



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CAMPUS PATOS DE MINAS

MARCELO MALAQUIAS DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DOS FORMATOS DE MODULAÇÃO NO
DESEMPENHO DOS SISTEMAS TS-OCDMA.**

Patos de Minas

2017

MARCELO MALAQUIAS DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DOS FORMATOS DE MODULAÇÃO NO
DESEMPENHO DOS SISTEMAS TS-OCDMA.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, campus Patos de Minas, como requisito parcial para obtenção do Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini

Patos de Minas

2017

INFLUÊNCIA DOS FORMATOS DE MODULAÇÃO NO DESEMPENHO DOS SISTEMAS TS-OCDMA.

Trabalho de conclusão de curso aprovado para
obtenção do título de Bacharelado em Engenharia
Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade
Federal de Uberlândia pela banca examinadora
formada por:

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini
(Orientador)

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa

Prof. Dra. Karine Barbosa Carbonaro

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter conduzido meus passos pelos caminhos da vida estando ao meu lado diante de cada obstáculo a ser superado.

Agradeço aos meus pais, Paulo Roberto dos Santos e Cleunice Ribeiro Malaquias dos Santos, que se esforçaram durante esses 5 anos para que eu pudesse me dedicar exclusivamente aos estudos da graduação, por compreenderem as muitas ausências e intercederem pelo meu êxito. Às minhas irmãs Paula Juliana dos Santos e Roberta Malaquias dos Santos pelo incentivo prestado a mim desde o primeiro momento em que surgiu essa oportunidade. À minha noiva Juliana Alves Moreira, sem você ao meu lado seria impossível chegar este momento, obrigado pela compreensão ao longo destes anos.

Agradeço aos diversos colegas e amigos com quem tive a felicidade e a honra de conviver durante estes anos de graduação, pelos momentos bons e ruins vivenciados, pela oportunidade de conhecê-los e caminharmos juntos.

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal de Uberlândia Campos Patos de Minas, por cada ensinamento ministrado e pela competência e seriedade com que conduzem os trabalhos realizados neste Campus.

Agradeço ao Professor Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini, pela oportunidade de realizarmos o projeto de pesquisa científica que inspira o presente trabalho, pelos ensinamentos e orientações dirigidos a mim ao longo deste período.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de conquistar essa graduação e pela estrutura do LAPSE onde esta pesquisa foi desenvolvida.

Muito obrigado a todos.

Resumo

A utilização eficiente de um canal de transmissão pode ser alcançada por meio da tecnologia de acesso múltiplo por divisão de código (CDMA - *Code Division Multiple Access*). Essa técnica de multiplexação utiliza o espalhamento espectral para permitir que múltiplos usuários possam compartilhar o meio de transmissão de forma assíncrona. Os sistemas CDMA aplicados ao meio óptico são chamados de sistemas OCDMA e estes podem ser classificados como coerentes ou incoerentes, dependendo de como o código é aplicado ao sinal óptico. O presente trabalho realiza uma análise detalhada sobre a influência das técnicas de modulações digitais em um sistema coerente OCDMA com codificação de temporal de fase (*Optical Time-Spread - TS-OCDMA*). Nesse contexto, objetivou-se aproximar as variáveis das simulações a valores de sistemas práticos, de forma que os resultados deste trabalho possam ser referência para uma implementação real. Assim, os desempenhos dos sistemas OCDMA com diferentes modulações digitais são comparados em termos de taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*).

Palavras-chave: Codificação temporal de fase, Acesso Múltiplo por Divisão de Código em domínio Óptico (OCDMA), modulações digitais, sistemas de comunicações ópticos.

Abstract

The efficient use of a transmission channel can be achieved by means of Code Division Multiple Access (CDMA) technology. This multiplexing technique uses spectral spreading to allow multiple users to share the transmission medium asynchronously. CDMA systems applied to the optical medium are known as OCDMA systems and these can be classified as coherent or incoherent, depending on how the user code is applied to the optical signal. The present work performs a comprehensive analysis on the influence of digital modulation techniques on a coherent OCDMA system with Time-Spread (TS-OCDMA). In this context, the simulation variables were approximated to values of practical systems, so that the results of this work can be a reference for a real implementation. Thus, the performances of OCDMA systems with different digital modulations are compared in terms of bit error rate (BER).

Key words: Phase Temporal Coding, Optical Code Division Multiple Access (OCDMA), Digital Modulations , Optical Communications Systems.

Lista de Figuras

FIGURA 1-1 - ESQUEMAS DE ACESSO MÚLTIPLO PARA N USUÁRIOS.	11
FIGURA 2-1: CONFIGURAÇÃO DE REDE ÓPTICA UTILIZANDO ESQUEMA DE CODIFICAÇÃO OCDMA.	15
FIGURA 2-2: SINAL DE INTERESSE RECEBIDO E SINAIS INTERFERENTES EM SISTEMA ASSÍNCRONO CDMA.	17
FIGURA 2-3: DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA OCDMA COM CODIFICAÇÃO DE FASE TEMPORAL (TS-OCDMA).	19
FIGURA 2-4 - VISÃO DETALHADA DOS (A) PULSOS ÓPTICO ANTES DO PROCESSO DE CODIFICAÇÃO E (B) CHIPS ÓPTICOS APÓS A CODIFICAÇÃO DOS PULSOS NO SISTEMA TS- OCDMA.	20
FIGURA 2-5- TÉCNICAS DE MODULAÇÃO NO DOMÍNIO ÓPTICO: OOK, BITS 1/0 MODULADOS EM DOIS NÍVEIS EM AMPLITUDES DISTINTAS.	21
FIGURA 2-6 – DPSK, BITS 1/0 MODULADOS PELA DIFERENÇA DE FASE π, PORÉM EM MESMA AMPLITUDE.	22
FIGURA 2-7- CHAVEAMENTO POR DESLOCAMENTO DE FASE BINÁRIA (BPSK).	23
FIGURA 2-8 - CHAVEAMENTO POR DESLOCAMENTO DE FASE DE QUADRATURA (QPSK).	24
FIGURA 2-9 – CONSTELAÇÕES 16QAM, 32QAM E 64QAM.	25
FIGURA 3-1 - IMPLEMENTAÇÃO DO TRANSMISSOR OOK-RZ COM CODIFICAÇÃO TS-OCDMA.	27
FIGURA 3-2 – IMPLEMENTAÇÃO DO CODIFICADOR TEMPORAL DE FASE (TS)	28
FIGURA 3-3 - LINK ÓPTICO DE TRANSMISSÃO.	29
FIGURA 3-4 – RECEPTOR E DECODIFICADOR TEMPORAL DE FASE.	30
FIGURA 3-5 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO TRANSMISSOR RZ-DPSK.	31
FIGURA 3-6 – IMPLEMENTAÇÃO DO MODULADOR RZ-DPSK E CODIFICADOR.	32
FIGURA 3-7 - COMPOSIÇÃO INTERNA DO BLOCO ÓPTICAL DPSK TRANSMITTER.	32
FIGURA 3-8 – DECODIFICADOR E IMPLEMENTAÇÃO DO MODULADOR RZ-DPSK.	33
FIGURA 3-9 - COMPOSIÇÃO INTERNA DO BLOCO ÓPTICAL DPSK RECEIVER.	33
FIGURA 3-10 – IMPLEMENTAÇÃO DO MODULADOR BPSK E CODIFICADOR.	34
FIGURA 3-11 -DECODIFICADOR TS-OCDMA E IMPLEMENTAÇÃO DO DEMODULADOR BPSK.	35
FIGURA 4-1 - (A) SEQUÊNCIA DE PULSOS TRANSMITIDOS PELO USUÁRIO 1, SEM CODIFICAÇÃO. (B) SEQUÊNCIA DE PULSOS TRANSMITIDOS PELO USUÁRIO 1 COM CODIFICAÇÃO TEMPORAL DE FASE.	36
FIGURA 4-2 - (A) PULSOS ÓPTICOS MISTURADOS NA SAÍDA DO MULTIPLEXADOS; (B) PULSOS DECODIFICADOS NO CIRCUITO DO RECEPTOR; (C) SINAL DE INTERESSE DO USUÁRIO APÓS O NOLM; (D) PULSO ÓPTICO RECUPERADO.	37
FIGURA 4-3 - (A) CONSTELAÇÃO DO SINAL RZ-OOK NO TRANSMISSOR E (B) CONSTELAÇÃO DO SINAL RZ-OOK NO RECEPTOR.	38
FIGURA 4-4 – (A) DIAGRAMA DE OLHO DO USUÁRIO 1 DO SISTEMA PARA UMA BER<10⁻⁵ E (B) DIAGRAMA DE OLHO DO USUÁRIO 32 DO SISTEMA PARA UMA BER < 10⁻⁴.	38
FIGURA 4-5 - INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA E DA TAXA DE BITS NA BER DO SISTEMA MODULADO EM RZ-OOK.	40
FIGURA 4-6 – (A) DIAGRAMA DE OLHO PARA TAXA DE 20 GBPS E COMPRIMENTO DA FIBRA IGUAL A 40 KM. (B) DIAGRAMA DE OLHO PARA TAXA DE 40 GBPS E COMPRIMENTO DE FIBRA IGUAL A 40 KM.	40
FIGURA 4-7 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE USUÁRIOS NA TAXA DE ERRO DE BITS NO SISTEMA MODULADO EM RZ-OOK.	41
FIGURA 4-8 - (A) SEQUÊNCIA DE PULSOS RZ-DPSK TRANSMITIDOS PELO USUÁRIO 1, SEM CODIFICAÇÃO. (B) SEQUÊNCIA DE PULSOS TRANSMITIDOS PELO USUÁRIO 1 COM CODIFICAÇÃO TEMPORAL DE FASE.	42
FIGURA 4-9 - (A) PULSOS ÓPTICOS SOBREPOSTOS NA SAÍDA DO MULTIPLEXADOR. (B) PULSOS ÓPTICOS RECUPERADOS NA SAÍDA DO DECODIFICADOR E (C) SINAL DE INTERESE APÓS O RECEPTOR DPSK.	43

FIGURA 4-10 – (A) CONSTELAÇÃO DO SINAL RZ-DPSK NO TRANSMISSOR E (B) CONSTELAÇÃO DO SINAL RZ-DPSK RECUPERADOR NO RECEPTOR.....	44
FIGURA 4-11 - EM (A) O DIAGRAMA DE OLHO PARA O USUÁRIO 2 E (B) O DIAGRAMA DE OLHO PARA O USUÁRIO 3.....	44
FIGURA 4-12 - INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA E DA TAXA DE BITS NO DESEMPENHO DO SISTEMA.....	45
FIGURA 4-13 - INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE INTERFERENTES NA BER DO SISTEMA TS-OCDMA MODULADO EM RZ-DPSK.....	46
FIGURA 4-14 - (A) SINAL NA SAÍDA DO MODULADOR ÓPTICO E (B) SINAL CODIFICADO EM TS-OCDMA.....	47
FIGURA 4-15 - (A) SINAIS DE TODOS OS USUÁRIOS MULTIPLEXADOS E (B) SINAL RECUPERADO NO RECEPTOR TS-OCDMA.....	48
FIGURA 4-16 - (A) CONSTELAÇÃO DO SINAL BPSK NO CIRCUITO TRANSMISSOR. (B) CONSTELAÇÃO DO SINAL BPSK RECUPERADO NO RECEPTOR.....	48
FIGURA 4-17 - EM (A) O DIAGRAMA DE OLHO $BER < 10^{-9}$ E (B) DIAGRAMA DE OLHO $BER = 0$	49
FIGURA 4-18 - INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA E DA TAXA DE BITS NO DESEMPENHO DO SISTEMA MODULADO EM BPSK.....	50
FIGURA 4-19 – INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE USUÁRIOS INTERFERENTES NO DESEMPENHO DO SISTEMA TS-OCDMA.....	51
FIGURA 4-20 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TRÊS MODULAÇÕES APRESENTADAS.....	52
FIGURA 4-21 - (A) CONSTELAÇÃO DO SINAL QPSK NO TRANSMISSOR, (B) CONSTELAÇÃO DO SINAL QPSK RECUPERADO NO RECEPTOR.....	53
FIGURA 4-22 - (A) CONSTELAÇÃO DO SINAL 16QAM NO TRANSMISSOR, (B) CONSTELAÇÃO DO SINAL 16QAM RECUPERADO NO RECEPTOR.....	53
FIGURA 4-23 - (A) CONSTELAÇÃO DO SINAL 32QAM NO TRANSMISSOR, (B) CONSTELAÇÃO DO SINAL 32QAM RECUPERADO NO RECEPTOR.....	54
FIGURA 4-24 - A) CONSTELAÇÃO DO SINAL 64QAM NO TRANSMISSOR, (B) CONSTELAÇÃO DO SINAL 64QAM RECUPERADO NO RECEPTOR.....	54
FIGURA 4-25 - CIRCUITO TRANSMISSOR DO SISTEMA MODULADO EM QPSK.....	55
FIGURA 4-26 – CIRCUITO RECEPTOR DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO MODULADO EM QPSK.....	56

Lista de Acrônimos

AM – <i>Modulation Amplitude</i>	Modulação em Amplitude
ASK - <i>Amplitude Shift-Keying</i>	Chaveamento de Amplitude
BASK – <i>Binary ASK</i>	Binário ASK
BER - <i>Bit Error Rate</i>	Taxa de Erro de Bit
BPSK - <i>Binary Phase Shift Keying</i>	Binário PSK
CDMA – <i>Code Division Multiple Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão de Código
CSMA/CD - <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>	Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora com Detecção de Colisão
DCF – <i>Dispersion Compensating Fiber</i>	Fibra Compensadora de Dispersão
DPSK – <i>Diferencial Phase Shift Keying</i>	Chaveamento Diferencial de Fase
DS – <i>Direct Sequence</i>	Sequência direta
EAM – <i>Electroabsorption modulator</i>	Moduladores Baseados em Eletro-absorção
FH – <i>Frequency Hopping</i>	Salto em Frequência
FM – <i>Frequency Modulation</i>	Modulação em Frequência
FSK - <i>Frequency Shift-Keying</i>	Chaveamento de Frequência
ISI – <i>Inter-Symbol Interference</i>	Interferência Inter Simbólica
LASER – <i>Light Amplified Stimulated Emission of Radiation</i>	Luz Amplificada por Emissão Estimulada de Radiação
LED - <i>Light Emitting Diode</i>	Diodo Emissor de Luz
MAI – <i>Multi-access interference</i>	Interferência de Múltiplo Acesso
M-ASK – <i>M-ary Amplitude Shift-Keying</i>	<i>M-ary Amplitude Shift-Keying</i>
MOE – <i>Eletro-Óptica Modulation</i>	Moduladores Baseado em Eletro-óptica
M-PSK - <i>M-ary Phase Shift Keying</i>	<i>M-ary Phase Shift Keying</i>
M-QAM - <i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i>	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i>
MZI – <i>Mach Zehnder Interferometer</i>	Interferômetro Mach Zehnder
NOLM - <i>Nonlinear Optical Loop Mirror</i>	<i>Nonlinear Optical Loop Mirror</i>
OCDMA - <i>Optical Code Division Multiplexing Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão de Código em domínio Óptico
OOK – <i>On-Off Keying</i>	Chaveamento On-Off
OSNR - <i>Optical Signal to Noise Ratio</i>	Relação Sinal Ruído no domínio Óptico
OTDMA – <i>Optical Time Division Multiplexing Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo Óptico
PM – <i>Phase Modulation</i>	Modulação em Fase
PSK - <i>Phase Shift-Keying</i>	Chaveamento de Fase
QAM - <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	Modulação em Amplitude e Quadratura
QPSK - <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Chaveamento por Mudança de Fase e Quadratura
RZ – <i>Return to zero</i>	Retorna ao Zero
SPC – <i>Spectral phase coding</i>	Codificação de Fase Espectral
SPECTS-OCDMA - <i>Spectral Phase-Encoded Time Spreading-OCDMA</i>	
SPM – <i>Self Phase Modulation</i>	Automodulação de Phase
TDMA – <i>Time Domain Multiplexing Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
TS – <i>Time Spreading</i>	Espalhamento Temporal
WDMA – <i>Wavelength Division Multiple Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão de Comprimento de Onda
W-H <i>Walsh-Hadamard</i>	Walsh-Hadamard
XPM - <i>Cross Phase Modulation</i>	Modulação Cruzada de Fase
WH/TS – <i>Wavelength Hopping/Time Spreading</i>	Espalhamento em Comprimento de Onda/ Espalhamento Temporal

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	IV
Resumo.....	V
Abstract	VI
Lista de Figuras	VII
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos a serem atingidos com o trabalho de pesquisa	12
1.2 Organização do texto.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Sistemas OCDMA.....	14
2.2 Sistema OCDMA Coerentes e Incoerentes	16
2.3 Sistemas Síncronos e Assíncronos	16
2.4 Códigos Walsh-Hadamard	17
2.5 Codificação Temporal de Fase.....	18
2.6 Modulação no domínio óptico.....	20
2.6.1 Modulações ASK – <i>Amplitude Shift-Keying</i>	21
2.6.2 Modulações PSK - <i>Phase Shift-Keying</i>	21
2.6.3 Modulações QAM – <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	24
3 METODOLOGIA	26
3.1 Simulação do sistema OOK-RZ com Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA).....	27
3.1.1 Transmissor e codificador	27
3.1.2 Enlace Óptico	28
3.1.3 Receptor e decodificador.....	29
3.2 Simulação do sistema RZ-DPSK com Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA).....	30
3.2.1 Transmissor e codificador	31
3.2.2 Receptor e decodificador.....	33
3.3 Simulação do sistema BPSK com Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA).....	34
3.3.1 Transmissor e codificador	34
3.3.2 Receptor e decodificador.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 Sistema RZ-OOK com codificação TS-OCDMA	36
4.1.1 Influência do comprimento da fibra e da taxa de transmissão na BER do sistema RZ-OOK.	39
4.1.2 Influência do número de interferentes na BER do sistema TS-OCDMA com modulação RZ-OOK	41
4.2 Análise do sistema modulado em RZ-DPSK com codificação TS-OCDMA.	42

4.2.1	Influência do comprimento da fibra e da taxa de transmissão na BER do sistema TS-OCDMA com modulação RZ-DPSK.....	45
4.2.2	Influência do número de interferentes na BER do sistema TS-OCDMA com modulação RZ-DPSK	46
4.3	Sistema modulado em BPSK com codificação TS-OCDMA.....	47
4.3.1	Influência do comprimento da fibra e da taxa de transmissão na BER do sistema TS-OCDMA com modulação BPSK.....	49
4.3.2	Influência do número de interferentes na BER do sistema TS-OCDMA com modulação BPSK. 50	
4.4	Comparação do desempenho entre as modulações RZ-OOK, RZ-BPSK e BPSK.....	52
4.5	Modulações avançadas M-PSK e M-QAM.....	52
5	CONCLUSÃO	57
5.1	Trabalhos Futuros.....	57
	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	58

1 INTRODUÇÃO

O aumento do número de aparelhos conectados simultaneamente às redes de comunicações ocasionou o crescimento da demanda de tráfego de dados dos sistemas de telecomunicação. Estima-se que até 2020 haverá um crescimento aproximadamente 3 vezes a quantidade de dados de tráfego em redes IP com relação aos valores observados em 2015, principalmente devido à quantidade de equipamentos conectados à rede como tablets, smartphones e TV's com internet e a forte demanda por vídeo [1].

No decorrer destes anos é notória a necessidade de implementação de sistemas que possibilitem maiores taxas e transmissão de dados de forma a aproveitar melhor a largura de banda do canal e permitir melhor escalabilidade ao sistema. Essa escalabilidade pode ser visualizada em três dimensões: (i) quanto ao tamanho, ou seja, adição de usuários e recursos ao sistema aumentando assim a expansão da rede; (ii) em relação à distância geográfica possibilidade de acesso a distâncias maiores mantendo o desempenho; (iii) e também à facilidade de administração.

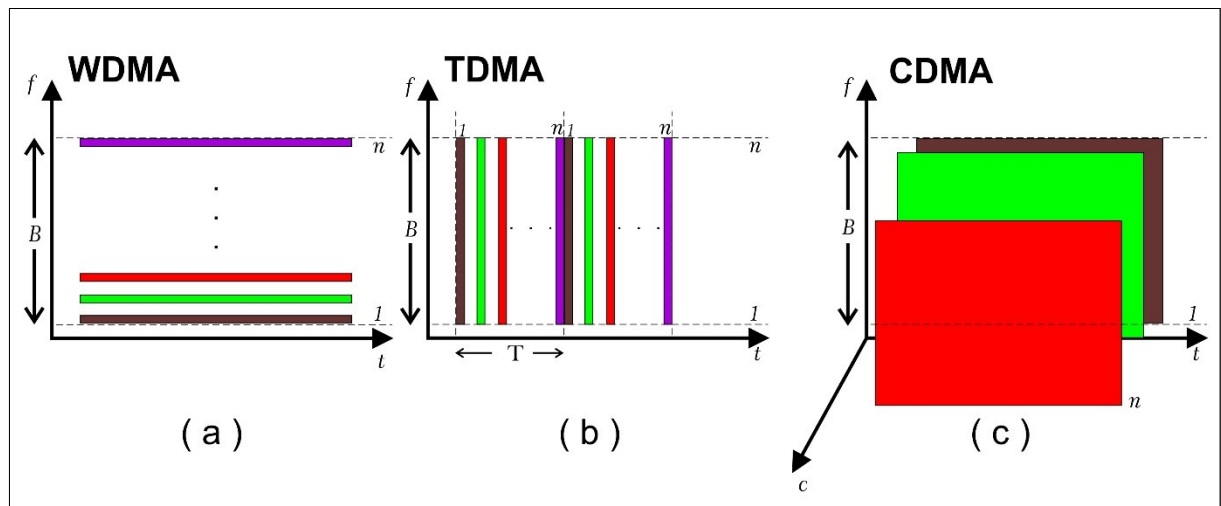
Aplicações militares foram inicialmente desenvolvidas em meados de 1950, mas apenas no fim dos anos de 1970 a ideia de acesso múltiplo por divisão de código (CDMA - *Code Division Multiple Access*); empregando a técnica de espalhamento espectral começou a ser explorada para uso civil em sistemas de comunicações móveis. A evolução dos processadores de sinais digitais, executando funções como codificação, regeneração, multiplexação, filtragem, etc. tornou viável a implementação prática [2]-[3]. O sucesso da tecnologia CDMA em comunicações móveis motivou intensos estudos sobre seus benefícios em comunicações ópticas explorando a largura de banda disponível nas fibras ópticas [4].

A aplicação da tecnologia CDMA em meio óptico (OCDMA - *Optical Code Division Multiplexing Access*) consiste em efetuar operações de codificação e decodificação em domínio totalmente óptico para promover acesso à rede. Caso objetive-se prover multiplexação de canais em uma rede de transporte a modulação é denominada OCDM [3].

As várias técnicas de multiplexação e demultiplexação utilizadas nos sistemas de comunicação permitem que vários usuários coexistam dentro de um mesmo canal. Na Figura 1-1, apresenta-se os 3 sistemas mais utilizados e que permitem que o meio de transmissão seja compartilhado pelos usuários. (a) Sistema de Acesso Múltiplo por Divisão de Comprimento de Onda (WDMA - *Wavelength Division Multiple Access*); (b) Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA - *Time Domain Multiplexing Access*) e (c) Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA) [5].

