

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA – PATOS DE MINAS
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ISABELA AKEMI CSISZER KOIZUMI

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO ÓPTICA QUE UTILIZA O MÉTODO
OFDM COM DETECÇÃO COERENTE**

Patos de Minas - MG
2018

ISABELA AKEMI CSISZER KOIZUMI

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO ÓPTICA QUE UTILIZA O MÉTODO
OFDM COM DETECÇÃO COERENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito para graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini

ISABELA AKEMI CSISZER KOIZUMI

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO ÓPTICA QUE UTILIZA O MÉTODO
OFDM COM DETECÇÃO COERENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito para graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Patos de Minas, 14 de dezembro de 2018

Banca Examinadora

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini – FEELT/UFU (Orientador)

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa – FEELT/UFU (Membro 1)

Prof.^a Dr.^a Karine Barbosa Carbonaro – FEELT/UFU (Membro 2)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia, em especial à Faculdade de Engenharia Elétrica, na qual tive a oportunidade realizar o curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Aos meus professores que, ao longo dos últimos cinco anos, compartilharam seus conhecimentos e experiências que me ajudaram a chegar onde estou. Em especial, ao professor Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini, meu orientador de Trabalho de Conclusão de Curso, e aos professores Dr. André Luiz Aguiar Costa e Dr.^a Karine Barbosa Carbonaro, que me auxiliaram a desenvolver o presente trabalho.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, com quem sempre compartilhei as alegrias e dificuldades da vida estudantil.

Aos meus pais, irmãos e familiares, que sempre me apoiaram e me incentivaram a seguir em frente com meus sonhos, que nunca me deixaram desistir.

E, finalmente, a Deus, que sempre me deu forças para seguir adiante, mesmo quando as dificuldades eram grandes e eu acreditava que não seria capaz.

RESUMO

Nas últimas décadas, a sociedade tem presenciado um crescente avanço das tecnologias e a área de telecomunicações é a mais influenciada por tal avanço. A necessidade de obter informações com maior velocidade e facilidade impulsiona o surgimento de novos dispositivos que mantêm as pessoas cada vez mais conectadas com o mundo. Tendo em vista essa demanda de estar sempre conectado, se torna necessário estudar diversos métodos de transmissão de dados, de modo a oferecer à sociedade serviços cada vez mais eficientes. O uso de sistemas ópticos vem crescendo nos últimos anos, pois eles oferecem uma transmissão de dados mais segura e rápida, dada a alta velocidade da luz usada na transmissão, além de permitir uma alta taxa de transmissão a longas distâncias, com menos perdas e erros. Fibras ópticas são mais imunes a interferências eletromagnéticas, quando comparadas às transmissões via cabos metálicos e espaço livre. Juntamente com os sistemas ópticos, é necessário aplicar alguma técnica para que a transmissão comporte múltiplos usuários neste sistema. Nesse sentido, uma técnica que tem se mostrado eficiente é a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM), a qual oferece transmissões de altas taxas por longas distâncias e com alta eficiência espectral. No domínio óptico, utiliza-se o OFDM com detecção coerente (CO-OFDM), o qual resulta em uma recepção de dados mais eficiente. Nesse contexto, este trabalho realiza um estudo sobre o desempenho do sistema CO-OFDM levando em consideração vários parâmetros de projeto do sistema, como por exemplo: número de portadoras OFDM, taxa de transmissão, formatos de modulação, distância do enlace e relação sinal-ruído óptica, dentre outras.

Palavras-chave: Sistemas ópticos. Alta taxa de transmissão. Longas distâncias. OFDM. Alta eficiência espectral. CO-OFDM.

ABSTRACT

In the last decades, society has witnessed a growing advancement of technologies and the telecommunications area is the most influenced by such advancement. The need to obtain information more quickly and easily drives the emergence of new devices that keep people increasingly connected to the world. In view of this demand to be always connected, it is necessary to study several methods of data transmission, in order to offer society increasingly efficient services. The use of optical systems has been growing in recent years, as they offer safer and faster data transmission, given the high speed of the light used in the transmission, as well as allowing a high rate of transmission over long distances, with fewer losses and errors. Optical fibers are more immune to electromagnetic interference, when compared to the transmissions via metallic cables and free space. Along with optical systems, it's needed to apply some technique for the transmission to support multiple users in this system. Then, one technique that has proved to be efficient is Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), which offers high rate transmissions over long distances and with high spectral efficiency. In the optical domain, OFDM with coherent detection (CO-OFDM) is used, which results in a more efficient data reception. In this context, this work performs a comprehensive study on the performance of the CO-OFDM system taking into consideration several system design parameters, such as: number of OFDM carriers, transmission rate, modulation formats, link distance and optical signal-noise ratio, among others.

Keywords: *Optical systems. High rate of transmission. Long distances. OFDM. High spectral efficiency. CO-OFDM.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de comunicação óptica genérico. Fonte: a autora.....	18
Figura 2 - Interferômetro ou Modulador de Mach-Zehnder. Fonte: a autora.....	19
Figura 3 - Curva de atenuação espectral de uma fibra monomodo. Fonte: [7]	21
Figura 4 - Ilustração da constelação do 64QAM. Fonte: [10].....	24
Figura 5 - Subportadoras de um sinal OFDM no domínio do tempo. Fonte: [12]	26
Figura 6 - Subportadoras de um sinal OFDM no domínio da frequência. Fonte: [12]	26
Figura 7 - Somatória das subportadoras no domínio do tempo. Fonte: [2].....	27
Figura 8 - Layout completo do sistema CO-OFDM analisado. Fontes: a autora, [14].....	30
Figura 9 - Bloco transmissor OFDM no domínio RF. Fonte: a autora.	31
Figura 10 - Conversor RF para óptico (RTO). Fonte: a autora.	31
Figura 11 - Enlace óptico (canal de transmissão). Fonte: a autora.	32
Figura 12 - Conversor óptico para RF (OTR). Fonte: a autora.	32
Figura 13 - Receptor OFDM no domínio RF. Fonte: a autora.	33
Figura 14 - Layout do receptor coerente utilizado. Fonte: a autora.....	35
Figura 15 - Relação OSNR x BER para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 48 Gbps.....	42
Figura 16 - Relação OSNR x EVM para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 48 Gbps.....	42
Figura 17 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	45
Figura 18 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	45
Figura 19 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	45
Figura 20 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	46

Figura 21 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	46
Figura 22 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	46
Figura 23 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	47
Figura 24 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	47
Figura 25 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	47
Figura 26 - Relação OSNR x BER para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 96 Gbps.....	48
Figura 27 - Relação OSNR x EVM para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 96 Gbps.....	49
Figura 28 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	50
Figura 29 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	51
Figura 30 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	51
Figura 31 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	51
Figura 32 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	52

Figura 33 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	52
Figura 34 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	52
Figura 35 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	53
Figura 36 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.....	53
Figura 37 - Relação OSNRxEVM para diferentes porcentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 512. Fonte: a autora.....	57
Figura 38 - Relação OSNRxEVM para diferentes porcentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 256. Fonte: a autora.....	57
Figura 39 - Relação OSNRxEVM para diferentes porcentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 128. Fonte: a autora.....	58
Figura 40 - Relação OSNRxEVM para diferentes porcentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 64. Fonte: a autora.....	58
Figura 41 - Relação OSNRxEVM para diferentes porcentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 32. Fonte: a autora.....	59
Figura 42 - Relação Distância x EVM para diferentes valores de OSNR. Fonte: a autora.	61
Figura 43 - Constelação utilizando 64 de 512 subportadoras, Fonte: a autora.....	63
Figura 44 - Constelação utilizando 512 de 512 subportadoras. Fonte: a autora.....	63
Figura 45 - Espectros ópticos para o segundo cenário, situação 1 (512 subportadoras máximas, com usos de 100%, 50%, 25% e 12,5%, respectivamente). Fonte: a autora.....	64
Figura 46 - Espectros ópticos para o segundo cenário, situação 1 (256 subportadoras máximas, com usos de 100%, 50%, 25% e 12,5%, respectivamente). Fonte: a autora.....	64
Figura 47 - Relação Ganho do amplificador óptico x EVM, quando o máximo de subportadoras é 512 e o uso é de 100%. Fonte: a autora.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisão do segundo cenário de acordo com a quantidade máxima de subportadoras e a porcentagem de uso	38
Tabela 2 - Posição das subportadoras escolhidas como símbolos pilotos	39
Tabela 3 - Valores de BER e EVM nos três formatos de modulação, considerando o primeiro cenário a uma taxa de 48 Gbps. Fonte: a autora.....	41
Tabela 4 - Valores de BER e EVM nos três formatos de modulação, considerando o primeiro cenário a uma taxa de 96 Gbps. Fonte: a autora.....	48
Tabela 5 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 512. Fonte: a autora .	55
Tabela 6 - - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 256. Fonte: a autora	55
Tabela 7 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 128. Fonte: a autora .	56
Tabela 8 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 64. Fonte: a autora ...	56
Tabela 9 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 32. Fonte: a autora ...	57
Tabela 10 - Dados referentes às simulações no terceiro cenário, relacionando os valores de OSNR com as distâncias percorridas pelo sinal óptico na fibra. Fonte: a autora.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APD	<i>Avalanche Photodiode</i>	Fotodiodo de Avalanche
B2B	<i>Back-to-back</i>	Transmissão sem fibra
BER	<i>Bit Error Rate</i>	Taxa de Erro de Bit
CO-OFDM	<i>Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal Óptica Coerente
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>	Transformada Discreta de Fourier
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>	Processador Digital de Sinais
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>	Magnitude do Vetor de Erro
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por Divisão de Frequência
FWM	<i>Four-wave Mixing</i>	Mistura de Quatro Ondas
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>	Chaveamento por Mudança de Frequência
I	<i>In-phase</i>	Sinal Fase da modulação QAM
ICI	<i>Inter-carrier Interference</i>	Interferência entre portadoras
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>	Transformada Discreta Inversa de Fourier
IR	<i>Infrared</i>	Infravermelho
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>	Interferência Intersimbólica
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>	Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação
LED	<i>Light Emission Diode</i>	Diodo Emissor de Luz
LP	<i>Low Pass Filter</i>	Filtro Passa-Baixa
MCM	<i>Multicarrier Modulation</i>	Modulação Multiportadora
MZM	<i>Mach Zehnder Modulator</i>	Modulador <i>Mach-Zehnder</i>
NRZ	<i>Non-return to Zero</i>	Sem retorno ao zero
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal
OSNR	<i>Optical Signal-to-noise Ratio</i>	Razão entre potência do sinal e ruído ópticos
OTR	<i>Optical to RF</i>	Óptico para RF

PIN	<i>Positive-Intrinsic-Negative</i>	Positivo-Intrínseco-Negativo
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>	Dispersão dos Modos de Polarização
PSK	<i>Phase-shift Keying</i>	Chaveamento por Mudança de Fase
Q	<i>Quadrature</i>	Sinal Quadratura da modulação QAM
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	Modulação da Amplitude em Quadratura
RF	Radiofrequência	
RTO	<i>RF to Optical</i>	RF para óptico
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>	Espalhamento Brillouin Estimulado
SER	<i>Symbol Error Rate</i>	Taxa de erro de símbolo
SPM	<i>Self Phase Modulation</i>	Automodulação de Fase
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>	Espalhamento Raman Estimulado
UV	Ultravioleta	
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>	Modulação de Fase Cruzada

LISTA DE SÍMBOLOS

V+	Representação para uma tensão elétrica positiva
V-	Representação para uma tensão elétrica negativa
λ	Comprimento de onda da luz
P _{out}	Potência óptica de saída
P _{in}	Potência óptica de entrada
L	Comprimento da fibra
dB/km	Decibéis por quilômetro: unidade de medida de atenuação da fibra óptica
nm	Nanômetro: unidade de medida usada para comprimento de onda
OH ⁻	Radical hidroxila
Si	Silício
T	Tempo de duração de um símbolo de modulação QAM
Gbps	Gigabits por segundo: Taxa de bits
GHz	Giga-hertz: frequência na faixa de 10 ⁹ Hz
THZ	Tera-hertz: frequência na faixa de 10 ¹² Hz
dB	Decibel: unidade de medida de potência em escala logarítmica
km	Quilômetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivos Gerais	16
1.1.2. Objetivos Específicos.....	16
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
1.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	17
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1. SISTEMA DE TRANSMISSÃO ÓPTICA.....	18
2.1.1. Parâmetros da Fibra Óptica	20
2.2. MODULAÇÃO DIGITAL.....	24
2.3. INTRODUÇÃO AO OFDM.....	25
2.3.1. Conceitos Básicos do OFDM	25
2.3.2. OFDM Coerente Óptico (CO-OFDM).....	27
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1. MÉTODOS DE PESQUISA.....	29
3.2. MATERIAL DE PESQUISA.....	29
3.2.1. Cenário 1	36
3.2.2. Cenário 2	37
3.2.3. Cenário 3	39
3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. CENÁRIO 1	41
4.1.1. 48 Gbps	41
4.1.2. 96 Gbps	48
4.2. CENÁRIO 2.....	53
4.3. CENÁRIO 3.....	59
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO E TRABALHOS FUTUROS.....	62
5.1. CONCLUSÕES.....	62
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	66
5.3. CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	66
REFERÊNCIAS	67

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Desde muito tempo, os seres humanos têm a necessidade de se comunicarem, seja por gestos, desenhos, fala ou escrita, sempre com a intenção de transmitir informações para outras pessoas. Com as revoluções industriais, o surgimento de novas tecnologias permitiu que fossem desenvolvidas técnicas de comunicação que alcançassem longas distâncias, como é o caso do telégrafo elétrico, muito utilizado em guerras para transmitir mensagens e informações em código Morse entre integrantes da mesma tropa. A partir disto, outras tecnologias foram surgindo, como os telefones, os computadores, os rádios, entre outros [1].

Os meios de transmissão das informações utilizando a tecnologia também evoluíram com o tempo. Antes, utilizava-se o espaço livre como meio de transmissão, sendo que as mensagens são enviadas por radiação de sinais eletromagnéticos. Depois, passou-se a utilizar cabeamento metálico para transmitir sinais elétricos [1]. Há alguns anos, começou-se a aprofundar os estudos sobre fibra óptica como meio de transmissão, utilizando a luz como portadora da informação.

Com o desenvolvimento das comunicações ópticas foi possível realizar grandes melhorias nas telecomunicações. Sistemas ópticos mais recentes permitem altas taxas de transmissão (podem chegar à faixa de gigabits por segundo, dependendo do sistema) e transmissão mais confiável (menor taxa de erros), uma vez que a luz é imune a interferências eletromagnéticas externas. Além disso, a comunicação óptica por fibra é capaz de realizar transmissões a longas distâncias sem que seja necessário utilizar muitos amplificadores e regeneradores de sinais, ao contrário da transmissão por cabos elétricos (estes estão mais sujeitos a interferências externas, o que produz muitos ruídos) [2].

Os estudos envolvendo as telecomunicações em geral incluem as técnicas de transmissão e recepção, que são responsáveis por tratar a mensagem que se deseja transmitir e recuperar a mensagem após a transmissão. Como será visto mais à frente, durante esse processo de transmissão é preciso modular o sinal mensagem (mudar seu domínio de elétrico para óptico), multiplexar, transmitir, amplificar (se necessário), receber, demultiplexar, converter novamente para o domínio elétrico e demodular o sinal para obter a informação desejada.

O presente trabalho tem como tema um sistema de comunicação óptica que faz uso da técnica OFDM com detecção coerente com o objetivo de melhorar a eficiência espectral do sistema. Serão mostrados como ocorrem todos os processos envolvidos na transmissão de dados por este sistema. A escolha do tema a ser estudado foi feita baseada na seguinte hipótese: o sistema CO-OFDM (*Coherent Optical OFDM*) pode apresentar alta eficiência na multiplexação

das subportadoras e na recepção do sinal. Esta hipótese será o guia para o desenvolvimento do presente trabalho, e serão considerados diversos parâmetros de comparação para verificar se tal proposição é verdadeira.

Além disso, ao estudar o tema proposto, surge o seguinte questionamento: quais as principais características e vantagens de um sistema óptico que utiliza modulação OFDM coerente? Qual a sua aplicabilidade em sistemas reais de comunicação? Conforme os estudos e as pesquisas se desenvolverem, será possível identificar e responder cada um dos pontos questionados.

Como dito anteriormente, a sociedade está sempre em busca de melhores maneiras de se comunicar, tentando sempre aproximar pessoas distantes e possibilitar maior acesso às informações. Com isso, o presente trabalho se faz importante por realizar um estudo sobre uma técnica que promete maior eficiência para as telecomunicações, atendendo, assim, às necessidades do mundo moderno.

Neste capítulo, serão definidas algumas características importantes do trabalho que será desenvolvido, com o intuito de contextualizar o leitor a respeito do assunto estudado. Serão definidos o tema, os objetivos, as justificativas e outros aspectos acerca do trabalho.

1.1. OBJETIVOS

O trabalho escolhido consiste na análise da simulação de um sistema CO-OFDM, utilizando o *software OptiSystem* [3]. Seu desenvolvimento foi motivado pela proposta de trazer melhorias aos atuais sistemas de comunicação, de modo a aumentar a eficiência e a velocidade da comunicação, sem acarretar altos custos de desenvolvimento, implementação e manutenção.

1.1.1. Objetivos Gerais

O trabalho tem como objetivo geral estudar o desempenho da técnica de transmissão CO-OFDM, levando em consideração as características e os conceitos levantados pelos fundamentos teóricos, de modo a compreender o funcionamento de cada parte do sistema utilizando a simulação.

1.1.2. Objetivos Específicos

A partir de um sistema CO-OFDM, serão realizadas simulações com a finalidade de analisar alguns parâmetros importantes para este sistema: o tipo de modulação digital, a OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*, ou Relação Sinal-Ruído Óptico), a quantidade de subportadoras, a taxa de bits e a distância do enlace. Ao fim das simulações, será possível concluir quais são os melhores valores para estes parâmetros a partir de gráficos comparativos e imagens das constelações que mostram o desempenho do sistema na recepção do sinal.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho será dividido, basicamente, em cinco capítulos: o Capítulo 1 apresenta as considerações iniciais do trabalho, como o tema, motivações (problematização e hipóteses) e objetivos; o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica acerca do trabalho, organizando os conceitos básicos de comunicações ópticas, de modulação digital e de OFDM, além de mostrar como é composto um sistema CO-OFDM; o Capítulo 3 descreve o objeto de estudo deste trabalho, um sistema CO-OFDM, detalhando o funcionamento de cada parte do sistema, como serão feitas as simulações e o que é utilizado para fazê-las; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pelos experimentos e simulações realizados; o Capítulo 5 reúne as conclusões acerca dos resultados obtidos, de modo a destacar a eficiência do sistema, e informa quais as contribuições que este trabalho traz e quais os trabalhos futuros que o autor pretende realizar baseado neste trabalho.

1.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o tema proposto e os objetivos esclarecidos no presente capítulo, bem como o detalhamento da organização do trabalho, o Capítulo 2 apresentará o referencial teórico acerca do assunto, para que o leitor tenha um embasamento teórico que facilitará compreender os futuros estudos a serem realizados sobre o sistema CO-OFDM. Como dito anteriormente, o Capítulo 2 reúne os conceitos básicos sobre sistemas de comunicações ópticas, modulação digital, OFDM e CO-OFDM.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

Para que se possa compreender o funcionamento do sistema CO-OFDM (*Coherent Optical OFDM*), é necessário, primeiramente, ter conhecimento básico a respeito de comunicações ópticas e multiplexação OFDM com foco em OFDM coerente. Neste capítulo, serão descritos os aspectos gerais desses conceitos básicos presentes no sistema em análise, a fim de contextualizar o assunto tratado.

2.1. SISTEMA DE TRANSMISSÃO ÓPTICA

Com o avanço das telecomunicações, foram surgindo novas ideias e tecnologias importantes para o aprimoramento dos meios de comunicação. A necessidade de transmitir dados com maior taxa foi um dos requisitos importantes para que fosse cogitada a utilização de fibras ópticas como meio de transmissão de informações. Atualmente, os sistemas ópticos têm sido usados cada vez mais, dada a sua efetividade em transmitir e receber dados com alta confiabilidade.

Um sistema de transmissão óptica é composto por três partes básicas: um transmissor, um canal de comunicação e um receptor. A Figura 1 ilustra o esquemático de um sistema óptico genérico [2].



Figura 1 - Sistema de comunicação óptica genérico. Fonte: a autora.

Em telecomunicações, as comunicações ópticas são classificadas em guiadas e não-guiadas. O primeiro termo refere-se ao sistema no qual o feixe de luz emitido na transmissão fica espacialmente confinado, o que é realizado, em termos práticos, pela fibra óptica. Já a não-guiada ocorre em espaço livre [2]. Para o presente trabalho, será considerada apenas a teoria referente à comunicação óptica guiada.

