

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REGINALDO BARBOSA NUNES

**OFDMA PON - ARQUITETURA PARA REDES ÓPTICAS
PASSIVAS COM ACESSO MÚLTIPLO POR DIVISÃO DE
FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS**

VITÓRIA

2016

REGINALDO BARBOSA NUNES

TESE DE DOUTORADO 2016

REGINALDO BARBOSA NUNES

**OFDMA PON - ARQUITETURA PARA REDES ÓPTICAS
PASSIVAS COM ACESSO MÚLTIPLO POR DIVISÃO DE
FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS**

Tese elaborada para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da UFES - Universidade Federal do Espírito Santo, com Doutorado Sanduíche no Instituto de Telecomunicações de Aveiro - Portugal, e apresentada como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto.

Co-orientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva.

Orientador Estrangeiro do Estágio de Doutorado Sanduíche:

Prof. Dr. Paulo Brito de Souza André.

VITÓRIA

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Nunes, Reginaldo Barbosa, 1964-
N972o OFDMA PON : arquitetura para redes ópticas passivas com
acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais / Reginaldo
Barbosa Nunes. - 2016.
140 f. : il.

Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.
Coorientador: Jair Adriano Lima Silva.
Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade.
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Redes ópticas passivas. 2. Redes ópticas. 3.
Telecomunicações. 4. Sistemas ópticos. 5. OFDM. I. Segatto,
Marcelo Eduardo Vieira. II. Silva, Jair Adriano Lima. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV.
Título.

CDU: 621.3

REGINALDO BARBOSA NUNES

**OFDMA PON - ARQUITETURA PARA REDES ÓPTICAS
PASSIVAS COM ACESSO MÚLTIPLO POR DIVISÃO DE
FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS**

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Divanilson Rodrigo de Sousa Campelo
CIn - Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Murilo Araújo Romero
EESC - Universidade de São Paulo

A Deus, por minha vida, dádiva generosa sem a qual nada seria possível.

À minha querida esposa e filhos, por entenderem a minha ausência e pelo apoio recebido durante a realização deste feito.

Aos professores e alunos que participaram na orientação, colaboração e apoio a esta pesquisa.

Agradecimentos

Aos Professores Marcelo Segatto, Jair Silva, Helder Rocha, Paulo André e Mário Lima, por estarem sempre disponíveis e solícitos.

Aos caros colegas Daniel Coura, Thiago Almeida, Diogo Vieira, Esequiel Pereira, Carlos Dalarmelina e Sergio Julião, por sua indispensável colaboração.

Às instituições: IFES, UFES, IT, CAPES, FAPES e CNPq, pelo suporte e confiança neste projeto. Em especial pelos recursos providos para os projetos de pesquisa:

FCT/CAPES/5885-14-0

UID/EEA/50008/2013

PRONEX/FAPES/48508560/2009.

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Rede de Acesso de Banda Larga Baseada em PON	15
1.2	Rede Óptica Passiva Baseada em OFDMA	17
1.3	Principais Contribuições do Trabalho	18
1.4	Artigos Publicados	19
2	Arquitetura das Redes Ópticas Passivas	22
2.1	Características das <i>Ethernet</i> PONs	24
2.1.1	Mecanismos de Controle e Sincronismo	26
2.1.2	Processo de Registro de ONUs	29
2.2	Características das <i>Gigabit Capable</i> PONs	29
2.2.1	Mecanismos de Controle e Sincronismo	30
2.2.2	Mecanismo de Ativação das ONUs	33
2.3	Características das NG-PON2 (TWDM-PONs)	35
2.4	Comparação entre EPONs e GPONs	37

3	Sistemas Ópticos Baseados em OFDM	39
3.1	A Modulação OFDM	41
3.2	Deteção Direta de Sinais Ópticos OFDM	44
3.3	OFDM em Sistemas Ópticos IMDD	46
3.4	Parâmetros de Projeto para Sistemas Ópticos OFDM	48
3.4.1	Uso do Modulador Externo	50
3.5	PONs Baseadas em OFDM/OFDMA	51
3.5.1	Arquitetura Física das OFDM PONs	53
3.5.2	Arquitetura MAC das OFDM PONs	56
4	Arquitetura BS OFDMA PON	60
4.1	Arquitetura Física BS OFDMA PON	60
4.1.1	Estruturas da OLT, PSC e ONU	61
4.1.2	Análise de Desempenho da BS OFDMA PON	63
4.2	Arquitetura da Camada de Acesso ao Meio	65
4.2.1	Coexistência com Outras Tecnologias de PON	67
4.2.2	Alocação Dinâmica de Largura de Banda	67
4.3	Adaptação da MAC EPON para BS OFDMA PON	70
4.3.1	Mecanismo de Controle	70
4.3.2	Processo de Registro das ONUs	73
4.4	Adaptação da MAC GPON para BS OFDMA PON	74
4.4.1	Descrição do Mecanismo de Controle	75

4.4.2	Ativação das ONUs e Sincronismo	78
4.5	Proposta de MAC Específica para BS OFDMA PON	80
4.5.1	Mecanismo de Controle de Acesso	81
4.5.2	Sincronismo dos <i>Superframes</i> no <i>Upstream</i>	85
4.5.3	Processo de Registro das ONUs	87
4.5.4	Alocação Dinâmica de Largura de Banda	89
4.6	Cenários de Simulação da Proposta de MAC	89
4.6.1	Resultados e Discussões	92
4.6.2	Conclusões Sobre a Simulação da MAC	96
5	Verificação Experimental da BS OFDMA PON	97
5.1	Configurações Experimentais para <i>Downstream</i>	100
5.1.1	Configuração Experimental - 1º Cenário	101
5.1.2	Resultados do 1º Cenário	103
5.1.3	Configuração Experimental - 2º Cenário	107
5.1.4	Resultados do 2º Cenário	109
5.2	Configurações Experimentais para <i>Upstream</i>	114
5.2.1	Configuração de <i>Upstream</i> I	114
5.2.2	Configuração de <i>Upstream</i> II	120
5.2.3	Resultados da Configuração de <i>Upstream</i> II	123
5.3	Conclusões sobre as Configurações Experimentais	127
6	Considerações Finais	129
6.1	Trabalhos Futuros	131

Lista de Tabelas

2.1	Características de Camada Física das PONs.	37
4.1	Parâmetros Utilizados nas Simulações da Camada Física.	64
4.2	Cenário Proposto como Exemplo de Cálculo do <i>Wait Time</i>	72
4.3	Parâmetros de Simulação da PON.	91
4.4	Taxas Úteis Calculadas e Simuladas.	93
5.1	Relação BER x EVM em função do formato de modulação.	100
5.2	Parâmetros Usados nas Simulações e nos Experimentos.	107

Lista de Figuras

1.1	Capacidade das redes de acesso por aplicação e tecnologia. Fonte Ref.[1].	15
1.2	Sistema FTTx (<i>C - curb</i> , <i>B - Building</i> , <i>H - Home</i> , <i>O - Office</i>). Fonte Ref. [4].	16
2.1	Comparação entre os quadros <i>Ethernet</i> IEEE 802.3 e 10G EPON.	24
2.2	Compartilhamento de canal 10G EPON. a) <i>Downstream</i> ; b) <i>Upstream</i> . Fonte Ref. [5].	25
2.3	Tempos de atraso envolvidos no cálculo dos <i>RTT's</i> . Fonte Ref. [7].	27
2.4	Alocação de <i>timeslots</i> - Diagrama de tempo (<i>GATE</i> e <i>REPORT</i>). Fonte Ref. [7].	27
2.5	Estrutura interna dos quadros 10G EPON no <i>upstream</i> . Fonte Ref. [7].	28
2.6	Encapsulamento de SDUs no <i>downstream</i> - XGPON. Fonte Ref. [10].	30
2.7	Encapsulamento de SDUs no <i>upstream</i> - XGPON. Fonte Ref. [10].	31
2.8	Multiplexação XGPON: (a) <i>Downstream</i> ; (b) <i>Upstream</i> . Fonte Ref. [10].	32
2.9	Controle de acesso ao meio do XGTC. Fonte Ref. [10].	32
2.10	Estrutura interna dos quadros 10G EPON no <i>upstream</i> - EoB. Fonte Ref. [10].	33
2.11	Diagrama de estados da ONU. Fonte Ref. [10].	34
2.12	TWDM-PON system diagram. [12].	36

3.1	Evolução das Redes Ópticas Passivas - Comparação entre os padrões consolidados e os estudos das OFDM - PONs.	40
3.2	Espectros no domínio da frequência para: (a) <i>Single Carrier</i> (SC) - Portadora única; (b) Multiplexação no domínio da frequência (FDM) e (c) FDM ortogonal (OFDM). Fonte Ref. [30].	42
3.3	Transmissão multiportadora OFDM em sistemas ópticos. Fonte Ref. [33].	45
3.4	Banda de guarda - efeitos da IMD. Fonte Ref. [33].	46
3.5	Diagrama de blocos do sistema DDO-OFDM. Fonte Ref. [33].	47
3.6	CP - Prefixo cíclico; ISI - Interferência intersimbólica; T_s - Tempo de símbolo.	48
3.7	Tolerância à dispersão cromática - sistema a 10 Gbps, $M = 16$, $\epsilon_{TS} + \epsilon_g = 8\%$ [33].	49
3.8	Função característica do modulador óptico Mach-Zehnder. [33].	51
3.9	Diagrama de blocos do sistema OFDM para enlaces ópticos de longo alcance. [49].	52
3.10	Diagrama de blocos: (a) Sistema DDO-OFDM, (b) Sistema DDO-SCFDE, e (c) Sistema DDO-DFTS. Espectro após modulação preliminar em RF: (d) DDO-OFDM, (e) DDO-SCFDE, e (f) DDO-DFTS. [47].	53
3.11	Configuração experimental OFDMA-PON coerente para longa distância. Fonte Ref. [45].	54
3.12	Configuração experimental com transmissão de quatro ONUs e recepção coerente na OLT. Fonte Ref. [46].	55
3.13	Configuração experimental com transmissão de ONUs usando comprimentos de onda diferentes. Fonte Ref. [44].	55
3.14	Alocação dinâmica de slots de tempo e subportadoras. Fonte Ref. [50].	56
3.15	Protocolo MAC e estrutura de <i>frame</i> . Fonte Ref. [51].	57

3.16	(a) Compartilhamento OFDMA com bloco de controle específico; (b) alocação de banda com <i>handshake</i> em três vias. Fonte Ref. [52].	58
4.1	Diagrama de blocos da arquitetura BS OFDMA PON.	62
4.2	(a) EVM x número de ONUs; (b) BER x SNR para 16 e 64 QAM. Fonte Ref. [21].	65
4.3	EVM x número da ONUs: a) Configuração aleatória; b) ONUs próximas - frequências altas. Fonte Ref. [21].	66
4.4	Comprimentos de onda utilizados pelos padrões de PON do IEEE e do ITU.	67
4.5	Coexistência entre a BS OFDMA PON e outras tecnologias.	68
4.6	Distribuição de subportadoras no <i>upstream</i> e <i>grant times</i>	71
4.7	Quadros de controle <i>GATE</i> e <i>REPORT</i>	72
4.8	Diagrama de tempo - controle e sincronismo.	73
4.9	Diagrama de alocação de subportadoras:(a) <i>Downstream</i> ; (b) <i>Upstream</i>	75
4.10	Estrutura de quadros da MAC BS OFDMA em três subcamadas.	76
4.11	Comparação entre o <i>BWmap</i> XGPON e o <i>BWmap</i> BS OFDMA PON.	77
4.12	Estrutura do <i>superframe</i> na subcamada de adaptação ao nível físico.	78
4.13	Diagrama de tempo comparando: (a) <i>BWmap</i> original da XGPON e (b) <i>BWmap</i> adaptado para BS OFDMA PON.	79
4.14	Diagrama de alocação de subportadoras BS OFDMA PON no <i>downstream</i>	80
4.15	Estrutura do cabeçalho (H) da camada de adaptação.	81
4.16	BSTC <i>payload</i> dos quadros de controle no <i>downstream</i>	82
4.17	Estrutura do quadro na subcamada de enquadramento no <i>upstream</i>	83

4.18	Estrutura do <i>superframe</i> no <i>downstream</i>	85
4.19	Estrutura do <i>superframe</i> no <i>upstream</i>	85
4.20	Diagrama temporal. (a) Chegada sem <i>WaitTime</i> ; (b) Sincronismo dos quadros com o uso do <i>WaitTime</i>	87
4.21	Transmissão do <i>Discovery frame</i> no <i>upstream</i>	88
4.22	<i>Throughput</i> no <i>upstream</i> - carga entre 10 e 120 % da capacidade do canal.	93
4.23	Atrasos para o tipo de serviço de voz.	94
4.24	Atrasos para o tipo de serviço de vídeo.	95
4.25	Atrasos para o tipo de serviço de dados.	95
4.26	Variação do atraso por tipo de serviço - (a) Voz e (b) Vídeo.	96
5.1	Configuração experimental considerando diferentes enlaces de SSMF (a), (b) e (c); Alocação das sub-bandas das três ONUs.	102
5.2	EVM em função da banda de guarda B_g para três ONUs usando 4-QAM: (a) 25 km; (b) 45 km; and (c) 65 km de SSMF.	104
5.3	EVM em função da banda de guarda B_g para três ONUs usando 16-QAM: (a) 25 km; (b) 45 km; and (c) 65 km de SSMF.	105
5.4	Constelações para 4 e 16-QAM com banda de guarda $B_g = 450$ MHz.	106
5.5	Configuração experimental considerando diferentes enlaces de SSMF (a), (b); Alocação das sub-bandas para 32 ONUs.	108
5.6	EVM em função do total de subportadoras de dados e da taxa total de bits (de 19.5 a 35.5 Gb/s), isto é, N_d variando de 64 a 115 subportadoras de dados por ONU. O limite de recuperação por FEC ($EVM = -16.4$ dB) corresponde a uma $BER = 3.8 \times 10^{-3}$	110

5.7	EVM em função da banda de guarda B_g variando de 500 a 2.5 MHz (5% a 0.025% de B_u) para as larguras de banda de 8.6 e 9.0 GHz (3520 e 3686 subportadoras de dados no total).	110
5.8	(a) Espectros dos sinais transmitido e recebido para 8.6 GHz (33.5 Gb/s) e $B_g = 78$ MHz (0.78% de B_u). (b) EVM_{RMS} medido para todas as subportadoras de dados após 20 km de SSMF.	111
5.9	(a) Espectros dos sinais transmitido e recebido para 8.6 GHz (33.5 Gb/s) e $B_g = 78$ MHz (0.78% de B_u), usando pré-ênfase. (b) EVM_{RMS} medido para todas as subportadoras de dados após 20 km de SSMF.	112
5.10	EVM por ONU com e sem pré-ênfase. Limite da FEC ($EVM = -16.4$ dB) Corresponde à $BER = 3.8 \times 10^{-3}$	113
5.11	Símbolos OFDM no <i>upstream</i> . (a) ONU#1; (b) ONU#2; (c) ONU#3; (d) ONU#4; (e) os quatro símbolos combinados após o PSC.	115
5.12	Setup experimental para <i>upstream</i> BS OFDMA PON. EA: Amplificador elétrico; PC: Controlador de polarização; MOD: Moulador de <i>Mach-Zhender</i> ; PSC: Divisor/combinador passivo; LP: Polarizador linear; PD: Foto-detector.	116
5.13	Atenuação devido aos diferentes estados de polarização. Terceira sub-banda é mais afetada.	117
5.14	Atenuação devido aos diferentes estados de polarização. Segunda sub-banda é mais afetada.	117
5.15	Atenuação devido às diferentes variações dos estados de polarização.	119
5.16	Setup experimental para <i>uplink</i> BS OFDM PON. EA: Amplificador elétrico; PC: Controlador de polarização; MZM: Modulador de <i>Mach-Zhender</i> ; PSC: Divisor/combinador passivo; PBC: Combinador de feixe de polarização; PD: Foto-detector.	121
5.17	EVM em função do atraso elétrico entre as ONUs em % da duração do CP.	123

5.18 EVM em função de Δ_{f_G} (<i>frequency gap</i>) para a) ONU#1 e b) ONU#2, considerando B2B e 25 km de SSMF.	124
5.19 EVM em função da banda de guarda B_G para a) $\Delta_{f_G} = 0$ Hz e b) $\Delta_{f_G} = 450$ MHz, considerando B2B e 25 km de SSMF.	125
5.20 EVM em função da potência óptica recebida no B2B óptico e após 45 km de SSMF, para a) 4-QAM e b) 16-QAM.	126

Lista de Acrônimos

ADC *Analog-Digital Converter* - Conversor analógico-digital

ASE *Amplified Spontaneous Emission* - Emissão espontânea amplificada

B2B *Back-to-back* - Conexão direta com enlace sem atenuação

BD *Burst Delimiter* - Delimitador de rajada

BER *Bit Error Rate* - Taxa de erro de bits

BPSK *Binary Phase-Shift Keying* - Chaveamento por deslocamento de fase binário

BS *Bandwidth Scalable* - Largura de banda escalonável

BSTC *Bandwidth Scalable Transmission Convergence Layer* - Camada de convergência de transmissão de largura de banda escalonável

BWmap *Bandwidth map* - Mapa de alocação de largura de banda

BWS *Bandwidth Spacing* - Banda de espaçamento entre sub-bandas

CAC *Call Admission Control* - Controle de admissão de chamadas

CBR *Constant Bit Rate* - Taxa de bits constante

CD *Chromatic Dispersion* - Dispersão Cromática

CDMA *Code Division Multiple Access* - Acesso múltiplo por divisão de código

CP *Cyclic Prefix* - Prefixo cíclico

CW *Continuous Wave* - Onda Contínua

DAC *Digital-Analog Converter* - Conversor digital-analógico

DBA *Dynamic Bandwidth Allocation* - Alocação dinâmica de largura de banda

DC *Direct Current* - Corrente contínua

DCT *Dynamic Circuit Transmission* - Transmissão via circuito dinâmico

DDO *Direct Detection of Optical Systems* - Detecção direta de sistemas ópticos

DMB *Dynamic Minimum Bandwidth* - largura de banda mínima dinâmica

DS *Downstream* - Fluxo de dados da operadora para o usuário

DSB *Double Side Band* - Banda lateral dupla

EoB *End of Burst* - Fim de rajada

EPON *Ethernet Passive Optical Network* - Redes ópticas passivas *Ethernet*

EVM *Error Vector Magnitude* - Magnitude do vetor de erro

E/O *Electrical to Optical* - Conversor eletro-óptico

FBT *Fixed Burst Transmission* - Transmissão por rajada fixada

FDM *Frequency Division Multiplexing* - Multiplexação por divisão de frequência

FDMA *Frequency Division Multiple Access* - Acesso múltiplo por divisão de frequência

FEC *Forward Error Correction* - Correção antecipada de erros

FFT *Fast Fourier Transform* - Transformada Rápida de Fourier

FSAN *Full Service Access Network* - Rede de acesso de serviço completo

FTTx *Fiber to the x (B, C, H...)* - Fibra até prédio, calçada, casa, etc.