Os sistemas TDMA e WDMA possuem alocações de canais fixas caracterizando-os como sistemas determinísticos. Já o CDMA depende da quantidade de códigos presentes, que se manifestam como interferentes em relação ao código desejado. Sendo assim, este último aceita uma degradação maior em função da quantidade de usuários admitidos no sistema, o que o caracteriza como sistema de multiplexação estatística [6]. Portanto, ao observar-se a técnica de acesso e multiplexação CDMA, nota-se que os usuários transmitem seus dados de maneira simultânea utilizando todo o espectro de frequência disponível. Por isso o CDMA é visto como uma técnica promissora para as redes de transmissão, características como robustez e escalabilidade despontam devido à flexibilidade e capacidade de reconfiguração da tecnologia [7].

Figura 1-1 - Esquemas de acesso múltiplo para N usuários.



Com o objetivo de obter a melhor eficiência espectral e de potência em um sistema de comunicação foram desenvolvidas diversas técnicas de modulação. A eficiência espectral tem como objetivo atingir a melhor eficiência no uso da faixa de frequência destinada a transmissão do sinal. A eficiência de potência estabelece um compromisso com a energia utilizada no processo [6].

Inicialmente as técnicas de transmissão desenvolvidas e aplicadas nos sistemas de comunicações eram as modulações em amplitude (AM - *Amplitude Modulation*), em frequência (FM - *Frequency Modulation*) e fase (PM - *Phase Modulation*) da portadora de transmissão de sinais. Posteriormente surgiram as técnicas de modulação digital em amplitude (ASK - *Amplitude Shift-Keying*), frequência (FSK - *Frequency Shift-Keying*) e fase (PSK - *Phase Shift-Keying*). As técnicas mais recentes citadas visam aumentar a sofisticação do processo. No entanto é imprescindível que os processos de modulação mantenham um compromisso de

simplicidade na detecção e na recepção. Por isso, ao escolher um esquema de modulação características como alta eficiência espectral e de potência; robustez aos efeitos dispersivos lineares e não lineares; baixo custo e facilidade de implementação; baixa emissão de radiação fora da faixa que está transmitido devem ser observadas [6].

Recentemente foram propostos esquemas BPSK - *Binary Phase Shift Keying* e QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying* em sistemas OCDMA, manipulando altas taxas de codificação e transmissão [6]. É objetivo deste trabalho pesquisar além das modulações já citadas, as modulações da família QAM-*Quadrature Amplitude Modulation*, que tem obtido uma performance satisfatória em comparação aos demais sistemas de modulação e, por isso seu uso está sendo bastante explorado nos meios de comunicação. Nestes sistemas de modulação digital é realizado o mapeamento das possíveis sequências de bits de um comprimento preestabelecido em um símbolo [22]. As alterações em amplitude, frequência e fase compõe a formação das constelações em análise.

1.1 Objetivos a serem atingidos com o trabalho de pesquisa

Neste trabalho objetiva-se o estudo do desempenho de uma rede de transmissão óptica coerente com codificação temporal de fase (*Time Spreading-OCDMA – TS-OCDMA*), quando aos dados a serem transmitidos são aplicados diferentes tipos de modulações digitais. Neste contexto, observa-se como o sistema de transmissão se comporta com relação à capacidade de transmissão de bits, comprimento da fibra, número de usuários ativos e taxa de erro de bit (BER-*Bit Error Rate*). Estas análises permitirão uma boa observação quanto à escalabilidade do sistema uma vez que o objetivo deste tipo de codificação é permitir que dados referentes a múltiplos usuários sejam transmitidos em um canal compartilhado, aproveitando ao máximo a largura de banda do sistema, com a menor taxa de erros possível.

A explanação deste sistema em meio óptico e os testes que serão realizados também permitirão ao leitor uma melhor compreensão desta técnica de múltiplo acesso no meio óptico.

1.2 Organização do texto

O trabalho será organizado da seguinte maneira: no capítulo 2 será realizada uma extensa revisão bibliográfica com a finalidade de proporcionar ao leitor o conhecimento dos aspectos principais deste sistema, suas vantagens e desvantagens, as possíveis configurações de um sistema OCDMA com destaque para o sistema TS-OCDMA que será a base da análise deste sistema.

Ainda neste capítulo serão apresentadas as principais modulações digitais a serem investigadas neste trabalho, pois esta abordagem teórica permitirá a compreensão de como as constelações são formadas e verificar como estas técnicas auxiliam no ganho de performance dos sistemas de telecomunicações.

No capítulo 3 será demonstrada toda a metodologia utilizada para a implementação do sistema OCDMA em software de simulação, bem como a geração das modulações digitais e os principais componentes do sistema.

Os resultados das simulações e as discussões sobre o desempenho das técnicas de modulação serão apresentadas no capítulo 4. E, finalmente no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões sobre o trabalho e as perspectivas de desenvolvimento futuro do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas OCDMA

A aplicação da tecnologia CDMA em meio óptico (OCDMA) consiste em efetuar operações de codificação e decodificação em domínio totalmente óptico para promover acesso ao canal. Caso objective-se prover multiplexação de canais em uma rede de transporte a modulação é denominada OCDM [3].

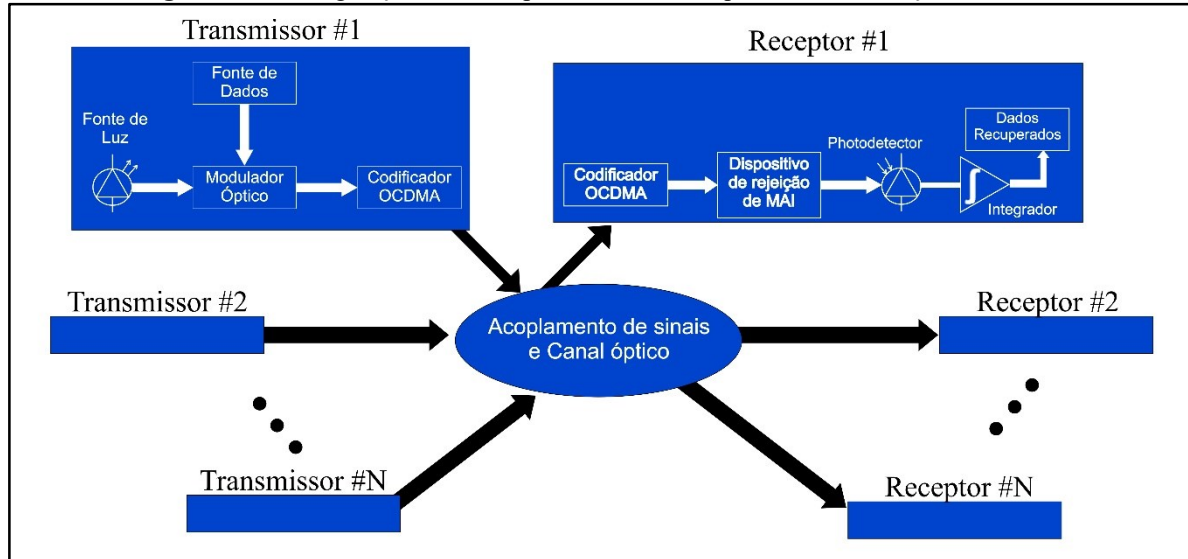
As pesquisas e trabalhos sobre a tecnologia OCDMA possuem suas bases fundamentadas nos trabalhos apresentados em [7] e [8]. Em seu trabalho Prucnal [8] propôs que a codificação e decodificação de pulsos ultra-curtos coerentes no domínio da frequência poderiam constituir a base de um sistema de telecomunicações óptica de acesso múltiplo de divisão de código. Ele mostrou que sequências diretas pseudo-ortogonais poderiam ser implementadas para codificação temporal utilizando fibras ópticas como linhas de atraso, e uma abordagem semelhante seria usada para os decodificadores ou correlatores. Este princípio possibilitou criar codificadores e decodificadores sem a necessidade de intervenção eletrônica. Weiner em [9] mostrou em seus trabalhos que em sistemas coerentes os pulsos ultracurtos e com grande largura espectral poderiam ser produzidos e manipulados utilizando codificação de fase espectral [5].

A partir dos trabalhos de Prucnal e Weiner [7,8] foram propostos diversificados tipos de configuração de sistemas com a utilização da técnica de espalhamento espectral. As duas técnicas mais comuns utilizadas com a finalidade de promover o espalhamento espectral são: espalhamento por sequência direta (DS- *Direct Sequence*), onde o sinal de cada usuário é multiplicado por uma sequência pseudoaleatória que constitui as sequências binárias ortogonais cuja correlação cruzada é igual a 0 e o espalhamento espectral por salto em frequência (FH - *Frequency Hopping*), onde a portadora de cada usuário “salta” entre as diversas faixas de frequência disponíveis no espectro conforme uma sequência pseudoaleatória também previamente disponibilizada [9].

Se estas configurações forem classificadas quanto à natureza da sobreposição do sinal óptico, pode-se dividir os sistemas OCDMA em coerentes e incoerentes. Porém se a análise do sistema for realizada com base no tipo de codificação do sinal óptico, pode-se definir seis tipos de sistemas OCDMA: Codificação de intensidade no domínio temporal, codificação de intensidade no domínio espectral, codificação de fase espectral, codificação de fase temporal (codificação que será estudada neste trabalho), codificação espacial e codificação híbrida. A

combinação entre estes tipos de codificação resulta nos chamados sistemas híbridos. Na Figura 2-1 ilustra-se o esquema de um sistema OCDMA básico.

Figura 2-1: Configuração de rede óptica utilizando esquema de codificação OCDMA.



Na Figura 2-1 verifica-se o funcionamento de um sistema de transmissão OCDMA. É importante que sejam conhecidos alguns dispositivos ópticos que compõem o sistema, pois o seu funcionamento é essencial para que o leitor possa entender o funcionamento da técnica OCDMA. Este tipo de sistema requer uma fonte de luz óptica capaz de produzir pulsos ultracurtos, como por exemplo os lasers *mode-locked* [5].

Primeiramente os dados dos usuários são modulados no modulador óptico que converte o sinal elétrico em um sinal óptico, o codificador OCDMA tem a função de codificar o sinal óptico conforme os tipos de codificação que foram citados anteriormente e fazendo uso das sequências pseudoaleatórias. Cada bit dessa sequência, ou *chip*, corresponde a uma parcela do período do tempo de bit e/ou frequência do pulso inicial. Como cada usuário transmitindo no canal óptico possui um código único pode-se fazer a combinação passiva dos sinais destes usuários.

No receptor, são utilizados decodificadores configurados com características similares aos transmissores com objetivo de que no processo de decodificação ocorra a correlação do sinal e os dados de um determinado usuário seja recuperado corretamente. O sinal já decodificado passa então pelo dispositivo de rejeição de MAI (*Multi Access Interference*) que se encarrega de remover o sinal indesejado de cada usuário, uma vez que os códigos aplicados nos processos de codificação e decodificação interferem entre si conforme descrito em [5]. O dispositivo fotodetector irá converter o sinal óptico em elétrico novamente e este será o sinal recebido pelo usuário de interesse [9].

2.2 Sistema OCDMA Coerentes e Incoerentes

Os sistemas OCDMA incoerentes, geralmente usam modulação em amplitude e usam um somatório de potências para determinar a presença de “1” binário. Os códigos unipolares longos e espaçados, devido à sua natureza incoerente, são utilizados frequentemente para distinguir o padrão de dados de cada utilizador dentro de uma rede de múltiplo acesso. Técnicas comuns utilizadas para codificação e decodificação em sistemas OCDMA incoerentes são a codificação em amplitude espectral [33], codificação espacial[34], espalhamento temporal[11] e saltos em frequência com espalhamento temporal (WHTS - *Wavelength Hopping Time Spreading* -) [11]. Estes sistemas podem fazer uso de fonte de luz incoerentes, como por exemplo, LEDs (*Light Emitting Diode*). Em sistemas OCDMA as codificações de intensidade no domínio temporal [16] e a codificação de intensidade no domínio espectral [17] são tipos de sistemas incoerentes.

Os métodos de detecção coerente OCDMA podem ser divididos em duas categorias diferentes; codificação de fase espectral (SPC-OCDMA) e codificação de fase temporal (TS-OCDMA). Nos sistemas SPC-OCDMA cada componente espectral de uma fonte de múltiplos componentes de onda (*laser mode-locked*) é codificado em fase com um conjunto único de códigos de fase espectral, quando para cada usuário é atribuído uma sequência de código única. Em geral, a codificação envolve a separação do espectro modulado em "compartimentos espectrais" discretos e um desvio de fase distinto é então aplicado a cada compartimento [10].

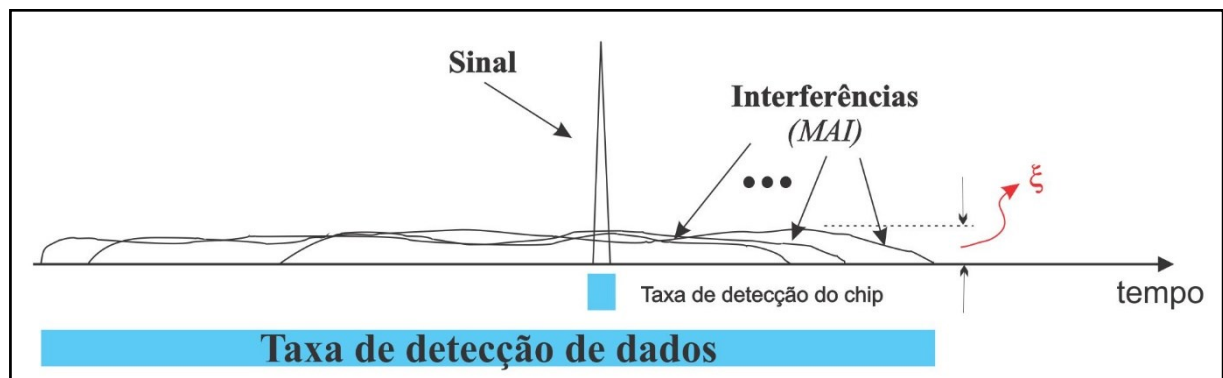
2.3 Sistemas Síncronos e Assíncronos

Os sistemas OCDMA possui a vantagem de maximizar a utilização da largura de banda do meio óptico [12]. Como a maior parte de tráfego dessa rede ocorre por rajadas, o esquema de multiplexação assíncrono permite aos usuários compartilharem toda a capacidade do canal de forma dinâmica. Pode-se então caracterizar que os sistemas assíncronos são mais adequados e eficientes que os sistemas síncronos [7]. Os sistemas OTDMA - *Optical Time Division Multiplexing Access* é um sistema síncrono, neste sistema a capacidade de transmissão é determinada previamente e de forma fixa pelo número de slots de tempo disponíveis para transmissão. Uma vantagem do sistema OCDMA é a possibilidade que o usuário tem de acessar o canal sem tempo de espera, ao contrário de alguns sistemas que também são assíncronos como o CSMA/CD - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* [7]. Dessa forma o OCDMA não requer nenhum tipo de sincronização de tempo entre transmissor e receptor.

Os sistemas OCDMA coerente podem sofrer ruído de batimento se o sinal e as interferências se sobrepuserem. Sendo o receptor rápido o suficiente para executar a detecção de taxa de chip, o ruído de batimento será a fonte de ruído dominante e, eventualmente, limitará o número máximo de usuários ativos que podem ser suportados no sistema sem prejuízos nos dados de interesse de cada usuário [13]. Porém, em um sistema OCDMA prático, a detecção de taxa de

dados no receptor é essencial. Neste caso, outra fonte importante de ruído é o ruído de interferência de acesso múltiplo (MAI), que se refere às interferências incoerentes [14]. Existem algumas técnicas que são utilizadas para reduzir os ruídos indesejados presentes no sistema, porém o ruído de batimento acompanha o pulso do sinal recuperado e não poderá ser totalmente suprimido. Na Figura 2-2 verifica-se as representações do sinal e das interferências, ξ representa o nível da interferência indesejada.

Figura 2-2: Sinal de interesse recebido e sinais interferentes em sistema assíncrono CDMA.



2.4 Códigos Walsh-Hadamard

Os códigos utilizados para inserir a codificação de fase aos pulsos ópticos nos sistemas OCDMA podem ser utilizados conforme a escolha para melhor performance do projeto, ou seja, quanto melhor a codificação utilizada menor a interferência de múltiplo acesso entre os dados dos usuários. A matriz de Hadamard é uma opção atrativa por obedecer uma relação de ortogonalidade e correlação. Ela é composta por um conjunto de códigos ortogonais construídos recursivamente a partir da seguinte relação [5]

$$H(k+1) = \begin{bmatrix} H(k) & H(k) \\ H(k) & -H(k) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

sendo $k=0,1,2, \dots$ e $H(0)=1$. Cada código de usuário será definido por uma linha dessa matriz cujo os elementos serão sempre “1” e “-1” que representam respectivamente os deslocamentos de fase “0” e “ π ”.

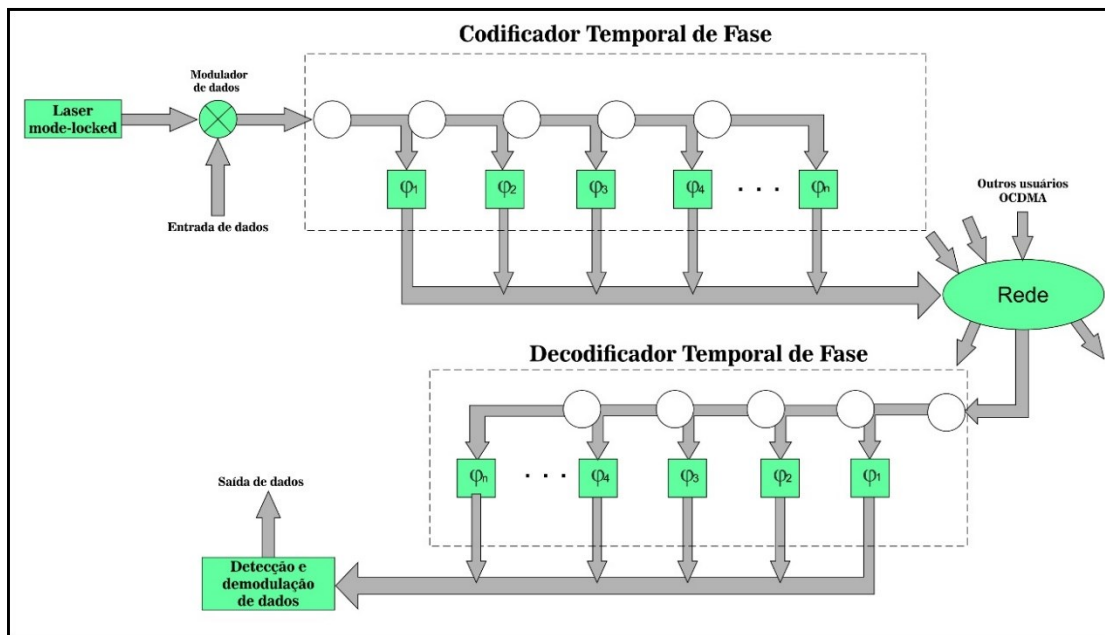
Os códigos ortogonais são projetados para ter funções de correlação cruzada próximas de zero, o que reduz consideravelmente a MAI. Porém, eles devem ser operados de forma síncrona para preservar a ortogonalidade. Os sistemas CDMA utilizados nas comunicações sem fio na tecnologia 3G utilizam esquemas de codificação binário Walsh-Hadamard. Nesta mesma linha ainda poderiam ser utilizadas os códigos pseudorrandômicos ou códigos gold [11].

2.5 Codificação Temporal de Fase

Nos sistemas TS-OCDMA, a codificação é aplicada no domínio temporal. Estes sistemas utilizam um laser *modo-locked* como fonte óptica. Porém, ao invés de explorar os múltiplos comprimentos de onda da fonte óptica, o sistema explora as características dos impulsos ultra-curtos gerados na fonte. Estes pulsos são replicados em N cópias de impulsos ou *chips* (onde N é o número de posições temporais num período de bit), cada cópia gerada é atrasada no tempo de forma igualmente espaçada. Além disso cada cópia de impulso sofre uma alteração de fase de acordo com a sequência de codificação de fase atribuída ao sistema. Neste trabalho serão utilizados os códigos Hadamard, cuja matriz são códigos ortogonais entre si, que foram explicados na seção anterior. Da mesma forma como acontece a maioria dos sistemas OCDMA coerentes, os impulsos são geralmente modulados com dados de cada usuário [11].

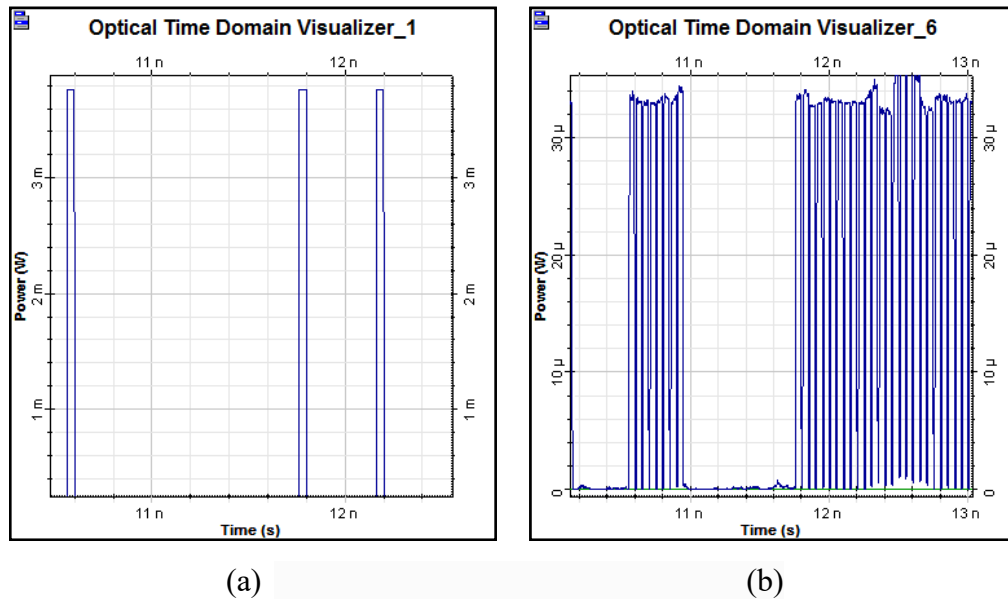
Já a codificação de fase pode ser aplicada utilizando os códigos binários (1 e -1, ou a mudança de fase π ou 0). A decodificação requer uma inversão das alterações de fase e atrasos que foram realizados no transmissor. Cada chip temporal é então presumido de forma coerente, proporcionando uma única saída de pulso que pode então ser detectada e processada através de um diodo fotodetector [11]. A Figura 2-3 mostra um exemplo de um sistema de codificação e decodificação TS-OCDMA.

Figura 2-3: Diagrama de blocos de um sistema OCDMA com codificação de fase temporal (TS-OCDMA).