A primeira parte do sistema de comunicação óptico guiado é o transmissor óptico, que utiliza uma fonte de luz, sendo as fontes mais comuns o *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) e o *LED* (*Light Emission Diode*). A geração de um sinal

óptico deve passar por um processo de modulação, que pode ser direta ou externa. A direta ocorre quando a corrente de alimentação da fonte sofre variações de acordo com os sinais e símbolos que se deseja transmitir. Já a externa é feita por um dispositivo externo capaz de variar a intensidade do sinal óptico [2].

Para a modulação externa, normalmente se utiliza um dispositivo conhecido como interferômetro (ou modulador) de *Mach-Zehnder* (MZM, *Mach-Zehnder Modulator*), ilustrado na Figura 2. A entrada do dispositivo consiste no sinal da portadora, o qual normalmente é um laser com onda contínua. As entradas V+ e V- representam o sinal elétrico que contém a mensagem a ser enviada e que será convertida para o domínio óptico utilizando o efeito eletroóptico do material que constitui o MZM. Tal efeito faz com que o sinal elétrico cause pequenas variações no índice de refração do MZM, o que resulta na variação da amplitude do sinal óptico [2]. Também pode ser utilizado outro tipo de modulador, como um modulador de eletroabsorção [4]. Após modulado, o sinal segue pela saída do dispositivo para ser transmitido pelo canal óptico.

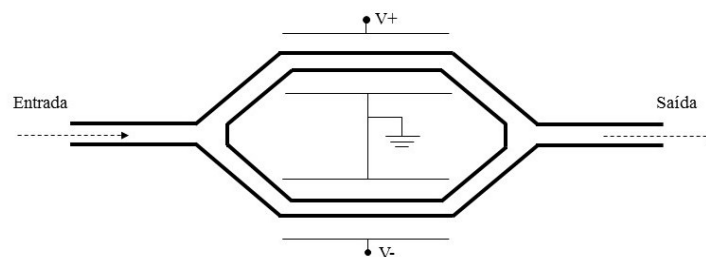


Figura 2 - Interferômetro ou Modulador de Mach-Zehnder. Fonte: a autora.

Para a recepção do sinal óptico, normalmente utiliza-se como dispositivos receptores os fotodetectores PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) ou APD (*Avalanche Photodiode*). Quando o sistema comporta uma alta taxa de transmissão, o APD é o mais adequado devido ao alto ganho que oferece, quando comparado ao PIN. Porém, devido à sua complexidade, o APD é um dispositivo de maior custo e com maior ruído, sendo necessário estudar sua aplicação para verificar sua viabilidade [2].

Em relação ao canal de transmissão, utiliza-se a fibra óptica, um guia de ondas dielétrico que opera na frequência óptica, para transportar dados modulados em luz ao longo do seu eixo. Seu uso em telecomunicações permite que uma grande quantidade de dados seja enviada por longas distâncias, além de apresentar imunidade a interferências eletromagnéticas e baixas perdas de potência do sinal transmitido, quando comparada a outros meios de comunicação (cabos de par metálico, cabos coaxiais, entre outros). Com isso, é possível transmitir dados

multimídia (telefone, Internet, televisão, entre outros) simultaneamente e de maneira mais eficaz. Caso o sistema apresente alguma perda de potência óptica, principalmente devido à distância da transmissão, utilizam-se amplificadores ópticos de modo a aumentar o alcance [2].

2.1.1. Parâmetros da Fibra Óptica

O projeto de um sistema de transmissão óptica eficiente deve levar em consideração alguns parâmetros relacionados à fibra, de modo a evitar que ocorram perdas durante a propagação ou erros na recepção do sinal, além de determinar a quantidade de usuários que poderão ser atendidos por este sistema. Portanto, tais parâmetros são utilizados para determinar as vantagens e as limitações do sistema. Os parâmetros da fibra se dividem em dois grupos básicos: estruturais e de transmissão, que definem as condições para a realização da transmissão. [5]

Os parâmetros estruturais referem-se à geometria da fibra. Dentre todos os parâmetros existentes, os que se destacam são [5]:

- Perfil de índice de refração (diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca), o qual permite fibras com diferentes dispersões;
- Tamanho do núcleo e da casca, responsáveis por determinar o tipo de transmissão (monomodo ou multimodo);
- Área efetiva da fibra, onde o sinal luminoso a ser transmitido irá incidir;
- Índices de refração do núcleo e da casca da fibra;
- Abertura numérica, ângulo máximo que um feixe de luz pode ter ao incidir na fibra, em relação ao eixo central desta, para que o feixe consiga realizar as reflexões necessárias para a propagação na fibra. Essa abertura é utilizada para indicar o número de feixes que o núcleo permite entrar em uma transmissão óptica;
- Comprimento de onda de corte, o qual define que a fibra é monomodo.

Já os parâmetros de transmissão são, normalmente, os principais fatores limitantes para as comunicações ópticas de longo alcance. Dentre estes fatores, existem os efeitos que se dividem em lineares e não-lineares, sendo os lineares mais fáceis de evitar que os não-lineares. Os principais efeitos lineares são: atenuação, dispersão cromática e perdas intrínsecas e extrínsecas. Dos efeitos não-lineares, citam-se: *Four-wave Mixing* (FWM), *Self-phase Modulation* (SPM), *Cross-phase Modulation* (XPM), *Stimulated Raman Scattering* (SRS) e *Stimulated Brillouin Scattering* (SBS) [2].

Atenuação

Este fator é considerado um dos mais limitantes de uma fibra, pois ele determina qual deve ser a distância máxima entre um transmissor e um receptor óptico. Considerando que dispositivos repetidores (os quais regeneram, amplificam e retransmitem o sinal óptico) têm altos custos de fabricação, instalação e manutenção, pode-se dizer que a atenuação é um parâmetro que atribui altos custos ao sistema, visto que quanto maior for a distância do enlace, mais dispositivos repetidores deverão ser utilizados [2]. Uma alternativa ao uso de repetidores são as redes totalmente ópticas, que não fazem o processo de conversão óptico-elétrico-óptico no meio do enlace. Assim, processos de amplificação e processamento do sinal, por exemplo, podem ser feitos diretamente no domínio óptico, o que diminuiu significativamente os altos custos das redes ópticas de longo alcance [6].

As perdas por atenuação dependem do comprimento de onda da luz (λ) e do material que constitui a fibra [2]. A Figura 3 representa essa relação em uma fibra monomodo, indicando as duas faixas de comprimentos de onda para as quais as perdas por atenuação são menores: 1300 nm e 1550 nm. Assim, essas são as principais faixas de comprimentos de ondas usadas em enlaces de longo alcance.

O cálculo da atenuação é feito pela razão entre as potências ópticas de saída (P_{out}) e de entrada (P_{in}), considerando ainda o comprimento da fibra (L). Desse modo, encontra-se o valor de atenuação, α , em decibéis por quilômetro (dB/km). A Equação (1) define o cálculo descrito.

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (1)$$

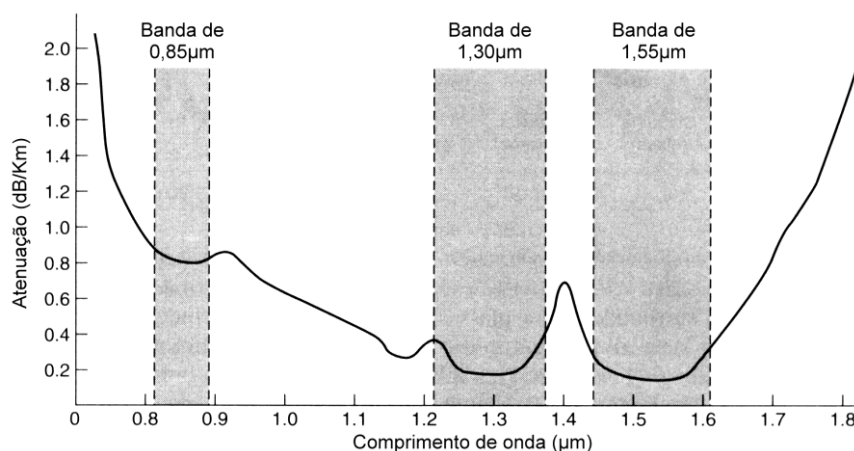


Figura 3 - Curva de atenuação espectral de uma fibra monomodo. Fonte: [7]

Um ponto importante a ser ressaltado é que a atenuação não é influenciada pela largura de banda nem pela modulação utilizada. Ela é produzida devido a outros efeitos, conhecidos como perdas intrínsecas e extrínsecas.

As perdas intrínsecas são perdas que ocorrem devido ao processo de fabricação da fibra. As causas mais conhecidas de perdas intrínsecas são [2]:

- Perdas devidas ao processo de fabricação, inerentes à fibra (geralmente são algumas imperfeições, como pequenas rugosidades ou variações no raio da fibra, as quais são impossíveis de evitar);
- Absorção de raios Ultravioleta (UV) e Infravermelho (IR), que definem as bandas de comprimento de onda consideradas ótimas para transmissão;
- Reflexão de Fresnel, cuja causa é a mudança abrupta do índice de refração na região de emenda da fibra;
- Espalhamento de Rayleigh, causada pela presença de partículas estranhas na fibra, nas quais a luz colide e, conseqüentemente, é espalhada;
- Absorção por impurezas, uma das principais causas de atenuação de fibras, sendo a impureza mais comum a molécula de hidroxila (radical OH^-). Este é um resíduo que permanece na fibra mesmo havendo diversas técnicas de fabricação que buscam deixar o material da fibra o mais puro possível. Esta impureza tem absorção fundamental em 2700 nm, e seus harmônicos resultam em três picos de absorção nos comprimentos de 1383 nm, 1250 nm e 950 nm, que coincidem com as três janelas típicas de operação, destacadas na Figura 3.

Enquanto as perdas intrínsecas estão relacionadas a irregularidades de menores dimensões presentes na fibra, as perdas extrínsecas se referem irregularidades macroscópicas, como curvaturas, emendas e tensões mecânicas nas fibras, além da temperatura do ambiente na qual elas são submetidas. Estas perdas, somadas às intrínsecas, resultam em maior perda de potência óptica ao longo da transmissão [2].

Dispersão

Este é um fator limitante da capacidade de transmissão de dados. A dispersão é o parâmetro da fibra que causa o espalhamento temporal do pulso óptico. Isto porque os diversos componentes espectrais (modos de propagação) que se propagam na fibra apresentam velocidades de propagação diferentes e, por consequência, cada um deles chega à saída da fibra em tempos distintos. Portanto, a capacidade de transmissão é limitada porque os pulsos acabam sendo distorcidos e alargados no processo de transmissão e, no final, estão sobrepostos e o

receptor não consegue distingui-los. Algumas consequências da dispersão são perda de largura de banda e redução do alcance e, devido ao seu efeito acumulativo, quanto mais longa a distância do enlace, maior é o efeito da dispersão na recepção do sinal [2].

Existem três tipos de dispersão: modal, cromática e dos modos de polarização (PMD) [2].

- Dispersão modal: como dito anteriormente, os modos de propagação apresentam diferentes velocidades e caminhos de propagação, o que resulta em atrasos do sinal na saída da fibra.
- Dispersão cromática: ocorre devido à variação do índice de refração de acordo com o valor do comprimento de onda do sinal. É resultado da dispersão do material e do guia de onda (tanto o material quanto a geometria da fibra influenciam na dispersão cromática).
- PMD: é caracterizado por um fenômeno denominado birrefringência, que é a diferença entre os índices efetivos de dois modos de propagação ortogonais. Isto ocorre porque a fibra, na prática, não é perfeitamente simétrica, visto que a fibra é perturbada por defeitos decorrentes da fabricação (microcurvaturas, diâmetro variável, entre outros fatores). Estas perturbações resultam em diferentes constantes de propagação para cada modo e, por consequência, ocorre a variação do índice de propagação efetivo para cada modo. Com isso, os modos se dispersam, chegando ao final da fibra em intervalos de tempo diferentes. A PMD se torna mais crítica conforme a taxa de transmissão e com o comprimento da fibra [2].

Efeitos não-lineares

Estes efeitos se tornam mais evidentes para potências maiores. Alguns autores ainda defendem que sistemas com altas taxas de transmissão também são afetados pelos efeitos não-lineares, algo que não foi realmente comprovado. Para esta hipótese, quando o sistema pretende atender uma alta taxa de transmissão, os efeitos não-lineares são os principais fatores limitantes. Além disso, deve-se considerar que estes efeitos surgem de variações que dependem da intensidade do campo elétrico, cuja variação causa alterações no índice de refração da fibra [2].

Os efeitos não-lineares são divididos em, basicamente, duas categorias: os que resultam do conhecido efeito Kerr, que é a consequência da dependência do índice de refração da fibra com a intensidade do campo aplicado; e os que são produzidos por difração da fibra, quando as vibrações moleculares da sílica (Si, principal componente da fibra) no núcleo causam o espalhamento não-linear do campo elétrico. A primeira categoria abrange os efeitos de Auto Modulação de Fase (SPM), Modulação de Fase Cruzada (XPM) e Mistura de Quatro Ondas

(FWM). Já a segunda categoria inclui os Espalhamentos Raman e Brillouin Estimulados (respectivamente, SRS e SBS) [2].

2.2. MODULAÇÃO DIGITAL

A modulação digital é um passo muito importante que deve ser realizado antes da aplicação do OFDM e da modulação óptica. Esse é o processo que consiste em transformar o sinal analógico em um sinal digital, composto basicamente por bits. Existem diversos tipos de modulação digital, dentre elas o PSK (*Phase Shift Keying*), o FSK (*Frequency Shift Keying*) e o QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Este último será o utilizado no desenvolver do presente trabalho [8].

Na modulação QAM, o sinal gerado é dividido em símbolos compostos por determinado número de bits. Os símbolos são mapeados em um diagrama que considera a fase e a quadratura, de modo que cada um deles tenha uma distância específica da origem do diagrama, o que representa a sua amplitude [9]. O diagrama de mapeamento do QAM é conhecido como constelação e, normalmente, tem o formato quadrado, com os pontos que representam os símbolos dispostos um ao lado do outro com uma distância padronizada.

O QAM pode ser classificado de acordo com a quantidade de bits por símbolos que se deseja modular, sendo os mais comuns o 4QAM, o 16QAM, o 64QAM e o 256QAM, que utilizam, respectivamente, dois, quatro, seis e oito bits por símbolo. Essas variações do QAM resultam em constelações na forma de um quadrado, cujos símbolos estão dispostos a uma distância padrão entre si. A Figura 4 ilustra a constelação do 64QAM, na qual é possível perceber que a distância entre dois símbolos consecutivos é sempre a mesma.

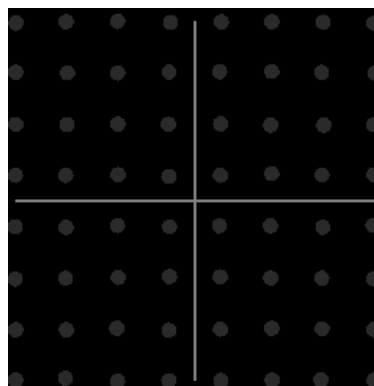


Figura 4 - Ilustração da constelação do 64QAM. Fonte: [10]

O eixo horizontal é o eixo da fase (representado por I, que indica *In-phase*) e o eixo vertical é o de quadratura (representado por Q, que indica *Quadrature*). Os cálculos envolvidos na determinação dos valores I e Q de cada símbolo e a forma de codificação dos mesmos é muito extensa e complexa, e não serão abordadas no presente trabalho [9].

Em relação à quantidade de símbolos utilizados no QAM, quanto mais símbolos forem utilizados, maior será a taxa de transmissão da modulação, pois cada símbolo comporta mais bits. Porém, a grande quantidade de símbolos faz com que eles fiquem mais próximos na constelação, o que pode gerar erros na detecção do sinal [9]. Esta informação será de grande importância para os procedimentos a serem realizados durante o desenvolvimento do presente trabalho.

2.3. INTRODUÇÃO AO OFDM

Com o avanço das comunicações digitais, é de grande importância desenvolver técnicas que supram as necessidades das pessoas de maneira eficiente. A técnica OFDM foi desenvolvida com o intuito de aumentar a capacidade de tecnologias no domínio de RF (Radiofrequência) que necessitam de altas taxas de transmissão. Um exemplo de tecnologia é a TV Digital. Nas comunicações ópticas esta técnica também vem sendo utilizada, como será mostrado mais adiante no presente trabalho [2].

2.3.1. Conceitos Básicos do OFDM

A técnica OFDM é um tipo de modulação multiportadora (em inglês, *Multicarrier Modulation*, MCM) que consiste em uma multiplexação por divisão de frequências cujas subportadoras são ortogonais entre si e têm menor taxa de transmissão de dados [2]. A modulação e a demodulação, normalmente, requerem conjuntos de osciladores coerentes, tornando o processo complexo e caro, principalmente quando se considera que a quantidade de subportadoras é elevada. Para simplificar, esses processos são realizados utilizando, respectivamente, IDFT (sigla em inglês para Transformada Discreta de Fourier Inversa) e DFT (sigla em inglês para Transformada Discreta de Fourier) [11].

Essa técnica de transmissão surgiu como uma evolução da técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*), a qual utilizava bandas de guarda para separar as subportadoras na recepção do sinal. No caso do OFDM, como dito anteriormente, é feita uma sobreposição espectral das subportadoras, de modo que elas fiquem ortogonais entre si. Isso resulta em uma

economia significativa de banda, quando comparada à técnica FDM tradicional [11]. A Figuras 5, 6 e 7 ilustram, respectivamente, como é um conjunto de subportadoras OFDM genéricas nos domínios do tempo e da frequência, bem como a sobreposição das mesmas no domínio do tempo.

Utilizando o OFDM, a transmissão dos dados é feita em paralelo por meio das diversas subportadoras com modulação da amplitude em quadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) ou por deslocamento de fase (PSK, *Phase-Shift Keying*), além das taxas de transmissão de cada subportadora ser de dimensão inversamente proporcional à quantidade de subportadoras utilizadas, ou seja, quanto mais subportadoras, menor a taxa de transmissão. Quando há redução da taxa de transmissão (maior duração dos símbolos transmitidos em cada subportadora), ocorre uma diminuição da sensibilidade à dispersão no tempo [11].

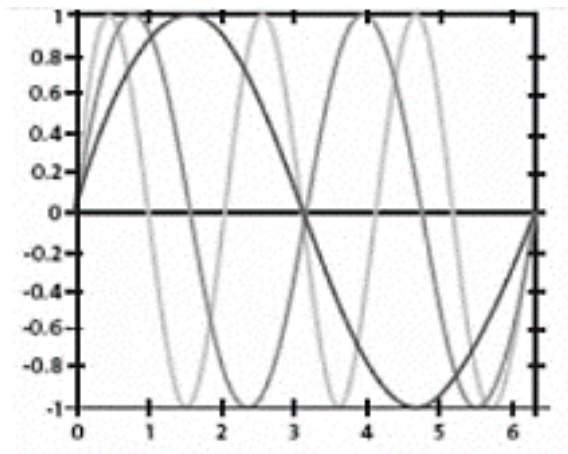


Figura 5 - Subportadoras de um sinal OFDM no domínio do tempo. Fonte: [12]

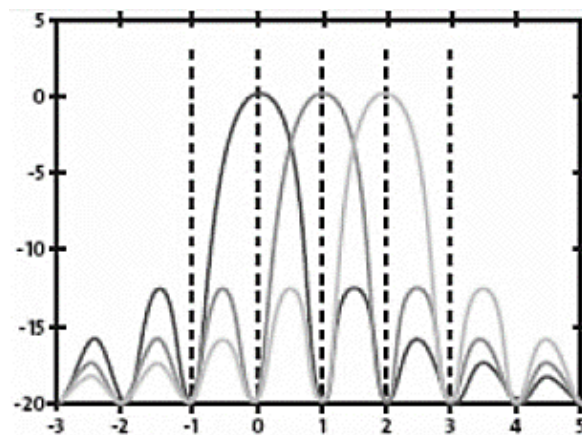


Figura 6 - Subportadoras de um sinal OFDM no domínio da frequência. Fonte: [12]

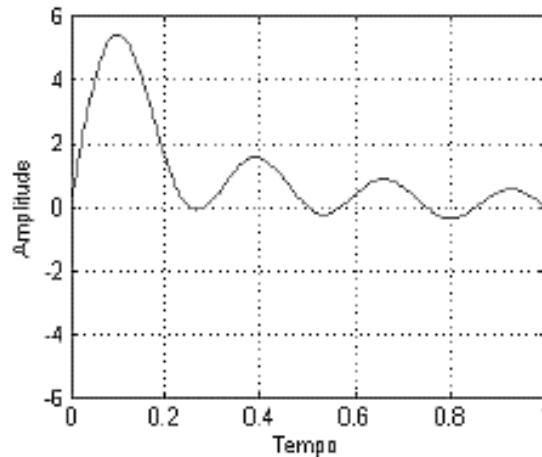


Figura 7 - Somatória das subportadoras no domínio do tempo. Fonte: [2]

Quando se utiliza a modulação QAM, o espectro de um pulso apresenta a forma da função $\text{sinc}(fT)$, como é visto na Figura 6, na qual as subportadoras sobrepostas são representadas por essa função. Os cruzamentos de zeros ocorrem em pontos múltiplos de $1/T$, sendo T a duração de um símbolo na modulação QAM. Analisando-se a Figura 6, percebe-se que o espaçamento entre as subportadoras é feito de forma que cada uma seja colocada exatamente nos pontos de cruzamento de zero do espectro das demais subportadoras, resultando na não interferência entre elas [11].