FWM *Four-wave Mixing* - Mistura de quatro ondas

GA *Genetic Algorithms* - Algoritmos Genéticos

GPON *Gigabit-capable Passive Optical Network* - Rede óptica passiva gigabit

HEC *Hybrid Error Correction* - Correção de erro híbrida

ICI *Inter-Subcarrier Interference* - Interferência entre subportadoras

IDFT *Inverse Discrete Fourier Transform* - Inversa da Transformada Discreta de Fourier

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers* - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IFFT *Inverse Fast Fourier Transform* - Inversa da FFT

IMD *Inter-Modulation Dispersion* - Dispersão por intermodulação

IMDD *Intensity Modulation and Direct Detection* - Modulação por intensidade e detecção direta

ISI *Inter-Symbolic Interference* - Interferência Intersimbólica

ITU - T *International Telecommunication Union - Telecommunication* - União Internacional para as Telecomunicações

LAN *Local Area Network* - Rede Local

LLID *Logical Link Identifier* - Identificador de enlace lógico

LODS *Loss of Downstream Synchronization* - Perda de sincronismo de *downstream*

LP *Linear Polarization* - Polarizador linear

MAC *Medium Access Control* - Controle de acesso ao meio

MPCP *Multi-Point Control Protocol* - Protocolo de controle multiponto

MZM *Mach-Zhender Modulator* - Modulador Mach-Zhender

NRZ *No Return to Zero* - Não Retorno a Zero

NG-PON2 *Next Generation - PON stage 2* - Próxima Geração de PON estágio 2

OAM *Operation, Administration and Maintenance* - Operação, Administração e Manutenção

OBI *Optical Beating Interference* - Interferência por batimento óptico

ODN *Optical Distribution Network* - Rede de distribuição óptica

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - Multiplexação por divisão de frequências ortogonais

OFDMA *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - Acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais

OLT *Optical Line Terminal* - Terminal de linha óptica

OMCI *ONU Management and Control Interface* - Interface de gerenciamento e controle da ONU

OMI *Optical Modulation Index* - Índice de modulação óptica

ONT *Optical Network Terminal* - Terminal de rede óptica

ONU *Optical Network Unit* - Unidade de rede óptica

OOFDMA *Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM óptica

OSNR *Optical Signal to Noise Ratio* - Relação sinal ruído óptica

O/E *Optical to Electrical* - Conversor opto-elétrico

PBC *Polarization Beam Combiner* - Combinador de feixe de polarização

PD *Photo-Detector, Photo-Diode* - Fotodetector

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

PLOT *Physical Layer Overhead Time* - Tempo de tratamento de cabeçalho no nível físico

PMD *Physical Medium Dependent* - Dependente do meio físico

PON *Passive Optical Network* - Rede óptica Passiva

PRBS *Pseudo Random Bit Sequence* - Sequência de bits pseudo aleatória

PSC *Passive Splitter/Combiner* - Divisor/combinador passivo

QAM *Quadrature Amplitude Modulation* - Modulação por amplitude e quadratura

QoS *Quality of Service* - Qualidade de serviço

QPSK *Quadrature Phase-Shift Keying* - Chaveamento por deslocamento de fase em quadratura

RF *Radio Frequency* - Rádio Frequência

RMS *Root-Mean-Square* - valor médio quadrático

RTT *Round Trip Time* - Tempo de ida e volta

RSOA *Reflective Semiconductor Optical Amplifier* - Amplificador óptico semiconductor reflexivo

SC *Single Carrier* - Portadora única

SCM *Subcarrier Multiplexing* - Multiplexação por subportadora

SDH *Synchronous Digital Hierarchy* - Hierarquia Digital Síncrona

SDU *Service Data Unit* - Unidade de dados de serviço

SE *Spectral Efficiency* - Eficiência Espectral

SLA *Service Level Agreement* - Contrato de nível de serviço

SN *Serial Number* - Número de série

SNR *Signal to Noise Ratio* - Relação sinal ruído

SPM *Self-phase Modulation* - Auto-modulação de fase

SR *Status Report* - Relatório de status

SSB *Single Side Band* - Banda lateral única

SSMF *Standard Single Mode Fiber* - Fibra monomodo padrão

TDMA *Time Division Multiple Access* - Acesso múltiplo por divisão de tempo

TM *Traffic Monitoring* - Monitoramento de tráfego

TWDM *Time and wavelength division multiplexing* - Multiplexação por divisão de Tempo e Comprimento de Onda

US *Upstream* - Fluxo de dados do usuário para a operadora

VBR *Variable Bit Rate* - Taxa de bits variável

VOA *Variable Optical Attenuator* - Atenuador óptico variável

VoIP *Voice over Internet Protocol* - Voz sobre Protocolo da Internet

WDM *Wavelength Division Multiplexing* - Multiplexação por divisão de comprimento de onda

WDMA *Wavelength Division Multiple Access* - Acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda

WFB *Wavelength Filter Block* - Bloco de filtros WDM

XGEM *XGPON Encapsulation Mode* - Modo de encapsulamento da XGPON

XGPON *10 Gigabit Capable PON* - Rede óptica passiva a 10 gigabits

XPM *Cross-phase Modulation* - Modulação cruzada de fase

Resumo

A evolução das tecnologias de acesso baseadas em fibras ópticas, provocada pela crescente demanda por largura de banda exigida em virtude da expansão da Internet e de suas aplicações, culminou na criação de padrões de redes ópticas passivas (*PONs - Passive Optical Networks*), tais como XGPON (10 Gigabit Capable PON) recomendado pela União Internacional para Telecomunicações (*ITU-T Recs - International Telecommunication Union - Telecommunication Recommendations*) e 10G EPON (10 Gigabit Ethernet PON) padronizado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers*), que fornecem ao usuário final taxas de até 10 Gb/s por comprimento de onda. Mais recentemente o padrão ITU-T NGPON2 passou a utilizar a tecnologia TWDM que prevê taxas de até 40 Gb/s, porém, a partir do uso de quatro comprimentos de onda. Neste contexto, o trabalho propõe uma arquitetura de PON, baseada na multiplexação por divisão de frequências ortogonais (*OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), cuja tecnologia é capaz estender a eficiência espectral por comprimento de onda, além de reduzir significativamente o custo por bit das unidades de rede ópticas (*ONUs - Optical Network Units*). A arquitetura reúne o uso de modulação em intensidade da portadora oriunda de fonte de luz centralizada na linha de terminal óptica (*OLT - Optical Line Terminal*) e detecção direta em uma proposta que explora o acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais (*OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para oferecer um controle eficiente de largura de banda com maior flexibilidade e granularidade na alocação de banda aos usuários finais de acordo com sua demanda ou qualidade de serviço (*QoS - Quality of Service*) requerida. A proposta baseia-se na topologia em árvore, em que cada OLT óptica é conectada a pelo menos um dispositivo passivo divisor/combinador, prestando múltiplos serviços para até 32 ONUs, e, é capaz de fornecer taxas de transmissão acima de 33 Gb/s por comprimento de onda. Este trabalho apresenta resultados experimentais que comprovam a viabilidade desta infraestrutura física para PON baseada em OFDM/OFDMA, sugere adaptações na arquitetura e apresenta técnicas para melhoria da eficiência espectral do sistema. Como contribuição adicional, ainda descreve as principais recomendações para construção de uma camada de acesso ao meio em concordância com esta proposta de implementação denominada BS OFDMA PON (*Bandwidth Scalable OFDMA PON*).

Abstract

The need for high bandwidth networks driven by new digital services and technologies has culminated in the emergence of the new standards for passive optical networks (PONs) such as 10 Gigabit Capable PON (XG-PON) recommended by the ITU-T (International Telecommunications Union - Telecommunications) and 10 Gigabit Ethernet PON (10G EPON) standardized by the IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), both provide rates up to 10 Gb/s per wavelength to the end user. More recently, the ITU-T standard NG-PON2 started using TWDM technology that provides rates up to 40 Gb/s, but for that, it needs to use four wavelengths. In this context, this thesis proposes a PON architecture based on Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), capable to offer an efficient bandwidth control with greater flexibility and granularity in bandwidth allocation to the end users according to their demand or required Quality of Service (QoS). The proposed architecture exploits the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) to provide transmission rates above 33 Gb/s per wavelength. The proposal considers a tree topology where each optical line terminal (OLT) is connected to at least one passive device splitter/combiner, provides multiple services for up to 32 optical network units (ONUs). This work presents experimental results that demonstrate the feasibility of this physical infrastructure for passive optical network based on OFDM/OFDMA, suggests adaptations in the architecture and presents techniques for improving the system spectral efficiency. In addition, it also describes the main recommendations to build a medium access layer in accordance with this proposal, named BS OFDMA PON (Bandwidth Scalable OFDMA PON).

Capítulo 1

Introdução

Ao longo de anos de avanço das tecnologias de redes de comunicação de dados, foi possível verificar certa interdependência entre a evolução tecnológica empregada nas redes de acesso, o crescimento dos serviços oferecidos pela internet e a crescente demanda de tráfego exigida pelos usuários finais. Isto é, quando as demandas de novos assinantes ou a necessidade dos novos serviços por maiores taxas de transmissões exigem das prestadoras a realização de upgrade em sua infraestrutura, ampliando os recursos ofertados, tais recursos são rapidamente escasseados, seja pela integração de aplicações oferecidas por canais antes específicos ou pela criação de novas aplicações, e consequente adesão de outros novos assinantes. O fato é que essas demandas têm crescido em ambos os sentidos de transmissão, tanto da rede para o usuário final como do usuário final para a rede [1]. A Figura 1.1 ilustra bem este cenário.

Toda esta avalanche fez com que grandes operadoras no mundo, *Nippon Telegraph and Telephone Corporation*, *British Telecom*, *France Telecom* e outras, bem como seus fornecedores de equipamentos iniciassem discussões com o intuito de desenvolver soluções de acesso completas, que atendessem à grande gama de serviços multimídia [2]. Uma das soluções que atendem tais exigências, tanto no que diz respeito ao controle de acesso como à planta física, é a rede óptica passiva (*PON - Passive Optical Network*), especialmente por ser uma opção para banda larga óptica de larga escala com custo relativamente reduzido, uma vez que não emprega amplificadores ópticos ao longo do enlace.

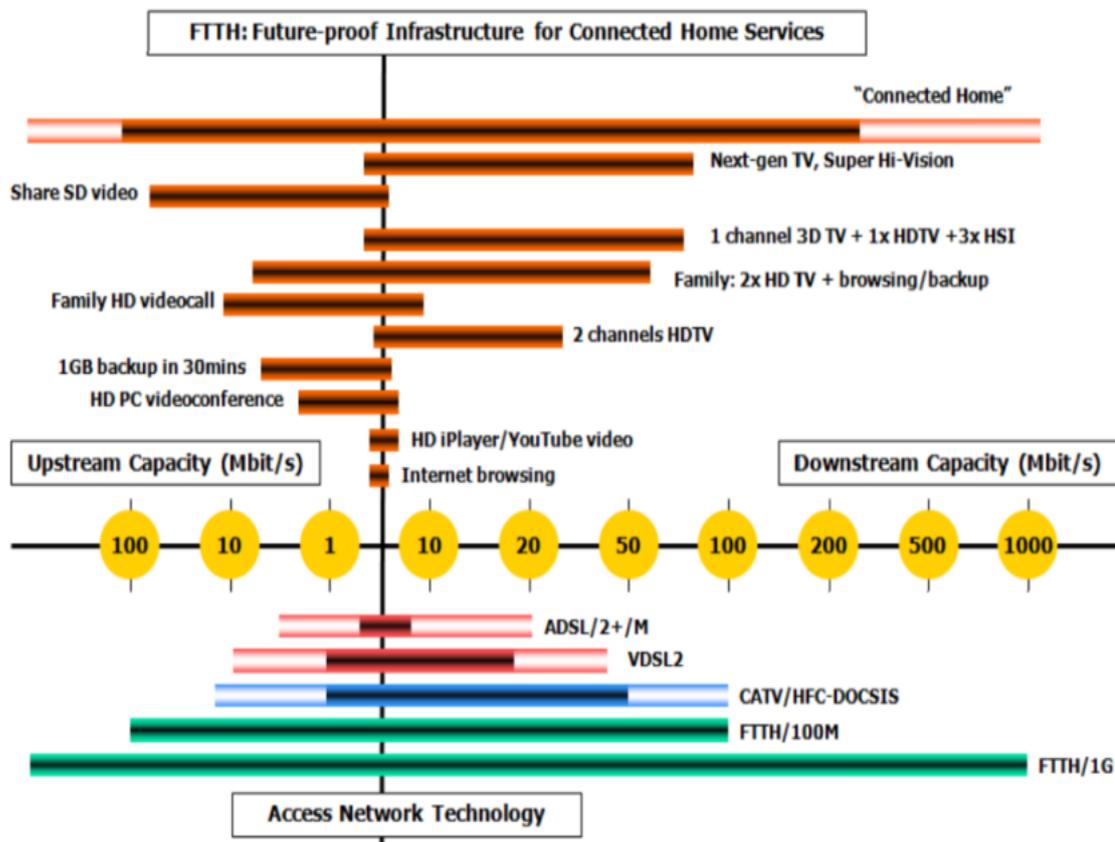


Figura 1.1: Capacidade das redes de acesso por aplicação e tecnologia. Fonte Ref.[1].

1.1 Rede de Acesso de Banda Larga Baseada em PON

Com a criação do comitê FSAN (*Full Service Access Network*), as PONs passaram a ser padronizadas sob a forma de recomendações da ITU-T (*International Telecommunication Union*) [3] ou de procedimentos do IEEE (*Institute of Electric and Electronic Engineers*). Outros países, especialmente os asiáticos, têm investido muito em redes ópticas passivas para atender demandas residenciais, já que este tem sido o grande desafio - estender a transmissão óptica até o usuário final mantendo a viabilidade econômica. Este tipo de rede óptica pode ser capaz de suprir os principais requisitos exigidos pelas aplicações, quais sejam: taxa de transferência de dados (*throughput*), atraso, variação de atraso (*jitter*) e taxa de erro. Assim, a PON tem se tornado alvo de testes e estudos sob diferentes enfoques, especialmente no que diz respeito a esquemas de compartilhamentos de banda de transmissão [4]. Utilizada para prover o acesso de última milha, com capacidade de suprir demandas dos diversos tipos de

serviços como voz, vídeo e dados, a PON é composta por um link de fibra óptica interligando um equipamento terminal de linha óptica (*OLT - Optical Line Terminal*), com maior complexidade e responsável pela conexão com redes de backbone, como as redes de transporte SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), a um elemento óptico passivo divisor/combinador (*splitter/combiner*), que, por sua vez, se conecta a vários outros equipamentos chamados unidades de rede óptica ou terminal de rede óptica (*ONU - Optical Network Units* ou *ONT - Optical Network Terminal*) localizados em condomínios, gabinetes nas calçadas, sites e residências. A Figura 1.2 apresenta o sistema FTTx (*Fiber-To-The-x*) que ilustra as várias possibilidades de interconexões usadas nas PONs:

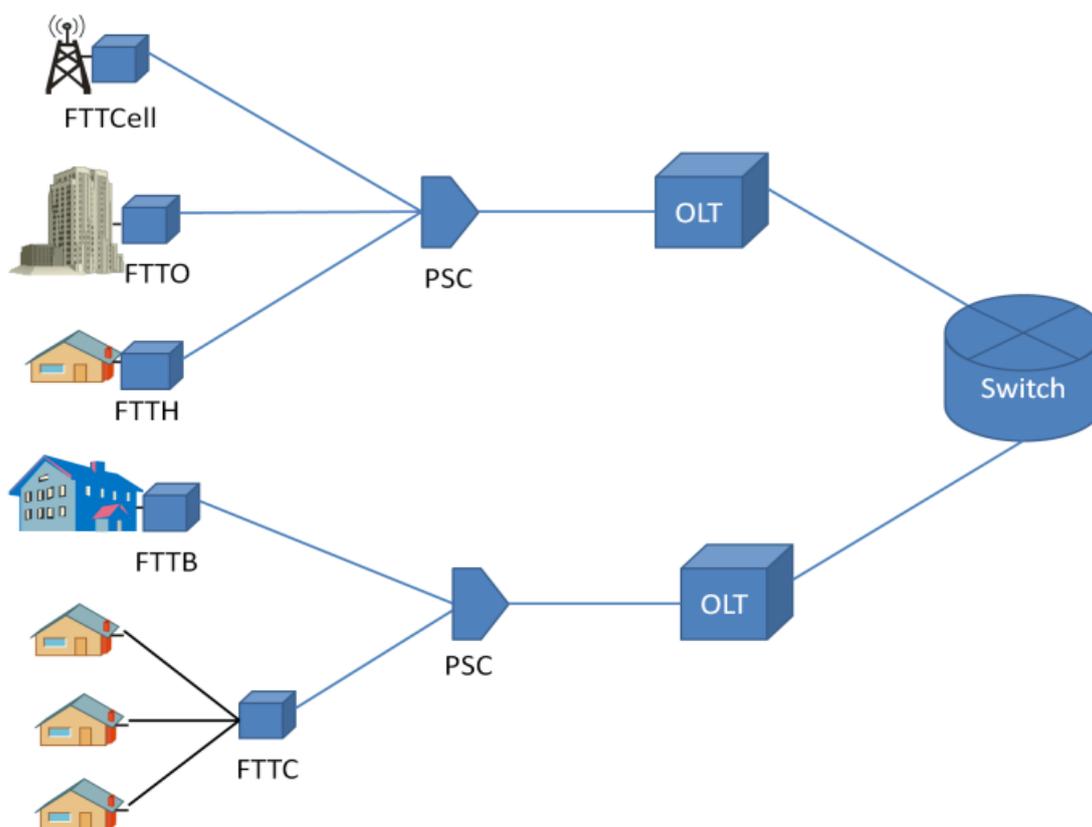


Figura 1.2: Sistema FTTx (*C - curb , B - Building, H - Home, O - Office*). Fonte Ref. [4].

Os padrões atuais para arquitetura de rede óptica passiva, 10G EPON (10 *Gigabit Ethernet PON*) [5, 6, 7, 8] e XGPON (10 *Gigabit-capable PON*) [9, 10], especificam protocolos para controle de acesso ao meio (*MAC - Medium Access Control*) com base no acesso múltiplo por divisão de tempo (*TDMA - Time Division Multiple Access*). Mais recentemente, a ITU padronizou a NG-PON2 [11, 12] que faz uso da multiplexação por divisão de tempo

e comprimento de onda (*TWDM - Time and wavelength division multiplexing*). Com esta tecnologia as taxas de transmissão chegam a alcançar até 40 Gb/s, utilizando quatro comprimento de ondas. Contudo, estes padrões não exploram a flexibilidade e a granularidade proporcionadas pela combinação das técnicas de multiplexação por divisão de frequências ortogonais (*OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e, conseqüentemente o acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais (*OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), e TDMA. Embora as tecnologias de acesso baseadas em fibras ópticas utilizem canais com capacidade para oferecer altíssimas taxas de transmissão de dados, os gargalos atuais encontram-se nos nós transmissores, receptores, especialmente no que diz respeito ao controle de acesso e distribuição dinâmica de banda. Portanto, o uso de uma tecnologia que permita alocar dinamicamente largura de banda tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, tende a aumentar a granularidade do sistema e, conseqüentemente, responder mais rapidamente às variações de demandas.