Na Figura 2-3 nota-se que após a realização da modulação dos dados no transmissor o codificador de fase temporal é utilizado com o objetivo de criar N cópias do pulso original, porém cada cópia sofre atraso de maneira que ficam igualmente espaçada no tempo. O espaço entre cada pulso é chamado de intervalo temporal entre *chips*. O codificador além de realizar este deslocamento temporal promove também o deslocamento de fase de forma muito precisa. A cada cópia do pulso é aplicada um conjunto de deslocamento de fase que faz baseado na codificação específica de cada usuário. Os componentes de deslocamento de fase do decodificador são ajustados de forma conjugada às posições desses elementos do codificador do usuário de interesse. A Figura 2-4 mostra o processo de codificação do pulso.

Figura 2-4 - Visão detalhada dos (a) pulsos óptico antes do processo de codificação e (b) chips ópticos após a codificação dos pulsos no sistema TS-OCDMA.



O decodificador, cuja função é realizar uma correlação entre o sinal que está sendo recebido e o código do usuário, realiza N cópias do sinal recebido. Em seguida ele aplica um conjunto de deslocamento de fase para cada cópia e atrasa temporalmente esses pulsos por um intervalo de chip antes de recombiná-los passivamente. O resultado deste processo é que quando o decodificador de fase está ajustado para um determinado código transmitido, um forte pico de correlação será observado na forma de onda de saída do decodificador. Caso contrário quando o decodificador não está ajustado para o código transmitido, é visto na saída do decodificador um sinal cuja forma de onda se assemelha ao ruído [5].

2.6 Modulação no domínio óptico

As técnicas de modulação influenciam parâmetros como largura de banda e eficiência energética [21]. Ao realizar o processo de modulação do sinal a ser transmitido visa-se a utilização do canal de transmissão com a maior precisão possível, ou seja, transmitir uma maior quantidade de dados mantendo as perdas causadas por interferência intersimbólica (*ISI – Inter-Symbol Interference*) dentro dos padrões aceitáveis à aplicação do sistema óptico de comunicação [22].

Nessa seção apresenta-se as características referentes aos principais sistemas de modulação digitais.

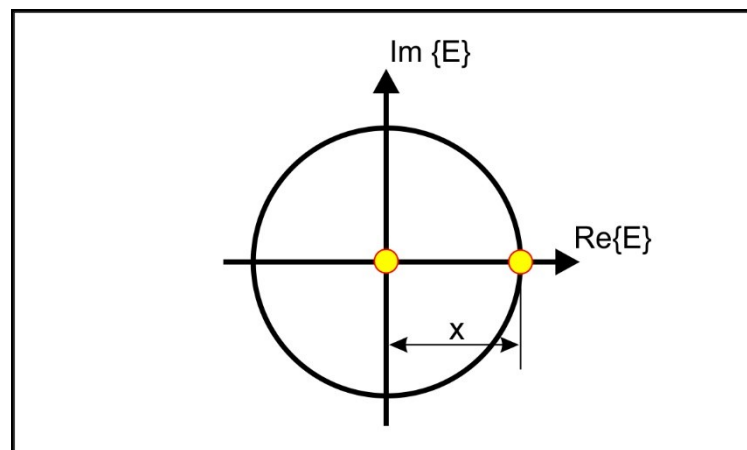
2.6.1 Modulações ASK – *Amplitude Shift-Keying*

Na modulação por chaveamento de amplitude, a amplitude da onda portadora é alterada em função do sinal digital que será transmitido. Este tipo de modulação deve ser utilizada em sistemas de comunicação onde a presença de ruído interferente na recepção é mínima ou quando se deseja reduzir o custo do sistema [22]. Pode-se dividir a modulação ASK em 2 tipos: (1) Chaveamento *on-off* (OOK – *On-Off Keying*) ou ASK Binária (BASK – *Binary ASK*); (2) ASK M-ária (M-ASK – *M-ary ASK*).

Dentre as técnicas de modulação utilizadas no domínio óptico, as mais comuns se caracterizam por manipular a intensidade de sinal [18]. Assim, um esquema bastante empregado é o de Chaveamento *On/Off* do sinal óptico (OOK) cuja representação do bit está relacionada ao deslocamento de fase π em pulsos de igual amplitude. Porém o sistema OOK é mais susceptível aos ruídos cumulativos, como o ruído balístico na recepção, por exemplo. O sinal OOK – *On-Off Keying* é mostrado na Equação 2.2 [23]. A Figura 2-5 ilustra a constelação do sinal modulado OOK.

$$\begin{aligned} S_1(t) &= A \cos(2\pi f_c t) & 0 \leq t \leq T_b \\ S_2(t) &= 0 & 0 \leq t \leq T_b \end{aligned} \quad (2.2)$$

Figura 2-5- Técnicas de modulação no domínio óptico: OOK, bits 1/0 modulados em dois níveis em amplitudes distintas.



2.6.2 Modulações PSK - *Phase Shift-Keying*

Nas modulações de chaveamento de fase (PSK – *Phase Shift-Keying*) a informação do sinal transmitido é embutida no parâmetro de fase da portadora. Esta família de modulação é

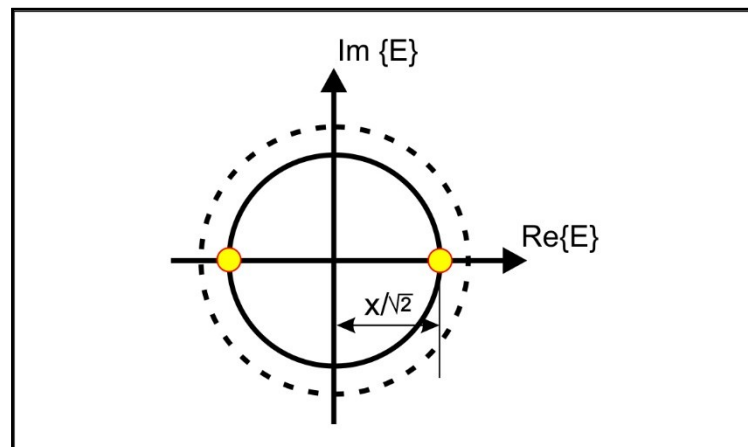
classificada por DPSK, BPSK ou PSK binário, QPSK – *Quadrature PSK* e PSK M-ária (M-PSK – *M-ary PSK*) que serão descritos a seguir.

2.6.2.1 DPSK

Outro esquema utilizado é o *DPSK – Diferencial Phase Shift Keying*, assim como no OOK a representação do bit está relacionada ao deslocamento de fase π em pulsos de igual amplitude. Durante a recepção, que é realizada utilizando um receptor balanceado, a diferença entre o sinal recebido e uma versão deslocada desse sinal correspondem ao sinal transmitido [6].

O sinal modulado em DPSK possui a amplitude $\sqrt{2}$ vezes menor que o OOK, para a mesma potência média. Desta forma a transmissão do sinal DPSK necessita da metade da potência necessária para o OOK [6] possui também maior robustez para a propagação. Além disso, é um formato de modulação rápido, estável e adequado para muitas aplicações ópticas. Se comparado ao BPSK o sinal DPSK possui algumas vantagens como taxa de erro de fase inferior e não há a necessidade de conhecer a fase absoluta [23]. A desvantagem deste sistema de modulação está no fato de que é vulnerável ao ruído de batimento e ao ruído de fase [6]. A Figura 2-6 ilustra o espaço de sinais desta modulação.

Figura 2-6 – DPSK, bits 1/0 modulados pela diferença de fase π , porém em mesma amplitude.



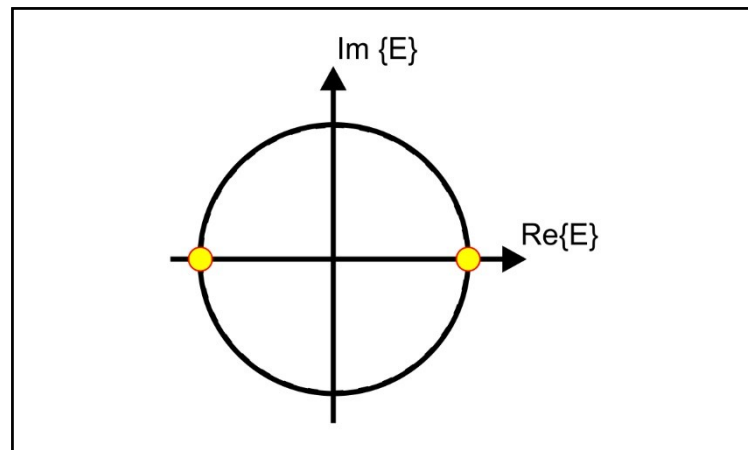
2.6.2.2 PSK binário ou BPSK

É uma modulação robusta e de fácil implementação. Os dois sinais que formam a constelação possuem fases diferentes (deslocadas em 180°), são sinais antipodal conforme observado na Figura 2.7 e possuem a mesma frequência e energia. A desvantagem desta

modulação é o fato de não utilizar bem a largura de faixa. A Equação 2.3 demonstra como os sinais são formados [22].

$$\begin{aligned} S_1(t) &= A \cos(2\pi f_c t) & 0 \leq t \leq T_b \text{ para } 1 \\ S_2(t) &= -A \cos(2\pi f_c t) & 0 \leq t \leq T_b \text{ para } 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Figura 2-7- Chaveamento por deslocamento de fase binária (BPSK).



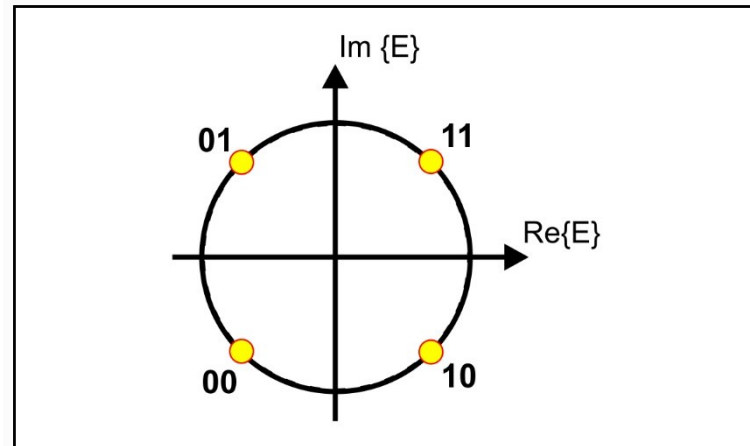
2.6.2.3 QPSK

Esta modulação utiliza a propriedade da ortogonalidade entre os sinais. Os sinais transmitidos são defasados de 90° . Dessa forma é possível transmitir a uma taxa de dados duas vezes maior que na mesma banda de um sinal PSK. Possui quatro estados de fase 0° , 90° , 180° e 270° [22]. Na Equação 2-5 verifica-se os quatro símbolos que compõe a modulação [24] e na Figura 2-8 observa-se a constelação do sinal.

$$s_{i=1,2,3,4}(t) = \begin{cases} A \cos \left[2\pi f_c t + \frac{\pi}{4} (2i - 1) \right], & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{outros} \end{cases} \quad (2.4)$$

Onde $f_c = \frac{n_c}{T}$ é a frequência da sinal da portadora e n_c é um número inteiro.

Figura 2-8 - Chaveamento por deslocamento de fase de quadratura (QPSK).



Então neste sistema de modulação são tomados dois bits no fluxo de bits e quatro fases da frequência de portadora são usadas para representar as quatro combinações dos dois bits. As quatro fases são usadas para representar as quatro combinações possíveis de dois bits: 00, 01, 10 e 11. Por isso as taxas de transmissão são duplicadas em relação ao OOK codificando dois bits em um símbolo [23]. A maior eficiência espectral se deve ao custo de maior complexidade no receptor [6].

Nos sistemas de comunicação esta modulação é bastante utilizada por não ter degradação da BER com o aumento da eficiência da largura de banda [22].

2.6.3 Modulações QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*

A modulação QAM utiliza a combinação das modulações ASK e PSK, o que permite obter uma maior taxa de dados, pois essa técnica resolve uma limitação dos dispositivos que é a dificuldade de distinguir pequenas diferenças de fases do sinal. Esta modulação foi proposta inicialmente em 1960 por C.R. Cahn [25], em sua proposta ele expandiu a modulação em fase para uma modulação com múltiplas amplitudes em fase associando mais que uma amplitude à fase permitida, a proposta de Cahn ficou conhecida como constelação QAM do tipo I formado por um número fixo de pontos igualmente espaçados em cada um dos N círculos (N-número de níveis de amplitude). Ainda em 1960, poucos meses depois Hancock e Lucky [26], propuseram a constelação do tipo II, nela os pontos do sinal estão em círculo, mas o número de pontos no círculo interno é menor do que o número de pontos no círculo externo, tornando a distância entre dois pontos adjacentes no círculo interno aproximadamente igual à do círculo externo[22].

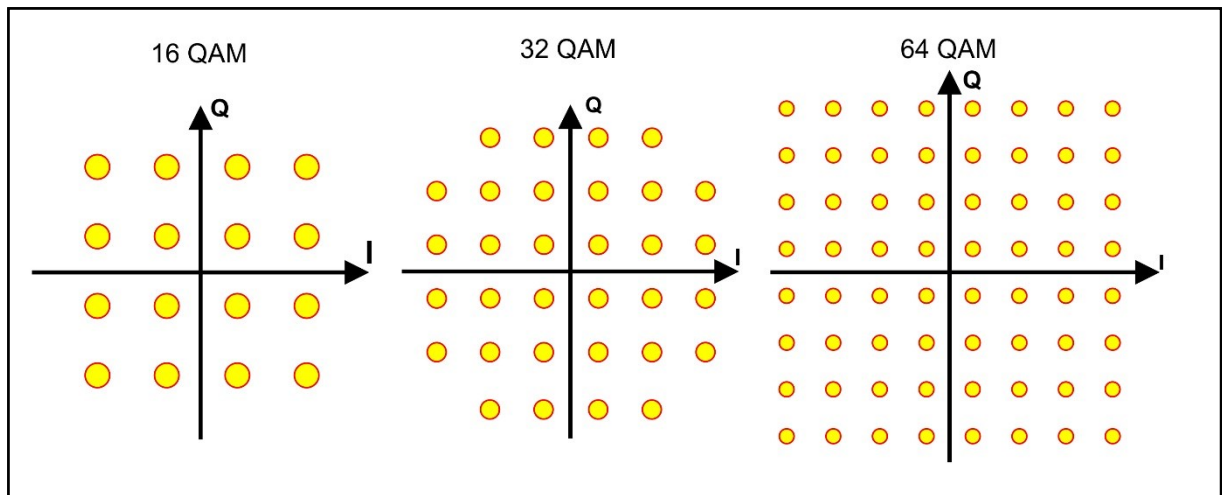
A constelação do tipo III, constelação quadrada, foi proposta em 1962 por Campopiano e Glazer [27], este tipo trouxe uma pequena melhora no desempenho quando comparada com a

constelação do tipo II e possui uma implementação mais simples. Abaixo é listado os requisitos das constelações QAM: [22]

1. Distância euclidiana mínima entre os pontos do sinal (fasor);
2. Diferentes fases entre os fasores;
3. Potência média dos fasores menor possível em relação as outras constantes;
4. Relação entre a potência de pico e a média do fasor deve ser um.

Na Figura subsequente é possível visualizar as constelações do sinal QAM abordadas neste trabalho:

Figura 2-9 – Constelações 16QAM, 32QAM e 64QAM.



3 METODOLOGIA

Nesta implementação serão utilizados dois softwares, sendo o principal deles o Optisystem da empresa Optiwave Corp. Este software é uma ferramenta muito eficaz para aplicações de simulações de redes ópticas pois dispõe de várias bibliotecas com diversos componentes utilizados nos sistemas reais, o que permite planejar, testar e simular enlaces ópticos na camada de transmissão de redes ópticas modernas [31]. O segundo software é o MATLAB [32], uma poderosa ferramenta de modelagem matemática bastante utilizada nos meios acadêmicos, sua funcionalidade nesta implementação é muito importante para o desenvolvimento de técnicas matemáticas implementadas no sistema real.

Serão implementadas redes ópticas com codificação TS-OCDMA. Os dados serão modulados em diversos formatos de modulação com a finalidade de realizar a comparação entre as modulações para este tipo de codificação. A fonte de luz laser *mode-locked* configurada com comprimento de onda de 1550 nm para que ele trabalhe dentro da janela de transmissão da fibra monomodo padrão. Nas implementações TS-OCDMA serão simuladas diferentes taxas de transmissão de dados, com diferentes números de usuários realizando acesso simultâneo ao canal de múltiplo acesso e com distâncias variadas entre transmissor e receptor com o objetivo de verificar como cada tipo de modulação se comporta diante de situações variáveis.

Para aplicar a modulação no domínio óptico existem dois tipos de implementação normalmente utilizados: Moduladores baseados em eletro-absorção (EAM - *Electroabsorption modulator*) e moduladores baseadas em eletro-óptica (MOE - *Eletro-Óptico Modulation*). Este método utiliza o interferômetro de Mach-Zehnder (MZI - *Mach Zehnder Interferometer*) frequentemente utilizado em sistemas baseados em fibra (devido a sua dependência de modulação de entrada). Seu funcionamento se resume em dividir um sinal em dois canais e aplicar um desvio de fase π para um canal para cada "0" binário antes de os recombinar fazendo com que o sinal interfira destrutivamente com ele mesmo [11].

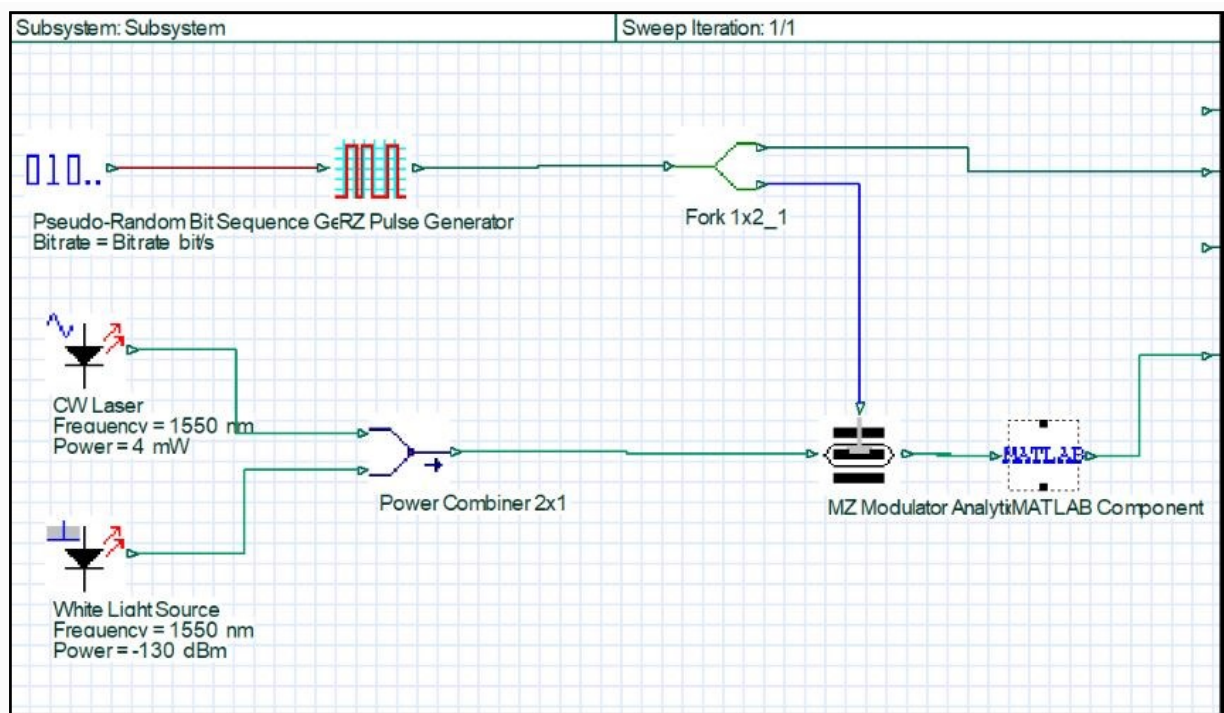
Para maior facilidade de compreensão, nas próximas seções serão apresentados os sistemas de transmissão e recepção referente a cada uma das modulações abordadas neste trabalho, sendo elas OOK-RZ, RZ-DPSK e BPSK. Apresentam-se ainda as constelações QPSK, 16QAM, 32QAM e 64 QAM que foram implementadas em domínio óptico e farão parte de trabalhos futuros.

3.1 Simulação do sistema OOK-RZ com Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA)

3.1.1 Transmissor e codificador

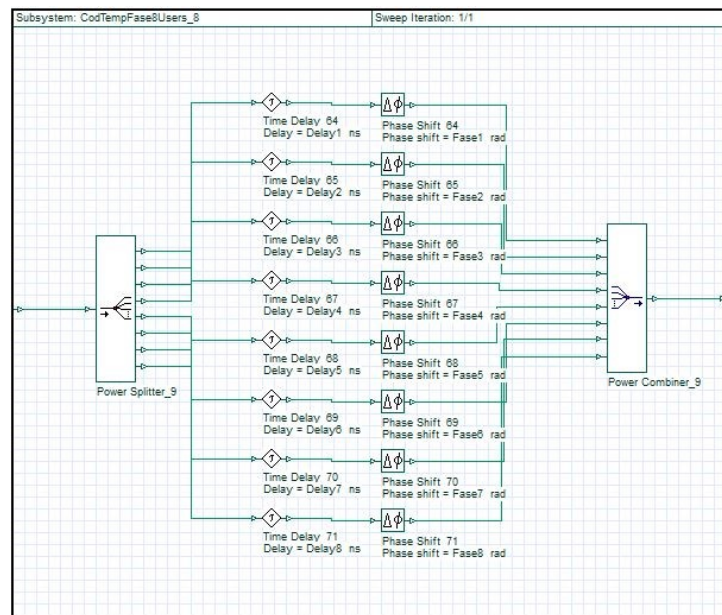
Todo o diagrama de blocos do transmissor é mostrado na Figura 3-1. A fonte óptica é constituída de um diodo laser com potência óptica de 4mW combinado com uma fonte de luz *seção* com uma potência de -130dBm, de forma que seja simulado o ruído de fase do laser. Procurou-se manter a SNR dos sinais combinados maior que 40 dB. Esses sinais combinados são ligados à entrada óptica do modulador *Mach-Zehnder* cujo funcionamento está descrito no início desta seção. À entrada elétrica do modulador foi ligada a saída do modulador OOK-RZ que foi acionado pelo sinal do gerador de seqüências pseudo-aleatórias cuja saída simula os dados de cada um dos usuários do sistema. Há ainda um dispositivo *Fork 1x2* que está sendo utilizado para copiar o sinal de entrada para duas saídas: uma saída é acoplada ao MZI e a outra alimenta o componente NOLM simulado em MATLAB cuja funcionalidade será explicada mais adiante. A segunda parte do transmissor é a implementação da codificação TS-OCDMA, ou seja, atrasos temporais e deslocamentos de fase são aplicados à saída do modulador *Mach-Zehnder*, por meio do bloco do MATLAB.

Figura 3-1 - Implementação do transmissor OOK-RZ com codificação TS-OCDMA.



O bloco codificador de fase temporal é implementado no software MATLAB, porém seu funcionamento pode ser compreendido na Figura 3-2 onde pode-se observar os blocos que realizam o atraso no tempo e a codificação da fase nos impulsos ópticos.