Mesmo ocorrendo uma sobreposição dos espectros das subportadoras, é possível isolar as informações carregadas por cada uma utilizando um filtro casado (ou correlator) adequado, cuja saída corresponde à projeção do sinal OFDM recebido sobre a subportadora que está associada a ele, quando se admite sincronização de relógio. Essa projeção depende apenas da informação que esta subportadora conduz, sendo nulas as projeções das outras subportadoras, o que significa que existe a ortogonalidade devido ao espaçamento de frequência adotado. Porém, a ortogonalidade dos subcanais na recepção depende da centralização das subportadoras nas frequências respectivas de cada subcanal, além de ser necessária a sincronização de relógio [11].

2.3.2. OFDM Coerente Óptico (CO-OFDM)

Este tipo específico de OFDM apresenta diversas vantagens em relação ao OFDM comum, visto que, de acordo com Shieh e Djordjevic (2010), “representa a melhor performance na sensibilidade do receptor, maior eficiência espectral e robustez contra dispersão por polarização, porém requer a mais alta complexidade em design de transceptores” [4].

O CO-OFDM tem dois princípios importantes [4]:

- O OFDM traz ao sistema coerente eficiência computacional, devido à facilidade em estimar o canal e a fase;
- O sistema coerente oferece mais linearidade na conversão de RF para óptico (RTO) e de óptico para RF (OTR).

Um sistema CO-OFDM apresenta um bloco de detecção coerente, o qual necessita de um oscilador óptico local. Este oscilador produz um sinal óptico que interfere com o sinal recebido, e esta interferência incide sobre o fotodetector, resultando em um sinal elétrico produzido por ele. Existem dois tipos de detecção coerente: a heteródina, na qual o oscilador local tem frequência diferente da frequência de transmissão, e a homódina, em que o oscilador e o *LASER* de transmissão estão na mesma frequência [13]. No presente trabalho, será considerada a detecção coerente homódina, como será apresentado mais adiante na descrição completa do sistema adotado como objeto de estudo.

A detecção coerente é feita baseada no tipo de modulação digital aplicada no sistema. Isto porque a detecção deve considerar a fase do sinal transmitido para que a sua detecção seja a mais correta possível [8]. No sistema em estudo, a detecção será baseada na modulação QAM e, como será visto mais adiante, o tipo de QAM também será importante na detecção do sinal.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um sistema OFDM óptico genérico pode ser dividido em, basicamente, cinco grandes blocos funcionais [4]:

1. Transmissor OFDM RF;
2. Conversor RTO;
3. Canal óptico;
4. Conversor OTR;
5. Receptor OFDM RF.

Levando isto em consideração, o Capítulo 3 irá descrever cada um destes cinco grandes blocos, indicando os componentes de cada bloco e suas funções. Também irá descrever todas as etapas do sistema, mostrando como ocorre a transmissão e recepção do sinal. O Capítulo 3 também explica como serão feitos os procedimentos de simulação do sistema, qual o *software* utilizado para realizar as simulações e qual o tipo de análise será feito.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo detalhar quais os tipos de pesquisas que se aplicam ao presente trabalho, bem como citar qual a ferramenta utilizada, o objeto de estudo e suas características e o que se pretende realizar em experimentos futuros.

3.1. MÉTODOS DE PESQUISA

Neste trabalho, serão desenvolvidos dois tipos de pesquisas:

- Referencial teórico: etapa onde será tratado todo o embasamento teórico a partir de materiais já existentes acerca dos sistemas OFDM ópticos coerentes, permitindo entender o funcionamento do sistema que será estudado;
- Simulações: serão realizados testes de simulação em *software* específico para sistemas de comunicações ópticas, o *Optisystem*®, de modo a estudar todos os parâmetros do sistema e entender como é feita a modulação OFDM, a transmissão, a recepção e a demodulação dos dados.

A partir do momento que se entende todas as partes do sistema, será possível realizar alterações em alguns parâmetros específicos, permitindo analisar os resultados e compará-los entre si. Com os resultados obtidos, pretende-se listar quais são as características positivas e negativas do sistema em questão, bem como verificar se há vantagens na aplicação desse sistema.

3.2. MATERIAL DE PESQUISA

O sistema a ser estudado é um sistema de comunicação óptico que faz uso da técnica OFDM com detecção coerente como método de transmissão por multiportadoras. O esquema do sistema a ser analisado, utilizando o *OptiSystem*® como *software* de simulação para sistemas ópticos, é ilustrado na Figura 8. O sistema foi dividido em cinco grandes blocos, que correspondem a cada etapa do enlace de comunicação, os quais são ilustrados pelas Figuras 9 a 13, de modo a permitir analisar cada componente com mais detalhes.

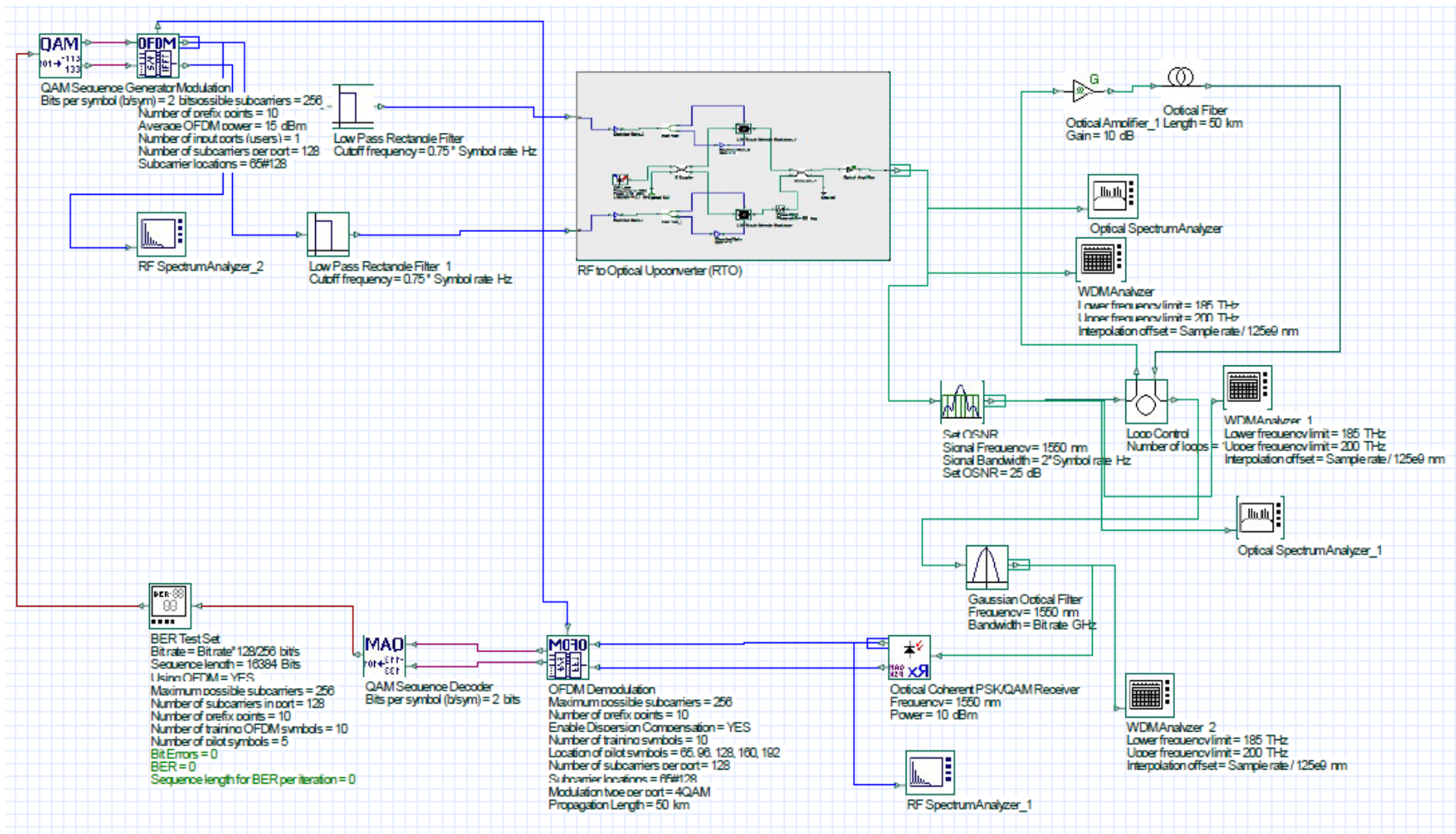


Figura 8 - Layout completo do sistema CO-OFDM analisado. Fontes: a autora, [14]

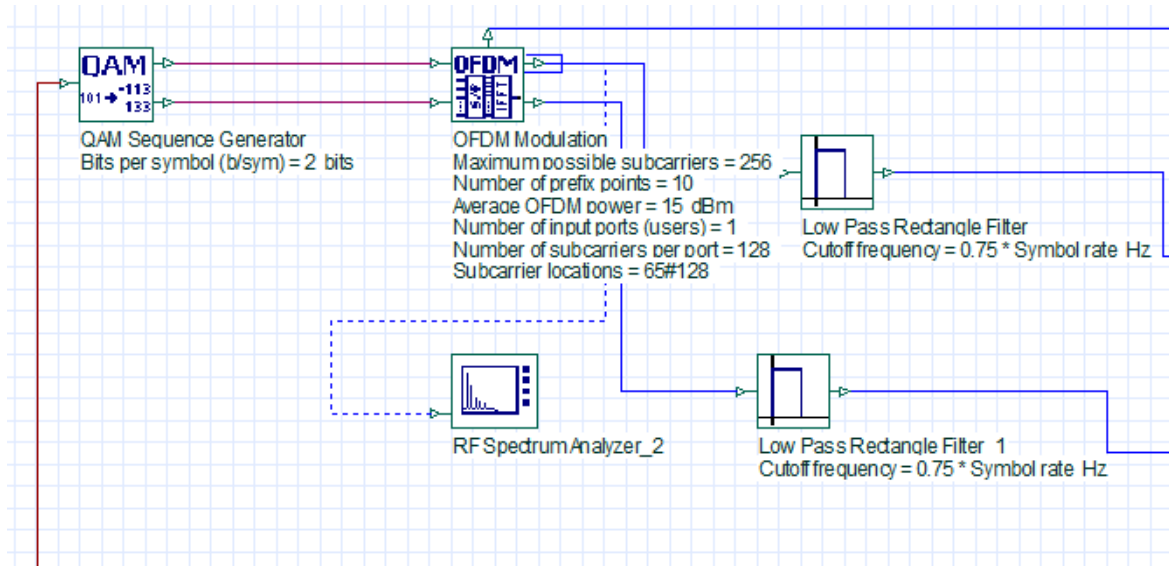


Figura 9 - Bloco transmissor OFDM no domínio RF. Fonte: a autora.

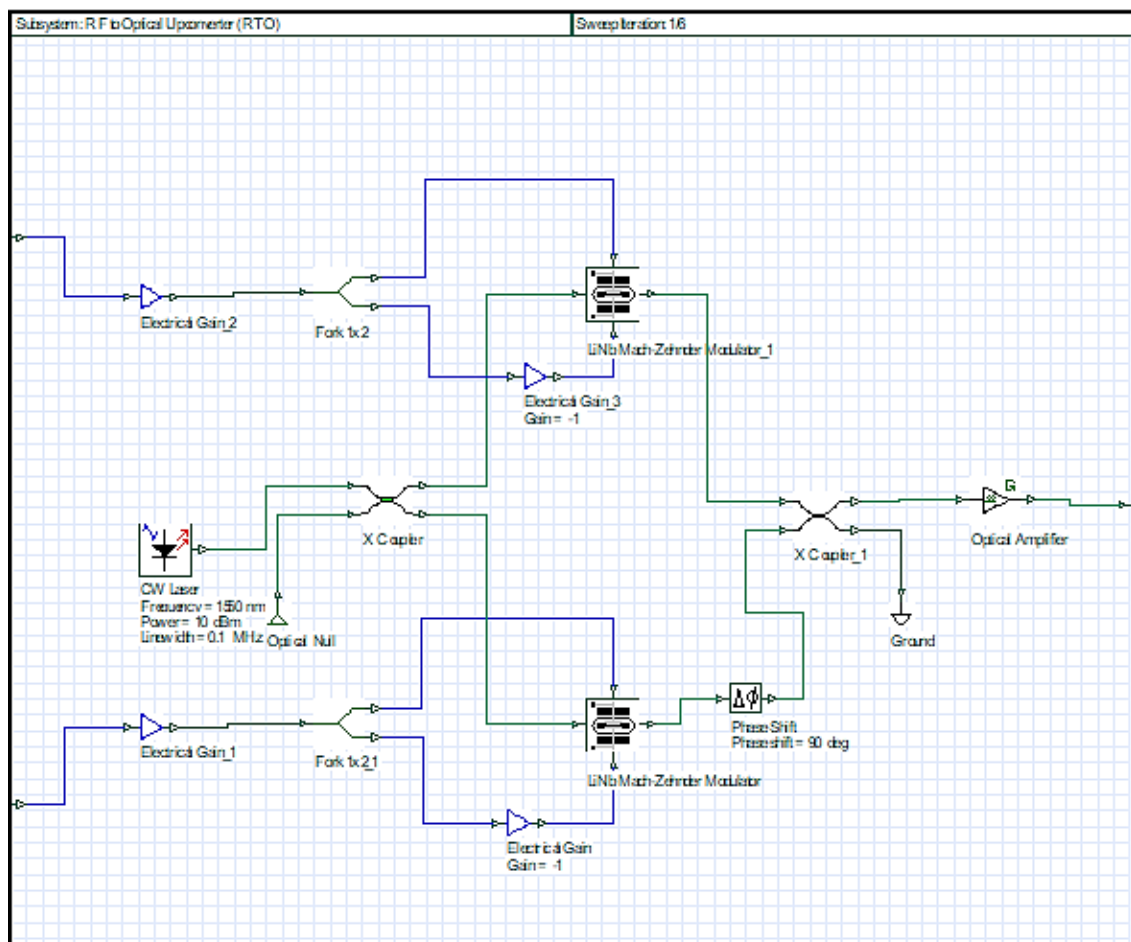


Figura 10 - Conversor RF para óptico (RTO). Fonte: a autora.

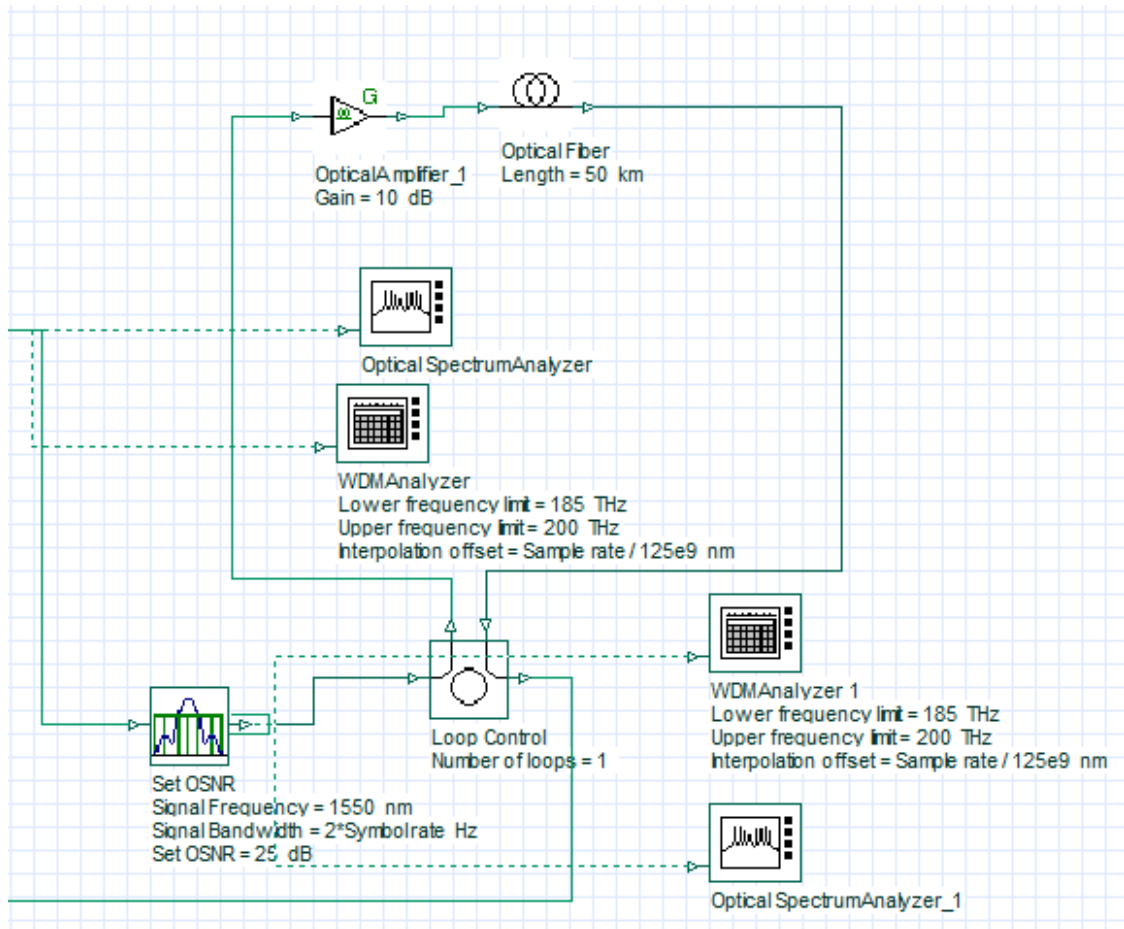


Figura 11 - Enlace óptico (canal de transmissão). Fonte: a autora.

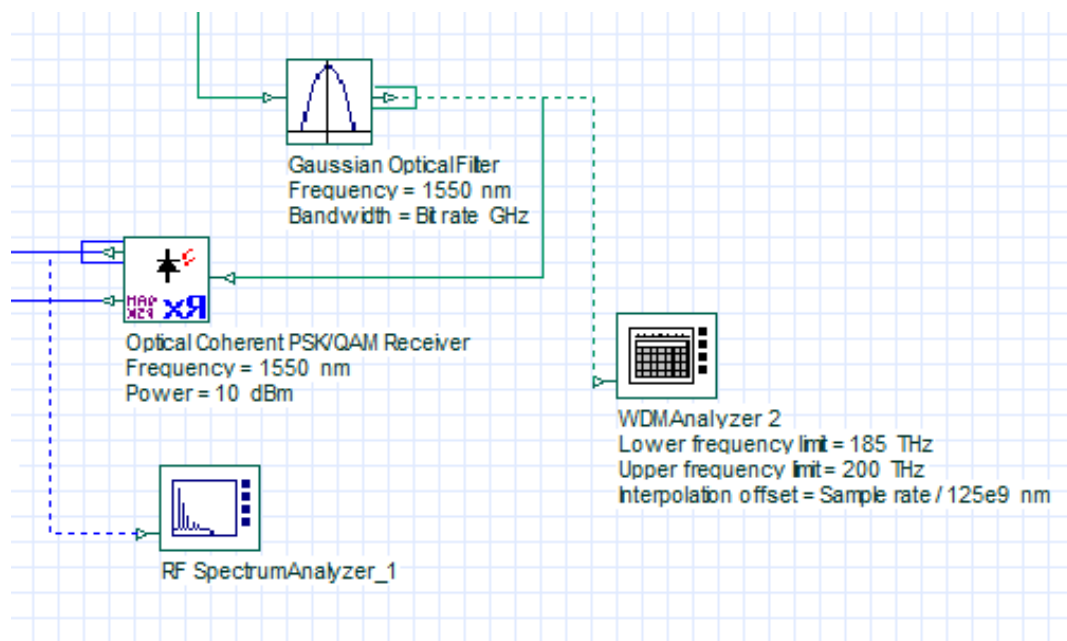


Figura 12 - Conversor óptico para RF (OTR). Fonte: a autora.