1.2 Rede Óptica Passiva Baseada em OFDMA

A necessidade de estender a capacidade de transmissão das redes ópticas de acesso tem fomentado o surgimento de novas tecnologias baseadas em multiplexação por subportadoras (*SCM - Subcarrier Multiplexing*) [13] e na multiplexação por divisão de frequências ortogonais ópticas (*OOFDM - Optical OFDM*) [13, 14, 15]. Tais tecnologias utilizam técnicas de modulação avançadas, abordadas por [13, 16, 17], que reduzem significativamente o custo por bit, oferecendo um grande potencial para aumento da capacidade e da flexibilidade de redes ópticas, mesmo em sistemas com um único comprimento de onda. A combinação de SCM com o uso de fontes de luz centralizada vista em [17, 18, 19, 20], incluindo a remodelação da portadora de downlink, como mostrado em [18, 20], e a redistribuição da portadora óptica discutida em [13], foram reunidas em uma proposta para utilização em redes ópticas, que apresenta uma nova arquitetura de acesso para PON com largura de banda escalonável baseada em OFDM/OFDMA, usando o esquema de fonte de luz centralizada para uplink. Esta proposta está completamente descrita em [21] e é denominada BS OFDM PON (*Bandwidth Scalable OFDM PON*).

1.3 Principais Contribuições do Trabalho

A partir do estudo de diversas propostas de arquitetura para próxima geração de redes ópticas passivas, este trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- Verificação experimental da arquitetura de nível físico proposta em [21]
 - Avaliação experimental da influência da banda de guarda normalmente usada para evitar os efeitos das distorções por intermodulação e batimento óptico próprios dos sistemas com detecção direta;
 - Avaliação experimental da influência do espaçamento entre subbandas (*frequency gap*) adotado em diversas arquiteturas, especialmente no sentido das ONUs para a OLT;
 - Melhoria da eficiência espectral com a eliminação do *frequency gap*, que provou ser desnecessário na arquitetura BS OFDM PON;
 - Melhoria da eficiência espectral através da redução da banda de guarda em relação a portadora óptica, considerando a potência óptica necessária na entrada do fotodetector e as exigências do formato de modulação.
 - Melhoria da eficiência espectral pelo uso de técnicas de processamento digital de sinal como a aplicação de pre-ênfase polinomial obtido a partir da resposta em frequência do sistema e da análise por subportadora.
- Recomendações para construção de camada de acesso ao meio (*MAC*) compatível com a infraestrutura física proposta em [21]
 - Proposta de uma arquitetura específica de camada 2 utilizando OFDMA, flexível na distribuição de largura de banda, com suporte a múltiplos protocolos de camada superior, que permita o transporte de aplicações de natureza variada, como voz, dados, vídeo e outras, com capacidade de fornecer tanto tráfego contínuo quanto em rajadas com garantia de qualidade de serviços (QoS) e com mecanismos de gerenciamento, controle e operação eficientes.
 - Proposta de modificações para o Padrão 10G EPON - Adaptação da estrutura dos quadros de controle e das mensagens de OAM (*Operation, administration and*

maintenance) e alteração da especificação do nível físico, a fim de estender a capacidade de transmissão em ambos os sentidos.

– Proposta de modificações para o Padrão XGPON - Adaptação da estrutura do mapa de alocação de largura de banda (*BWmap - Bandwidth map*) e das mensagens do PLOAM (*Physical Layer OAM*) e alteração das especificações do nível físico estendendo a capacidade de transmissão em ambos os sentidos.

Cabe resaltar que parte desta pesquisa foi realizada durante o estágio de Doutorado Sanduíche no Instituto de Telecomunicações de Aveiro, Portugal. Este desenvolvimento parcial, tanto no aspecto teórico quanto na coleta e tratamento de dados, foi de grande importância para verificação experimental proposta nesta tese.

1.4 Artigos Publicados

Esta seção relaciona os artigos publicados em conferências e periódicos nacionais e internacionais, resultantes dos estudos de doutoramento realizados até a composição deste texto. Todos os trabalhos estão relacionados à transmissão de sistemas OFDM com modulação em intensidade e recepção por detecção direta em sistemas ópticos. Alguns trabalhos são resultados de investigações experimentais com processamento offline e outros do uso de modelagem e simulação de protocolos.

São artigos publicados em periódicos:

1. **NUNES, Reginaldo B.**; SHAHPARI, Ali; SILVA, Jair A. L.; LIMA, Mário; ANDRÉ, Paulo B. S.; SEGATTO, Marcelo E. V.: Experimental Demonstration of a 33.5 Gb/s OFDM based PON with Subcarrier Pre-emphasis. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 00, Ed 00, pp. 1-4, 2016. DOI:10.1109/LPT.2016.2515060
2. PEREIRA, Esequiel da V.; ROCHA, Helder R. de O.; **NUNES, Reginaldo B.**; SEGATTO, Marcelo E. V.; SILVA, Jair A. L.: Impact of Optical Power in the Guard-band Reduction of an Optimized DDO-OFDM System. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 33(23), pp.4717 - 4725, 2015. DOI: 10.1109/JLT.2015.2481085.

3. **NUNES, Reginaldo B.**; ROCHA, Helder R. de O.; MELO, Darli A. A.; SIMÕES, Fabio D.; SEGATTO, Marcelo E. V.; SILVA, Jair A. L.: Transmission of CE-OFDM signals over MMF Links using Directly-Modulated 850 nm VCSELs. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 27, Ed. 3, p 315-318, 2014. DOI: 10.1109/LPT.2014.2370643.
4. **NUNES, Reginaldo B.**; ROCHA, Helder R. de O.; SEGATTO, Marcelo E. V.; SILVA, Jair A. L.: Experimental validation of a constant-envelope OFDM system for optical direct-detection. *Optical Fiber Technology (Print)*, v. 20, p. 303-307, 2014, DOI: 10.1016/j.yofte.2014.03.003.

Artigo aceito para publicação em periódico:

1. **NUNES, Reginaldo B.**; BACALHAU, João Marcos R.; SILVA, Jair A. L.; SEGATTO, Marcelo E. V.: A MAC Layer Protocol for Bandwidth Scalable OFDMA PON Architecture. *Computer Communications*, (2016) p.1-15, 2016.

São artigos publicados em anais de congressos:

1. PEREIRA, Esequiel da V.; ROCHA, Helder R. de O.; **NUNES, Reginaldo B.**; SEGATTO, Marcelo E. V.; SILVA, Jair A. L.: Reducing the Guard-band of a DDO-OFDM System by Multi-Objective Optimization. Microwave Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International, pp.1 - 5, 2015.
2. JULIÃO, Sérgio; **NUNES, Reginaldo B.**; VIANA, Diogo; JESUS, Paulo; SILVA, Nelson; OLIVEIRA, Arnaldo S.R. and MONTEIRO, Paulo.: High Spectral Efficient and Flexible Multicarrier D-RoF Modem using up to 1024-QAM Modulation Format. Optical Communication (ECOC), 41st European Conference on. v. 41, pp. 1-3, 2015
3. DALARMELINDA, Carlos A.; PEREIRA, Esequiel da V.; **NUNES, Reginaldo B.**; SEGATTO, Marcelo E. V.; SILVA, Jair A. L.: Experimental Performance Analysis of LTE-A Downlink Inband Carrier Aggregation in a RoF System. WTS 2015 - Wireless Telecommunications Symposium, At New York City, NY, USA, v. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1662.2569.

4. **NUNES, Reginaldo B.**; ROCHA, Helder R. de O.; SEGATTO, Marcelo E. V.; SILVA, Jair A. L.: Experimental Transmission of CE-OFDM Signals over 300 m of MMF Using an 850 nm VCSEL. Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP) © OSA 2014. DOI: 10.1364/LAOP.2014.LF1C.4.
5. **NUNES, R. B.**; COELHO, D. V. N.; SILVA, Jair. A. L.; SEGATTO, Marcelo. E. V.: An Experimental Assessment of the BSOFDM-PON Architecture. In: 18th International Conference on Optical Networking Design and Modeling - ONDM 2014, Stockholm - Sweden, p. 228-233, 2014. ISBN: 978-3-901882-60-9.
6. ALMEIDA, T. M.; **NUNES, R. B.**; ROCHA, H. R. O.; SEGATTO, Marcelo. E. V.; SILVA, Jair. A. L.. Performance Optimization of DDO-OFDM Systems Through Genetic Algorithms. In: 1st BRICS Countries Congress on Computational Intelligence (BRICS-CCI), Porto de Galinhas - PE - Brasil. BRICS Journal of Computational Intelligence, pp. 86-91, 2013. DOI:10.1109/BRICS-CCI-CBIC.2013.25.
7. **NUNES, R. B.**; SILVA, Jair. A. L.; COURA, Daniel. J. C.; SEGATTO, Marcelo. E. V.. Bandwidth Scalable OFDM PON Architecture – MAC Layer. In: WorkInnova - Denmark - South America Workshop, 2012, Vitória - ES Brasil. WorkInnova, 2012. Disponível em: http://www.servicesom.com/sites/workinnova/index.php?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=190

Capítulo 2

Arquitetura das Redes Ópticas Passivas

A rápida queda no custo das fibras ópticas e dos equipamentos baseados na tecnologia *Ethernet* proporcionou o surgimento de uma geração de redes de acesso passiva, da qual se destacam os padrões EPON e sua sucessora 10G EPON. Além destes, surgiram também padrões com características bem diferentes do padrão *Ethernet*, cuja finalidade era assegurar a compatibilidade com a diversidade de protocolos de camada superior. São eles os padrões GPON e sua sucessora XGPON. Em ambas as tecnologias a rede de distribuição óptica (*ODN - Optical Distribution Network*) é compatível com todas as arquiteturas do sistema FTTx, e a tecnologia de controle de acesso ao meio (*MAC - Medium Access Control*) adotada é o acesso múltiplo por divisão de tempo (*TDMA - Time Division Multiple Access*). Em 2013 a ITU padronizou a NG-PON2 (*Next Generation - PON stage 2*) [11], esforço iniciado pela FSAN em 2011, com finalidade de investigar tecnologias que permitissem um aumento de largura de banda para além de 10 Gb/s nas redes ópticas de acesso. Uma solução primária para NG-PON2 surgiu com o projeto de uma rede óptica passiva nos moldes da XGPON, porém multiplexada por divisão de tempo e comprimento de onda (*TWDM-PON - Time and Wavelength Division Multiplexed*). Este primeiro protótipo oferece capacidade de transmissão de 40 Gb/s usando, para isto, quatro comprimentos de onda. Em paralelo a estes desenvolvimentos, diversos estudiosos vêm propondo arquiteturas para redes de acesso que utilizam a multiplexação por divisão de frequências ortogonais [14, 21, 22, 23], este caminho tem sido escolhido, não só pelo aumento da eficiência espectral do sistema, mas também por permitir modelos de acesso ao meio com alta flexibilidade, granularidade e escalabilidade.

Os modelos de camada de controle de acesso ao meio encontrados na literatura, utilizam diferentes técnicas para divisão do canal de comunicação e compartilhamento dos recursos da rede. As principais técnicas de acesso múltiplo são:

- acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA) – nesta técnica, cada usuário utiliza uma parte da largura de banda do canal correspondente a uma fatia do espectro total;
- acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) – cada usuário utiliza toda a largura de banda do canal durante um intervalo de tempo, tal intervalo pode ser fixo ou variável de acordo com a demanda. Além disto, o tempo de retorno ao primeiro usuário pode ser fixo, a fim de garantir requisitos de aplicações síncronas, ou variável de modo a atender melhor o tráfego em rajadas;
- acesso múltiplo por divisão de código (CDMA) – nesta técnica, cada usuário utiliza um código ortogonal, de modo que cada bit é representado por uma sequência de *chips*, bits em uma frequência maior que o bit original, gerando um espalhamento espectral do sinal. Assim, vários usuários podem transmitir simultaneamente no canal e recuperar a informação recombinação o sinal recebido com o seu código;
- acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda (WDMA) – cada usuário faz uso de um comprimento de onda específico para transmitir e receber suas informações. Apesar do princípio ser o mesmo empregado no FDMA, a nomenclatura difere por tratar-se de canais de espectro largo utilizados em fibras ópticas, de modo que sua separação se dá em medida de comprimentos de onda;
- acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais (OFDMA) – esta técnica também divide o canal na frequência, entretanto, difere do FDMA, pois utiliza portadoras em frequências ortogonais, cujo produto escalar é nulo. Deste modo, não são necessárias bandas de guarda e as portadoras são estabelecidas bem próximas umas das outras e um único comprimento de onda pode ser dividido em muitas subportadoras. Porém, são necessárias técnicas específicas, como a transformada e a transformada inversa de Fourier, para combinar e recuperar os sinais de cada subportadora.

Além destes, existem outros modelos que combinam uma ou mais destas técnicas.

Neste Capítulo, as seções que seguem apresentam as características dos padrões *Ethernet* PON, Gigabit Capable PON e NG-PON2, além de tecer uma comparação considerando suas principais características.

2.1 Características das *Ethernet* PONs

O padrão 10G EPON tem como característica o emprego da tecnologia *Ethernet* com adaptações para transmissão em meio óptico. A Figura 2.1 mostra sua estrutura de quadro, onde o preâmbulo *Ethernet* é substituído por campos de controle.

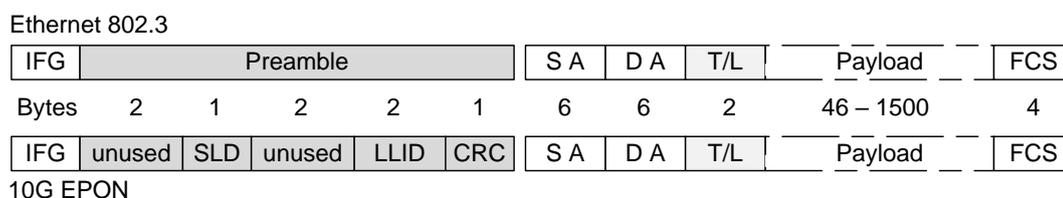
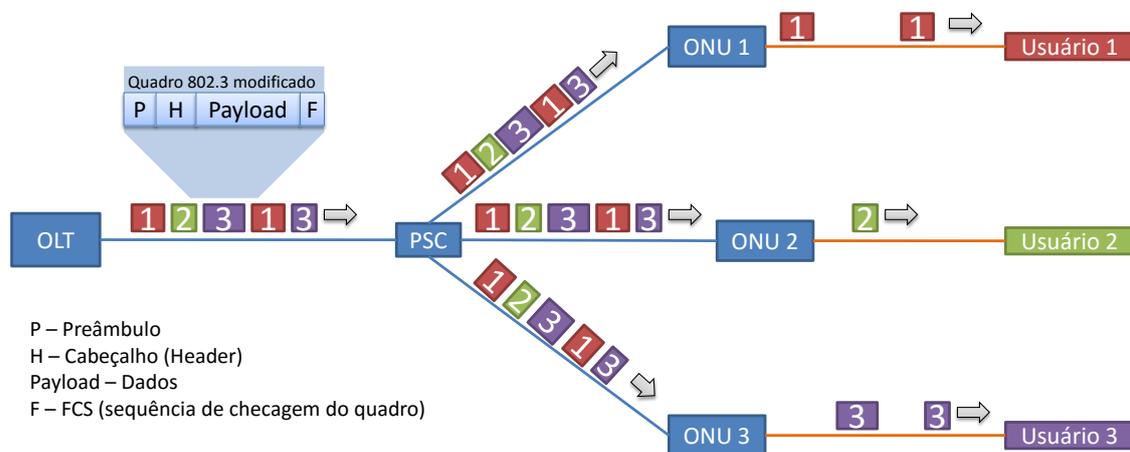


Figura 2.1: Comparação entre os quadros *Ethernet* IEEE 802.3 e 10G EPON.

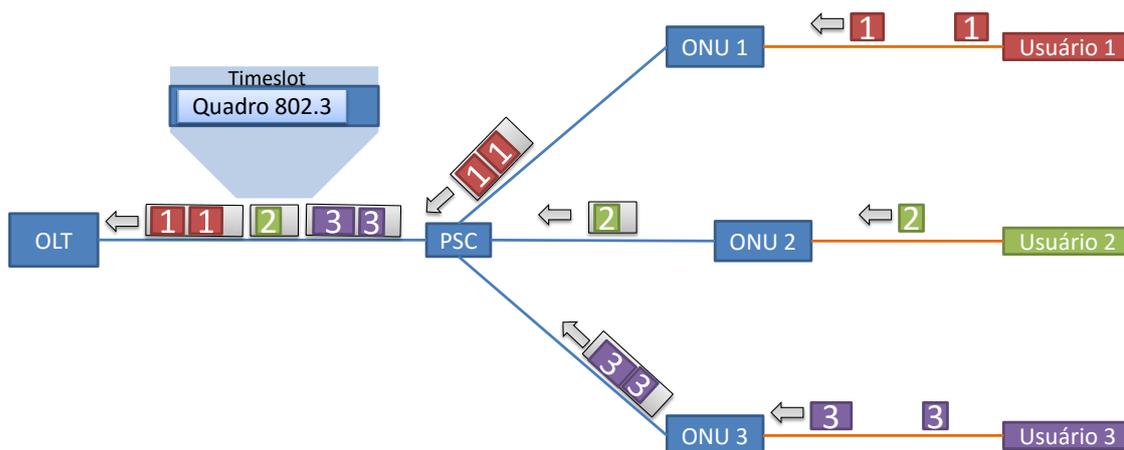
Esta arquitetura tem o controle de acesso ao meio baseado no protocolo de controle multi-ponto (*MPCP - Multi-Point Control Protocol*), onde cada uma das várias instâncias MPCP na OLT comunica-se com sua respectiva instância em uma das ONUs. Isto é conseguido pela adição de um campo identificador de enlace lógico (*LLID - Logical Link Identifier*) no preâmbulo de cada quadro IEEE 802.3, e de mecanismos para diferenciar os quadros de dados dos de controle [5].