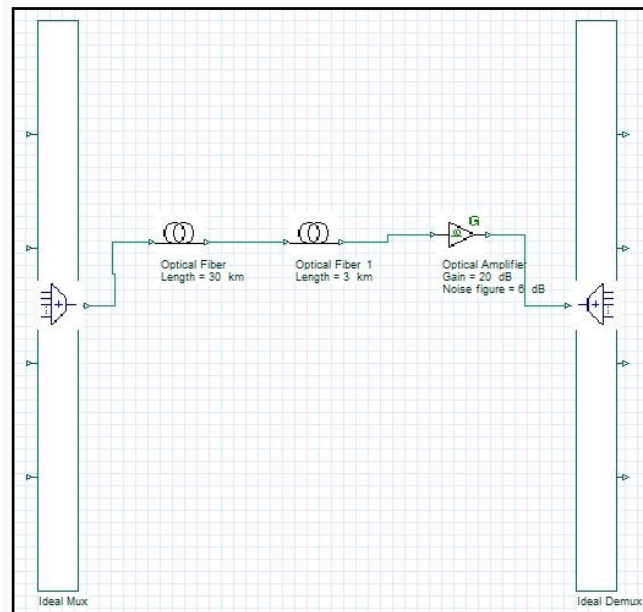
Figura 3-2 – Implementação do codificador Temporal de Fase (TS)



3.1.2 Enlace Óptico

A Figura 3-3 ilustra o enlace cujo comprimento é o tamanho da fibra óptica entre o transmissor e o receptor. Pode ser observado que inicialmente os sinais de cada um dos usuários ligados ao sistema são misturados através “*Ideal Mux*” que realiza o acoplamento de potência dos sinais. Após este acoplamento os sinais de cada usuário se propagam na fibra óptica onde irão sofrer atenuações e dispersões características do meio de transmissão óptico.

Figura 3-3 - Link Óptico de transmissão.



Para corrigir os efeitos de atenuação utilizou-se um amplificador óptico com ganho de 20 dB ao final do link de transmissão (pós-amplificação). Uma abordagem para anular a dispersão acumulada na fibra de transmissão é a utilização de técnicas de compensação de dispersão. Dentre dos possíveis métodos para minimização deste problema, o escolhido foi o método mais tradicional, com a inserção de uma fibra compensadora de dispersão no enlace. A fibra compensadora de dispersão (DCF - *Dispersion Compensating Fiber*) possui características de dispersão opostas à fibra de transmissão. Desta forma a dispersão total da DCF precisa ser igual e oposta à dispersão acumulada ao longo do enlace de transmissão [28].

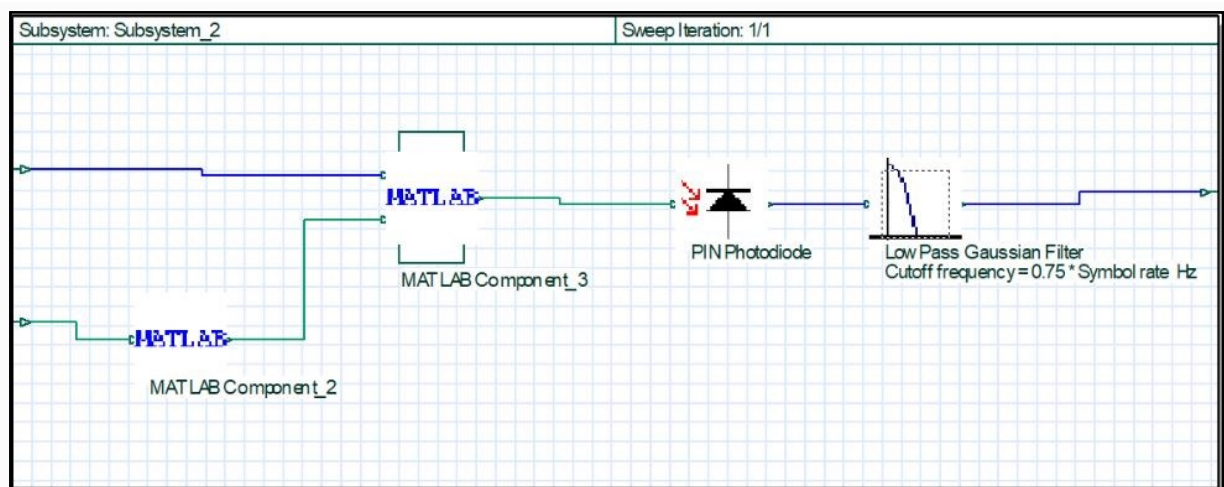
A fibra utilizada nas simulações em software apresenta uma dispersão cromática de 16.75 ps/nm/km, por esta razão foi calculada uma fibra compensadora de dispersão com uma dispersão cromática de -167.5 ps/nm/km. Após a compensação, o sinal óptico entra no segundo “*Ideal Demux*”, onde acontece desacoplamento de potência e uma cópia do sinal de entrada é enviado para cada uma das saídas em direção ao sistema receptor de cada usuário.

3.1.3 Receptor e decodificador

O circuito receptor é ilustrado na Figura 3-4, onde se pode notar que o primeiro passo no processo de recepção do sinal óptico é realizar a decodificação do sinal no sistema TS-OCDMA. Os componentes de deslocamento de fase do decodificador são ajustados de forma conjugada às posições desses elementos do codificador do usuário de interesse. O decodificador, cuja função de realizar uma correlação entre o sinal que está sendo recebido e o

código do usuário, realiza N cópias do sinal recebido. Em seguida ele aplica um conjunto de deslocamento de fase para cada cópia e atrasa temporalmente esses pulsos por um intervalo de chip antes de recombina-los passivamente. O resultado deste processo é que quando o decodificador de fase está ajustado para um determinado código transmitido, um forte pico de correlação será observado na forma de onda de saída do decodificador. Caso contrário quando o decodificador não está ajustado para o código transmitido, é visto na saída do decodificador um sinal cuja forma de onda se assemelha a ruído [5].

Figura 3-4 – Receptor e Decodificador Temporal de Fase.



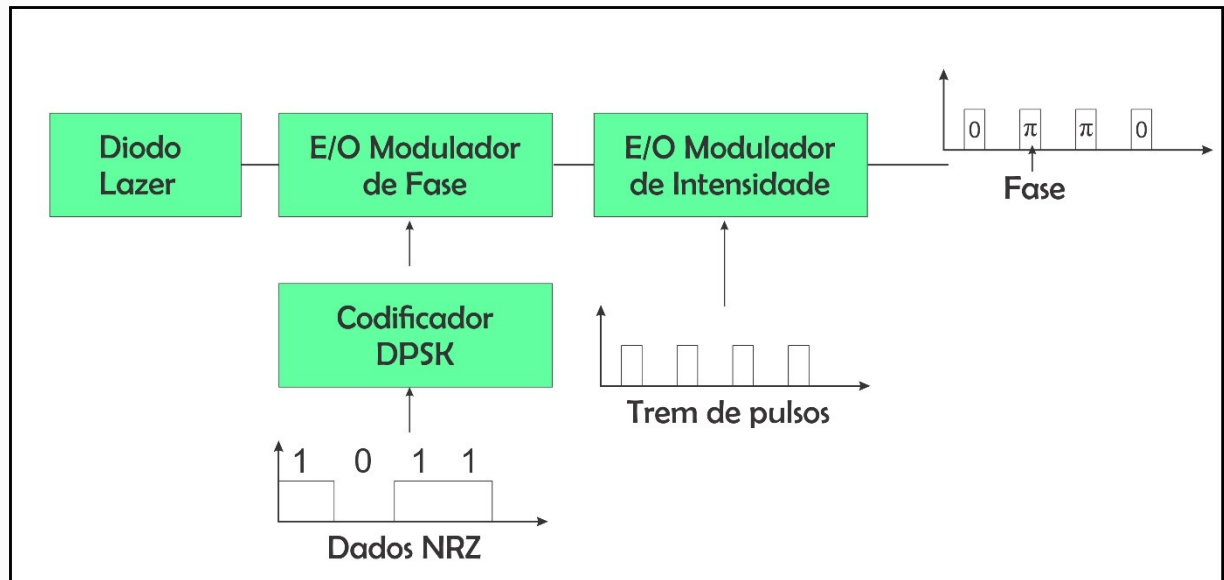
Após esse processo ainda estará presente junto ao sinal de interesse a interferência de múltiplo acesso (MAI). Essa interferência poderá ser minimizada com o uso do “*Nonlinear Optical Loop Mirror*” (NOLM) [5] pela sua facilidade de implementação matemática através do componente MATLAB que também pode ser observado na Figura 3-5. Este componente passivo é capaz de realizar o recorte temporal do sinal óptico por meio de chaveamento óptico síncrono. Sinais que estiverem fora da janela temporal de operação serão rejeitados. A realização com precisão deste processo resulta no benefício adicional de rejeitar a maioria da energia vinda de usuários interferentes [5]. O diodo fotodetector irá converter a entrada de sinal no domínio óptico para o domínio elétrico e um filtro passa baixa é utilizado na saída do receptor para eliminar as altas frequências.

3.2 Simulação do sistema RZ-DPSK com Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA)

A Figura 3-5 mostra o diagrama de blocos do transmissor do sistema RZ-DPSK, onde observa-se o modulador de fase eletro-óptica que gera um sinal óptico NRZ-DPSK. À entrada óptica do modulador é alimentada pelo laser, enquanto a entrada elétrica recebe os dados

codificados em NRZ-DPSK. O segundo modulador, que é um modulador de intensidade, realiza a modulação de intensidade, modulando o sinal NRZ-DPSK por um mesmo sinal de *clock*. Este tipo de codificação é bastante atraente para as aplicações por ser bastante tolerante às dispersões não lineares e alcançar assim uma maior distância de transmissão [29].

Figura 3-5 - Diagrama de blocos do Transmissor RZ-DPSK.

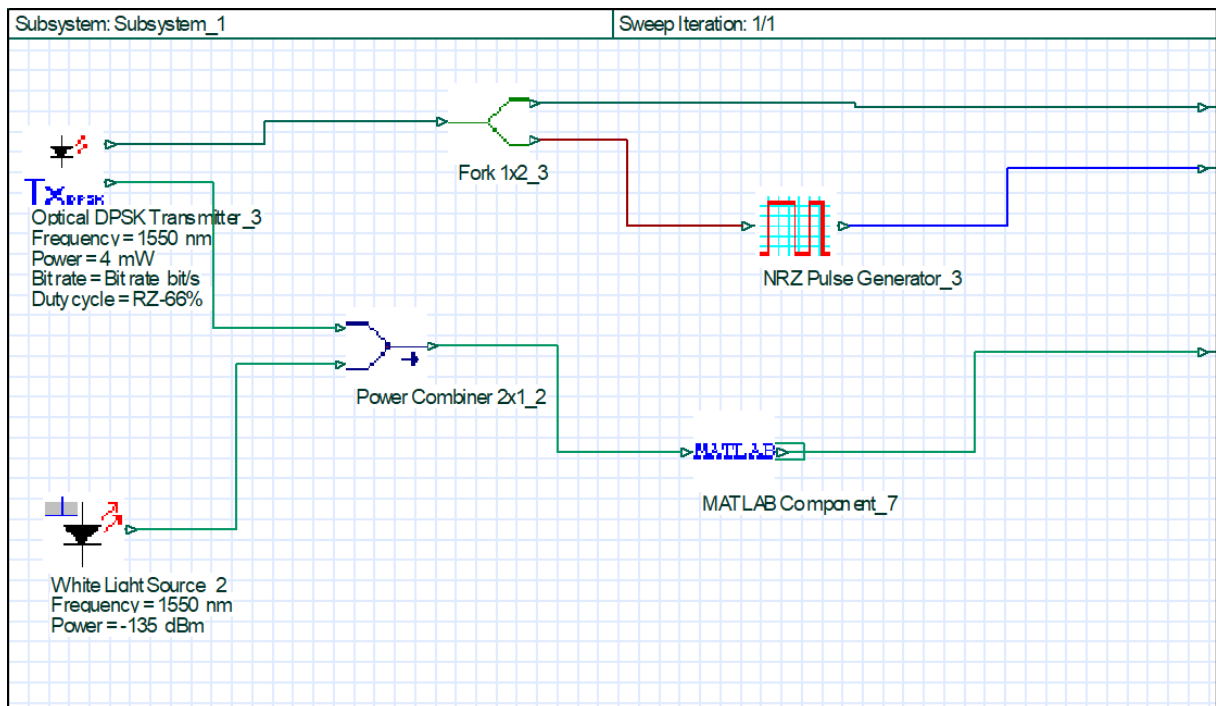


3.2.1 Transmissor e codificador

Na Figura 3-6 verifica-se o diagrama de blocos utilizado no transmissor RZ-DPSK.

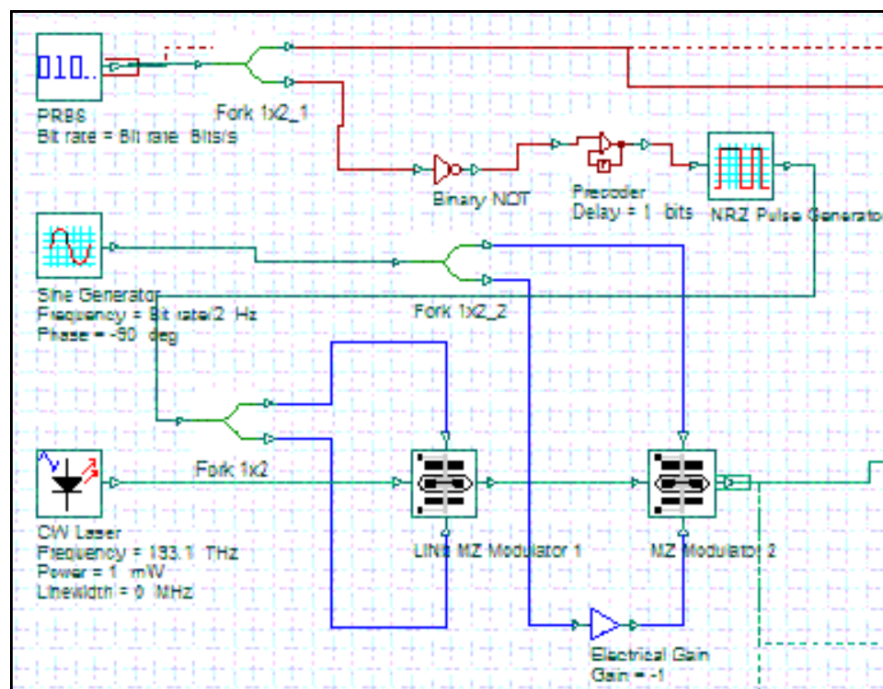
O transmissor RZ-DPSK está configurado para trabalhar com o comprimento de onda de 1550 nm, potência de 4mW e um *Duty cycle* igual a 66% do pulso RZ. A saída óptica do transmissor está ligada ao codificador TS-OCDMA implementado no software Matlab. Já a saída lógica do transmissor é utilizada para alimentar primeiramente o BER *Analiser* e também gerar pulsos NRZ que serão utilizados para obter a BER do sistema óptico. Note que ao sinal óptico do transmissor é adicionada uma fonte de ruído branco com potência de -135 dBm.

Figura 3-6 – Implementação do modulador RZ-DPSK e codificador.



A composição do bloco *Optical DPSK Transmitter* pode ser observada na Figura 3-7, nela observa-se os dois moduladores: 1) Modulador de fase dos dados e 2) Modulação de amplitude do *clock* para formar os pulsos RZ.

Figura 3-7 - Composição interna do bloco *Optical DPSK Transmitter*.



3.2.2 Receptor e decodificador

O receptor do sistema RZ-DPSK é de simples configuração e fácil entendimento. Observar na Figura 3-8 que ele é composto do decodificador TS-OCDMA, o amplificador óptico, o bloco *Óptico DPSK Receiver* e o filtro passa-baixa gaussiano. Na Figura 3-9 é apresentado os componentes externos do *DPSK Receiver*. Ele é composto de um *interferômetro Delay* cujas saídas são ligadas a 2 diodos PIN fotodetectores que realizam a conversão do domínio óptico para o domínio elétrico e o *Electrical Subtractor* que combina o sinal resultante dessas operações.

Figura 3-8 – Decodificador e Implementação do modulador RZ-DPSK.

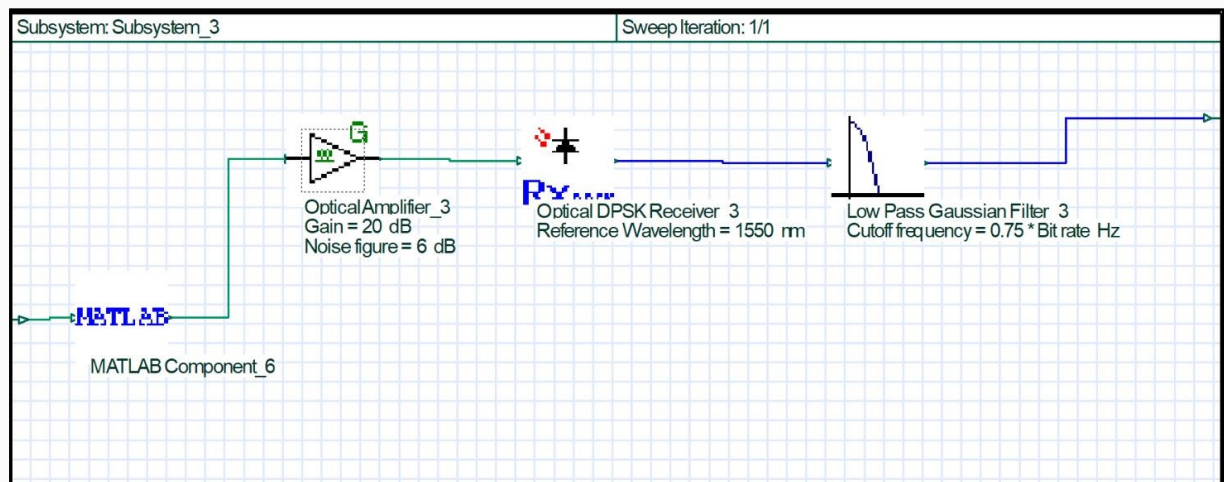
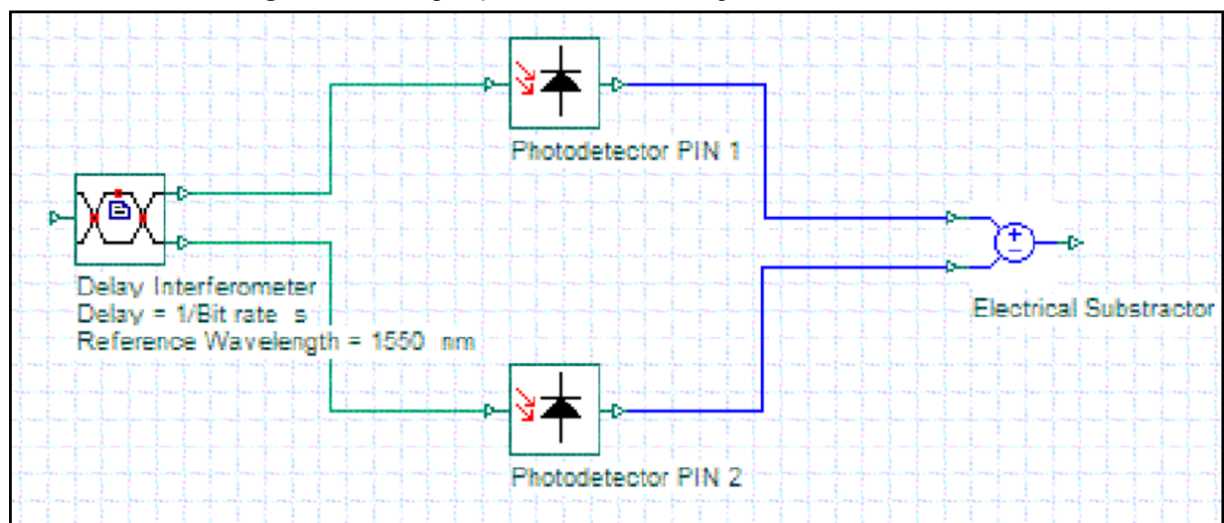


Figura 3-9 - Composição interna do bloco *Óptico DPSK Receiver*.



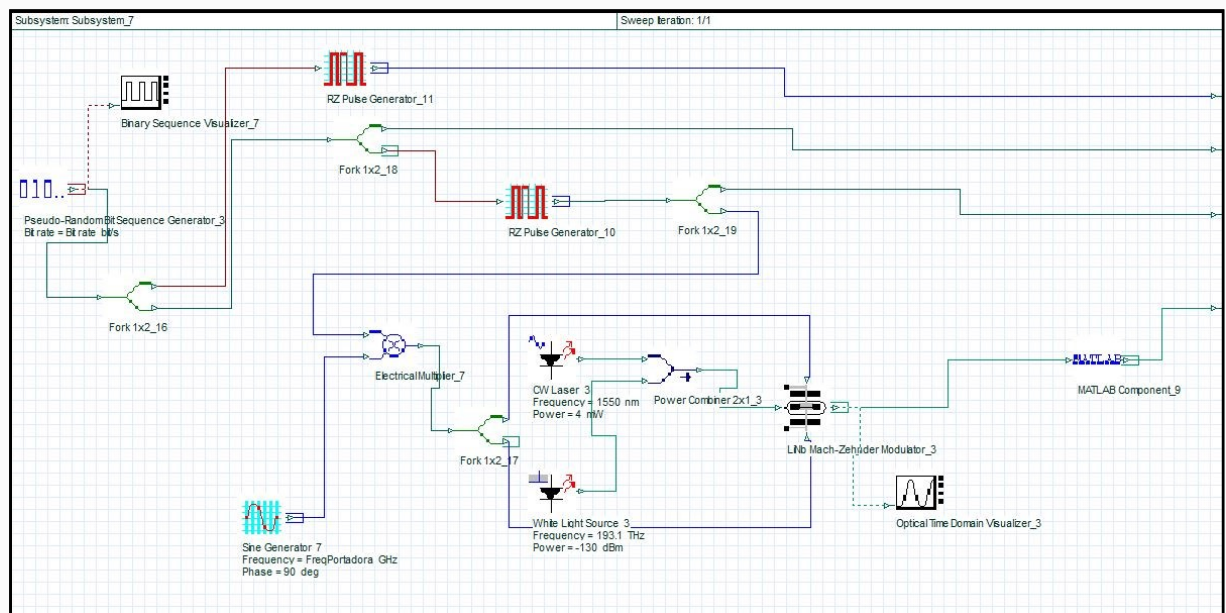
3.3 Simulação do sistema BPSK com Codificação Temporal de fase (TS-OCDMA)

3.3.1 Transmissor e codificador

A implementação da modulação binária por chaveamento de fase (BPSK) é a terceira modulação apresentada neste trabalho. Nesta configuração o sinal BPSK é usado para inserir informação na portadora de RF na taxa de bits utilizada para cada configuração do sistema, este sinal, alimentará a entrada elétrica do *Mach-Zehnder* modulando a luz óptica proveniente da fonte de luz laser [30].

