



FELIPE KOJI GODINHO HOSHINO

**ESTUDO E SIMULAÇÃO DA MODULAÇÃO OFDM
APLICADA EM REDES ÓPTICAS DE NOVA GERAÇÃO**

***REVIEW AND SIMULATION OF OFDM MODULATION
APPLIED IN NEXT GENERATION OPTICAL NETWORK***

**LIMEIRA
2013**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

FELIPE KOJI GODINHO HOSHINO

**ESTUDO E SIMULAÇÃO DA MODULAÇÃO OFDM
APLICADA EM REDES ÓPTICAS DE NOVA GERAÇÃO**

Orientador/Supervisor: Prof. Dr. Rangel Arthur

***REVIEW AND SIMULATION OF OFDM MODULATION
APPLIED IN NEXT GENERATION OPTICAL NETWORK***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Tecnologia, área de concentração em Tecnologia e Inovação.

Master's Dissertation presented to the Graduate Program in Technology of the School of Technology of the University of Campinas to obtain the title of Master in Technology, area of concentration in Technology and Innovation.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO FELIPE KOJI GODINHO HOSHINO
E ORIENTADO PELO PROF. DR. RANGEL ARTHUR

Assinatura do Orientador

**Limeira
2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR SILVANA MOREIRA DA SILVA SOARES –
CRB-8/3965
BIBLIOTECA UNIFICADA FT/CTL
UNICAMP

Hoshino, Felipe Koji Godinho, 1989-
H792e Estudo e simulação da modulação OFDM aplicada
em redes ópticas de nova geração / Felipe Koji Godinho
Hoshino. – Limeira, SP : [s.n.],
2013.

Orientador: Rangel Arthur.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. OFDM. 2. Redes ópticas passiva. 3. Comunicações ópticas.
I. Arthur, Rangel. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Review and simulation of OFDM modulation applied in next
generation optical network

Palavras-chave em inglês (Keywords):

- 1- OFDM
- 2- Passive optical networks
- 3- Optical communications

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora: Rangel Arthur, Edson Luiz Ursini, Vicente Idalberto Becerra
Sablón

Data da Defesa: 28-02-2013

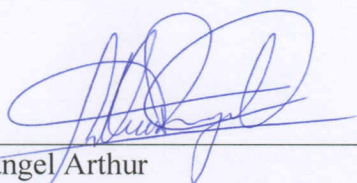
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

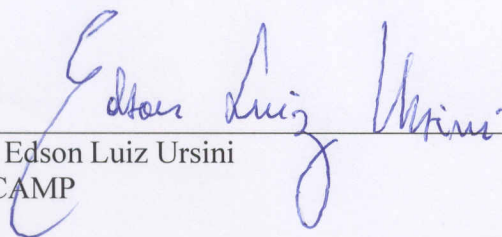
Estudo e Simulação da modulação OFDM aplicada em redes ópticas de nova geração

Autor: Felipe Koji Godinho Hoshino

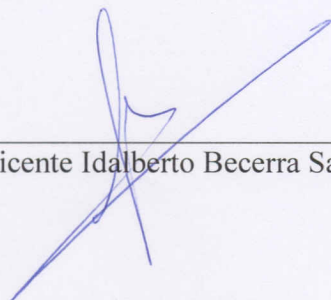
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Rangel Arthur
FT/UNICAMP



Prof. Dr. Edson Luiz Ursini
FT/UNICAMP



Prof. Dr. Vicente Idalberto Becerra Sablón
UNISAL

Aos meus pais

Agradecimentos

A Deus por me proporcionar muitas oportunidades na vida.

A minha família, parentes e amigos que sempre me apoiaram direta e indiretamente durante a minha jornada.

Ao meu orientador professor Dr. Rangel Arthur pelo apoio, paciência, conselhos, orientação e sua compreensão nos momentos de dificuldade.

Aos professores, Dr. Cristiano de Melo Gallep e Dr. Evandro Conforti, e aos demais membros do LAPCOM (Laboratório de Pesquisas em Comunicações Ópticas e em Microondas) por ceder espaço para a realização de algumas simulações no decorrer do desenvolvimento dessa dissertação.

Aos professores da Faculdade de Tecnologia pelos conhecimentos passados.

As secretárias da Pós-Graduação, Fátima e Karen, aos técnicos do Laboratório de Telecomunicações, João e Rodrigo, aos técnicos do Laboratório de Informática, Marcelo, Ricardo e Wander, e aos demais colaboradores da Faculdade de Tecnologia pela amizade, ajuda e conselhos.

Ao Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAEPEX/UNICAMP) pelo apoio financeiro.

Muito obrigado!

“The only limit to our realization of tomorrow will be our doubts of today. Let us move forward with strong and active faith.” (Franklin Delano Roosevelt)

Resumo

O aumento exponencial no tráfego mundial de dados tem imposto inúmeros desafios para os sistemas de telecomunicações. Há um compromisso entre o interesse das operadoras de telecomunicações, de aumentar a receita líquida, e dos clientes, de aumentar a taxa de transmissão de dados. Com isso, diversas soluções têm sido discutidas no âmbito das comunicações ópticas. Uma das propostas estudadas é a aplicação mais intensa do processamento digital de sinais. Dessa forma, neste trabalho foi estudado e simulado o uso da modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) nas redes ópticas de nova geração. Também foi simulado um modem OFDM em linguagem VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language*) sendo esta uma etapa do projeto de novos equipamentos. Como prova de conceito, analisou-se o desempenho de redes ópticas por meio do *software* OptiSystem. De maneira geral, os resultados obtidos foram satisfatórios para demonstrar a viabilidade da modulação OFDM em redes ópticas de nova geração.

Palavras-chave: Modem OFDM, OFDM Óptico, OptiSystem, Rede de Nova Geração, Rede Óptica Passiva.

Abstract

The exponential increase in global data traffic has imposed many challenges for telecommunication systems. There is a trade-off between the interest of telecom operators to increase the net revenue and the customers to increase the transmission data rate. Several solutions have been discussed in optical communications field. One approach is the more intense application of the digital signal processing. Thus, in this work is presented a review and simulations of OFDM modulation (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) in the next generation networks. It was also simulated a OFDM modem in VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) which for a new equipment design. The performance of optical networks has been examined with OptiSystem software as a proof of concept. In general, the results obtained were satisfactory to show the feasibility of OFDM modulation in the next generation networks.

Keywords: Next Generation Network, OFDM Modem, Optical OFDM, OptiSystem, Passive Optical Network.

Lista de Figuras

1	Tráfego de Internet (IP) Global.	1
2	Sistema de comunicação óptica genérico.	7
3	Modulador <i>Mach-Zehnder</i>	8
4	Espectro eletromagnético.	10
5	Lei de reflexão e refração.	11
6	Lei de Snell.	12
7	Princípio de confinamento da luz em fibra óptica.	13
8	Cone de aceitação de uma fibra óptica.	14
9	Atenuação total de uma fibra óptica em função do comprimento de onda.	16
10	Alargamento do pulso devido a dispersão do modo de polarização.	18
11	Componentes básicos de uma rede PON.	21
12	Exemplo da multiplexação por divisão de tempo.	23
13	Operação de um divisor óptico genérico.	24
14	Rede WDM-PON.	31
15	Diagrama da rede 10G-GPON.	33
16	Diagrama da rede 10G-EPON.	34
17	Sinal OFDM: (a) Subportadoras no domínio do tempo; (b) Sobreposição/somatória das subportadoras no domínio do tempo; (c) Subportadoras no domínio da frequência.	38
18	Modulador OFDM básico.	40
19	Diagrama de blocos do demodulador OFDM.	42
20	Modulador OFDM utilizando a IDFT.	44
21	Demodulador OFDM utilizando a DFT.	45
22	Sistema OFDM com transmissão da parte imaginária da IDFT.	46
23	Sistema OFDM utilizando o método da IFFT/FFT.	47
24	Configurações de transmissores OFDM óptico.	50
25	Configurações de receptores OFDM óptico.	50
26	Sistema CO-OFDM completo considerando os efeitos da CD, PMD e PDL.	51
27	Diagrama esquemático de um sistema WDM-OFDM-PON.	54
28	Ambiente de programação do <i>software</i> OptiSystem.	59
29	Sistema DDO-OFDM simulado.	61

30	Sinal OFDM óptico: (a) Antes da filtragem; (b) Após a filtragem.	62
31	Diagrama de constelação do sistema DDO-OFDM com mapeamento dos dados em 4-QAM: (a) No transmissor; (b) No receptor.	63
32	Comportamento do sinal recebido em banda base.	64
33	Sistema CO-OFDM simulado.	65
34	Sinal OFDM em banda-base: (a) No transmissor; (b) No receptor.	66
35	Diagrama de constelação do sistema CO-OFDM com mapeamento dos dados em 4-QAM: (a) No transmissor; (b) No receptor.	66
36	Sistema OFDM óptico 100 Gbit/s com detecção coerente de dupla polarização simulado.	68
37	Subsistema OFDM X.	69
38	Analisador de Espectro Óptico.	70
39	Visualizador de sinal óptico no domínio do tempo.	70
40	Diagrama de constelação do sistema CO-OFDM com dupla polarização e mapeamento dos dados em 4-QAM recebidos: (a) Em X; (b) Em Y.	71
41	Sistema GPON simulado.	72
42	Diagrama de olho da simulação do GPON em: (a) <i>Downstream</i> ; (b) <i>Upstream</i>	73
43	Sistema WDM-PON simulado.	74
44	Comportamento do sinal recebido em banda base.	75
45	Diagrama de constelação do sistema WDM-OFDM: (a) Do canal 1; (b) Do canal 2.	76
46	Sistema XG-PON simulado.	77
47	Diagrama de olho do sistema simulado: (a) <i>Upstream</i> do XG-PON; (b) <i>Upstream</i> do GPON; (c) <i>Dowstream</i> do XG-PON e (d) <i>Dowstream</i> do GPON.	78
48	Arquitetura básica de um FPGA.	82
49	<i>Waveform</i> do circuito modelado.	84
50	Ambiente de programação do <i>software</i> ModelSim versão 10.0c.	85
51	Ambiente de programação do <i>software</i> Quartus II versão 7.2.	86
52	Ambiente de programação do <i>software</i> MATLAB versão 7.6.0 (R2008a).	87
53	Diagrama de blocos do modem OFDM.	88
54	Conversão de símbolos no transmissor e receptor operando com diferentes taxas de processamento.	89
55	Uma implementação do mecanismo eficiente de memória de inserção de prefixo cíclico com <i>backpressure</i>	90

Lista de Tabelas

1	Tabela comparativa dos diferentes tipos de topologia de rede	26
2	Combinação de taxas de transmissão <i>downstream/upstream</i> da tecnologia BPON .	27
3	Tabela comparativa das tecnologias BPON, EPON e GPON	30
4	Esquema de cores para a representação dos diferentes tipos de sinais no OptiSystem	58

Lista de Abreviaturas e Siglas

3R: *Reamplifying, Reshaping, Retiming* – Reamplificação, Reformatação, Ressincronização

ADC: *Analog-to-Digital Converter* – Conversor Analógico-Digital

AES: *Advanced Encryption Standard* – Padrão de Criptografia Avançada

APD: *Avalanche Photodiode* – Fotodiodo de Avalanche

APON: *ATM Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva ATM

ASE: *Amplified Spontaneous Emission* – Emissão Espontânea Amplificada

ASIC: *Application-Specific Integrated Circuit* – Circuito Integrado de Aplicação Específica

ATM: *Asynchronous Transfer Mode* – Modo de Transferência Assíncrono

AWG: *Arrayed Waveguide Grating* – Grades Ordenadas em Guias de onda

BER: *Bit Error Rate* – Taxa de Erro de Bit

BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BPON: *Broadband Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva Banda larga

CAD: *Computer-Aided Design* – Projeto Assistido por Computador

CAPEX: *Capital Expenditure* – Despesas de Capital

CD: *Chromatic Dispersion* – Dispersão Cromática

CLB: *Configurable Logic Block* – Bloco Lógico Configurável

CO-OFDM: *Coherent Optical OFDM* – OFDM Óptico Coerente

CO: *Central Office* – Central Local

CP: *Cyclic Prefix* – Prefixo Cíclico

CW: *Continuous Wave* – Onda Contínua

DAC: *Digital-to-Analog Converter* – Conversor Digital-Analógico

DARPA: *Defense Advanced Research Projects Agency* – Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América

DBA: *Dynamic Bandwidth Assignment* – Atribuição Dinâmica de Largura de banda

DDC: *Digital Down-Converter* – Conversor de subida Digital

DDO-OFDM: *Direct Detection Optical OFDM* – OFDM Óptico de Detecção Direta

DFT: *Discrete Fourier Transform* – Transformada Discreta de Fourier

DUC: *Digital Up-Converter* – Conversor de descida Digital

EDA: *Electronic Design Automation* – Automação de Projeto Eletrônico

EDFA: *Erbium Doped Fiber Amplifier* – Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio

EFM: *Ethernet in the First Mile* – *Ethernet* na Primeira Milha

EPON: *Ethernet Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva *Ethernet*

FFT: *Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier

FINEP: Financiadora de Estudos e Projetos

FPGA: *Field Programmable Gate Array* – Arranjo de Portas Programáveis em Campo

FSAN: *Full Service Access Network* – Rede de Acesso de Serviço Completo

FTTH: *Fiber To The Home* – Fibra até a residência

FUNTEL: Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações

FUST: Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações

GEM: *GPON Encapsulation Method* – Método de Encapsulamento GPON

GEAPON: *Gigabit Ethernet Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva Gigabit *Ethernet*

GFP: *Generic Framing Procedure* – Procedimento de Enquadramento Genérico

GPON: *Gigabit-capable Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva com capacidade para Gigabit

HDL: *Hardware Description Language* – Linguagem de Descrição de *Hardware*

HIBI: *High Birefringence* – Alta Birrefringência

ICI: *Inter-Carrier Interference* – Interferência entre subportadoras

IDFT: *Inverse Discrete Fourier Transform* – Transformada Discreta Inversa de Fourier

IEEE: *Institute of Electrical and Electronic Engineer* – Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica

IFFT: *Inverse Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida Inversa de Fourier

IP: *Internet Protocol* – Protocolo de Internet

IPTV: *Internet Protocol Television* – Televisão por Protocolo de Internet

IQ: *In-Phase and Quadrature* – Em Fase e Quadratura

IR: *Infrared* – Infravermelho

ITU-T: *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* – União Internacional de Telecomunicações - Setor de Padronização das Telecomunicações

LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação

LED: *Light Emission Diode* – Diodo Emissor de Luz

LN: *Lithium Niobate* – Niobato de Lítio

LUT: *LookUp Table* – Tabela de consulta

MC: Matriz de Chaveamento

MCM: *Multicarrier Modulation* – Modulação Multiportadora

MDU: *Multiple Dwelling Unit* – Unidade Multi-Residencial

Modem: Modulador/Demodulador

MTU: *Multiple Tenant Units* – Unidade com Múltiplos Inquilinos

MZM: *Mach-Zehnder Modulator* – Modulador *Mach-Zehnder*

NG-PON: *Next Generation Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva de Nova Geração

OA: *Optical Amplifiers* – Amplificadores Ópticos

ODN: *Optical Distribution Network* – Rede de Distribuição Óptica

OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal

OLT: *Optical Line Terminal* – Terminal de Linha Óptica

ONT: *Optical Network Terminal* – Terminal de Rede Óptica

ONU: *Optical Network Unit* – Unidade de Rede Óptica

OPEX: *Operational Expenditure* – Despesas Operacionais

OSA: *Optical Spectrum Analyzer* – Analisador de Espectro Óptico

OSNR: *Optical Signal-to-Noise Ratio* – Razão Sinal-Ruído Óptica

P2P: *Point-to-point* – Ponto-a-ponto

PAPR: *Peak-to-Average Power Ratio* – Razão entre Potências de Pico e Média;

PDA: *Photonic Design Automation* – Automação de Projeto Fotônico

PDL: *Polarization Dependent Loss* – Perda Dependente da Polarização

PIN: *Positive-Intrinsic-Negative* – Positivo-Intrínseco-Negativo

PLOAM: *Physical Layer Operation, Administration and Maintenance* – Operação, Administração e Manutenção da Camada Física

PMD: *Polarization Mode Dispersion* – Dispersão do Modo de Polarização

PNBL: Plano Nacional de Banda Larga

PON: *Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva

QAM: *Quadrature-Amplitude Modulation* – Modulação de Amplitude em Quadratura

RF: *Radio-Frequency* – Radiofrequência

RSOA: *Reflective Semiconductor Optical Amplifier* – Amplificador Óptico Semicondutor Reflexivo

S-SMF: *Standard Single-Mode Fiber* – Fibra Óptica Monomodo Padrão

SI: *Système international d'unités* – Sistema Internacional de unidades

SOA: *Semiconductor Optical Amplifier* – Amplificador Óptico a Semicondutor

TDM: *Time Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Tempo

TDMA: *Time Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo

TOF: *Tunable Optical Filter* – Filtro Óptico Sintonizável

UV: *Ultraviolet* – Ultravioleta

VHDL: *Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language* – Linguagem de Descrição de *Hardware* com ênfase em Circuitos Integrados de Velocidade Muito Alta

VHSIC: *Very High Speed Integrated Circuit* – Circuitos Integrados de Velocidade Muito Alta

VoD: *Video-on-Demand* – Vídeo sob Demanda

VoIP: *Voice over IP* – Voz sobre IP

WDM: *Wavelength-Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Comprimentos de Onda

Wi-Fi: *Wireless Fidelity* – Fidelidade Sem fio

WLAN: *Wireless Local Area Network* – Rede de Área Local Sem fio

Lista de Símbolos

λ	– Comprimento de onda
λ_0	– Comprimento de onda no vácuo
v_p	– Velocidade de uma onda
f	– Frequência de uma onda
c	– Velocidade da luz
n	– Índice de refração
α	– Fator de atenuação da fibra óptica
P	– Potência
i_n	– Sinal em fase
q_n	– Sinal em quadratura
c_n	– Sinal complexo mapeado pelos sinais em fase (i_n) e em quadratura (q_n)
$m(t)$	– Sequência de dados a ser transmitida
ω_n	– Frequência angular
i'_N	– Componentes recebidas
T	– Período de uma onda
R_s	– Taxa de Amostragem do sinal
Ω_n	– Frequência angular da n -ésima subportadora
$s(t)$	– Tempo do símbolo OFDM de entrada
f_s	– Frequência de amostragem
s_{OFDM}	– Sinal OFDM amostrado em banda básica
$r(m)$	– Sinal discreto recebido
$x_g(n)$	– Número de amostras do símbolo OFDM com intervalo de guarda
N	– Número de subportadoras ou símbolos complexos
N_g	– Número de amostras do intervalo de guarda
$h(t)$	– Função de resposta ao impulso fim-a-fim
$N(t)$	– Ruído óptico adicionado pelos amplificadores ópticos
ϵ_{ki}	– Ruído de interferência entre subportadoras

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Visão geral	1
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivo	4
1.4	Contribuições	4
1.5	Organização da dissertação	5
2	Conceitos gerais de comunicações ópticas	7
2.1	Sistema de transmissão óptica	7
2.2	Propagação da luz em fibras ópticas	9
2.2.1	As ondas eletromagnéticas	9
2.2.2	Refração e reflexão	11
2.2.3	Princípio de confinamento da luz na fibra óptica	13
2.3	Parâmetros das fibras ópticas	14
2.3.1	Parâmetros estruturais	15
2.3.2	Parâmetros de transmissão	15
3	Redes Ópticas Passivas	21
3.1	Descrição genérica de uma Rede Óptica Passiva	21
3.1.1	OLT: <i>Optical Line Terminal</i>	22
3.1.2	ONT/ONU: <i>Optical Network Terminal/Unit</i>	22
3.1.3	<i>Splitter</i>	23
3.1.4	Funcionamento de uma Rede Óptica Passiva	24
3.2	Vantagens e desvantagens das Redes Ópticas Passivas	26
3.3	Arquiteturas e evolução das Redes Ópticas Passivas	26
3.3.1	APON: <i>Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network</i>	27
3.3.2	BPON: <i>Broadband Passive Optical Network</i>	27
3.3.3	EPON: <i>Ethernet Passive Optical Network</i>	28
3.3.4	GPON: <i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i>	29
3.3.5	Arquiteturas de nova geração	31

4	Modulação OFDM	37
4.1	Definições da modulação OFDM	37
4.1.1	Transmissor OFDM	40
4.1.2	Receptor OFDM	41
4.1.3	Intervalo de Guarda	47
4.2	Aplicação da modulação OFDM em comunicações ópticas	48
4.2.1	Descrição do OFDM óptico	48
4.2.2	Modelo de canal para CO-OFDM	51
5	Simulação de redes ópticas	57
5.1	Ferramentas para simulação de sistemas ópticos	57
5.1.1	Método de análise numérica	57
5.1.2	<i>Software</i> OptiSystem	58
5.2	Simulação dos sistemas PON e OFDM óptico	59
5.2.1	Sistema OFDM óptico de detecção direta	60
5.2.2	Sistema OFDM óptico de detecção coerente	64
5.2.3	Sistema OFDM óptico de detecção coerente com dupla polarização	67
5.2.4	Sistema GPON	71
5.2.5	Sistema WDM-PON	73
5.2.6	Sistema XG-PON	76
5.3	Resultados e discussões	79
6	Simulação do modem OFDM em VHDL	81
6.1	Aspectos gerais dos sistemas embarcados	81
6.1.1	FPGA: <i>Field Programmable Gate Array</i>	81
6.1.2	Linguagem de descrição de <i>hardware</i> e VHDL	82
6.1.3	Ferramentas de síntese e simulação	85
6.2	Modem OFDM em VHDL	87
6.3	Resultados e discussões	92
7	Considerações Finais	93
7.1	Conclusão	93
7.2	Trabalhos Futuros	94
	Referências Bibliográficas	95

1 Introdução

O presente capítulo apresenta uma contextualização do trabalho desenvolvido nesta dissertação. Será apresentada uma visão geral da área de telecomunicações, bem como a motivação, objetivo, contribuições do trabalho e, por fim, a organização da dissertação.

1.1 Visão geral

Segundo a previsão da Cisco[®], publicada em maio de 2012, estima-se que as proporções do tráfego mundial de Internet em 2016 seja na ordem de 109,5 EB (Exabytes, no qual 1 Exabyte equivale a 10^{18} Bytes no prefixo do SI – Sistema Internacional de Unidades – ou 2^{60} Bytes no prefixo binário) por mês [1]. Em outras palavras, o tráfego total previsto para o ano de 2016 equivalerá a aproximadamente 1,3 ZB (Zettabytes, 10^3 EB no prefixo SI ou 2^{10} EB no prefixo binário), que corresponde à quantidade de informação armazenada em 52 bilhões discos *Blu-rays* (sendo a capacidade de armazenamento de 25 GB por disco).

A Figura 1 apresenta um gráfico com detalhes essa demanda crescente de tráfego conforme o tipo de aplicação e a legenda ordenada em ordem decrescente desse consumo. Ressalta-se que a demanda é impulsionada principalmente pelo vídeo.

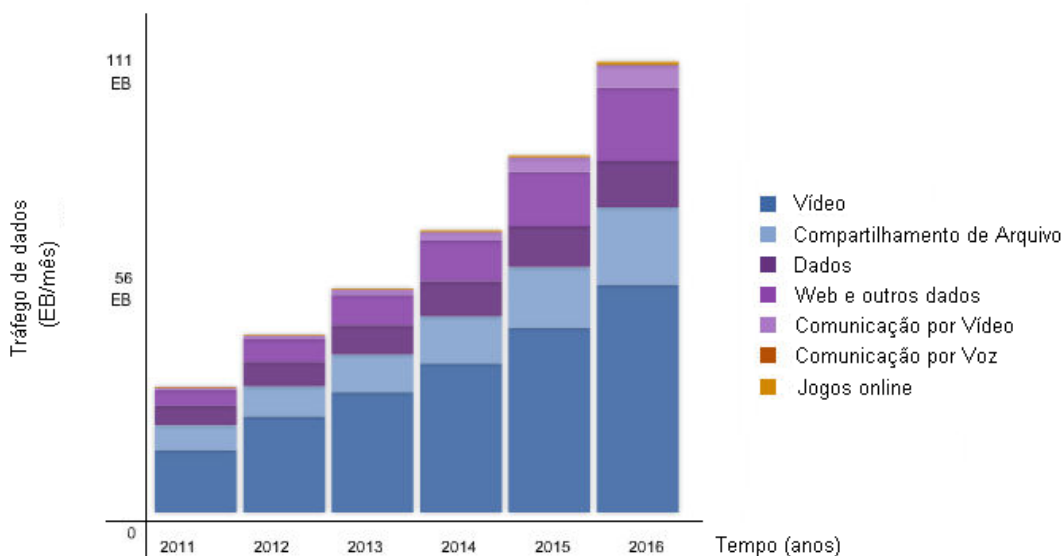


Figura 1: Tráfego de Internet (IP) Global. Adaptado de [1].

Dentre os fatores responsáveis por esse aumento, podem-se destacar o número crescente de dispositivos conectados como *tablets* e *smartphones* [2], bem como o maior número de usuários de Internet, aumento da velocidade de banda larga, demanda crescente de vídeo e expansão das redes Wi-Fi (*Wireless Fidelity*, padrão IEEE 802.11).

No Brasil, além do aumento da demanda, essa ênfase no mercado de telecomunicações deve-se também as políticas públicas que estão favorecendo a expansão da infraestrutura, como é o caso do PNBL (Plano Nacional de Banda Larga). Esse plano foi criado pelo Ministério das Comunicações no final de 2009 para promover o aumento da oferta de acesso à banda larga. Soma-se a isso, os incentivos por parte do governo por meio do apoio e financiamento de vários órgãos de fomento como FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), e fundos de investimento como FUNTTEL (Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações) e FUST (Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações).

Uma das principais tecnologias de rede de acesso utilizada para atender a demanda, bem como suportar os novos tipos de serviços emergentes no contexto atual, é a tecnologia PON (*Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva). Especificamente, a GPON (*Gigabit-capable PON* – Rede Óptica Passiva com capacidade para Gigabit) destaca-se devido a sua alta capacidade na ordem de Gbit/s por canal e inserção de apenas componentes passivos na Rede de Distribuição Óptica (ODN, *Optical Distribution Network*), resultando em despesas de Capital (CAPEX, *Capital Expenditure*) e Operacional (OPEX, *Operational Expenditure*) relativamente baixas em termos do custo por unidade de largura de banda (*per-unit bandwidth cost*) [3, 4, 5].

Dado esse crescente consumo de dados e o aumento da dependência dos serviços de telecomunicações pela sociedade atual, faz-se necessário investir no desenvolvimento de tecnologia de ponta para atender aos requisitos dos usuários, bem como diminuir os custos e aumentar a receita das operadoras, por meio da inovação contínua nesse seguimento. Além disso, a preocupação com a sustentabilidade vem ganhando cada vez mais destaque e atenção por parte dos fabricantes de equipamentos, principalmente no que se relaciona com a redução no consumo de potência dos equipamentos de redes em geral.

Dessa forma, a União Internacional de Telecomunicações (ITU-T, *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*) e FSAN (*Full Service Access Network*) têm se empenhado para a evolução da tecnologia PON, sendo este último um grupo composto por mais de 80 empresas do ramo de telecomunicações.

Eles determinaram que o desenvolvimento das redes de nova geração PON ocorresse em duas fases: NG-PON1 e NG-PON2. O primeiro estágio dos padrões de nova geração de redes PON, a chamada NG-PON1, tem como principal requisito permitir a coexistência dos sistemas atualmente

em uso, como o próprio GPON, e ser compatível com as implantações e infraestruturas externas já instaladas. Acrescenta-se que essas infraestruturas externas representam aproximadamente 70% de todo o investimento na implantação de uma rede PON [3, 6].

O NG-PON2 é uma solução de PON a longo prazo. A maioria das operadoras aguardam por esta solução para fornecer maior largura de banda, razão de *split* (divisão do sinal transmitido), distância de transmissão e capacidade de acesso, aproveitando-se parcialmente ou totalmente das redes de distribuição óptica (ODNs) existentes.

Existem diversas soluções e tecnologias que estão em pauta. No âmbito do processamento digital de sinal, incluem-se novos formatos de modulação para comunicações ópticas, dentre eles o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [7, 8].

A modulação OFDM realiza a transmissão da informação em múltiplas subportadoras de menor taxa de transmissão de dados. Esse formato de modulação pertence a uma classe mais ampla de Modulação Multiportadora (MCM, *Multicarrier Modulation*), que proporciona uma maior eficiência espectral e possibilita uma largura de banda variável, tornando o sistema mais adaptável conforme a demanda da rede [9, 10].

Por meio do processamento digital de sinal, a geração dos sinais OFDM no transmissor e a equalização digital do sinal no receptor, possibilitam prover uma maior imunidade ao sinal óptico diante dos efeitos de canal como a dispersão cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) e PMD (*Polarization Mode Dispersion* – Dispersão do Modo de Polarização) [9, 11]. Ressalta-se que os estudos do comportamento do sistema são importantes para o desenvolvimento desses sistemas.

Uma maneira de se avaliar o desempenho de um sistema de comunicação óptica é por meio do uso de ferramentas de projeto assistido por computador (CAD, *Computer-Aided Design*), mais especificamente de Automação de Projeto Fotônico (PDA, *Photonic Design Automation*). Com estas ferramentas é possível simular inúmeros sistemas, possibilitando o desenvolvimento e testes de diversos *setups*, otimizando o sistema como um todo de forma a obter os parâmetros adequados para os requisitos propostos, sem gerar qualquer custo adicional ao projeto [12].

Para complementar este trabalho, destaca-se o estudo de um dispositivo que possibilita o projeto de uma unidade de processamento de dados digitais embarcado, o FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Desenvolvido inicialmente pela “Xilinx Inc.”, em 1983, esse dispositivo semicondutor suporta a implementação de circuitos lógicos e usualmente programada em linguagens de descrição de *hardware* como Verilog e VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language* – Linguagem de Descrição de *Hardware* com ênfase em Circuitos Integrados de Muita Alta velocidade). Neste trabalho, foi dada ênfase a linguagem VHDL, como será descrito mais a frente.

1.2 Motivação

Com o grande aumento mundial da demanda de banda larga, as redes ópticas passivas (PON) representam atualmente o melhor custo-benefício para se atender à estimativa anteriormente citada.

Dentre as diversas soluções em discussão para dar suporte ao futuro panorama das telecomunicações, a modulação OFDM está sendo analisada no âmbito das comunicações ópticas, com base nas tecnologias já existentes. Deve-se salientar que esta modulação já é aplicada com êxito nas comunicações sem fio, o que a torna este estudo mais atraente.

Além disso, há um número crescente de artigos publicados que envolvem a aplicação da modulação OFDM em redes ópticas de nova geração.

Dessa maneira, este trabalho analisa o uso dessa técnica para o desenvolvimento de novos equipamentos provedores de serviços de telecomunicações, visando uma maior qualidade de serviço e diminuição dos custos de implementação dessas novas redes sob diversos aspectos.

1.3 Objetivo

O presente trabalho consiste no estudo e simulação da modulação OFDM em redes ópticas de nova geração.

Para a simulação de desempenho das redes ópticas foi utilizado o *software* OptiSystem[®]. Também foram utilizadas plataformas de desenvolvimento de sistemas embarcado para a simulação de um modem OFDM em linguagem VHDL, sendo este relacionado a uma das etapas da prototipagem de novos equipamentos.

1.4 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho foram:

- Estudo das tecnologias de redes de comunicação óptica;
- Análise de viabilidade e das implicações da adoção da modulação OFDM em redes ópticas;
- Simulações usando o *software* OptiSystem de ambientes que envolvem padrões PON e OFDM óptico;
- Estudo de um sistema embarcado de modem OFDM para aplicações em redes ópticas.

1.5 Organização da dissertação

Neste capítulo, foi apresentada uma introdução geral sobre o mercado das telecomunicações, com ênfase para a tecnologia de rede de acesso PON. Foram descritos também a motivação, objetivo e contribuições do projeto de pesquisa desenvolvido.

Os três capítulos seguintes (Cap. 2, 3, 4) apresentam a fundamentação teórica referente a esse trabalho. O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos das comunicações ópticas. O Capítulo 3 aborda os conceitos da tecnologia PON e sua evolução. E o Capítulo 4 explora os conceitos da modulação OFDM de modo geral e sua aplicação em redes ópticas.

Os Capítulos 5 e 6 apresentam as simulações realizadas. No Capítulo 5 tem-se a visão geral da simulação de redes ópticas PON e sistemas com OFDM óptico, realizada no *software* OptiSystem. E o Capítulo 6 aborda a simulação do modem OFDM em linguagem VHDL, bem como os desafios impostos nesta etapa de desenvolvimento de um projeto com FPGA.

E, finalmente, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 7.

2 Conceitos gerais de comunicações ópticas

Neste capítulo serão descritos os aspectos gerais que envolvem as comunicações ópticas. Dada a importância do canal de comunicação para uma transmissão e recepção efetiva dos dados, serão detalhadas ao longo deste capítulo as características e degradações inerentes às fibras ópticas.

2.1 Sistema de transmissão óptica

Basicamente, um sistema de comunicação óptica é composto por 3 elementos principais, conforme apresentado na Figura 2. O sistema consiste de um transmissor, canal de comunicação e um receptor.

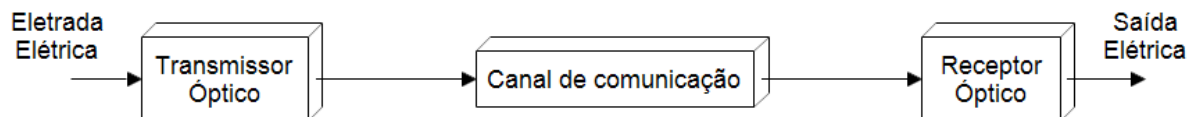


Figura 2: Sistema de comunicação óptica genérico.

Esses sistemas podem ser classificados em duas grandes categorias: guiado e não-guiado. Nos sistemas de comunicação óptica guiado, o feixe de luz emitido pelo transmissor permanece espacialmente confinado. Na prática, isso é realizado utilizando-se fibras ópticas. Já a comunicação óptica não-guiada ocorre no espaço livre [12]. Vale ressaltar que apenas o sistema guiado faz parte do escopo deste trabalho.

Quanto aos transmissores ópticos, LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) e LED (*Light Emission Diode*) são as fontes de luz mais comumente utilizadas. Para a geração do sinal óptico, pode-se utilizar a modulação direta ou externa. Na modulação direta, a corrente de alimentação da fonte é variada para gerar os sinais e/ou símbolos a serem transmitidos. Na modulação externa, como o próprio nome sugere, há um dispositivo externo responsável pela geração da variação da intensidade do sinal óptico.

Um dispositivo tipicamente usado na modulação externa é o interferômetro de *Mach-Zehnder* (também conhecido como modulador *Mach-Zehnder*), ilustrado na Figura 3. Basicamente, esse modulador possui uma Entrada correspondente ao sinal da portadora, sendo usualmente um laser CW (onda contínua). As outras duas entradas (“V+” e “V-”) correspondem ao sinal elétrico a ser

convertido para o domínio óptico, excitando o dispositivo de modo a variar a amplitude do sinal da portadora. O sinal modulado segue pela Saída desse dispositivo.

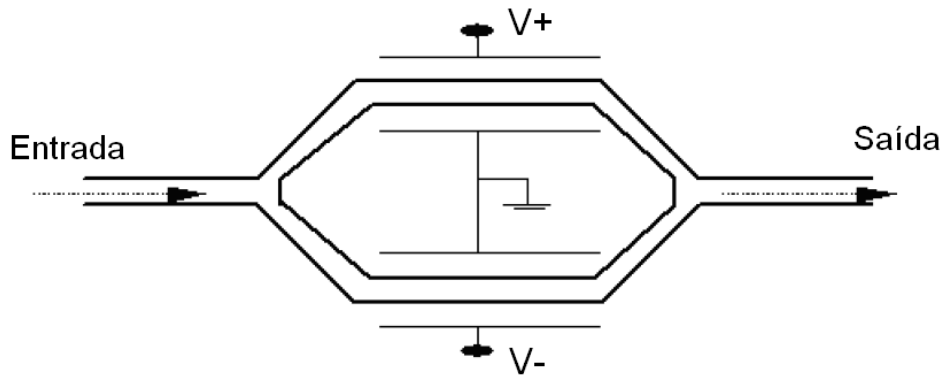


Figura 3: Modulador *Mach-Zehnder*. Adaptado de [13].