As Figuras 2.2. a. e b. apresentam a topologia em árvore utilizada nesta arquitetura. A 10G EPON é bastante eficiente no transporte de dados baseado em pacotes, porém, não possui ferramentas explícitas para dar suporte ao transporte TDM síncrono (Native TDM), ou seja, realiza um TDMA estatístico. Uma grande vantagem desta tecnologia, no que tange à infraestrutura física, é sua simplicidade, pois permite o uso do mesmo canal físico (a mesma fibra) para transmissão de dados nos dois sentidos, tanto no fluxo de dados da OLT para as ONUs (*downstream*), como no fluxo de dados das ONUs para a OLT (*upstream*), neste caso, *downstream* e *upstream* usam comprimentos de ondas diferentes. Além disso, várias redes deste tipo podem ser acomodadas na mesma rede óptica de distribuição (*ODN - Optical*

Distribution Network), quando utilizada a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM - wavelength division multiplexing*).



a) Trafego no sentido Downstream



b) Trafego no sentido Upstream

Figura 2.2: Compartilhamento de canal 10G EPON. a) *Downstream*; b) *Upstream*. Fonte Ref. [5].

No sentido de *downstream* a OLT transmite os dados para todas as ONUs, via *broadcast*, e cabe às ONUs extrair os pacotes identificados com seu *LLID*, como ilustra a Figura 2.2 a. A Figura 2.2 b. apresenta a transmissão na direção de *upstream*. Neste sentido as ONUs compartilham o canal por TDMA. A alocação de janelas de tempo (*timeslots*) no compartilhamento de *upstream* é estatística e determinada por um algoritmo de alocação dinâmica de banda (*DBA - Dynamic Bandwidth Allocation algorithm*), que se baseia nas mensagens

contidas nos quadros de controle. Entretanto, o padrão 10G EPON deixa a cargo de cada fornecedor a especificação de algoritmos de DBA, por entender que existe uma dependência entre os contratos de nível de serviço (*SLAs - Service Level Agreement*) e o tipo adequado de algoritmo [8].

2.1.1 Mecanismos de Controle e Sincronismo

O mecanismo de controle utilizado nas redes com tecnologia PON é conhecido como esquema centralizado dinâmico, porque este tipo de rede não permite a comunicação direta entre as ONUs, devido às propriedades de direcionamento dos divisores/combinadores (*splitters/combiners*). As mensagens de controle permitem à OLT conhecer o tamanho das filas de todas as ONUs (mensagem *REPORT*), e, por conseguinte, alocar janelas de tempo (mensagem *GATE*) de acordo com suas demandas [7, 8]. Além disso, o campo *Time Stamp*, que carrega a marca temporal de início da transmissão da ONU, e o tempo de ida e volta (*RTT - Round Trip Time*) dos pacotes permitem à OLT calcular o tempo máximo de processamento de cada ONU. Deste modo, ela pode estabelecer uma sequência adequada de mensagens *GATE*, de modo a não permitir sobreposição das transmissões das ONUs. Como as ONUs estão a diferentes distâncias da OLT, a coordenação das transmissões deve proceder de forma a evitar sobreposições, ainda que parciais, mas de maneira a reduzir o intervalo entre transmissões sucessivas das várias ONUs. Isto requer um mecanismo de compensação do *ranging*, isto é, compensação das diferenças entre os *RTTs* de uma mesma ONU. A Figura 2.3 mostra a relação entre os tempos utilizados no cálculo dos *RTT's*:

OLT envia a mensagem *GATE* no instante $T1$ e coloca na mensagem um *time stamp* = $T1$. A ONU recebe a mensagem *GATE* no instante $T2$ e registra o valor do *time stamp* = $T1$ recebido, envia a mensagem *REPORT* no instante $T3$, preenchendo o campo adequado com *time stamp* = $T4$, calculado de modo que $T4 - T1 = T3 - T2$. Na prática corresponde a ter alterado o valor do relógio local quando da recepção da mensagem *GATE*, substituindo $T2$ por $T1$. A OLT recebe a mensagem *REPORT* no instante $T5$, e assim é capaz de determinar os tempos de propagação e de processamento na ONU [7]:

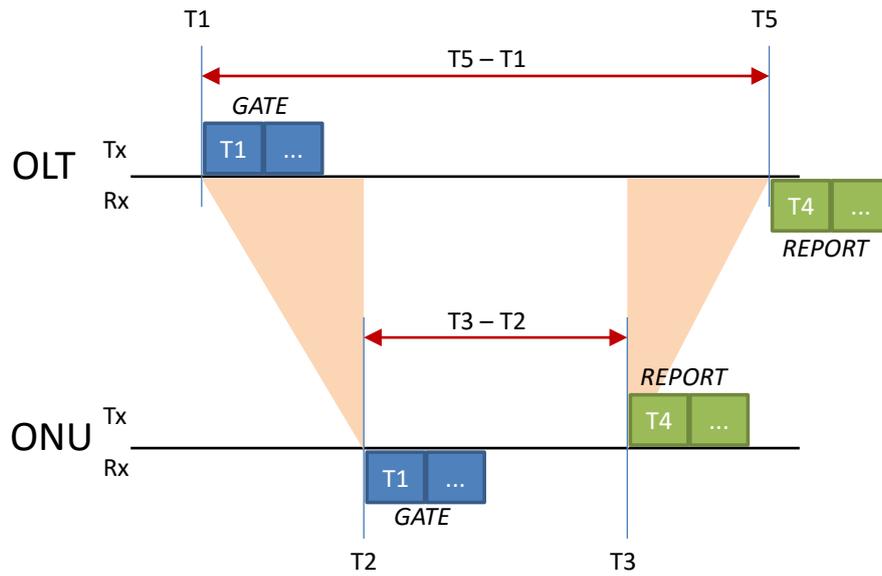


Figura 2.3: Tempos de atraso envolvidos no cálculo dos $RTT's$. Fonte Ref. [7].

$$RTT = T5 - T1 \tag{2.1}$$

$$T_{proces.} = T3 - T2 = T4 - T1 \tag{2.2}$$

$$T_{propag.} = (T5 - T1) - (T3 - T2) = (T5 - T1) - (T4 - T1) = T5 - T4 \tag{2.3}$$

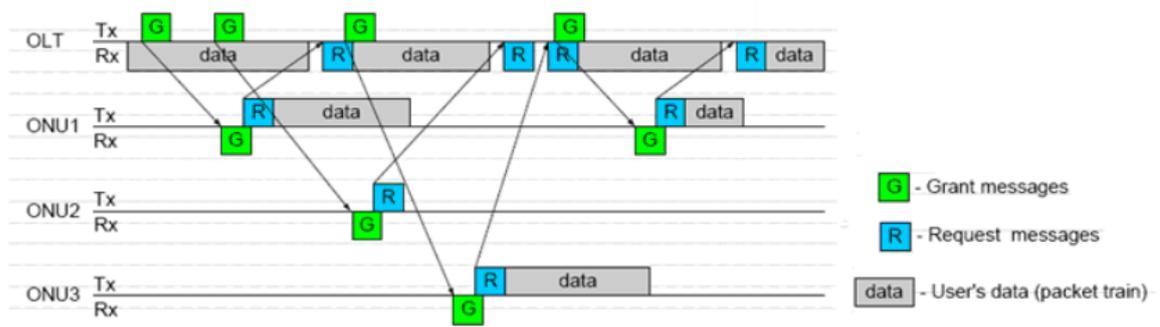


Figura 2.4: Alocação de *timeslots* - Diagrama de tempo (*GATE* e *REPORT*). Fonte Ref. [7].

A OLT permite que cada ONU transmita seus dados usando alocação de *timeslot* de forma canalizada (*pipelined timeslot assignment*), deste modo, manda para a ONU#n a mensagem *GATE* antes de receber dados da ONU#n-1, conforme a ilustra Figura 2.4 [7]. O processo de alocação deve permitir que todas as ONUs tenham *timeslots* durante um inter-

valo de tempo máximo configurável usualmente para 1, 2, 4 ou 8 milissegundos (*Período Cíclico Máximo*) [24].

A taxa de transmissão pode ser simétrica com 10 Gbps para ambos os sentidos, ou assimétrica, cuja taxa no *upstream* é reduzida para 1.25 Gbps. Utiliza transceptores ópticos de modo contínuo para a ligação de *downstream* (*downlink*) e de modo intermitente para a ligação de *upstream* (*uplink*). No modo intermitente, cada ONU deve habilitar seus lasers para transmitir a rajada de dados e desabilitá-los em seguida. Neste caso, o consumo de banda exigido pelo uso de intervalo de guarda pode chegar a 18% da banda total [7]. Possui diferentes classes de potência requerida, que são dependentes da distância máxima entre OLT e ONU, e do número de ONUs agregadas [5, 25].

O modo de transmissão intermitente, impõe um alto custo, em termos de largura de banda, devido aos parâmetros $T_{on/off}$ - intervalos de tempo necessários à estabilização quando o laser é ligado e desligado, T_{agc} - Tempo para controle de ganho do sinal, e T_{cdr} - tempo de recuperação de sincronismo e de dados. A Figura 2.5 mostra a estrutura interna da rajada de dados do canal de upstream considerando todos estes intervalos, bem como as sequências de bits para indicar início e fim dos dados (*BD - Brust Delimiter* e *EoB - End of Brust*) protegidos por bits de redundância (*FEC - forward error correction*). Estas e outras características de nível físico, tais como codificação de linha, comprimentos de onda utilizados e alcance máximo, estão elencadas na Tabela 2.1 da Seção 2.4.

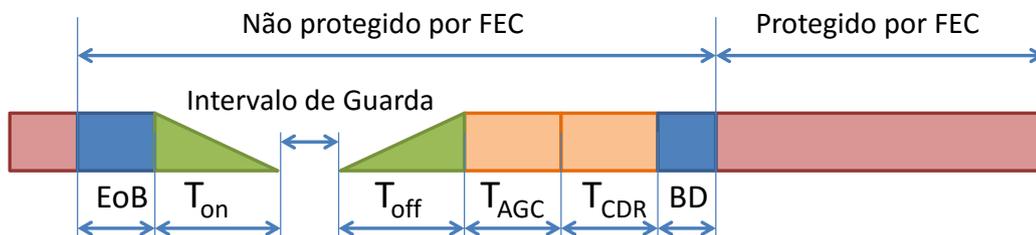


Figura 2.5: Estrutura interna dos quadros 10G EPON no *upstream*. Fonte Ref. [7].

2.1.2 Processo de Registro de ONUs

Todas as ONUs registradas como ativas na OLT possuem um *LLID unicast* e, portanto, estão aptas a participar do processo de distribuição de *timeslots*. Para que uma nova ONU possa se registrar, a OLT envia periodicamente um quadro de *GATE* contendo um *LLID* específico (*LLID de broadcast*), garantindo um intervalo de tempo para as ONUs solicitarem seu registro. Neste intervalo, o canal funciona como um domínio de colisão, e é disputado por quadros de controle do tipo *REGISTER_REQ*. Este tipo de quadro contém o *Serial – ID*, *Interface – ID* ou *MAC Address* da ONU solicitante, e é enviado para solicitar que a OLT inclua a ONU no processo de transmissão gerenciado pelo protocolo MPCP. A OLT, por sua vez, responde com um quadro do tipo *REGISTER* associando o *MAC Address* a um *LLID unicast*. Então, a ONU envia um quadro do tipo *REGISTER_ACK* confirmando sua participação.

2.2 Características das *Gigabit Capable* PONs

A arquitetura XGPON possui um transporte realizado através da camada de convergência de transmissão XGTC (*XGPON Transmission Convergence Layer*), que é estruturada em três subcamadas (Figura 2.6 e Figura 2.7).

A subcamada de adaptação de serviços (*Service adaptation sublayer*) utiliza o método de encapsulamento XGEM (*XGPON Encapsulation Method*), com o objetivo de encapsular quadros de diversos tipos de serviços de camada superior (Ethernet, TDM, ATM) e multiplexá-los em uma única carga útil (*payload*), atribuindo a cada quadro ou fragmento um identificador de porta (*XGEM Port-ID - Port Identifier*). A subcamada de enquadramento (*Framing Sublayer*) é responsável por dar suporte ao funcionamento da PON, com campos de cabeçalho necessários para prover o seu gerenciamento e demais funcionalidades. A subcamada de adaptação ao nível físico (*Physical Adaptation Sublayer*) agrega as funções de ajustar a modulação da portadora óptica em função do stream de bits e o funcionamento do transmissor óptico a fim de melhorar a detecção e recepção do sinal.

A XGPON também utiliza topologia em árvore, porém, para dar suporte a vários serviços

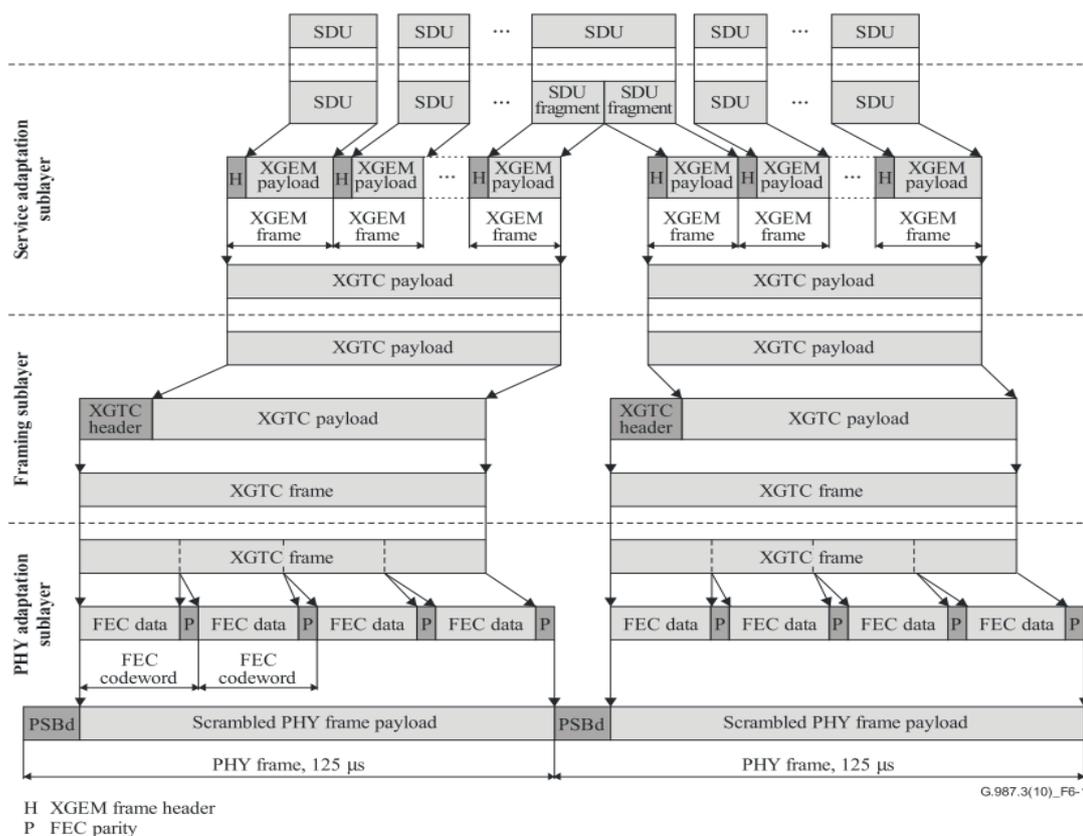


Figura 2.6: Encapsulamento de SDUs no *downstream* - XGPON. Fonte Ref. [10].

de camada superior, inclusive aos serviços TDM, sua arquitetura de protocolos é mais complexa e a transmissão de dados é realizada no modo síncrono com quadros de 125 μ s [9].

2.2.1 Mecanismos de Controle e Sincronismo

O controle, operação e gerenciamento das informações são realizados por três canais: OAM incorporado, PLOAM e OMCI (*ONU Management and Control Interface*) [26]. Os dois primeiros canais gerenciam as funções dependentes do meio físico (*PMD - Physical Medium Dependent*) e as funcionalidades das subcamadas do XGTC. O OMCI provê um sistema uniforme de gerenciamento para os serviços das camadas superiores.

Na direção de *downstream*, a transmissão se dá via *broadcast* e a funcionalidade de multiplexação de tráfego é centralizada na OLT. Os quadros são enviados a todas as ONUs, como nas EPONs, entretanto cabe às ONUs filtrarem os quadros de interesses com base no *XGEM Port – ID* (Figura 2.8 a.). Além disso, a OLT aloca largura de banda para os

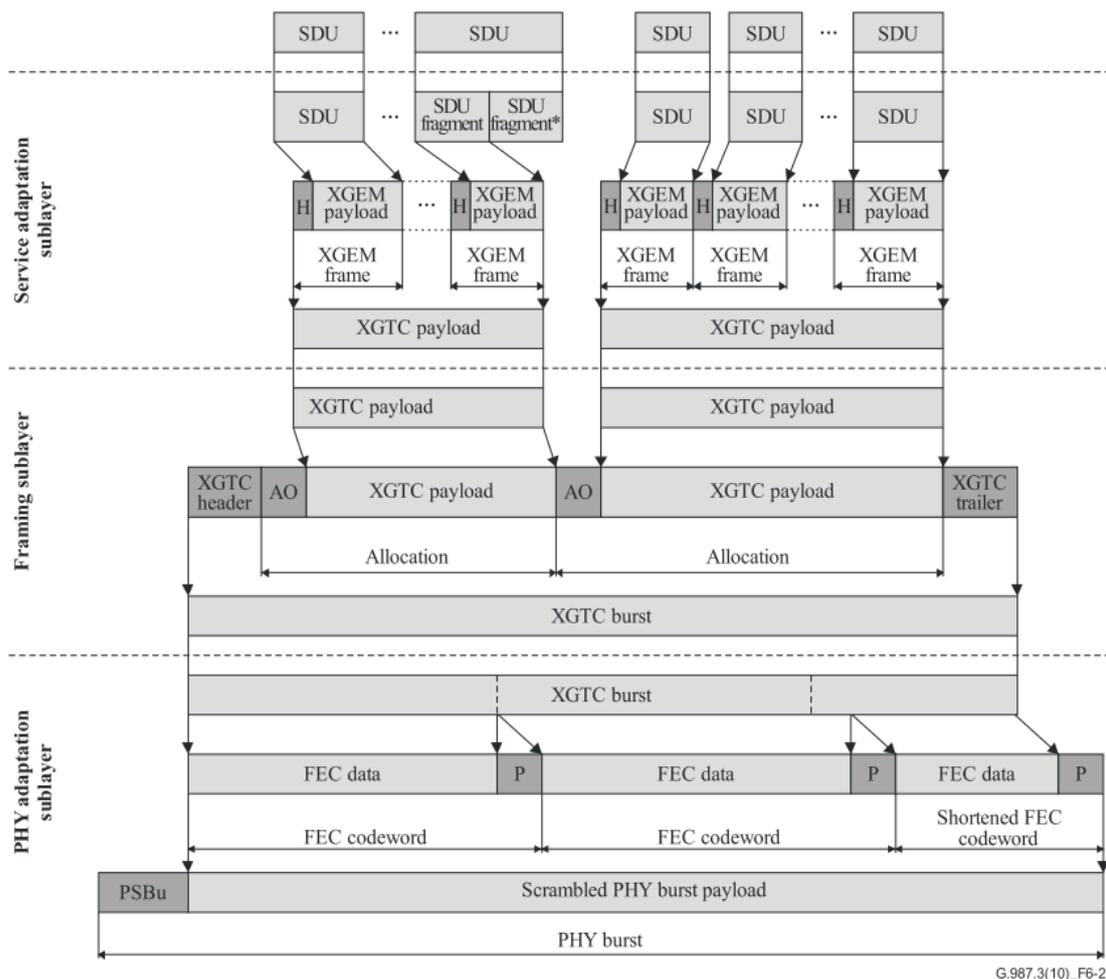


Figura 2.7: Encapsulamento de SDUs no *upstream* - XGPON. Fonte Ref. [10].

tráfegos gerados a partir das ONUs utilizando identificadores de alocação (*Alloc-IDs* - *Allocation Identifiers*) e um mapa de distribuição de banda denominado *BWmap* (*Bandwidth Distribution Map*) [10].