A configuração apresentada na Figura 3-10 ilustra o circuito transmissor de um dos usuários acoplados à rede óptica, nela verifica-se a geração dos dados binários no bloco *Pseudo-Random Bit Sequence*, assim como conexões que passam pelo bloco *RZ pulse Generator* para levar informações para obtenção da BER do sistema. O bloco *Sine Generation* está configurado com uma fase de 90 graus e a sua saída é uma portadora cossenoidal multiplicada pela entrada de dados modulada em RZ. A principal parte do transmissor é constituída pelo modulador Mach-Zehnder e o dispositivo codificador implementado no software MATLAB. Um fonte de luz branca foi adicionada para inserir ruído óptico ao sistema.

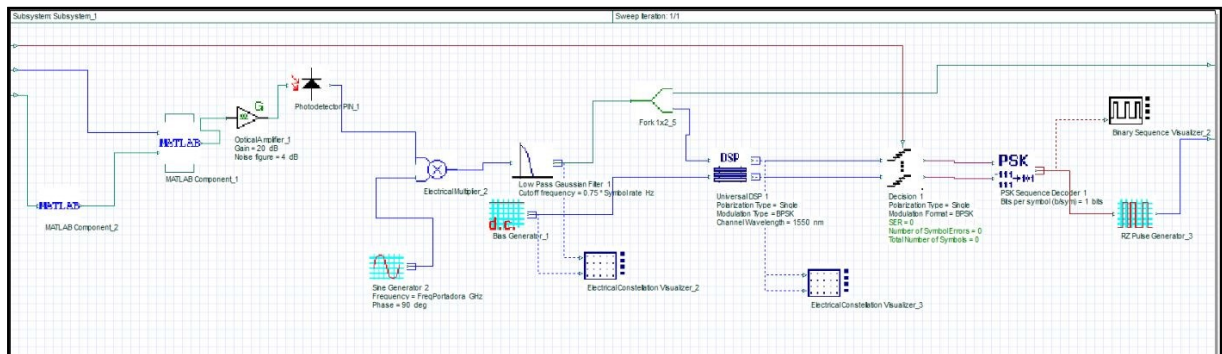
Figura 3-10 – Implementação do modulador BPSK e codificador.



3.3.2 Receptor e decodificador

A implementação do demodulador BPSK e o decodificador TS-OCDMA é ilustrada visualizada na Figura 3-11, observe que o decodificador TS-OCDMA foi implementado no bloco do MATLAB bem como o dispositivo NOLM cujo funcionamento foi explicado na seção 3.1. Observa-se que o fotodetector PIN realiza a conversão do sinal do domínio óptico para o domínio elétrico e o sinal é multiplicado pelo mesmo sinal de portadora, uma cossenoide com o objetivo de eliminar a portadora de RF e manter apenas o sinal de interesse. Depois da filtragem no filtro gaussiano uma cópia do sinal é enviada para o bloco *BER Analyser* e a outra saída do *fork* alimentará o Processador Digital de Sinais (DSP - *Digital Signal Processor*). O sinal processado neste bloco é enviado ao circuito de decisão que está configurado para analisar o sinal de entrada como BPSK e converte-lo no domínio elétrico para um sinal M-ary. Sua saída alimenta um *Decoder PSK* que recupera os dados binários transmitidos por cada um dos N-usuários do sistema.

Figura 3-11 -Decodificador TS-OCDMA e implementação do demodulador BPSK.



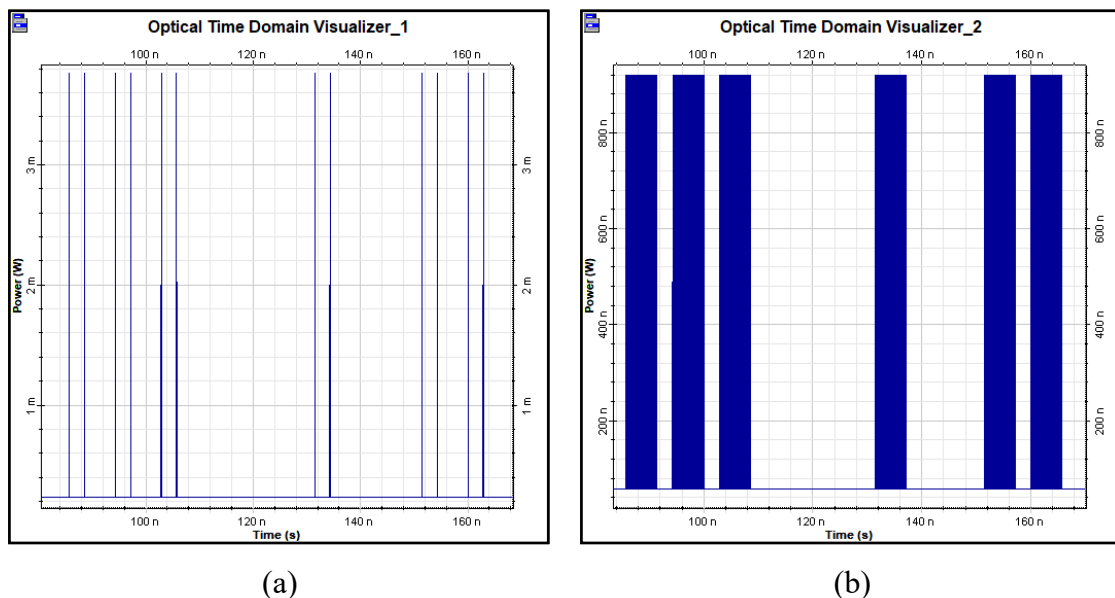
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Sistema RZ-OOK com codificação TS-OCDMA

Nesta primeira análise verifica-se o funcionamento do sistema de transmissão modulado em RZ-OOK com codificação TS-OCDMA e compartilhamento do canal óptico pelos usuários da rede. Visou-se nesta configuração obter o sistema mais robusto possível, o que possibilitou a transmissão de dados entre 40 usuários com acesso simultâneo, a uma taxa de transmissão de 350 Mbps e a uma distância de 40 km entre transmissor e receptor. Esta configuração permite uma capacidade total de 14 Gbps de transmissão de dados total ao sistema. Utilizou-se comprimento do código Hadamard 64.

A Figura 4-1 (a) mostra a sequência de pulsos ópticos sendo transmitidos pelo usuário 1 do sistema. Uma sequência de bits aleatória foi implementada para cada um dos 40 usuários ativos do sistema de transmissão. Já na Figura 4-1 (b) apresenta-se a mesma sequência de bits, porém com a codificação temporal de fase aplicada a cada pulso. Ressalta-se que para fins de análise o sinal apresentado na Figura 4-1 está livre do ruído.

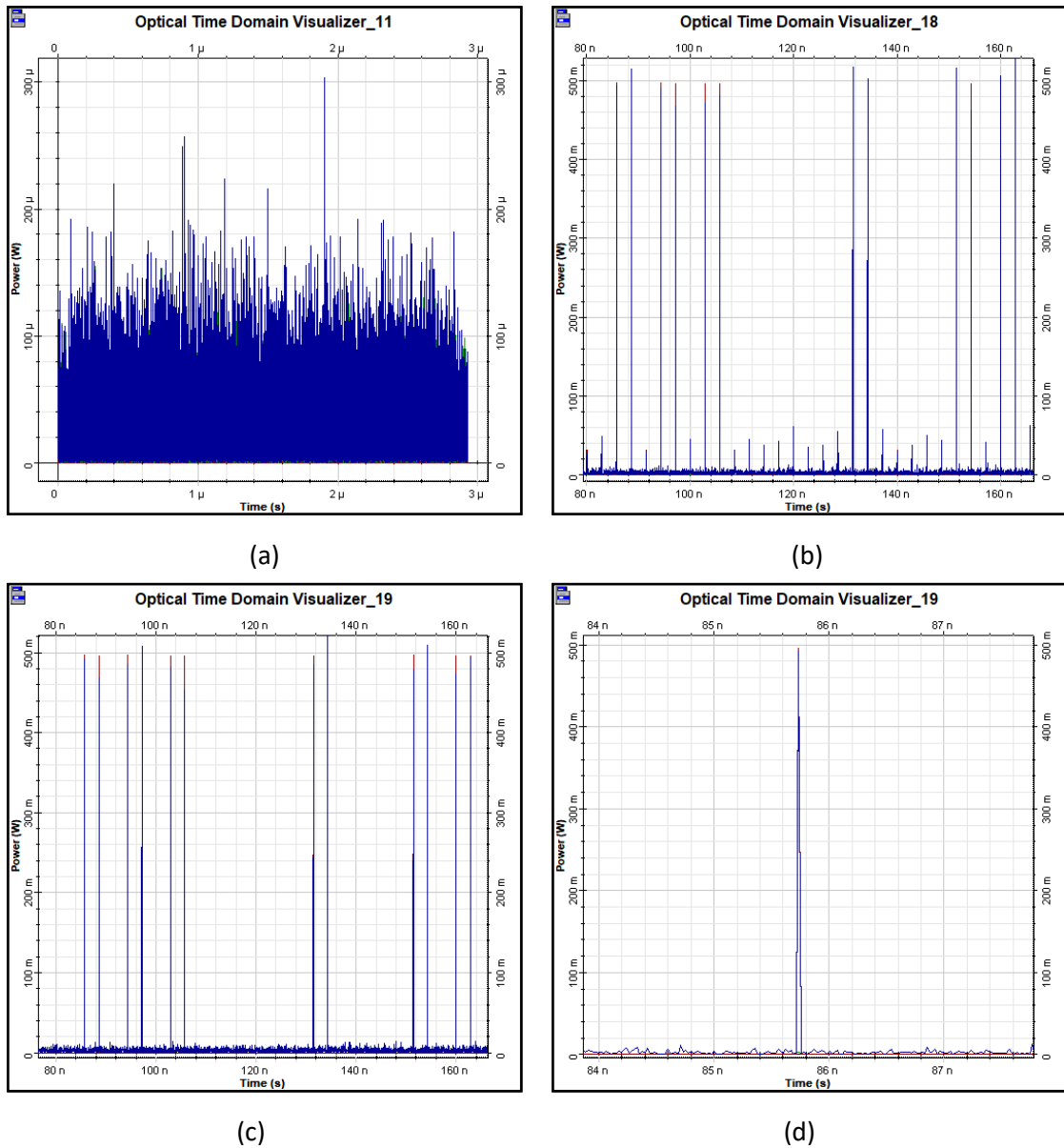
Figura 4-1 - (a) Sequência de pulsos transmitidos pelo usuário 1, sem codificação. (b) Sequência de pulsos transmitidos pelo usuário 1 com codificação temporal de fase.



Os dados de cada um dos usuários do sistema após a codificação são misturados no multiplexador de sinais. Todo o passo a passo do processo de recepção é ilustrado na Figura 4-2. As Figura 4-2 (a), (b), (c) e (d) apresentam, respectivamente, o sinal após a multiplexação, o

signal de interesse após o processo de decodificação, o sinal de interesse do usuário 1 após o *NOLM* e finalmente, a ampliação de um dos pulso óptico recuperado.

Figura 4-2 - (a) Pulsos ópticos misturados na saída do multiplexados; (b) Pulsos decodificados no circuito do receptor; (c) Sinal de interesse do usuário após o *NOLM*; (d) Pulso óptico recuperado.



Este sistema de transmissão demonstrou-se eficiente tanto quanto a taxa de transmissão disponível para cada usuário quanto ao comprimento da fibra óptica. O processo de codificação utilizando os códigos Hadamard se demonstrou bastante eficiente durante a realização dos testes. Nestes resultados apresentados inicialmente utilizou-se os códigos Hadamard com a extensão 64, e foi possível com essa configuração atingir uma taxa de erro de bit $BER < 10^{-6}$ com 32 usuários ativos.

Outros aspectos importantes para a análise do desempenho é a constelação e o diagrama de olho, que podem ser verificados respectivamente nas Figuras 4-3 e 4-4. Na Figura 4-3 (a) verifica-se a constelação do sinal RZ-OOK no circuito transmissor e em (b) a constelação recuperada RZ-OOK após a recuperação dos dados no receptor. Na Figura 4-4 (a) e (b) apresentam-se os diagramas de olho referentes aos usuários 1 e 32, respectivamente, do sistema de transmissão com codificação TS-OCDMA. O usuário 1 obteve uma BER $< 10^{-5}$ enquanto o usuário 32 obteve uma BER $< 10^{-4}$, o que pode ser comprovado com um olho mais fechado.

Figura 4-3 - (a) Constelação do sinal RZ-OOK no transmissor e (b) Constelação do sinal RZ-OOK no receptor.

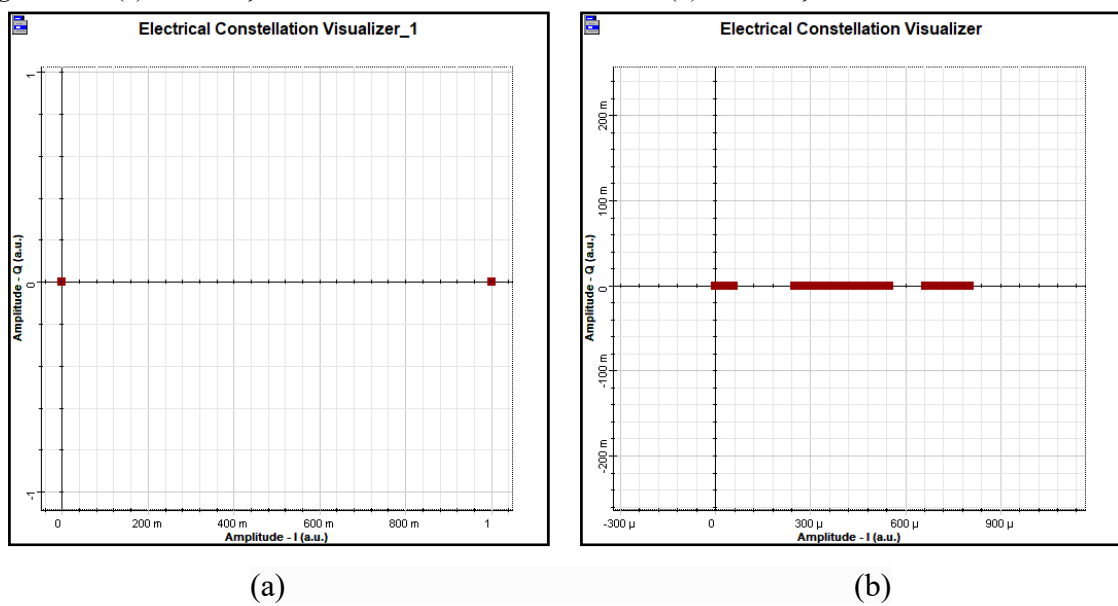
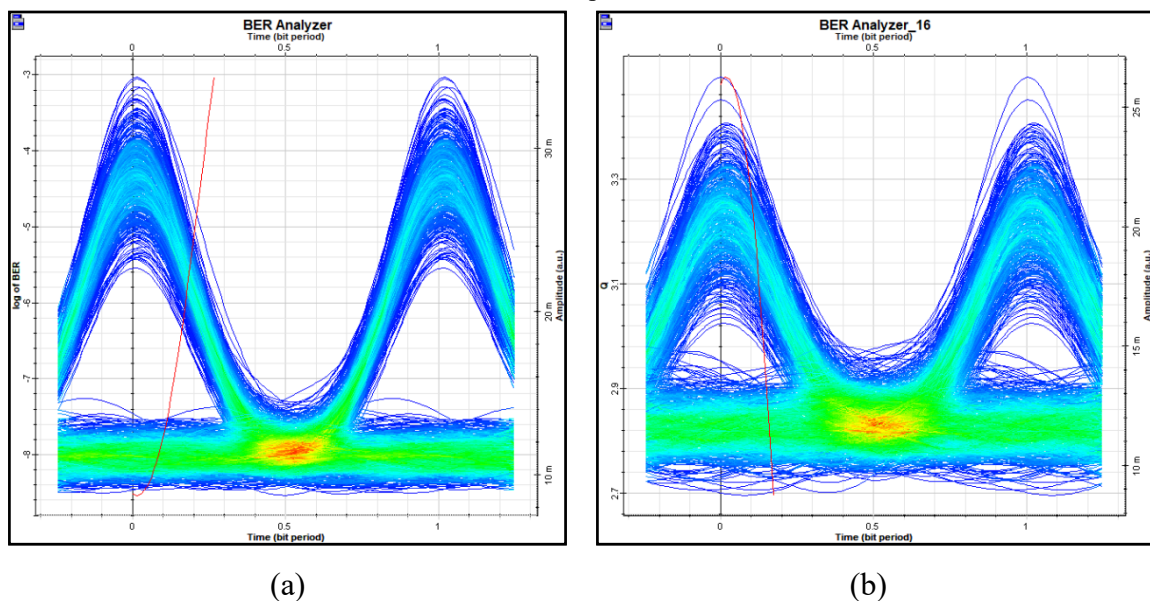


Figura 4-4 – (a) Diagrama de olho do usuário 1 do sistema para uma BER $< 10^{-5}$ e (b) Diagrama de olho do usuário 32 do sistema para uma BER $< 10^{-4}$.



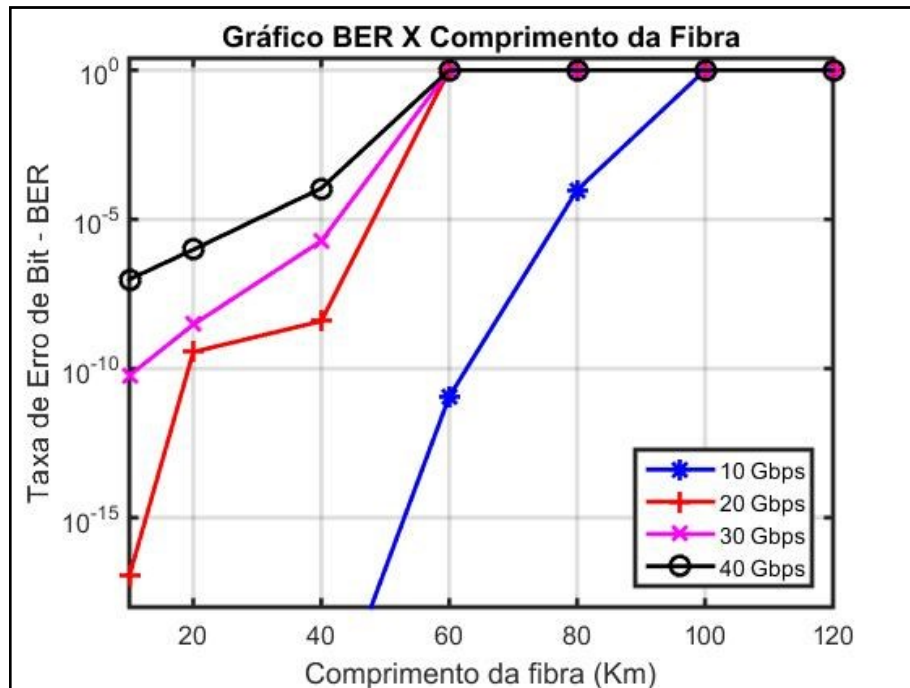
Os três fatores principais a serem investigados neste sistema RZ-OOK são: (1) a influência do comprimento da fibra entre receptor e transmissor, (2) a influência de diferentes taxas de transmissão no desempenho e (3) a influência do número de usuários interferentes no sistema. Esses cenários serão mostrados nas próximas seções.

4.1.1 Influência do comprimento da fibra e da taxa de transmissão na BER do sistema RZ-OOK.

O comprimento da fibra entre o transmissor e o receptor e a taxa de transmissão de bits são fatores importante quando se trata de atestar a robustez de um sistema de transmissão. Nesta análise observa-se como a variação da taxa e o comprimento da fibra podem influenciar o desempenho a medida que se aumenta a quantidade de bits sendo transmitidos por cada um dos N usuários ativos e/ou a distância entre as extremidades do sistema.

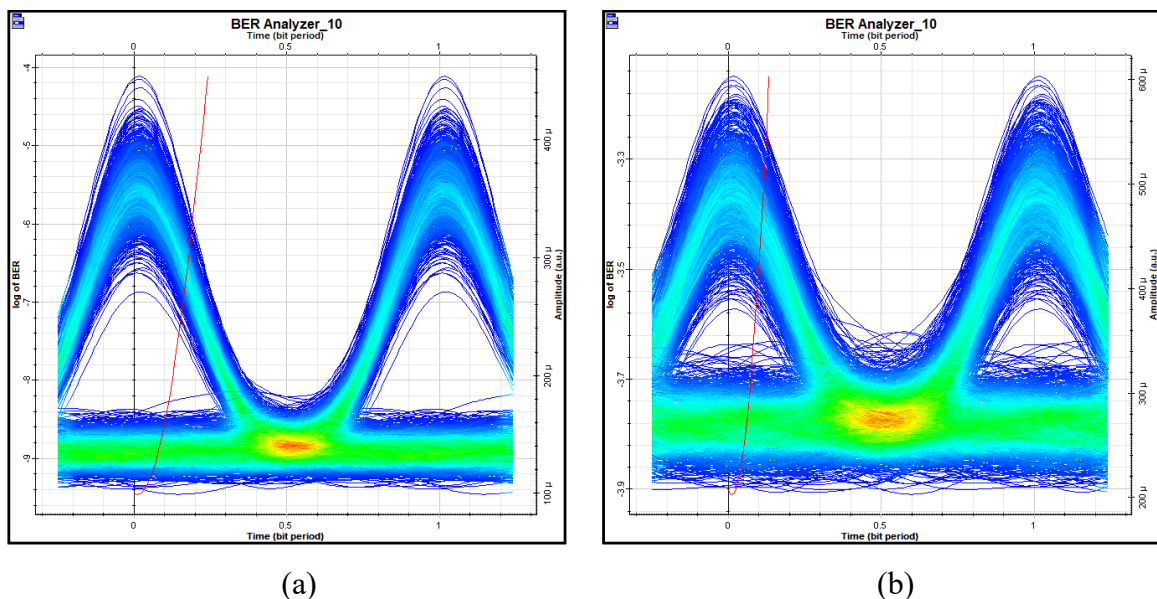
Neste contexto, para analisar a BER em função da taxa de transmissão de bits, varia-se a taxa de 10 Gbps à 40 Gbps e o comprimento da fibra 10 km à 120 km. O número de usuários ativos é fixado em 32 usuários com codificação Hadamard 32. A Figura 4-5 apresenta a variação da BER no cenário proposto. Como era esperado o aumento da taxa de bits para 40 Gbps faz com que o comprimento máximo da fibra para uma $BER < 10^{-6}$ seja 30 km. Já a 10Gbps é possível a transmissão de dados em distâncias próximas a 80 km.

Figura 4-5 - Influência do comprimento da fibra e da taxa de bits na BER do sistema modulado em RZ-OOK.



A Figura 4-6 (a) apresenta o diagrama de olho do sistema de transmissão com fibra de comprimento igual a 40 km e taxa de 20 Gbps ($BER < 10^{-9}$), enquanto a Figura 4-4 (b) apresenta o diagrama para igual comprimento de fibra porém a uma taxa de 40 Gbps o que ocasiona uma $BER < 10^{-4}$. No próximo tópico é apresentado um estudo sobre a influência de usuários interferentes sobre a taxa de erro de bit (BER) do sistema de transmissão.