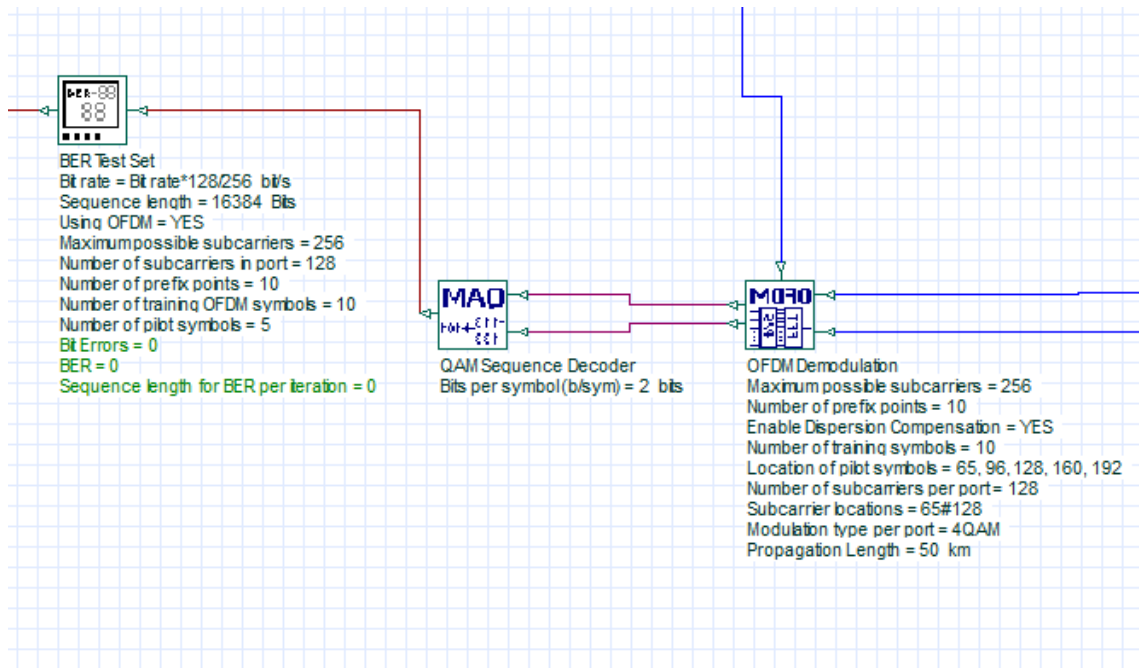


Figura 13 - Receptor OFDM no domínio RF. Fonte: a autora.

Neste sistema, é utilizado um componente denominado *BER Test Set*, o qual é responsável por gerar a sequência de bits que será transmitida e verificar qual a BER (*Bit Error Rate*) após a recepção e demodulação do sinal. Normalmente, em outros projetos, são utilizados outros componentes, como um gerador NRZ (*Non-return to Zero*) na parte de transmissão e um *BER Analyzer* na parte de recepção. O *BER Test Set* é ligado tanto no bloco de transmissão quanto no de recepção, para que a sequência de bits emitida seja comparada com a recebida e, assim, seja feito o cálculo da BER. Esse componente pode ser visto na Figura 8.

O primeiro grande bloco (Figura 9) corresponde ao transmissor OFDM no domínio RF. O primeiro componente é o modulador QAM, que pode ser configurado de acordo com a quantidade de símbolos que se deseja gerar. Ao abrir a janela de propriedades do QAM, deve-se inserir a quantidade de bits que cada símbolo gerado terá. Por exemplo, se for utilizado um 16QAM, a quantidade de bits por símbolo é quatro. Após a modulação QAM, são gerados dois sinais, I e Q, que possuem as informações de fase e quadratura, respectivamente, do sinal QAM. Estes sinais seguem para o componente OFDM, o qual faz a modulação multiportadora. As principais propriedades consideradas neste bloco são: número máximo de subportadoras possíveis, número de subportadoras utilizadas por porta e localização das subportadoras utilizadas (deve-se colocar o intervalo das subportadoras). Quando já multiplexados, os sinais I e Q seguem para dois filtros LP (*Low Pass*) retangulares, ambos com frequência de corte, dada em Hz (Hertz), em 75% da taxa de símbolos (multiplica-se a taxa por 0,75).

Após a multiplexação e a filtragem, os sinais I e Q passam para o segundo grande bloco, conversor de RF para óptico (*RF to Optical Upconverter*, ou RTO), ilustrado pela Figura 10, o qual faz a modulação no domínio óptico. Esta etapa utiliza moduladores de *Mach-Zehnder*, que utilizam o efeito eletroóptico para modular o feixe de luz emitido por um *LASER*. Como já dito, um sinal elétrico é injetado em eletrodos presentes no dispositivo e, como o MZM é construído com material cujo índice de refração varia de acordo com uma tensão elétrica aplicada (efeito eletroóptico), essa variação do índice é capaz de modular o feixe luminoso que passa pelo dispositivo. O sinal elétrico utilizado para a modulação da luz são os sinais I e Q, cada um deles aplicado em um MZM diferente. O sinal Q modulado em luz ainda passa por um componente (*Phase shift*) que altera a sua fase em 90° . Por fim, ambos os sinais passam por um acoplador cruzado, que combina os sinais, e o sinal combinado passa por um amplificador óptico que fornece uma figura de ruído ao sinal, finalizando o Bloco RTO.

O sinal óptico, então, segue para o canal de transmissão, ilustrado pela Figura 11, o qual é iniciado pelo bloco *Set OSNR*, responsável por ajustar a OSNR do sinal óptico de acordo com a necessidade da simulação. Isto porque após a modulação óptica, o sinal pode ter algumas variações de OSNR e, além disso, será possível ver o desempenho do sistema com diferentes valores de OSNR. Neste componente, deve-se ajustar o comprimento de onda do sinal óptico transmitido, para que a OSNR seja aplicada no comprimento correto que, neste caso, é de 1550 nm. Depois do *Set OSNR*, é estruturado o canal óptico, composto por amplificadores ópticos e fibras. O amplificador está ajustado em 10 dB e a fibra tem 50km de comprimento. Para facilitar a construção do *link* óptico, foi utilizado um *loop control*, o qual faz com que o conjunto amplificador-fibra seja repetido quantas vezes forem necessárias, sendo necessário, no *layout* do sistema, colocar apenas um trecho de fibra e um amplificador.

Após o enlace, é colocado um filtro óptico Gaussiano, com frequência central ajustada na frequência do sinal óptico. Neste caso, ajusta-se o valor do comprimento de onda, para que a filtragem seja mais correta. O sinal é recebido pelo bloco conversor de sinal óptico para RF (*OTR, Optical to RF Downconverter*), ilustrado pela Figura 12, composto basicamente por um receptor óptico coerente PSK/QAM. Esse receptor é formado por um conjunto de componentes, sendo eles um oscilador local de mesmo comprimento de onda que o sinal óptico para realizar a detecção coerente, acopladores, um defasador em 90° , alguns fotodetectores PIN e amplificadores elétricos, para recuperar as componente I e Q do sinal. O *layout* do receptor coerente é ilustrado na Figura 14. Esse receptor é específico para modulações PSK e QAM, pois são modulações que geram informação de fase e a detecção coerente considera deve considerar a fase do sinal.

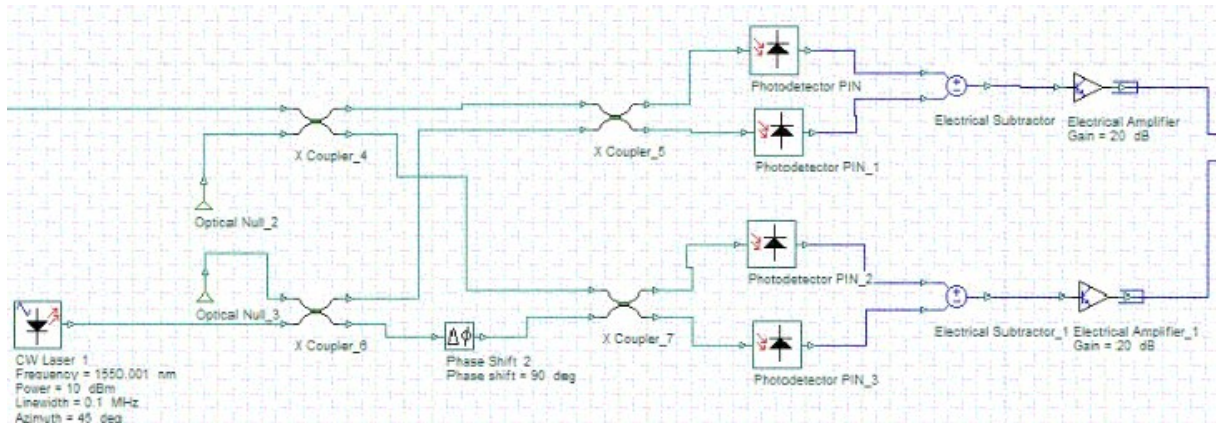


Figura 14 - *Layout* do receptor coerente utilizado. Fonte: a autora.

Feita a detecção do sinal óptico e a conversão OTR, o sinal em RF segue para bloco de recepção do OFDM no domínio RF, ilustrado pela Figura 13. O primeiro componente é o demodulador OFDM, que recebe os sinais I e Q, em OFDM, e faz uma sequência de procedimentos para demultiplexar os sinais. Os sinais I e Q chegam ao demodulador e passam por uma conversão analógica-digital a partir da redução da amostragem para a taxa de símbolo global. Uma filtragem digital é aplicada para compensar a dispersão cromática resultante da propagação na fibra. Nas propriedades do demodulador OFDM, deve-se informar a distância de fibra percorrida na transmissão.

Após a filtragem, o demodulador remove o prefixo cíclico adicionado na modulação (é adicionado para reduzir a ISI (*Intersymbol Interference*) e aplica a DFT para converter cada subportadora, no domínio do tempo, em uma sequência de símbolos. Com isso, é possível identificar quais são os símbolos úteis, os símbolos pilotos e os de treino. Os símbolos recebidos nos locais dos símbolos de treinamento são comparados com os símbolos originais, tendo em vista que o modulador e o demodulador OFDM são interligados. Essa comparação é utilizada para compensar a dispersão cromática, as não-linearidades e outros tipos de atenuação e dispersão do sinal durante a propagação na fibra. Desse modo, é possível fazer a estimativa do canal e reduzir a SER (*Symbol Error Rate*, ou taxa de erro de símbolo). Os símbolos pilotos são utilizados para estimar a fase da portadora, pois a fase tende a modificar, mesmo que pouco, no decorrer da transmissão. Por fim, é feita a decisão dos símbolos de acordo com os valores dos sinais I e Q e, após a decisão, são calculados os valores de EVM (*Error Vector Magnitude*, ou magnitude do vetor de erro) e SER [15]. A EVM é uma medida que indica o quão longe os símbolos estão dos locais ideais na detecção em termos de constelação. Em alguns casos, ao analisar a constelação dos símbolos recebidos, é possível ver que alguns símbolos estão mais

dispersos que outros. Assim, a EVM é a quantização dessa dispersão, permitindo avaliar o desempenho do sistema.

No demodulador OFDM, é necessário inserir algumas informações importantes, sendo elas: número máximo de subportadoras possíveis, número de subportadoras por porta, localização das subportadoras (estas três devem ser iguais ao modulador OFDM), localização dos símbolos pilotos (deve ser inserido o número de cada subportadora), o tipo de modulação digital e a distância da propagação para a compensação da dispersão. Além desses dados, também deve-se informar, tanto no modulador como no demodulador OFDM, quantos pontos de prefixo e símbolos pilotos serão considerados, porém a influência destes parâmetros no desempenho deste sistema não foi investigada neste trabalho. O demodulador OFDM irá fornecer, após a simulação, cinco gráficos, dentre eles três diagramas de constelação diferentes: um antes da estimação do canal, um depois da estimação do canal (compensados os efeitos lineares) e o diagrama de constelação final, feito após a estimação da fase da portadora. Estes diagramas serão utilizados para analisar o desempenho do sistema em diferentes cenários, que serão descritos posteriormente.

Quando o demodulador OFDM realiza a decisão dos símbolos e calcula a EVM e a SER, os sinais I e Q seguem para o decodificador QAM, que irá decodificar os símbolos e terá, como saída, uma sequência de bits. O decodificador QAM deve ser configurado de acordo com o tipo de modulação digital, assim como o modulador QAM na parte de transmissão. A sequência de bits segue para o *BER Test Set*, o qual irá calcular a BER do sistema. Neste componente, deve-se ajustar algumas informações, que são: número máximo de subportadoras possíveis, número de subportadoras por porta, a taxa de bit (esta varia de acordo com os parâmetros anteriores), números de pontos prefixos, de símbolos de treinamento OFDM e de símbolos pilotos. No final, são fornecidos a quantidade de bits errados e a BER, sendo esta última muito importante para avaliar o desempenho do sistema.

Tendo conhecimento de todas as partes que compõem o sistema, definiu-se que as simulações serão divididas em três cenários diferentes. As características de cada cenário e os valores que serão modificados para realizar as simulações e análises serão descritos a seguir.

3.2.1. Cenário 1

No primeiro cenário, o sistema não apresentará a fibra para propagação do sinal, sendo isto chamado de sistema *back-to-back* (ou B2B). Será feita uma análise do desempenho do sistema comparando três formatos de modulação digital: 4QAM, 16 QAM e 64QAM. Também

será feita uma comparação entre duas taxas de bits, 48 Gbps e 96 Gbps, para avaliar se a taxa influencia no desempenho final do sistema. Estes valores foram escolhidos por serem múltiplos dos números de bits por símbolo de cada modulação citada, pois deve-se inserir, nos parâmetros do *layout*, a taxa de símbolos (*symbol rate*) do sistema, dada pela divisão da taxa de bits pelo número de bits por símbolo. Em relação às subportadoras, foi considerado um valor fixo

Para configurar o sistema neste primeiro cenário, deve-se seguir alguns procedimentos, de acordo com os parâmetros considerados em cada situação. Alguns valores mudam de acordo com a situação analisada, já que são três tipos de modulação e duas taxas de bits diferentes. A taxa de bits deve ser 48 ou 96 Gbps, e a taxa de símbolos depende da modulação usada. Por exemplo, se a taxa de bits é de 48 Gbps e a modulação é 64 QAM, a taxa de símbolos será resultado da divisão de 48 Gbps por seis bits (número de bits por símbolo no 64QAM).

No bloco *QAM Sequence Generator*, deve-se inserir a quantidade de bits por símbolo de acordo com a modulação utilizada. Para o 4QAM, são dois bits por símbolo; para o 16QAM, quatro bits por símbolo; para o 64QAM, 6 bits por símbolo.

Em relação à modulação OFDM, não serão feitas alterações durante a simulação do primeiro cenário. A quantidade máxima de portadoras possíveis (*Maximum possible subcarriers*) será fixada em 256, sendo utilizadas 128 delas, alocadas nas portadoras centrais (da 65 até a 192). A variação da quantidade máxima de subportadoras e da quantidade utilizada será realizada no segundo cenário.

A simulação é feita variando o valor da OSNR, no bloco *Set OSNR*, do sinal óptico no intervalo de 20 a 50 dB e, para cada valor de OSNR, serão anotadas a BER e a EVM. Espera-se que, quanto maior a OSNR, menores sejam os valores de BER e EVM, pois o sinal tende a ser menos danificado pelo ruído e, por isso, a detecção, demodulação e decodificação do sinal se torna mais correta (menos erros). Ao final das simulações, serão desenhados gráficos que relacionam a BER e a EVM e comparam o desempenho do sistema com as diferentes modulações e taxas de bits, de modo a verificar quais os melhores parâmetros utilizados.

3.2.2. Cenário 2

No segundo cenário, será feita uma análise de desempenho do sistema, também B2B, em relação à porcentagem de subportadoras utilizadas a partir de um valor máximo reservado. Neste caso, o formato de modulação e a taxa de bits serão fixados em 4QAM e 48Gbps, respectivamente. Este cenário será dividido em cinco situações diferentes, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Divisão do segundo cenário de acordo com a quantidade máxima de subportadoras e a porcentagem de uso

	Número de subportadoras				
	Nº máximo	100%	50%	25%	12,5%
Situação 1	512	512	256	128	64
Situação 2	256	256	128	64	32
Situação 3	128	128	64	32	16
Situação 4	64	64	32	16	8
Situação 5	32	32	16	8	-

Os valores da Tabela 1 devem ser inseridos no bloco *OFDM Modulation e Demodulation*, como já dito anteriormente na apresentação do sistema. Além disso, deve-se inserir a localização das subportadoras utilizadas, para que o bloco realize a IDFT nas subportadoras. O número de pontos prefixos e de portas, no *OFDM Modulation*, são fixos em 10 e 1, respectivamente. No *OFDM Demodulation*, também deve-se inserir o número de pontos prefixos e a quantidade de símbolos de treino (que também são 10), além das posições das subportadoras onde se localizam os símbolos pilotos. A Tabela 2 mostra quais são estas posições.

No bloco *BER Test Set*, também deve-se inserir os dados presentes na Tabela 1, de acordo com a situação analisada e a porcentagem de portadoras em uso. Além disso, os números de pontos prefixos, de símbolos de treino e símbolos pilotos são, respectivamente, 10, 10 e 5 em todas as situações. Quanto à taxa de bit (campo *Bit rate*), este valor é dado pela taxa de bit inserido nos parâmetros do *layout* (que, no caso, é 48 Gbps) multiplicada pela razão entre a quantidade de subportadoras em uso e a quantidade máxima de subportadoras. Portanto, esse valor varia de acordo com a situação e a porcentagem de uso de portadoras.

Neste cenário, a simulação também ocorre com a variação da OSNR entre 20 e 50 dB, e os valores de EVM e BER calculados serão utilizados para analisar o desempenho do sistema. Serão desenhados gráficos de EVM×OSNR e BER×OSNR para cada situação, comparando as porcentagens de uso de subportadoras. Assim, será possível verificar como a quantidade de subportadoras influencia no desempenho do sistema.

Tabela 2 - Posição das subportadoras escolhidas como símbolos pilotos

	Posição das subportadoras piloto			
	100%	50%	25%	12,5%
Situação 1	1, 128, 256, 384, 512	129, 192, 256, 320, 384	193, 224, 256, 288, 320	225, 240, 256, 272, 288
Situação 2	1, 64, 128, 192, 256	65, 96, 128, 160, 192	97, 112, 128, 144, 160	113, 120, 128, 136, 144
Situação 3	1, 32, 64, 96, 128	33, 48, 64, 80, 96	49, 56, 64, 72, 80	57, 60, 64, 68, 72
Situação 4	1, 16, 32, 48, 64	17, 24, 32, 40, 48	25, 28, 32, 36, 40	29, 30, 32, 34, 36
Situação 5	1, 8, 16, 24, 32	9, 12, 16, 20, 24	13, 14, 16, 18, 20	-

3.2.3. Cenário 3

O terceiro cenário tem a finalidade de analisar o sistema quando é incluída a propagação em fibra. Neste caso, sabe-se que os efeitos lineares e não-lineares, citados no Capítulo 2, terão influência no desempenho do sistema e, por isso, deve-se saber que é adicionado ao sinal óptico uma figura de ruído de 4 dB no amplificador óptico ao final do bloco RTO, ilustrado na Figura 10. A análise será feita utilizando a modulação 4QAM, com 256 subportadoras máximas e usando 50% delas (128), que vão da 64 até a 192. Os símbolos pilotos estão localizados nas subportadoras 65, 96, 128, 160 e 192. Serão considerados três valores de OSNR, que são 30, 35 e 40 dB, e para cada valor de OSNR a fibra irá variar de 50 a 500 km. O *loop control* terá valores de 1 a 10, visto que o trecho de fibra utilizado tem 50 km de comprimento. No bloco *OFDM Demodulation*, deve-se informar a distância de propagação a cada simulação realizada, pois o bloco necessita aplicar uma compensação da dispersão do sinal, causada pela fibra. Ou seja, a cada aumento da distância propagada, deve-se informar qual a distância de fibra percorrida. A cada 50 km adicionados, serão anotados valores de BER e EVM, os quais serão utilizados para construir os gráficos que relacionam BER e EVM com a distância de propagação. Ao final das simulações do terceiro cenário, será possível verificar até que distância é possível utilizar o sistema CO-OFDM, juntamente com o melhor valor de OSNR que é possível utilizar em um sistema real.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu quais os procedimentos experimentais do presente trabalho, bem como os tipos de pesquisa envolvidos e os materiais utilizados como objetos de estudo. Ao final das simulações, serão obtidos resultados suficientes para avaliar o desempenho do sistema em diversas situações e, possivelmente, dizer quais os melhores parâmetros que poderiam ser aplicados em um sistema real. Considerando isto, o Capítulo 4 apresentará os resultados obtidos em cada procedimento experimental e as discussões cabíveis em cada resultado.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos após realizar as simulações descritas no Capítulo 3. Os resultados serão apresentados nas formas de gráficos e tabelas, a partir dos quais será possível analisar o desempenho do sistema em diferentes cenários e situações e, com isso, concluir quais são os melhores parâmetros que podem ser adotados para que o sistema tenha um desempenho satisfatório.