No sentido de *upstream* o canal é compartilhado por TDMA síncrono pelas diversas ONUs. A principal diferença reside na estrutura de quadros, que possui um mecanismo de alocação de tempo mais sofisticado, pois considera a demanda de recurso por tipo de serviço. As ONUs identificam os *Alloc-IDs* concedidos pela OLT, multiplexam os diferentes tráfegos conforme a distribuição de banda, encapsulam em quadros XGEM, preenchendo os campos apropriados com seus *XGEM Port-IDs* (Figura 2.8 b.), e enviam as rajadas para

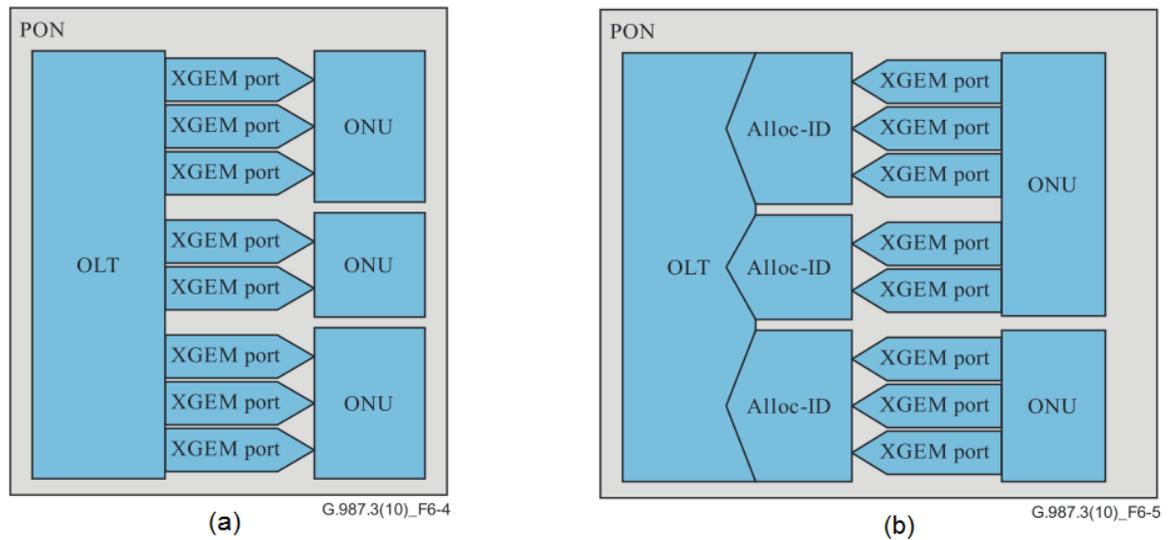


Figura 2.8: Multiplexação XGPON: (a) *Downstream*; (b) *Upstream*. Fonte Ref. [10].

a OLT cada uma a seu tempo [10].

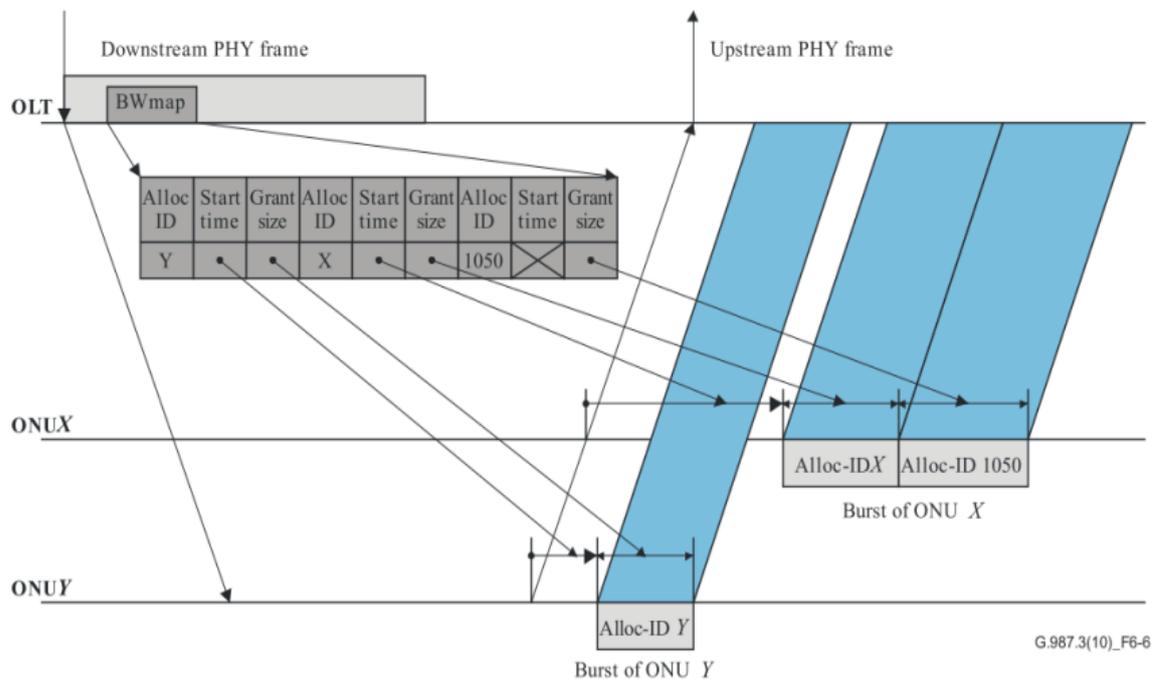


Figura 2.9: Controle de acesso ao meio do XGTC. Fonte Ref. [10].

O *BWmap* indica, para cada ONU, o início (*start time*) e o intervalo de tempo de transmissão (*grant*), oferecendo oportunidade para todas as ONUs enviarem suas rajadas a cada $125 \mu\text{s}$, sem que haja sobreposição entre elas (Figura 2.9). A XGPON especifica um algoritmo de alocação de banda para montar o *BWmap* que faz a avaliação de demanda com

base no monitoramento do tráfego (*TM – Traffic Monitoring*) ou nas informações sobre filas fornecidas pelas ONUs (*SR – Status Report*) [10].

Assim como nas EPONs, as transmissões no *upstream* são separadas por um intervalo de tempo denominado $T_{plo} = T_g + T_p + T_d$ (*PLOT - Physical Layer Overhead Time*), considerando o intervalo de guarda $T_g > T_u + T_{on}$ e $T_g > T_{off} + T_u$, onde T_u é denominado intervalo de incerteza, T_{on} e T_{off} são os tempos gastos para ligar e desligar o laser, respectivamente, T_p é o tempo do preâmbulo usado para recuperação de relógio e T_d é o intervalo de tempo delimitador usado para sincronismo do quadro de *upstream*. A Figura 2.10 apresenta estes intervalos dentro da estrutura interna dos quadro físicos [10].

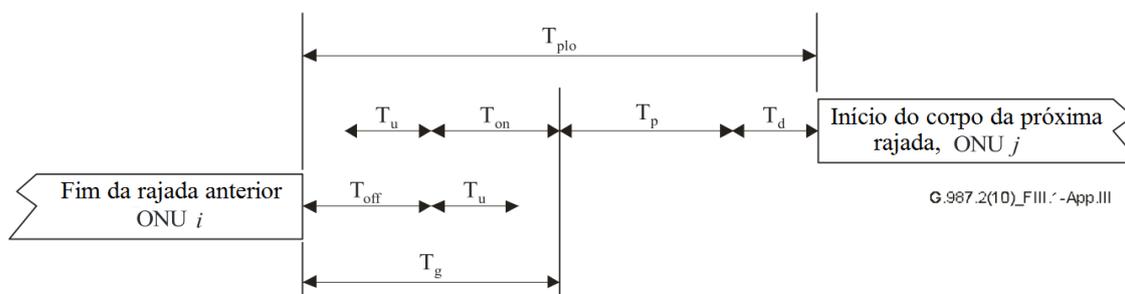


Figura 2.10: Estrutura interna dos quadros 10G EPON no *upstream* - EoB. Fonte Ref. [10].

2.2.2 Mecanismo de Ativação das ONUs

A XGPON define seis estados e dois temporizadores para dar suporte ao procedimento de ativação das ONUs [10]. A Figura 2.11 mostra um diagrama de estados das ONUs contendo os principais eventos e transições associadas.

No estado inicial $O1$ a ONU tenta identificar o início do quadro de downstream enviado pela OLT. A ONU entra neste estado ao ser ligada, ou em caso de falha ou erro de sincronismo. Assim que a ONU conseguir a sincronização, poderá obter as informações do perfil de rajadas de upstream e responder ao grant de solicitação de número serial (*SN - serial number*), para informá-lo à OLT. A partir de então, passa ao estado $O2 - 3$, onde aguarda o recebimento do seu *ONU - ID* próprio. Tendo recebido seu identificador, a ONU passa ao estado $O4$, torna-se apta a responder ao *grant* de solicitação de *ranging*. Neste estado

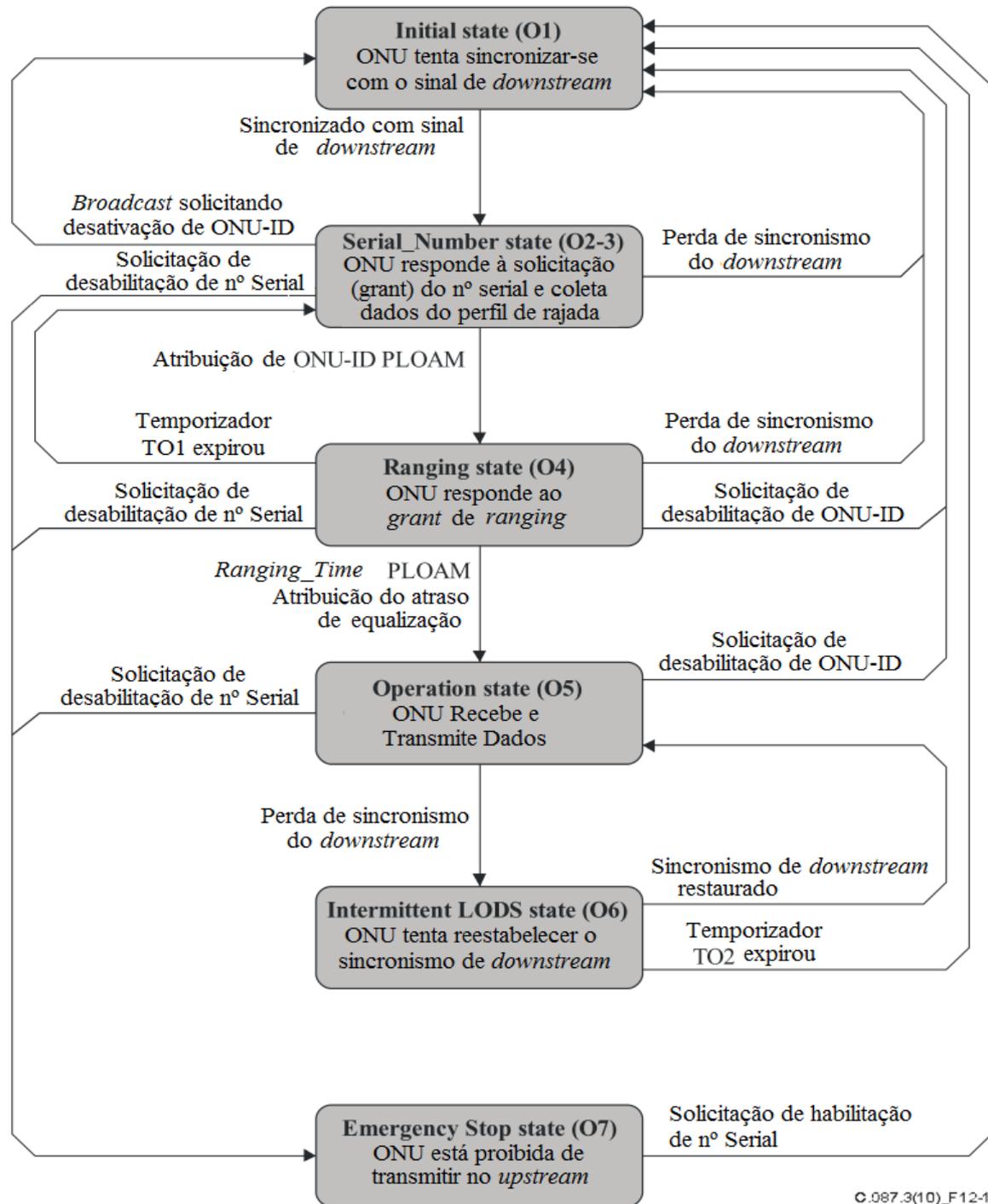


Figura 2.11: Diagrama de estados da ONU. Fonte Ref. [10].

a ONU aguarda, por um intervalo $TO1$, a atribuição do atraso de equalização. Este mecanismo permitir que a OLT determine seu atraso de equalização usado no cálculo dos *start times* das ONUs. Se durante o intervalo $TO1$ o atraso foi lhe atribuído, a ONU entra no

estado *O5*, pronto para receber e transmitir dados, caso contrário ela volta ao estado inicial. A ocorrência de uma perda de sincronismo enquanto a ONU se encontra no estado *O5*, vai levá-la ao estado de perda intermitente de sincronismo de *downstream* (*LODS - Loss of Downstream Synchronization*)(*O6*), que permite à ONU tentar restabelecer este sincronismo durante o intervalo de tempo *TO2*. Ainda existe um estado denominado parada de emergência *O7*, no qual a ONU mantém o sincronismo de *downstream*, mas fica proibida de encaminhar os dados recebidos no *downlink* e de enviar dados pelo *uplink*, até receber a solicitação de habilitação do número serial [10].

2.3 Características das NG-PON2 (TWDM-PONs)

A NG-PON2 tornou-se o primeiro padrão em que a WDM foi introduzida para aumentar a capacidade das PONs. Em uma TWDM-PON a taxa agregada é ampliada pelo empilhamento XG-PONs utilizando múltiplos pares de comprimentos de onda. Um sistema XG-PON, como visto anteriormente, oferece as taxas de acesso de 10 Gb/s no *downstream* e 2,5 Gb/s no *upstream*. Um sistema TWDM-PON com quatro pares de comprimentos de onda é capaz de fornecer 40 Gb/s para *downstream* e 10 Gb/s para *upstream*. Os quatro comprimentos de onda são multiplexado e demultiplexados por uma matriz de transceptores WDM de 4 x 10 Gb/s na OLT, assim, é feito um broadcast de todos os comprimentos de onda para todas as ONUs, e cada ONU é equipada com um único canal transceptor de 10 Gb/s [12].

A arquitetura básica TWDM-PON é mostrado na Fig. 2.12, onde quatro XG-PONs são empilhadas usando quatro pares de comprimentos de onda, (λ_1, λ_5) , (λ_2, λ_6) , (λ_3, λ_7) e (λ_4, λ_8) . Para facilitar a implantação da rede e o gerenciamento de registro, as ONUs são equipadas com transmissores e receptores ajustáveis. O transmissor ajustável pode ser sintonizado para qualquer um dos quatro comprimentos de onda de *upstream*. Assim como, o receptor também pode ser sintonizado para qualquer um dos quatro comprimentos de onda do *downstream*. A fim de atender um orçamento de potência mais elevado do que o da XG-PON, amplificadores ópticos (OA) são usados tanto no lado da OLT, para amplificar os sinais no *downstream*, como para pré-amplificar os sinais no *upstream*. A rede de distribuição óptica (ODN) permanece passiva, visto que os OAs e o Mux/Demux WDM são colocados

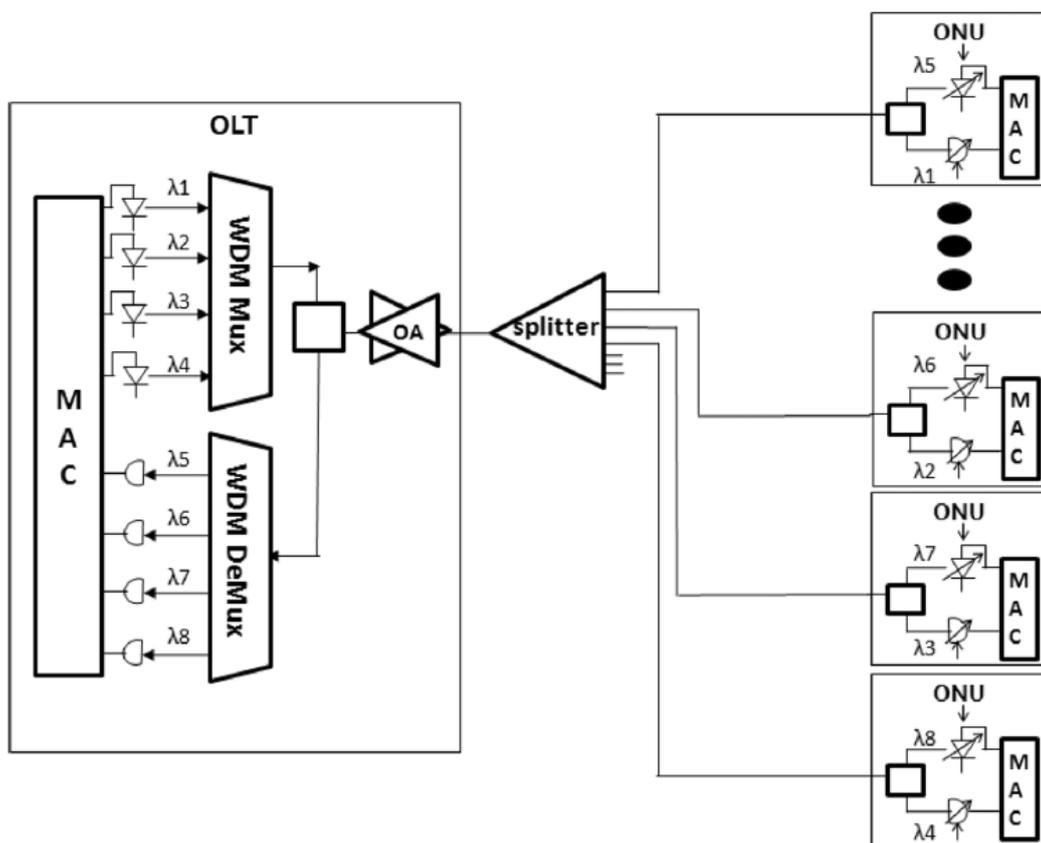


Figura 2.12: TWDM-PON system diagram. [12].

na OLT e não na ODN [12]. Opcionalmente esta arquitetura básica pode incluir mais pares de comprimentos de onda e, conseqüentemente, empilhamentos com taxas diferentes. Este tipo de sistema é interessante para o mercado, uma vez que vários operadores podem compartilhar a mesma infra-estrutura de rede física. Outro ponto importante, é a possibilidade de proporcionar tarifas como as da Gigabit PON (XG-PON) em cada par de comprimentos de onda.