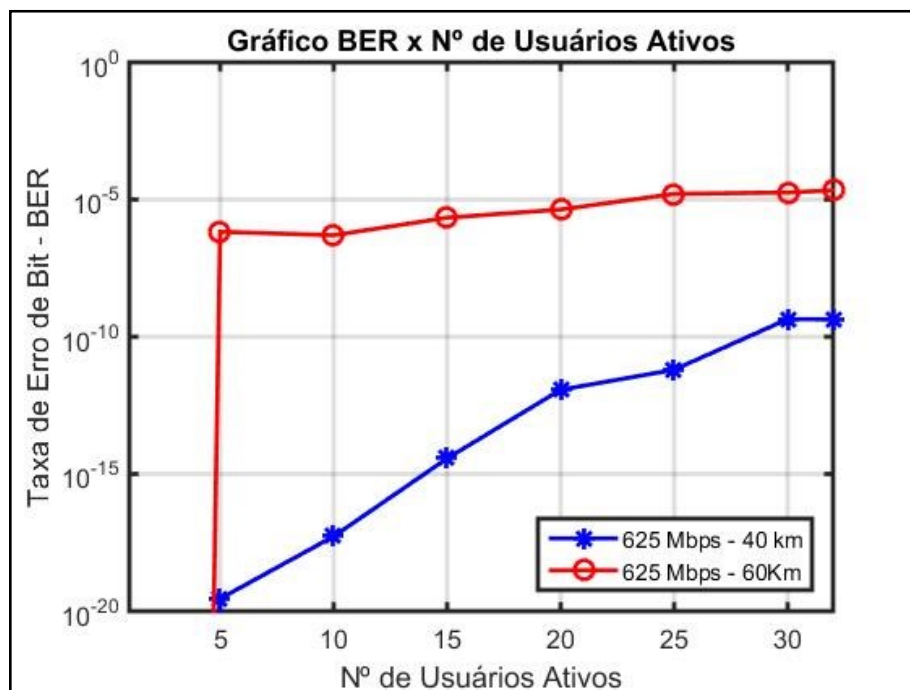
Figura 4-6 – (a) Diagrama de olho para taxa de 20 Gbps e comprimento da fibra igual a 40 km. (b) Diagrama de olho para taxa de 40 Gbps e comprimento de fibra igual a 40 km.



4.1.2 Influência do número de interferentes na BER do sistema TS-OCDMA com modulação RZ-OOK

Outro fator importante na análise deste sistema é o estudo de como a interferência de outros usuários (MAI) influencia o desempenho do sistema TS-OCDMA com modulação RZ-OOK. Para isso apresentam-se nos resultados obtidos a relação entre a BER e o número de usuários no sistema, utilizando-se os códigos Hadamard 32 para codificação dos pulsos ópticos. O experimento é configurado com 650 Mbps de taxa de transmissão bits por usuário ativo e as simulações são realizadas com comprimento de fibra de 40 km e 60 km. A Figura 4-7 demonstra estes resultados.

Figura 4-7 - Análise da influência do número de usuários na taxa de erro de bits no sistema modulado em RZ-OOK.



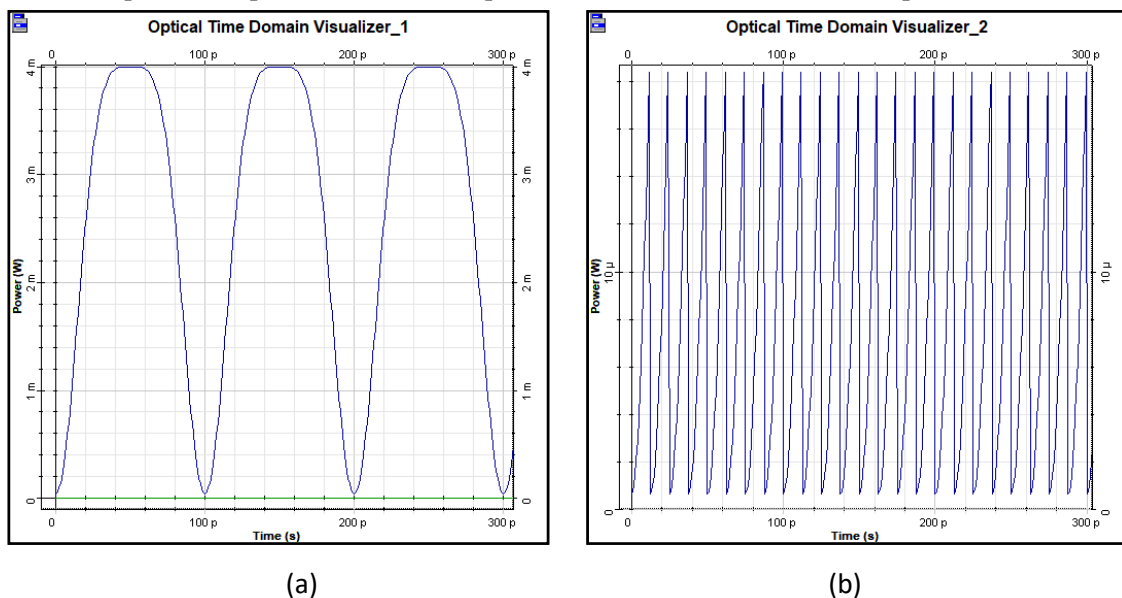
Pelos resultados apresentados na Figura 4-7 observa-se que o número de usuários ativos no sistema TS-OCDMA é um fator relevante no desempenho. Nota-se que para o comprimento de fibra de 40 km pôde-se agregar ao experimento até 32 usuários com $BER < 10^{-9}$, ou seja, esta configuração apresenta excelentes resultados. Observe que quando se aumentou o comprimento da fibra para 60 km a partir de 5 usuários ativos tem-se uma $BER > 10^{-6}$ estes persistem com o aumento do números de usuários ativos e ao chegar em 25 usuários tem-se $BER < 10^{-4}$. No

próximo tópico são apresentados resultados e análises de funcionamento do sistema modulado em RZ-DPSK com codificação TS-OCDMA.

4.2 Análise do sistema modulado em RZ-DPSK com codificação TS-OCDMA.

A segunda modulação proposta para a codificação e a análise é a RZ-DPSK cuja teoria foi apresentada no item 3.2. O sistema proposto foi simulado no software e na Figura 4-8 é possível verificar (a) a forma de onda do sinal RZ-DPSK na saída do transmissor e (b) os pulsos ópticos após o sinal ser codificado.

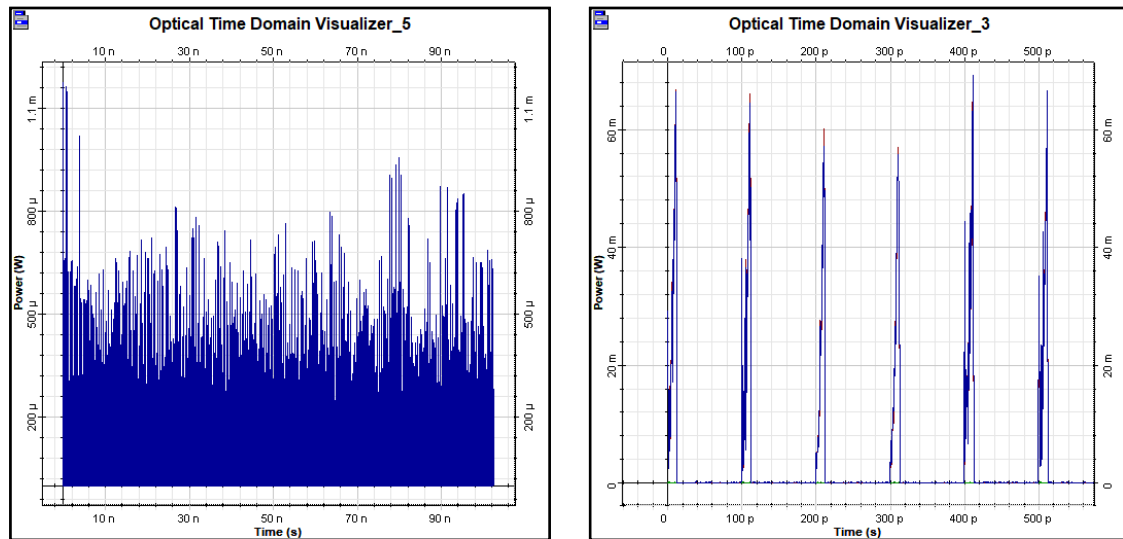
Figura 4-8 - (a) Sequência de pulsos RZ-DPSK transmitidos pelo usuário 1, sem codificação. (b) Sequência de pulsos transmitidos pelo usuário 1 com codificação temporal de fase.



O pulso RZ utilizado nesta modulação utiliza 66% do *duty cycle* (ciclo de trabalho) do pulso RZ. Observando a Figura 4-8 nota-se que cada bit da sequência original está sendo codificada em 8 *chips* e cada *chip* recebe tanto o atraso temporal como a codificação de fase utilizando o códigos Hadamard.

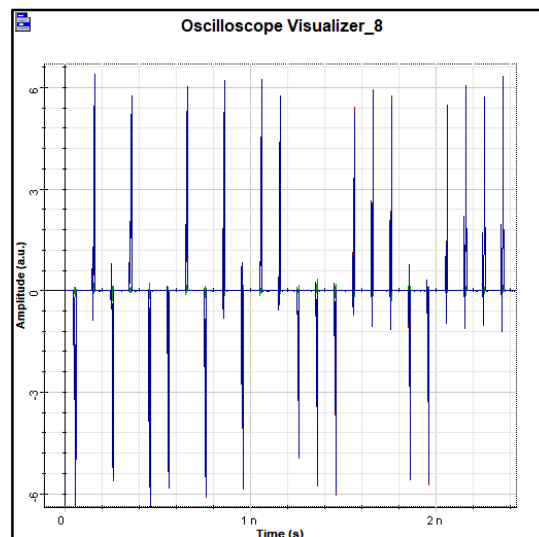
Após passar pelo processo de codificação os dados dos usuários do sistema podem ser multiplexados para posteriormente serem transmitidos através do canal óptico. Na Figura 4.9 (a) verificam-se os pulsos ópticos dos 8 usuários do sistema se sobrepondo na saída do multiplexador; em (b) apresentam-se os pulsos ópticos decodificados e em (c) os pulsos no domínio elétrico após recuperação no dispositivo *Receiver PSK*.

Figura 4-9 - (a) Pulsos ópticos sobrepostos na saída do multiplexador. (b) Pulsos ópticos recuperados na saída do decodificador e (c) Sinal de interesse após o receptor DPSK.



(a)

(b)



(c)

Na análise desta modulação e codificação, visou-se atingir a maior taxa de bits para uma maior distância de transmissão, com o objetivo de investigar a teoria que afirma que este tipo de modulação apresenta certa robustez por ser resistente aos efeitos dispersivos não lineares como automodulação de fase (SPM – *Self Phase Modulation*) e modulação cruzada de fase (XPM – *Cross Phase Modulation*) [29]. Neste contexto fixou-se o número de usuários ativos no sistema em 8 utilizando para codificação dos pulsos os códigos de Hadamard (8) e alcançou-se uma taxa de transmissão de 3.75 Gbps por usuário, totalizando 30Gbps neste experimento com um comprimento de fibra de 50 km para valores de BER aceitáveis. Na Figura 4-10 é apresentada: (a) A constelação do sinal RZ-DPSK no transmissor e (b) a constelação do sinal RZ-DPSK no receptor. A Figura 4-11 apresenta a BER de dois usuários do sistema de

transmissão para a configuração citada. Em (a) O diagrama de olho para o usuário 2 do sistema cuja $BER < 10^{-15}$ e em (b) O diagrama de olho para o usuário 3 com $BER < 10^{-7}$.

Figura 4-10 – (a)Constelação do sinal RZ-DPSK no Transmissor e(b)Constelação do sinal RZ-DPSK recuperador no receptor.

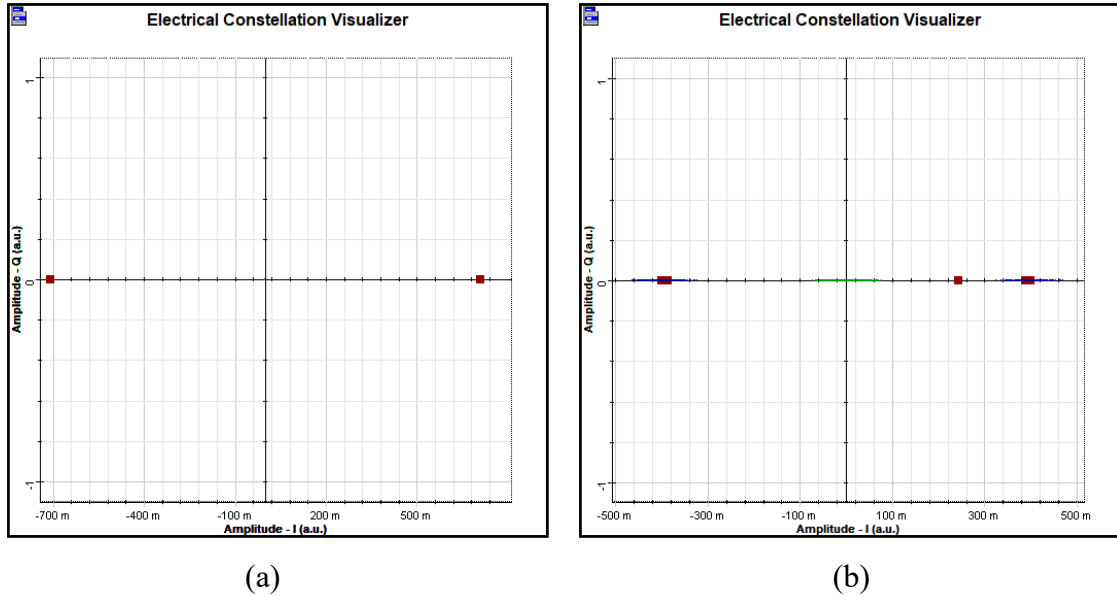
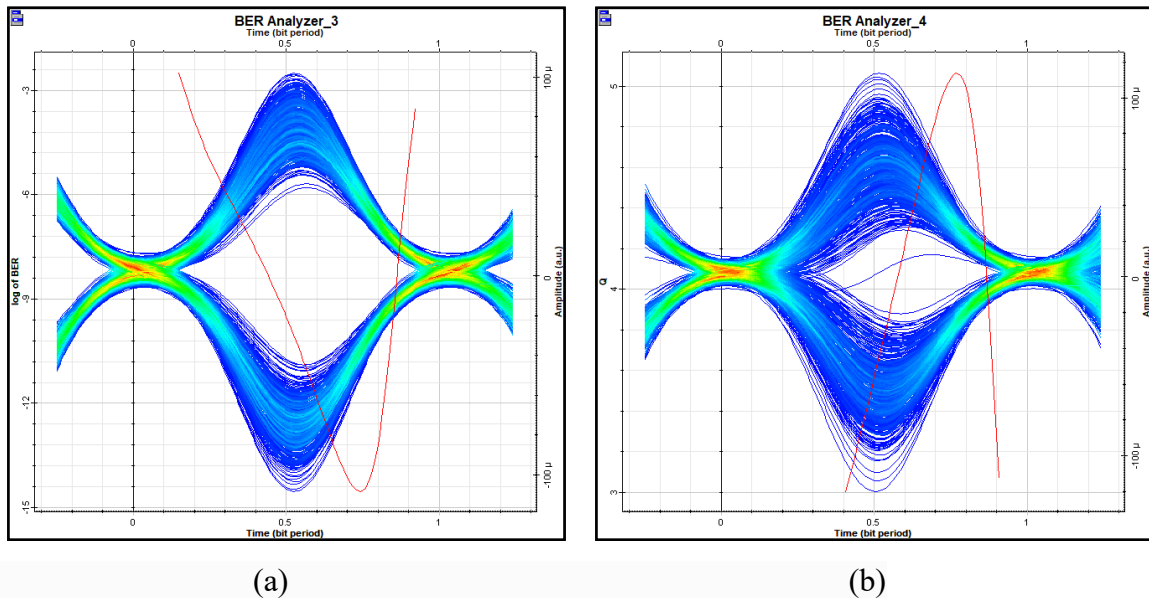


Figura 4-11 - Em (a) O diagrama de olho para o usuário 2 e (b) O diagrama de olho para o usuário 3.



Observando os diagramas de olho é possível verificar que o usuário 2 apresenta menor taxa de erro de bit (BER) que o usuário 3, uma vez que o diagrama de olho do usuário 2 está mais aberto. No próximo tópico realiza-se uma abordagem sobre a influência da taxa de

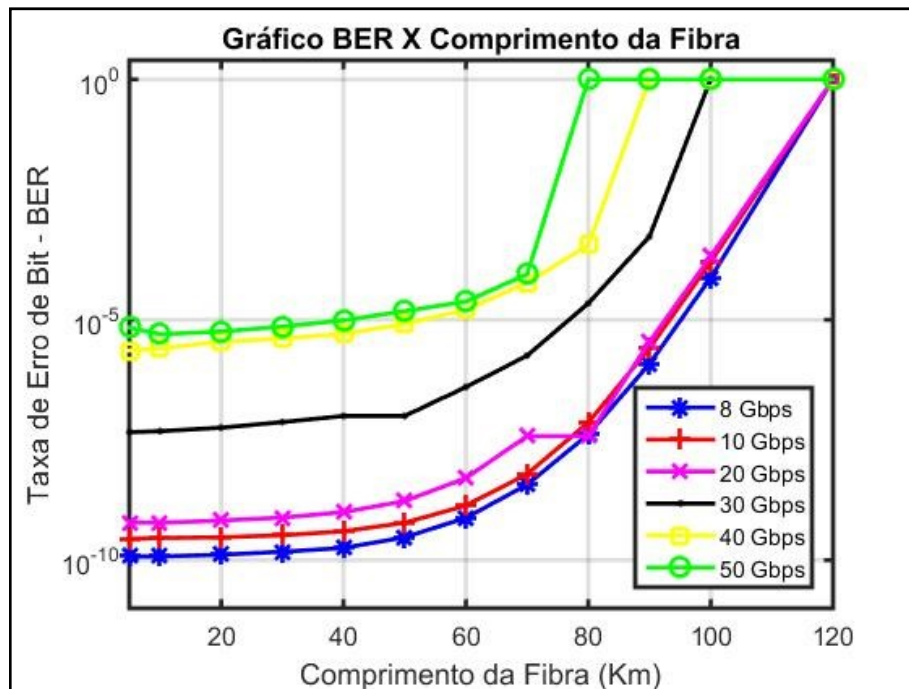
transmissão e do comprimento da fibra instalada entre transmissor e receptor no sistema RZ-DPSK codificado em TS-OCDMA.

4.2.1 Influência do comprimento da fibra e da taxa de transmissão na BER do sistema TS-OCDMA com modulação RZ-DPSK.

Na Figura 4-12 ilustra-se a análise da BER no sistema com modulação RZ-DPSK quanto a varia-se a taxa de bit e o comprimento da fibra óptica. Esta análise é oportuna para que haja melhor compreensão da capacidade de transmissão deste sistema de acesso.

Na configuração proposta para esta abordagem foi realizada com o número de 8 usuários ativos no sistema de transmissão, o comprimento da fibra óptica foi variado de 0 a 120 km, a fonte de luz branca com potência de -130dBm está presente no sistema.

Figura 4-12 - Influência do comprimento da fibra e da taxa de bits no desempenho do sistema.



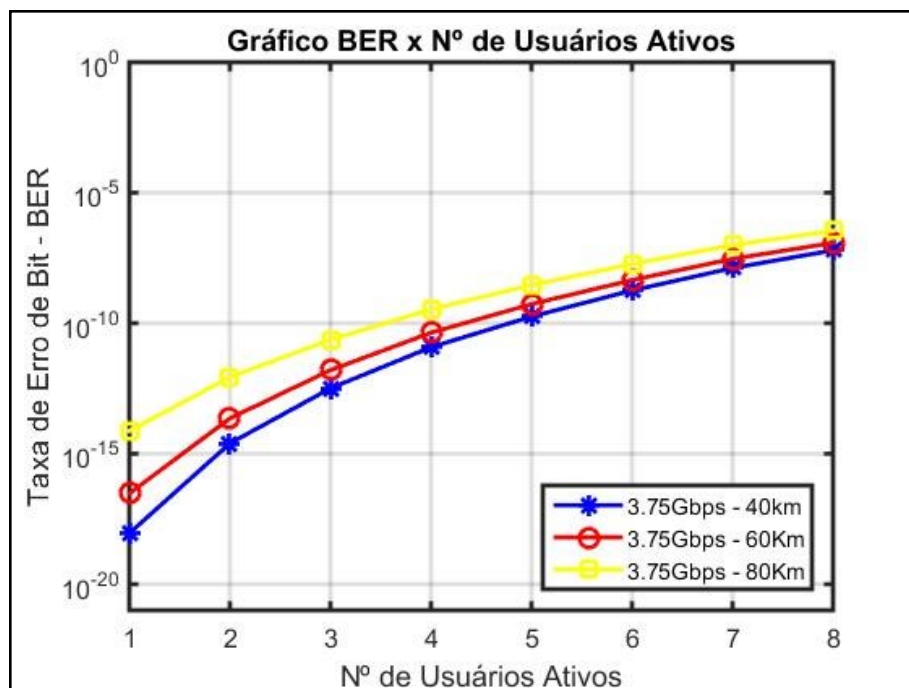
Observando o gráfico ilustrado na Figura 4-12 é possível a identificação de 6 curvas que correspondem cada uma a uma taxa de bits do sistema, onde é possível perceber que a medida que se aumenta o comprimento da fibra, a BER do sistema também aumenta. Com taxas menores, 8, 10 e 20 Gbps, o sistema apresenta $BER < 10^{-9}$ em até 60 km de transmissão, um valor considerado muito bom para aplicações em redes de acesso. A medida que a distância da fibra cresce, nota-se que para as taxas mais baixas ocorre prejuízo da BER chegando a valores inviáveis ($BER > 10^{-4}$) para transmissão nessas taxas quando o comprimento da fibra atinge aproximadamente 90 km.

O gráfico apresenta ainda a curva para uma taxa de transmissão de 30 Gbps, e pode-se extrair dele uma $BER < 10^{-6}$ alcançada para 8 usuários ativos até aproximadamente 70 km, este valor de BER é também aceitável para a transmissão de dados uma vez que ele exprime que o sistema tem a probabilidade de errar 1 bit em 1 milhão de bits transmitidos. Finalmente, tem-se as curvas que representam as taxas de 40 e 50 Gbps e nelas observam-se que transmissões nessas taxas serão possíveis apenas à curtas distâncias, podendo alcançar até 30 km.

4.2.2 Influência do número de interferentes na BER do sistema TS-OCDMA com modulação RZ-DPSK .

A abordagem a respeito do número de usuários interferentes no sistema óptico RZ-DPSK com codificação TS-OCDMA é também interessante pois é possível uma verificação sobre como este sistema se comporta quando há alterações no número de usuários ativos. Para a realização desta análise manteve-se a taxa de cada usuário em 3,75 Gbps para cenários com distâncias de 40 km, 60 km e 80 km e variou-se o número de usuários de 1 a 8.