Quanto aos receptores ópticos, PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) e APD (*Avalanche Photodiode*) são os fotodetectores mais comumente utilizados. O APD é mais adequado para sistemas de alta taxa de transmissão pois possui um alto ganho na conversão eletro-óptica comparado ao PIN. Entretanto, devido ao APD ter uma estrutura mais complexa, é um dispositivo de maior custo que o PIN.

Quanto ao canal de comunicação, a fibra óptica, um sistema guiado, é comumente utilizada como um meio de transmissão de dados. De maneira resumida, a fibra óptica é um guia de ondas dielétrico que opera na frequência óptica e transporta informações na forma de luz ao longo de seu eixo.

As fibras ópticas são largamente utilizadas em telecomunicações, uma vez que permitem o envio de grandes quantidades de dados a longas distâncias e com larguras de banda (e taxa de dados) mais altas que outras formas de comunicação. Elas são um meio de transmissão imune à interferência eletromagnética e com perdas de potência muito baixas, quando comparadas, por exemplo, aos cabos coaxiais (fios de cobre). Dessa forma, elas suportam o transporte simultâneo de dados multimídia como telefone, Internet e televisão a cabo, de maneira mais eficaz. E para compensar as perdas de potência na transmissão, são utilizados amplificadores ópticos que permitem aumentar o alcance dos enlaces.

Acrescenta-se que nos últimos anos, tem-se aplicado o processamento digital de sinais em comunicações ópticas, no domínio elétrico, que permitiu a melhoria do desempenho dos enlaces ópticos por *software* com um custo relativamente baixo [14].

Ao longo deste capítulo serão descritos alguns detalhes das características das fibras ópticas que influenciam e limitam o desempenho do sistema quando aplicadas em redes ópticas em geral.

2.2 Propagação da luz em fibras ópticas

Atualmente, vive-se na chamada “Era da informação”, que se baseia em grande parte na física das ondas eletromagnéticas. Nesse contexto, inclui-se a comunicação por fibra óptica, que tem dado suporte a diversas aplicações multimídia. Dessa maneira, esta seção introduz as noções básicas da física da luz e sua propagação em fibras ópticas para maior compreensão desta tecnologia.

2.2.1 As ondas eletromagnéticas

Uma onda eletromagnética é a propagação de campos elétricos e magnéticos no espaço. Seus aspectos teóricos estão relacionados as equações de Maxwell [15, 16, 17]. Enquanto as ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagarem, as ondas eletromagnéticas podem se propagar, inclusive, no vácuo.

Com relação a essas ondas, existem três propriedades características que as definem:

- Frequência (f): Número de oscilações por segundo para cada ponto da onda.
- Comprimento de onda (λ): Distância ao longo da direção de propagação entre dois pontos em fase.
- Velocidade de propagação (v_p): Velocidade da onda em um meio específico.

Existe uma relação direta entre a velocidade propagação, frequência e comprimento de onda. A velocidade de uma onda eletromagnética é definida como o produto da frequência e comprimento de onda, conforme a Equação 1 [18].

$$v_p = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Nos casos em que a onda se propaga no vácuo, a Equação 1 pode ser particularizada atribuindo-se o valor da velocidade de propagação da velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) e o valor do comprimento de onda no vácuo (λ_0):

$$c = \lambda_0 \cdot f \quad (2)$$

Há, assim, infinitos valores de λ_0 e f que satisfazem a Equação 2 e uma vasta gama de ondas eletromagnéticas cujas características obedecem a essa equação. O conjunto dessas ondas é chamado de espectro [19].

A Figura 4 mostra o espectro eletromagnético em função do comprimento de onda e da frequência. No espectro visível, cada cor é diferenciada por seu respectivo comprimento de onda. Assim,

2.2. Propagação da luz em fibras ópticas

a faixa de luz visível é de 350 nm (violeta) a 750 nm (vermelho). A luz branca é obtida a partir da mistura de todos os comprimentos de onda do espectro visível [19].

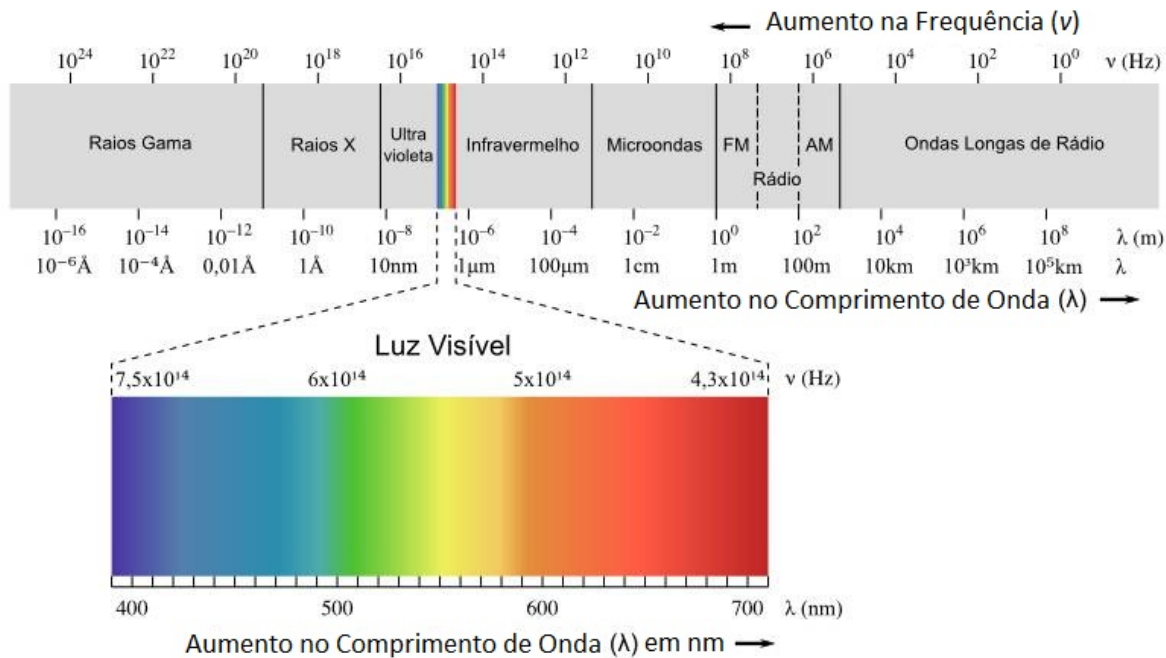


Figura 4: Espectro eletromagnético. Modificado de [20].

A velocidade de propagação de uma onda no vácuo é constante e independe do comprimento de onda. No entanto, a velocidade da luz em meios materiais é menor do que no vácuo e varia para diferentes comprimentos de onda. Essa característica permite a definição do índice de refração, que será descrito na seção seguinte [19].

Para a área de óptica, pode-se definir as ondas luminosas. Elas são um dos tipos de ondas eletromagnéticas cuja frequência está dentro do espectro eletromagnético visível. Cada pulso de luz é um campo eletromagnético único de propagação, ou também denominado “Modo de propagação”. As soluções particularizadas das equações de Maxwell para diferentes pulsos de luz determinam a propagação das ondas eletromagnéticas por meio da fibra óptica [19, 17].

Para as ondas luminosas, como em todas as ondas eletromagnéticas, existem campos elétrico e magnético em cada ponto do espaço que variam ao longo do tempo, representados por um raio (linha reta para mostrar a trajetória da onda) e duas frentes de onda. Matematicamente, elas são representadas como grandezas vetoriais com intensidade, direção e sentido [16, 17].

2.2.2 Refração e reflexão

Quando um raio de luz se propaga através de um meio transparente e atinge obliquamente sobre uma superfície de um segundo meio transparente, parte dessa luz é refletida e parte penetra o segundo meio como um raio refratado, podendo ou não ser absorvido. Assim, a refração produz uma mudança na direção de um raio ou feixe de raios luminosos que entram no meio com diferente velocidade de propagação [17].

A Figura 5 ilustra o plano de incidência. Ele é definido como sendo o plano físico formado pelo raio incidente e a sua normal (linha perpendicular à interface dos meios) no ponto de incidência.

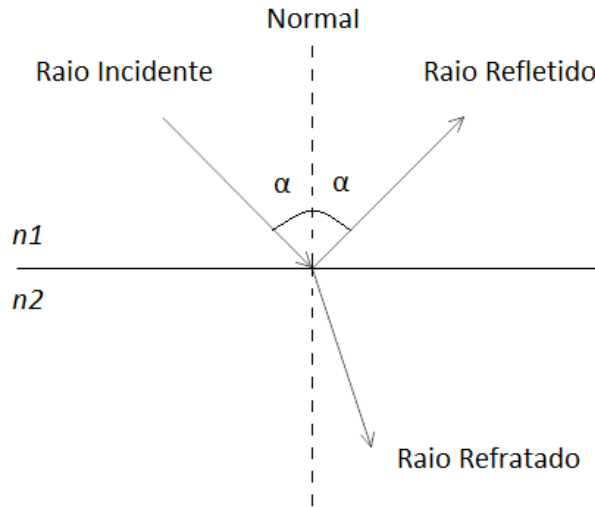


Figura 5: Lei de reflexão e refração.

A partir desse conceito, no qual um feixe luminoso é dividido em dois feixes que viajam em meios diferentes, pode-se extrair duas leis fundamentais da física óptica: a lei da reflexão e a lei da refração.

Da lei da reflexão tem-se que, quando um feixe luminoso atinge a fronteira entre dois meios homogêneos e isotrópicos transparentes, parte do feixe incidente é refletido no mesmo ângulo e a outra parte atravessa para o outro meio [19].

Outra lei importante para compreender o funcionamento do guiamento da luz no interior da fibra é a lei da refração ou também conhecida como a lei de Snell, conforme ilustrado na Figura 6. Para entender essa lei, é necessário primeiro definir o índice de refração. Esse índice é a relação entre a velocidade da luz no vácuo c e da velocidade da luz em um determinado meio v_p , como demonstrado na Equação 3:

$$n = \frac{c}{v_p} \quad (3)$$

2.2. Propagação da luz em fibras ópticas

A lei de Snell define uma relação entre a propriedade dos dois meios e do ângulo de incidência, conforme a Equação 4:

$$n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (4)$$

onde: n_1 é o índice de refração do primeiro meio, θ_1 é o ângulo de incidência, n_2 é o índice de refração do segundo meio e θ_2 é o ângulo de refração.

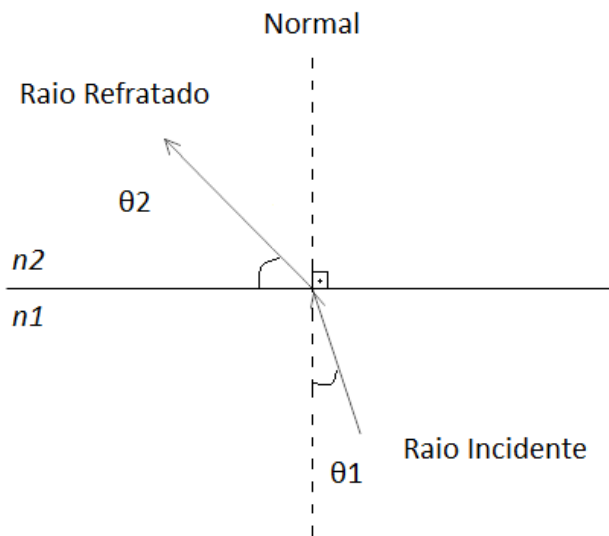


Figura 6: Lei de Snell.

Outro conceito importante, que leva em consideração o guiamento da luz dentro da fibra, é a reflexão interna total, baseada na lei da reflexão. Esse fenômeno ocorre quando o índice de refração do primeiro meio é maior que do segundo. Dessa forma, existe um ângulo de incidência, denominado ângulo crítico, que resulta em um ângulo de refração de 90° , conforme apresenta a Equação 5 [16, 17].

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5)$$

Todos esses conceitos anteriormente citados servem de base para explicar como a informação pode ser transportada por meio das fibras ópticas. Na próxima seção será explicado o princípio de confinamento da luz na fibra óptica.

2.2.3 Princípio de confinamento da luz na fibra óptica

Para tornar possível a transmissão de informações por meio de fibra óptica, é necessário incidir feixes de luz a partir de uma fonte luminosa (normalmente LED ou laser) nessa fibra.

Os pulsos de luz entram no núcleo da fibra e passam a ser refletidos pelos revestimentos que envolvem o núcleo. Isso é possível devido à diferença entre o índice de refração do núcleo e da casca, sendo o índice de refração da casca menor do que o índice do núcleo. Finalmente, os raios luminosos que atingem a extremidade oposta da fibra, chegam ao receptor e são transformados em sinais elétricos [19].

Em resumo, o princípio de confinamento da fibra óptica baseia-se no princípio da reflexão interna total, que foi explicado na seção anterior. O transmissor emite raios luminosos com um ângulo de incidência maior que o ângulo crítico, permitindo que o feixe transmitido ao longo da fibra.

No entanto, nem todos os raios luminosos da fonte de alimentação entram no núcleo, ou quando entram, não são transmitidos por meio de reflexões internas na fibra. Isso ocorre porque essa luz atinge o núcleo com um ângulo menor que o ângulo crítico, dissipando a energia para a casca [19].

A Figura 7 ilustra o princípio da propagação através da fibra óptica baseado na lei de Snell.

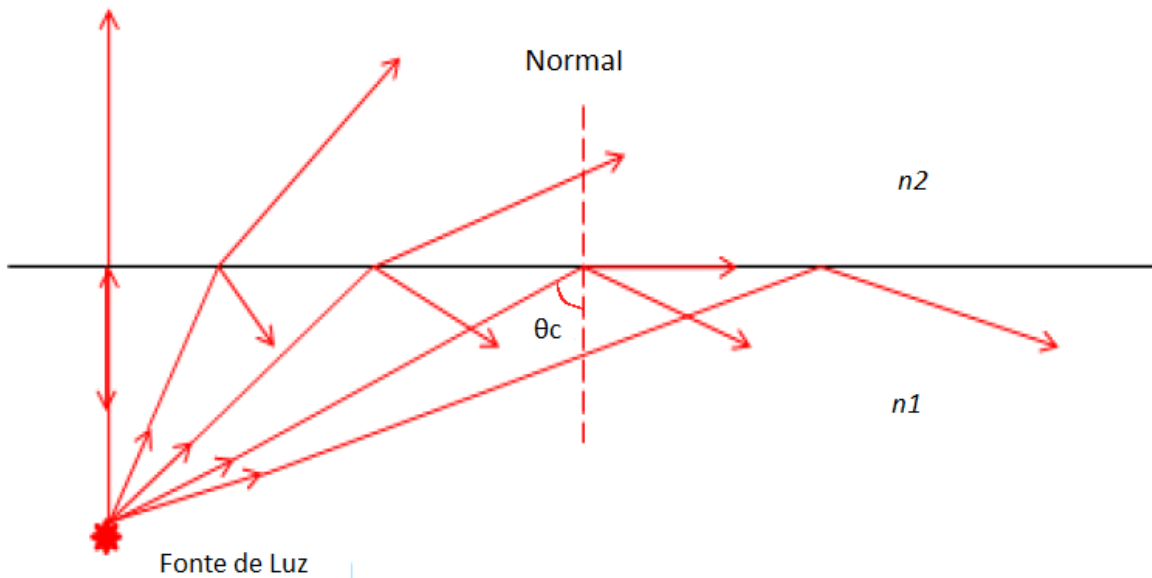


Figura 7: Princípio de confinamento da luz em fibra óptica. Modificado de [19].

Na Figura 7 são mostrados raios de referência com diferentes ângulos de incidência no núcleo da fibra, considerando $n_1 > n_2$. Da esquerda para a direita, os três primeiros raios têm um ângulo de incidência menor que o ângulo crítico, de modo que o feixe é refratado, dissipando energia na casca da fibra [19].

O quarto feixe tem um ângulo de incidência exatamente igual ao ângulo crítico, assim o fenômeno da reflexão interna total ocorre, porém ainda dissipa energia nas fronteiras. O quinto raio tem um ângulo de incidência maior que o ângulo crítico e obedece à lei da reflexão total, permanecendo confinado no núcleo [19].

Se considerar que todos os raios luminosos incidentes com um ângulo maior que o ângulo crítico são confinados no interior do núcleo, um cone virtual é gerado, conhecido como cone de aceitação. Desse modo, todos os raios que incidem sobre a fibra fora do cone de aceitação não se propagam através do núcleo. A Figura 8 representa graficamente esse cone.

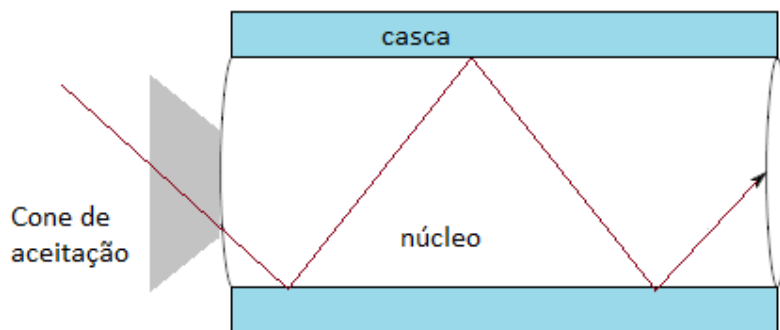


Figura 8: Cone de aceitação de uma fibra óptica.

Quanto maior for o cone de aceitação de uma fibra óptica, maior a quantidade de raios que podem ser transmitidos por ela e, assim, a emissão de luz a partir do transmissor não precisa ser tão direcionada. Entretanto, um maior número de feixes luminosos no interior da fibra resulta em uma menor qualidade da transmissão, devido ao efeito da dispersão que será descrito posteriormente [19].

2.3 Parâmetros das fibras ópticas

Uma vez conhecidas as estrutura de uma fibra óptica, é fundamental o conhecimento dos parâmetros que caracterizam as fibras. Esses parâmetros determinam as vantagens e limitações desse meio de comunicação.

Existem dois grupos de parâmetros: os parâmetros estruturais e os parâmetros de transmissão. Ambos estabelecem as condições em que se pode realizar a transmissão de dados [19].

2.3.1 Parâmetros estruturais

Os parâmetros estruturais são aqueles relacionados com a geometria da fibra. Há muitos e variados tipos de parâmetros que caracterizam as fibras, porém os mais importantes são [19]:

- Perfil de índice de refração, que permite fibras com dispersões diferentes.
- Tamanho do núcleo e da casca, que determinam o tipo de transmissão: monomodo ou multimodo.
- Abertura numérica, que indica o número de raios que podem entrar no núcleo em uma transmissão de fibra óptica.
- Comprimento de onda de corte, em que a fibra óptica transmite em um único modo de propagação.

2.3.2 Parâmetros de transmissão

Os parâmetros relacionados a seguir são os principais fatores que, na maioria das vezes, limitam as comunicações ópticas de longo alcance. Dentre esses fatores, existem os efeitos que classificam-se em dois tipos: lineares e não-lineares. Geralmente, os efeitos lineares são mais facilmente contornáveis do que os não-lineares.

Dentre os efeitos lineares, pode-se citar a atenuação, dispersão cromática e perdas intrínsecas e extrínsecas. E dentre os efeitos não lineares estão a Mistura de Quatro Ondas, Auto-Modulação de Fase, Modulação de Fase Cruzada e os Espalhamentos Estimulados Raman e Brillouin.

A seguir, serão descritos brevemente esses parâmetros da fibra óptica que influenciam na transmissão dos dados.

Atenuação

A atenuação de sinal é um dos principais fatores limitantes de uma fibra óptica, já que ela determina a separação máxima entre o transmissor e o receptor óptico. Uma vez que os repetidores são caros de se fabricar, instalar e manter, o grau de atenuação de uma fibra tem uma grande influência no custo do sistema. As perdas por atenuação dependem do comprimento de onda da luz e do material que a fibra óptica é fabricada [21].

Matematicamente, a atenuação é definida como a razão entre a potência óptica de saída P_{out} , a partir de uma fibra de comprimento L , e a potência óptica de entrada P_{in} . O símbolo α é normal-

mente usado para expressar a atenuação em decibéis por quilômetro [21]:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (6)$$

Na Figura 9 é apresentada a curva da atenuação espectral típica de uma fibra óptica monomodo. Como se pode observar, as menores perdas estão no comprimento de onda em torno de 1550 nm. Essa faixa é muito utilizada para a transmissão em longa distância, enquanto que valores menores de comprimento de onda podem ser usados em distâncias mais curtas.

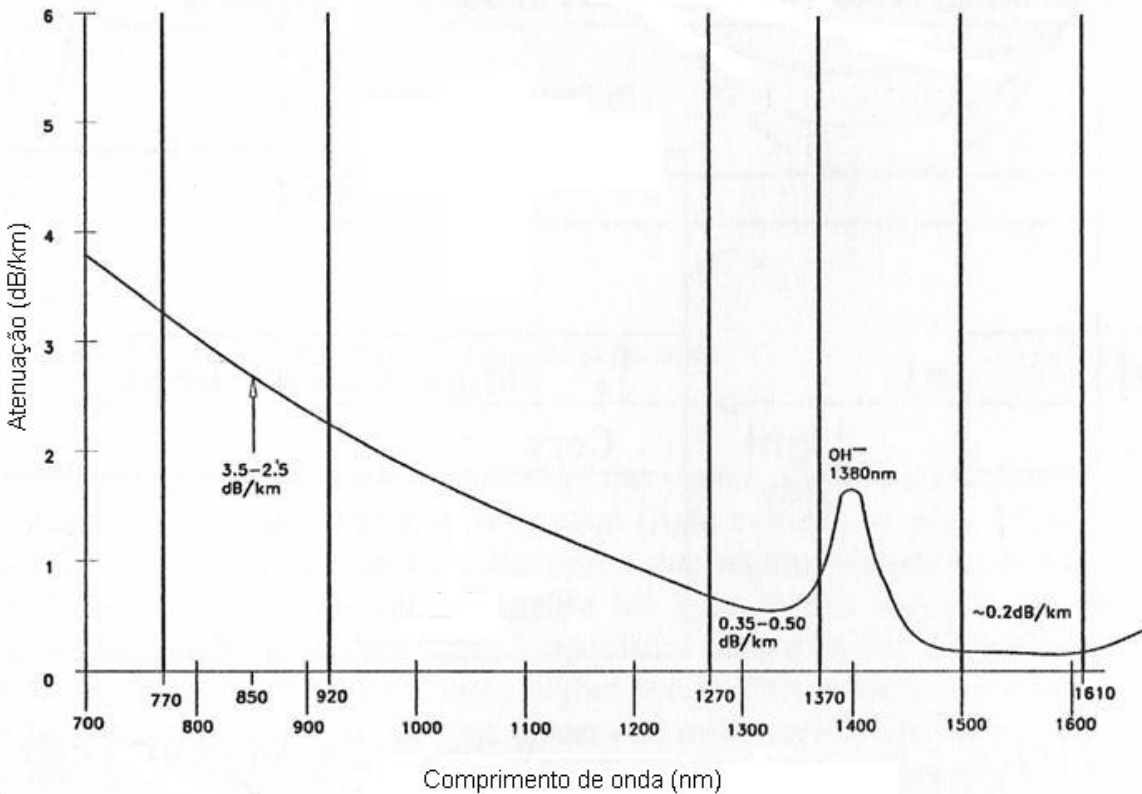


Figura 9: Atenuação total de uma fibra óptica em função do comprimento de onda. Adaptado de [22].

Abaixo de 800 nm, não é conveniente usar a fibra, devido à elevada atenuação por Espalhamento Rayleigh. Acima de 1600 nm, surgem problemas de atenuação pelo efeito da radiação infravermelha. Além disso, a tecnologia dos transmissores e fotodetectores para esse comprimento de onda ainda é muito recente. Portanto, comunicações de fibra óptica geralmente operam em regiões de comprimento de onda que correspondem a uma das seguintes “janelas de transmissão óptica”:

- A primeira janela (entre 800 nm e 900 nm) foi usada inicialmente. Devido a sua alta atenua-

ção, é adequada apenas para curtas distâncias de transmissão.

- A segunda janela utiliza comprimentos de onda ao redor de $1,3\ \mu\text{m}$, em que as perdas da sílica são muito menores e a dispersão cromática é baixa. Essa janela foi originalmente usada para transmissões de longa distância. Contudo, os amplificadores ópticos de $1,3\ \mu\text{m}$ não são tão bons quanto aos de $1,5\ \mu\text{m}$. Além disso, a baixa dispersão não é necessariamente ideal para a transmissão de longa distância, pois pode aumentar os efeitos não-lineares.
- A terceira janela, a mais utilizada atualmente, trabalha com comprimentos de onda de cerca de $1,5\ \mu\text{m}$. As perdas de fibras de sílica são mais baixas nessa região e os atuais amplificadores de fibra dopada a érbio oferecem desempenho mais elevado.

Vale mencionar que a largura de banda e a modulação utilizada não interferem na atenuação do sinal em fibras ópticas. A atenuação da luz numa fibra óptica é produzida como resultado de vários efeitos e essas perdas podem ser classificadas em intrínsecas e extrínsecas:

Perdas intrínsecas: Essas perdas estão relacionadas a fabricação da fibra. As perdas intrínsecas que mais influenciam são [19]:

- Perdas inerentes à fibra durante o processo de fabricação.
- A absorção de Ultravioleta (UV) e Infravermelho (IR), que definem as chamadas janelas de transmissão óptica ou bandas de comprimentos de onda ótimos para a transmissão de luz.
- Reflexão de Fresnel, causada por um salto ou mudança do índice de refração nas emendas da fibra.
- Espalhamento Rayleigh, que ocorre quando a luz colide com partículas estranhas ao meio, causando espalhamento.
- A absorção devido às impurezas, que é uma das principais causas da atenuação em fibras ópticas. A impureza mais comum é a molécula de hidroxila (também conhecida como oxidrila ou pelo radical OH^-), que permanece na fibra como um resíduo, apesar de rigorosas técnicas de fabricação. Ela tem uma absorção fundamental em $2700\ \text{nm}$ e seus harmônicos produzem três picos de absorção em $1383\ \text{nm}$, $1250\ \text{nm}$ e $950\ \text{nm}$. Esses picos de absorção definem as três janelas típicas de operação.

Perdas extrínsecas: Essas perdas ocorrem devido a fatores como a curvatura nas fibras, as emendas entre elas, tensões mecânicas devido à instalação e a temperatura na qual elas são submetidas. Como resultado, há uma maior perda de potência do sinal ao longo da transmissão, pois somam-se as perdas intrínsecas.

Dispersão

A dispersão é uma propriedade da fibra que pode ser atribuída ao espalhamento de um impulso óptico no domínio do tempo, devido à diferença de velocidade dos vários componentes espectrais que viajam por caminhos diferentes. Devido a isso, cada componente atinge a extremidade de saída da fibra em diferentes intervalos de tempo. Essa diferença de tempo dos vários componentes espectrais leva a um espalhamento longitudinal do pulso no guia de onda cilíndrico. Isso limita a capacidade de transmissão de informações uma vez que os pulsos são distorcidos e alargados ao longo da transmissão, sobrepondo-se uns aos outros e tornando-se indistinguíveis ao receptor [19].

Essa dispersão resulta em perdas na largura de banda do sinal bem como a redução no alcance. A largura de banda de uma fibra óptica é uma medida da capacidade de transmissão, limitada pela dispersão total da fibra ou pelo alargamento do pulso transmitido. Devido ao seu efeito acumulativo, quanto maior for o comprimento da fibra, mais significativo é o valor da dispersão.

A dispersão pode ser subdividida em três categorias [19]:

Dispersão modal: Causada pelos diferentes modos de propagação em uma fibra. Como os diferentes modos de propagação viajam por diferentes caminhos, isso resulta em diferentes atrasos do sinal na outra extremidade da fibra.

Dispersão cromática: Surge como um resultado da dispersão do material (inerente ao material de fabricação da fibra) e da dispersão do guia de onda (geometria da fibra) resultando na variação do índice de refração do meio óptico com o comprimento de onda.

Dispersão dos modos de polarização (PMD): Ocorre devido a fibra não ser um guia de ondas exatamente cilíndrico, o que resulta em um fenômeno chamado birrefringência. Isso faz com que um pulso de propagação perca o equilíbrio entre os componentes de polarização, conforme ilustrado na Figura 10.

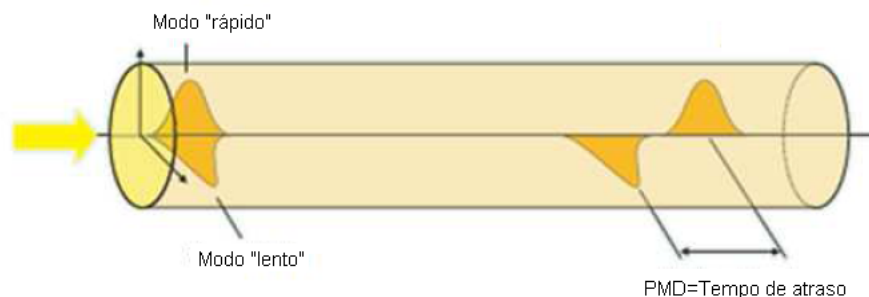


Figura 10: Alargamento do pulso devido a dispersão do modo de polarização. Adaptado de [19].

Não-linearidades

O fato de se assumir que sistemas de comunicação óptica tenham comportamento linear é uma aproximação apropriada quando se opera em níveis de potência moderados (com magnitudes na ordem de mW) e taxas de transmissão que não excedam 2,5 Gbit/s. Mas, para taxas mais altas ou potências maiores, os efeitos não-lineares começam a ser mais evidentes, sendo eles os principais fatores limitantes.

No caso de sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), esses efeitos são relevantes, mesmo com potências e taxas de transmissão moderadas, determinando o número de canais no sistema e a separação entre eles.

As não-linearidades nas fibras podem ser classificadas em duas categorias [23, 24]:

- Aquelas que ocorrem como consequência da dependência do índice de refração com a intensidade do campo aplicado, conhecido como efeito Kerr, que por sua vez, é proporcional ao quadrado da amplitude: a Auto-Modulação de Fase (SPM), a Modulação de Fase Cruzada (XPM) e a Mistura de Quatro Ondas (FWM).
- Os efeitos produzidos por difração da fibra, devido ao espalhamento não-linear do campo elétrico pelas vibrações moleculares da sílica no núcleo da fibra: Espalhamento Raman Estimulado (SRS) e Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS).

No próximo capítulo, será abordado especificamente as Redes Ópticas Passivas (PONs), sendo esta a principal tecnologia para as atuais redes de acesso.

3 Redes Ópticas Passivas

Este capítulo compreende os conceitos de Redes Ópticas Passivas (PONs), um dos objetos de estudo deste trabalho. Serão definidos os componentes básicos dessa tecnologia, suas vantagens e desvantagens, os principais padrões e as propostas para evolução.

3.1 Descrição genérica de uma Rede Óptica Passiva

As Redes Ópticas Passivas foram implantadas para substituir as redes de acesso tradicionais por cabo devido ao seu maior alcance, maior largura de banda e eficiência no consumo de energia por fazer uso de apenas componentes passivos na rede de distribuição [25].

A infraestrutura de cabos de fibra óptica e os componentes ópticos como os *splitters* (divisores), combinadores e filtros formam a chamada Rede de Distribuição Óptica – ODN (*Optical Distribution Network*). Uma rede PON pode ser descrita genericamente por meio de três componentes principais [26, 27, 28]:

- OLT: *Optical Line Terminal* (Terminal de Linha Óptica)
- ONU/ONT: *Optical Network Unit/Terminal* (Unidade/Terminal de Rede Óptica)
- *Splitter* (divisor)

A Figura 11 ilustra a disposição desses componentes em uma rede PON. Cada um desses componentes será detalhado nas subseções a seguir.

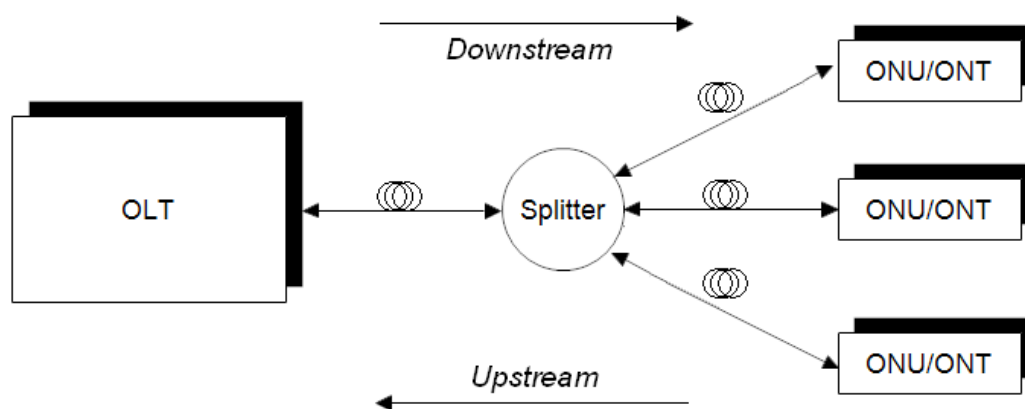


Figura 11: Componentes básicos de uma rede PON.

3.1. Descrição genérica de uma Rede Óptica Passiva

A Rede Óptica Passiva é uma rede que, por sua natureza, fornece uma variedade de serviços de banda larga para os usuários por meio da fibra óptica. As redes PON permitem a remoção de todos os componentes ativos entre o servidor e o cliente, substituindo-os por componentes passivos que irão orientar o tráfego através da rede [19].

O uso da arquitetura passiva permite reduzir os custos de instalação e manutenção das redes e são usados principalmente em redes FTTH (*Fiber To The Home*). Em contrapartida, a largura de banda não é dedicada, mas sim multiplexada numa única fibra nos pontos de acesso à rede. Assim, trata-se de uma rede com topologia ponto-multiponto [19].

3.1.1 OLT: *Optical Line Terminal*

O OLT está localizado no servidor e controla o fluxo bidirecional de informações por meio da ODN. Um OLT deve suportar distâncias de transmissão de até 20 km. No sentido servidor-cliente (*downstream*), a função de um OLT é prover tráfego de voz, dados e vídeo para uma rede de longa distância, transmitindo a todos os módulos ONT da rede. No sentido inverso (*upstream*), o OLT aceita e distribui todo o tráfego dos usuários da rede [26].

A transmissão simultânea de diferentes tipos de serviços em uma única fibra é possível usando diferentes comprimentos de onda para cada sentido. O OLT deve evitar a interferência entre os conteúdos dos canais de *downlink* e *uplink*, utilizando dois comprimentos de onda diferentes e sobrepostos. Para isso, são usadas técnicas para de multiplexação por divisão de comprimento de onda, baseadas em filtros ópticos.

No *downstream*, é utilizado um comprimento de onda de 1490 nm, para voz e os dados combinados do tráfego, e um comprimento de onda de 1550 nm para a distribuição de vídeo. No *upstream*, voz e dados trafegam em um comprimento de onda de 1310 nm [26].

Para assegurar que a potência óptica seja suficiente para ser entregue aos ONTs, é necessário medir a potência óptica na OLT. Isso deve ser feito na fase inicial de implantação da rede, um vez que o sinal não pode ser repetido sem interromper o serviço nesse tipo de rede.

3.1.2 ONT/ONU: *Optical Network Terminal/Unit*

O ONT ou ONU está localizado nas instalações do cliente. Sua finalidade é fornecer uma ligação óptica para a rede PON no lado do servidor e a interfacear eletricamente ao equipamento do lado do cliente. Dependendo das necessidades de comunicação do cliente ou bloco de usuários, o ONT tipicamente suporta uma mistura de serviços de telecomunicações, incluindo várias taxas *Ethernet*, T1 ou E1 (1,544 Mbit/s ou 2,048 Mbit/s) e DS3 ou E3 (44,736 Mbit/s ou 34,368 Mbit/s), conexões de telefone, interfaces ATM (*Asynchronous Transfer Mode*, 155 Mbit/s) e formatos de vídeo

analógico e digital [26].

Atualmente existe uma grande variedade de projetos e configurações de ONTs para acomodar as necessidades dos vários níveis de demanda. A dimensão de um ONT pode variar de uma simples caixa, que pode ser fixada no exterior de uma casa, a uma unidade razoavelmente sofisticada, montada em um *rack* padrão *indoor* para uso em grandes Unidades Multi-Residenciais (MDUs) ou aplicações com múltiplos inquilinos (MTU), tais como conjuntos de apartamentos ou escritórios.