4.1. CENÁRIO 1

No primeiro cenário, os resultados serão divididos de acordo com as taxas de transmissão utilizadas. Tanto para 48 Gbps quanto 96 Gbps serão mostrados os resultados das simulações dos três tipos de modulação digital, variando o valor de OSNR e obtendo os valores de BER e EVM. Em ambas as situações, foram construídas tabelas que informam os resultados obtidos de BER e EVM e, com esses valores, foram desenhados gráficos que representam a relação entre tais valores e a OSNR.

4.1.1. 48 Gbps

Ao simular o sistema no primeiro cenário, a uma taxa de 48 Gbps, foram obtidos os valores de BER e EVM contidos na Tabela 3 e mostrados nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Tabela 3 - Valores de BER e EVM nos três formatos de modulação, considerando o primeiro cenário a uma taxa de 48 Gbps. Fonte: a autora.

OSNR	4QAM		16QAM		64QAM	
	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
20	0,013868962	45,46348	0,16971545	37,186201	0,29417344	25,315481
23	0,001036187	32,693622	0,092784553	30,146768	0,24850949	19,660749
26	0	23,812265	0,037195122	23,737571	0,20772358	19,535208
29	0	17,74409	0,01453252	20,391288	0,14119241	14,206954
32	0	14,137527	0,004674797	16,14238	0,10609756	13,762482
35	0	11,461513	0,001626016	13,290436	0,081571816	13,326077
38	0	10,400527	0,00050813	11,891242	0,069241192	13,72658
41	0	9,2547981	0,000101626	11,148046	0,039837398	11,226836
44	0	8,7707557	0	10,245697	0,069105691	14,332644
47	0	8,7051291	0	11,962395	0,045663957	11,428245
50	0	8,5220454	0	9,7743106	0,030894309	10,931203

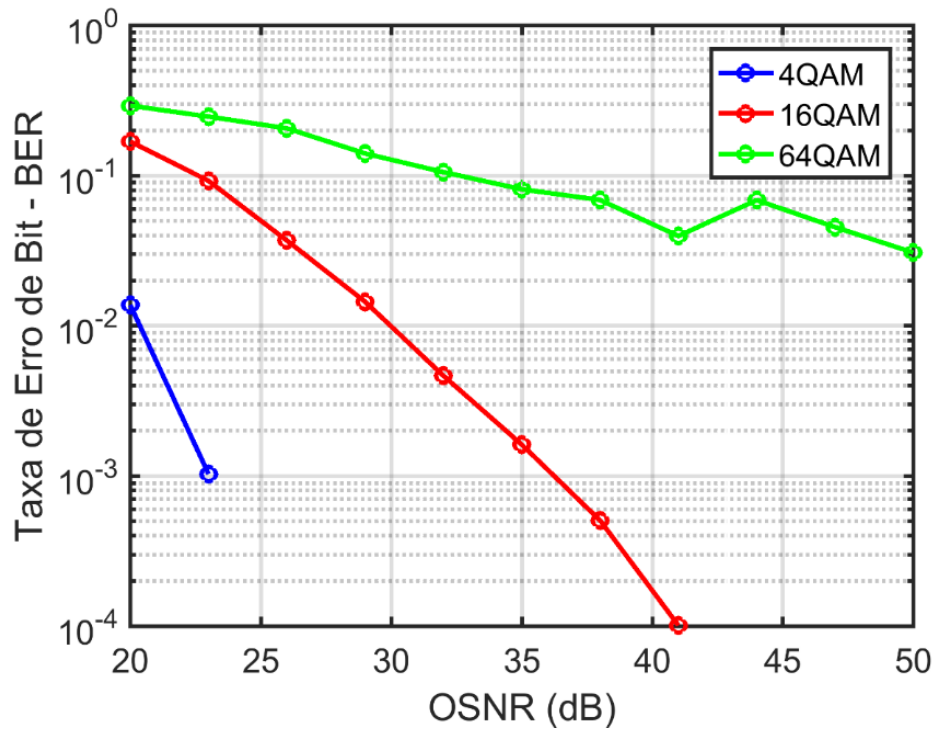


Figura 15 - Relação OSNR x BER para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 48 Gbps.
Fonte: a autora

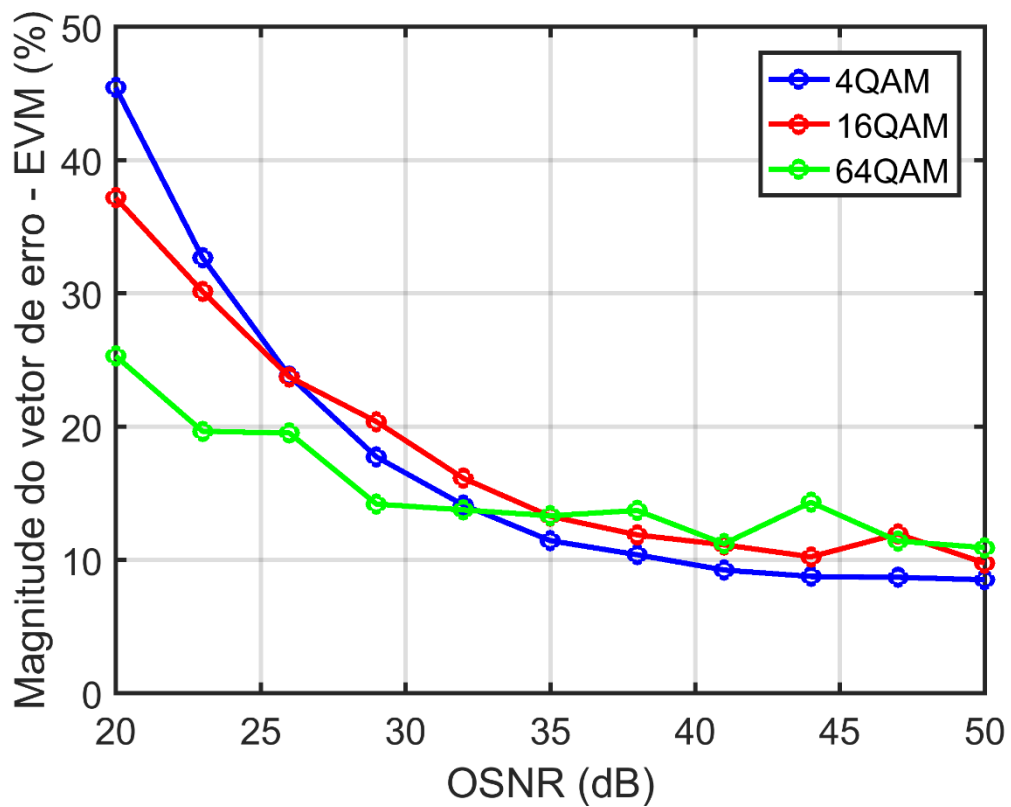


Figura 16 - Relação OSNR x EVM para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 48 Gbps.
Fonte: a autora

Pelas figuras é possível perceber que quanto maior a OSNR, menor serão os valores de BER e EVM. Isto porque o aumento da OSNR implica em um sistema em que o ruído passa a interferir cada vez menos no sinal transmitido. Sendo assim, a detecção do sinal tende a ser mais precisa, gerando menos erros de bits durante a decodificação QAM. A redução da EVM indica que os símbolos QAM se tornam cada vez mais precisos após a demodulação OFDM e isso também influencia na decodificação do sinal.

Além disso, pode-se dizer que o formato de modulação também exerce influência no desempenho do sistema neste cenário. A medida que o número de símbolos aumenta, a distância entre os símbolos diminui tornando o processo de decisão mais errático. Ou seja, quando comparadas com o 4QAM, as modulações 16QAM e 64QAM sofrem maior penalidade durante o processo de detecção e decisão dos símbolos transmitidos, aumentando as chances de erros acontecerem. Portanto, o 4QAM é o tipo de modulação que oferece os melhores resultados, tanto em termos de BER e de EVM. Já para a modulação 64QAM, a BER é maior devido à menor distância entre os símbolos adjacentes. Assim, a detecção dos símbolos é mais difícil e suscetível a erros, resultando em valores maiores de BER. Para o 16QAM os resultados são intermediários entre 4QAM e 64QAM.

Também é interessante observar que as modulações 4QAM e 16QAM toleraram, respectivamente, valores de EVM de 23,8% e 10,2% sem causar nenhum erro ($BER = 0$). Esses cenários aconteceram para valores de OSNR de 26 e 44 dB, respectivamente. A modulação 64QAM não apresentou nenhum cenário de simulação sem erros, apesar de valores de EVM sensivelmente melhores que nos outros formatos de modulação. Como exemplo, no pior cenário analisado ($OSNR = 20$ dB), a EVM da modulação 64QAM foi de 25,3%, que é um valor que provavelmente ocasionaria um cenário livre de erros caso fosse obtida com a modulação 4QAM. Assim, pode-se afirmar que a comparação de valores de EVM entre os formatos de modulação é injusta, mas é bastante útil quando utilizada para entender o desempenho do sistema em função da OSNR dentro de um único formato de modulação.

Outro aspecto importante que deve ser avaliado é qual a OSNR que atenderia o limite do FEC. O máximo valor de BER aceitável é de 10^{-2} . Isto se deve a utilização de um código corretor de erro (FEC – *Forward Error Correction*), que quando utilizado faz com que uma BER de 10^{-2} se torne uma BER de 10^{-15} [16]. Ao se observar a Figura 15, pode-se perceber que as modulações 4QAM e 16QAM atingem o limite do FEC com valores de OSNR de 21 e 30 dB, respectivamente. A modulação 64QAM não atingiu o limite do FEC para nenhum valor de OSNR, o que a tornaria inviável para aplicação nesse sistema sob as condições de simulação aqui empregadas.

Para verificar a diferença de detecção dos símbolos entre os formatos de modulação, é necessário analisar os diagramas de constelação em cada situação. Durante as simulações, foram obtidas imagens dos diagramas de constelação para cada valor de OSNR. Esses diagramas permitem visualizar como o processo de demodulação do sinal é realizado de forma a se obter um sinal codificado em QAM. Uma vez que no bloco *OFDM Demodulation* é simulado o processamento do sinal por DSP (*Digital Signal Processor*), podem ser vistas as constelações em três etapas do processamento do sinal: (i) antes da estimativa do canal, que mostra o sinal recebido sem processamento; (ii) depois da estimativa do canal, quando são compensados os efeitos lineares da fibra óptica; (iii) depois da estimativa de fase da portadora do oscilador local do receptor coerente. Essa última constelação mostra como de fato o sinal ficou após a atuação do DSP.

As Figuras 17, 18 e 19 ilustram os diagramas de constelação para a modulação 4QAM com os valores de OSNR em 20, 35 e 50 dB, respectivamente. As Figuras 20, 21 e 22 ilustram, para os mesmos valores de OSNR, as constelações para a modulação 16QAM. As Figuras 23, 24 e 25 ilustram as constelações para 64QAM, também para os valores de OSNR citados.

Os diagramas do 4QAM tornam nítidas as diferenças causadas pelo aumento da OSNR no sistema. Para a OSNR de 20 dB, a constelação final aparece bastante espalhada (Figura 17 (c)). Porém, quando a OSNR é 35 dB (Figura 18 (c)) ou 50 dB (Figura 19 (c)), os símbolos do 4QAM já são detectados corretamente e sem riscos de haver erros. Para o 16QAM, os símbolos da constelação no cenário de OSNR de 20 dB (Figura 20 (c)) são indistinguíveis. Já para OSNR de 35 dB (Figura 21 (c)), a detecção ainda apresenta erros, mas são muito baixos e considerados aceitáveis ($BER = 1,6 \cdot 10^{-3}$, que está abaixo do limite do FEC). O cenário de 16QAM com OSNR de 50 dB (Figura 22 (c)) mostra uma constelação sem erros, com símbolos bem distinguíveis. Por fim, percebe-se nas Figuras 23 a 25 (c) que a medida que OSNR vai aumentando, a constelação vai se tornando mais próxima da constelação ideal para o 64QAM, mais ainda assim os resultados não foram bons, pois a BER mínima atingida fica na faixa de 10^{-2} , mesmo quando a OSNR é de 50 dB (Figura 25 (c)).