Tendo em vista que esta arquitetura utiliza mais de um comprimento de onda e que este trabalho tem como foco o aumento da eficiência espectral e da flexibilidade/granularidade de sistemas que usam um comprimento de onda, aliado ao fato de que em cada comprimento de onda, as características da NG-PON2 são iguais as da XG-PON, a Seção 2.4 tece uma breve comparação entre os padrões 10G EPON e XGPON, a fim de permitir que o leitor compreenda os limites por comprimento de onda alcançados pelas tecnologias atualmente padronizadas.

2.4 Comparação entre EPONs e GPONs

Em [27] foi realizada uma comparação entre os padrões 10G EPON e XGPON, na qual se discute, sobretudo, a eficiência oferecida, relacionando a taxa nominal de 10 Gbps com a taxa real conseguida, descontando os *overheads* gerados nas camadas física e de quadros. Como conclusão, estes estudos indicam que inicialmente a XGPON tem melhor eficiência, mas à medida que o número de ONUs cresce a 10G EPON tende a superá-la. Isto ocorre devido ao acréscimo de *overhead* imposto pelo limite de 125 μ s exigido para atender todas as ONUs da rede XGPON. Em [28], a comparação é feita em termos de consumo de potência, e os autores sugerem alguns métodos para melhorar sua eficiência.

Tabela 2.1: Características de Camada Física das PONs.

Arquitetura da PON	IEEE 802.3av 10G EPON	ITU-T 987 XGPON
Estrutura de Camada 2	Encapsulamento Simples 802.3	Encapsulamento Complexo XGEM
Eficiência <i>Downstream</i> / <i>Upstream</i>	$\approx 82\%$ / $\approx 73\%$ (1)	$\approx 80\%$ / $\approx 83\%$ (1)
Tempo mínimo do ciclo de rajadas	1, 2, 4 ou 8 milissegundos	125 microssegundos
TDM nativo	Não implementado diretamente	Sim
Número máximo de ONUs/OLT	16, 32 (2)	32, 64 (2)
Alcance máximo	10 / 20 km	20 / 40 km (60 km lógico)
Diferença Máxima (Distâncias OLT/ONUs)	20 km	DD20 = 20 km DD40 = 40 km
Velocidade de Transmissão	10 Gbps <i>downlink</i> ; 1.25 / 10 Gbps <i>uplink</i>	10 Gbps <i>downlink</i> ; 2.5 / 10 Gbps <i>uplink</i>
Intervalo entre rajadas no <i>uplink</i>	$T_{on/off} + T_{agc} + T_{cdr} = 26$ ns 528 ns (3)	$T_{plo} = T_g + T_p + T_d = 256$ ns 2048 (4) (tempos de bit)
Cod. de Linha	64 B / 66 B	NRZ
<i>Power Budgets Class</i>	3 : (PR 10/20/30) (PRX 10/20/30) (5)	2 : (Nominal 1/2) (<i>Extended</i> 1/2) (5)
Comprimentos Onda	1260 - 1280 nm (US) e 1575 - 1580 nm (DS) (6)	1260 - 1280 nm (US) e 1575 - 1580 nm (DS) (6)

(1) Calculado considerando 32 ONUs e 2 milissegundos de tempo de Ciclo;

(2) Dependência do orçamento de potência utilizado;

(3) Para o modo de transmissão intermitente - $T_{on} = T_{off} = 64$ ns e T_{agc} e $T_{cdr} = 200$ ns (adotando uma menos conservadora $T_{total} \approx 26$ ns);

(4) Para o modo de transmissão intermitente - para taxa de 10 Gbps: $256 \cdot T_{bit} = 25,6$ ns e $2048 \cdot T_{bit} = 204,8$ ns, para o pior caso;

(5) 20, 24 e 29 dB de perda no canal, respectivamente;

(6) US *upstream* e DS *Downstream*.

Outro fator a considerar é que tipicamente as GPONs e EPONs usam lasers com tecnologia legada capazes de realizar as operações de ligar e desligar em intervalos que variam de 5 a 20 ns. Entretanto para estas análises foram tomados valores mais conservadores com $T_{on} = T_{off} = 64$ ns. A Tabela 2.1 ilustra as principais diferenças entre as duas arquiteturas.

No decorrer deste Capítulo foram avaliados os principais padrões de rede de acesso ópticas em operação. Entretanto, uma nova geração de redes de acesso fundamentadas no uso da modulação OFDM tem surgido com capacidade de ampliar a eficiência spectral e reduzir o custo por bit entregue ao usuário final. O Capítulo 3 apresenta uma breve discussão sobre os sistemas ópticos baseados em OFDM.

Capítulo 3

Sistemas Ópticos Baseados em OFDM

As redes de acesso ópticas passivas, têm evoluído rapidamente nas últimas décadas, com tecnologias já padronizadas que chegam a oferecer dezenas de gigabits ao usuário final. Tais velocidades tem sido alcançadas multiplicando a capacidade total do canal a partir do uso de múltiplos comprimentos de onda. Entretanto, os progressos recentes no desenvolvimento de DSP para o emprego de técnicas de modulação avançadas vem impulsionando os estudos das redes de acesso óptica baseadas em OFDM. As motivações para o uso de OFDM e consequentemente, o uso de compartilhamento de canal via OFDMA podem ser resumidas em três principais razões:

- A OFDM permite uma modulação multi-nível avançada capaz de compensar dispersões ao longo do canal, além de alcançar maior eficiência espectral e alta velocidade de transmissão;
- O uso de subportadoras OFDM permite que a largura de banda do canal possa ser distribuída entre os usuários com alta granularidade, aumentando a eficiência na agregação dinâmica de tráfego multi-usuário em redes ópticas de acesso ponto-a-multiponto;
- A aplicação OFDM permite a utilização de processamento de sinal digital (DSP) e pode assim ser realizado numa plataforma de silício, que se traduz em integração de componentes, a produção em massa eficiente em termos de custo, e em última análise,

um perfil favorável de custos que é o alvo para qualquer tecnologia candidata a área de acesso óptico.

A multiplexação por divisão de frequências ortogonais em sistemas ópticos tem sido alvo de diversos estudos, especialmente por sua robustez às dispersões ao longo de enlaces de fibra [29]. A crescente demanda das redes ópticas, aliada ao desenvolvimento das tecnologias de processamento digital de sinais em altas taxas de transferências, viabilizou o uso de OFDM em diversos tipos de redes [14, 15, 21, 30]. A Fig. 3.1 apresenta um gráfico da evolução das redes ópticas de acesso passivas e situando o desenvolvimento de tecnologias com base em OFDM juntamente com os padrões já consolidados.

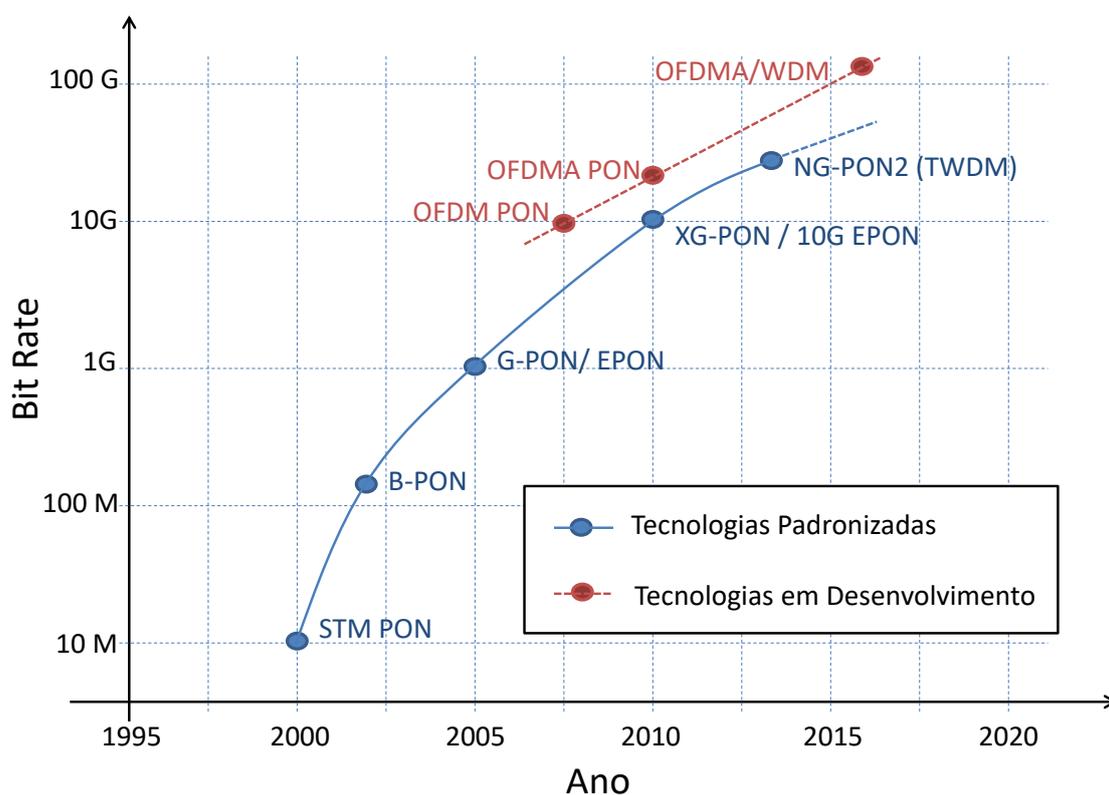


Figura 3.1: Evolução das Redes Ópticas Passivas - Comparação entre os padrões consolidados e os estudos das OFDM - PONs.

3.1 A Modulação OFDM

A aplicação da técnica OFDM tem se tornado uma área de pesquisa e desenvolvimento dominante no campo das comunicações de alta velocidade [4, 14, 15, 21, 22, 23, 29, 30, 31, 32, 33]. A teoria de sistemas OFDM é bastante extensa e complexa, entretanto é possível explicá-la de maneira concisa e intuitiva, quando apresentada em comparação com os sistemas de uma só portadora e com os sistemas convencionais de multiplexação por divisão de frequência (*FDM - Frequency Division Multiplexing*) [30]. A Figura 3.2 mostra que é possível transmitir uma mesma taxa de dados global utilizando uma única portadora (*SC - Single-Carrier*) com uma largura de banda de amplo espectro de frequência, ou através da transmissão paralela de múltiplas portadoras com largura de banda de espectro estreito, isto é via FDM.

A fim de facilitar o entendimento sobre as três abordagens, um "símbolo" pode ser definido como um sinal de duração determinada que representa uma certa quantidade de bits de informação. Por exemplo, um símbolo bpsk (*binary phase shift keying*) é representado por um sinal que assume um de dois valores durante um intervalo de tempo denominado período do símbolo (T), indicando o valor de um bit. Por conseguinte, um símbolo 4-QAM (*QAM - Quadrature Amplitude Modulation*), assume um dos quatro valores ($A + jB$, $-A + jB$, $A - jB$ ou $-A - jB$), representando, assim, o valor de dois bits.

A abordagem SC quando usada para taxas de símbolos muito elevadas, requer que o intervalo de duração dos símbolos (T) seja bastante curto. Em canais não ideais os símbolos são alongados pela convolução com a resposta ao impulso do canal, este alongamento, conhecido como dispersão cromática (*CD - Chromatic Dispersion*), estende o símbolo para além de seu intervalo designado, causando sobreposição parcial entre os símbolos adjacentes e produzindo interferência intersimbólica (*ISI - Inter-Symbolic Interference*). De fato, quanto mais curto for o período de símbolo maior será o percentual de sobreposição em relação ao tempo de símbolo, e, conseqüentemente, maior a degradação do sinal causada pela ISI. Assim, recuperar o sinal transmitido exige receptores com sistemas de equalização mais sofisticados e bem mais caros.

A vantagem da abordagem com paralelismo de portadoras FDM é que a duração dos

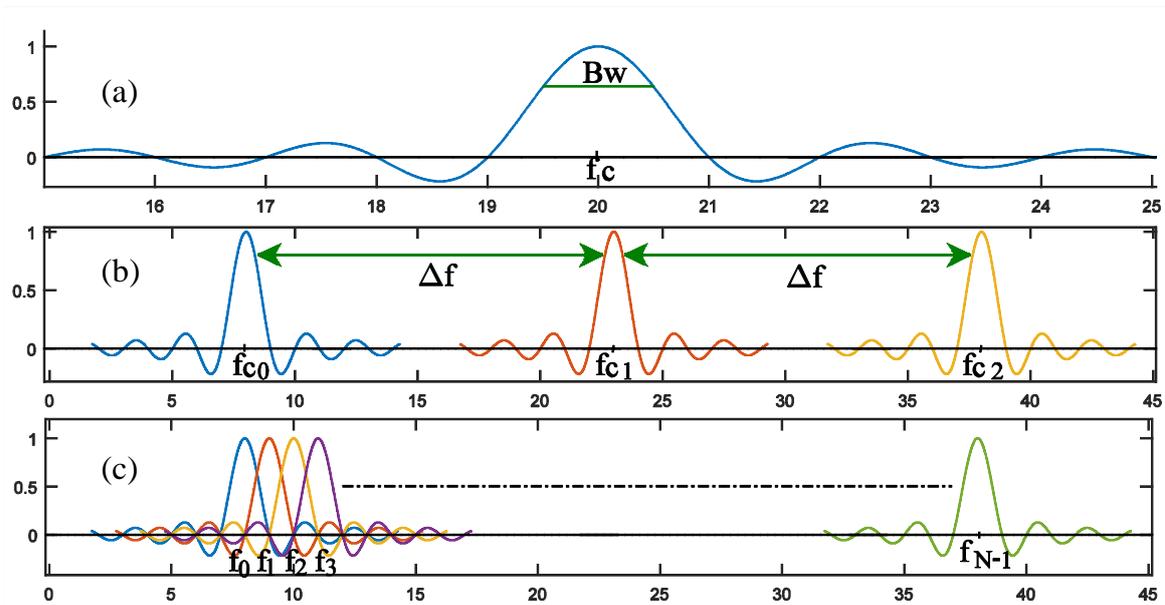


Figura 3.2: Espectros no domínio da frequência para: (a) *Single Carrier* (SC) - Portadora única; (b) Multiplexação no domínio da frequência (FDM) e (c) FDM ortogonal (OFDM). Fonte Ref. [30].

símbolos é maior em virtude da estreita largura de banda que cada portadora utiliza. Como a sobreposição ocorre em uma pequena fração do período de símbolo, estes sistemas são mais robustos à ISI, possibilitando aproximar a resposta do canal sobre cada portadora para a condição de amplitude e fase constantes. Isto permite o emprego de equalizadores mais simples na recepção do sinal. Entretanto, neste caso, ocorre uma perda significativa de eficiência espectral devido ao uso da guarda Δf , entre as portadoras, necessárias para prevenir a interferência por sobreposição de frequências.

O uso da abordagem com paralelismo de subportadoras ortogonais OFDM, faz uso do princípio da ortogonalidade para eliminar a banda de guarda Δf e aumentar a eficiência espectral do sistema. A ortogonalidade, por sua vez, pode ser obtida através da seleção criteriosa das frequências das subportadoras: $f_n \mid n = 0, 1, 2 \dots N - 1$. Seja f_n a frequência de uma subportadora senoidal cujo sinal modulado, correspondente ao símbolo QAM ($A_n - jB_n$) a ser transmitido, seja dado por:

$$S_n(t) = A_n \cdot \cos(2\pi f_n t) - B_n \cdot \sin(2\pi f_n t), \quad (3.1)$$

a ortogonalidade entre $S_n(t)$ e o sinal de outra subportadora $S_m(t)$ é assegurada tomando f_m de modo que:

$$\int_0^T S_n(t) \cdot S_m(t) dt = 0. \quad (3.2)$$

As condições de ortogonalidade para gerar um sinal OFDM com N subportadoras, são obedecidas quando a equação 3.2 for satisfeita para todo $S_n(t)$ e $S_m(t) \mid n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ com $n \neq m$. Para que estas condições sejam satisfeitas, basta definir as frequências das subportadoras como múltiplos inteiros sobre o período de símbolo:

$$f_n = \frac{n}{T} + f_{RF}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.3)$$

onde f_{RF} indica que a banda do sinal OFDM pode ser transladado para uma frequência central diferente de zero (RF - *Rádio Frequência*), caso contrário, o sinal é considerado como em banda base. Assim, como apresentado em [30], combinando as Equações 3.1 e 3.3, o sinal OFDM elétrico completo pode ser expresso por:

$$S_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n \cdot h(t) \cdot \cos(2\pi f_n t) - B_n \cdot h(t) \cdot \sin(2\pi f_n t), \quad (3.4)$$

onde $h(t)$ é a resposta ao impulso de algum filtro ao qual o sinal em banda base eventualmente tenha sido submetido. A simples escolha de um pulso retangular cujo $h(t) = 1, 0 \geq t \leq T$ e zero caso contrário, produz o espectro da Fig. 3.2 c. Re-escrevendo a equação 3.4 temos:

$$S_{OFDM}(t) = \Re \left\{ \tilde{S}_{OFDM}(t) e^{j2\pi f_{RF} t} \right\}, \quad (3.5)$$

onde:

$$\tilde{S}_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} (A_n - jB_n) e^{j2\pi n t / T}, \quad (3.6)$$

onde $\tilde{S}_{OFDM}(t)$ é o sinal OFDM complexo em banda base que pode ser convertido para domínio digital ($\tilde{S}[k]$) a partir de amostras a cada instante $t = kT/N$, de modo que o índice das amostra seja definido por $k = 1, 2, 3, \dots$. Assim, obtemos:

$$\tilde{s}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} (A_{n,k} - jB_{n,k}) e^{j2\pi nk/N}. \quad (3.7)$$

Note que cada amostra k é a Transformada Inversa Discreta de Fourier (*IDFT - Inverse Discrete Fourier Transform*) do símbolo QAM complexo, $A_{n,k} - jB_{n,k}$, sobre as N subportadoras OFDM. Este sinal pode ser obtido utilizando-se o algoritmo da Transformada Inversa Rápida de Fourier (*IFFT - Inverse Fast Fourier Transform*) no modulador e o algoritmo da FFT no demodulador [30]. Deste modo, a conversão digital-analógica e o translado em frequência para banda passante centrada em f_{RF} pode ser feita usando um único oscilador.