Para proporcionar alto desempenho, um ONT pode agregar tráfego proveniente de várias fontes do usuário e enviá-lo por meio de uma única fibra. Nesse caso, o equipamento de comutação utiliza multiplexação por divisão de tempo (TDM). É identificado os destinos de cada canal multiplexado e, em seguida, reordena os canais de modo que os dados possam ser entregues de maneira eficiente [26]. Desse modo, os ONTs são elementos capazes de filtrar as informações associadas a cada usuário do OLT.

A Figura 12 exemplifica a operação de um sistema de multiplexação por divisão de tempo (TDM).

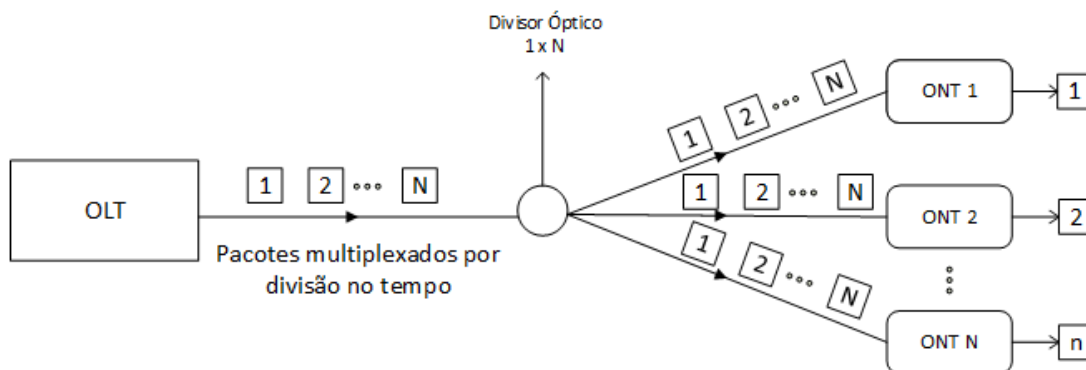


Figura 12: Exemplo da multiplexação por divisão de tempo.

3.1.3 Splitter

Os *splitters* são divisores de potência óptica que interconectam os ONTs com o OLT. Esse dispositivo realiza a multiplexar e/ou demultiplexar sinais e também combina potências. Eles são dispositivos de distribuição óptica bidirecional com uma entrada e várias saídas. A “porta de entrada” do *splitter* recebe o sinal de *downlink* que vem do OLT e é dividido entre as múltiplas saídas. Já a “porta de saída” *splitter* recebe o sinal de *uplink* que vêm dos ONTs e eles são combinados para seguir ao OLT, interligado por meio da “porta de entrada” [19].

A principal vantagem do *splitter* deve-se ao fato de ser um dispositivo completamente passivo, operando sem alimentação externa. Isso reduzindo o custo de operação, implantação e manutenção

3.1. Descrição genérica de uma Rede Óptica Passiva

da rede. Entretanto, devido à essa sua natureza, ele inserem perda de potência óptica ao sistema e orçamento de potência deve ser balanceada dependendo da quantidade de usuários ligados a ele.

A Equação 7 descreve a relação entre a atenuação e o número de “portas de saída”. Por exemplo, para um *splitter* com duas saídas, há uma perda da ordem de 3 dB (o que equivale a metade da potência total) em cada “porta de saída”. A Figura 13 ilustra de forma simplificada a operação interna de um divisor óptico genérico.

$$Atenuação_{splitter} = 10 \cdot \log \frac{1}{N} \quad (7)$$

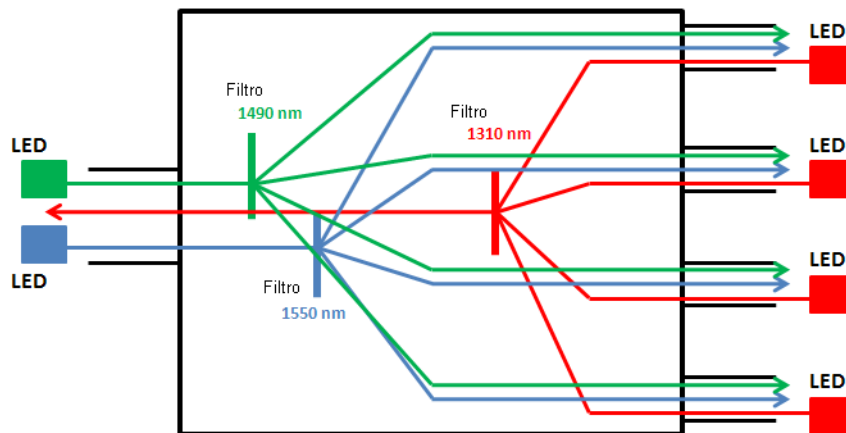


Figura 13: Operação de um divisor óptico genérico. Extraído de [19].

Existem vários tipos de *splitters* e cada um deles é construído com tecnologias distintas. Os dois tipos mais comuns de *splitters* são:

- Para dispositivos com um grande número de saídas (mais de 32 “portas de saída”), que são baseados na tecnologia planar.
- Para aparelhos com um número menor de saídas (menos de 32 “portas de saída”), que são baseados em acopladores bi-cônicos fundidos.

3.1.4 Funcionamento de uma Rede Óptica Passiva

Uma vez que todos os elementos básicos que compõem as redes PON foram detalhados, é fundamental o entendimento do funcionamento global do sistema e o comportamento da rede quando todos os seus elementos são interligados, do servidor (OLT) ao ONT dos usuários, e vice-versa.

Um aspecto relevante na operação genérica da rede é a existência de dois canais, um ascendente (*downstream*) e um descendente (*downstream*). Na maior parte dos casos, esses dois canais operam em na mesma fibra. Nesses casos, são adotados comprimentos de onda diferentes para cada um dos canais de transmissão. A seguir serão analisados com mais detalhes esses canais de transmissão.

Canal de *downstream*

O canal de *downstream* é representado pelo fluxo de dados do OLT da operadora ao ONT localizado no usuário final. Nesse sentido a rede PON possui uma topologia de rede ponto-multiponto. Essa conexão pode ser formada por uma ou duas fibras que transmitem sinais bi ou unidirecionais. Essas fibras são acopladas por divisores ópticos que permitem a união de todos os ONT na rede com o OLT, sem regeneração intermediária de sinais, ou seja, sem a presença de elementos ativos na ODN.

Os divisores receber a informação do OLT e a envia para todos os ONTs. Uma vez que a informação chega nos ONTs, cada um irá ser capaz de processar apenas o tráfego a que pertence, ou para as quais têm o acesso permitido pela operado, com base em técnicas do de segurança AES (*Advanced Encryption Standard*). A OLT se baseia na técnica TDM enviando informações de cada usuário em instantes diferentes pré-definidos. Assim, em função de cada segmento temporal, cada ONT de filtra a informação dirigida a ele.

Um aspecto a ser considerado é o comprimento de onda no qual o OLT transmite as informações para o ONT. Esses comprimentos variam de acordo com o tipo de informação ou se a conexão da ONT é por meio de uma ou duas fibras.

Canal de *upstream*

O canal de *upstream* é representado pelo fluxo de dados do ONT do usuário final para o OLT da operadora. Nesse sentido, a PON tem a característica de uma topologia de rede ponto a ponto. Cada ONT inclui quadros de voz e de dados que são encaminhados para o OLT.

A fim de transmitir informações de diferentes ONTs no mesmo canal, utiliza-se a técnica de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*). Com essa técnica, cada ONT envia a informação em diferentes intervalos de tempo, controlado pelo OLT. As informações enviadas pelo usuário (voz e/ou dados) usa um canal no comprimento de onda de 1310 nm, independentemente se a ligação do ONT com divisor é de uma ou duas fibras [19].

3.2 Vantagens e desvantagens das Redes Ópticas Passivas

Para entender porque uma arquitetura FTTx [26] é baseada em redes PON, é necessário fazer uma comparação direta entre redes ópticas ponto-a-ponto (P2P), Redes Ópticas Passivas ponto-multiponto (PON) e Redes Ópticas Ativas ponto-multiponto (AON). A Tabela 1 mostra as vantagens e desvantagens de cada um dos três tipos de configuração de rede referidos.

Tabela 1: Tabela comparativa dos diferentes tipos de topologia de rede

Tipo de Rede	Aspecto Positivos	Aspectos Negativos
Ponto-a-ponto (P2P)	· Alta capacidade	· Alto custo de desenvolvimento
Ponto-multiponto ativa (AON)	· Alta capacidade	· Alto custo de operação e manutenção · Alto custo de desenvolvimento
Ponto-multiponto passiva (PON)	· Baixo custo de operação e manutenção · Uso de elementos passivos (investimento mais baixo) · Alta capacidade · Flexibilidade e escala · Todos os serviços na fibra · Padronização ITU G.983.3	· Métodos de segurança contra invasão de usuários não permitidos · Alto impacto há interrupção na central OLT

Como mostrado na Tabela 1, as redes PON possuem diversas vantagens que são as mais adequadas para a concepção de arquiteturas FTTx. As redes ponto-a-ponto, apesar de fornecerem uma grande largura de banda por usuário, possui um alto custo de implantação. No caso das redes ativas, a inclusão de elementos ativos aumenta o custo de implantação da rede em si e também da operação e manutenção, forçando um gerenciamento e centralização em níveis de *software* e de *hardware*.

Assim, a utilização de arquiteturas PON significa vantagens muito importantes na concepção da instalação e subsequente manutenção da rede.

3.3 Arquiteturas e evolução das Redes Ópticas Passivas

As Redes Ópticas Passivas são uma família de redes (xPON) cuja origem é encontrada numa primeira rede definida pela FSAN, um grupo composto na época por sete operadoras de telecomunicações. Eles tinham como objetivo unificar as especificações para o acesso de banda larga para as famílias das tecnologias desenvolvidas. A seguir é descrito brevemente a evolução dos padrões da família de redes PON.

3.3.1 APON: Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network

Foi a primeira rede definida pela FSAN. O APON (ATM PON) se baseia na transmissão de células ATM em rajadas com uma taxa de *downlink* máxima de 155 Mbit/s compartilhados entre as ONTs conectadas a rede. Posteriormente, essa taxa foi aumentada para 622 Mbit/s.

Em cada célula ATM são introduzidas duas células PLOAM (*Physical Layer Operation, Administration and Maintenance* – Operação, Administração e Manutenção da Camada Física), responsáveis por indicar o endereço de cada célula para a manutenção da rede. Essa rede é normatizada pelo padrão G.983.1 da ITU-T.

3.3.2 BPON: Broadband Passive Optical Network

Sob o mesmo padrão, ITU-T G.983.1, surgiu o chamado BPON (*Broadband PON*), uma evolução da tecnologia APON devido a sua taxa de transmissão muito limitada.

As redes BPON também são baseadas na transmissão de células ATM, entretanto, elas suportam outros padrões de banda larga. Em sua primeira versão, foi definida uma taxa de transmissão fixa de 155 Mbit/s, tanto para *uplink* como para *downlink*. Posteriormente, foi alterada para admitir canais assimétricos, com um *downlink* de 622 Mbit/s e *uplink* de 155 Mbit/s.

No entanto, apesar das melhorias sobre a rede APON, a tecnologia tinha um alto custo de implementação e várias limitações técnicas. Posto estes problemas, lentamente o sistema foi melhorado para alcançar taxas de *downstream* de até 1,2 Gbit/s de maneira assimétrica, como segue na Tabela 2 [27].

Tabela 2: Combinação de taxas de transmissão *downstream/upstream* da tecnologia BPON

<i>Downstream</i> (Mbit/s)	<i>Upstream</i> (Mbit/s)
155	155
622	155
622	622
1244	155
1244	622

Com relação aos comprimentos de onda definidos no padrão BPON, eles variam de acordo com o número de fibras utilizadas em cada ONT. Entretanto, tanto para a configurações com uma ou duas fibras, há um comprimento de onda dedicado para transmissão de vídeo do OLT para o ONT, diferente daqueles utilizados para a transmissão de voz e de dados. Os comprimentos de onda para um *downstream* 1,244 Gbit/s e *upstream* de 622 Mbit/s são:

- Para uma fibra, compartilhado para *upstream* e *downstream*

- Canal *downstream*: $\lambda_{down}=1480\text{ nm}-1500\text{ nm}$
- Canal *upstream*: $\lambda_{up}=1260\text{ nm}-1360\text{ nm}$
- Canal para Vídeo: $\lambda_{video}=1550\text{ nm}-1560\text{ nm}$

- Para duas fibras em um ONT, compartilhado para *upstream* e *downstream*
 - Canal *downstream*: $\lambda_{down}=1260\text{ nm}-1360\text{ nm}$
 - Canal *upstream*: $\lambda_{up}=1260\text{ nm}-1360\text{ nm}$
 - Canal para Vídeo: $\lambda_{video}=1550\text{ nm}-1560\text{ nm}$

As redes BPON suportam uma razão máxima de 32 *splitters* por OLT e cada *splitter* suporta até 64 usuários (ONT). Isto resulta em um total de 2048 usuários atendidos (ONTs) por OLT. E o alcance máximo definido foi de 20km entre o divisor (*splitter*) ótico e o ONT.

3.3.3 EPON: *Ethernet Passive Optical Network*

Paralelamente à evolução do PON, que têm a sua origem na FSAN e é padronizado pela ITU, foi feita uma nova especificação pelo grupo EFM (*Ethernet in the First Mile*), criado pelo IEEE. A intenção do EFM foi aproveitar as vantagens das características da tecnologia de fibra óptica em PON e aplicá-las a *Ethernet*. Desse modo, foi criada o padrão EPON (*Ethernet PON*) sob o domínio da norma IEEE 802.3ah.

A arquitetura EPON é baseada no transporte de tráfego *Ethernet*. Ela mantém as características da especificação IEEE 802.3 e encapsula as informações em quadros *Ethernet*, deixando de lado a transferência de células ATM adotadas em APON e BPON. Isso permitiu o fornecimento de um sistema com taxas na ordem de Gbit/s por já ser suportado no padrão *Ethernet*. No entanto, essa taxa não é de um único usuário, uma vez que deve ser compartilhado entre todos os usuários da rede. E também, certos custos foram reduzidos em decorrência da não utilização dos elementos de ATM e SDH típicos das redes APON e BPON.

A tecnologia EPON estabelece uma velocidade simétrica de linha de 1 Gbit/s, tanto para os canais *upstream* e *downstream*. Dada a sua capacidade em Gigabit, também é chamado de GEPON (Gigabit EPON).

Vale ressaltar que a norma só permite a transmissão em *upstream* e *downstream* utilizando-se apenas uma fibra monomodo, com um alcance máximo de 10 km entre o *splitter* ótico e o ONT.

O padrão EPON, assim como o padrão BPON, estabelece um comprimento de onda dedicado para a transmissão de vídeo do OLT para os ONTs. E os comprimentos de onda (para *upstream*, *downstream* e vídeo) são os mesmos do padrão BPON para configuração com uma fibra, descritos anteriormente.

As redes EPON suportam uma razão máxima de 16 *splitters* por OLT, e cada *splitter* suporta até 64 usuários (ONT). Assim, tem-se um total de 1024 usuários atendidos (ONTs) por OLT, ou seja, EPON suporta metade dos usuários comparado ao BPON.

E por fim, apesar do EPON ser um padrão que permite uma maior taxa de transmissão que o BPON, ele possui uma limitação de distância máxima entre o OLT e ONT de 10 km. Ou seja, o BPON tem o dobro do alcance do EPON.

3.3.4 GPON: *Gigabit-capable Passive Optical Network*

Na atualidade, o padrão mais avançado e que tem sido adotado amplamente, é o que nasce a partir da evolução do BPON. Para trabalhar melhor com as mudanças nas tecnologias de comunicação e para atender rapidamente à crescente demanda, a ITU-T criou a série de normas ITU-T G.984.x para PON com capacidade Gigabit.

O GPON permite a transmissão da informação encapsulada em duas tecnologias:

- ATM, como no caso do padrão BPON, mas melhorado.
- *Ethernet* ou TDM, utilizando para isso o GEM (Método de encapsulamento GPON) com base no GFP (Procedimento de Enquadramento Genérico).

As melhorias que o GPON oferece em relação aos seus padrões anteriores além de transferir os dados mais rapidamente é sua maior confiabilidade, uma vez que tem um nível de protocolo seguro de transmissão.

Assim, a tecnologia GPON permite que as taxas de transmissão varie entre 622 Mbit/s (como seu antecessor BPON) e 2,488 Gbit/s no canal de *downstream*. Assim como no padrão BPON, é possível a transmissão dos dados de forma simétrica ou assimétrica, podendo ser combinadas conforme as taxas:

- *Downstream*: 12,44 Gbit/s e 24,88 Gbit/s
- *Upstream*: 155 Mbit/s, 622 Mbit/s, 1,244 Gbit/s e 2,488 Gbit/s

Com o GPON, é possível transmitir praticamente qualquer informação multimídia e suporta qualquer serviço da operadora, devido a sua largura de banda de até 2,5 Gbit/s. Além disso, dado o suporte completo de serviços, via ATM ou sobre *Ethernet* e TDM, ele se torna uma plataforma global de multisserviços.

Quanto aos comprimentos de onda definidos no padrão GPON, eles são os mesmos do BPON para a configuração com uma ou duas fibras ópticas.

As redes GPON suportam uma razão máxima de 128 *splitters* por OLT e cada *splitter* suporta até 64 usuários (ONT). Dessa forma, são ao todo 8192 usuários atendidos (ONTs) por OLT, uma

3.3. Arquiteturas e evolução das Redes Ópticas Passivas

capacidade quatro vezes maior que a rede BPON e oito vezes maior que a rede EPON. Essa diferença da tecnologia GPON permite minimizar o custo de implantação, já que se necessita de menos OLTs instaladas para cobrir uma determinada área e um determinado número de assinantes.

E finalmente, é notável o aumento da distância entre o OLT e os ONTs diferentes, já que o alcance passa para até 60 km, um valor três vezes maior que a tecnologia BPON e seis vezes maior que a tecnologia EPON. A Tabela 3 resume as principais características das tecnologias PON.

Tabela 3: Tabela comparativa das tecnologias BPON, EPON e GPON [19]

Características	BPON	EPON	GPON
Padrão	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Taxa de Transmissão (Mb/s)	<i>Down:</i> 155, 622, 1244 <i>Up:</i> 155, 622	<i>Down:</i> 1250 <i>Up:</i> 1250	<i>Down:</i> 1244, 2488 <i>Up:</i> 155, 622, 1244, 2488
Tipo de Fibra	Monomodo (padrão ITU-T G.652)	Monomodo (padrão ITU-T G.652)	Monomodo (padrão ITU-T G.652)
Número de fibras por ONT	1 ou 2	1	1 ou 2
Comprimento de onda de operação (nm)	Para uma fibra: <i>Down:</i> 1480-1500 <i>Up:</i> 1260-1360 Vídeo: 1550 Para duas fibras: <i>Down:</i> 1260-1360 <i>Up:</i> 1260-1360 Vídeo: 1550-1560	<i>Down:</i> 1480-1500 <i>Up:</i> 1260-1460 Vídeo: 1550-1560	Para uma fibra: <i>Down:</i> 1480-1500 <i>Up:</i> 1260-1360 Vídeo: 1550-1560 Para duas fibras: <i>Down:</i> 1260-1360 <i>Up:</i> 1260-1360 Vídeo: 1550-1560
Número máximo de <i>splitters</i> por ONT	32	16	128
Alcance máximo (km)	20	10	60
Modo de tráfego de dados entre OLT e ONT	ATM	<i>Ethernet</i>	ATM, <i>Ethernet</i> , TDM
Arquitetura de transmissão	Simétrico e assimétrico	Simétrico	Simétrico e assimétrico
Comentários	Aperfeiçoamento do APON. Suporte para outros serviços além daqueles baseado em ATM.	Tecnologia muito popular na ásia. GE-PON é um caso especial do EPON.	<i>Upgrade</i> do BPON. Tecnologia dominante nos EUA.

3.3.5 Arquiteturas de nova geração

Com o aumento substancial do tráfego de dados previsto para os próximos anos, novas soluções tem sido propostas. A seguir, são descritas algumas dessas soluções.

WDM-PON

A multiplexação por divisão de comprimento de onda é uma tecnologia que permite a construção de redes de transporte robustas de alta capacidade. A crescente demanda por largura de banda tem conduzido ao uso das técnicas WDM nas extremidades da rede, mais perto dos usuários finais.

O WDM-PON (*Wavelength-Division Multiplexing PON*) permite a transmissão de comprimentos de onda em *downstream* completamente separada para cada assinante. Isso proporciona maior largura de banda para cada assinante, mais segurança e um melhor controle operacional, já que não há interferência na direção de *downstream*, entre os diversos comprimentos de onda utilizados.

Ele ainda não está definido como um padrão mas as operadoras e os fornecedores esperaram que com essa tecnologia possam ser atendidos até 32 de assinantes por meio de uma única fibra de acesso.

A arquitetura WDM-PON é relativamente semelhante à do EPON e GPON (e suas versões 10G). No entanto, o WDM-PON geralmente tem uma AWG (*Arrayed Waveguide Grating*), funcionando de forma semelhante a um filtro que separa os comprimentos de onda para cada ONT dos assinantes. O diagrama simplificado de uma rede WDM-PON típica é ilustrado na Figura 14.

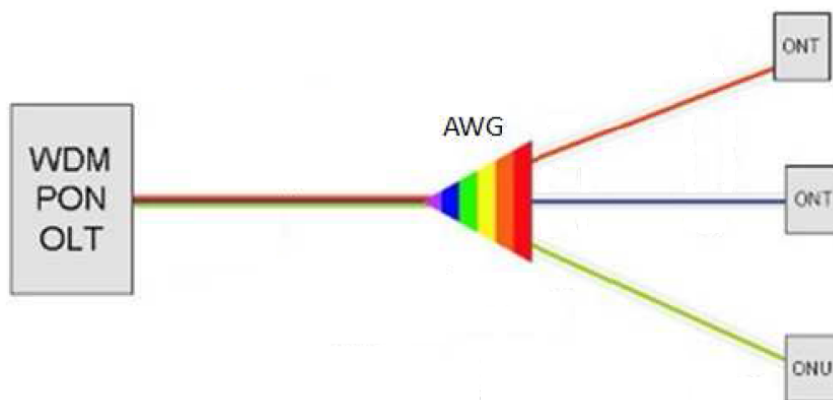


Figura 14: Rede WDM-PON. Extraído de [19].

Além disso, a aplicação de técnicas WDM para a próxima geração das redes de acesso de fibra é atraente sob vários pontos de vista, tais como a perda de caminho óptico reduzida, conectividade

ponto-a-ponto, transparência na taxa de bits, a escalabilidade (o número de canais pode ser facilmente atualizado) e flexibilidade (vários tipos de canais transmitidos em diferentes comprimentos de onda podem coexistir no mesmo *link*) [29, 30].

Apesar de todos esses atrativos, a maior desvantagem do WDM-PON é o seu custo elevado e pouca maturidade. Cada assinante requer seu próprio transceptor dedicado no OLT. Além disso, o AWG deverá ser mais caro que os *splitters* utilizados no BPON, EPON e GPON pois os componentes ópticos seletivos estáveis em comprimento de onda estáveis fazem com que o WDM aplicado em redes ópticas passivas ainda não seja competitivo.

Ponzini et. Al, propõe uma solução baseada em dois comprimentos de onda colocadas nas duas extremidades da fibra: após o terminal de linha óptica (OLT) e antes do nó remoto (RN). Sugere-se que sejam usados apenas os comprimentos de onda do PON original (normalmente dois, para transmissão *downstream* e *upstream*) e destinados para expansão WDM em larguras de banda diferentes [31].

Um caso prático é o de uma GPON usando 1310 nm e 1490 nm no *upstream* e *downstream*, respectivamente, atualizado pela adição de novos canais WDM na banda C (de 1530 nm a 1565 nm) ou banda L (de 1565 nm a 1625 nm). Nesse caso, a utilização de acopladores seletivos em comprimentos de onda apresenta várias vantagens: total compatibilidade com a GPON instalada, sem qualquer modificação necessária no equipamento existente; pequeno impacto sobre o gasto de energia (a perda de acoplamento é inferior a 1 dB); pequeno custo, compatibilidade com canais de 10 Gbit/s e 40 Gbit/s devido à ausência de distorções de filtragem, fácil expansão da banda C para a banda L [31].

10G-GPON e 10G-EPON

Aplicações e serviços, tais como IPTV de alta definição, Vídeo sob Demanda (VoD), Voz sobre IP (VoIP), videoconferência e jogos *online*, fazem com que no futuro seja necessário implementar novas tecnologias a partir dos padrões existentes. Foram desenvolvidos padrões 10G da rede PON pelo IEEE (10G-EPON) e ITU-T/FSAN (10G-GPON). Esses padrões de nova geração (NG-PON) serão descritos brevemente, uma vez que eles são padrões relativamente recentes.

O 10G-PON, ou também conhecido como XG-PON, é um padrão de transmissão de banda larga definido pela ITU (recomendação ITU-T G.987), que pode proporcionar taxas de transmissão de 10 Gbit/s em redes ópticas passivas, aprovado em 2010. Essa é a próxima geração do padrão GPON e permite sua coexistência com os equipamentos instalados na mesma rede, podendo ser uma extensão da tecnologia GPON.

A Figura 15 mostra simplificada uma rede típica 10G-GPON para serviço de FTTH. Nessa tecnologia, a taxa de *downstream* sobre a fibra é de 10 Gbit/s e a taxa de *upstream* pode

Capítulo 3. Redes Ópticas Passivas

ser de 1,25 Gbit/s, 2,5 Gbit/s ou 10 Gbit/s. Quanto maior a taxa de *upstream*, maior é o custo do terminal de rede óptica (ONT). A rede GPON utiliza ONTs com taxa de *upstream* de 1,25 Gbit/s e esse será a alternativa de menor custo do transceptor para o ONT da tecnologia 10G-GPON, já que esse componente é o mais caro do ONT. A atribuição dinâmica de largura de banda (DBA), especificado na recomendação G.984.3, permite mais assinantes no sentido *upstream*, e isso elimina a exigência de maiores taxas de *upstream* [19].

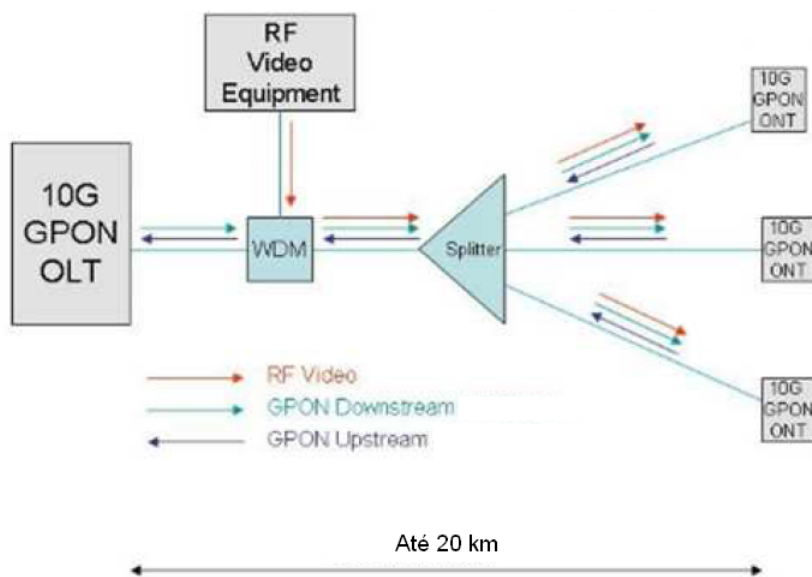


Figura 15: Diagrama da rede 10G-GPON. Extraído de [19].

O elemento essencial para manter o custo do ONT baixo é um transceptor óptico barato. Os transceptores 10G-GPON capazes de transmitir a 10 Gbit/s em *upstream* são consideravelmente mais caros que os transceptores de 2,5 Gbit/s e 1,25 Gbit/s. Embora a comunicação no sentido *upstream* tenha recebido muita atenção ultimamente, o custo do ONT recebe muita atenção por parte das operadoras. Por isso, espera-se que a taxa de *upstream* no 10G-GPON, seja inicialmente inferior e seja aumentado gradativamente com a diminuição do custo de produção do transceptor.

E, por fim, esse padrão pode ser resumido em dois tipos:

- XG-PON1 (10G-PON assimétrico): *downstream* de 10 Gbit/s e *upstream* de 2,5 Gbit/s.
- XG-PON2 (10G-PON simétrico): *downstream* e *upstream* de 10 Gbit/s, que requer transceptores mais caros.

Já o 10G-EPON é um padrão com capacidade para 10 Gigabit *Ethernet* que foi definida pelo IEEE pela norma P802.3av. Esse padrão enfatiza a coexistência dos sistemas EPON de 1 Gbit/s e 10 Gbit/s na mesma rede. A Figura 16 apresenta uma rede de acesso 10G-EPON simplificada.

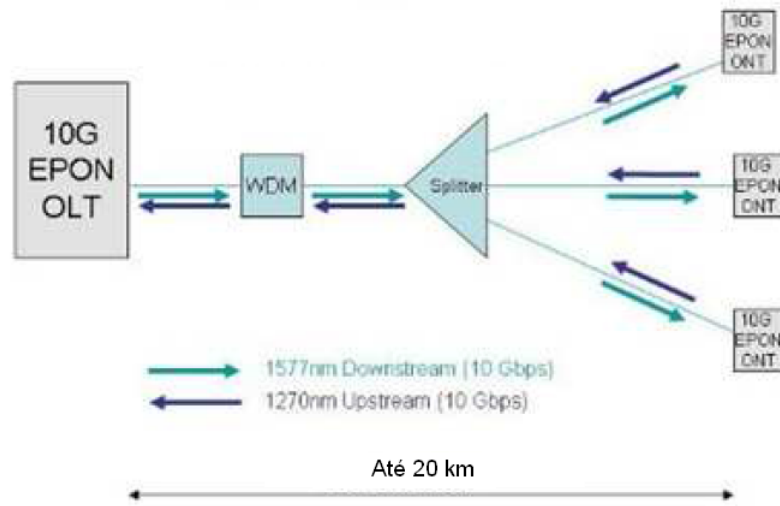


Figura 16: Diagrama da rede 10G-EPON. Extraído de [19].

A comunicação em *downstream* no 10G-EPON é por difusão (*broadcast*) de quadros *Ethernet*. No sentido *upstream* é utilizado o TDMA, em que cada ONT transmite em seu próprio *slot* de tempo, podendo variar o tamanho desse *slot* de tempo para otimizar o *upstream*. Como as transmissões em rajada de diferentes ONTs podem ter diferentes taxas de transmissão (entre 1 Gbit/s e 10 Gbit/s), esse método é chamado de TDMA de taxa dupla.

No sentido de *downstream*, os canais de 1 Gbit/s e 10 Gbit/s têm comprimentos de onda diferentes, com as transmissões em 1 Gbit/s na banda entre 1480 nm e 1550 nm, e em 10 Gbit/s entre 1575 nm e 1580 nm [19].

No sentido de *upstream*, as bandas dos canais de 1 Gbit/s e de 10 Gbit/s se sobrepõem, sendo a banda entre 1260 nm e 1360 nm para 1 Gbit/s, e entre 1260 nm e 1280 nm para 10 Gbit/s. Isso permite que os dois canais de *upstream* compartilhem a mesma região de espectro, mas requer que os canais de 1 Gbit/s e 10 Gbit/s sejam separados no domínio do tempo [19].

O padrão 10G-EPON pode ser também ser resumido em dois tipos:

- 10G-EPON assimétrico: *downstream* de 10 Gbit/s e *upstream* de 1 Gbit/s.
- 10G-EPON simétrico: *downstream* e *upstream* de 10 Gbit/s.

O 10G-EPON assimétrico é mais simples de ser implementado que o simétrico, já que a primeira depende de uma tecnologia bastante madura. A transmissão em *upstream* é idêntica ao 1G-EPON (especificado na norma IEEE 802.3ah) e conta com transceptores ópticos de transmissão em rajada desenvolvidos em massa. Já a transmissão em *downstream*, que utiliza óptica de modo contínuo, depende da maturidade e a consequente diminuição do custo da fabricação dos dispositivos *Ethernet* ponto-a-ponto de 10 Gbit/s [32].

O principal propulsor para o 10G-EPON simétrico é a necessidade de fornecer largura de banda *downstream* e *upstream* adequada para suportar a MDU (Unidade Multi-Residencial). Quando a estratégia de implantação é a configuração da MDU, um ONU EPON pode ser conectado para até mil assinantes [32].

No próximo capítulo será abordado mais especificamente a modulação OFDM, sendo a base para o trabalho proposto, uma vez que será simulada a sua aplicação em sistemas PON.

3.3. Arquiteturas e evolução das Redes Ópticas Passivas

4 Modulação OFDM

Com a evolução das tecnologias de processadores digitais de sinais, a modulação OFDM surgiu como uma solução para aumentar a capacidade de várias tecnologias que demandam altas taxas de transmissão no domínio de RF (Radiofrequência) como nos sistemas sem-fio (IEEE 802.11a e 802.11g), WiMAX (IEEE 802.16) e nos padrões de TV Digital (DVBT e ISDBT), e mais recentemente no domínio óptico em comunicações ópticas. Assim, neste capítulo será abordada especificamente a Modulação OFDM de maneira genérica e os aspectos da sua aplicação nos sistemas de comunicação óptica.

4.1 Definições da modulação OFDM

O OFDM, Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal, pertence a uma ampla classe de Modulação Multiportadora (MCM, *Multicarrier Modulation*), no qual as informações são distribuídas em múltiplas subportadoras com menor taxa de transmissão de dados em cada uma delas [10]. A Figura 17 ilustra um sinal OFDM. A Figura 17(a) ilustra cada uma das subportadoras separadamente no domínio do tempo. A Figura 17(b) representa a somatória de todas as subportadoras. E a Figura 17(c) apresenta cada uma das subportadoras no domínio do tempo.

Com relação ao uso da modulação OFDM podem ser destacados os seguintes pontos [33, 34]:

- Vantagens
 - Uso espectral mais eficiente.
 - Maior imunidade ao efeito de canal.
 - Flexibilidade para as redes PON como alocação dinâmica da banda disponível e acesso múltiplo (OFDMA).
 - Baixo custo de implementação (domínio digital).
- Desvantagens/Desafios
 - Alta razão de potência de pico e média (PAPR, *Peak-to-Average Power Ratio*).
 - Sensibilidade a ruído de fase e de frequência.

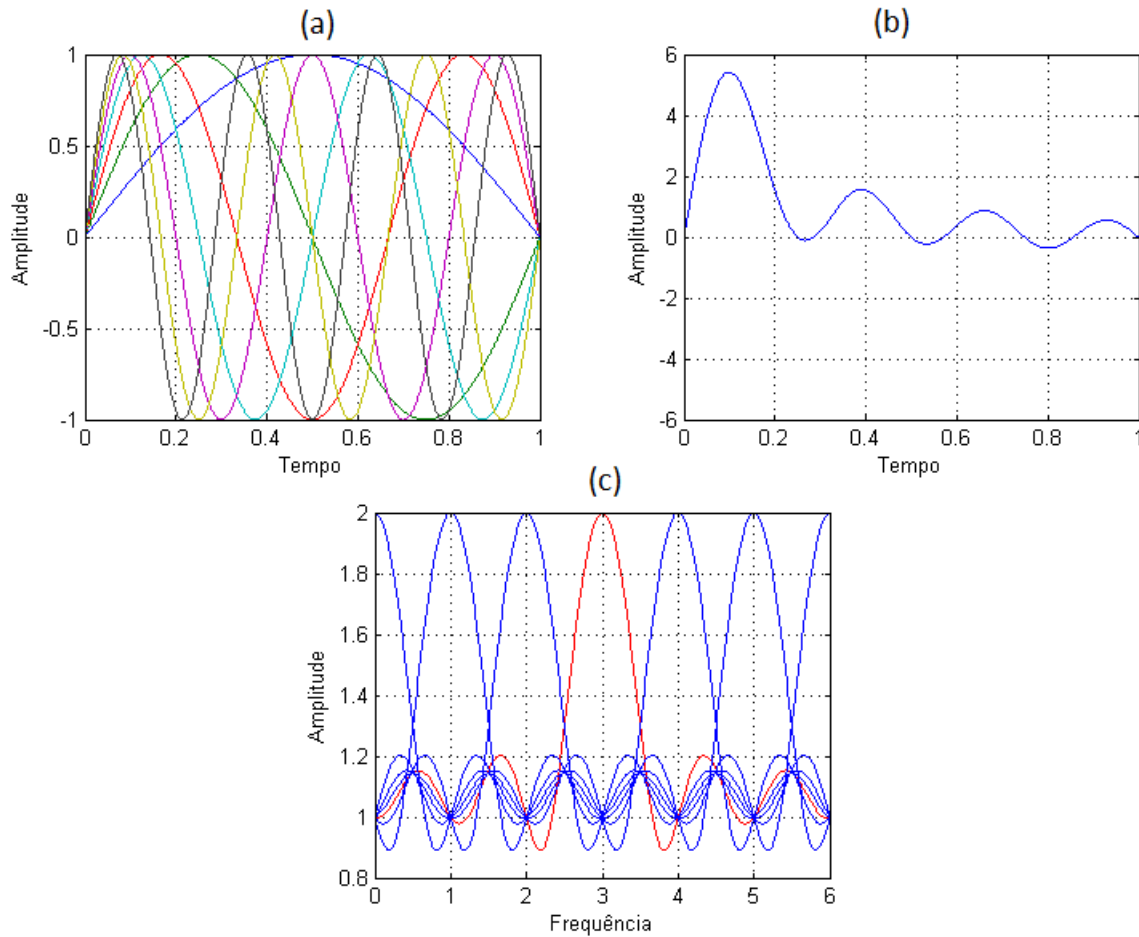


Figura 17: Sinal OFDM: (a) Subportadoras no domínio do tempo; (b) Sobreposição/somatória das subportadoras no domínio do tempo; (c) Subportadoras no domínio da frequência.