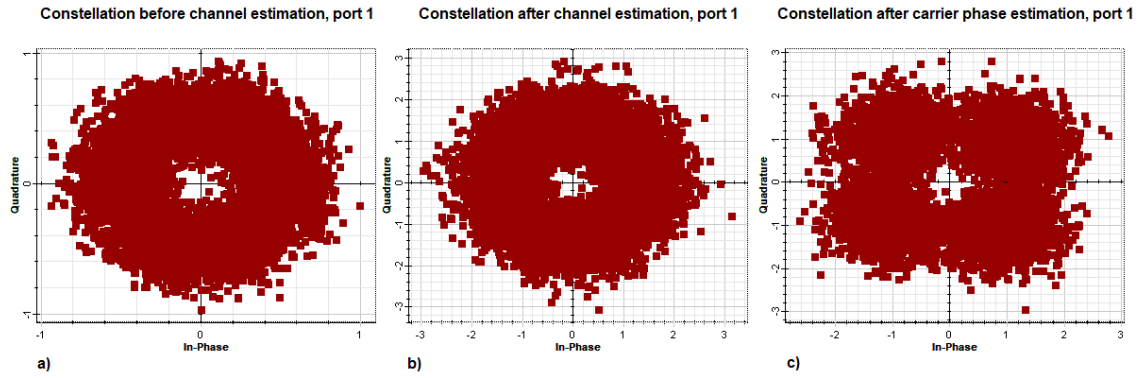


Figura 17 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

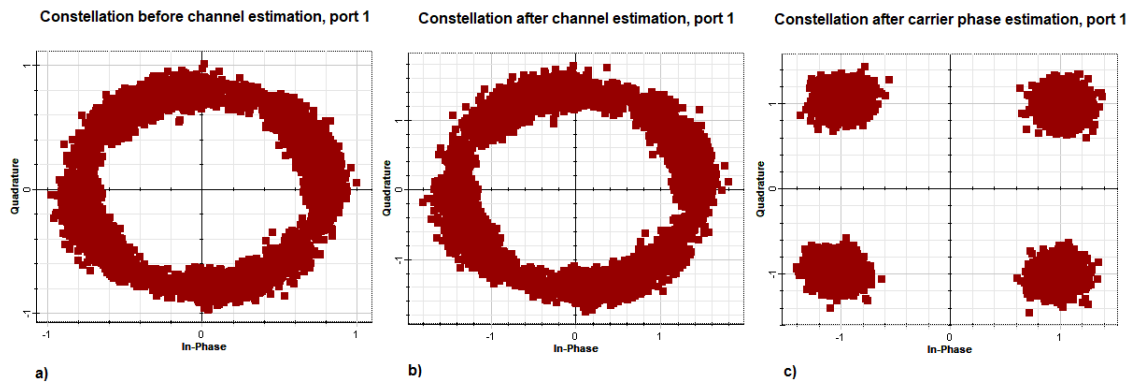


Figura 18 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

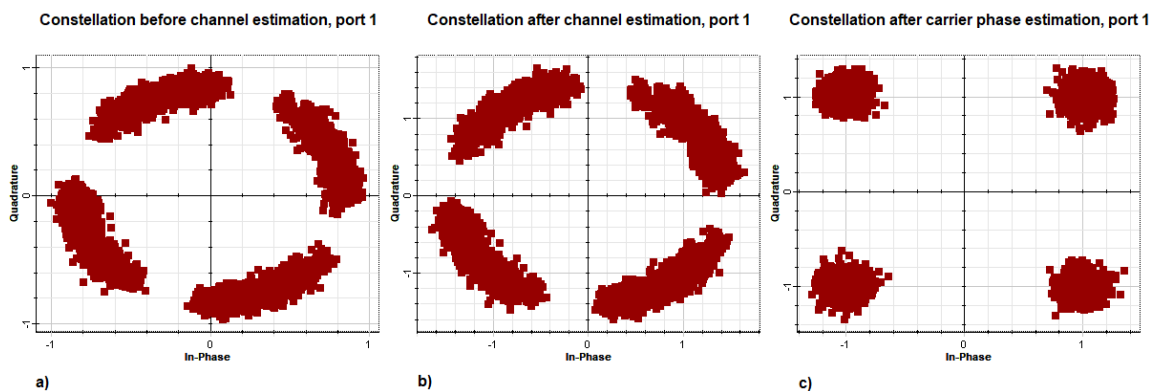


Figura 19 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

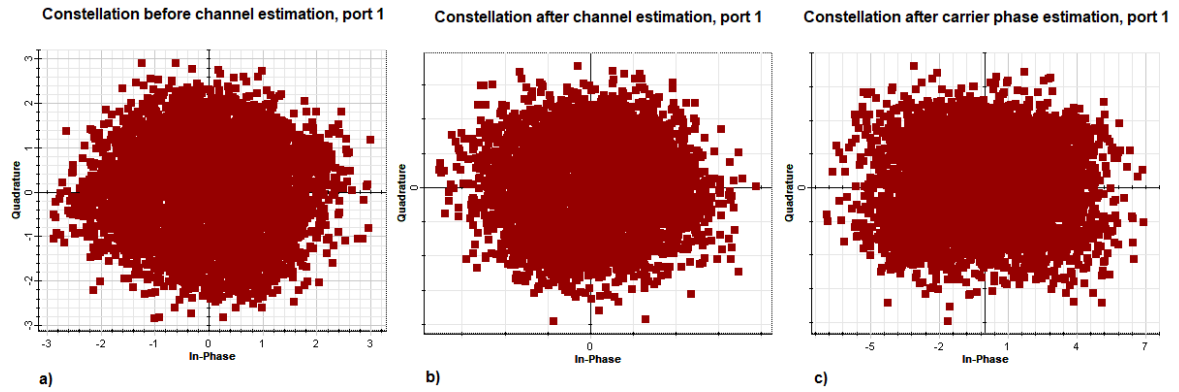


Figura 20 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

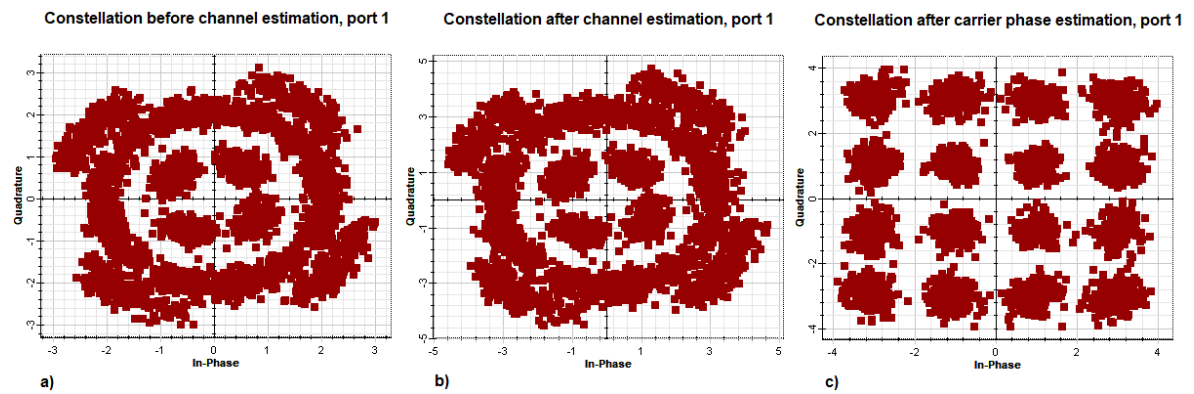


Figura 21 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

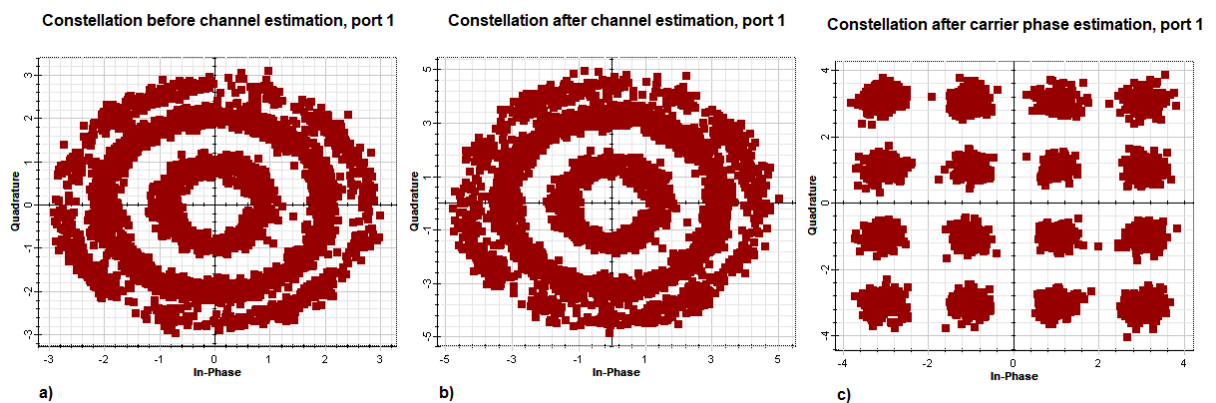


Figura 22 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

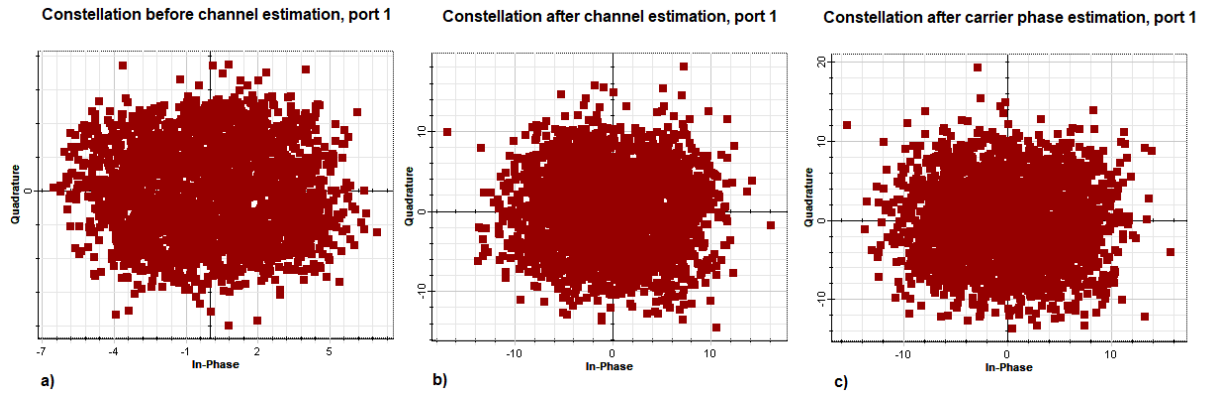


Figura 23 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

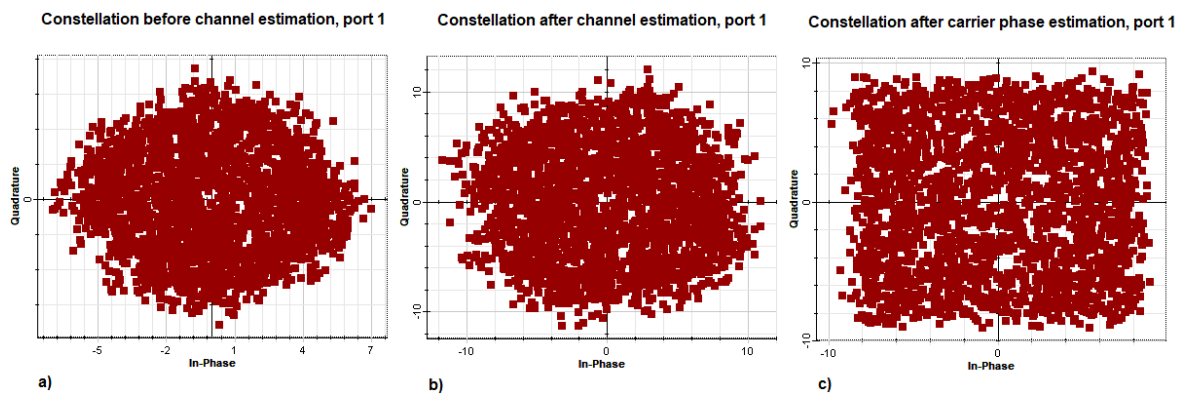


Figura 24 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

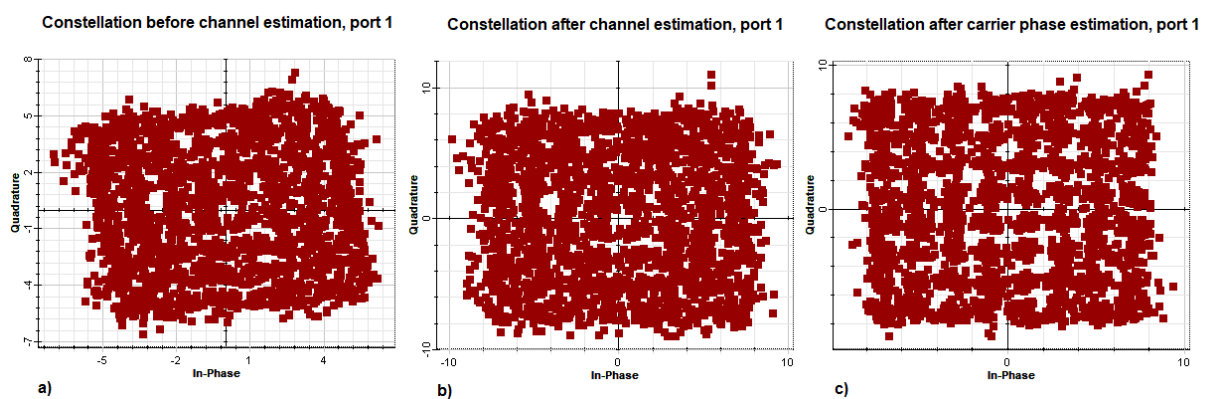


Figura 25 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 48 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

4.1.2. 96 Gbps

De forma semelhante à situação anterior, os resultados das simulações do sistema no primeiro cenário, desta vez com 96 Gbps de taxa, são exibidos na Tabela 4. As Figuras 26 e 27 ilustram os gráficos desenhados a partir dos dados da Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de BER e EVM nos três formatos de modulação, considerando o primeiro cenário a uma taxa de 96 Gbps. Fonte: a autora.

OSNR	4QAM		16QAM		64QAM	
	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
20	0,06408417	56,705608	0,28943577	43,500626	0,33292683	47,973401
23	0,013470429	43,401168	0,19806911	34,443962	0,29200542	26,559472
26	0,0011956	32,403361	0,12865854	29,889197	0,23550136	21,058201
29	0	23,544895	0,051930894	24,220687	0,17682927	15,972066
32	0	18,108405	0,015447154	20,625095	0,13387534	14,860153
35	0	14,320791	0,005487805	16,868536	0,098373984	14,023561
38	0	12,009631	0,000406504	14,456189	0,060162602	12,144329
41	0	10,732094	0	12,436002	0,056368564	12,878
44	0	10,100182	0	12,511686	0,043766938	11,505439
47	0	9,7517566	0	11,340824	0,037533875	11,094191
50	0	9,6212999	0	10,72417	0,032791328	11,260111

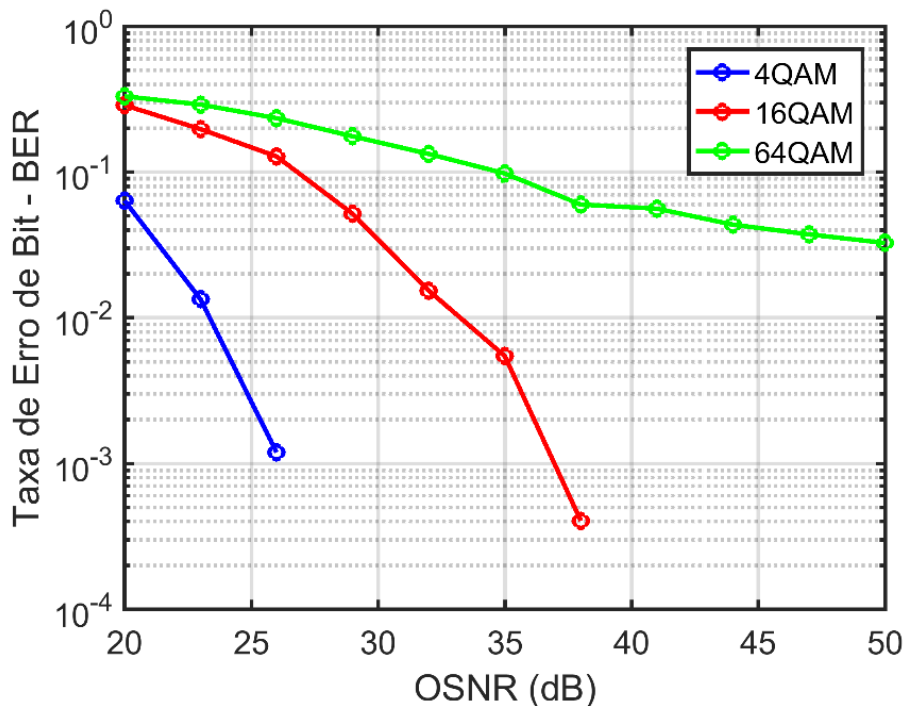


Figura 26 - Relação OSNR x BER para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 96 Gbps. Fonte: a autora.

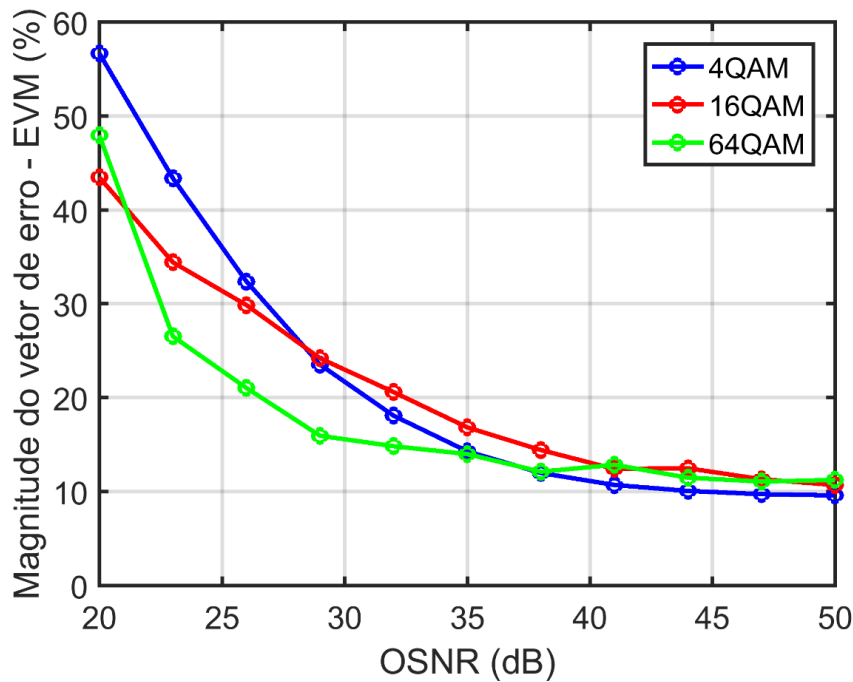


Figura 27 - Relação OSNR x EVM para as modulações 4QAM, 16QAM e 64QAM com taxa de 96 Gbps.
Fonte: a autora.

Da mesma forma que no cenário anterior (48 Gbps), é possível perceber que quanto maior a OSNR, menor serão os valores de BER e EVM. Além disso, novamente o 4QAM é o tipo de modulação que oferece os melhores resultados, tanto em termos de BER e de EVM. Novamente 4QAM e 16QAM toleraram, respectivamente, valores de EVM de 23,5% e 12,4% sem causar nenhum erro (BER = 0). Esses cenários aconteceram para valores de OSNR de 29 e 41 dB, respectivamente. Ou seja, para essa análise de BER = 0, houve uma piora de 3 dB na OSNR necessária para o 4QAM e uma melhora de 3 dB para o 16QAM. Era esperado que o sistema piorasse com o aumento da taxa de transmissão, e essa melhora pode ser explicada pelas variáveis aleatórias que são consideradas na simulação.

Outro aspecto importante que deve ser avaliado é qual a OSNR que atenderia o limite do FEC. Ao se observar a Figura 27, pode-se perceber que as modulações 4QAM e 16QAM atingem o limite do FEC com valores de OSNR de 24 e 34 dB, respectivamente, cerca de 4 dB maiores que para o cenário anterior (48 Gbps). Aqui os sistemas se comportaram como esperado e seus desempenhos pioraram com o aumento da taxa. Novamente, a modulação 64QAM não atingiu o limite do FEC para nenhum valor de OSNR, o que a tornaria inviável para aplicação nesse sistema sob as condições de simulação aqui empregadas.

Da mesma forma que na situação anterior (com taxa de 48 Gbps), também foram obtidas as imagens de constelação fornecidas pelo bloco *OFDM Demodulation*, ilustradas nas Figuras

28 a 36. As Figuras 28 a 30 referem-se ao 4QAM; as Figuras 31 a 33, ao 16QAM; as Figuras 34 a 36, ao 64QAM. Nenhuma diferença significativa para o cenário anterior em termos qualitativos das constelações foi observada quando se aumentou a taxa para 96 Gbps, ou seja, a medida que OSNR vai aumentando, a constelação vai se tornando mais próxima da constelação ideal. Já em termos quantitativos, pode-se perceber que a EVM aumentou em todos os casos com o aumento da taxa de transmissão. Para a modulação de 4QAM, a EVM aumentou de 8,5% para 9,6%, 11,4% para 14,3% e 45,4% para 56,7% considerando os valores de OSNR de 20 (Figura 28 (c)), 35 (Figura 29 (c)) e 50 (Figura 30 (c)) dB, respectivamente. Já para a modulação de 16QAM, a EVM aumentou de 9,7% para 10,7%, 13,2% para 16,8% e 37,1% para 43,5% considerando os valores de OSNR de 20 (Figura 31 (c)), 35 (Figura 32 (c)) e 50 (Figura 33 (c)) dB, respectivamente. Por fim, para a modulação de 16QAM, a EVM aumentou de 10,9% para 11,2%, 13,3% para 14,0% e 25,3% para 47,9% considerando os valores de OSNR de 20 (Figura 34 (c)), 35 (Figura 35 (c)) e 50 (Figura 36 (c)) dB, respectivamente.

Por fim, de acordo com os resultados obtidos, é possível prever que o desempenho do sistema será pior em termos de BER e EVM para maiores valores de taxa de transmissão. Apesar de poder afirmar que 96 Gbps é uma taxa que pode ser utilizada em um sistema óptico CO-OFDM quando a modulação utilizada for o 4QAM ou 16QAM, não foi investigada nesse trabalho qual a taxa de transmissão limite para esses sistemas. Isso fica como sugestão para trabalhos futuros, assim como investigar quais as condições para que o sistema funcione com modulação 64QAM.

No próximo cenário será investigado qual o desempenho do sistema quando parâmetros do OFDM são alterados. Nesse caso, serão variados o número de portadoras máximo e a porcentagem delas que estão sendo usadas.

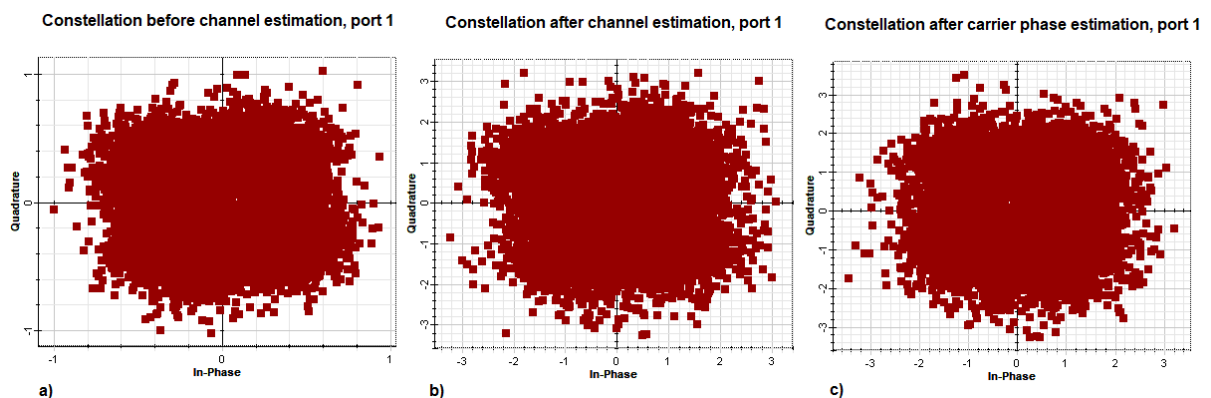


Figura 28 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

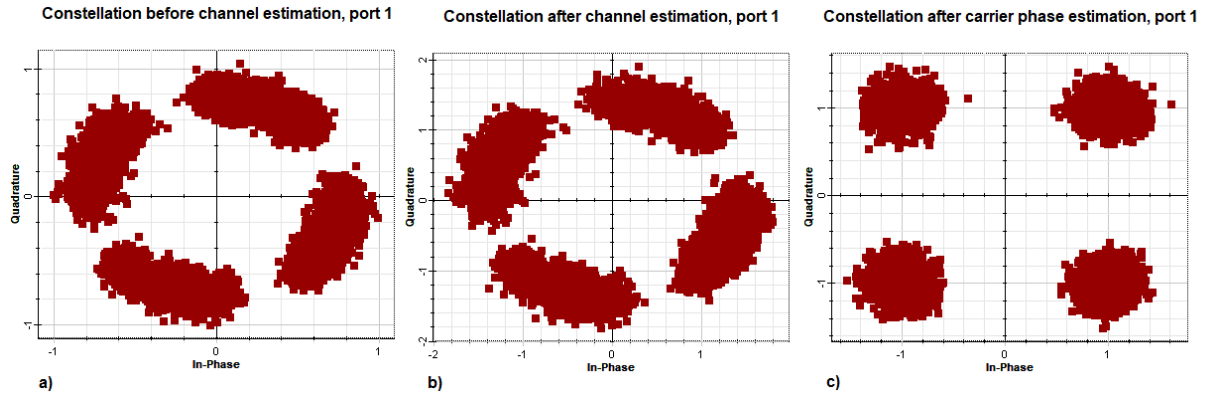


Figura 29 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

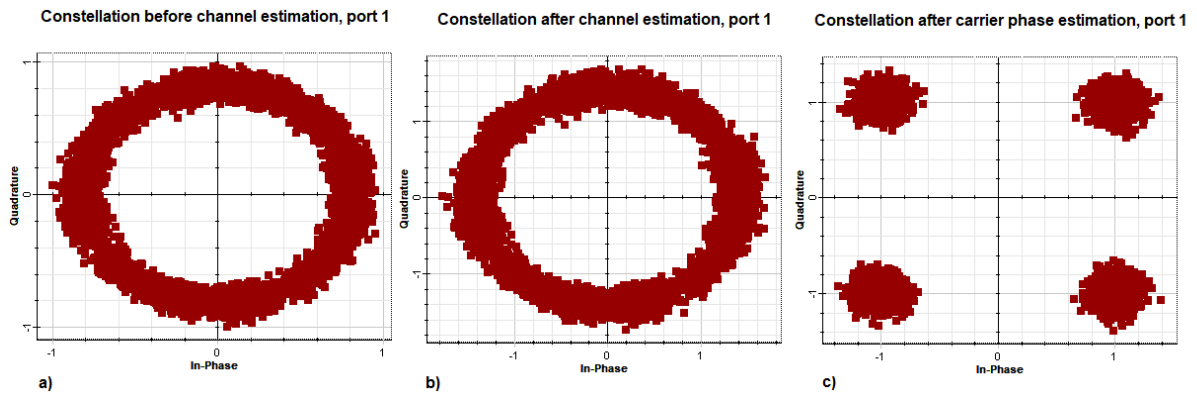


Figura 30 - Diagramas de constelação para o 4QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