Figura 4-13 - Influência do número de interferentes na BER do sistema TS-OCDMA modulado em RZ-DPSK.



Verifica-se nesta abordagem as 3 curvas que ilustram o funcionamento do experimento realizado. Nos três casos testados o comportamento é similar quanto a variação do comprimento da fibra é muito similar, sendo importante a observação de que na configuração com maior

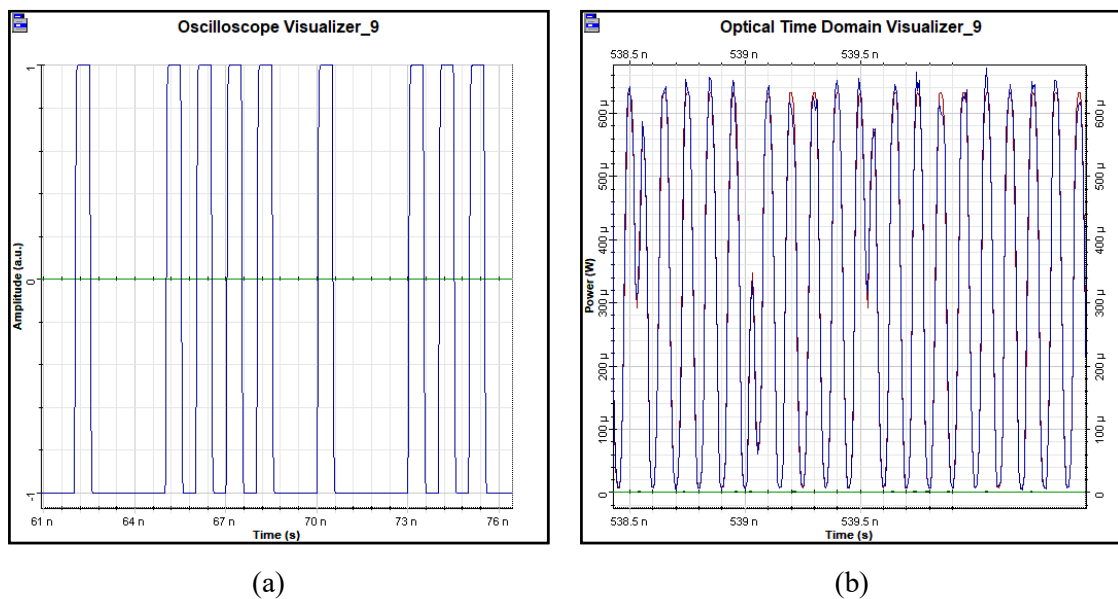
comprimento de fibra (80 km) atingiu-se valores de $BER < 10^{-9}$ com menor número de usuários agregados.

O mais relevante neste experimento é a comprovação da interferência entre usuários agregados no sistema. Observou-se que com o aumento gradual de usuários houve a tendência da BER do sistema para valores maiores. Na configuração de 40 km de fibra com 1 usuário agregado obteve-se $BER < 10^{-18}$ para $BER < 10^{-9}$.

4.3 Sistema modulado em BPSK com codificação TS-OCDMA.

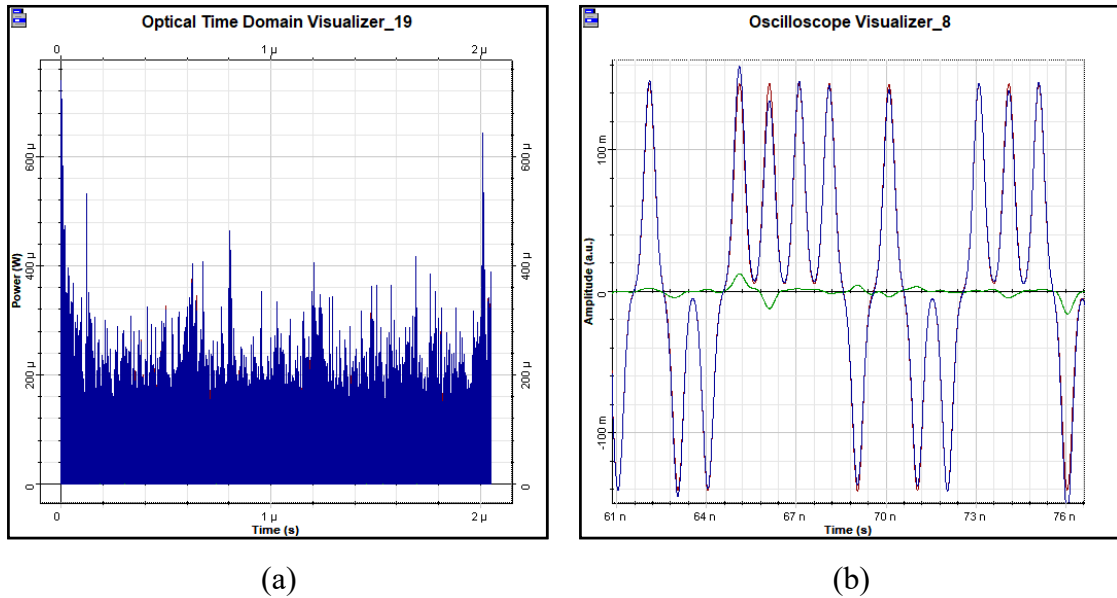
Enfim, apresenta-se neste tópico a terceira modulação proposta para análise, cujos conceitos a respeito da composição do sinal modulado em BPSK foram apresentados no item 2.6.2.2. A Figura 4-14 mostra (a) os pulsos no domínio elétrico antes de modular a portadora e (b) o sinal na saída do modulador óptico onde é possível observar a forma de onda da portadora cossenoidal modulada em BPSK.

Figura 4-14 - (a) Pulsos no domínio elétrico e (b) Sinal modulado no domínio óptico.



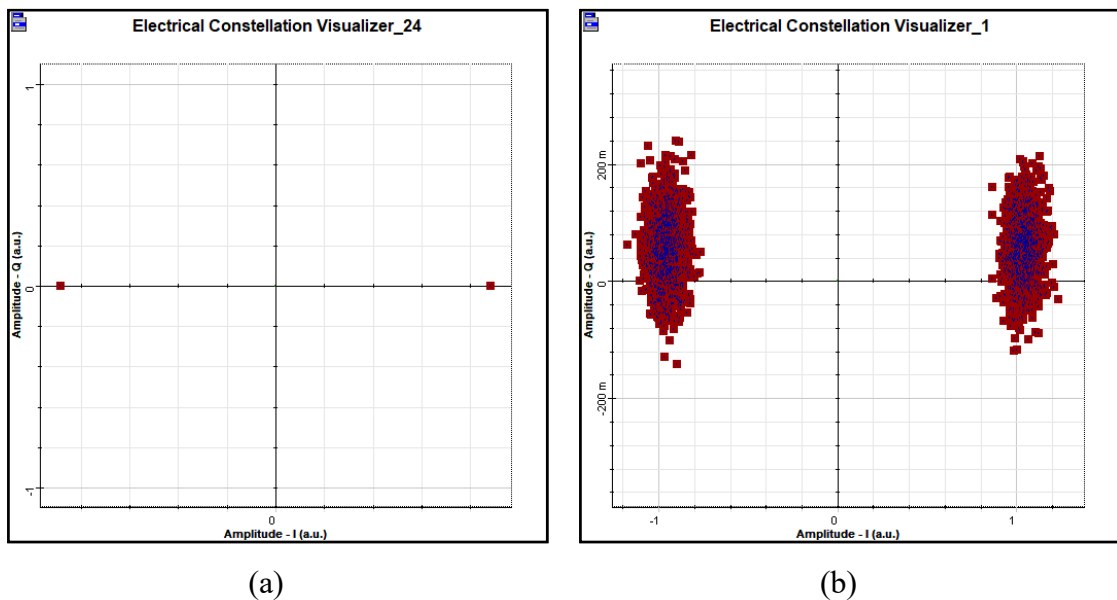
Neste sistema de transmissão foi possível acesso simultâneo de 32 usuários ativos transmitindo dados a uma distância de 20 km a uma taxa de 750 Mbps por usuário, com o uso do DSP e do circuito de decisão configurados para a modulação BPSK. A Figura 4-15 (a) apresenta o sinal após o multiplexador onde é possível combinar passivamente o sinal de todos os usuários do sistema de transmissão enquanto em (b) visualiza-se o sinal já recuperado e sem a portadora antes do DSP.

Figura 4-15 - (a) Sinais de todos os usuários multiplexados e (b) Sinal recuperado no receptor TS-OCDMA.



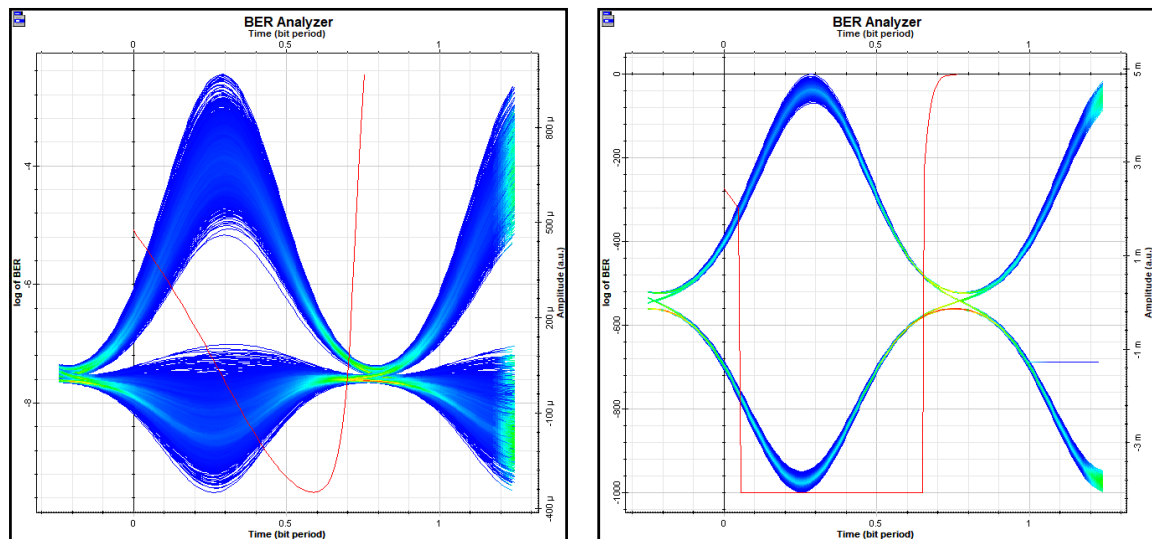
O bloco DSP é utilizado associado ao circuito de decisão para recuperar a informação correta do sinal de interesse do usuário do sistema. Este tipo de modulação óptica se demonstra bastante eficiente para este sistema e verifica-se na Figura 4-16 que a distância euclidiana entre os sinais que formam a constelação é maior que as modulações RZ-OOK e RZ-DPSK em (a) visualiza-se a constelação BPSK no transmissor e em (b) a constelação BPSK no receptor.

Figura 4-16 - (a) Constelação do sinal BPSK no circuito transmissor. (b) Constelação do Sinal BPSK recuperado no receptor.



Na Figura 4-17 (a) apresenta-se o diagrama de olho para um usuário com $BER < 10^{-9}$ em uma configuração com 30 km de fibra óptica entre o transmissor e o receptor enquanto verifica-se em (b) o mesmo diagrama do mesmo usuário a 5 km e $BER=0$.

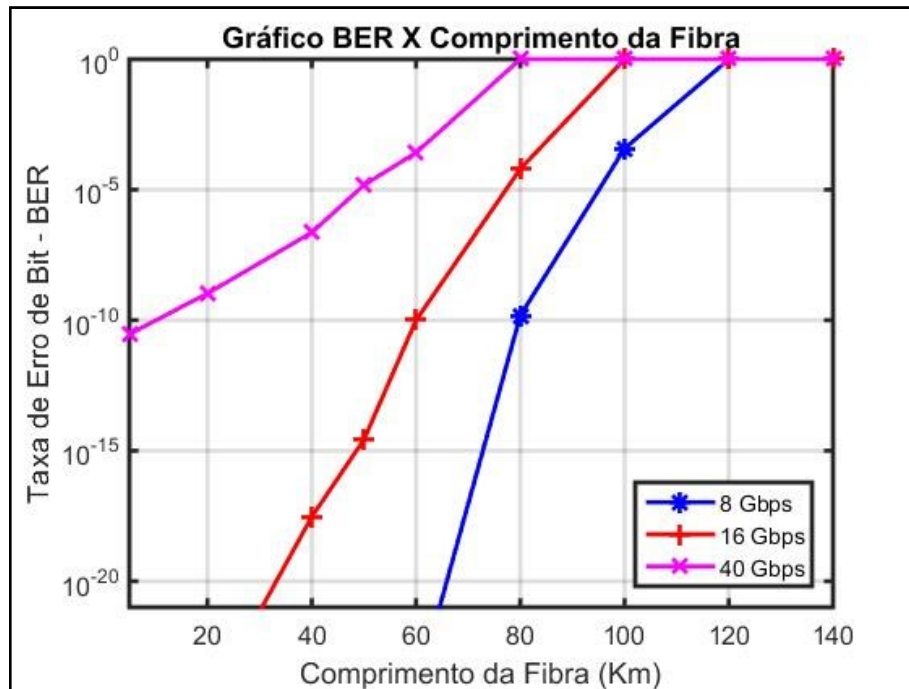
Figura 4-17 - Em (a) O diagrama de olho BER $<10^{-9}$ e (b) Diagrama de olho BER=0.



4.3.1 Influência do comprimento da fibra e da taxa de transmissão na BER do sistema TS-OCDMA com modulação BPSK.

Nesta seção realiza-se a análise da BER do sistema BPSK em função da taxa de transferência e do comprimento da fibra óptica. Os resultados dos testes realizados neste sistema são apresentados graficamente na Figura 4-18. Observando o gráfico verifica-se as três curvas que corresponde às diferentes taxas de transmissão do sistema óptico codificado em TS-OCDMA. Nota-se que esta configuração se apresenta sensível ao aumento da taxa de transferência. Quando o sistema foi configurado com a maior taxa, 40 Gbps, obteve-se um valor de BER $<10^{-9}$ somente com comprimentos de fibra menores que 20 km. No entanto o sistema se mostrou eficiente para transmissões a 60 km para a taxa de 16 Gbps com BER $<10^{-10}$. Os melhores resultados obtidos ocorreram para 8Gbps, representados pela curva mais à direita do gráfico onde observa-se uma BER $<10^{-9}$ à 80 km. Na próxima seção analisa-se este sistema quanto ao número de usuários ativos.

Figura 4-18 - Influência do comprimento da fibra e da taxa de bits no desempenho do sistema modulado em BPSK.

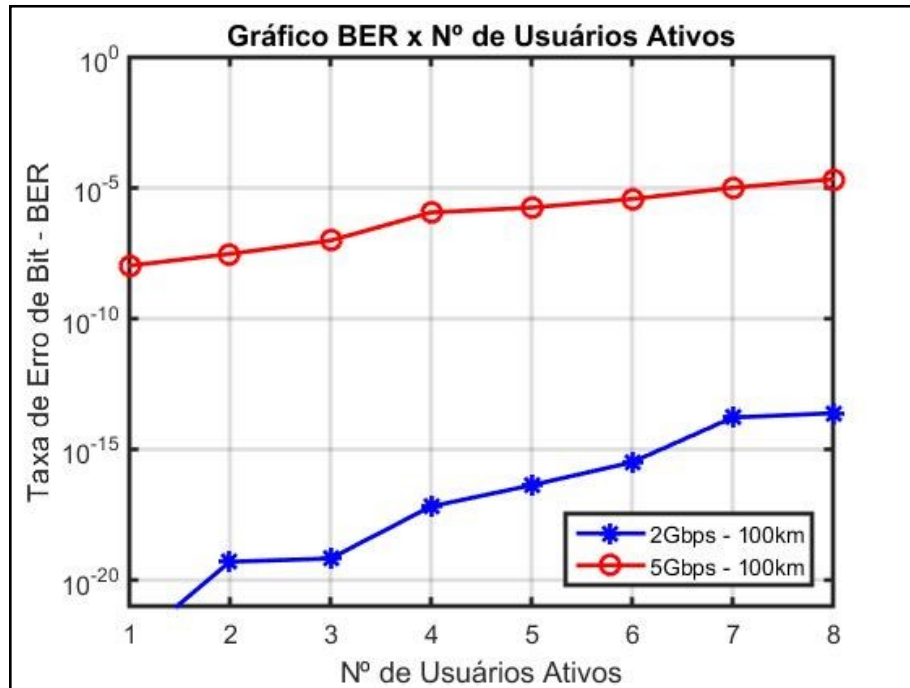


4.3.2 Influência do número de interferentes na BER do sistema TS-OCDMA com modulação BPSK.

Na Figura 4-19 apresenta-se uma abordagem sobre a influência dos usuários ativos no sistema BPSK. Este experimento foi realizado com o objetivo de observar a variação da BER para o sistema BPSK, para isso variou-se o número de usuários ativos até 8 usuários enquanto manteve-se fixo o comprimento da fibra em 100 km. Dois cenários são investigados o primeiro com 2 Gbps e o segundo com 5 Gbps por usuário ativo.

Os resultados demonstram que enquanto se manteve apenas um usuário ativo no sistema para o cenário de 2 Gbps obteve-se $BER=0$. Ao aumentar gradualmente o número de usuários a BER aumentou atingindo $BER < 10^{-12}$. Já no cenário com 5 Gbps embora tenhamos valores de BER bem diferentes do primeiro cenário, devido ao aumento da taxa, verificou-se que a BER do sistema varia de ($BER < 10^{-12}$) até ($BER < 10^{-4}$) a medida que usuários foram adicionados ao sistema. Assim como nos sistemas anteriores o experimento comprova que o número de interferentes agregados é comprovadamente um fator determinante para o desempenho do sistema. Ou seja quanto mais usuários ativos maior será a probabilidade de erro de bits.

Figura 4-19 – Influência do número de usuários interferentes no desempenho do sistema TS-OCDMA.



Nesta análise observa-se um comportamento muito similar nas duas configurações propostas para a quantidade de usuários associados ao sistema. O aspecto mais importante desta simulação é o fato de o sistema apresenta taxa de erro de bit, $BER < 10^{-6}$ para 1 usuário ativo com taxa de 5 Gbps, agregando-se usuários ao sistema percebe-se o aumento da BER até que chegando à 8 usuário obteve-se BER próxima a 10^{-4} .

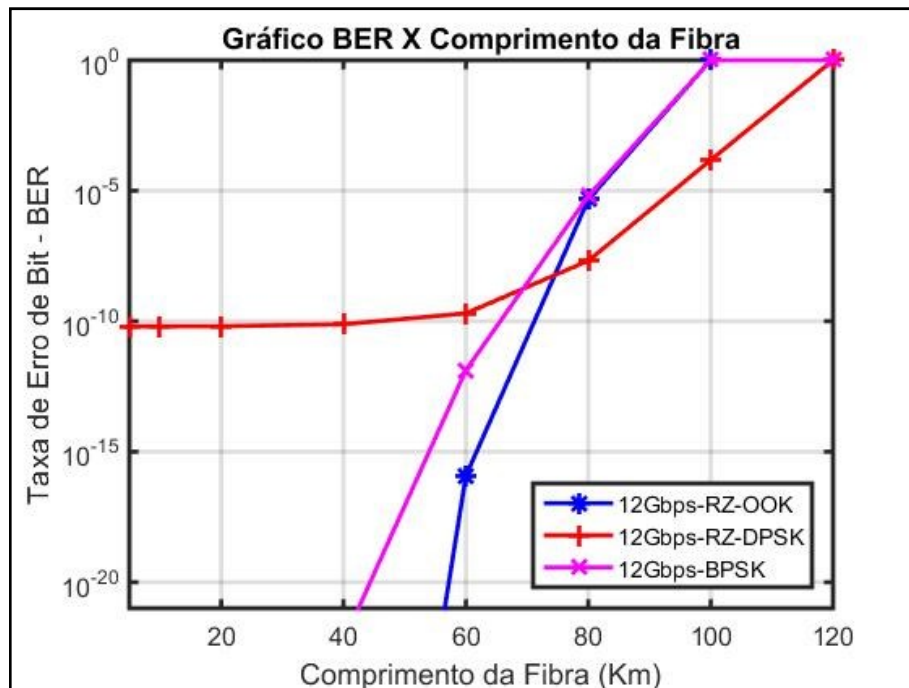
Finalizadas as análises individuais das modulações implementadas e codificadas em TS-OCDMA, na próxima seção aborda-se a comparação entre os principais aspectos e características de cada sistema estudado.

4.4 Comparação do desempenho entre as modulações RZ-OOK, RZ-BPSK e BPSK.

Na Figura 4-20 observam-se as três curvas, cada uma delas corresponde a uma das modulações abordadas. Na implementação dos sistemas fixou-se a taxa de transmissão de bits em 12 Gbps e variou-se o comprimento da fibra óptica de 0 à 120 km. Observa-se que o desempenho da modulação RZ-DPSK no que diz respeito ao comprimento da fibra é melhor que o desempenho dos demais sistemas, nota-se que este sistema alcançou um $BER < 10^{-6}$ em 90km. Porém, o sistema apresenta uma $BER < 10^{-10}$ até os 70km a taxa de bits associada a ele. Quanto a curva referente ao sistema BPSK mantém-se valores de BER aceitáveis até aproximadamente 70 km. E finalmente no sistema OOK verifica-se um bom desempenho podendo transmitir dados a distâncias próximas a 80 km com $BER < 10^{-6}$.

Uma análise interessante a ser feita é a observação de como os sistemas se comportam quanto a extensão do código Hadamard no processo de codificação. Esta investigação comparativa será abordada em trabalhos posteriores.

Figura 4-20 - Comparação entre as três modulações apresentadas.



4.5 Modulações avançadas M-PSK e M-QAM

Na origem do presente trabalho, a proposta era realizar a codificação TS-OCDMA em modulações avançadas das famílias PSK e QAM. Embora haja êxito na codificação das três modulações aqui apresentadas, algumas modulações foram implementadas e a realização da

codificação em OCDMA será objeto de estudos futuros. Desta forma apresenta-se nas ilustrações subsequentes as constelações (espaço de sinais) dos sinal modulados no transmissor e suas respectivas constelações recuperadas no receptor para os sinais QPSK, 16QAM, 32QAM e 64QAM para as Figuras 4-21, 4-22, 4-23 e 4-24, respectivamente.

Figura 4-21 - (a) Constelação do sinal QPSK no transmissor, (b) Constelação do sinal QPSK recuperado no receptor.