Como destacado anteriormente, uma das vantagens do uso do OFDM no domínio de RF é sua robustez contra a dispersão de canal e sua facilidade de estimação de fase de canal em um ambiente variante no tempo. No entanto, o OFDM possui desvantagens intrínsecas a natureza do seu sinal, tais como a sua alta Potência de Pico em relação a potência média (PAPR, *Peak-to-Average Power Ratio*) e sensibilidade ao ruído de frequência e fase [10].

Um dos grandes desafios do OFDM é com relação ao grande número de subportadoras necessárias para que o canal de transmissão afete cada subportadora como um canal de desvanecimento plano. Isto requer uma arquitetura muito complexa, envolvendo vários osciladores e filtros, tanto no transmissor como no receptor.

No entanto, em 1971, Weinstein e Ebert revelaram que a modulação/demodulação (modem) OFDM poderia ser implementada usando a Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*)/Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Trans-*

form), respectivamente. Computacionalmente, a DFT e a IDFT são implementadas por algoritmos otimizados, pela FFT (*Fast Fourier Transform*) e IFFT (*Fast Fourier Transform*), respectivamente [10, 33].

Dentre as várias vantagens de um sistema multiportadora em relação a sistemas de portadora única, podem ser destacadas: alta imunidade a multipercursos, redução significativa da taxa de sinalização no canal, a largura de faixa ocupada por cada subportadora é N vezes menor do que a largura de faixa ocupada pelo sinal modulado por uma única portadora. Por outro lado, os sistemas multiportadora possuem algumas desvantagens, como os problemas do pico de potência na transmissão, e a dificuldade de sincronismo de símbolo [35].

O sistema OFDM surgiu nos anos 60, quando Chang [36] publicou seu artigo sobre síntese de transmissão com vários canais limitados em banda. Chang apresentou o princípio de transmissão de mensagens em vários canais limitados em banda sem causar interferência entre portadoras (ICI – *Inter Carrier Interference*) e interferência entre símbolos (ISI – *Inter Symbol Interference*) [35].

Em 1971 Weinstein e Ebert [37] demonstraram a possibilidade de realizar o processo de multiplexação e demultiplexação OFDM a partir da Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT) e da Transformada Discreta de Fourier Direta (DFT), respectivamente. Esta descoberta auxiliou na elaboração de novas técnicas, que futuramente, com o desenvolvimento da microeletrônica e a criação de algoritmos otimizados como o *Fast Fourier Transform* (FFT), possibilitaram a aplicação do OFDM em sistemas de comunicações [35].

Uma outra contribuição que se pode destacar é a de Peled e Ruiz em 1980 [38], que introduziram o prefixo cíclico ou extensão cíclica, para resolver a questão da ortogonalidade. Em vez de utilizar um espaço de guarda vazio, eles preencheram esse espaço com uma extensão cíclica do símbolo OFDM [35].

O sistema OFDM consiste em uma técnica de transmissão de múltiplas portadoras, dividindo o espectro disponível em muitas subportadoras, cada uma sendo modulada por um feixe de baixa taxa de dados. Essa técnica é muito semelhante à técnica de multiplexação por divisão de frequência FDM (*Frequency Division Multiplexing*), porém utilizando o espectro de frequências de forma mais eficiente, com a redução de espaçamento entre portadoras. Isso é possível porque as portadoras são ortogonais entre si, eliminando a necessidade da banda de guarda entre as portadoras, como mostrado na Figura 17 [35].

4.1.1 Transmissor OFDM

A Figura 18 ilustra o diagrama de blocos de um modulador OFDM básico.

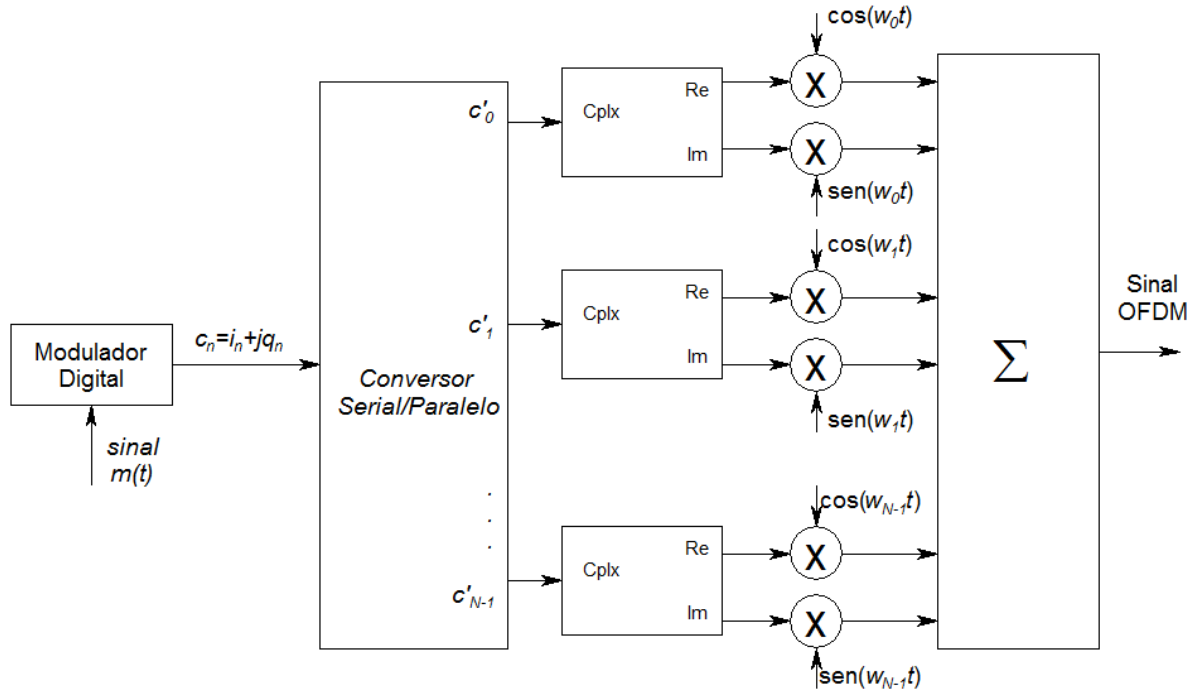


Figura 18: Modulador OFDM básico. Extraído de [35].

Na Figura 18, $m(t)$ representa a sequência que se deseja transmitir, e $c_n = i_n + jq_n$ o sinal complexo mapeado nos sinais i_n em fase e q_n em quadratura. Em seguida, o conversor série paralelo transforma o sinal em N feixes de símbolos complexos paralelos, que modulam as subportadoras complexas. A modulação é então aplicada a partir de funções cosseno e seno de frequência angular ω_n para se obter as partes real e imaginária, respectivamente. O espaçamento entre as subportadoras é igual ao inverso do tempo do símbolo OFDM, sendo que o conjunto das N subportadoras adjacentes é ortogonal. O equacionamento do sinal OFDM pode ser resumido como:

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ c_n e^{-j\omega_n t} \},$$

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ (i_n + jq_n) \cdot [\cos(\omega_n t) - j \text{sen}(\omega_n t)] \}, \quad (8)$$

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ i_n \cos(\omega_n t) - j i_n \text{sen}(\omega_n t) + j q_n \cos(\omega_n t) + q_n \text{sen}(\omega_n t) \},$$

onde $\Re \{ . \}$ corresponde à parte real e N é o número de subportadoras.

Logo, o sinal OFDM pode ser expresso por:

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ i_n \cos(\omega_n t) + q_n \text{sen}(\omega_n t) \}, \quad (9)$$

Decorrido o tempo do símbolo OFDM em T segundos, o valor de amplitude de cada subportadora é atualizado com os dados no próximo símbolo. Caso o pico do sinal de várias subportadoras, vistas no tempo, estejam em fase, o somatório da Equação 9 pode repercutir em elevados níveis, que podem levar os transmissores a trabalharem em regiões de saturação, como comentado no início deste capítulo. Além disso, em um sistema OFDM, todos os N osciladores complexos do transmissor e do receptor devem estar em fase. Quanto maior for o número de subportadoras no sistema, maior será a dificuldade em se obter o sincronismo entre os osciladores, aumentando a complexidade de implementação, que pode inviabilizar o uso desta técnica.

4.1.2 Receptor OFDM

A recepção do sinal OFDM é realizada por um banco de correladores, conforme apresentado na Figura 19.

Para um canal sem distorção e sem ruído, a detecção é realizada sem erros, uma vez que todas as subportadoras são ortogonais entre si, não existindo interferências entre os N subcanais recebidos. Observando que todas as subportadoras possuem um número inteiro de ciclos no intervalo de T segundos, podem-se detectar as componentes recebidas, i'_N , como

$$i'_n = \frac{2}{T} \int_0^T r(t) \cos(\omega_n t) dt. \quad (10)$$

Tomando-se como exemplo a recepção da componente i'_0 e lembrando que para um canal sem ruído e sem distorções $r(t) = s_{OFDM}(t)$, tem-se que

$$\begin{aligned} i'_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(\omega_n t) + q_n \text{sen}(\omega_n t)] \cdot \cos(\omega_0 t) dt, \\ i'_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} i_n \cos(\omega_n t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt + \underbrace{\frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} q_n \text{sen}(\omega_n t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt}_0, \\ i'_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T i_0 \cos(\omega_0 t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt + \underbrace{\frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} i_n \cos(\omega_n t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt}_0, \end{aligned}$$

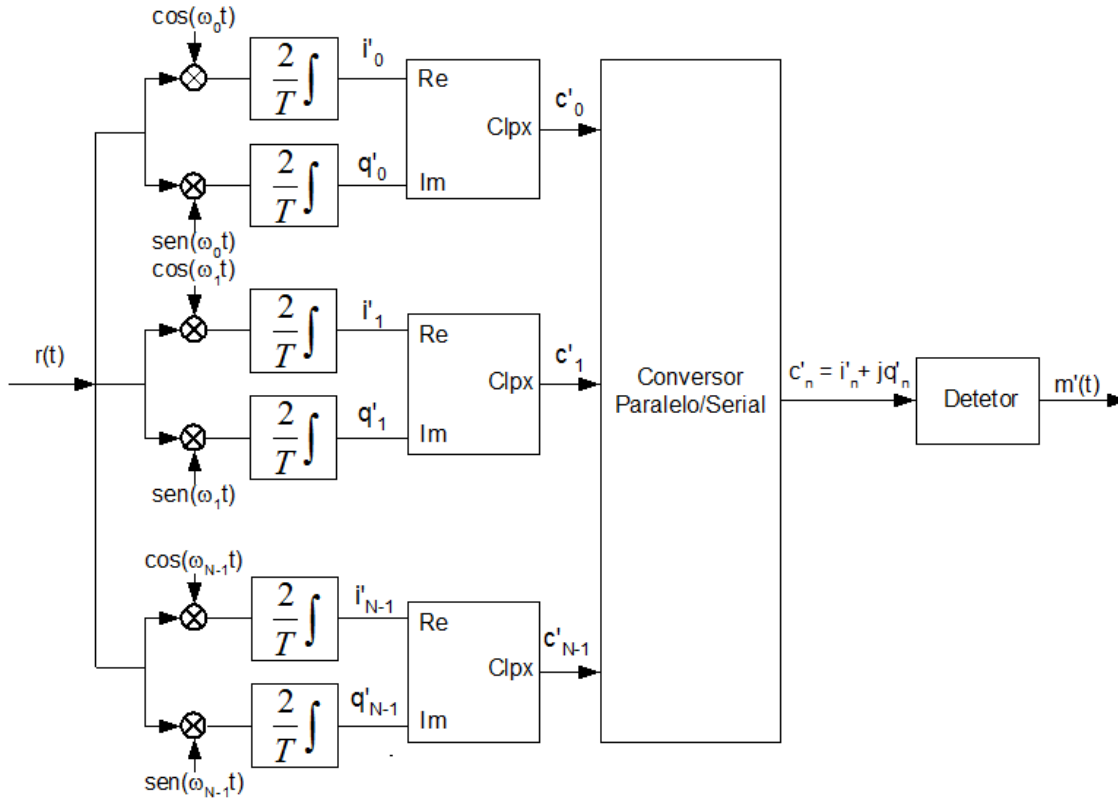


Figura 19: Diagrama de blocos do demodulador OFDM. Extraído de [35].

$$i'_0 = \frac{2i_0}{T} \int_0^T \cos^2(\omega_0 t) dt = i_0. \quad (11)$$

O procedimento anterior é o mesmo para todas as componentes do sinal $r(t)$, uma vez que todas as portadoras possuem um número inteiro de ciclos no intervalo de T segundos.

O método de geração e detecção do sinal OFDM apresentado no equacionamento anterior é denominado Método da Força Bruta. Com o aumento do número de subportadoras, sua implementação torna-se inviável, devido à complexidade de construção dos osciladores complexos presentes no transmissor e no receptor. Entretanto, os avanços da tecnologia digital permitiram implementar o sistema OFDM através de um método que simplifica a construção do transmissor e do receptor, como descrito a seguir.

Partindo da Equação 9, os coeficientes i_n e q_n podem representar, respectivamente, os coeficientes de bases ortogonais, $\cos(\omega_n t)$ e $\sin(\omega_n t)$, de modo que o sinal OFDM pode ser analisado como uma série de Fourier de N elementos e coeficientes i_n e q_n . Primeiramente, é necessário amostrar o sinal OFDM. Isto se deve a utilização de DSP's (*Digital Signal Processor*) na geração e detecção deste sinal, o que exige uma análise discreta do sistema. A Equação 9 pode ser analisada no

domínio do tempo, adotando uma taxa de amostragem expressa por:

$$f_s = \frac{1}{T_s} = R_s, \quad (12)$$

onde f_s corresponde à frequência de amostragem do sinal.

Assim, a Equação 9 pode ser reescrita como:

$$s_{OFDM}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(\Omega_n t_s m) + q_n \text{sen}(\Omega_n t_s m)], \quad (13)$$

onde m define o símbolo OFDM e Ω_n é a frequência angular da n -ésima subportadora amostrada e é definida como:

$$\Omega_n = 2\pi f_n. \quad (14)$$

Em banda básica, a frequência da primeira portadora é nula ($f_0 = 0$ Hz). Então as frequências das subportadoras, f_n , podem ser expressas por:

$$f_n = \frac{n}{T}. \quad (15)$$

O intervalo durante o qual as amostras do sinal OFDM são tomadas, $m(t)$, é dado por

$$t_m = mt_s, \quad (16)$$

onde $s(t)$ é o tempo do símbolo OFDM de entrada. Assim:

$$T = Nt_s. \quad (17)$$

Utilizando essas definições, pode-se representar o sinal OFDM amostrado em banda básica como:

$$s_{OFDM}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[i_n \cos\left(\frac{2\pi t_s}{Nt_s} m\right) + q_n \text{sen}\left(\frac{2\pi t_s}{Nt_s} m\right) \right],$$

$$s_{OFDM}(m) = \Re \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} [c_n e^{-j\frac{2\pi n}{N} m}] \right\}, \quad (18)$$

Este resultado mostra que o sinal OFDM pode ser obtido através da Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT – *Inverse Discrete Fourier Transform*) do vetor de N símbolos complexos, c_n . Como a IDFT gera um sinal no domínio do tempo a partir do espectro de frequências do sinal,

o vetor c_n pode ser considerado como o espectro de frequência do símbolo OFDM.

Sabe-se que o espectro de um sinal real é simétrico com relação à frequência nula. Tratando-se de um sinal discreto real, seu espectro é simétrico com relação à $N = 2$. Entretanto, para o sinal OFDM esta simetria não existe porque cada componente do vetor c_n corresponde a um símbolo de dados a ser transmitido, independente dos demais. Assim, o resultado da $IDFT(c_n)$ gera um sinal complexo, onde a informação a ser transmitida está presente tanto na parte real quanto na parte imaginária, conforme mostra a Equação 8, reescrita a seguir por conveniência.

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \{i_n \cos(w_n t) + q_n \text{sen}(w_n t)\}.$$

Deste modo, somente a parte real da $IDFT(c_n)$ é transmitida, como mostra a Equação 18.

É importante considerar o número de pontos presentes no sinal gerado a partir da IDFT, porque como o vetor c_n contém N amostras, o sinal também possui N amostras complexas. Para transmiti-lo deve-se interpolar a parte real das amostras geradas pela IDFT, obtendo-se assim um sinal contínuo no tempo. A Figura 20 apresenta o diagrama em blocos de um modulador OFDM utilizando a IDFT.

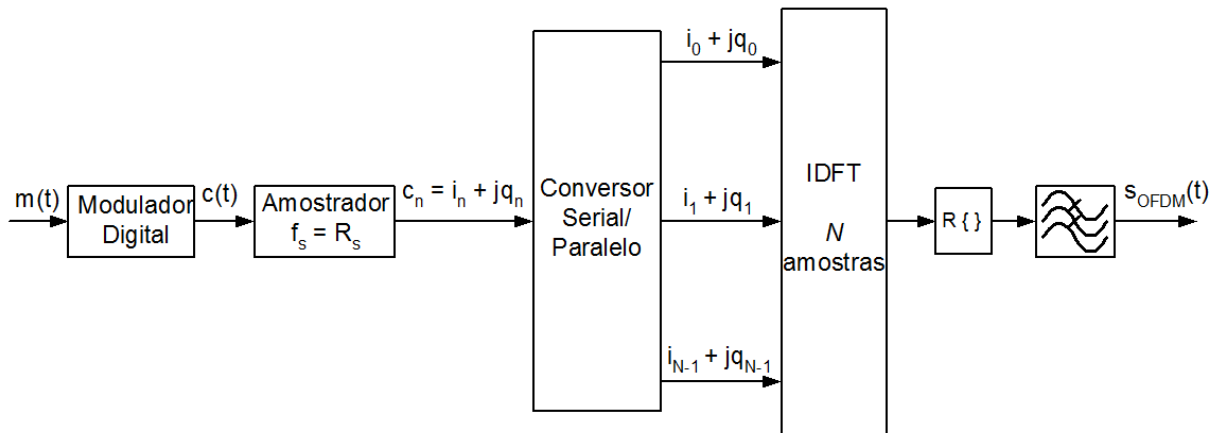


Figura 20: Modulador OFDM utilizando a IDFT. Extraído de [35].

A recepção do sinal é realizada através da Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*). A taxa de amostragem do sinal recebido deve ser duas vezes maior do que a taxa do sinal transmitido, uma vez que o mesmo contém apenas a parte real. Deste modo, tem-se o sinal recebido discreto, $r(m)$, dado por

$$r_m = r\left(\frac{t_m}{2}\right) = r\left(\frac{t_s}{2}m\right). \quad (19)$$

O sinal r_m é composto por $2N$ amostras e, assumindo que o canal não apresenta ruídos e distorções, é expresso por

$$r_m = \sum_{n=0}^{N-1} \left[i_n \cos \left(\frac{2\pi n}{2N} m \right) + q_n \text{sen} \left(\frac{2\pi n}{2N} m \right) \right]. \quad (20)$$

Aplicando a IDFT ao sinal representado por 20, tem-se

$$c'_l = \begin{cases} 2i_0 & l = 0 \\ i_l + jq_l & 1 \leq l \leq N-1 \\ \text{irrelevante} & N \leq l \leq 2N-1 \end{cases}, \quad (21)$$

onde c'_l corresponde ao vetor complexo recebido. Este vetor apresenta o dobro do comprimento do vetor c_n , mas apenas as N primeiras amostras referem-se à informação relevante. Outra consideração importante é que apenas a parte real do coeficiente c_0 é recuperada. Isto se deve ao fato deste coeficiente ser transportado na subportadora de frequência nula, pois a função *seno* da Equação 20 tem valor nulo para $n = 0$. Assim, a primeira subportadora do sistema OFDM em banda básica não é capaz de transportar informação em quadratura. A Figura 21 ilustra o diagrama em blocos do demodulador OFDM utilizando a DFT.

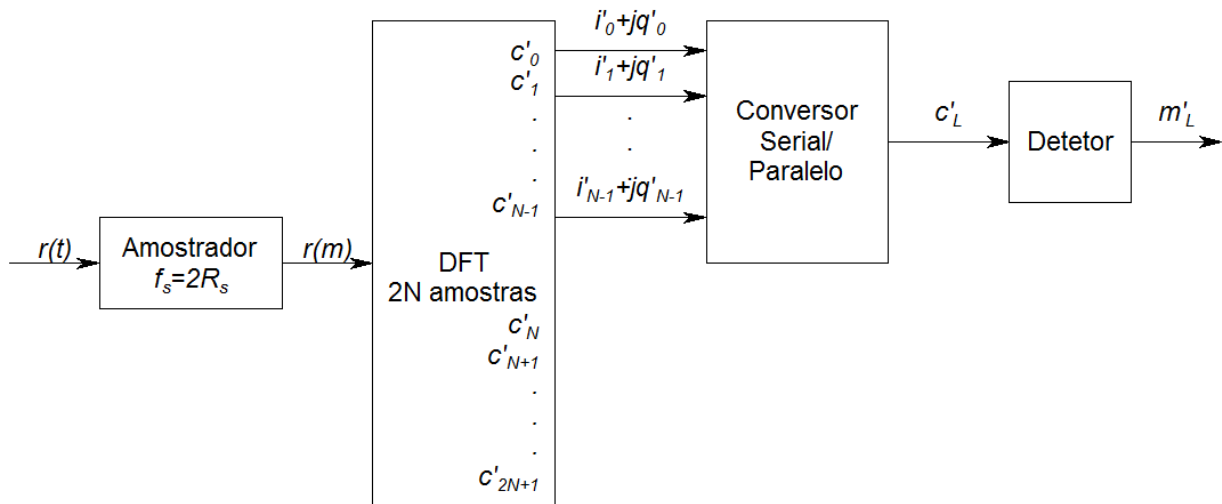


Figura 21: Demodulador OFDM utilizando a DFT. Extraído de [35].
Extraído de [35].

Na literatura, é comum encontrar esquemas de modulação e demodulação OFDM, onde a parte imaginária da IDFT também é transmitida. Isto simplifica a análise e a modelagem para a simulação. A Figura 22 apresenta o diagrama em blocos do sistema OFDM com transmissão da parte

imaginária da IDFT.

Nesse sistema, como não ocorre perda da parte imaginária da IDFT, não é necessário amostrar o sinal recebido com o dobro da taxa de amostragem utilizada na transmissão. A parte imaginária do coeficiente c_0 também é recuperada, pois a parcela $jq_n \cos(\omega_n t)$ da Equação 8 garante a transmissão do termo q_0 .

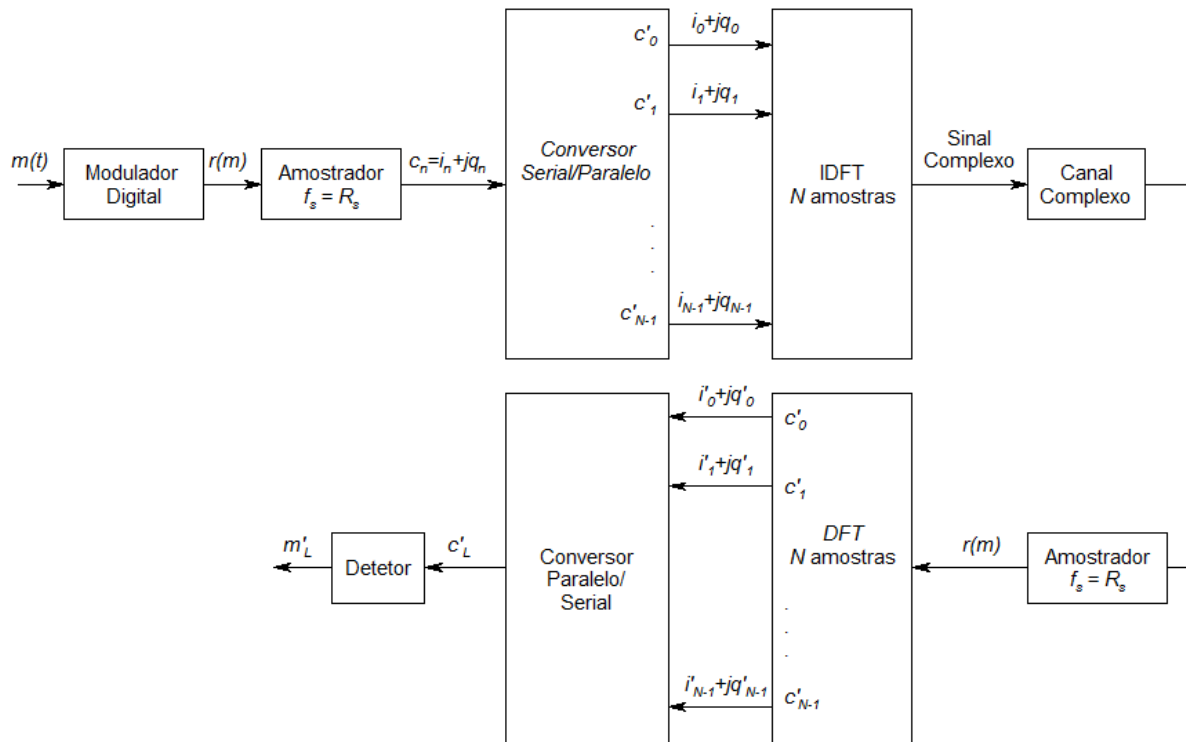


Figura 22: Sistema OFDM com transmissão da parte imaginária da IDFT. Extraído de [35].

Enquanto que no Método da Força Bruta existe a dificuldade de construir N osciladores complexos, nesse método existe a dificuldade em realizar a IDFT e a DFT das N amostras durante o tempo de símbolo OFDM. Embora o tempo de símbolo OFDM aumente linearmente com o aumento do número de subportadoras, o tempo requerido para computar a IDFT e a DFT aumenta exponencialmente com N . Deste modo, aumentando-se o número de subportadoras, aumenta-se também a carga computacional do sistema [35].

Com o objetivo de minimizar esta carga computacional, utiliza-se um algoritmo eficiente para computar a DFT, conhecido como Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*). Entretanto, para que o tempo de processamento seja efetivamente reduzido, a seguinte

condição deve ser satisfeita

$$N = 2^p \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (22)$$

O ganho de eficiência é aumentado quando se trabalha com valores maiores de N . A Figura 23 apresenta o diagrama em blocos de um sistema OFDM implementado pelo método da IFFT/FFT.

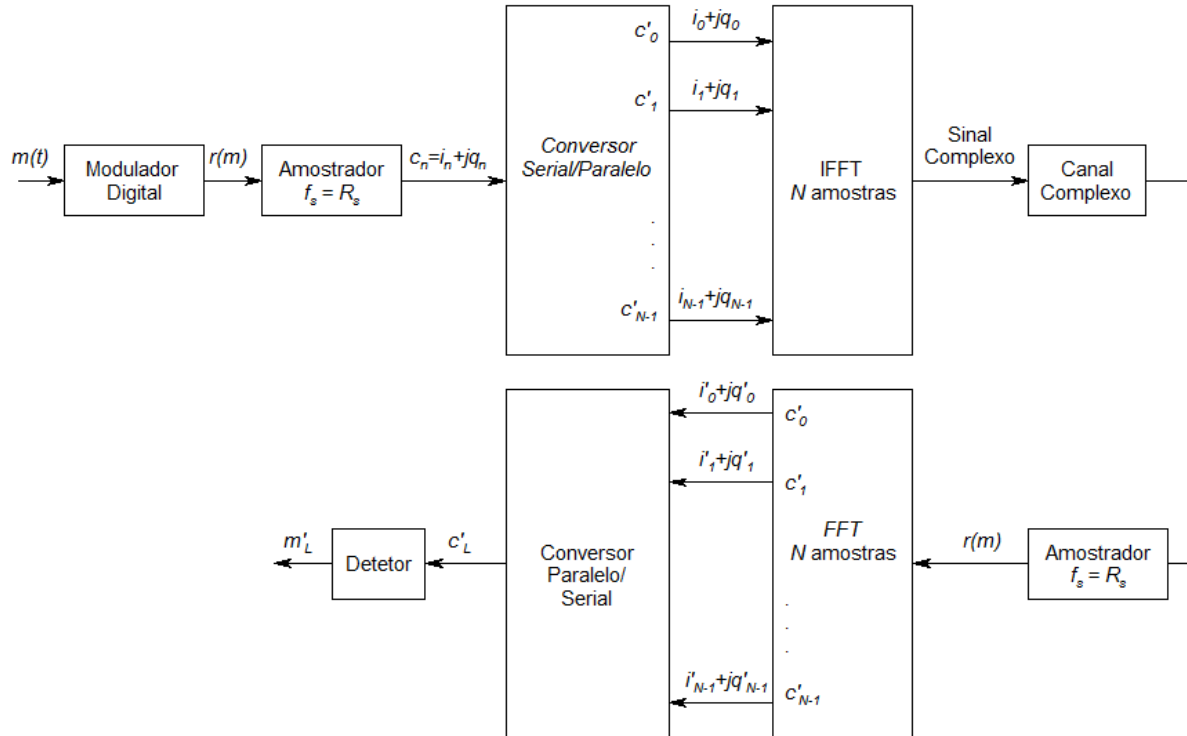


Figura 23: Sistema OFDM utilizando o método da IFFT/FFT. Extraído de [35].

Os padrões que utilizam o sistema OFDM empregam este método para implementar o transmissor e o receptor. As técnicas de processamento digital de sinais permitiram que sistemas OFDM com elevado número de subportadoras fossem empregados para a transmissão digital a altas taxas.

4.1.3 Intervalo de Guarda

Em muitos ambiente de transmissão, ocorrem multicaminhos e muita reflexão entre o transmissor e o receptor, a ortogonalidade das portadoras do sinal recebido pode ser prejudicada. Para se evitar isso, pode ser inserido um bloco, após a modulação OFDM, que consiste na extensão cíclica do símbolo OFDM. O tamanho desta extensão equivale à duração do intervalo de guarda [35].

O propósito do intervalo de guarda é amenizar os problemas relacionados às interferências intersimbólicas. Porém, para que isto funcione, é necessário que o tamanho do intervalo de guarda

seja maior que a dispersão temporal do canal, ou seja, o atraso máximo de um sinal refletido que chega à antena deve ter uma duração menor que a duração do intervalo de guarda.

O intervalo de guarda também poderia ser constituído de um intervalo vazio, porém quando o canal é dispersivo, o atraso de cada subportadora pode ser diferente, acarretando uma interferência intersimbólica e perda de ortogonalidade. No domínio do tempo significa que deixa de existir um número inteiro de portadoras dentro de um ciclo (parte útil do símbolo OFDM).

A Equação 23 mostra este caso, garantindo que se a dispersão do sinal for menor que o comprimento do intervalo de guarda as subportadoras atrasadas do símbolo OFDM sempre terão um número inteiro de ciclos na parte útil do símbolo OFDM [35].

$$x_g(n) = \begin{cases} x(N+n) & n = -N_g, -N_g + 1, \dots - 1 \\ x(n) & n = 0, 1, \dots N-1 \end{cases}, \quad (23)$$

onde $x_g(n)$ é o número de amostras do símbolo OFDM com intervalo de guarda, N é o número de subportadoras e N_g é o número de amostras do intervalo de guarda.

4.2 Aplicação da modulação OFDM em comunicações ópticas

O OFDM em comunicações ópticas é um grande desafio, possuindo vantagens e desvantagens. Diante da grande otimização e adoção que essa modulação tem proporcionado em aplicações de rádio frequência, o seu estudo em redes ópticas tem gerado discussões na comunidade acadêmica e entre as fabricantes de equipamentos. Nesta seção será definido o OFDM óptico, é proposto um modelo de canal e são descritas algumas referências sobre o assunto.

4.2.1 Descrição do OFDM óptico

Recentemente, inúmeros pesquisadores têm mostrado que a modulação OFDM é uma tecnologia promissora para as comunicações ópticas [33, 34]. Assim como nas comunicações por RF, ela é imune ao multicaminho (“reflexões e refrações”) que ocorre na fibra óptica.

Existem diversos trabalhos abordando as tecnologias para redes ópticas passivas de nova geração [39, 40]. Outros também envolve a simulação numérica de sistemas PON utilizando OFDM com o *software* MATLAB [41, 42]. Quase nessa mesma linha, existe um trabalho no qual foi utilizado o *software* de simulação de redes ópticas (VPItransmissionMakerTM da VPI Photonics) em conjunto com o MATLAB para implementar, neste último, a parte de modulação OFDM e assim simular seu desempenho da rede [43, 44].

Outros pesquisadores estão desenvolvendo experimentos físicos de transmissão e/ou recepção, que utilizam um Gerador de Ondas Aleatórias e um Osciloscópio digital para análise de desempenho. As informações coletadas são tratadas de modo “*offline*” [45, 46]. Destacam-se também os trabalhos nos quais os pesquisadores intitulam como sistema “*real-time*”, em que implementam a FFT/IFFT diretamente nos FPGAs [47, 48, 49]. Os resultados atingidos em vários experimentos, físicos e teóricos, passam da ordem de 20 Gbit/s.

Com relação aos tipos de OFDM óptico, existem duas abordagens principais : o OFDM óptico coerente (CO-OFDM, *Coherent Optical OFDM*), que envolve a modulação no domínio óptico e o OFDM de detecção direta óptica (DDO-OFDM, *Direct Detection Optical OFDM*), que envolve a modulação da intensidade óptica. O CO-OFDM apresenta melhor desempenho na sensibilidade do receptor, eficiência espectral e robustez contra a dispersão de polarização, mas requer uma maior complexidade no projeto do transceptor [50].

No domínio óptico, ressalta-se que é necessário o uso de um Conversor Digital/Analogico (DAC) no transmissor e um Conversor Analógico/Digital (ADC) no receptor. O papel do DAC é converter um sinal digital OFDM em um sinal analógico que, por sua vez, atua no modulador óptico para produzir um sinal óptico OFDM. Já o papel do ADC é prover um receptor digital OFDM, por meio da conversão de um sinal elétrico OFDM analógico para o domínio digital e prepará-lo para o processador digital dos dados do receptor [51].

Em geral, sinais OFDM elétricos são sinais com valores complexos. Para converter os dados em valores complexos no domínio óptico, o sinal pode ser eletricamente convertido usando uma portadora de frequência intermédia (IF) para modular o sinal utilizando-se um misturador complexo IQ (*In-Phase and Quadrature*) no domínio elétrico. O sinal resultante da conversão dos dados para sinal OFDM elétrico pode ser convertido para o domínio óptico usando um modulador de amplitude. Alternativamente, um modulador complexo IQ e/o (eletro-óptico) pode ser conduzido diretamente pelo sinal OFDM elétrico e, assim, convertido para o domínio óptico. As configurações do transmissor estão resumidas na Figura 24.