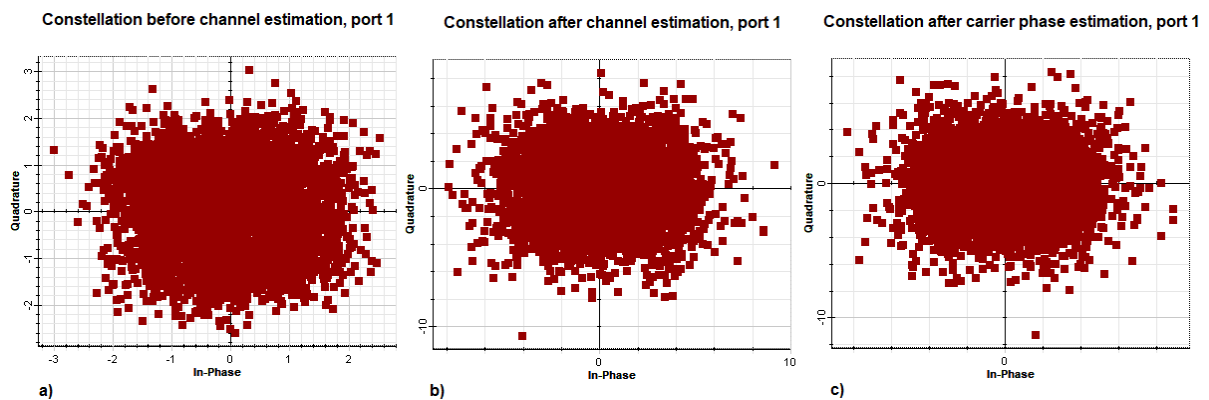


Figura 31 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

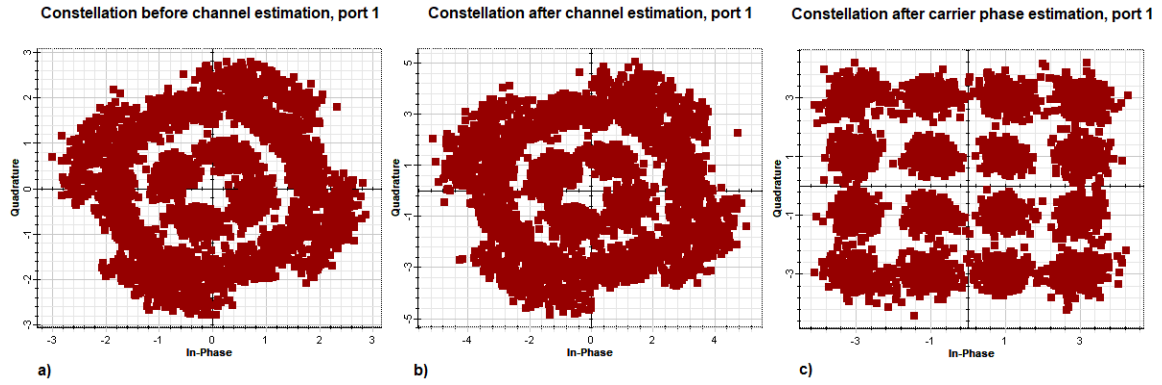


Figura 32 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 35 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

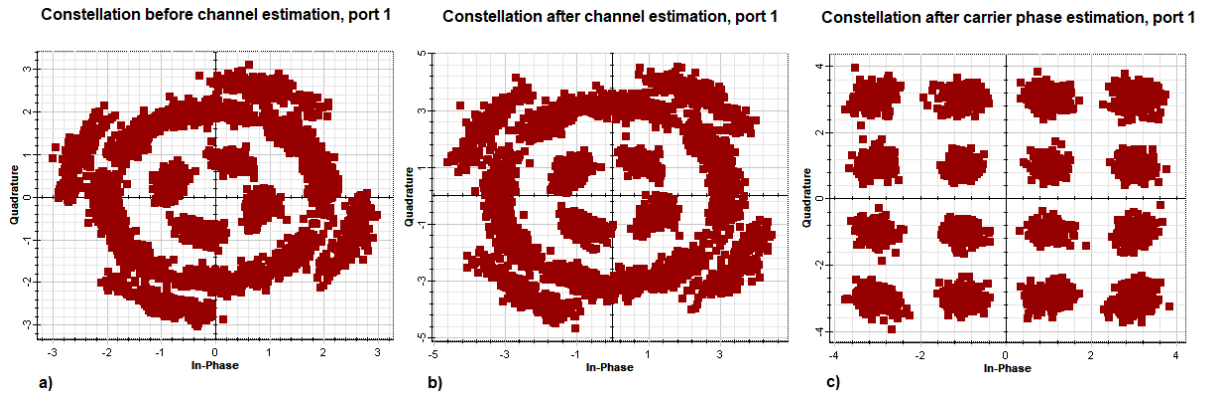


Figura 33 - Diagramas de constelação para o 16QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

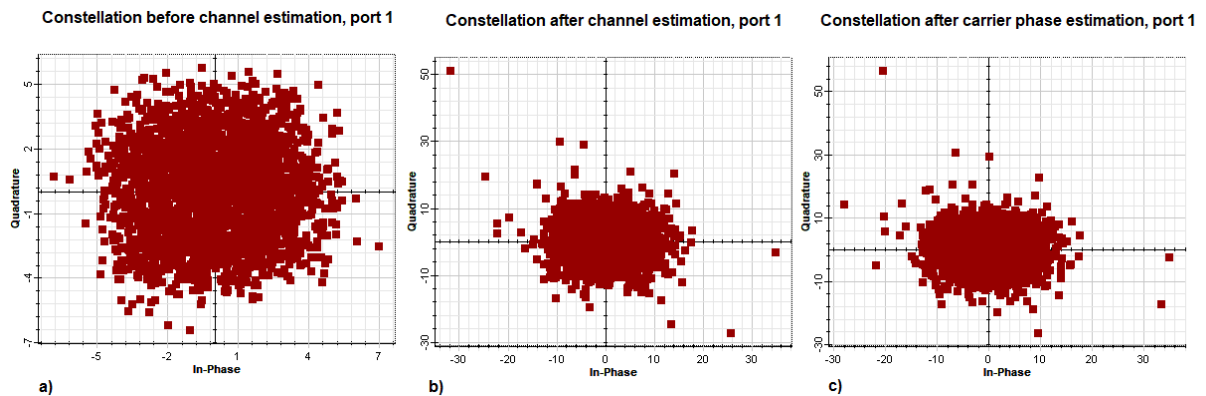


Figura 34 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

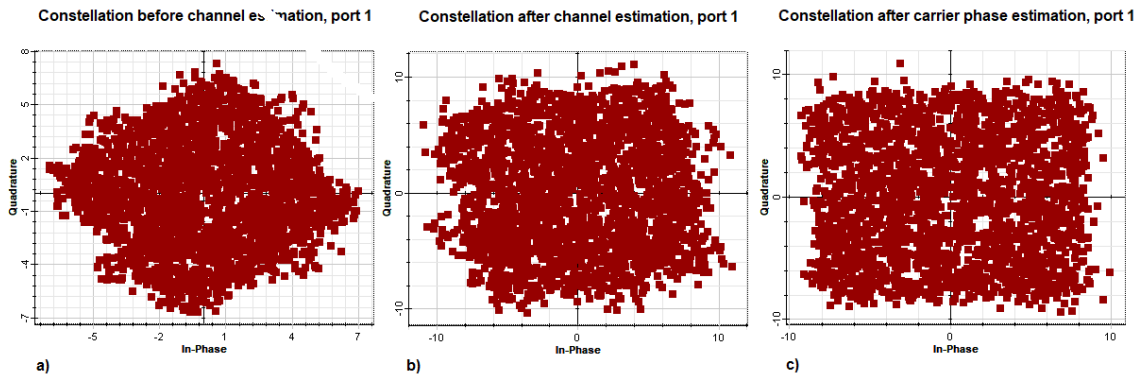


Figura 35 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 20 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

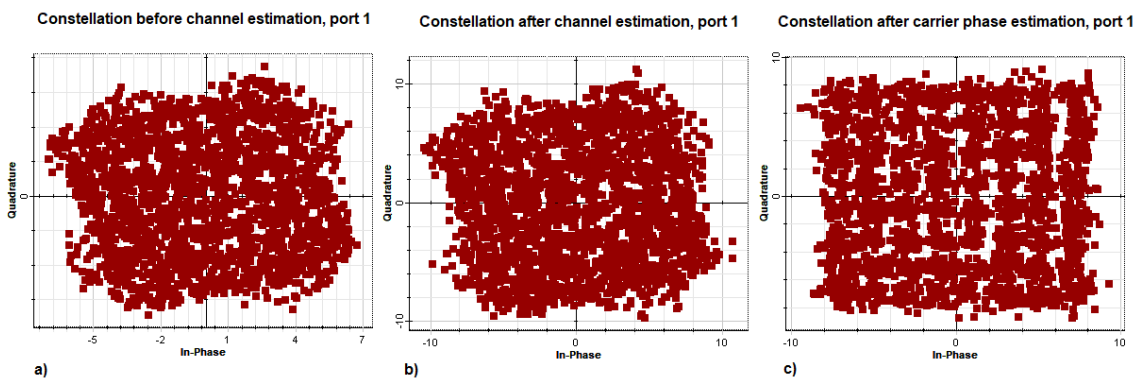


Figura 36 - Diagramas de constelação para o 64QAM, com taxa de 96 Gbps e OSNR = 50 dB: a) antes da estimativa do canal; b) depois da estimativa do canal; c) depois da estimativa de fase da portadora.

Fonte: a autora.

4.2. CENÁRIO 2

Para o segundo cenário, foram fixados como parâmetros da simulação o formato de modulação 4QAM e a taxa de bits de 48Gbps. Assim, os dados obtidos nas simulações foram organizados nas Tabelas 5 a 9, sendo cada tabela referente a uma quantidade máxima de subportadoras, cujos valores são 512, 256, 128, 64 e 32 subportadoras, respectivamente. Com esses dados, foram desenhados os gráficos ilustrados nas Figuras 37 a 41, que permitem visualizar o desempenho do mesmo sistema para diferentes porcentagens de uso das subportadoras máximas.

Analisando e comparando os dados das Tabelas 5 a 9, pode-se dizer que variar a quantidade máxima de subportadoras não afeta no desempenho do sistema. Ou seja, quando

100% das portadoras foram utilizadas, os valores de EVM oscilaram pouco em torno de 56%, 14% e 10%, respectivamente para 20, 35 e 50 dB de OSNR. O mesmo aconteceu para as outras porcentagens: 50% teve EVM em torno de 44%, 11% e 8% para 20, 35 e 50 dB de OSNR, respectivamente; 25% teve EVM em torno de 32%, 8% e 6% para 20, 35 e 50 dB de OSNR, respectivamente; e quando 12,5% das portadoras eram utilizadas, o EVM oscilou em torno de 21%, 7% e 5% para 20, 35 e 50 dB de OSNR, respectivamente.

Portanto, quanto menor a porcentagem de uso das subportadoras, melhor o desempenho do sistema. Ou seja, os valores de BER e EVM tendem a serem menores quando se usa menos subportadoras. Por exemplo, o melhor desempenho é obtido quando apenas 12,5% delas são utilizadas para transportar informação. Isso acontece porque, mesmo em um cenário B2B, quanto maior for o número de portadoras empregadas no sistema, maior a interferência entre elas. Esse fenômeno é conhecido por ICI (*Inter-Carrier Interference*). Isso se acentuaria ainda mais caso fosse empregada a fibra óptica no sistema, devido ao efeito não linear FWM (*Four Wave Mixing*) [17]. Nesse artigo, inclusive, foi proposto um esquema de preenchimento parcial das portadoras para melhorar o desempenho do sistema em razão das não linearidades da fibra, mas como o cenário em estudo não utiliza fibra, a proposta do artigo não se aplica.

Tabela 5 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 512. Fonte: a autora

OSNR	100%		50%		25%		12,50%	
	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
20	0,04414389	56,695161	0,012236767	44,964873	0,001548587	32,637262	0	23,890915
25	0,001972387	34,703199	0,000009486	26,545312	0	20,272368	0	15,503144
30	0	23,122066	0	17,161787	0	15,661459	0	10,448206
35	0	14,863203	0	12,352552	0	10,185228	0	8,8841132
40	0	13,304227	0	10,653717	0	9,4495708	0	8,0934142
45	0	13,015181	0	9,4331742	0	9,2126107	0	7,928721
50	0	11,352242	0	9,6364681	0	8,6585532	0	7,9905037

Tabela 6 - - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 256. Fonte: a autora

OSNR	100%		50%		25%		12,50%	
	BER (%)	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
20	0,049097727	56,306038	0,014506616	45,101706	0,000166168	31,371176	0	22,50426
25	0,002265448	34,763104	0	26,297429	0	18,441577	0	13,732837
30	0	21,275876	0	16,452281	0	11,702051	0	9,6869288
35	0	14,944199	0	11,512294	0	9,0799782	0	6,9837009
40	0	11,792344	0	9,7252357	0	7,7881624	0	6,6936331
45	0	10,79618	0	8,5027551	0	7,2979589	0	6,4809406
50	0	10,391797	0	8,3009075	0	7,1106117	0	6,2440637

Tabela 7 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 128. Fonte: a autora

OSNR	100%		50%		25%		12,50%	
	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
20	0,04558115	56,578473	0,01153484	42,955892	0,001028807	32,263012	0	21,937704
25	0,001505571	34,057997	0	25,445923	0	18,628144	0	12,946095
30	0	20,515258	0	15,399213	0	11,528341	0	8,6879668
35	0	13,962105	0	10,459716	0	8,2110541	0	6,3562409
40	0	11,026113	0	8,4999522	0	6,829	0	5,6008478
45	0	9,7528027	0	7,5140901	0	6,1800053	0	5,4502857
50	0	9,4450301	0	7,498086	0	5,9446843	0	5,3200499

Tabela 8 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 64. Fonte: a autora

OSNR	100%		50%		25%		12,50%	
	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
20	0,046268777	55,540121	0,016850974	45,637169	0,000430849	31,957793	0	21,031447
25	0,001807374	34,061279	0,000263296	26,316275	0	18,246695	0	12,09765
30	0	20,446791	0	15,842477	0	11,265971	0	7,6422187
35	0	13,682221	0	10,585109	0	7,7596234	0	5,4158046
40	0	10,679735	0	8,2106116	0	6,3685034	0	4,5594295
45	0	9,4845893	0	7,3766465	0	5,9762899	0	4,2474579
50	0	9,3002747	0	6,912295	0	5,6910502	0	4,1583528

Tabela 9 - BER e EVM quando o número máximo de subportadoras é 32. Fonte: a autora

OSNR	100%		50%		25%	
	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
20	0,055214425	57,603546	0,01208134	44,115143	0,000438596	28,856617
25	0,001900585	35,135862	0,000119617	25,589683	0	16,826979
30	0	20,768699	0	15,488159	0	10,400776
35	0	13,671767	0	10,177173	0	7,0734407
40	0	10,434496	0	7,9785123	0	5,788005
45	0	9,4151471	0	7,2672568	0	5,1582923
50	0	9,0125816	0	6,9869552	0	5,1543924

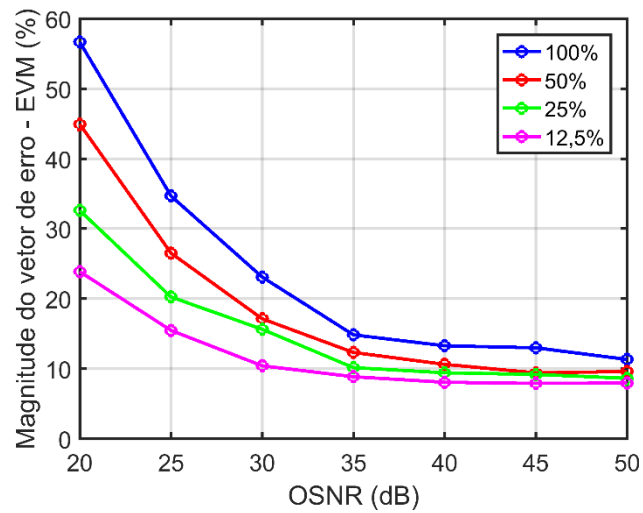


Figura 37 - Relação OSNRxEVM para diferentes percentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 512. Fonte: a autora.

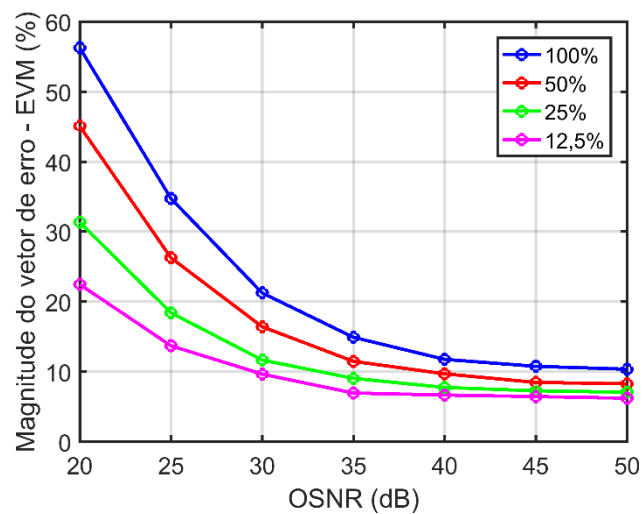


Figura 38 - Relação OSNRxEVM para diferentes percentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 256. Fonte: a autora.

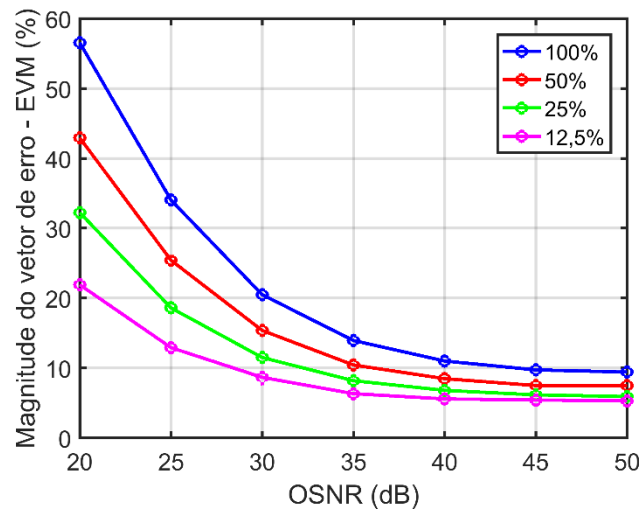


Figura 39 - Relação OSNRxEVM para diferentes percentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 128. Fonte: a autora.

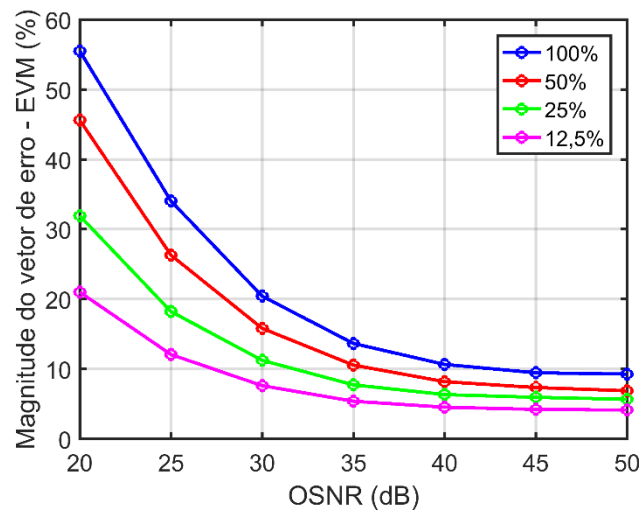


Figura 40 - Relação OSNRxEVM para diferentes percentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 64. Fonte: a autora.

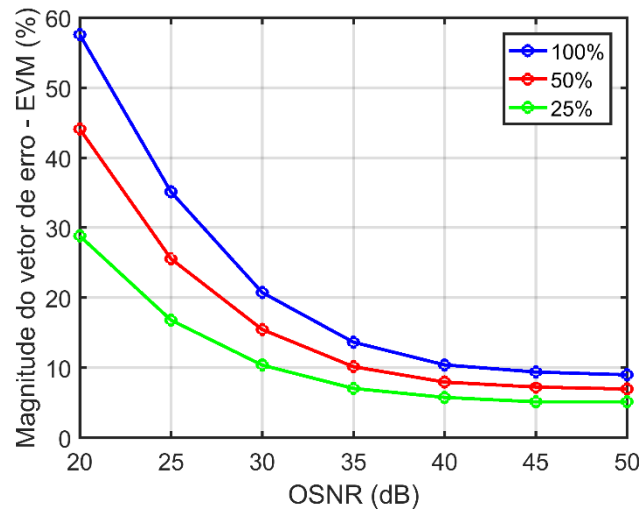


Figura 41 - Relação OSNRxEVM para diferentes porcentagens de uso de subportadoras quando o máximo de subportadoras possíveis é 32. Fonte: a autora.

4.3. CENÁRIO 3

Para o terceiro cenário, os dados coletados foram organizados na Tabela 10, que relaciona as distâncias de propagação na fibra, que variam entre 50 e 500 km, com os valores de OSNR estabelecidos (30, 35, 40 e 45 dB). Os valores de EVM foram utilizados para desenhar as curvas do gráfico ilustrado na Figura 42, sendo que cada curva corresponde a um valor de OSNR.

Analisando a Tabela 10, pode-se dizer que, conforme a distância de propagação aumenta, a EVM também aumenta, devido a diminuição da OSNR do sinal a medida que ele passa por amplificadores ao longo do enlace. Foram obtidos cenários livres de erros para as distâncias de 300, 300, 350 e 400 km quando a OSNR inicial era 30, 35 40 e 45 dB, respectivamente. Além disso, todos os valores de EVM abaixo de 25% resultaram em BER = 0, o que pode ser o limite fundamental de tolerância para a modulação 4QAM. Ainda assim, em todos os cenários com distâncias maiores ou iguais a 350 km (mesmo quando a OSNR é mais baixa - 30 dB) até 500 km, a BER ficou dentro do limite do FEC, sendo considerados valor aceitáveis de desempenho.

Tabela 10 - Dados referentes às simulações no terceiro cenário, relacionando os valores de OSNR com as distâncias percorridas pelo sinal óptico na fibra. Fonte: a autora.