3.2 Detecção Direta de Sinais Ópticos OFDM

Sistemas com modulação em intensidade e detecção direta de sinais OFDM (IM/DDO-OFDM) têm futuro promissor quando se trata de redes de acesso, principalmente pela simplicidade da arquitetura dos receptores. O diagrama ilustrado na Figura 3.3 apresenta detalhes de uma configuração para transmissão de sinais multiportadoras OFDM em sistemas ópticos com detecção direta. Note que, os sinais gerados no transmissor OFDM (OFDM Tx) modulam a intensidade do sinal de um laser CW através de um modulador óptico de Mach-Zehnder (*MZM - Mach-Zehnder Modulator*) externo de porta única. Na saída do MZM utiliza-se um filtro óptico de modo a inserir um sinal de banda lateral única (*SSB - Single Side Band*) na fibra. No caso de enlaces longos, faz-se necessário o uso de amplificação óptica e filtragem para redução da banda do ruído de emissão espontânea amplificada (*ASE - Amplified Spontaneous Emission*) ao fim de cada trecho de fibra. O sinal OOFDM é, então, detectado diretamente por um fotodiodo (*PD - Photo-diode*) e enviado ao receptor OFDM (OFDM Rx), onde as dispersões são corrigidas por um equalizador de um atraso (*one tap equalizer*) [33].

Entretanto, quando se usa detecção direta de sinais ópticos oriundos de diversas fontes

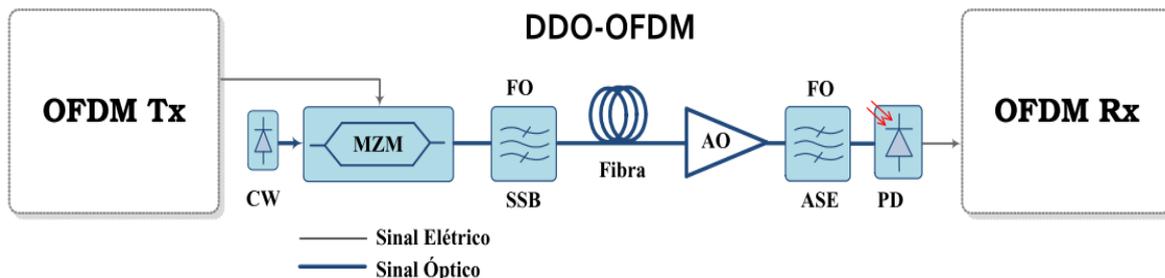


Figura 3.3: Transmissão multiportadora OFDM em sistemas ópticos. Fonte Ref. [33].

ópticas, como o processo de foto detecção obedece uma lei de natureza quadrática, isto é, a foto-corrente gerada é proporcional ao quadrado da intensidade do campo óptico, os termos gerados na foto-corrente contém batimentos devido ao cruzamento entre sinais de frequências diferentes (*beat signal-cross-mixing*), e estes termos aparecem para cada par de campo óptico recebido. A este fenômeno dá-se o nome de interferência por batimento óptico (*OBI - Optical Beating Interference*) [34]. Outro problema encontrado neste tipo de receptor óptico, são as distorções por intermodulação (*IMD - Inter-modulation Distortion*). Os efeitos da IMD correspondentes aos produtos de intermodulação $|s(t) \otimes h(t)|^2$ são gerados na detecção direta e obtidos na expansão da equação do sinal detectado no fotodiodo [32, 33]:

$$Y_{det}(t) = |E(t)|^2. \quad (3.8)$$

$$Y_{det}(t) = |A|^2 + A \cdot s(t)e^{j2\pi f_b t} \otimes h(t) + A \cdot s^*(t)e^{-j2\pi f_b t} \otimes h^*(t) + |s(t) \otimes h(t)|^2, \quad (3.9)$$

onde $E(t)$ representa o campo elétrico do sinal óptico na entrada do fotodetector, composto pela resposta impulsiva de todo o canal óptico $h(t)$ e pelo sinal OOFDM SSB centrado em f_b , que caracteriza a portadora óptica - matematicamente representado por $s(t)e^{j2\pi f_b t}$ e pela componente DC A . A partir desta expansão conclui-se que os produtos de intermodulação $|s(t) \otimes h(t)|$ são eliminados quando adotada uma banda de guarda com largura mínima igual à largura de banda do sinal OFDM óptico SSB [32] conforme ilustrado na Figura 3.4.

Assim, algumas desvantagens dos sistemas de detecção direta, tais como a banda de guarda em relação à portadora óptica, usada para evitar os efeitos da intermodulação (IMD) e do batimento óptico (OBI), e a ineficiência no uso da potência da portadora óptica [32, 33,

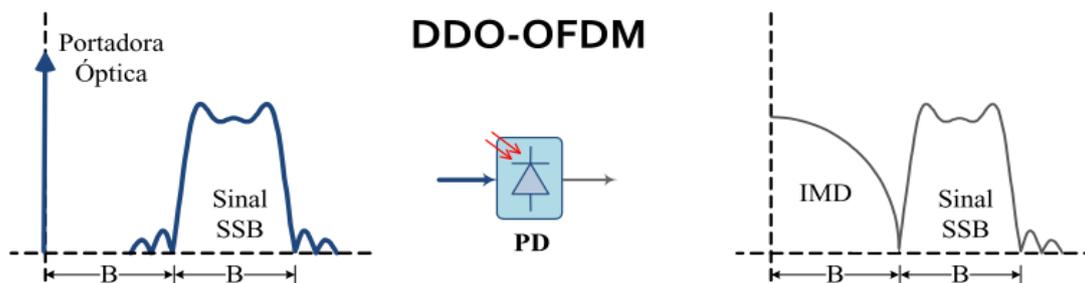


Figura 3.4: Banda de guarda - efeitos da IMD. Fonte Ref. [33].

35], levam os investigadores a buscar uma boa relação entre potência do sinal transmitido e sensibilidade dos receptores ou entre robustez à dispersão cromática (CD) e eficiência espectral do sistema.

3.3 OFDM em Sistemas Ópticos IMDD

Variadas soluções para implementação de transmissores e receptores OFDM para uso em investigações experimentais de sistemas OOFDM com modulação em intensidade e detecção direta (IM-DDO-OFDM) podem ser encontradas em [32, 33, 36, 37]. Dentre elas, destacam-se as configurações que empregam a simetria Hermitiana na entrada do modulador IFFT para geração dos sinais OFDM com coeficientes reais. Esta técnica, embora dobre o número de entradas da IFFT, tem como vantagem a dispensa de misturadores analógicos (Electrical IQ mixer), e torna desnecessária a modulação preliminar de portadoras de radio frequência. A Figura 3.5 apresenta o diagrama de blocos de um sistema para transmissão e recepção de um sinal OFDM. No transmissor, um conversor digital-analógico (*DAC - Digital-to-Analogue Converter*) gera um sinal analógico de banda lateral dupla (*DSB - Double Side Band*) que modula uma portadora óptica CW através de um MZM de uma única porta. A saída do MZM passa por um filtro óptico para obter um sinal OFDM SSB. Note que a banda de guarda para separar a portadora óptica do sinal OOFDM é obtida com o uso de um bloco inicial de subportadoras nulas (*Zero Padding*) na entrada do modulador IFFT [33]. No receptor, o sinal passa por um pré-amplificador óptico, um filtro óptico para redução da ASE e é detectado diretamente por fotodetector, que converte o sinal para o domínio elétrico, a fim de que possa

ser amostrado por um conversor análogo-digital (ADC - Analogue-Digital Converter).

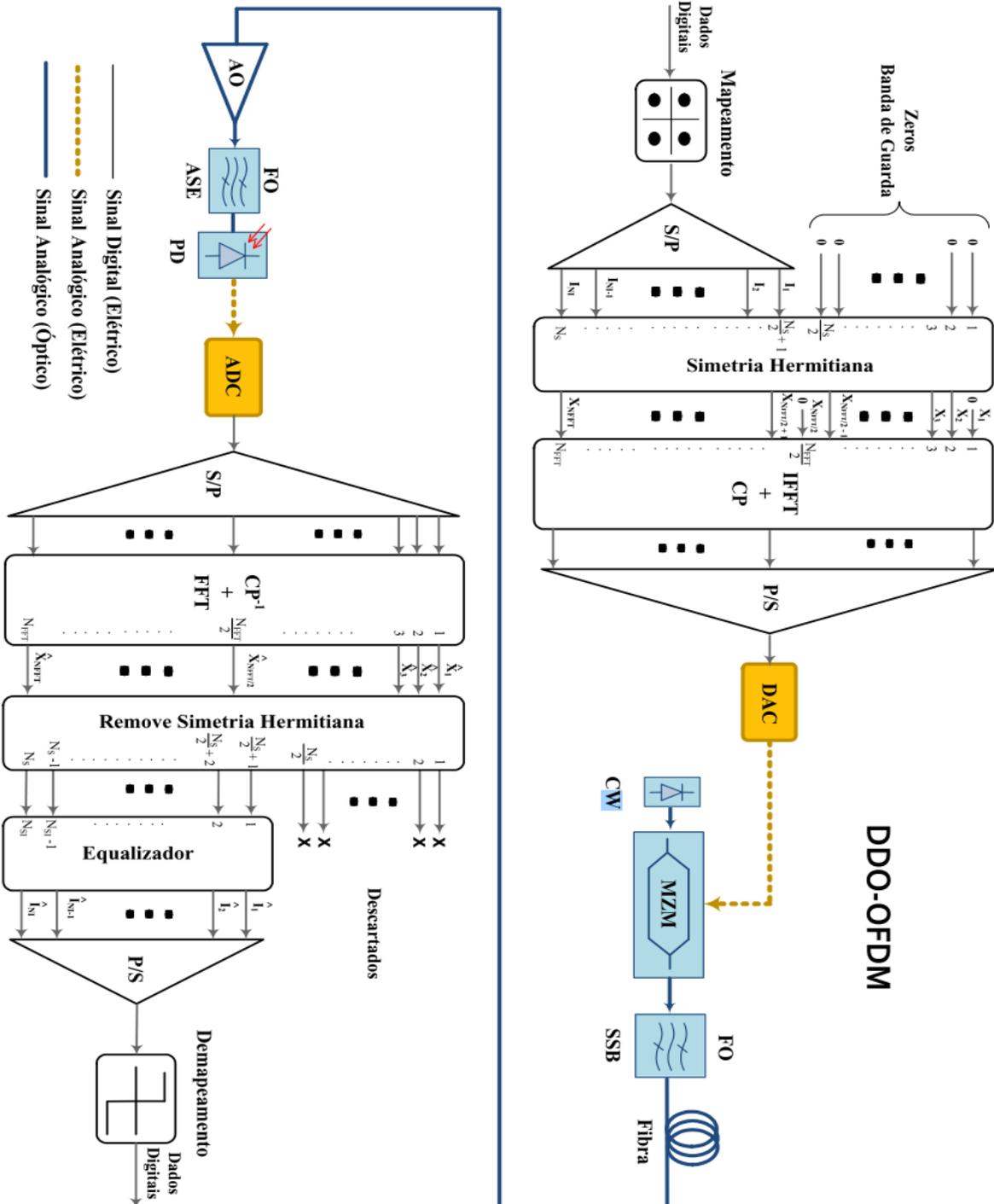


Figura 3.5: Diagrama de blocos do sistema DDO-OFDM. Fonte Ref. [33].

3.4 Parâmetros de Projeto para Sistemas Ópticos OFDM

De acordo com [33, 38, 39, 40, 41], o desenvolvimento de projetos de sistemas de transmissão de sinais OFDM envolve um grande número de parâmetros. Tais parâmetros estão relacionados às características físicas dos componentes, à concepção do sinal elétrico e também ao modo de conversão para o meio óptico. Um importante parâmetro ligado à concepção do sinal é o prefixo cíclico (*CP - Cyclic Prefix*), cuja inserção pode eliminar a interferência intersimbólica ISI, além de auxiliar no sincronismo dos símbolos OFDM no receptor. A Figura 3.6 mostra a ISI causada pela sobreposição dos símbolos sem o CP e sua eliminação quando é utilizado um adequado prefixo cíclico.

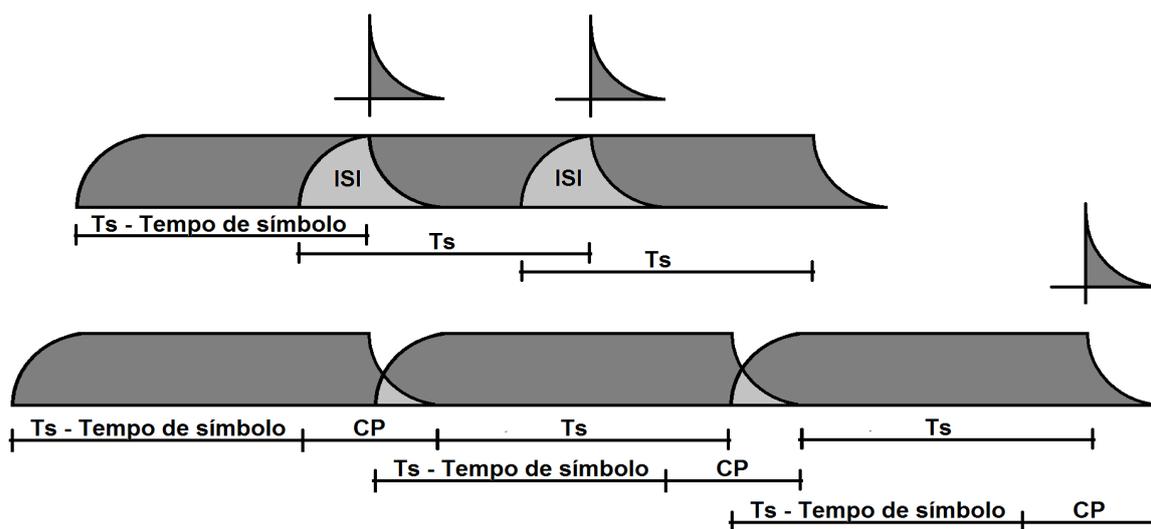


Figura 3.6: CP - Prefixo cíclico; ISI - Interferência intersimbólica; Ts - Tempo de símbolo.

Foi demonstrado em [38], que a eficiência espectral global dos sistemas DDO-OFDM é afetada pelo espaçamento entre frequências, necessário para evitar a interferência entre subportadoras (*ICI - Inter-subcarrier interference*) [41] e pelo tamanho do CP. Assim, torna-se necessário manter o compromisso de adotar um CP menor possível que possa assegurar que os efeitos da ISI, provocada pela dispersão cromática, estejam dentro de níveis toleráveis. Uma boa estimativa para duração do CP (tempo de guarda T_g) é dada por [31]:

$$T_g \geq D \cdot B_w \cdot \frac{c}{f^2}, \quad (3.10)$$

onde D é a dispersão cromática, $B_w = R_{Nominal}/\log_2(M)$, a largura de banda do sinal para a taxa de transmissão nominal do sistema $R_{Nominal}$ e nível de modulação das subportadoras M , c é a velocidade da luz e $f = c/\lambda$ a frequência da portadora óptica para o comprimento de onda do sinal óptico λ . Entende-se por $R_{Nominal}$ a taxa de transmissão antes da codificação: $R_{Nominal} = R_b \cdot (1 - \epsilon_{FEC}) \cdot (1 - \epsilon_{TS}) \cdot (1 - \epsilon_g)$, onde R_b é a taxa útil, ϵ_{FEC} , ϵ_{TS} , e ϵ_g são as redundâncias inseridas na codificação, no uso de símbolos de treinamento e do prefixo cíclico, respectivamente.

A relação entre o tempo de símbolo T_s e o tempo de guarda T_g (CP) influencia diretamente no alcance de sistemas OOFDM. A Figura 3.7 apresenta curvas de tolerância à dispersão cromática em km de fibra monomodo padrão (*SSMF - Standard Single Mode Fiber*), para um sistema óptico a 10 Gbps usando 16-QAM e $\epsilon_{FEC} + \epsilon_{TS} = 8\%$, onde é possível obter valores de projeto para T_s e T_g . Observe que, para $T_s = 20$ ns e $T_g = 5$ ns o limite de tolerância à dispersão do sistema fica em torno de 10000 km. Entretanto, para o mesmo $T_s = 20$ ns, se T_g for reduzido para 2 ns o alcance do sistema fica abaixo de 6000 km.

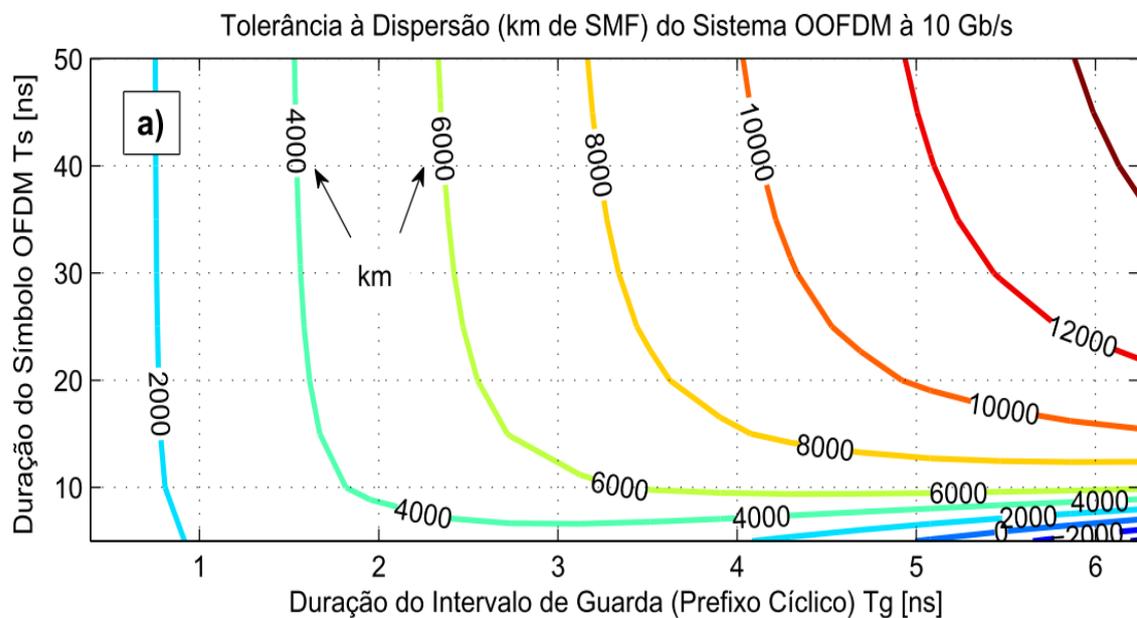


Figura 3.7: Tolerância à dispersão cromática - sistema a 10 Gbps, $M = 16$, $\epsilon_{TS} + \epsilon_g = 8\%$ [33].