Em receptores ópticos, tipicamente, fotodiodos simples são aplicados, operando de acordo com o esquema de detecção quadrática (“*square-law*”). A Figura 25 ilustra as configurações do receptor O-OFDM. É impossível transferir o sinal OFDM óptico diretamente para o domínio elétrico. Em vez de detecção direta do sinal OFDM óptico puro (25(a)), uma portadora óptica deve ser entregue pelo transmissor (usando DD-OFDM) ou por um oscilador local no receptor (usando CO-OFDM), por meio de uma abordagem heteródina ou “*intradyn*”, mostrado, respectivamente, na Figura 25(b) e 25(c). No cenário heteródino, o sinal OFDM óptico é convertido em um sinal OFDM elétrico com valores reais em uma Frequência Intermediária (IF). Na sequência, utilizando-se um demodulador IQ elétrico, as componentes reais e imaginárias estão disponíveis em banda base. Na abordagem

4.2. Aplicação da modulação OFDM em comunicações ópticas

“*intradyne*”, o comprimento de onda do oscilador local é próximo do comprimento de onda do transmissor. O sinal OFDM, em seguida, é multiplicado com o sinal do oscilador local (LO) óptico híbrido defasado em 90° para obter as componentes I e Q do sinal [52].

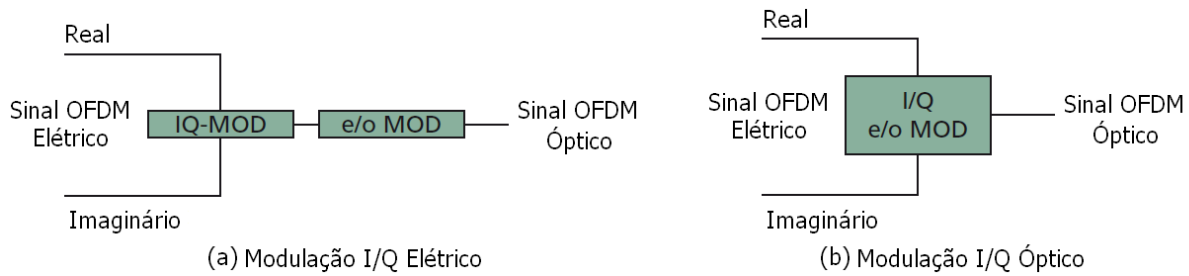


Figura 24: Configurações de transmissores OFDM óptico. Extraído de [52].

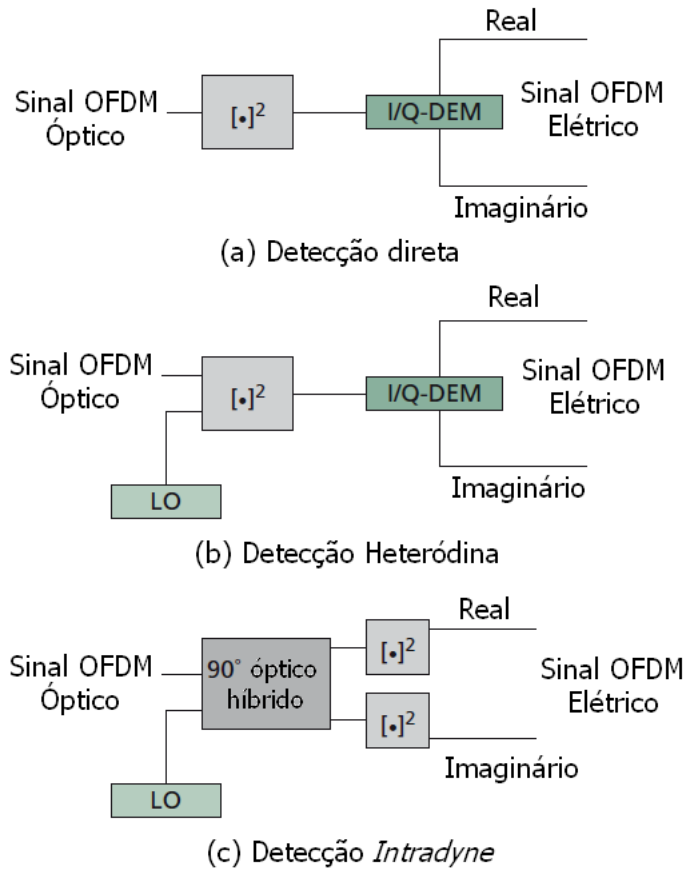


Figura 25: Configurações de receptores OFDM óptico. Extraído de [52].

4.2.2 Modelo de canal para CO-OFDM

A Figura 26 mostra um sistema CO-OFDM completo, que consiste de um transmissor CO-OFDM, um link óptico e um receptor CO-OFDM.

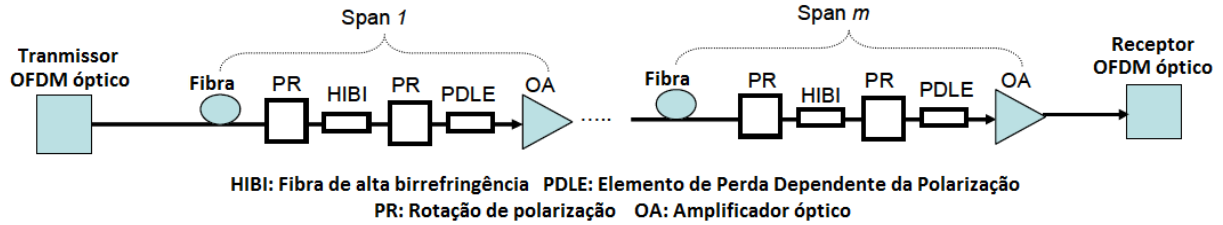


Figura 26: Sistema CO-OFDM completo considerando os efeitos da CD, PMD e PDL. Extraído de [53].

O transmissor CO-OFDM compreende de um transmissor OFDM de RF, um *up-converter* RF-para-óptico, enquanto o receptor CO-OFDM compreende um *down-converter* óptico-para-RF e receptor OFDM de RF. Cada trecho de fibra acarreta dispersão cromática, múltiplos estágios de elementos de alta birrefringência (HIBI) e elementos de perda de polarização dependente (PDL). Por uma questão de simplicidade, apenas uma etapa de HIBI e elementos PDL são mostrados. O ruído óptico é adicionado a partir dos amplificadores ópticos (OA), no final de cada período [53].

Primeiro definido o sinal OFDM em banda base recebido no domínio do tempo $r(t)$ dado por

$$r(t) = e^{j\phi(t)} s(t) \otimes h(t) + N(t). \quad (24)$$

$$h(t) = h_t(t) \otimes h_l(t) \otimes h_r(t). \quad (25)$$

onde $\phi(t) = \phi_r(t) - \phi_t(t)$, $\frac{\phi_t}{\phi_r}$ é o ruído de fase do transmissor/receptor OFDM óptico, incluindo os ruídos óptico e de oscilador local de RF, $s(t)$ é o sinal OFDM transmitido de banda de base [17]. h_t , h_l e h_r são, respectivamente, as funções de resposta de impulso para o enlace do OFDM óptica do transmissor, fibra óptica e receptor OFDM, $h(t)$ é a função de resposta ao impulso fim-a-fim, $N(t)$ é o ruído óptico adicionado a partir dos amplificadores ópticos em todo o enlace da fibra, e “ \otimes ” significa convolução. A não-linearidade da fibra não é considerado neste modelo de canal.

Assumindo uma perfeita sincronização em frequência e da janela DFT, o sinal recebido é amostrado e a DFT é realizada para recuperar a informação recebida do símbolo OFDM, que é dada pela

$$C'_{ki} = I_{i0} \cdot h_{ki} \cdot C_{ki} + \varepsilon_{ki} + n_{ki} \quad (26)$$

4.2. Aplicação da modulação OFDM em comunicações ópticas

$$\epsilon_{ki} = \sum_{m=-\frac{N_{sc}}{2}, m \neq k}^{\frac{N_{sc}}{2}-1} C_{mi} h_{mi} I_{i(m-k)} \quad (27)$$

$$I_{im} = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{n=-\frac{N_{sc}}{2}}^{\frac{N_{sc}}{2}-1} e^{\frac{j2\pi nm}{N_{sc}}} e^{j\phi_{in}} \quad (28)$$

onde C'_{ki} e C_{ki} são respectivamente os símbolos de informação recebido e transmitido para o símbolo da k -ésima subportadora no i -ésimo símbolo OFDM, ϵ_{ki} é o ruído de interferência entre subportadoras (ICI) induzida pelo ruído de fase, n_{ki} é o ruído óptico dos amplificadores, I_{im} é o coeficiente de acoplamento de ICI entre duas subportadoras com distância de m , N_{sc} é o número de subportadoras. Da Equação 28, I_{i0} é expresso como

$$I_{i0} = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{n=-\frac{N_{sc}}{2}}^{\frac{N_{sc}}{2}-1} e^{j\phi_{in}} \cong \frac{1}{N_{sc}} e^{j\phi_{i0}} \sum_{n=-\frac{N_{sc}}{2}}^{\frac{N_{sc}}{2}-1} (1 + j\Delta\phi_{in}) \cong e^{j\phi_i} \quad (29)$$

$$\Delta\phi_{in} = \phi_{in} - \phi_{i0}, \phi_i = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{n=-\frac{N_{sc}}{2}}^{\frac{N_{sc}}{2}-1} \phi_{in} \quad (30)$$

Pode ser visto que quando $\Delta\phi_{in} \ll 1$, I_{i0} representa evolução da fase para todo o símbolo OFDM, e, subsequentemente, pode ser considerada como a fase do símbolo OFDM (OSP), também conhecido como o erro de fase comum (CPE) [53], h_{ki} é a função de transferência do canal no domínio da frequência dada por

$$h_{ki} = h_{ki}^t \cdot h_{ki}^l \cdot h_{ki}^r \quad (31)$$

onde h_{ki}^t e h_{ki}^r são, respectivamente, as respostas de frequência do transmissor e receptor OFDM óptico, incluindo as respostas do DAC/ADC, RF pós/pré-amplificador, modulador IQ óptico e fotodetectores balanceados. h_{ki}^l é a resposta em frequência da fibra incluindo dispersão cromática, os efeitos PMD e PDL dados por

$$h_{ki}^l = e^{j\Phi_{ki}^D} \prod_{p=1}^M \exp \left\{ \left(-\frac{1}{2} j \cdot \vec{\beta}_{pi} \cdot f_k + \frac{1}{2} \vec{\alpha}_{pi} \right) \cdot \vec{\sigma} \right\} \quad (32)$$

$$\Phi_{ki}^D = \pi \cdot c \cdot D_t \cdot f_k^2 / f_{LD}^2 \quad (33)$$

onde Φ_{ki}^D é a mudança de fase devido à dispersão cromática, f_k é a frequência para a k -ésima subportadora, M é o número de elementos PMD/PDL em cascata em todo trecho de fibra, com

cada secção representada pelo seu vetor de birrefringência $\vec{\beta}_p$ e vetor PDL $\vec{\alpha}_p$ [25], $\vec{\sigma}$ é o vetor da matriz de Pauli, D_t é a dispersão total cromática assumindo dependência quadrática de frequência mas, em geral, pode ser uma função arbitrária da frequência, f_{LD} é a frequência central do laser de transmissão/recepção.

Para um grande número de subportadoras, ϵ_{ki} na Equação 26 pode ser aproximado como um ruído Gaussiano [53]. O canal óptico varia de forma relativamente lenta (<10 kHz) e, consequentemente, a função de transferência do canal dentro de vários blocos de símbolos OFDM pode ser considerada constante. Por uma questão de simplicidade, o subscrito 'i' para a função de transferência de canais h pode ser descartado, a fim de mostrar que é invariante dentro de cada OFDM bloco. Assim, supondo um pequeno ruído de fase (Equações 29, 30), a Equação 26 torna-se

$$C'_{ki} = e^{i\phi_i} h_k C_{ki} + \zeta_{ki} \quad (34)$$

onde $\zeta_{ki} = \epsilon_{ki} + n_{ki}$

WDM-OFDM-PON

O diagrama esquemático da Figura 27 mostra um sistema WDM-OFDM-PON proposto em [53]. Uma fonte de múltiplos comprimentos de onda (MWS) gera N ondas contínuas (CWS) com espaçamento de comprimentos de onda idênticos na banda-C. Através de um circulador óptico e uma grade de guia de onda (AWG), os feixes de luz são demultiplexados em comprimento de onda e seguem para as N portas de saída do comutador opto-mecânico $M \times N$.

O comutador opto-mecânico tem baixo consumo de energia e um tempo de comutação típico de vários milissegundos [53].

No outro lado do comutador, M portas são ligadas aos módulos de modulação OFDM por N $f \times 1$ acopladores ópticos com uma relação de $M = N \times f$. Cada acoplador óptico conecta um módulo de modulação OFDM com f portas de comutação. Um parâmetro F é definido como o grau de flexibilidade (DOF) da rede, o que representa o número máximo de comprimentos de onda que um módulo de modulação OFDM pode suportar. O parâmetro F é determinado pelos $f \times 1$ acopladores ópticos e F é igual a f . No modo de operação de economia de energia, k ($k \leq f$) feixes são introduzidos em um módulo de modulação OFDM, ajustando o comutador opto-mecânico, quando a carga de tráfego total dos k canais é inferior a capacidade máxima de transmissão do módulo de modulação OFDM. Por esse caminho, $k - 1$ módulos OFDM de modulação podem ser desligados, e ocorre grande redução de consumo de energia.

No funcionamento do módulo de modulação OFDM, os dados dos k canais de *downlink* são combinados para gerar um sinal OFDM com alocação adaptativa de subportadora. O sinal OFDM

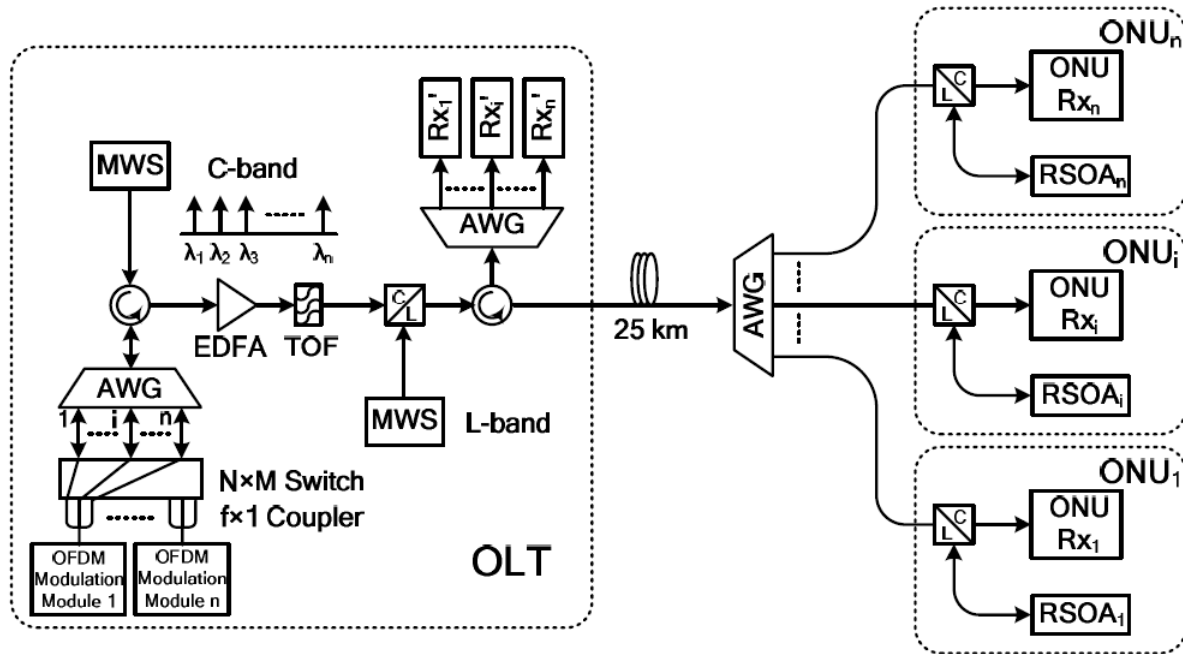


Figura 27: Diagrama esquemático de um sistema WDM-OFDM-PON.

elétrico é então imposto sobre os k feixes de luz e cada comprimento de onda transporta os dados combinados de k unidades de rede ópticas (ONUs). O módulo OFDM reflete os sinais ópticos modulados para o acoplador óptico e comuta para dispositivos refletores tais como amplificadores ópticos a semicondutor (RSOA). Passando pelo AWG e pelo circulator óptico, os sinais ópticos são amplificados por um amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) para compensar as perdas induzidas pelos acopladores ópticos. O filtro óptico sintonizável (TOF) é inserido em seguida para suprimir o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE).

Em seguida, os sinais ópticos são multiplexados na banda total com um conjunto de comprimentos de onda na banda-L distribuindo fontes de luz para a modulação de *uplink*. Depois de 25 km de transmissão de fibra monomodo (SSMF), é utilizado um outro AWG para demultiplexar os sinais ópticos e encaminhá-los para ONUs individuais. No lado da ONU, os sinais ópticos de *downlink* são separados por filtros da banda C/L. Os receptores OFDM (Rxs) implementam a conversão O/E e recuperam os dados necessários para os usuários finais a partir dos sinais ópticos. Além disso, os RSOAs são utilizados para transmitir os sinais de *uplink* recebidos no OLT.

É bem sabido que a carga de tráfego das redes de acesso varia em horas diferentes do dia. Para um WDM-OFDM-PON convencional, todos os módulos de modulação OFDM estarão em execução, independentemente da condição de tráfego atual. Isso resulta num consumo de energia elevado e baixa eficiência energética.

Em [53], módulos de modulação OFDM sub-utilizados podem ser desligados enquanto seus tráfegos são reencaminhados para outros módulos de modulação OFDM pela reconfiguração do comutador $M \times N$ opto-mecânico nos períodos de baixa carga. Conforme o tráfego em tempo real carrega ONUs diferentes, uma estratégia ideal pode ser alcançada para se usar o número mínimo de módulos de modulação OFDM para entregar os dados de todas as ONUs. Por outro lado, o custo adicional de energia devido à reconfiguração é desprezível, devido ao baixo consumo de energia do comutador opto-mecânico.

4.2. Aplicação da modulação OFDM em comunicações ópticas

5 Simulação de redes ópticas

Neste capítulo será apresentada a simulação de redes ópticas realizada com o apoio de *software* específico para este propósito. Serão apresentados também os resultados obtidos e discussão dessa simulação.

5.1 Ferramentas para simulação de sistemas ópticos

Para a avaliação de desempenho dos Sistemas Ópticos é comum utilizar-se de ferramentas de Projeto Assistido por Computador (CAD, do inglês *Computer-Aided Design*), mais especificamente ferramentas de Automação de Projeto Fotônico (PDA).

Esses *softwares* permitem projetar novos sistemas fotônicos, incluindo os sistemas de transmissão óptica de curto alcance, de acesso e de longo alcance, já que simulam os efeitos típicos dos canais ópticos. Pode-se avaliar a influência dos efeitos como a dispersão cromática e efeitos não-lineares nos parâmetros de avaliação de desempenho de sistemas como a BER (*Bit Error Rate*), PMD (*Polarization Mode Dispersion* – Dispersão do Modo de Polarização) e a OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio* – Relação Sinal-Ruído Óptica) [54, 55].

Além disso, com essas ferramentas é possível desenvolver estratégias para atualização da tecnologia e substituição de componentes para as plantas de redes existentes. Pode-se investigar e otimizar as tecnologias utilizadas nos sistemas como, por exemplo, codificação, modulação, compensação, monitoramento e regeneração [56].

E também, pode ser feita a modelagem de qualquer sistema de transmissão, incluindo *links* bidirecionais, em anel e redes *mesh*, possuindo uma gama de componentes fotônicos e eletrônicos na biblioteca [57].

5.1.1 Método de análise numérica

Por meio da simulação numérica é possível estimar a acumulação dos efeitos não-lineares e diversas outras fontes de ruído, que frequentemente causam deformações no fluxo de bits transmitidos e limitam o alcance dos sistemas reais. Dessa forma, é possível otimizar todo o sistema e obter os valores ótimos de vários parâmetros requeridos nesses projetos, com um custo relativamente baixo.

A abordagem mais prática para a avaliação dos projetos de sistemas ópticos modernos consiste em resolver a Equação Não-linear de Schrödinger (NLS) (Equação 35) [12], já que a solução analítica dessa equação é, na maioria das vezes, inviável.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{2}A + i\gamma|A|^2 A \quad (35)$$

onde α é a atenuação da fibra, γ é o parâmetro não-linear, β_2 é a dispersão de segunda ordem e $A(z,t)$ é a amplitude de variação lenta (*slow varying amplitude*) do sinal.

Dentre os métodos de solução numérica, existem duas grandes categorias: método das diferenças finitas e métodos pseudoespectrais. E entre os métodos pseudoespectrais, destaca-se o método SSFM (*Split-Step Fourier Method*) para resolver a equação da propagação do pulso em meios não-lineares com dispersão. O SSFM é de resolução mais rápida, comparado aos métodos das diferenças finitas, pois ele utiliza algoritmos FFT [58].

5.1.2 Software OptiSystem

A simulação dos sistemas ópticos foi realizada por meio do *software* OptiSystem, que resolve a equação de propagação de ondas na forma genérica pelo método numérico SSFM (*Split-Step Fourier Method*). A Figura 28 apresenta o ambiente de desenvolvimento desse *software*.

Para a interligação dos componentes utilizados nos projetos, o OptiSystem padroniza um esquema de cores para a representação de sinais. Essa padronização é descrita na Tabela 4 conforme o tipo de sinal e sua cor correspondente.

Tabela 4: Esquema de cores para a representação dos diferentes tipos de sinais no OptiSystem

Sinal	Cor da conexão
Binário	Vermelho
M-ário	Vermelho Escuro
Elétrico	Azul
Óptico	Verde
Misto (qualquer tipo)	Verde Escuro

Nesse *software* existem diversas ferramentas para a análise do sistema projetado. As ferramentas mais utilizadas neste trabalho foram o diagrama de olho, BER (que está diretamente relacionado com o fator Q), Analisador de Espectro Óptico (OSA, do inglês *Optical Spectrum Analyzer*), Medidor de potência (*Power metter*), Osciloscópio e Visualizadores de diagramas de constelação.

Ele também define alguns parâmetros comuns a todas as simulações (incluindo as simulações que aqui serão apresentadas) [59]. Genericamente tem-se:

- Taxa de transmissão de bit (*Bit rate*)
- Tamanho da sequência de bits (*Sequence length*)
- Número de amostras por bit (*Samples per bit*)

Esses parâmetros são usados para calcular a janela de tempo (*time window*), taxa de amostragem (*sample rate*), e o número de amostras (*number of samples*), de acordo com as seguintes expressões:

- $Time\ window = Sequence\ length / Bit\ rate$
- $Number\ of\ samples = Sequence\ length \cdot Samples\ per\ bit$
- $Sample\ rate = Number\ of\ samples / Time\ window$

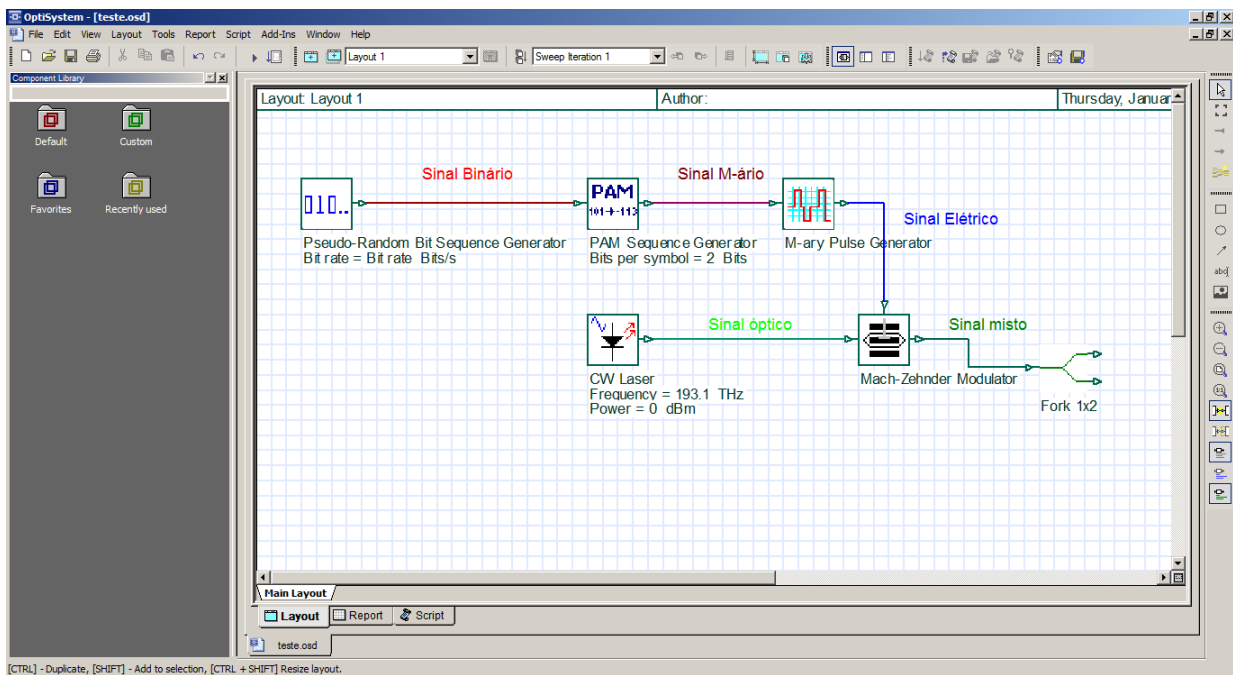


Figura 28: Ambiente de programação do *software* OptiSystem.

5.2 Simulação dos sistemas PON e OFDM óptico

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos dos sistemas simulados no *software* OptiSystem. Foram escolhidos alguns sistemas disponíveis no site da Optiwave [60], que implementam a modulação OFDM óptica e também redes PON.

A seguir são descritos mais detalhadamente cada um desses sistemas, sendo eles:

- Sistema OFDM óptico de detecção direta

- Sistema OFDM óptico de detecção coerente
- Sistema OFDM óptico de detecção coerente com dupla polarização
- Sistema GPON
- Sistema WDM-PON
- Sistema XG-PON

5.2.1 Sistema OFDM óptico de detecção direta

Na Figura 29 é apresentado o modelo de simulação do Optisystem para OFDM óptico com detecção direta (ou, não coerente). Da esquerda para a direita, tem-se um gerador pseudo-aleatório binário operando com uma taxa de 10 Gbit/s. Esse sinal será duplicado, sendo que 1ª parte dele irá ser modulada e processado em outros blocos do transmissor e a outra parte será usada como referência para o cálculo da BER.

Neste sistema, os dados são mapeados em 4-QAM (*Quadrature-Amplitude Modulation*) por um modulador (bloco *QAM Sequence Generator*) que divide o sinal em fase (I, *In-phase*) e quadratura (Q, *Quadrature*). Estes sinais seguem para um subsistema (Bloco *subsystem*), que, por sua vez, duplica o sinal e parte dele é convertido de binário para elétrico (para uma visualização da constelação, Figura 31(a)), a outra parte segue ao modulador OFDM. Após o último bloco, o sinal já é convertido para o domínio elétrico.

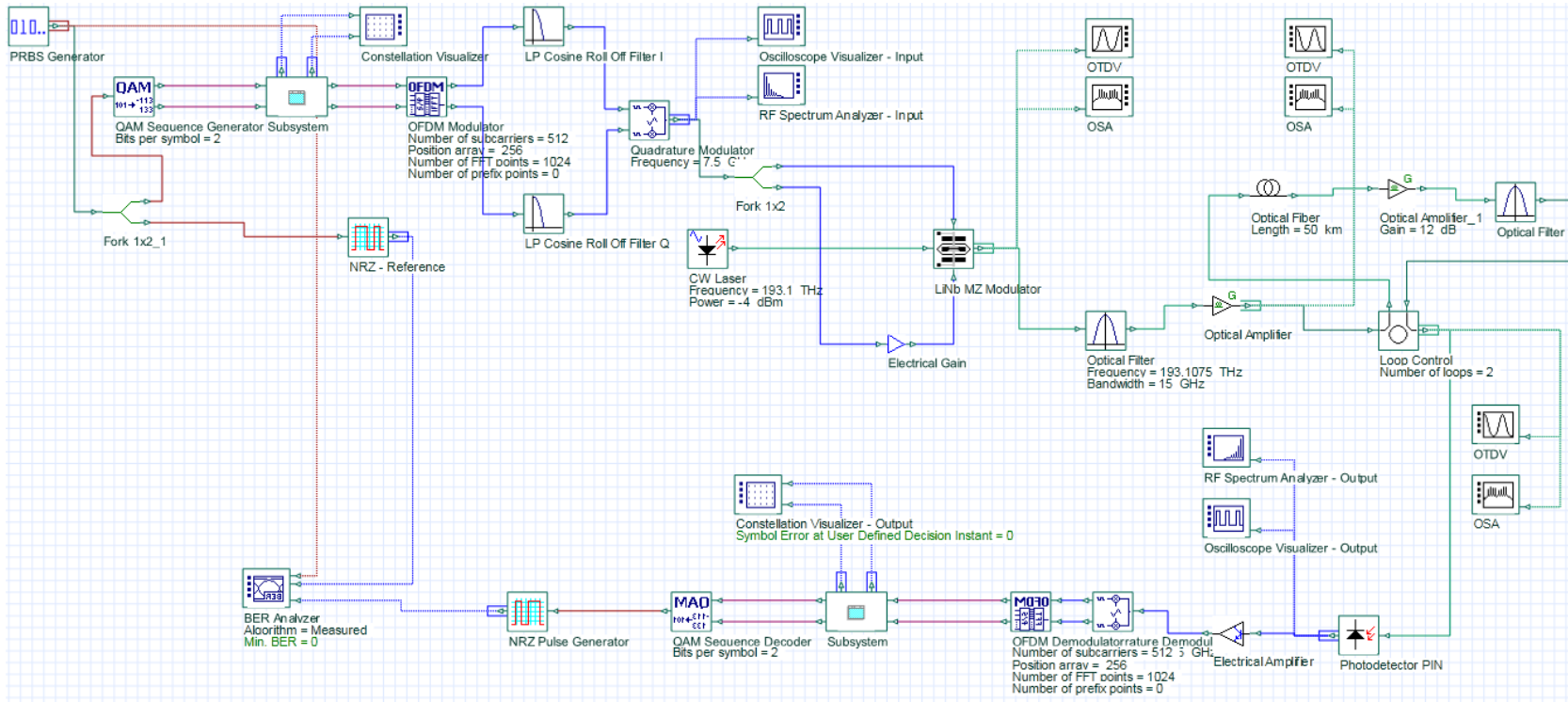


Figura 29: Sistema DDO-OFDM simulado.

5.2. Simulação dos sistemas PON e OFDM óptico

A fim de se limitar a banda ocupada pelo sinal a ser transmitido, filtros passa-baixa (*Cosine roll off filter*) atuam nos sinais I e Q, antes do modulador de quadratura, que eleva a frequência central do sinal para 7,5 GHz.

Ainda no transmissor, um duplicador (*fork*) permite alimentar o modulador eletro-óptico LN (*Lithium Niobate Mach-Zehnder*, que possui duas entradas elétricas, uma entrada e uma saída óptica. Em uma das entradas elétricas injeta-se diretamente o sinal e na outra, injeta-se o sinal invertido. Para a entrada óptica, é utilizado um laser com regime de operação contínuo (CW, do inglês *Continuous Wave*) com potência de -4 dBm e frequência de 193,1 THz ou, aproximadamente, 1552 nm.

Após a saída do modulador *Mach-Zehnder* (LN-MZM) tem-se um filtro óptico passa-banda com largura de 15 GHz, recuperando apenas um dos lados desse sinal e eliminando a simetria. As Figuras 30(a) e 30(b) mostram os sinais amplificados antes e após o filtro em função da frequência, obtidas pelo OSA.

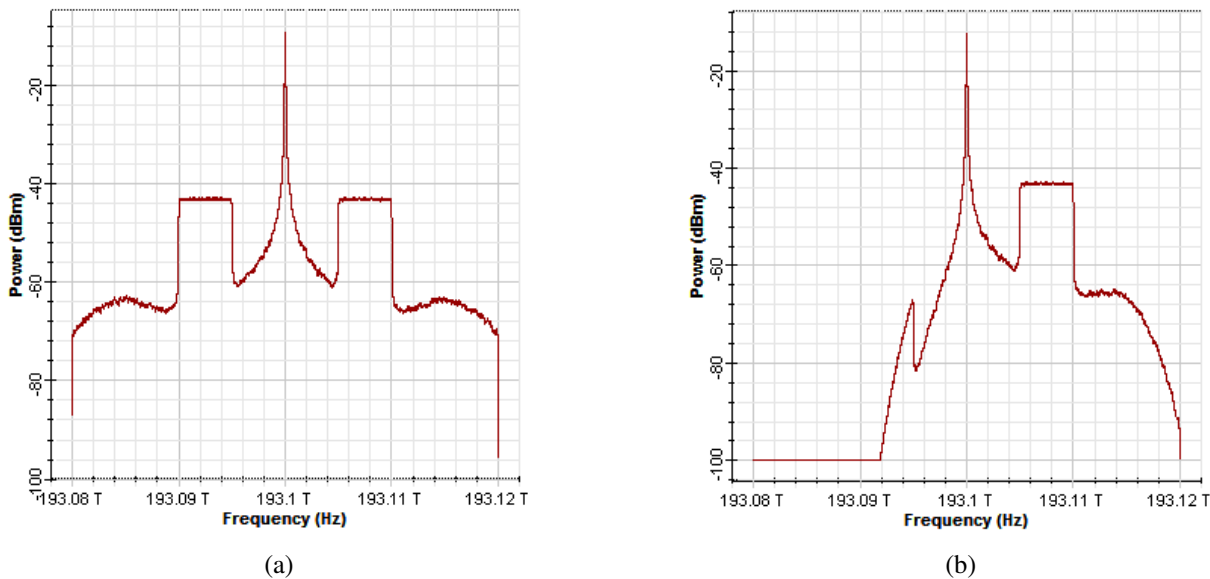


Figura 30: Sinal OFDM óptico: (a) Antes da filtragem; (b) Após a filtragem.

Em seguida, o sinal passa por um amplificador óptico de 13 dB de ganho com figura de ruído de 4 dB. Em seguida, o sinal é submetido a um meio de transmissão por meio de um link com dois *loops*, cada *loop* composto por 50 km de fibra óptica S-SMF, seguido por um amplificador óptico passa-banda de 12 dB de ganho, e por um filtro óptico passa-banda com as mesmas características do filtro antes da transmissão.

Vale ressaltar que essa fibra óptica S-SMF (*Standard Single-Mode Fiber*) é monomodo e possui atenuação de 0,2 dB/km, dispersão de 16,75 ps/nm/km e inclinação de dispersão (*dispersion*

slope) de $0,075 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$. Esses dados estão padronizados pela norma ITU G.652 [61]. Todas os enlaces simulados aqui neste trabalho utilizarão esse tipo de fibra.

No receptor, inicialmente, o sinal no domínio óptico é convertido para o domínio elétrico por um fotodetector PIN, com responsividade de 1 A/W , e amplificado com um ganho de 16 dB . Em seguida, aparecem então os blocos que buscam reverter os processamentos realizados no transmissor, sendo eles o *down-converter*, demodulador OFDM e decodificador QAM. Após o bloco demodulador OFDM, pode ser visualizado o diagrama de constelação do sinal (conforme a Figura 31(b)).