DISTÂNCIA (km)	OSNR=30		OSNR=35		OSNR=40		OSNR=45	
	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)	BER	EVM (%)
50	0	17,056528	0	13,515351	0	10,179243	0	11,121938
100	0	19,529306	0	14,222197	0	12,791827	0	12,882151
150	0	22,267724	0	15,372664	0	13,877998	0	13,832005
200	0	22,577444	0	18,103711	0	16,628563	0	16,086413
250	0	24,329342	0	20,728341	0	18,607204	0	20,036841
300	0	24,972349	0	22,964319	0	20,812243	0	22,663024
350	0,000159413	26,6659	7,97067E-05	26,827146	0	23,265698	0	24,982855
400	0,000637653	28,499206	0,00023912	26,353122	0,000159413	25,781903	0,000159413	25,590933
450	0,001992667	32,631992	0,000557947	27,623806	0,000637653	27,21865	0,001036187	28,184108
500	0,001992667	33,23257	0,001275307	30,052603	0,000797067	29,7957	0,002550614	32,417489

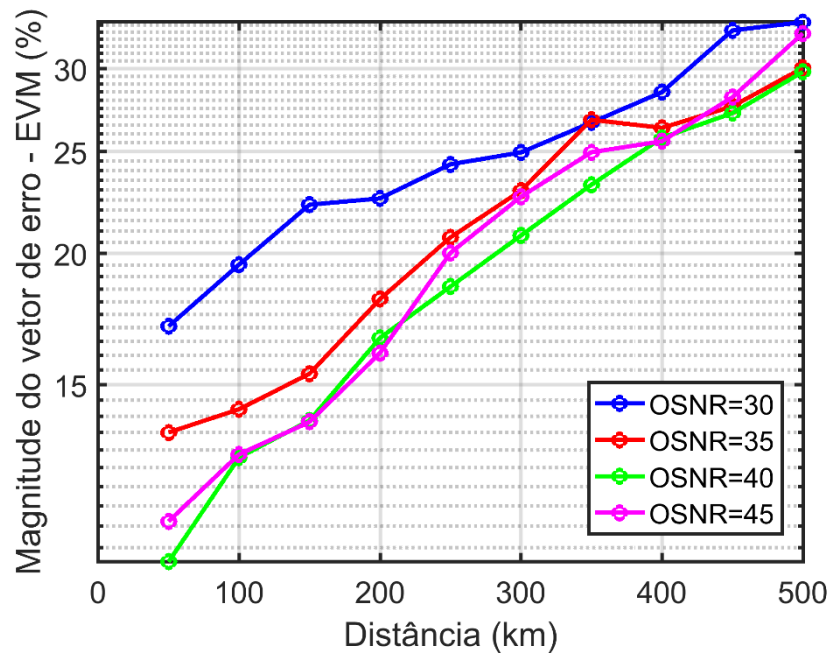


Figura 42 - Relação Distância x EVM para diferentes valores de OSNR. Fonte: a autora.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados fornecidos a partir das simulações realizadas, o Capítulo 5 apresentará um apanhado geral sobre o sistema CO-OFDM, bem como quais são as contribuições do presente trabalho e quais as perspectivas de futuros trabalhos abordando o assunto.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo visa fornecer algumas considerações finais acerca do trabalho como um todo, apresentando conclusões a partir resultados obtidos nas simulações realizadas. Além disso, também serão apresentadas as contribuições que este trabalho forneceu durante seu desenvolvimento e quais os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir dele.

5.1. CONCLUSÕES

Durante o Capítulo 1, o tema CO-OFDM foi contextualizado, de forma o leitor entenda a importância desta técnica de transmissão de dados e informações, além de mostrar que o setor de telecomunicações está em constante avanço. O Capítulo 2 forneceu as informações básicas necessárias para compreender minimamente o sistema objeto de estudo deste trabalho. O Capítulo 3 detalhou a forma que os experimentos foram desenvolvidos para, no Capítulo 4, apresentar os resultados obtidos. Analisando os resultados fornecidos no capítulo anterior, é possível afirmar que o sistema CO-OFDM se mostra muito promissor para as telecomunicações.

No primeiro cenário, é possível perceber que quanto maior o valor de OSNR, melhor será a recepção do sinal. Além disso, a modulação 4QAM apresentou os melhores resultados que o 16QAM e o 64QAM, devido à distância entre os símbolos ser maior para o 4QAM em relação às outras. A taxa de bits exerceu uma pequena influência sobre o desempenho do sistema, sendo que a maior taxa (96 Gbps) teve valores de BER e EVM ligeiramente maiores que a menor taxa (48 Gbps). Ainda assim, ambas as taxas podem ser aplicadas no sistema CO-OFDM, indicando que o sistema CO-OFDM tem capacidade para altas taxas de transmissão (na casa dos Gbps).

O segundo cenário forneceu resultados que mostram que a quantidade máxima de subportadoras não altera o desempenho do sistema. Porém, a porcentagem destas subportadoras que é utilizada traz diferenças significativas. Quanto menos subportadoras são utilizadas em relação ao total reservado (quanto menor a porcentagem de uso), melhor é a detecção do sinal e demodulação OFDM. Uma hipótese que explicaria este resultado é que, quando o *OFDM Demodulation* faz a decisão da posição dos símbolos, a quantidade de subportadoras que carrega esses símbolos é menor e, por isso, a chance de erros de decisão se torna menor. Neste

caso, cada subportadora “carrega” um símbolo e, por isso, o diagrama de constelação apresenta menos pontos detectados, como pode ser visto na Figura 43, que ilustra o diagrama de constelação referente ao segundo cenário, utilizando o 4QAM como modulação digital, com OSNR de 50 dB e com a quantidade máxima de 512 subportadoras, sendo utilizadas apenas 12,5% delas (ou seja, 64 subportadoras utilizadas). Para fins de comparação, a Figura 44 ilustra o diagrama de constelação para a mesma situação, mas utilizando 100% das subportadoras.

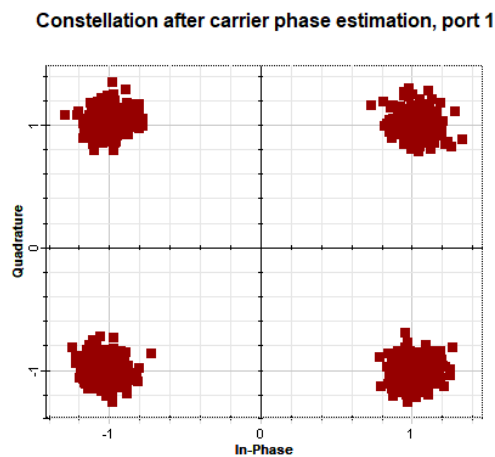


Figura 43 - Constelação utilizando 64 de 512 subportadoras, Fonte: a autora.

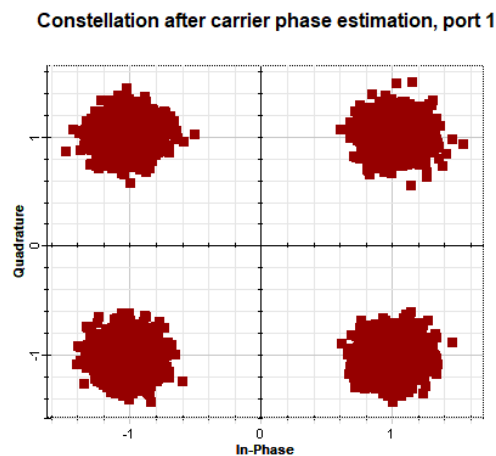


Figura 44 - Constelação utilizando 512 de 512 subportadoras. Fonte: a autora.

A hipótese apresentada, no entanto, contradiz a proposta do OFDM de permitir utilizar mais subportadoras com alta eficiência de transmissão, comparado ao FDM tradicional. Isto porque os resultados apresentados pelas Figuras 43 e 44 indicam que o uso de menos subportadoras melhoram a eficiência do sistema. Para entender as causas desta melhora de detecção com menos subportadoras utilizadas, foram analisados os espectros ópticos para as situações com máximos de 512 e 256 subportadoras, utilizando 100%, 50% 25% e 12,5% das

subportadoras e com OSNR de 50 dB em ambas as situações. Os espectros obtidos para as duas situações são ilustrados pelas Figuras 45 e 46, respectivamente.

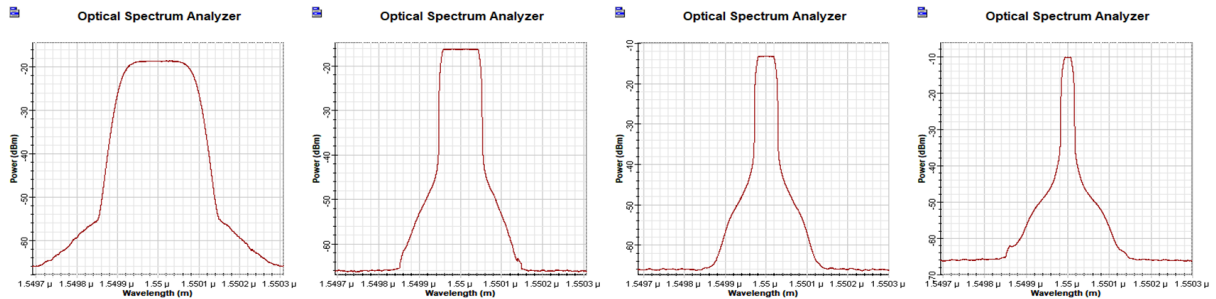


Figura 45 - Espectros ópticos para o segundo cenário, situação 1 (512 subportadoras máximas, com usos de 100%, 50%, 25% e 12,5%, respectivamente). Fonte: a autora.

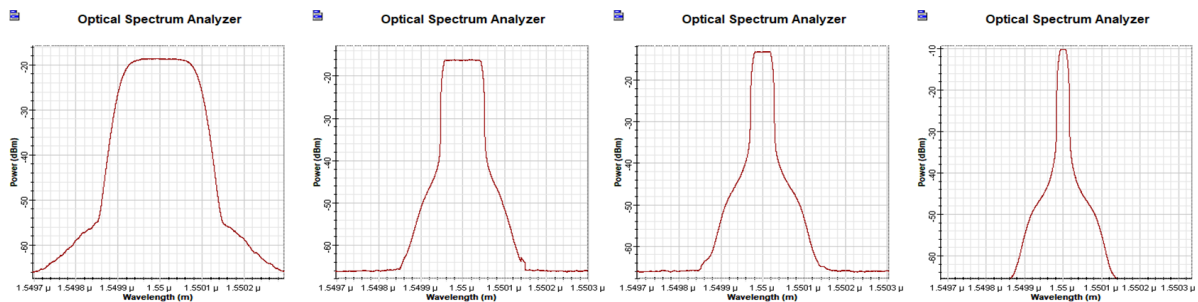


Figura 46 - Espectros ópticos para o segundo cenário, situação 1 (256 subportadoras máximas, com usos de 100%, 50%, 25% e 12,5%, respectivamente). Fonte: a autora.

Comparando as Figuras 45 e 46, percebe-se que, para uma mesma porcentagem de uso, o espectro será o mesmo para diferentes quantidades máximas de subportadoras. Ou seja, tanto para 512 quanto para 256 subportadoras, se são utilizadas 100% das subportadoras os espectros serão iguais. Porém, ao analisar os espectros para uma mesma situação, comparando as porcentagens de uso (por exemplo, analisando os espectros da Figura 45 apenas), percebe-se que quanto menor a porcentagem de uso de subportadoras, maior é o nível de potência máxima do espectro. Quando se utiliza 12,5% das subportadoras, o nível da potência do sinal é de aproximadamente -10 dB, enquanto que quando se utiliza 100%, o nível de potência é de aproximadamente -19 dB. O que se pode dizer a respeito destes resultados é que a potência do sinal óptico é dividido entre as subportadoras e, por isso, quanto menos subportadoras são utilizadas maior será a potência de cada subportadora e, com isso, o nível de potência no espectro será maior. Logo, se a potência de cada subportadora é maior, o desempenho do sistema será melhor.

Um aspecto importante a ser considerado nesta análise é que não foi aplicado nenhum ganho óptico ao sinal, visto que o amplificador óptico ao final do bloco RTO (Figura 10) tem ganho de 0 dB no sinal, mas aplica uma figura de ruído de 4 dB. Para verificar se o nível de potência das subportadoras realmente influencia no desempenho do sistema, foi realizado um teste no qual se varia o ganho óptico, no amplificador do bloco RTO, de 0 a 9 dB, considerando o máximo de 512 subportadoras com 100% de uso delas e OSNR de 50 dB (fixado no bloco *Set OSNR*). Para cada valor de ganho óptico no amplificador, foi anotado o valor de EVM calculado pelo *OFDM Demodulation*. Os resultados obtidos foram utilizados para desenhar o gráfico ilustrado na Figura 47.

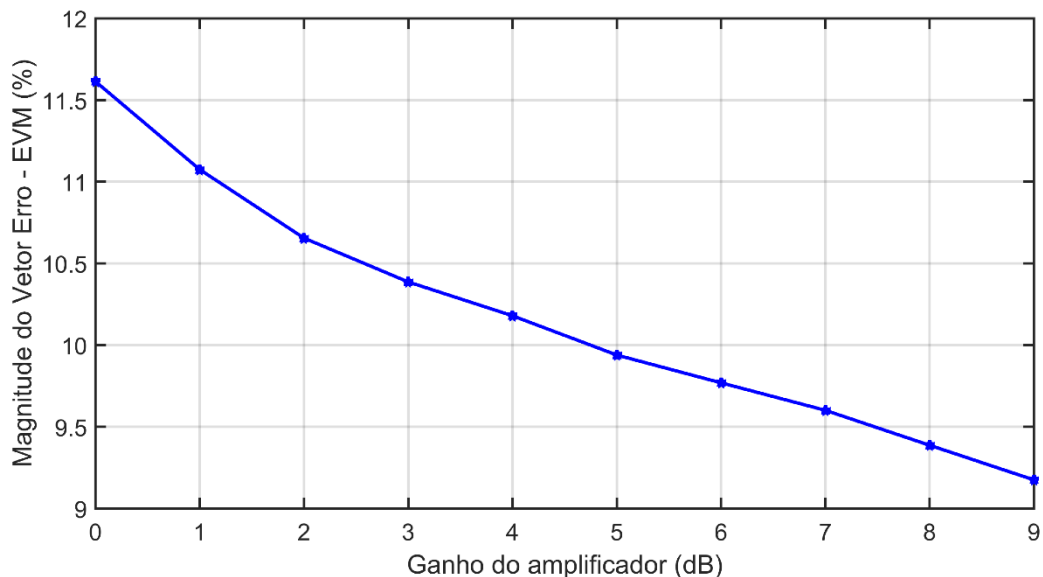


Figura 47 - Relação Ganho do amplificador óptico x EVM, quando o máximo de subportadoras é 512 e o uso é de 100%. Fonte: a autora.

Pela Figura 47, é possível perceber que o aumento no ganho óptico reduz o valor da EVM, o que indica uma melhora no desempenho (pois sabe-se que a redução da EVM significa que a detecção dos símbolos é mais próxima do ponto ideal). Quando o ganho óptico foi de 9 dB, o valor de EVM foi próximo ao encontrado quando o sistema tem um máximo de 512 subportadoras, com uso de 25% delas e com OSNR de 45 dB, resultado mostrado na Tabela 5. Ou seja, o ganho óptico aumenta o nível de potência das subportadoras e, com isso, traz melhorias no desempenho final do sistema, além de permitir utilizar uma maior porcentagem de subportadoras para a transmissão.

Quanto ao terceiro cenário, deve-se considerar, primeiramente, que a fibra exerce grande influência sobre o sinal e a sua recepção, devido aos efeitos lineares e não-lineares citados no Capítulo 2. Para reduzir a ação destes efeitos, o próprio *OFDM Demodulation* faz uma compensação da dispersão que o sinal sofre ao longo da propagação, e essa compensação é feita de acordo com a distância percorrida, como foi explicado no Capítulo 4. Analisando os resultados expostos sobre o terceiro cenário, pode-se dizer que o aumento da distância de propagação afetou, principalmente, o valor da EVM, como pode ser visto no gráfico da Figura 42 e nos dados da Tabela 10, pois os símbolos detectados tendem a ficar mais dispersos do ponto ideal de detecção conforme a distância aumenta.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Tomando como base o tema deste trabalho e os resultados obtidos com as simulações, a autora pretende, a longo prazo, utilizar o tema como objeto de estudo para um trabalho de mestrado, estendendo ainda mais os conhecimentos na área de comunicações ópticas e técnicas utilizadas nas telecomunicações em geral. Isto porque o sistema se mostra muito promissor para aplicação nas telecomunicações. Além disso, o sistema ainda pode ser estudado para verificar seu uso com múltiplos sinais ópticos, ou seja, se é possível utilizar mais de um comprimento de onda (sinal óptico) para comportar mais usuários no sistema e, se isso for feito, qual o desempenho do sistema.

5.3. CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Durante o desenvolvimento deste trabalho, pode-se dizer que ele contribuiu para ampliar os conhecimentos da autora acerca do assunto. Isto também é importante para o futuro dos profissionais na área de telecomunicações, pois, considerando o constante avanço da área, é sempre necessário se manter atualizado sobre novas tecnologias e técnicas que surgem a todo momento. Este trabalho também contribui para que novos estudantes da área de telecomunicações tenham acesso a informações e conceitos básicos sobre o CO-OFDM, servindo como um guia para estes estudantes que buscam informações mais resumidas e de fácil entendimento.

REFERÊNCIAS

- [1] M. TEIXEIRA e P. SOMSEN, “A Evolução dos Meios de Comunicação,” Google Sites, [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/fctunlcomunicacao/evolucao>. [Acesso em 29 Novembro 2018].
- [2] F. K. G. HOSHINO, *ESTUDO E SIMULAÇÃO DA MODULAÇÃO OFDM APLICADA EM REDES ÓPTICAS DE NOVA GERAÇÃO*, Limeira, 2013.
- [3] Optiwave Systems Inc., 2018. [Online]. Available: <https://optiwave.com/applications/coherent-optical-ofdm-2/>. [Acesso em 11 Maio 2018].
- [4] W. SHIEH e I. DJORDJEVIC, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications*, Burlington, San Diego, London: Elsevier, 2010.
- [5] J. S. A. PLA, *Desing os Passive Optical Network*, Department of Telecommunications - Brno University of Tecnology, 2011.
- [6] H. ZANG e e. al, “A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks.,” *Optical Networks Magazine*, vol. 1, nº 1, pp. 47-60, 2000.
- [7] U. F. d. R. d. Janeiro. [Online]. Available: https://www.gta.ufrj.br/grad/98_2/joao/1000basex.html. [Acesso em 05 Junho 2018].
- [8] N. C. BRAGA, “Instituto NCB,” Instituto Newton C Braga, [Online]. Available: newtoncbraza.com.br/index.php/telecom-artigos/5018-te1048.html. [Acesso em 29 Novembro 2018].
- [9] A. C. PEREIRA, L. R. SILVA, L. d. R. MARTINS, L. S. CAETANO e R. G. MORAES, “Tecnologia PLC I: Alternativa para o Plano Nacional de Banda Larga,” *Teleco*, 05 Maio 2011. [Online]. Available: www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplcalt1/pagina_4.asp. [Acesso em 29 Novembro 2018].
- [10] I. POOLE, “Radio-Electronics.com,” Adrio Communications Ltd, [Online]. Available: <https://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/8qam-16qam-32qam-64qam-128qam-256qam.php>. [Acesso em 29 Novembro 2018].
- [11] E. L. PINTO e C. P. d. ALBUQUERQUE, “A Técnica de Transmissão OFDM,” *Revista Científica Periódica - Telecomunicações*, vol. 05, nº 1, 2002.
- [12] P. TURMERO, “Monografias.com,” Moografias.com S.A., [Online]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos105/multiplexacion-division-frecuencias-ortogonales-ofdm/multiplexacion-division-frecuencias-ortogonales-ofdm.shtml>. [Acesso em 11 Maio 2018].
- [13] W. C. Corrêa, *Estudos de sistemas OFDM para Comunicações Ópticas*, São Carlos: Departamento de Engenharia Elétrica - USP, 2012.

- [14] Optiwave, *OptiSystem - [OFDM Coherent Detection Single Port Single Polarization]*, Ottawa, 2017.
- [15] Optiwave Systems Inc., “OptiSystem Help - OFDM Demodulation,” Ottawa.
- [16] L. M. ZHANG e F. R. KSCHISCHANG, “Staircase codes with 6% to 33% overhead,” *Journal os Lightwave Technology*, vol. 32, nº 10, pp. 1999-2002, 2014.
- [17] H. BAO e W. SHIEH, *Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM systems*, Melbourne: Optical Society of America, 2007.
- [18] J. A. L. SILVA, *Transmissão de Sinais OFDM com Envelope Constante em Sistemas Ópticos IMDD*, Vitória, 2011.