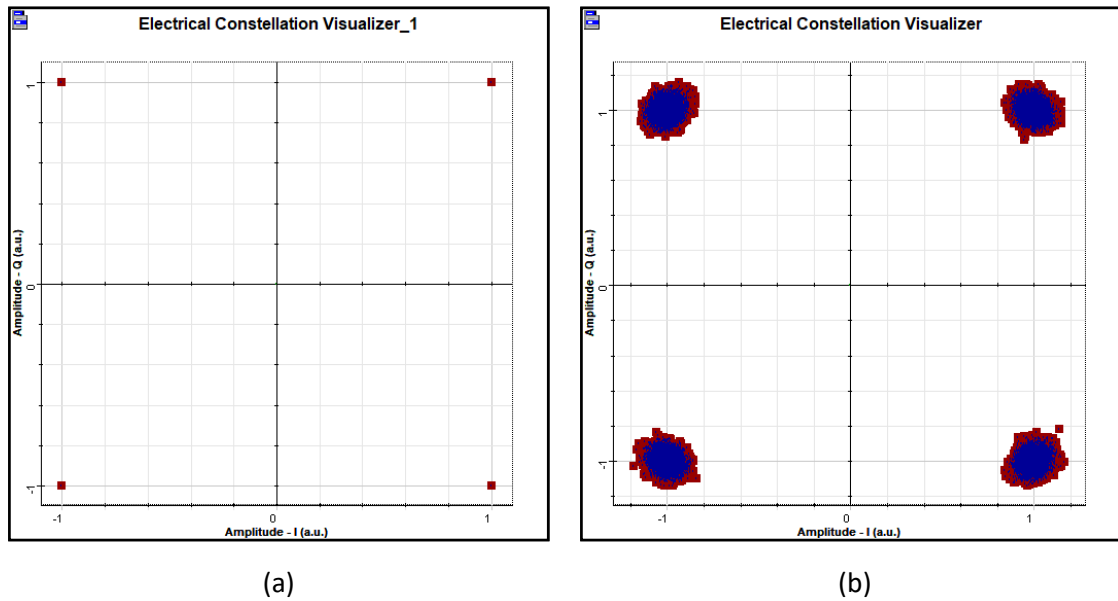


Figura 4-22 - (a) Constelação do sinal 16QAM no transmissor, (b) Constelação do sinal 16QAM recuperado no receptor.

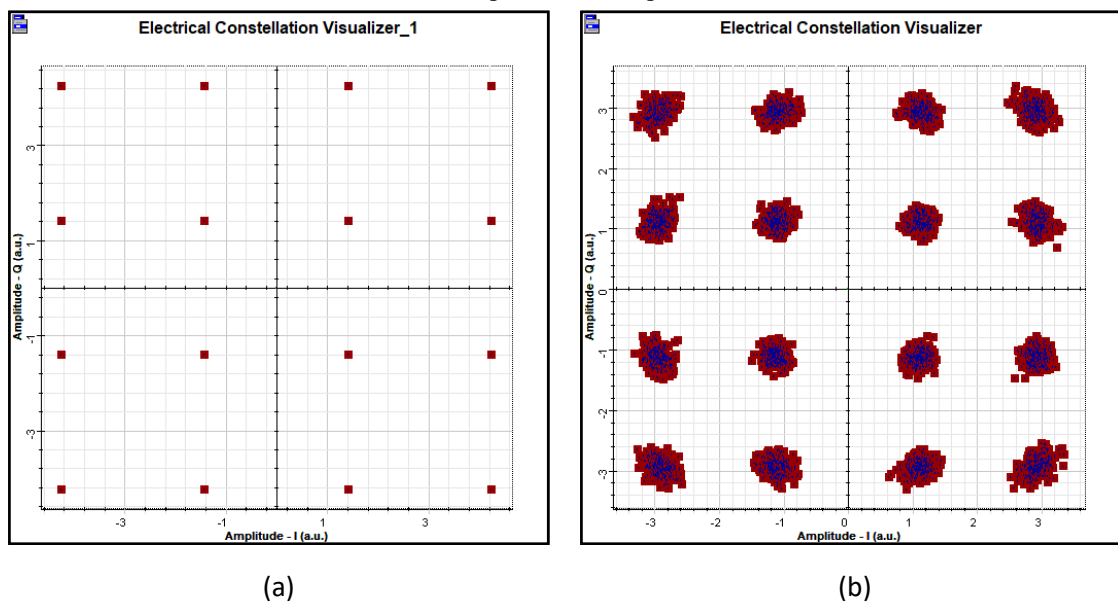


Figura 4-23 - (a) Constelação do sinal 32QAM no transmissor, (b) Constelação do sinal 32QAM recuperado no receptor.

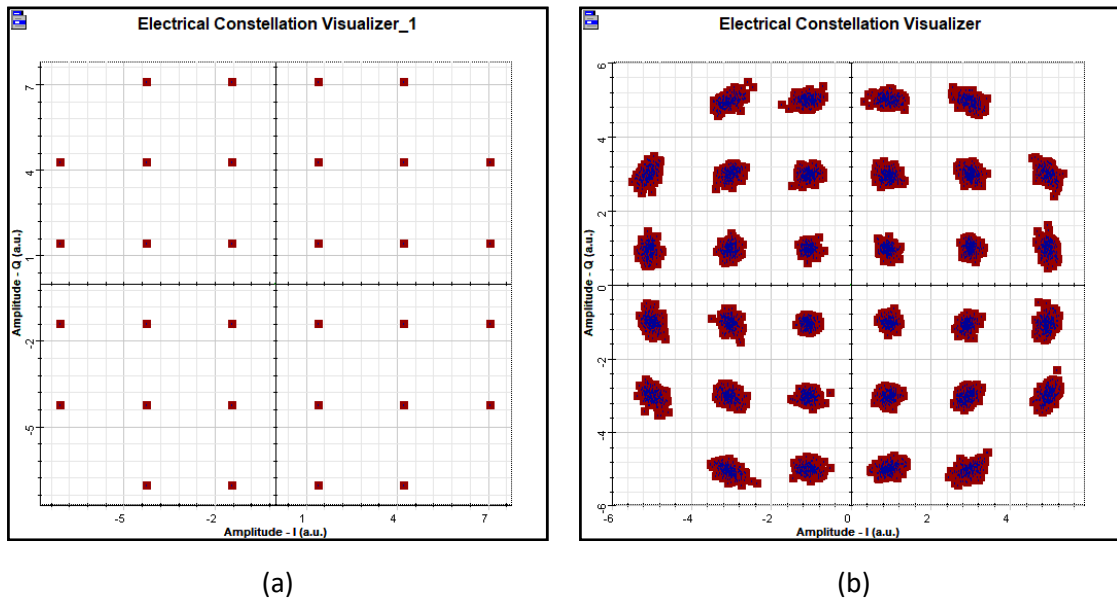
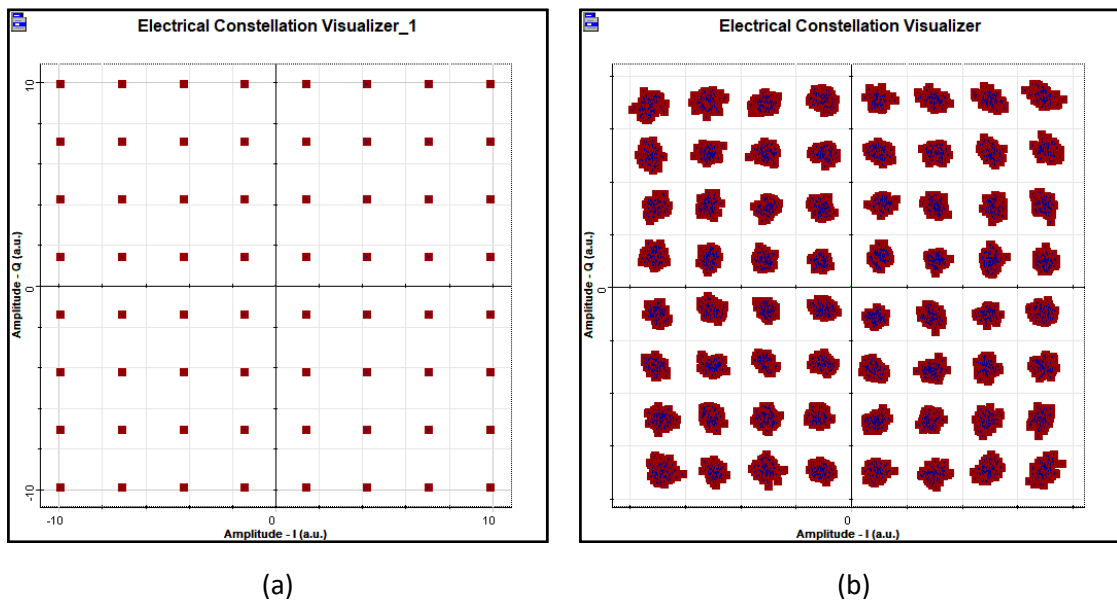


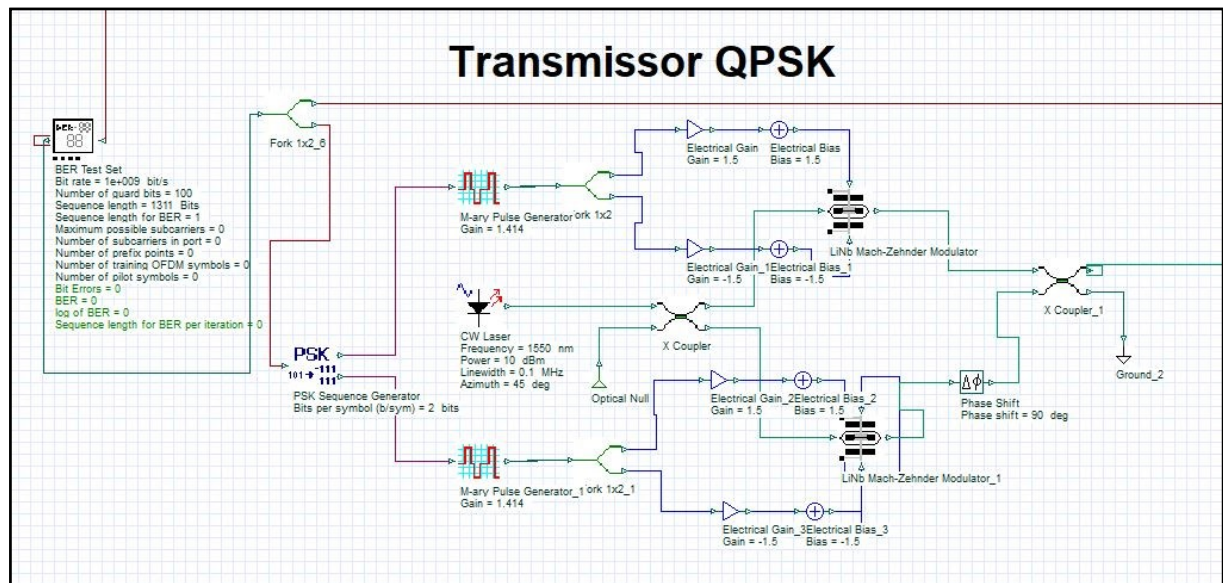
Figura 4-24 - (a) Constelação do sinal 64QAM no transmissor, (b) Constelação do sinal 64QAM recuperado no receptor.



Na Figura 4-25 apresenta-se o bloco transmissor do sistema QPSK, o primeiro componente do transmissor é o bloco *BER Test Set*, nos sistemas de modulação avançada da família PSK e QAM ele é utilizado para gerar e enviar sequências aleatórias de bits, porém também possui uma entrada de dados onde é ligada a saída do receptor para avaliar os *Symbols errors* e estimar a BER do sistema. A sequência gerada chega até o bloco *PSK Sequence Generator* onde é possível configurar a quantidade de bits por símbolo que compõe a modulação e a *phase off set*. Assim sendo, para gerar um sinal QPSK no transmissor deve-se configurar 2 bits por símbolo a uma fase de 45 graus.

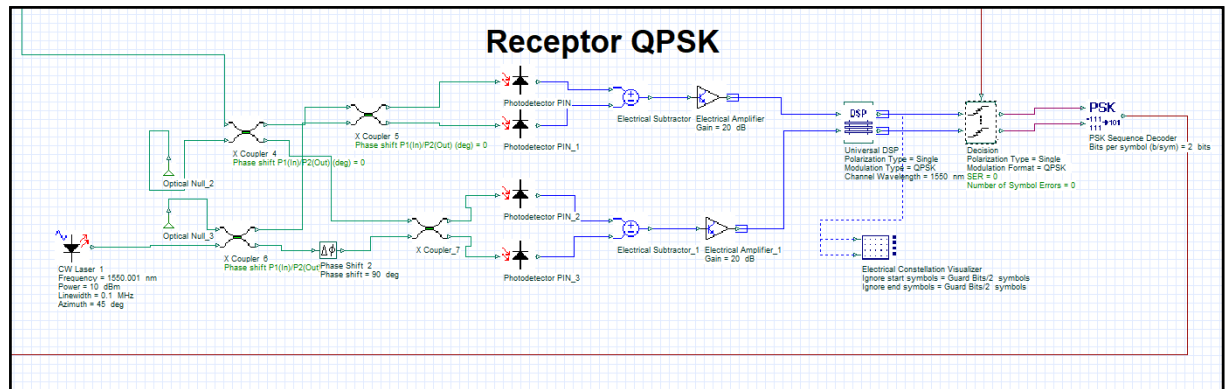
O sinal na saída do gerador PSK é um sinal M -ary, em fase (I) e quadratura (Q) cada um destes sinais é conectado a um M -ary *Pulse Generator* que por sua vez irá polarizar os dois *LiNb Mach-Zehnder Modulator* cujas entradas ópticas são alimentadas pelo mesmo laser *CW laser* com frequência de 1550 nm. O sinal de uma das saídas ópticas dos moduladores é invertida em 90 graus e depois os dois sinais ópticos podem ser acoplados no *X Coupler* configurado com fator de acoplamento 0,5. Após isso o sinal é transmitido pelo canal óptico.

Figura 4-25 - Circuito transmissor do sistema modulado em QPSK.



No receptor o sinal óptico que chega em uma das entradas de outro acoplador óptico é dividido com fator de acoplamento 0.5 e este chega a uma das entradas de outro acoplador que por sua vez tem a sua outra entrada modulada por um *laser CW* cuja saída recebe uma defasagem de 90 graus. A recepção ocorre de modo duplo, tem-se então 4 fotodetectores PIN, cada par recebe um sinal proveniente de um acoplador óptico e o sinal recebido é convertido para o domínio elétrico, passam pelo *subtractor* e pelo amplificador elétrico e chegam até o DSP, pré-configurado para a modulação de interesse. Ele realiza processos como filtragem, reamostragem, QI compensação e equalização para recuperar corretamente o sinal recebido. Depois disso a saída do DSP alimenta as entradas do circuito de decisão que também deve estar configurado para a modulação de interesse, este dispositivo recebe o sinal elétrico e libera um sinal M -ary que irá alimentar o bloco *PSK sequence decoder*. A saída do *PSK sequence decoder* é então ligada ao *BER Test Set*. A Figura 4-26 mostra com detalhes o bloco receptor.

Figura 4-26 – Circuito receptor do sistema de transmissão modulado em QPSK.



Analogia similar é seguida para realizar a configuração das modulações QAM, porém levando-se em considerações modificações nos ganhos dos moduladores *Mach-Zenner* no transmissor, substituição dos blocos *PSK Sequence Generator* e *PSK Sequence Decoder* além das alterações das configurações do DSP e do *circuito decision*.

5 CONCLUSÃO

Realizou-se neste trabalho uma investigação ampla sobre a funcionalidade dos diversos formatos de modulação de sinais em redes ópticas com codificação OCDMA com codificação temporal de fase. Os sistemas OCDMA possuem características vantajosas como alta possibilidade de alocação de usuários, segurança e escalabilidade elevada. Os esforços na realização deste trabalho permitiram atestar a efetividade deste sistema em redes de acesso. Inicialmente foi dada toda atenção à literatura a respeito das modulações a serem implementadas. Depois de vasta pesquisa, iniciaram as tentativas de implementação, quando foi verificado que os pulsos NRZ não são favoráveis a forma de codificação TS-OCDMA.

Dentre as modulações estudadas destacaram-se as codificações RZ-OOK, RZ-DPSK e BPSK. Com a modulação RZ-OOK obteve-se êxito em alocar uma quantidade maior de usuários e razoável taxa de bit desde que a largura do *chip* não diminuísse a ponto de ocasionar queda considerável no sistema. O sistema RZ-DPSK é sem dúvida o mais promissor e alvo de estudos futuros que poderão melhorar o processo de codificação para que, além de apresentar alta taxa de transmissão e possibilitar comprimentos de fibra próximo à 90 km, ele possa também comportar um número maior de usuários ativos no sistema. Finalmente, o sistema BPSK implementado apresentou certa robustez para algumas configurações. Além disso, verificou-se que a utilização no receptor de técnicas de processamento de sinais aumenta o custo desta implementação, porém permite alcançar resultados muitos satisfatórios.

5.1 Trabalhos Futuros

O primeiro passo para continuidade deste trabalho passa por um estudo mais aprofundado das modulações avançadas que foram implementadas aqui com objetivo de tentativa de codificar e transmitir esse sinal. As constelações resultantes dessas implementações se encontram na seção 4.5 e serão o primeiro objeto de estudos.

Posteriormente e como já citado acima uma investigação minuciosa sobre o sistema RZ-DPSK poderá ser feita no intuito de alocar mais usuários ao sistema de transmissão que atualmente apresenta bom funcionamento para 8 usuários ativos e é bastante promissor.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- [1] Cisco Systems. Tráfego de dados no Brasil deve crescer quase três vezes até 2020. Disponível em: <<http://link.estadao.com.br/noticias/empresas,trafego-de-dados-no-brasil-deve-crescer-quase-tres-vezes-ate-2020,10000055769>> Acesso em: 19. Abr. 2017
- [2] D. R. Hughes and D. Hendrcks, “Spread-Spectrum Radio”, *Scientific America*, pp. 94-96, Apr. 1998.
- [3] H.V. Poor and L.A. Rush, “A promising multiplexing technology for cellular telecommunications: Narrowband Interference Suppression in Spread Spectrum CDMA”, *IEEE Personal Commun.*, Rhird Quarter, pp. 14-27, 1994.
- [4] K.S. Gilhousen, I.M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L.A. Weaver and C.E. Wheatley III, “On the Capacity of a Cellular CDM System”, *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, Vol. 40, No. 2, pp. 303 -312, May. 1991.
- [5] P. L. L Bertarini, *Sistemas CDMA ópticos coerentes baseados em codificação de fase espectral*, USP, São Carlos, 2012.
- [6] SANTOS FILHO, R. V. B. (2005). *Análise de Sistemas CDMA Ópticos*. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006
- [7] P. R. Prucnal, M. A. Santoro and T. R. Fan, “Spread Spectrum Fiber-optic Local Area Network Using Optical Processing”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 4, No.5,pp. 547-554, May 1986.
- [8] A. M .Weiner, J. P. Heritage, J. A. Salehi, “Encoding and decoding of femtosecond pulses”, *Optics Letters*, Vol. 13, No. 4, pp. 300-302, 1988
- [9] CRUZ, F.T.; MACHADO, G.E.D.; SOUZA, N.T.; BERTARINI, P. L. L., “Análise de Redes Ópticas Coerentes baseadas na Tecnologia CDMA” Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2016.
- [10] M. Attygalle, A. Nirmalathas, H. F. Liu, and D. Novak, “Injection Signal Wavelength Dependence of a Subharmonically Synchronous Mode-Locked Monolithic Semiconductor Laser,” *Conf. Proc. on Optoelectron. and Microelectron Material Devices 1998*, pp 206-208, 1999.
- [11] Haji, Mohsin (2012) *Optical code division multiple access systems in AlGaInAs/InP*. PhD thesis.
- [12] TARHUNI, Naser G. *Fiber-Optic Code Division Multiple Access: Multi-Class Optical Orthogonal Codes, Optical Power Control and Polarization Encoding*. Tese (PhD in Science in

Technology) – Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Espoo, Finland, 2007.

[13] X. Wang et al., *J. Lightwave Technol*, 22, 2226-2235 (2004).

[14] X. Wang et al., *LEOS 2005*, WW2, 2005.

[15] X. Wang, N. Wada and K. Kitayama, *Multi-user asynchronous coherent OCDMA system*, Japan, 2007.

[16] Murat Azizoglu; Jawad A. Salehi and Ying Li, "Optical CDMA via Temporal Codes", *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, VOL. 40, NO. 7, JULY 19.

[17] Raad S. Fyath; Howraa M. and Mohammad Ali, "Transmission Performance of Optical Code Division Multiple Access Network Based on Spectral Amplitude Coding", *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, March 2012.

[18] D. J. Richardson, J. M. Fini and L. E. Nelson, "Space-division multiplexing in optical fibres," *Nature Photonics*. vol. 7, 354-362, May 2013.

[19] Morioka, T., Awaji, Y., Ryf, R., Winzer, P., Richardson, D., & Poletti, F. (2012). "Enhancing optical communications with brand new fibers." *Communications Magazine*, IEEE, 50(2), s31-s42.

[20] SANCHES., A. L. Single and Multirate FFH-OCDMA Network Based on PSK Modulation Formats.2015

[21] Ales VANDERKA, Lukas HAJEK, Jan LATAL, Jan VITASEK, Petr KOUDELKA, Design, Simulation and Testing of the OOK NRZ Modulation Format for Free Space Optic Communication in a Simulation Box, 2014.

[22] Carbonaro, Karine Barbosa, 1978- Avaliação do sistema M-QAM OFDM sem e com tempo de guarda em um canal PLC com os ruídos Gaussiano e impulsivo e múltiplas reflexões / Karine Barbosa Carbonaro. - 2015.

[23] *International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology (IJECET)*, ISSN 0976 – 6464(Print), ISSN 0976 – 6472(Online) Volume 4, Issue 2, March – April (2013), © IAEME.

[24] XIONG, F. *Digital modulation techniques*. 2. ed, Artech House, 2006.

[25] CAHN, C. Combined digital phase and amplitude modulation communication systems. *IRE Transactions on Communications Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 150 –155, setembro 1960.

[26] HANCOCK, J.; LUCKY, R. Performance of combined amplitude and phase-modulated communication systems. *IRE Transactions on Communications Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 232 – 237, dezembro 1960.

- [27] CAMPOPIANO, C.; GLAZER, B. A coherent digital amplitude and phase modulation scheme. IRE Transactions on Communications Systems, vol. 10, no. 1, pp. 90–95, março 1962.
- [28] KEISER, Gerd. “Optical Fiber Communications”. McGraw-Hill, EUA, 1993.
- [29] Q. Hu, D. Che, Y. Wang, and W. Shieh, "Advanced modulation formats for high-performance short-reach optical interconnects," Opt. Express 23, 3245-3259 (2015).
- [30] Alves. Antonio, Lemes. Alan, Scudeler. Luiz, “Efeito da dispersão cromática no sinal BPSK em um enlace óptico com modulação de intensidade e detecção direta” Revista Telecomunicações, Vol. 16, Nº 02, Novembro de 2014.
- [31] Optiwave System Inc. Disponível em <http://optiwave.com> .
- [32] MathWorks Inc. Matlab © Disponível em <http://mathworks.com> .
- [33] Hassan Y. Ahmed , Mohammed E. , Hilal A. Fadhil , and Syed Aljunid, “Optical CDMA: Performance of Spectral-Amplitude Coding with New Direct Recovery Scheme using Vector Combinatorial (VC) Code”.
- [34] Hui, J. (1985). Pattern code modulation and optical decoding—a novel code division multiplexing technique for multifiber networks. IEEE J. Select. Areas Commun. 3: 916–927.