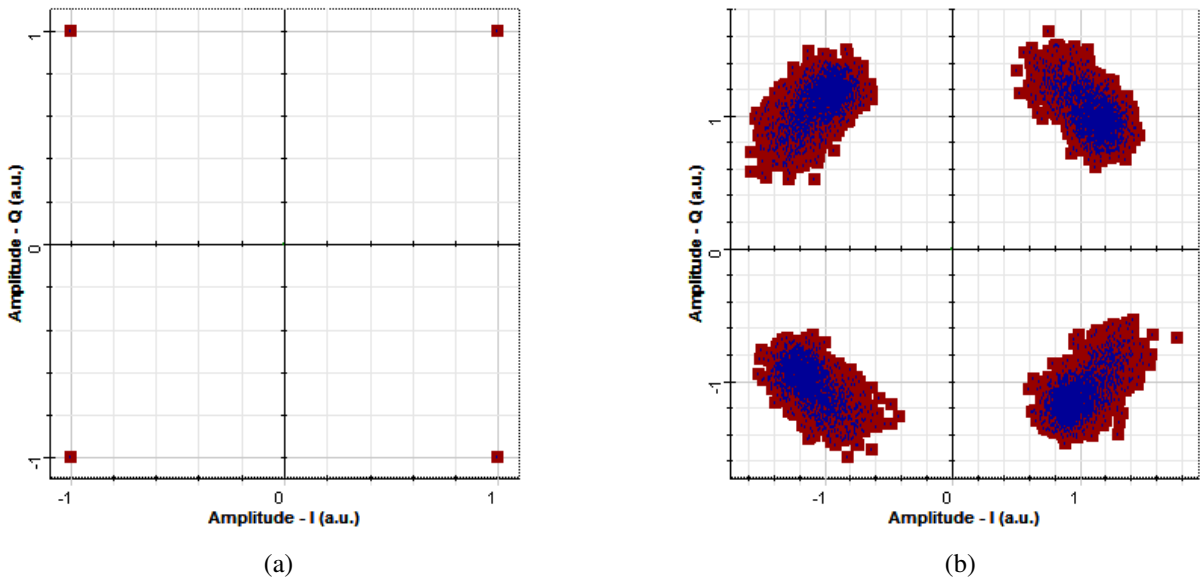


Figura 31: Diagrama de constelação do sistema DDO-OFDM com mapeamento dos dados em 4-QAM: (a) No transmissor; (b) No receptor.

Vale destacar que o diagrama de constelação ilustra simultaneamente as coordenadas em Fase (I) e Quadratura (Q) dos pontos que representam todos os símbolos possíveis de uma modulação em quadratura, sendo uma ferramenta útil para a representação da modulação digital.

Com ele também é possível avaliar a magnitude dos efeitos das interferências. São exemplos de ruídos que interferem nos pontos de constelação, o ruído branco gaussiano que alarga o ponto da constelação, o *jitter* de fase que faz com que o diagrama oscile rotacionalmente ao redor do ponto central do diagrama, entre outros efeitos. A modulação 4-QAM é um tipo de modulação digital que cada ponto na constelação equivale a um símbolo, no caso, com 2 bits de informação [62].

O comportamento do sinal recebido, no domínio da frequência, com a presença de ruído, pode ser observado na Figura 32. Com relação a BER, o valor obtido foi muito próximo de zero e por consequência resultando em um fator Q tendendo para infinito.

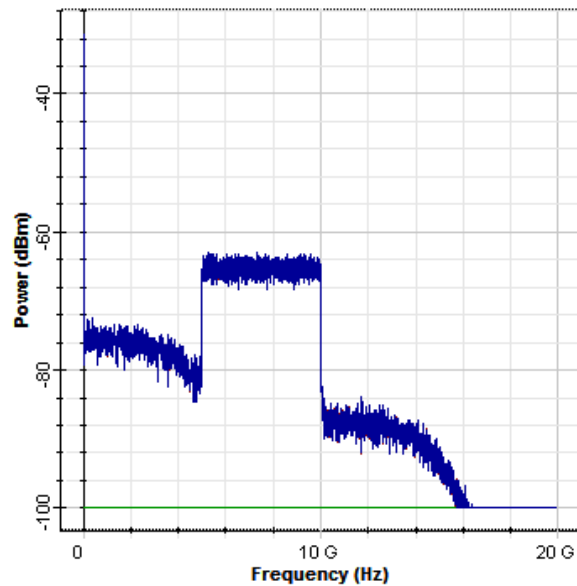


Figura 32: Comportamento do sinal recebido em banda base.

5.2.2 Sistema OFDM óptico de detecção coerente

Na Figura 33 é apresentado sistema OFDM óptico com detecção coerente simulado. Da mesma forma que no modelo anterior, tem-se um gerador pseudoaleatório binário com uma taxa de 10 Gbit/s. Da esquerda para a direita, tem-se os mesmos blocos de modulação QAM, OFDM e filtro passa-baixas. A partir desse ponto, utiliza-se dois moduladores LN *Mach-Zehnder*, que trabalham independentemente com os sinais I e Q, a fim de convertê-los ao domínio óptico. Em seguida, esses sinais são combinados por meio de um *power combiner*, passando pelo amplificador óptico (de ganho 13 dB e figura de ruído de 4 dB). Esse sinal é submetido ao mesmo enlace de 100 km do modelo anterior.

Para a recuperação do sinal, utiliza-se um oscilador local com a mesma frequência do laser usado no transmissor. Um subsistema é utilizado para separar os sinais I e Q, convertendo cada um desses sinais por meio dos fotodetectores PIN. Para recuperar o sinal I, utiliza-se como referência o sinal do oscilador defasado de 90° . Para o sinal Q, o próprio sinal do oscilador é utilizado como referência. Em seguida, os sinais elétricos são amplificados (em 20 dB) e passa por todos os outros blocos de recepção, demodulador OFDM e decodificador QAM.

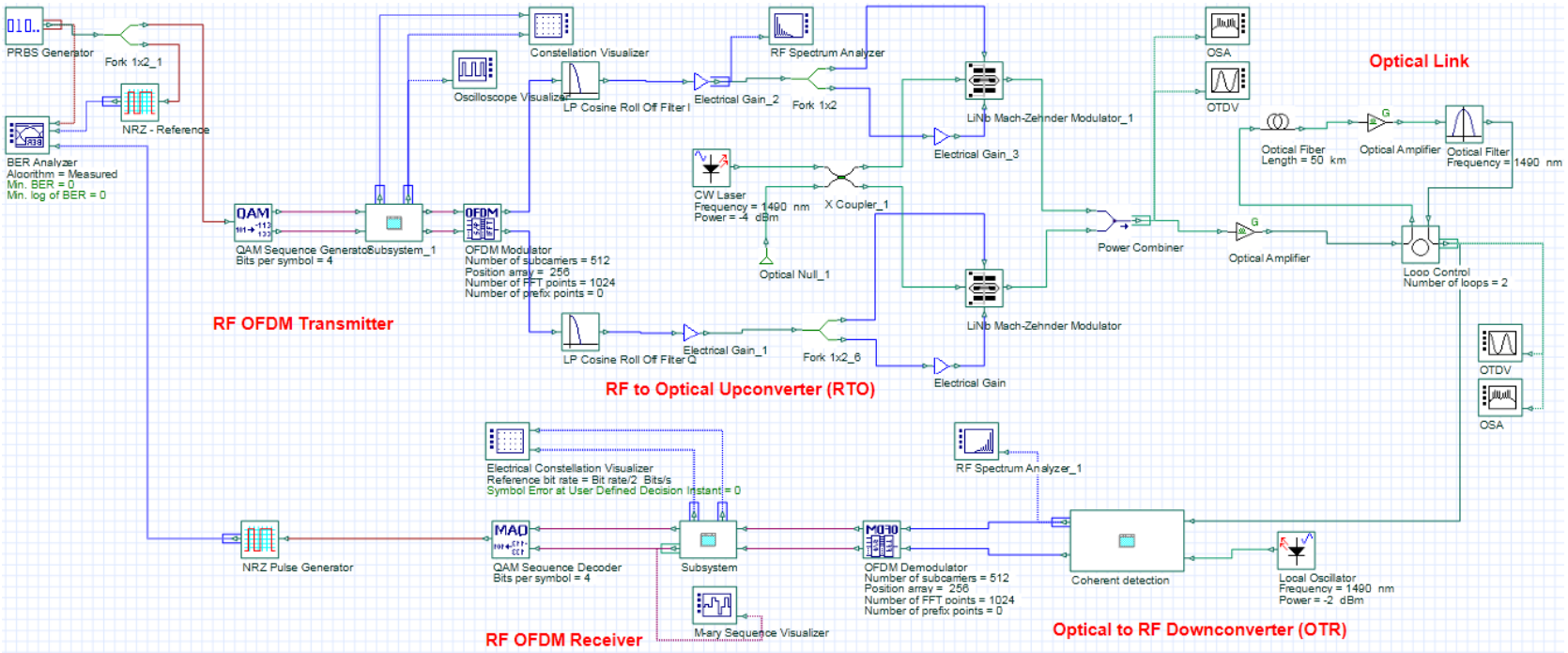


Figura 33: Sistema CO-OFDM simulado.

A Figura 34 mostra o sinal OFDM em banda-base antes e após a transmissão.

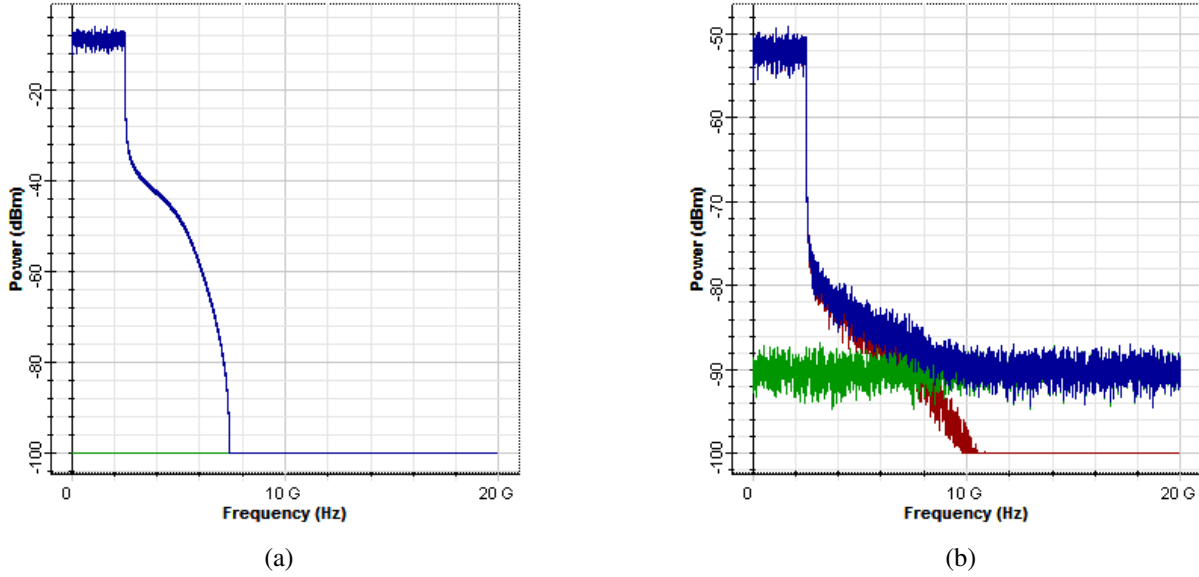


Figura 34: Sinal OFDM em banda-base: (a) No transmissor; (b) No receptor.

As Figuras 35(a) e 35(b) mostra a constelação antes e após a transmissão. Assim como no caso anterior (Sistema DDO-OFDM), a BER foi muito próxima de zero e um fator Q tendendo para infinito.

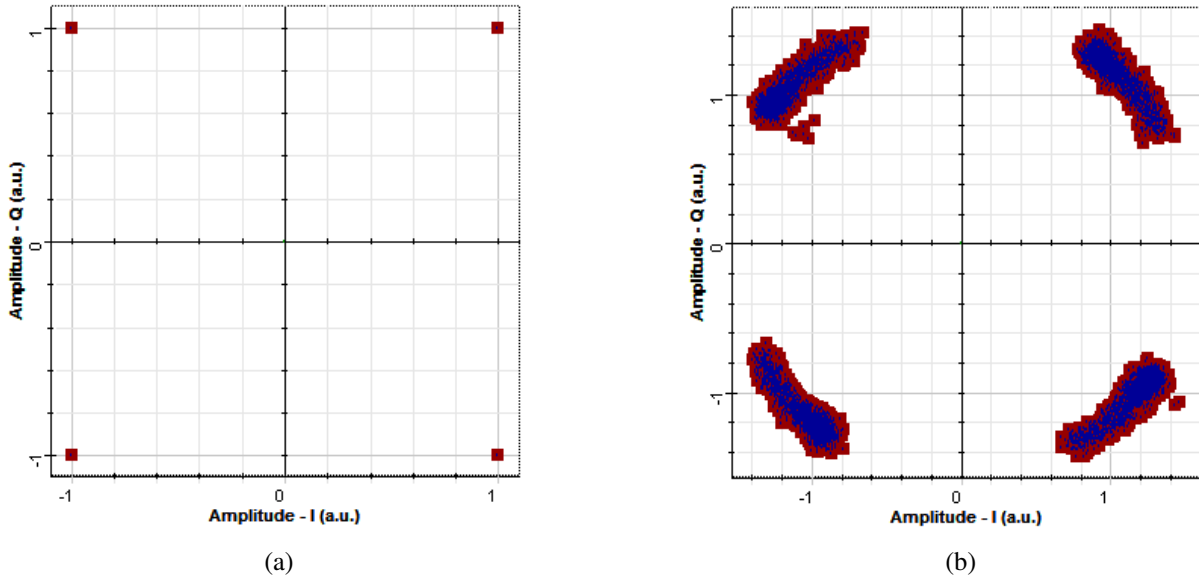


Figura 35: Diagrama de constelação do sistema CO-OFDM com mapeamento dos dados em 4-QAM: (a) No transmissor; (b) No receptor.

5.2.3 Sistema OFDM óptico de detecção coerente com dupla polarização

A Figura 36 mostra a simulação de sistema OFDM óptico 100 Gbit/s com detecção coerente. Na parte de transmissão dos dados, há 2 blocos geradores de dados pseudo aleatórios, como uma taxa de 50 Gbit/s cada.

A etapa seguinte é a de modulação. Dentro dos subsistemas OFDM X e Y são gerados pulsos QAM, a partir da sequência de dados binários, que servem de entrada para o modulador OFDM. Esse modulador, por sua vez, possui uma saída I e outra Q no domínio elétrico.

Para a conversão do sinal no domínio óptico, é utilizado um modulador *Mach-Zehnder* (MZM) para cada uma das saídas anteriores. Posteriormente, o sinal óptico é condensado em um combinador de potência.

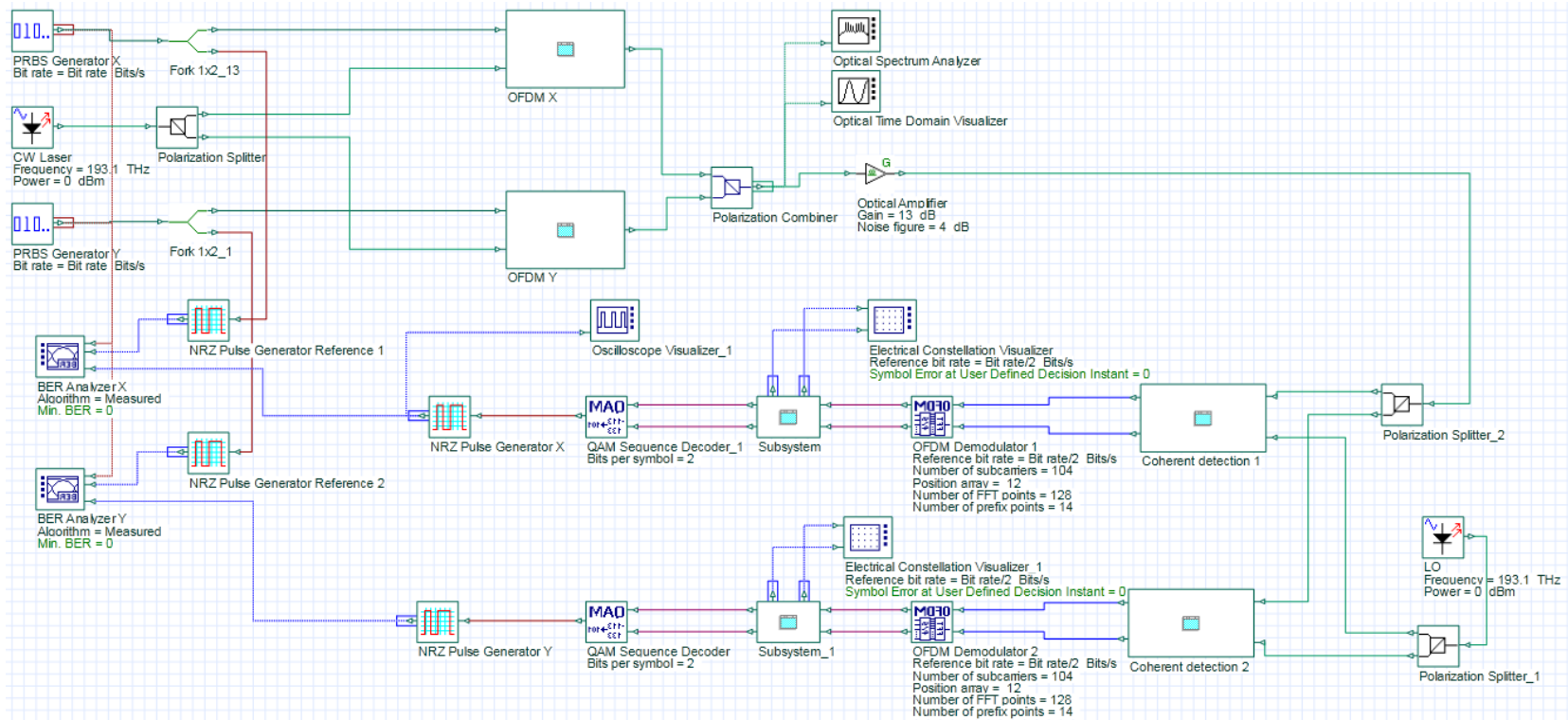


Figura 36: Sistema OFDM óptico 100 Gbit/s com detecção coerente de dupla polarização simulado.

Cada subsistema (OFDM X e Y) utiliza nesse caso um modo de polarização (*Polarization Splitter/Polarization Combiner*), tal que a saída deles é combinada, resultando em um link com 100 Gbit/s, ou seja, 50 Gbit/s em cada modo de polarização (Figura 37).

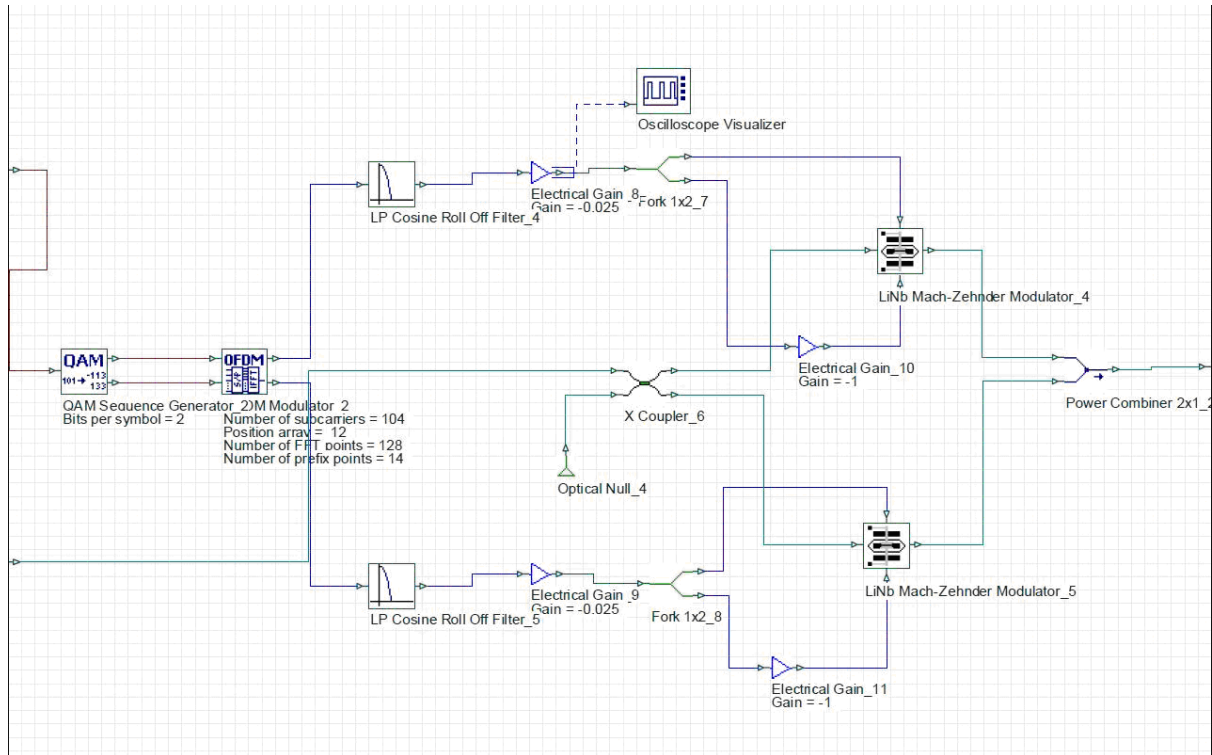


Figura 37: Subsistema OFDM X.

Na saída do combinador de polarização existe um OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) e um OTDV (*Optical Time Domain Visualizer*). As Figuras 38 e 39 ilustram cada uma desses visualizadores.

Na parte de recepção, separa-se o sinal óptico recebido em 2 modos de polarização. Há também um laser atuando como Oscilador Local (LO), por se tratar de uma comunicação com detecção coerente.

Há um subsistema responsável pela recuperação da parte I e Q de cada um dos modos de polarização para o domínio elétrico. Em seguida, realiza-se a demodulação do sinal OFDM.

Após essa etapa, cada uma das quatro saídas dos modems OFDM passa por um subsistema que converte o sinal QAM recebido (sinal M-ário) em um sinal elétrico para gerar o diagrama de constelação do sinal recebido.

As Figuras 40(a) e 40(b) ilustram o diagrama de constelação do sinal recebido para cada um dos modos de polarização transmitidos. Observa-se em azul a constelação com ação apenas da distorção natural da fibra, e em vermelho o efeito combinado da distorção natural com ruído adicionado.

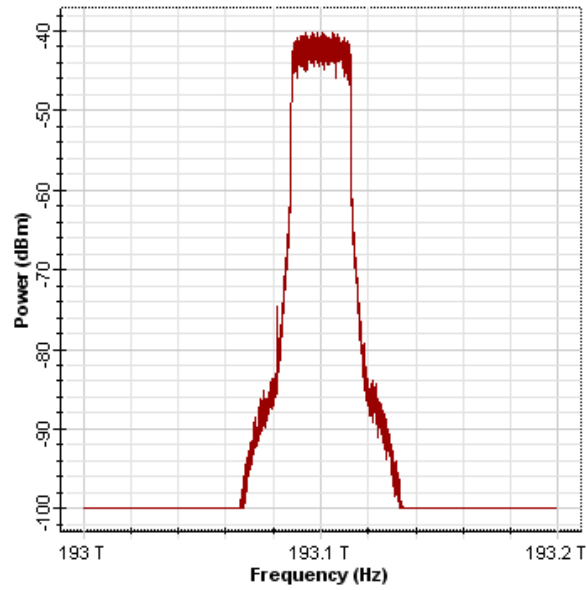


Figura 38: Analisador de Espectro Óptico.

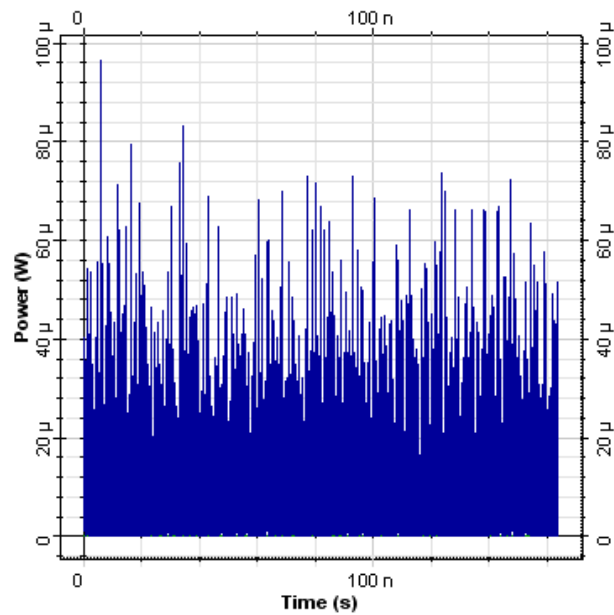


Figura 39: Visualizador de sinal óptico no domínio do tempo.

Por fim, um decodificador de sequência QAM converte os sinais I e Q em pulsos NRZ para a medição da BER.

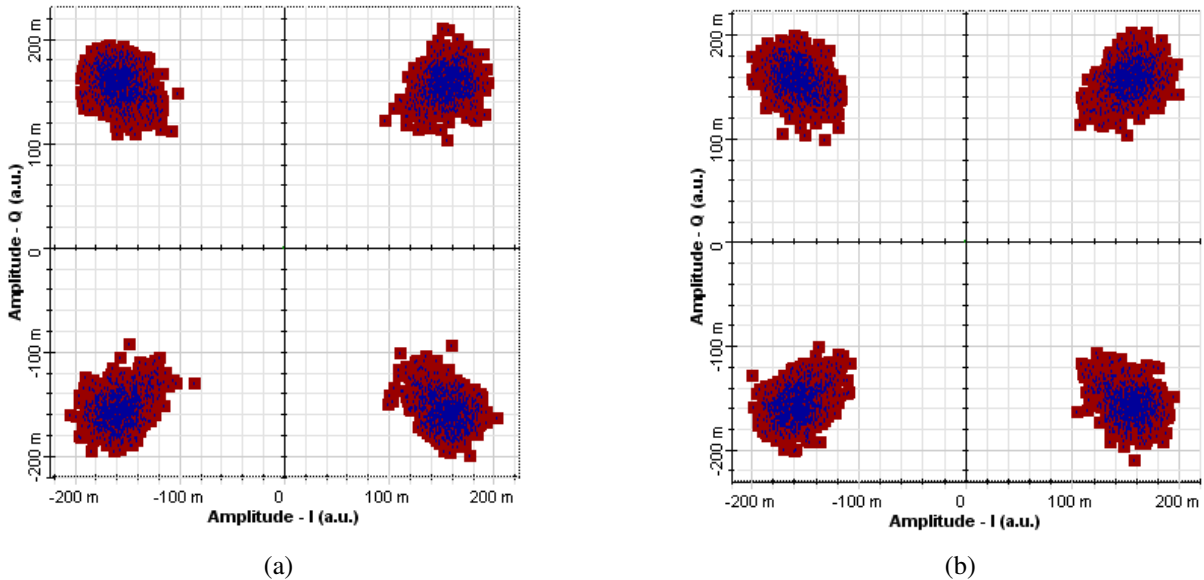


Figura 40: Diagrama de constelação do sistema CO-OFDM com dupla polarização e mapeamento dos dados em 4-QAM recebidos: (a) Em X; (b) Em Y.

5.2.4 Sistema GPON

Na Figura 41 é apresentado um modelo de simulação para o padrão GPON. Essa rede, conforme descrito no Capítulo 3, tem como característica principal o uso exclusivo de elementos passivos na rede.

Para geração do sinal a ser transmitido, é utilizado um bloco transmissor óptico da OLT, que utiliza comprimento de onda de 1490 nm (conforme norma GPON G.984.2 [63]), potência de 3 dBm, taxa de transmissão de 2,5 Gbit/s e modulação NRZ. O sinal gerado é então multiplexado com sinais de dois lasers de bombeio de 1239 nm (para *downstream*) e 1427 nm (para *upstream*), para permitir a amplificação Raman. O sinal combinado percorre então um enlace de 60 km para, no receptor, ser filtrado por um filtro Butterworth passabanda de 5 nm de largura de banda e 2 dB de perda de inserção.

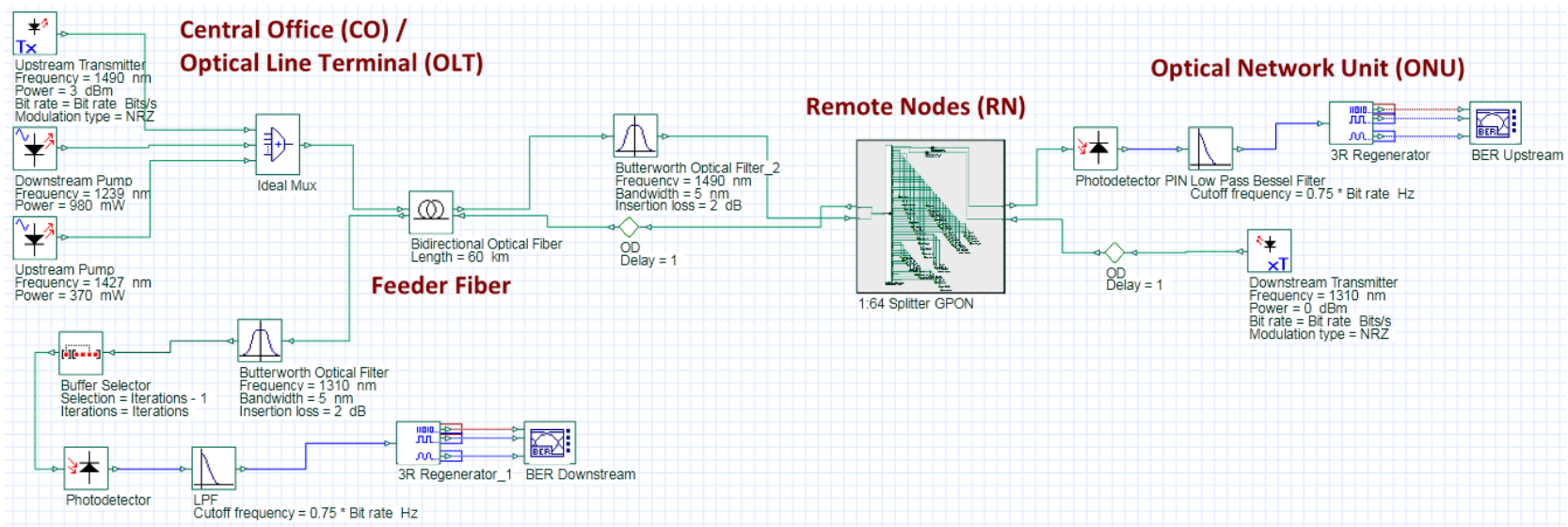


Figura 41: Sistema GPON simulado.

Do lado da ONT utiliza-se um transmissor óptico trabalhando com comprimento de onda de 1310 nm, potência de 0 dBm, da mesma forma taxa de 2,5 Gbit/s e modulação NRZ.

Para recuperar o sinal, na OLT e ONT utiliza-se fotodetectores PIN e regenerador 3R (Re-amplifica, Reformata e Ressincroniza). Usando esse bloco, não são necessárias conexões entre o transmissor e o medidor de BER. Isso é especialmente importante para sistemas WDM, onde se tem múltiplos transmissores, receptores e analisadores de BER. Esse bloco regenera, ressincroniza e filtra o sinal.

As Figuras 42(a) e 42(b) mostram os diagramas de olho para *downstream* e *upstream* respectivamente.

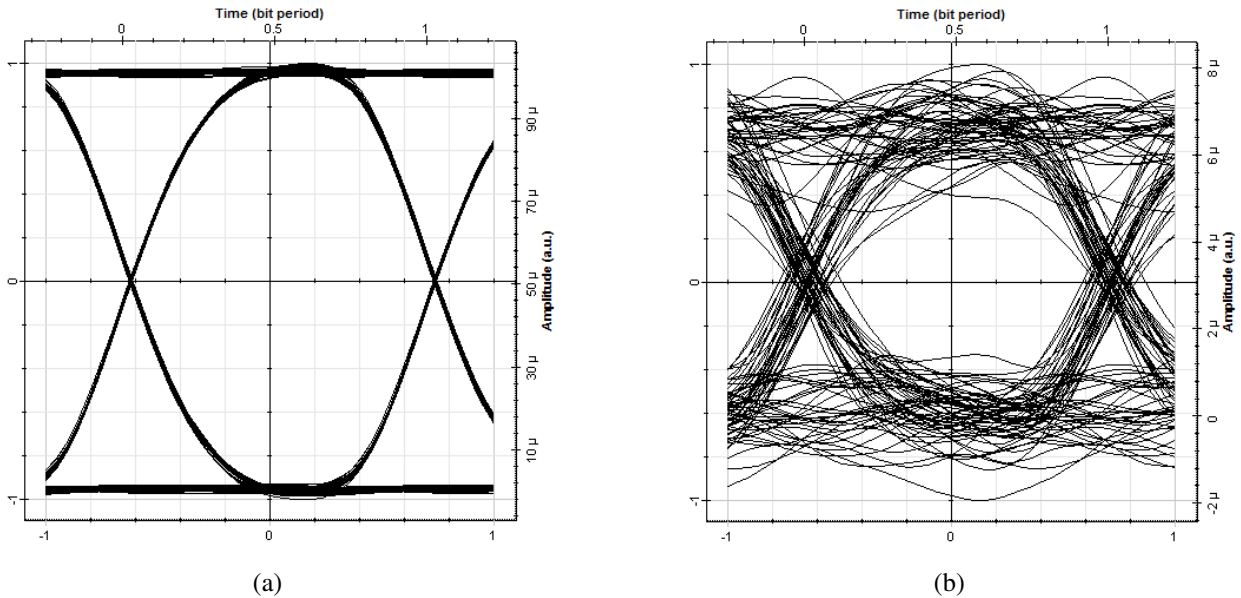


Figura 42: Diagrama de olho da simulação do GPON em: (a) *Downstream*; (b) *Upstream*.

5.2.5 Sistema WDM-PON

Na Figura 14 é apresentado o modelo de simulação para OFDM óptico com detecção coerente e multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). A análise do comportamento dessa simulação é importante para avaliar a capacidade dos enlaces utilizando diversos canais caso as novas gerações PON utilizem OFDM, conforme proposto neste trabalho.

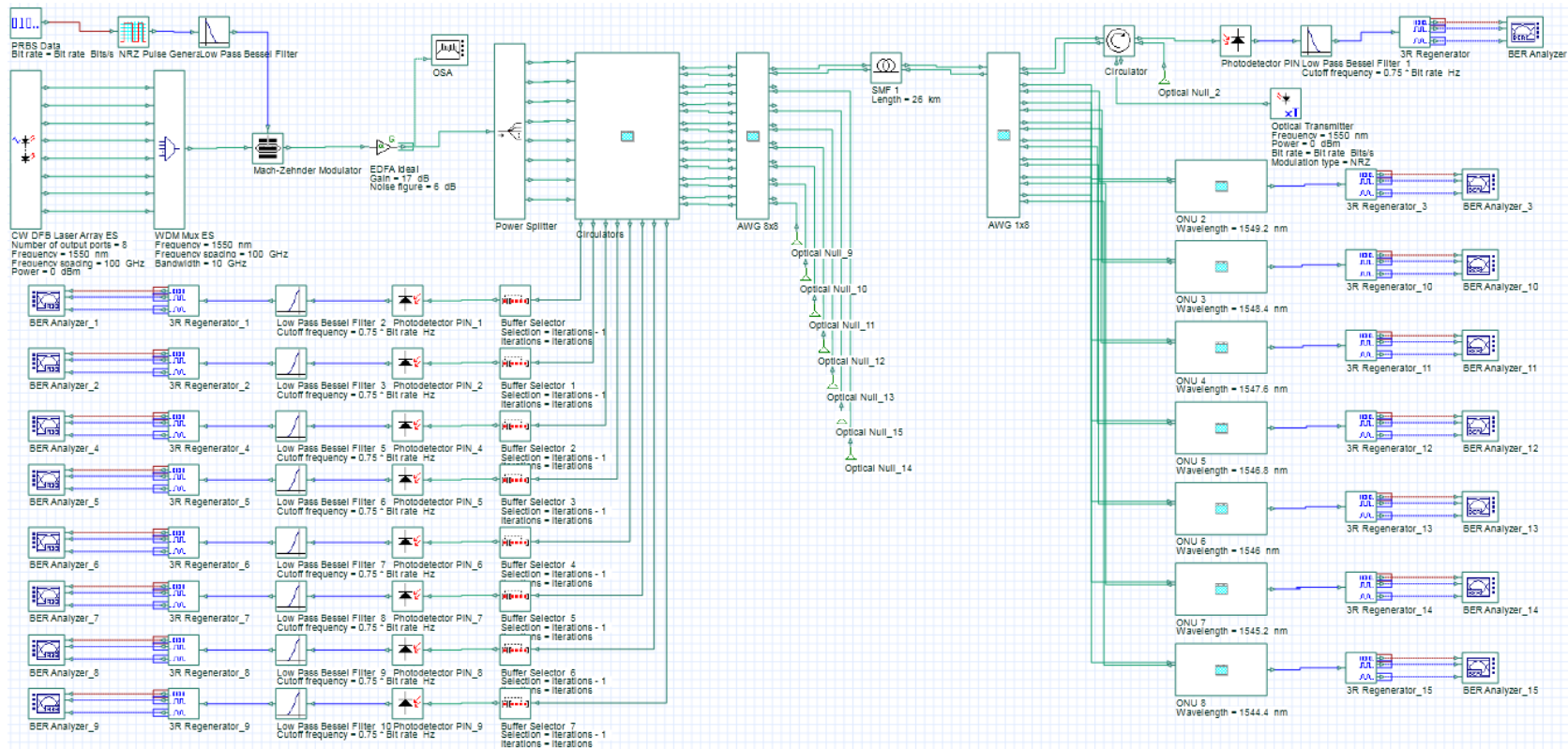


Figura 43: Sistema WDM-PON simulado.

Nesse caso, tem-se quatro geradores pseudo-aleatórios binários com taxa de transmissão de 10 Gbit/s cada. Para cada um dos sinais aleatórios gerados, tem-se os blocos de modulação QAM, OFDM e filtro cosseno-levantado. A partir desse ponto, as portadoras ópticas a serem moduladas pelos LN-MZM são lasers com frequências de onda diferentes, espaçadas de 50 GHz. A Figura 44 ilustra o comportamento dos sinais antes da transmissão, onde se pode observar esse espaçamento de 50 GHz entre as frequências centrais dos sinais e uma largura de 10 GHz ocupada por cada canal.

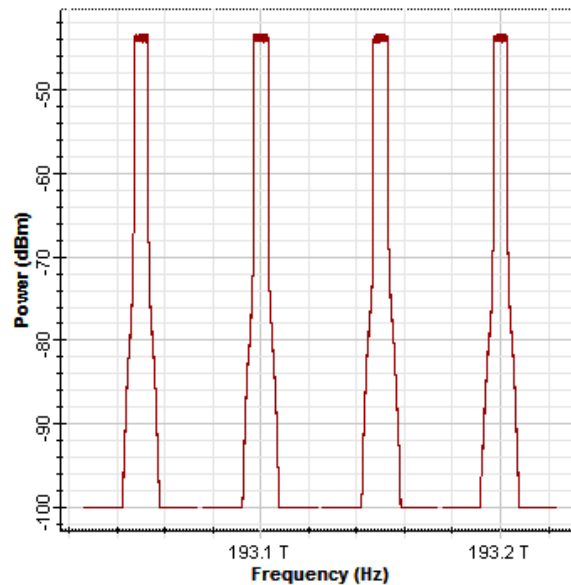


Figura 44: Comportamento do sinal recebido em banda base.

Em seguida, esses sinais são multiplexados em uma única fibra e amplificados (em amplificadores ópticos com ganho 13 dB e figura de ruído de 4 dB). Esse sinal passa por um enlace de 60 km de fibra S-SMF.

Após amplificação, os sinais são convertidos e demultiplexados, conforme procedimento descrito na subseção 5.2.2. As constelações recuperadas de dois sinais são mostradas nas Figuras 45(a) e (b), a fim de se validar a simulação proposta.

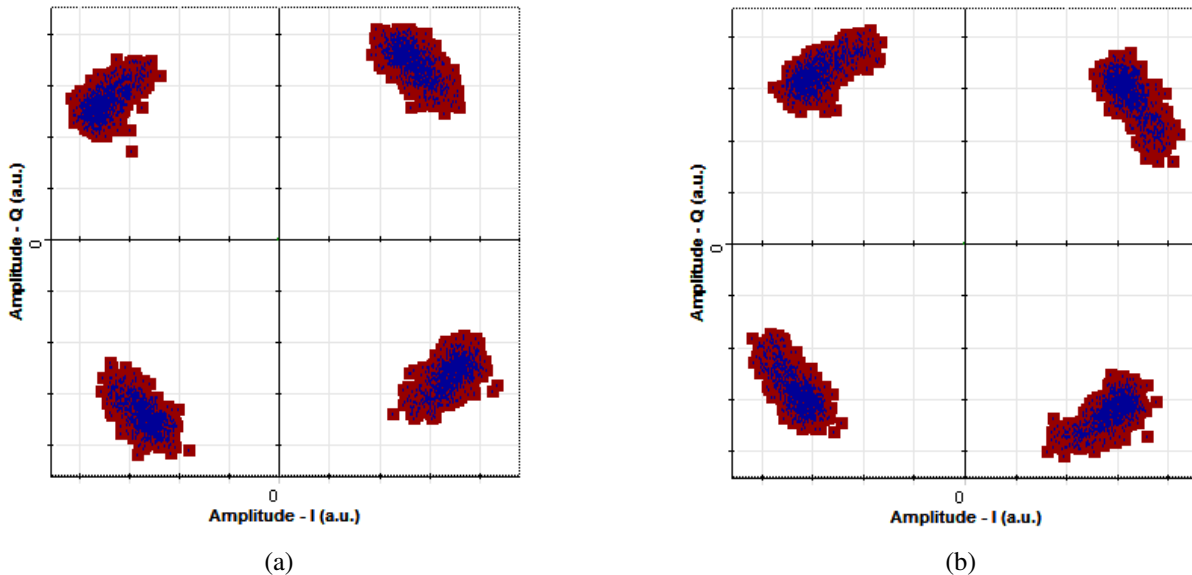


Figura 45: Diagrama de constelação do sistema WDM-OFDM: (a) Do canal 1; (b) Do canal 2.

5.2.6 Sistema XG-PON

Na Figura 46 é apresentado um modelo de simulação que segue os padrões GPON e o padrão XGPON1, que é a primeira evolução do padrão GPON, conforme detalhado no Capítulo 3 (na Seção 3.3.5). Entre as diferenças em relação ao GPON, o XGPON1 possui maior taxa de transmissão (10 Gbit/s de *downstream* de 2,5 Gbit/s de *upstream*) e uso de valores de comprimento de onda maiores (para permitir a coexistência das tecnologias).

Da esquerda para a direita, observando a Figura 46, tem-se dois blocos de transmissores ópticos da OLT. Um dos transmissores opera com comprimento de onda de 1490 nm (conforme norma ITU-T G.984.2 para GPON) e o outro opera em 1577 nm (conforme norma ITU-T G.987.1 para XG-PON), ambos com modulação NRZ. Os sinais provenientes destes transmissores, em seguida, passam por um isolador óptico, para que não ocorra retorno de potência do amplificador, seguido de um Amplificador Óptico a Semicondutor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*). Os lasers de bombeio utilizados para amplificação Raman possuem comprimentos de 1240 nm para o GPON (potência de 520 mW) e 1206 nm para o XGPON (com potência de 850 mW).

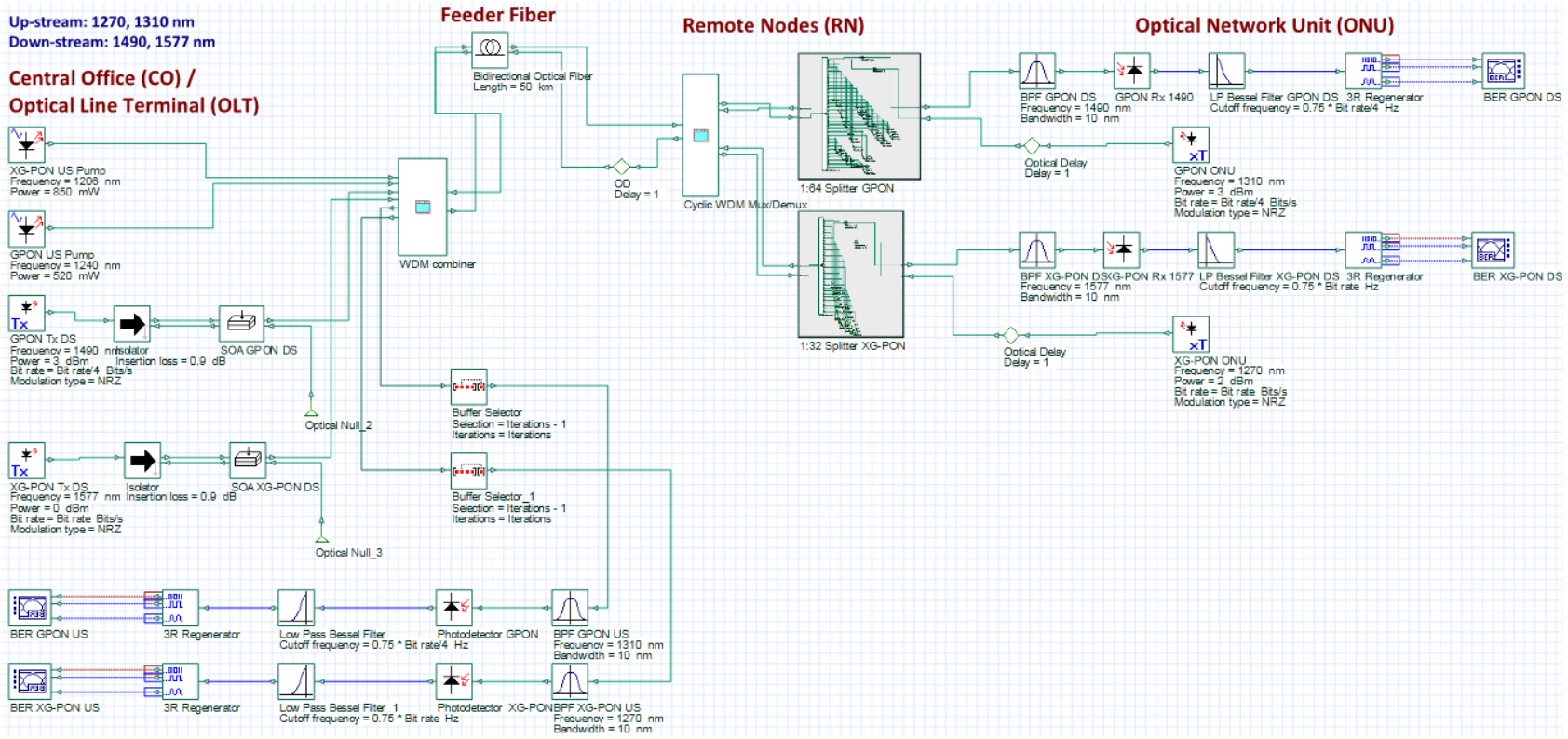


Figura 46: Sistema XG-PON simulado.

5.2. Simulação dos sistemas PON e OFDM óptico

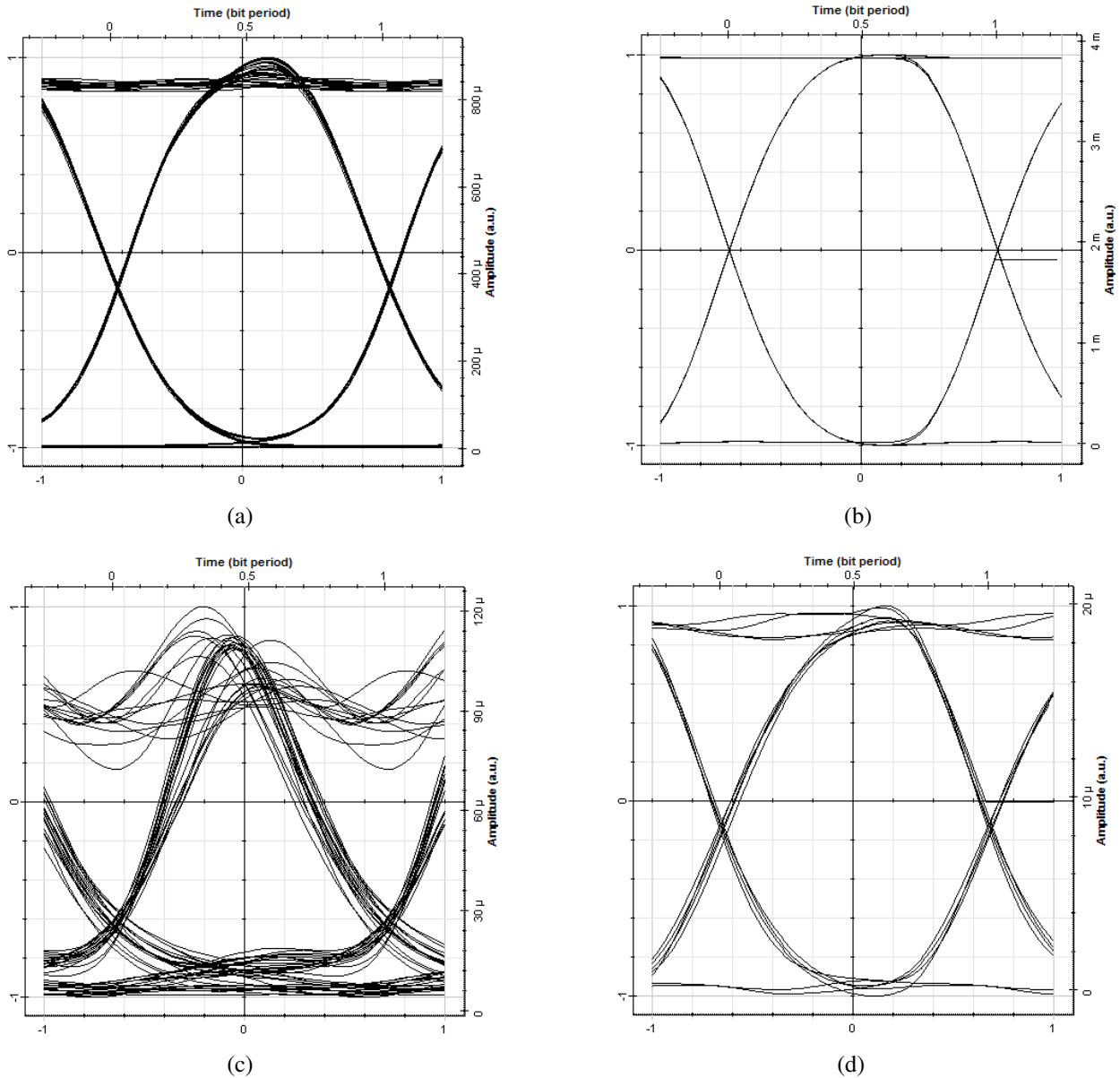


Figura 47: Diagrama de olho do sistema simulado: (a) *Upstream* do XG-PON; (b) *Upstream* do GPON; (c) *Downstream* do XG-PON e (d) *Downstream* do GPON.

Após um link de 50 km, os sinais passam por divisores ópticos e, na ONT, utiliza-se fotodetec-
tores APD (que é mais eficiente que um fotodetector PIN) e regeneradores 3R, da mesma forma
que na simulação anterior.

Do lado da ONT, para o *upstream*, utilizaram-se transmissores ópticos trabalhando com com-
primentos de onda de 1310 nm para GPON e 1270 nm para XG-PON.

Os diagramas de olho dos sinais GPON e XGPON, para *downstream* e *upstream*, são mostrados
nas Figuras 47(a), (b), (c) e (d).

5.3 Resultados e discussões

A primeira simulação apresentada foi do Sistema OFDM óptico de detecção direta. Nessa simulação, a Figura 30(a) ilustra que a modulação, ou seja, a passagem do sinal OFDM em banda base para banda passante, foi realizada com sucesso. A Figura 30(b) confirma a atuação do filtro óptico para a transmissão do sinal na fibra.

Comparando-se as Figura 31(a) e 31(b), é possível perceber a influência dos efeitos lineares e não-lineares, abordados no Capítulo 1, no diagrama de constelação. Mesmo com esses ruídos inerentes a fibra, o sinal pôde ser demodulado completamente a uma taxa de 10 Gbit/s em um enlace de 100 km. A Figura 32 apresenta o ruído residual no sinal em banda base após o processo de demodulação.

A segunda simulação apresentada foi do Sistema OFDM óptico de detecção coerente. A Figura 35(b) também deixa claro que o sinal foi demodulado por completo no receptor. Comparando-se com a Figura 31(b), pode-se observar que o sistema CO-OFDM é mais robusto que o sistema DD-OFDM pois a influência dos efeitos da fibra foi menor.

A terceira simulação apresentada foi do Sistema OFDM óptico de detecção coerente com dupla polarização. Apesar de ser um sistema para prova de conceito, já que o sinal gerado não passa por uma fibra óptica, seu diferencial é que cada modo de polarização opera a uma taxa de 50 km, totalizando um sistema de 100 km. Um problema dessa simulação é contornar as perdas que ocorrem para a demodulação do sinal, pois, apesar de apresentar um diagrama de constelação nítido (Figuras 40(a) e 40(b)), o sinal recebido está em uma amplitude relativamente baixa.

Essas três primeiras simulações foram relacionadas ao OFDM óptico. Nos três casos, considerando-se os parâmetros do GPON, eles têm um bom alcance e um diagrama de olho apresentando os efeitos de ruídos, originado de várias fontes como o ruído ASE acumulado do *link* e da figura de ruído dos componentes existentes no sistema, *jitter* de fase causado pelas imperfeições da fibra, mas ainda muito nítido para a recuperação e demodulação do sinal no receptor com uma BER muito baixa.

A quarta simulação apresentada foi do Sistema GPON. Conforme o diagrama de olho da Figura 42(a), pode-se observar que o sinal que chega no ONT/ONU (sentido *downstream*) possui uma BER extremamente baixa, devido a grande abertura do olho. Já no sentido *upstream*, o diagrama de olho da Figura 42(b) é bem mais fechado mas ainda assim possui uma BER em um patamar razoável, na ordem de $5,3 \cdot 10^{-10}$.

A penúltima simulação apresentada foi do Sistema WDM-PON. Com um espaçamento de 50 GHz entre os canais (Figura 44), o sinal é demodulado completamente, como mostra os diagramas de constelação obtidos para os canais 1 e 2 (Figuras 45(a) e (b)).

A última simulação apresentada foi do Sistema XG-PON. Nesse caso, os diagramas de olho das Figuras 47(a), (b), (c) e (d) validaram o funcionamento do GPON e XG-PON de forma simultânea, como proposto pelo padrão da ITU-T. No sentido *downstream*, ambas as tecnologias apresentaram um ótimo fator Q, e conseqüentemente uma BER tendendo a zero. Já no sentido *upstream*, o XG-PON mostrou-se muito superior que o GPON, sendo que o primeiro teve um fator Q de aproximadamente 40 e para o segundo aproximadamente 9 (e BER equivalente a $1,4 \cdot 10^{-21}$). Uma explicação para o melhor desempenho do GPON neste caso é relacionado à amplificação Raman que utiliza lasers de bombeio de maior potência.

As três últimas simulações foram relacionadas às redes ópticas passivas. A rede GPON no sentido *downstream* tem um bom desempenho, mesmo considerando o *link* de fibra óptica e os componentes passivos ao longo da transmissão. Já no sentido *upstream*, o diagrama de olho apresentado é mais fechado e o uso de técnicas como codificação pode melhorar o desempenho do sistema nesse sentido. O WDM-PON (abordagem no Capítulo 3), um sistema de nova geração, mostrou-se um sistema viável, no caso, simulado com quatro canais espaçados em 50 GHz. E na última simulação, mostrou-se que é viável a coexistência do sistema GPON e sua segunda evolução (XG-PON2). Todos esses casos reforçam o bom desempenho das redes PON e a viabilidade dos sistemas de nova geração.

No capítulo a seguir será apresentada a simulação do modem OFDM em linguagem VHDL como seqüência do trabalho proposto.

6 Simulação do modem OFDM em VHDL

Este capítulo descreverá brevemente a simulação de um modem OFDM em linguagem VHDL. Será abordado sucintamente o panorama atual da área de sistemas embarcados, bem como os conceitos relacionados as FPGAs e linguagens de descrição de *hardware* (HDL), metodologia, testes e simulação do código, resultados obtidos e discussão.

6.1 Aspectos gerais dos sistemas embarcados

O crescimento da indústria eletroeletrônica e a evolução dos componentes eletrônicos de estado sólido, de maneira geral, têm propiciado o aumento do uso de sistemas digitais como solução para a automação e controle de inúmeras tarefas do dia a dia. Entretanto, há uma exigência, por força de mercado, de que os projetos no ramo de tecnologia devem ser desenvolvidos em prazos cada vez mais curtos, para tornar isso um diferencial competitivo das empresas/fabricantes, inclusive para projetos de equipamentos de telecomunicações.

Dessa forma, a área de sistemas embarcados está em franca expansão, sendo ela voltada ao desenvolvimento de sistemas baseados em microprocessadores projetados para executar uma tarefa particular, controlando uma ou mais funções, com versatilidade, robustez, portabilidade (ser pequeno e leve) e baixo consumo de energia [64].

Na atualidade, uma das principais ferramentas para prover essa prototipação rápida de projetos que demandam processamento em tempo real é o FPGA. Enquanto Circuitos Integrados de Aplicação Específica (ASICs, *Application Specific Integrated Circuits*) são mais limitados, o FPGA é uma solução ideal para o desenvolvimento, por exemplo, de equipamentos de telecomunicações para as redes de nova geração, apesar do seu custo elevado comparado ao ASIC. E, para programar o FPGA, utiliza-se a linguagem VHDL. A seguir será descritos o FPGA e a linguagem VHDL.

6.1.1 FPGA: *Field Programmable Gate Array*

O FPGA é um dispositivo semiconductor que suporta a implementação de circuitos lógicos, programado por meio da linguagem VHDL e criado em 1983 pela “Xilinx Inc.” [65]. Além dessa última, destacam-se também outras grandes fabricantes de FPGAs como a “Altera Corp.” e a “Atmel Corp.”.

É importante mencionar que a expressão *gate array* em FPGA aparece por questões históricas, já que ele não possui *gate arrays* internamente. Isso se deve ao fato do FPGA ter sido comercializado em meados da década 1980 como uma tecnologia alternativa aos *gate arrays*, que eram populares naquela época [66].

Basicamente, a arquitetura de um FPGA possui dois componentes principais: tabelas de consultas (LUTs, *Lookup Tables*) e matrizes de chaveamento (ou interconexões programáveis). A ideia chave que fundamenta os FPGAs é que uma memória com N linhas de endereço pode implementar qualquer função lógica combinacional, por meio das chamadas tabelas *lookup*, ou simplesmente LUTs. Já as matrizes de chaveamento permitem programar as conexões entre as LUTs. Ambos os componentes são repetidos em um padrão regular dentro do *chip* [66].

Vale mencionar que para possibilitar a implementação de circuitos sequenciais, são incluídos *flip-flops* dentro do FPGA juntamente com as LUTs. Este conjunto é denominado de Bloco Lógico Programável (CLB, *Configurable Logic Block*).

Dessa forma, o conjunto de todos esses componentes tornam o FPGA um instrumento poderoso para o desenvolvimento de sistemas digitais. A Figura 48 ilustra a arquitetura básica de um FPGA, no qual CLB refere-se ao Bloco lógico Programável e MC refere-se à matriz de chaveamento.

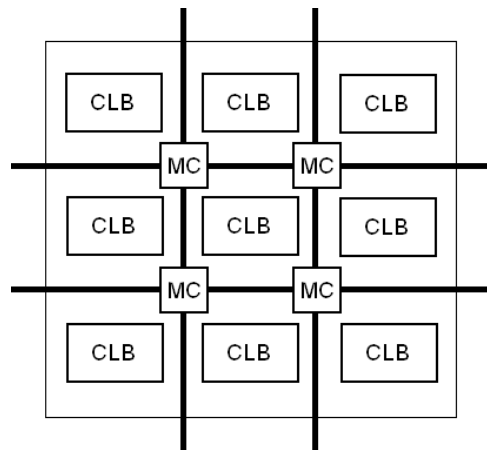


Figura 48: Arquitetura básica de um FPGA.

6.1.2 Linguagem de descrição de *hardware* e VHDL

Por um longo período, as linguagens de programação como FORTRAN, Pascal e C, estavam sendo usadas para descrever programas que eram de natureza sequencial. No entanto, na área de projetos digitais, os projetistas sentiram a necessidade de uma linguagem padrão para descrever circuitos digitais. Nesse contexto surgiram, então, as linguagens de descrição de *hardware*.

Essas linguagens permitiram aos projetistas modelar a concorrência (ou, o paralelismo) de processos encontrados nos elementos de *hardware* e também servindo de ferramenta de documentação padrão para projetos de VHSIC (*Very High Speed Integrated Circuit*) [67, 68].

Nesse contexto, as linguagens de descrição de *hardware* (HDLs) como Verilog e VHDL tornaram-se populares. O Verilog originou-se em 1983 na empresa “*Design Automation Gateway*” e foi padronizado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineer*) em 1995, nomeado como IEEE 1364. O VHDL foi desenvolvido sob contrato com o DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*, Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América), com a padronização concretizada em 1987 pelo IEEE, dando origem ao padrão IEEE 1076-1987. Ambos os simuladores, de Verilog e VHDL, ganharam rapidamente a aceitação dos projetistas para simular grandes circuitos digitais. O VHDL, comparado ao Verilog, é uma linguagem mais descritiva e mais abstrata, possibilitando o desenvolvimento de projetos específicos com maior detalhamento [67, 69].

Vale ressaltar que as Linguagens de Descrição de *Hardware* (HDL – *Hardware Description Language*) são relativamente parecidas com as estruturas sequenciais das linguagens de programação convencionais como C e Pascal. No entanto, elas são especificamente orientadas à descrição da estrutura e do comportamento de *hardware*. Mesmo assim, o processo de concepção se assemelha mais a um desenvolvimento de *software* do que a um desenvolvimento de *hardware* [70, 71].

Uma das vantagens das HDLs, com relação aos projetos em esquemático, é que elas podem representar diretamente equações booleanas, tabelas verdade e operações complexas. Por exemplo, a representação de uma operação aritmética como a soma é realizada simplesmente pelo uso do operador “+” [70].

Além disso, a padronização dessas linguagens de descrição de circuitos provê a troca de informações entre fabricantes, fornecedores de sistemas e de projetos, referentes ao comportamento de um circuito, tornando o desenvolvimento de projetos mais flexível e dinâmico.

A linguagem VHDL suporta projetos com múltiplos níveis de hierarquia, podendo a descrição consistir na interligação de outras descrições menores. Essa estrutura hierárquica facilita o desenvolvimento de projetos complexos que partem de um nível mais elevado para um nível mais baixo de especificação, conhecidos como métodos de projeto *top down design* [72, 73].

Um aspecto interessante dessa linguagem é que ela permite a execução de comandos de forma concorrente, o que torna a execução do código mais eficiente. Também é possível delimitar regiões de código sequencial, onde a execução dos comandos segue a ordem apresentada no código, muito comum em outras linguagens de programação estruturadas como a linguagem C ou mesmo a linguagem MATLAB. Assim como em outras linguagens de programação, pode-se descrever subprogramas que são definidos na forma de procedimentos e funções.

Um outro importante recurso é a definição de biblioteca (“*library*”) e pacote (“*package*”), no

qual os pacotes armazenam subprogramas, constantes e novos tipos definidos, o que evita a repetição de uma definição em todas as descrições. Esse mecanismo de acesso às bibliotecas permite que o trabalho de equipes envolvidas em um mesmo projeto possa ser compartilhado.

Um aspecto muito diferente do VHDL com outras linguagens de programação é o conceito de entidade de projeto. Uma entidade de projeto, ou *design entity*, pode representar desde uma simples porta lógica a um sistema completo, e é composta de duas partes [74]:

- Declaração da entidade: define a interface entre a entidade e o ambiente exterior, como, por exemplo, entradas e saídas.
- Arquitetura: contém a especificação das relações entre as entradas e saídas de uma entidade.

Para efeito de exemplo, o código a seguir é um modelo comportamental de uma porta *NOT* descrita em VHDL, com suas respectivas interfaces. A Figura 49 ilustra o resultado da simulação da porta *NOT* descrita, comprovando sua compatibilidade com o modelo.

```

1  LIBRARY ieee;
2  USE ieee.std_logic_1164.ALL;
3
4  ENTITY porta_not IS
5
6  PORT
7  ( a : IN  std_logic;
8    b : OUT std_logic);
9  END porta_not;
10
11 ARCHITECTURE comportamento OF porta_not IS
12 BEGIN
13 b <= '1' WHEN a = '0' ELSE
14     '0' WHEN a = '1' ELSE
15     '0';
16 END comportamento;

```

Modelo de uma porta *NOT* em VHDL.

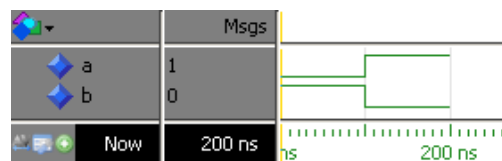


Figura 49: Waveform do circuito modelado.

6.1.3 Ferramentas de síntese e simulação

Neste trabalho, foram utilizadas duas ferramentas de Automação de Projeto Eletrônico (EDA) para síntese e simulação de códigos em VHDL, e uma terceira ferramenta foi utilizada em conjunto para a verificação de alguns testes. Nessa seção, será descrito brevemente as ferramentas ModelSim[®], Quartus II[®] e MATLAB[®], respectivamente.

Software ModelSim

O ModelSim[®] da Mentor Graphics[®] é um ambiente de depuração e análise para projetos de ASICs e FPGAs com suporte nativo para as linguagens Verilog, VHDL e SystemC. Esse *software*, além de sintetizar os circuitos a partir dos modelos em VHDL, permite também muitos recursos de depuração e análise a ser empregada na pós-simulação dos resultados salvos, bem como durante a simulação em execução. A Figura 50 mostra o ambiente de programação do ModelSim.

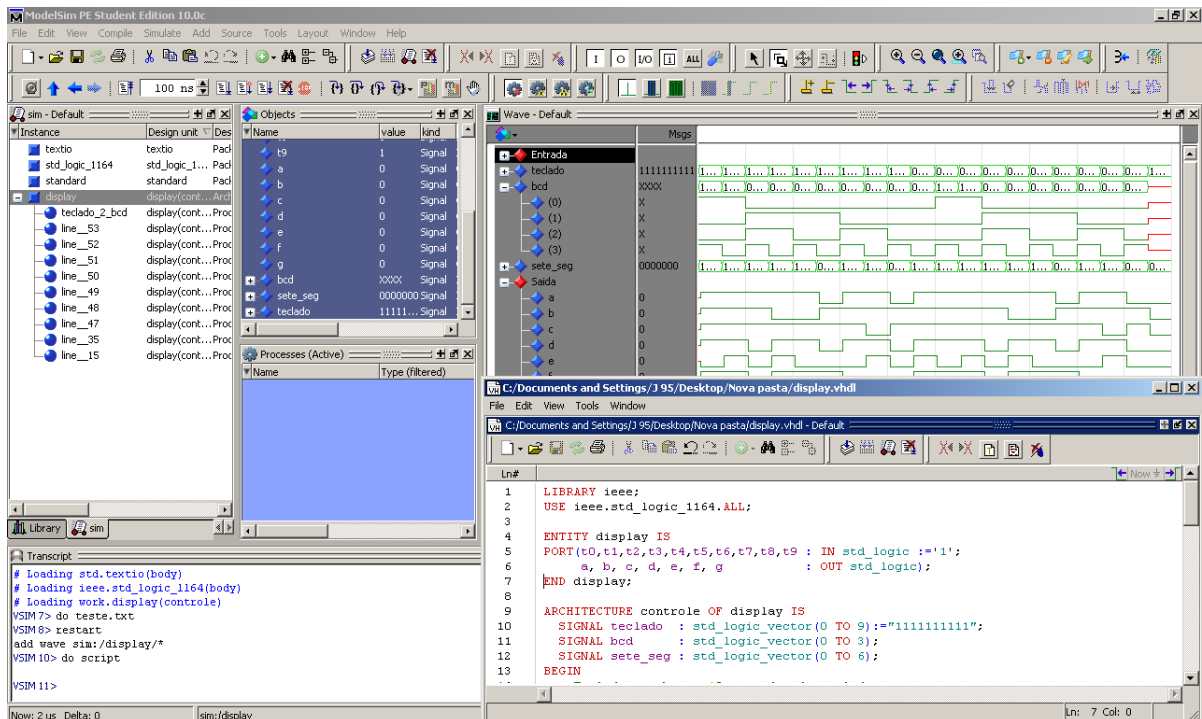


Figura 50: Ambiente de programação do *software* ModelSim versão 10.0c.

Os valores dos sinais existentes na descrição podem ser observados em um visualizador de forma de onda, possuindo um *hiperlink* entre os objetos e sua declaração no código, facilitando a navegação e depuração do projeto. As condições de corrida (ou de concorrência), os incrementos de atraso (atraso delta) e outros eventos do modelo podem ser analisados facilmente na forma de listas no

software. Um outro recurso para auxiliar na depuração do código é a visualização dos fluxo de dados de forma gráfica e textual [75].

Software Quartus II

A outra ferramenta de programação e sintetização utilizada foi o *software* Quartus II®. Esse *software* é produzido pela fabricante Altera® para análise e síntese de projetos VHDL, que permite aos desenvolvedores compilar projetos, realizar análise no tempo, simular a reação de um projeto para diferentes estímulos e configurar o dispositivo objeto com o programador [76]. O ambiente de desenvolvimento desse *software* é ilustrado na Figura 51.

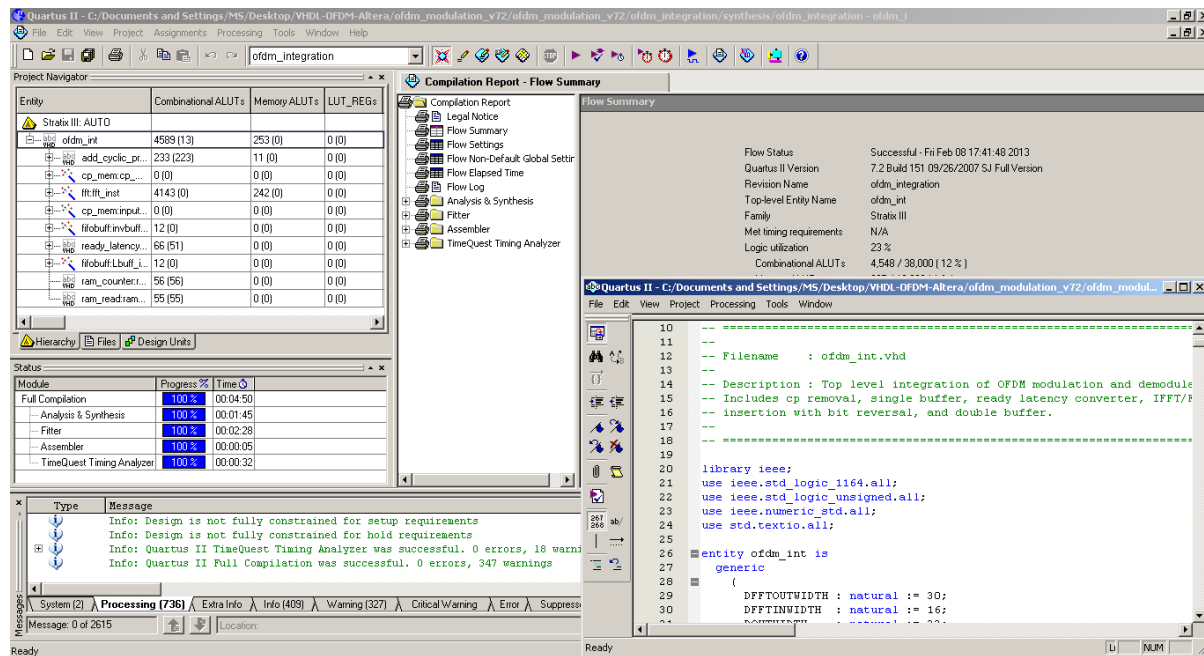


Figura 51: Ambiente de programação do *software* Quartus II versão 7.2.

Neste *software* é permitido, também, a criação de projetos em diagrama esquemático (*block diagram*), com uso de funções (blocos) de bibliotecas de portas lógicas, flip-flops, pinos e de outras primitivas, possibilita a criação de biblioteca pelo usuário e possui ferramentas para simulação e análise das saídas dos circuitos por meio de *waveforms* [77].

Vale ressaltar uma grande vantagem da linguagem VHDL. Quando comparada à entrada esquemática, as linguagens de descrição de *hardware*, como o VHDL, permitem a representação direta das equações booleanas, tabelas verdade e operações complexas. Por exemplo, é possível a representação de uma operação aritmética [70] em VHDL, o que não acontece no diagrama esquemático.

Software MATLAB

O MATLAB[®] é um *software* destinado à realização de cálculos com matrizes (MATrix LA-Boratory). Atualmente, esse programa é definido como um sistema interativo e uma linguagem de programação para computação técnica e científica em geral, integrando a capacidade de fazer cálculos, visualização gráfica e programação [78]. A Figura 52 ilustra o ambiente de programação do MATLAB.

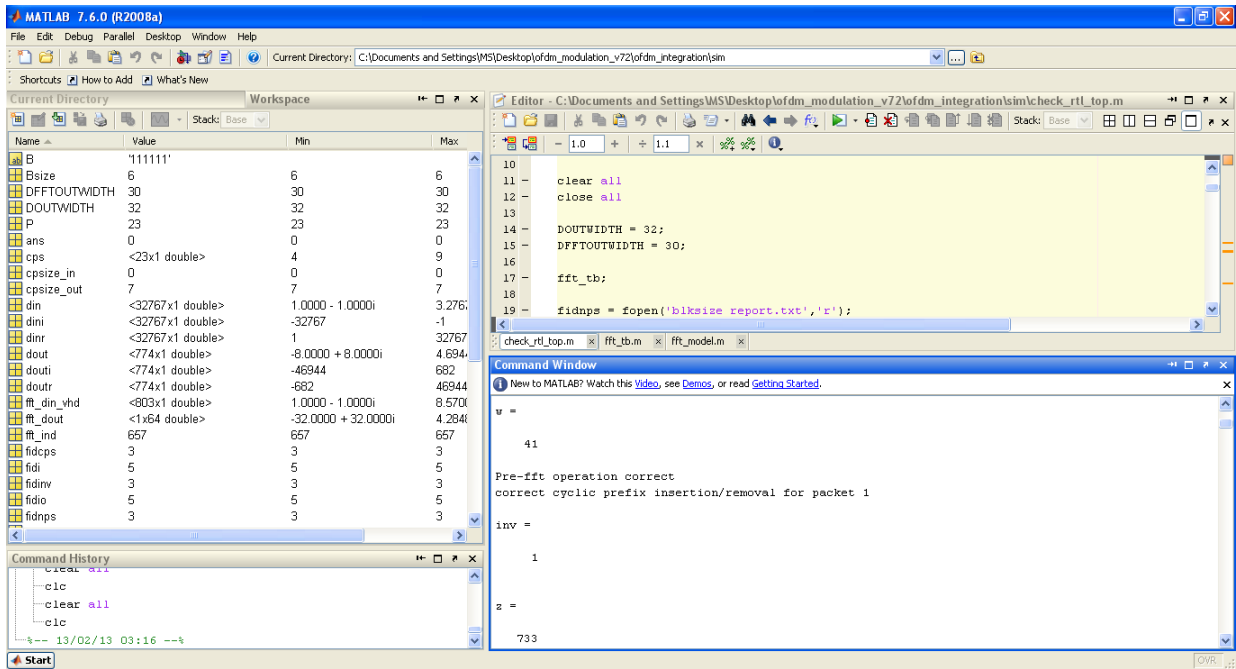


Figura 52: Ambiente de programação do *software* MATLAB versão 7.6.0 (R2008a).

6.2 Modem OFDM em VHDL

Um dos desafios da proposta deste trabalho é verificar a viabilidade de se implementar os blocos de modulação e demodulação OFDM para aplicação em tempo real nas redes ópticas de nova geração, que precisa ter um processamento suficientemente rápido para suprir as altas taxas suportadas por essa nova geração. As soluções para isso são a criação de um circuito dedicado ASIC ou a implementação em um FPGA. Conforme já comentado anteriormente, os FPGAs possuem uma série de vantagens em relação aos ASICs, sendo a principal delas a sua versatilidade. O circuito projetado pode ser alterado e adequado de acordo com a demanda do sistema de comunicação.

A partir disso, é apresentado neste capítulo a implementação de um sistema modulador e demodulador OFDM baseado numa *Application Note* da fabricante Altera [79] para aplicações em

tempo real nas redes de nova geração, tomando-se como referência as redes GPON. A inserção de um intervalo de guarda, que permite explorar características de dispersão temporal do sinal óptico, também foi considerada.

Esse projeto do modem OFDM possui três partes, a de modulação OFDM, demodulação OFDM e uma integração dos dois primeiros (*top level*). E ele inclui os submódulos a seguir:

- Núcleo IFFT/FFT para a implementação da modulação/demodulação do sinal OFDM
- Módulo de inserção de prefixo cíclico e reversor de bit
- *Buffer* de direcionamento dos dados processados
- RAM de duas portas

O *chip* que serviu de referência para a implementação foi o Stratix III, da Altera. Ele possui como características principais, uma alta capacidade de processamento, tecnologia de 65 nm e baixo consumo de potência, permitindo uma integração eficiente do *chip* nos equipamentos como o OLT e ONT das redes PON. Apesar de ser um *chip* de custo relativamente elevado, com ele é possível, em alguns casos, otimizar os recursos de processamento de sinal mantendo-se a mesma arquitetura da placa de circuito impresso projetada, apenas atualizando para um novo modelo VHDL desenvolvido.

A Linguagem escolhida foi o VHDL por permitir uma maior eficiência no processamento dos sinais, comparado a outras ferramentas que aceleram o processo de prototipagem, mas podem gerar redundâncias que poderiam inviabilizar a aplicação.

A Figura 53 mostra o diagrama de blocos da implementação, onde são definidos os blocos que precisam de alta taxa de processamento (*clock* rápido) e outros, para a inserção de intervalo de guarda, em que a taxa de processamento pode ser mais baixa. Foi imposto um *clock* rápido pelo menos 16 vezes mais rápido que o *clock* lento.

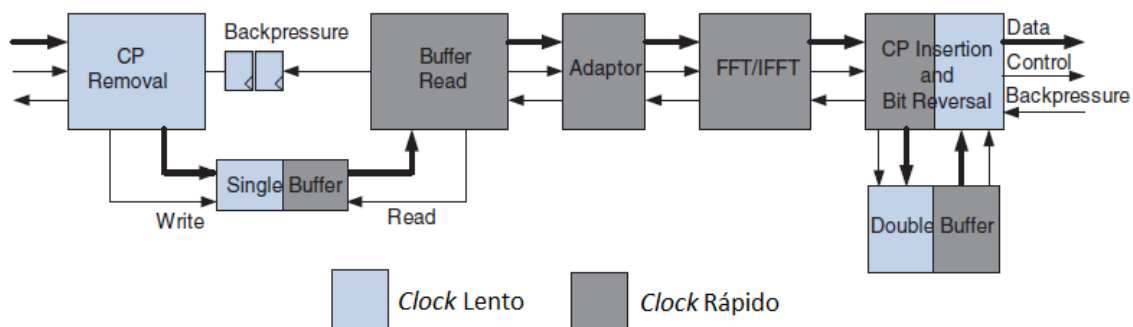


Figura 53: Diagrama de blocos do modem OFDM. Extraído de [79].

Deve ser mencionado que o intervalo de guarda é apenas uma cópia temporal de parte do trecho final do sinal OFDM, inserida no início desse pacote OFDM. A Figura 54 ilustra a conversão dos símbolos no domínio temporal para a inserção do prefixo cíclico.

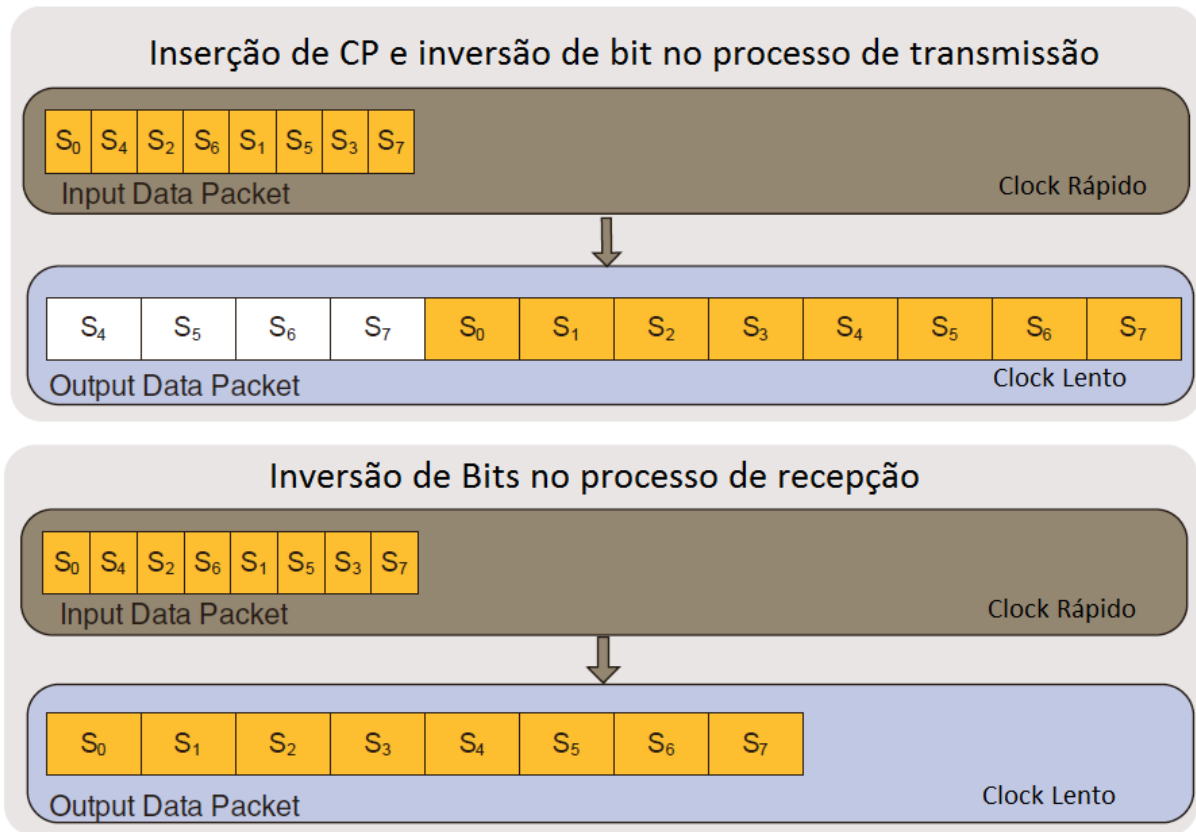


Figura 54: Conversão de símbolos no transmissor e receptor operando com diferentes taxas de processamento. Extraído de [79].

A operação computacionalmente mais intensa na modulação OFDM é a IFFT e, de forma similar, no núcleo da demodulação OFDM é a FFT. Uma FFT de alto rendimento é essencial em sistemas de banda larga, especialmente quando a FFT é compartilhada entre vários caminhos de dados. A Altera disponibiliza a função FFT MegaCore[®] [79] que permite a construção de sistemas reconfiguráveis, adequada para se projetar sistemas OFDM, como o caso deste trabalho.

A função FFT MegaCore[®] pode ser configurada no modo de fluxo (*streaming*) variável, permitindo que a FFT tenha tamanhos diferentes em cada quadro processado. Essa função também faz proveito de um mecanismo eficiente de memória, que gera símbolos com bits invertidos diretamente dos processamentos do “algoritmo da borboleta” da FFT [80]. Essa inversão pode ser combinada com a inserção de prefixo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) fora do núcleo da FFT. Assim, todo o resultado da modulação OFDM pode ser salva em um único *buffer*, conforme também mostrado

na Figura 53.

A Figura 55 mostra esse mecanismo eficiente de memória, que utiliza a interface de transmissão Altera Avalon (Avalon-ST).

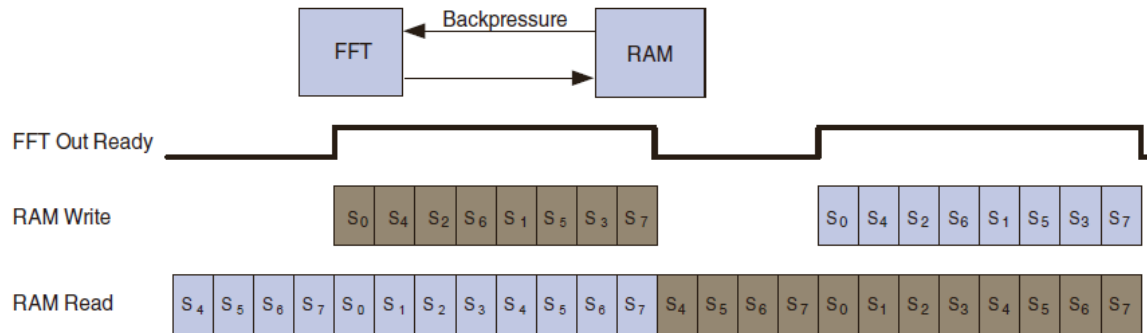


Figura 55: Uma implementação do mecanismo eficiente de memória de inserção de prefixo cíclico com *backpressure*. Extraído de [79].

É possível compartilhar o módulo FFT com outros módulos funcionais, tais como o de redução da razão potência de pico e potência média do sinal (uma das desvantagens da aplicação do OFDM que pode fazer com que os equipamentos operem na região de saturação, por exemplo o amplificador do transmissor) ou bloco estimador de canal (que utiliza como referência sinais de portadoras piloto). No entanto, essas reutilizações não são do escopo deste trabalho.

No processo de transmissão, os dados em banda base são fornecidos diretamente ao módulo de IFFT. Na saída do módulo de IFFT, os bits são invertidos e carregados sequencialmente em um único *buffer*, onde as amostras ordenadas do símbolo OFDM anterior são lidas simultaneamente a partir da RAM de porta dupla. Enquanto é gerado o prefixo cíclico, o núcleo FFT fica em espera pelo Avalon-ST *backpressure* (contrapressão). Em seguida, os símbolos OFDM com CP são enviados para ao *up-converter* digital (DUC) para sua efetiva transmissão.

No processo de recepção, após o *down-converter* digital (DDC), o prefixo cíclico é removido a partir dos símbolos OFDM recebidos. O módulo de remoção do prefixo cíclico procura pelo início correto de cada símbolo OFDM e fornece os dados à FFT para demodulação. O *buffer* após o módulo de FFT serve como *buffer* para o inversor de bits no receptor.

A seguir são listados as interfaces e as constantes da entidade do modem OFDM em VHDL, que utiliza o FFT MegaCore[®] e a interface de transmissão Altera Avalon[®].


```

1  entity ofdm_int is
2    generic (
3      DFFTOUTWIDTH : natural := 30;
4      DFFTINWIDTH  : natural := 16;
5      DOUTWIDTH    : natural := 32;
6      MWIDTH      : natural := 64;
7      MADDR_WIDTH_D : natural := 12;    -- double buffer depth
8      MADDR_WIDTH_S : natural := 11;    -- single buffer depth
9      CPWIDTH      : natural := 10;
10     NWIDTH       : natural := 12);
11
12  port (
13     clk_f   : in std_logic;
14     clk_s   : in std_logic;
15     rst_f_n : in std_logic;
16     rst_s_n : in std_logic;
17
18     -- Control
19     cpsize_in  : in std_logic_vector (CPWIDTH - 1 downto 0);
20     cpsize_out : out std_logic_vector (CPWIDTH - 1 downto 0);
21     fftsize_in : in  std_logic_vector (NWIDTH - 1 downto 0);
22     fftsize_out : out std_logic_vector (NWIDTH - 1 downto 0);
23     inv_in     : in  std_logic;          -- '1' for IFFT
24     inv_out    : out std_logic;
25
26     -- Avalon Streaming Data Sink Input Interface
27     din_valid : in  std_logic;
28     din_real  : in  std_logic_vector (DFFTINWIDTH - 1 downto 0);
29     din_imag  : in  std_logic_vector (DFFTINWIDTH - 1 downto 0);
30     din_sop   : in  std_logic;
31     din_eop   : in  std_logic;
32     din_ready : out std_logic;
33
34     -- Avalon Streaming Source Interface
35     dout_ready : in std_logic;
36     dout_valid : out std_logic;
37     dout_sop   : out std_logic;
38     dout_eop   : out std_logic;
39     dout_real  : out std_logic_vector (DOUTWIDTH - 1 downto 0);
40     dout_imag  : out std_logic_vector (DOUTWIDTH - 1 downto 0);
41  end ofdm_int;

```

Entidade do modem OFDM em VHDL.

6.3 Resultados e discussões

Esse projeto tem como objetivo o desenvolvimento de sistemas OFDM reconfiguráveis com comprimentos variáveis de janelas da FFT (16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 e 2048) e de prefixo cíclico, para otimizar a alocação dos recursos disponíveis.

O FFT MegaCore[®] permite a reutilização do seu núcleo por meio de um bit responsável por inverter o fluxo de dados e realizar o processamento de modulação e demodulação do sinal (“1” para a IFFT e “0” para FFT).

Para verificar se o modem OFDM em linguagem VHDL executou corretamente os processos de IFFT/FFT no sinal e a inserção/remoção do prefixo cíclico, foi utilizado o MATLAB. Executou-se um código em MATLAB que realiza a chamada de uma função (*SVSfftmodel*) e compara os resultados esperados com os resultados obtidos pela execução do código VHDL, que foi sintetizado no ambiente *ModelSim*. Nessa etapa, confirmou-se a execução correta dos processos do modem OFDM.

Com relação a utilização do *chip*, o *software* Quartus II indicou um uso de 8% dos recursos do FPGA Stratix III para o projeto integrado com modulação e demodulação OFDM. A ocupação do FPGA obtida revela que a implementação é viável e pode ser integrada aos demais blocos que compõem o OLT e também o ONT.

Um ponto fundamental é a taxa de processamento que o *chip* suporta para atender às demandas de redes PON para as novas gerações. No mercado atual já existem chips que suportam processamentos superiores a 100 Gbit/s.

7 Considerações Finais

O presente capítulo apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

7.1 Conclusão

No Capítulo 1 foi apresentada uma contextualização do atual panorama do desenvolvimento das telecomunicações com ênfase para as comunicações ópticas. Dada a demanda crescente, é fato que são necessários esforços para o desenvolvimento da tecnologia para as operadoras comportarem os serviços requeridos pelos assinantes.

No Capítulo 2 foram apresentados os principais aspectos relacionados às comunicações ópticas, principalmente sobre a fibra óptica. É importante ressaltar que, dentre todos os canais de comunicação existentes, a fibra óptica é a que possui menor perda de potência e maior largura de banda. Os efeitos lineares e não lineares são os principais fatores limitantes para o aumento da taxa de transmissão na fibra óptica. Uma solução para lidar com esses desafios é a utilização do processamento digital de sinais nos transmissores e receptores ópticos.

No Capítulo 3 foram descritos os componentes básicos de uma Rede Óptica Passiva. Por esta tecnologia fazer uso de componentes passivos em sua rede de distribuição e assim diminuir os custos de maneira geral, motivou muitas operadoras a adotarem essa tecnologia, somada a possibilidade de prover altas taxas de transmissão, que despertou o interesse dos usuários.

No Capítulo 4 foram compilados os aspectos teóricos relativos à modulação OFDM, passando pelos sistemas de comunicação por RF e sua adequação para sistemas de comunicação óptica. A principal vantagem desse tipo de modulação é o uso mais eficiente do canal de comunicação e maior taxa de transmissão de dados. Entretanto, alguns dos desafios ainda serem explorados é para contornar a influência dos ruídos de fase e o problema da PAPR.

No Capítulo 5 foi apresentada a simulação das redes ópticas com o *software* OptiSystem[®]. Foi observado que nos sistemas que utilizam OFDM, mesmo sem qualquer uso de codificação e equalização, foi possível a recuperação do sinal transmitido no receptor, observado pelo diagrama de constelação bem definido e com uma BER muito baixa.

Os sistemas PON simulados complementaram a parte teórica apresentada no Capítulo 3. Esses sistemas confirmaram as vantagens das redes PON frente às outras redes de comunicação, como sua alta taxa de transmissão de dados e maior alcance.

O Capítulo 6 abordou os aspectos dos sistemas embarcados, intimamente relacionado ao desenvolvimento e simulação do modem OFDM em VHDL. O FPGA é um dispositivo de prototipação rápida de projetos de circuitos e de fácil adaptação para o desenvolvimento de um modem OFDM, por exemplo. Juntamente com o FPGA, a linguagem VHDL mostrou-se robusta para o desenvolvimento de sistemas digitais. A possibilidade do uso de bibliotecas facilita o desenvolvimento de projetos que requerem diversos recursos em sua implementação.

Quanto aos aspectos relativos a aplicação da modulação OFDM em redes ópticas de nova geração, pôde-se observar que a implementação do modem OFDM é uma das tarefas mais trabalhosas para o desenvolvimento dessa solução, pois deve processar os dados em altas taxas. As simulações de sistemas com OFDM validaram a viabilidade da aplicação dessa modulação em comunicações ópticas. Dessa forma, concluiu-se que a modulação OFDM é uma candidata promissora para ser adotada nas redes de nova geração dada as suas inúmeras vantagens.

7.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se o estudo e simulação dos sistemas OFDM com uso de codificação e equalização. Estas técnicas podem contribuir ainda mais para tornar o sistema robusto.

Outro sugestão seria o uso de portadoras piloto para a análise do canal e utilizá-las também como mais uma forma de aumentar a eficiência dos sistemas com modulação OFDM.

Apesar deste trabalho fazer a análise por meio de simulação numérica, um experimento físico impõe outros desafios relativos a construção de um protótipo real. Isso pode ser feito utilizando-se o modem OFDM executado em FPGA com um gerador de sinais aleatórios para efetuar a transmissão do sinal OFDM óptico de fato.

Referências Bibliográficas

- [1] Cisco. *Cisco Visual Networking Index*. Página na internet, Disponível em: <http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns827/networking_solutions_sub_solution.html>. Acessando em: Jun. 2012.
- [2] Ericsson. *Traffic and Market Report*. Página na internet, Disponível em: <http://www.ericsson.com/res/docs/2012/traffic_and_market_report_june_2012.pdf>. Acessando em: Jun. 2012.
- [3] Teleco. Serviços banda larga: O uso de rede óptica passiva GPON. Página na internet, Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialblgpon/>>. Acessando em: jan. 2012.
- [4] Ivan P. Kaminow, Tingye Li, and Alan E. Willner. *Optical Fiber Telecommunications V– B: Systems and Networks*. Academic Press, 2008.
- [5] H. Takara, B. Kozićki, Y. Sone, T. Tanaka, A. Watanabe, A. Hirano, K. Yonenaga, and M. Jinno. Distance-adaptive super-wavelength routing in elastic optical path network (slice) with optical ofdm. In *Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on*, pages 1 –3, sept. 2010.
- [6] Huawei Technologies. *Next-Generation PON Evolution*. Página na internet, Disponível em: <<http://www.huawei.com/en/static/hw-077443.pdf>>. Acessando em: jan. 2012.
- [7] ZTE Technologies. *A Discussion on OFDM-PON*. Página na internet, Disponível em: <http://wwen.zte.com.cn/endata/magazine/ztetechnologies/2011/No6/articles/201111/t20111118_263968.html>. Acessando em: jan. 2012.
- [8] FSAN. *Next Generation PON Task Group*. Página na internet, Disponível em: <<http://www.fsan.org/task-groups/ngpon/>>. Acessando em: Fev. 2012.
- [9] Takashi Goh Shinji Mino, Hiroshi Yamazaki and Takashi Yamada. *Multilevel Optical Modulator Utilizing PLC-LiNbO3 Hybrid-integration Technology*. Technical report, NTT Technical Review, Disponível em: <<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201103fa8.html>>. Acessando em: Jun. 2012.

- [10] William Shieh and Ivan Djordjevic. *OFDM for Optical Communication*. Academic Press, 2010.
- [11] Hiroji Masuda, Etsushi Yamazaki, Akihhide Sano, Toshihide Yoshimatsu, Takayuki Kobayashi, Eiji Yoshida, Yutaka Miyamoto, Shinji Matsuoka, Yasushi Takatori, Masato Mizoguchi, Kazuyasu Okada, Kazuo Hagimoto, Takashi Yamada, and Shin Kamei. 13.5-tb/s (135 x 111-gb/s/ch) no-guard-interval coherent ofdm transmission over 6,248 km using snr maximized second-order dra in the extended l-band. In *Optical Fiber Communication Conference*, page PDPB5. Optical Society of America, 2009.
- [12] Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley, 4th edition, 2010.
- [13] OptiSystem. Component library. Technical report, Optiwave, 2012.
- [14] Masataka Nakazawa. Ultrahigh spectral density coherent optical transmission technologies. In Masataka Nakazawa, Kazuro Kikuchi, and Tetsuya Miyazaki, editors, *High Spectral Density Optical Communication Technologies*, volume 6 of *Optical and Fiber Communications Reports*, pages 51–80. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [15] William H. Hayt Jr and John A. Buck. *Eletromagnetismo*. McGraw-Hill, 8 ed edition, 2008.
- [16] David Halliday and Robert Resnick and Jearl Walker. *Fundamentos de física*, volume 4. LTC, 9 edition, 2012.
- [17] Raymond A. Serway and John W. Jewett Jr. *Princípios de Física*, volume 4. CENGAGE learning, 3 edition, 2005.
- [18] José Antônio Justino Ribeiro. *Comunicações Ópticas*. Editora Érica, 4 edition, 2012.
- [19] Juan Salvador Asensi Pla. Design of Passive Optical Network. Dissertação de mestrado, Department of Telecommunications – Brno University of Technology, 2011.
- [20] Philip Ronan. Electromagnetic spectrum. Página na internet, Wikipedia, Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:EM_spectrum.svg>. Acessando em: jan. 2013.
- [21] Gerd Keiser. *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill, 1991.
- [22] AD net Technology Co. Optical power loss (attenuation) in fiber access – types, values and sources. Página na internet, Disponível em: <<http://www.ad-net.com.tw/index.php?id=472>>. Acessando em: jan. 2013.

- [23] Felipe Rudge Barbosa. Efeitos não-lineares. Página na internet, Universidade Estadual de Campinas, Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/pdf/IE008-b2_Efeit-NLinear=f212.pdf>. Acessando em: jan. 2013.
- [24] Felipe Rudge Barbosa. Dispersão em fibras Ópticas. Página na internet, Universidade Estadual de Campinas, Disponível em: <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/pdf/Dispers_Complet_f201r.pdf>. Acessando em: jan. 2013.
- [25] Yuan Zhan, Mengli Tang, Hai Liu, Minming Zhang, and Deming Liu. A novel design of orthogonal frequency division multiplexing-based passive optical networks. *Photonic Netw. Commun.*, 23(3):265–271, June 2012.
- [26] Gerd Keiser. *FTTx Concepts and Applications*. Wiley-Interscience, 2006.
- [27] Cedric F. Lam. *Passive optical networks : principles and practice*. Elsevier, 2007.
- [28] Recommendation ITU-T G.984.1. *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics*. ITU-T, mar. 2008.
- [29] Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke, Huan Song, Sunhee Yang, Glen Kramer, Kwangjoon Kim, and Biswanath Mukherjee. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (wdm-pon) technologies for broadband access: a review. *J. Opt. Netw.*, 4(11):737–758, Nov 2005.
- [30] Soo-Jin Park, Chang-Hee Lee, Ki-Tae Jeong, Hyung-Jin Park, Jeong-Gyun Ahn, and Kil-Ho Song. Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network. *Lightwave Technology, Journal of*, 22(11):2582–2591, 2004.
- [31] Filippo Ponzini, Fabio Cavaliere, Gianluca Berrettini, Marco Presi, Ernesto Ciaramella, Nicola Calabretta, and Antonella Bogoni. Evolution scenario toward wdm-pon. *J. Opt. Commun. Netw.*, 1(4):C25–C34, Sep 2009.
- [32] Sameer Ashfaq Malik. 10G-EPON: Unleashing the bandwidth potential. Página na internet, ZTE Technologies, Disponível em: <http://www.telecomasia.net/pdf/ZTE/ZTE_101909.pdf>. Acessando em: jan. 2009.
- [33] J. Armstrong. OFDM for Optical Communications. *Lightwave Technology, Journal of*, 27(3):189–204, feb.1, 2009.
- [34] N. Cvijetic. OFDM for Next-Generation Optical Access Networks. *Lightwave Technology, Journal of*, 30(4):384–398, feb.15, 2012.

- [35] Rangel Arthur. Novas propostas para otimização de receptores de TV digital baseados em OFDM em ambientes de redes de frequência única regionais. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Fevereiro 2007.
- [36] R. Chang and R. Gibby. A theoretical study of performance of an orthogonal multiplexing data transmission scheme. *Communication Technology, IEEE Transactions on*, 16(4):529–540, august 1968.
- [37] S. Weinstein and P. Ebert. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform. *Communication Technology, IEEE Transactions on*, 19(5):628–634, october 1971.
- [38] A. Peled and A. Ruiz. Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '80.*, volume 5, pages 964 – 967, apr 1980.
- [39] Paulo M. A. Monteiro. Redes Ópticas Avançadas Coerentes NG-PON2. Dissertação de mestrado, Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática – Universidade de Aveiro, 2010.
- [40] Andreia Juliana Alves. Redes ópticas passivas de próxima geração (NG-PON). Dissertação de mestrado, Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática – Universidade de Aveiro, 2010.
- [41] J.A.L. Silva, D.J.C. Coura, A.P.L. Barbero, and M.E.V. Segatto. *A passive optical network based on centralized wavelength and bandwidth scalable OFDM signals.* In *Transparent Optical Networks, 2009. ICTON '09. 11th International Conference on*, pages 1–4, 28 2009-july 2 2009.
- [42] Daniel Coura, Jair Silva, and Marcelo Segatto. *A bandwidth scalable OFDM passive optical network for future access network.* *Photonic Network Communications*, 18:409–416, 2009. 10.1007/s11107-009-0203-0.
- [43] Arthur J. Lowery. *Fiber nonlinearity pre- and post-compensation for long-haul optical links using OFDM.* *Opt. Express*, 15(20):12965–12970, Oct 2007.
- [44] Eduardo Heras Miguel. *Fiber-based Orthogonal Frequency Division Multiplexing Transmission Systems.* Dissertação de mestrado, Universidade Politécnica da Catalunha, Out. 2010.

- [45] Hsing-Yu Chen, Chia Chien Wei, Dar-Zu Hsu, M.C. Yuang, Jyehong Chen, Yu-Min Lin, Po-Lung Tien, S.S.W. Lee, Shih-Hsuan Lin, Wei-Yuan Li, Chih-Hung Hsu, and Ju-Lin Shih. *A 40-Gb/s OFDM PON System Based on 10-GHz EAM and 10-GHz Direct-Detection PIN. Photonics Technology Letters, IEEE*, 24(1):85–87, jan.1, 2012.
- [46] Dar-Zu Hsu, Chia-Chien Wei, Hsing-Yu Chen, Wei-Yuan Li, and Jyehong Chen. *Long-reach OFDM PON*. In *Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 2011 16th*, pages 34–36, july 2011.
- [47] Yannis Benlachtar, Philip M. Watts, Rachid Bouziane, Peter Milder, Deepak Rangaraj, Anthony Cartolano, Robert Koutsoyannis, James C. Hoe, Markus Püschel, Madeleine Glick, and Robert I. Killey. *Generation of optical OFDM signals using 21.4 GS/s real time digital signal processing*. *Opt. Express*, 17(20):17658–17668, Sep 2009.
- [48] Qi Yang, Simin Chen, Yiran Ma, and William Shieh. *Real-time reception of multi-gigabit coherent optical OFDM signals*. *Opt. Express*, 17(10):7985–7992, May 2009.
- [49] Dayou Qian, Tyrone Tai-On Kwok, Neda Cvijetic, Junqiang Hu, and Ting Wang. *41.25 Gb/s Real-Time OFDM Receiver for Variable Rate WDM-OFDMA-PON Transmission*. In *National Fiber Optic Engineers Conference*, page PDPD9. Optical Society of America, 2010.
- [50] The OASE project and research. *Survey of Next-Generation Optical Access System Concepts*. Página na internet, Disponível em: <http://www.ict-oase.eu/public/files/OASE_WP4_D4_1_29th_October_2010_v1_0.pdf>. Acessando em: jan. 2012.
- [51] N. Cvijetic, Dayou Qian, and Junqiang Hu. *100 Gb/s optical access based on optical orthogonal frequency-division multiplexing*. *Communications Magazine, IEEE*, 48(7):70–77, july 2010.
- [52] Fred Buchali, Roman Dischler, and Xiang Liu. *Optical ofdm: A promising high-speed optical transport technology*. *Bell Labs Technical Journal*, 14(1):125–146, 2009.
- [53] W. Shieh, H. Bao, and Y. Tang. *Coherent optical ofdm: theory and design*. *Opt. Express*, 16(2):841–859, Jan 2008.
- [54] *User's Manual*. Technical report, VPIphotonics, Nov. 2011.
- [55] *Full Product Overview*. Página na internet, Optiwave, Disponível em: <http://www.optiwave.com/pdf/brochure/Optiwave_Brochure2009.pdf>. Acessando em: jan. 2013.

- [56] VPIsystems. VPItransmissionMaker and VPIcomponentMaker. Página na internet, Disponível em: <http://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35557.html>. Acessando em: Jan. 2012.
- [57] VPIphotonics. VPItransmissionMaker optical systems. Página na internet, Disponível em: <<http://www.vpiphotonics.com/TMOpticalSystems.php>>. Acessando em: Jan. 2012.
- [58] Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 4th edition, 2007.
- [59] OptiSystem. Getting started. Technical report, Optiwave, 2012.
- [60] Optiwave. Simulation examples for optisystem. Página na internet, Disponível em: <http://www.optiwave.com/products/system_downloads.html>. Acessando em: Setembro de 2012.
- [61] Recommendation ITU-T G.652. *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ITU-T, nov. 2009.
- [62] Sudhakar Yalamanchili. *Digital Video and Audio Broadcasting Technology Ç A Practical Engeneering Guide*. Springer, 2nd edition, 2008.
- [63] Recommendation ITU-T G.984.2. *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification*. ITU-T, mar. 2003.
- [64] Steve Heath. *Embedded Systems Design*. Newnes, 2nd edition, 2003.
- [65] Xilinx Inc. *Our History*. Página na internet, Disponível em: <<http://www.xilinx.com/company/history.htm>>. Acessando em: jul. 2011.
- [66] Frank Vahid. *Sistemas digitais : projeto, otimização e HDLs*. Bookman, 2008.
- [67] Samir Palnitkar. *Verilog HDL: A Guide to Digital Design and Synthesis*. Prentice Hall, 2nd edition, 2003.
- [68] Roberto d'Amore. *VHDL: Descrição e Síntese de Circuitos Digitais*. LTC, 2005.
- [69] Sudhakar Yalamanchili. *VHDL: A Starter's Guide*. Prentice-Hall, 2nd edition, 2005.
- [70] Edson T. Midorikawa. Uma introdução às linguagens de descrição de hardware. Página na internet, Escola Politécnica da USP, Disponível em: <<http://www.pcs.usp.br/~edson/intro-hdl.pdf>>. Acessando em: mai. 2011.

- [71] David R. Martinez, Robert A. Bond, and M. Michael Vai. *High Performance Embedded Computing Handbook – A Systems Perspective*. CRC Press, 2008.
- [72] IEEE Standards Interpretations: IEEE Std 1076-1987. *IEEE Standard VHDL Language Reference Manual*. IEEE reference manual, 1992.
- [73] Douglas L. Perry. *VHDL: Programming by Example*. McGraw-Hill, 4rd edition, 2002.
- [74] Volnei A. Pedroni. *Circuit Design with VHDL*. MIT Press, 2004.
- [75] Mentor Graphcs. ModelSim. Página na internet, Disponível em: <<http://www.mentor.com/products/fpga/simulation/modelsim>>. Acessando em: jan. 2012.
- [76] Altera. Quartus II handbook version 12.1. Página na internet, Disponível em: <http://www.altera.com/literature/hb/qts/quartusii_handbook.pdf>. Acessando em: jan. 2013.
- [77] Manoel Eusebio de Lima. Sistemas digitais: Introdução ao quartus II. Página na internet, UFPE, Disponível em: <http://www.cin.ufpe.br/~if675/arquivos/laboratorios/2006-2/aula1_intro_quartus.ppt>. Acessando em: mai. 2011.
- [78] Adriana Maria Tonini and Daniela Naufel Schettino. Matlab para engenharia. Página na internet, Centro Universitário de Belo Horizonte, Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/~camecc/temporary_files/ApostilaMatLab_UNI.pdf>. Acessando em: mar. 2011.
- [79] Altera. *Implementing OFDM Modulation and Demodulation*. Página na internet, Disponível em: <<http://www.altera.com/support/examples/vhdl/vhd-cyclic-prefix-insertion-ofdm.html>>. Acessando em: Janeiro de 2013.
- [80] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, J. B. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, 2nd edition, 2000.