3.4.1 Uso do Modulador Externo

O desempenho de um sistema OOFDM que usa laser modulado diretamente é bastante inferior quando comparado a sistemas com moduladores externos. Este fato decorre de um fenômeno chamado *chirp* [42], que aparece devido à modulação em frequência da portadora óptica. O uso de modulador externo insere outros parâmetros a serem considerados no projeto de sistemas. Em [38], foi ainda demonstrado que um nível de potência ótimo da portadora óptica em concordância com a sensibilidade do receptor depende da potência média do sinal, do seu desvio padrão σ_s^2 e do ponto de polarização do modulador externo Mach-Zehnder. A posição do ponto de polarização do MZM pode inserir distorções não lineares se estiver na região de maior transferência de potência. Entretanto, é possível atenuar estes efeitos posicionando o ponto de polarização na região de máxima linearidade da curva característica do MZM, ou seja, em quadratura. Porém, a redução da transferência de potência óptica pode não permitir que o fotodetector, em virtude de sua sensibilidade, converta adequadamente o sinal óptico recebido. A equação 3.11 representa a função de transferência do MZM de porta única [43]:

$$E_0(t) = E_i(t) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2V_\pi} (s(t) + V_{bias}) \right] \quad (3.11)$$

Onde $E_0(t)$ é o campo elétrico do sinal óptico na saída do MZM, $E_i(t)$ é o campo elétrico do sinal óptico de entrada, V_π é a tensão aplicada ao eletrodo necessária para induzir um desvio de fase de π radianos no sinal de entrada, $s(t)$ é o sinal OFDM modulante e V_{bias} é a tensão de polarização do MZM. A Figura 3.8 apresenta a curva característica referente à função de transferência de potência de um modulador óptico de uma única porta para diferentes pontos de polarização. Note que a região central de polarização encontra-se entre $V_\pi/2 \leq V_{bias} \leq V_\pi$.

Outro fator importante é a amplitude do sinal OFDM na entrada do MZM. Os valores assumidos por $s(t)$ estão associados a um parâmetro denominado índice de modulação óptica (*OMI – Optical Modulation Index*), dado por $OMI = RMS(s(t))/V_\pi$, onde $RMS(s(t))$ é o valor quadrático médio (*RMS - root-mean-square*) do próprio sinal elétrico. O emprego de valores maiores de OMI pode resultar no acréscimo de distorções não lineares inseridas

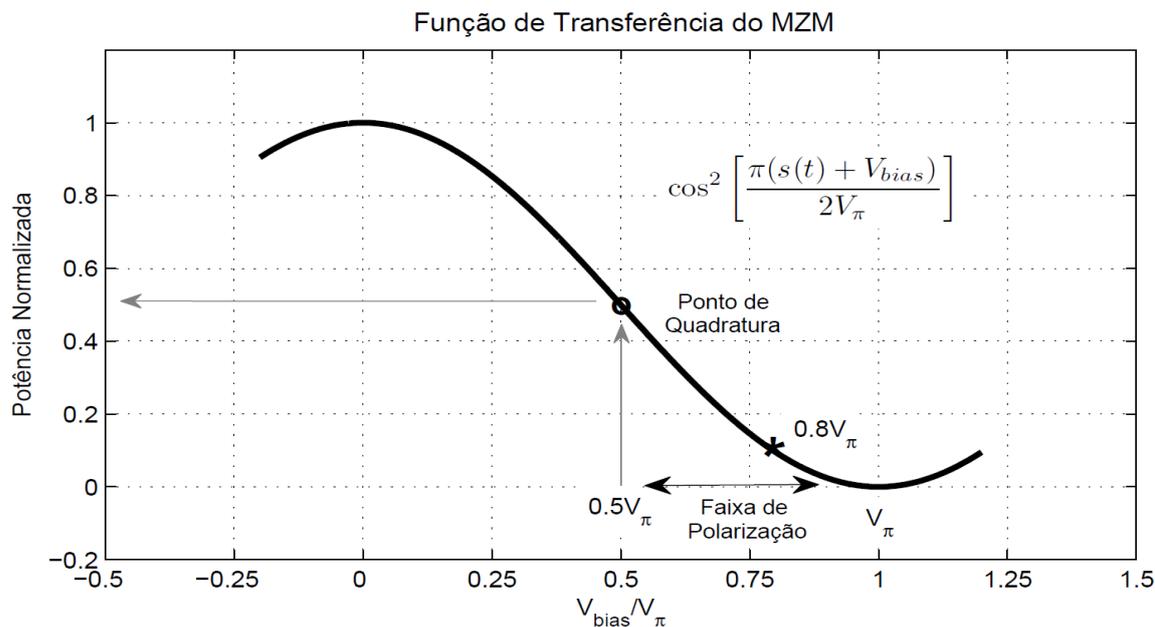


Figura 3.8: Função característica do modulador óptico Mach-Zehnder. [33].

pelo modulador óptico, mas em contrapartida, maior será a potência do sinal na entrada dos receptores. No entanto, valores menores do OMI tornam predominante o sinal da portadora óptica, reduzindo a potência das componentes de frequência do sinal, levando-as a valores abaixo da sensibilidade no fotodetector.

3.5 PONs Baseadas em OFDM/OFDMA

O acesso múltiplo e a multiplexação por divisão de frequência ortogonal têm atraído o interesse para aplicação em redes ópticas passivas, especialmente por características como largura de banda estreita por subportadora, granularidade e elasticidade na alocação de largura de banda [4, 30, 44, 45, 46, 47, 48]. Com objetivo de avaliar a factibilidade do uso de OFDM para as próximas gerações de sistemas ópticos em enlaces de longa distância, foram realizadas simulações para análise da técnica OFDM em comparação com a transmissão por SCM, já consolidada, utilizando formatos de modulação de alto nível e detecção coerente [49]. Esta análise considerou um cenário para transmissão a taxa de 100 Gb/s e leva em conta as principais degradações impostas por este tipo de canal, quais sejam, dispersão cromática, dispersão do modo de polarização, auto-modulação de fase (*SPM - Self-phase Modulation*)

, modulação cruzada de fase (*XPM - Cross-phase Modulation*) e *four-wave mixing* (FWM). A Fig. 3.9 apresenta o diagrama de blocos do sistema OFDM utilizado. Neste artigo foi demonstrado que a principal vantagem da OFDM, o que a tornou tecnologia vencedora, foi a facilidade de combinar o espectro do sinal transmitido com filtros para compensar as características peculiares do canal, como resposta em amplitudes não planas. Outro benefício desta técnica seria sua escalabilidade, com taxas de bits mais elevadas, entretanto, isto exige DSPs sofisticados e mais dispendiosos.

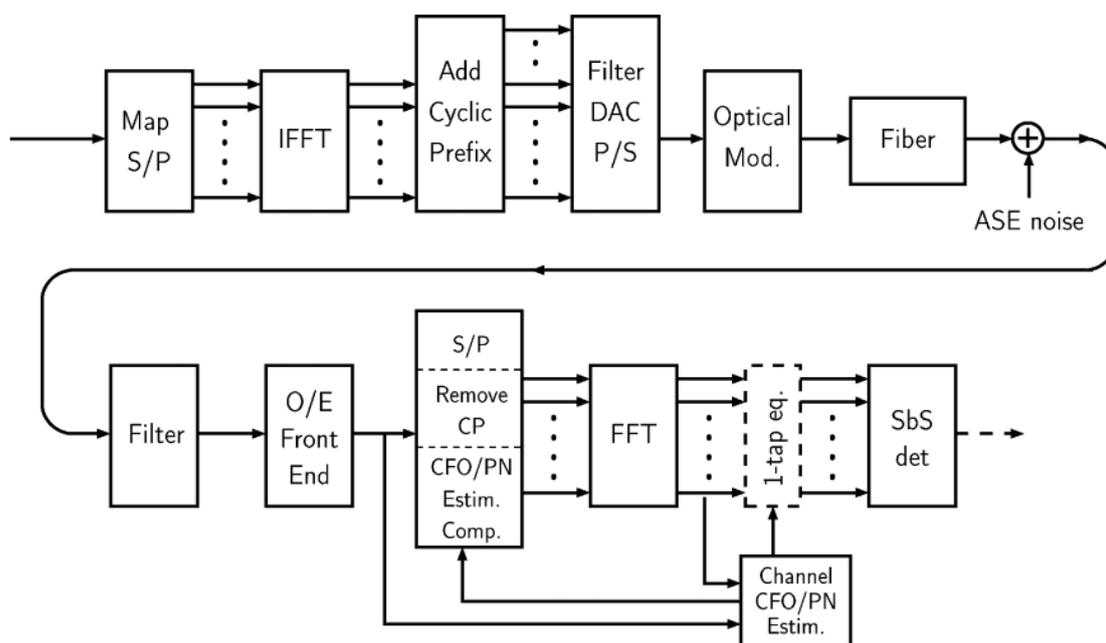


Figura 3.9: Diagrama de blocos do sistema OFDM para enlaces ópticos de longo alcance. [49].

Em [47] simulações comparando três esquemas de processamento digital dos sinais, sendo dois deles com base em OFDM, também avaliaram o uso desta técnica para sistemas ópticos com detecção direta. A Fig. 3.10 ilustra os esquemas DDO-OFDM, usando multiplexação por divisão de frequências ortogonais, DDO-SCFDE, equalização no domínio da frequência de portadora única e DDO-DFTS, OFDM com espalhamento por transformada discreta de Fourier. Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que o uso de OFDM consegue ampliar a eficiência espectral do sistema, além de permitir que a transmissão alcance distâncias ainda maiores.

A demonstração da aplicação desta técnica em PONs tem sido mais comum para o

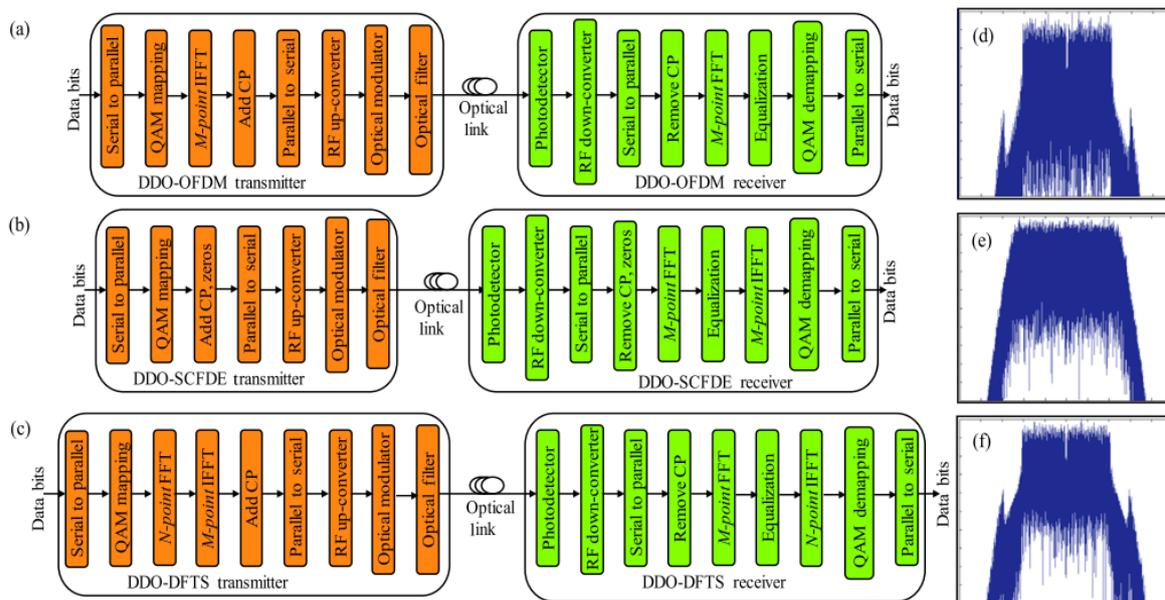


Figura 3.10: Diagrama de blocos: (a) Sistema DDO-OFDM, (b) Sistema DDO-SCFDE, e (c) Sistema DDO-DFTS. Espectro após modulação preliminar em RF: (d) DDO-OFDM, (e) DDO-SCFDE, e (f) DDO-DFTS. [47].

downstream. Apenas alguns poucos trabalhos tem demonstrado a factibilidade também para o *upstream*. Nas Seções 3.5.1 e 3.5.2 são apresentadas algumas soluções para nível físico e camada MAC utilizadas nas OFDM PONs.

3.5.1 Arquitetura Física das OFDM PONs

Em [45], foi demonstrado experimentalmente a arquitetura completa de uma PON para longa distância. Esta arquitetura é capaz de transmitir a 40 Gb/s usando sistema com detecção coerente inclusive nas ONUs. A Figura 3.11 mostra a configuração experimental utilizada. Note que o transmissor usa moduladores I/Q e o receptor necessita de um oscilador local e quatro fotodiodos para realizar a detecção coerente. Por tratar-se de longas distâncias, o custo e a complexidade desta implementação é justificável. Entretanto, para redes de acesso passivas de curto alcance a redução do custo e complexidade, especialmente nas ONUs, deve ser fator preponderante na escolha da arquitetura.

Como alternativa para redução do custo das ONUs, foi demonstrada em [46] uma solução onde as ONUs usam detecção direta, enquanto na OLT é feita detecção coerente. A Figura

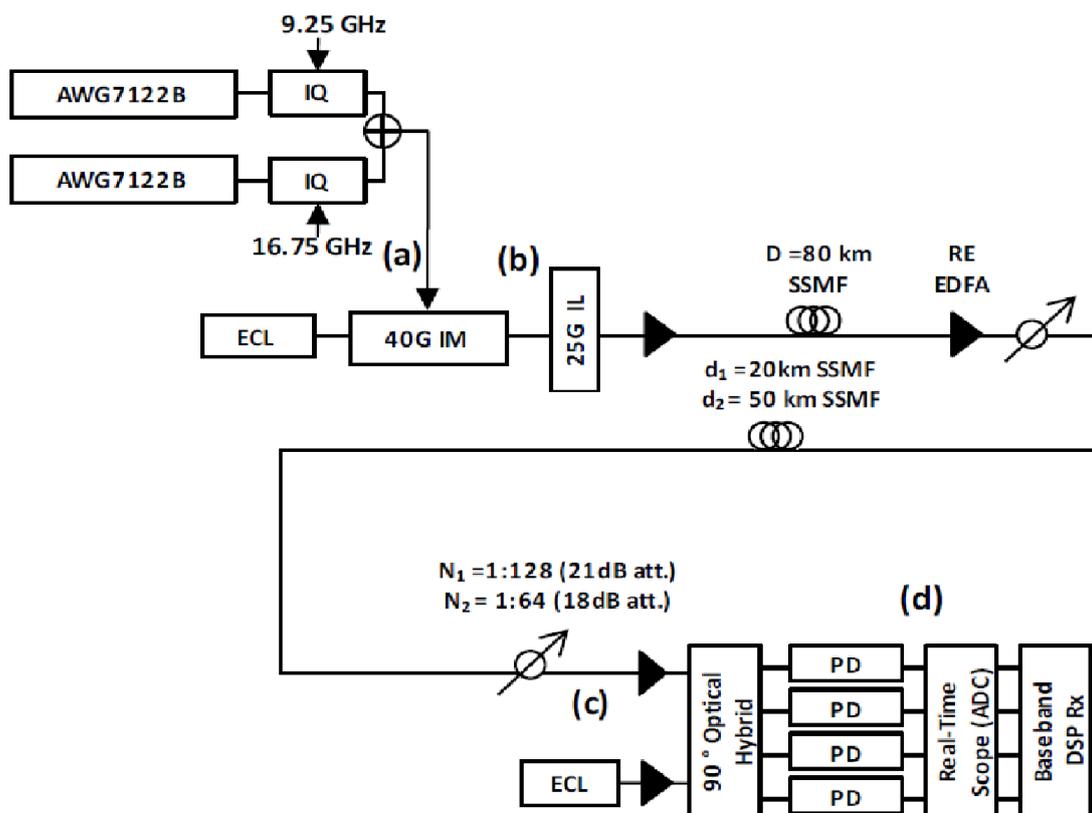


Figura 3.11: Configuração experimental OFDMA-PON coerente para longa distância. Fonte Ref. [45].

3.12 apresenta um esboço geral da configuração. Para realizar a detecção coerente a OLT usa a mesma fonte de luz centralizada como oscilador local e as ONUs polarizam os moduladores em V_{π} para realizar a supressão da portadora óptica e evitar a OBI. Entretanto, neste esquema os autores utilizam modulação preliminar de portadora de RF e filtro elétrico na recepção para separar as sub-bandas das ONUs, o que reduz a flexibilidade e granularidade na alocação de banda.

Outra solução para uplink também foi proposta em [44]. A Figura 3.13 ilustra esta configuração que emprega a detecção direta tanto nas ONUs quanto na OLT, entretanto, cada ONU utiliza um comprimento de onda e as sub-bandas também são separadas via modulação em RF. Um importante detalhe é que o espaçamento entre as portadoras ópticas deve ser maior que banda ocupada por todas as sub-bandas. Outra restrição é que este espaçamento seja maior que a largura de banda elétrica do fotodetector (PD). Deste modo o PD funciona como um filtro passa baixa detectando apenas as sub-bandas. Como visto, esta solução reduz

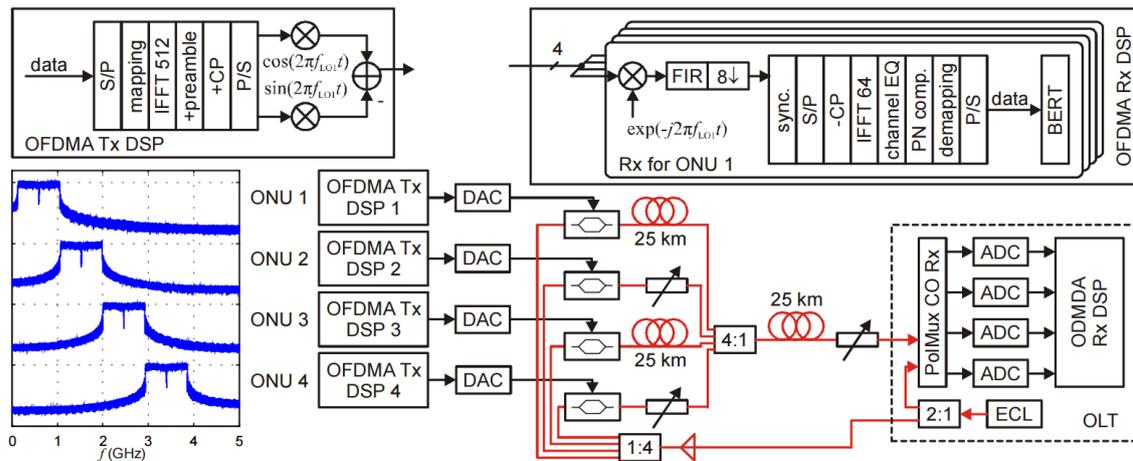


Figura 3.12: Configuração experimental com transmissão de quatro ONUs e recepção coerente na OLT. Fonte Ref. [46].

significativamente o custo das ONUs e da OLT, entretanto, consome um número maior de comprimentos de onda, restringindo uma possível expansão por WDM.

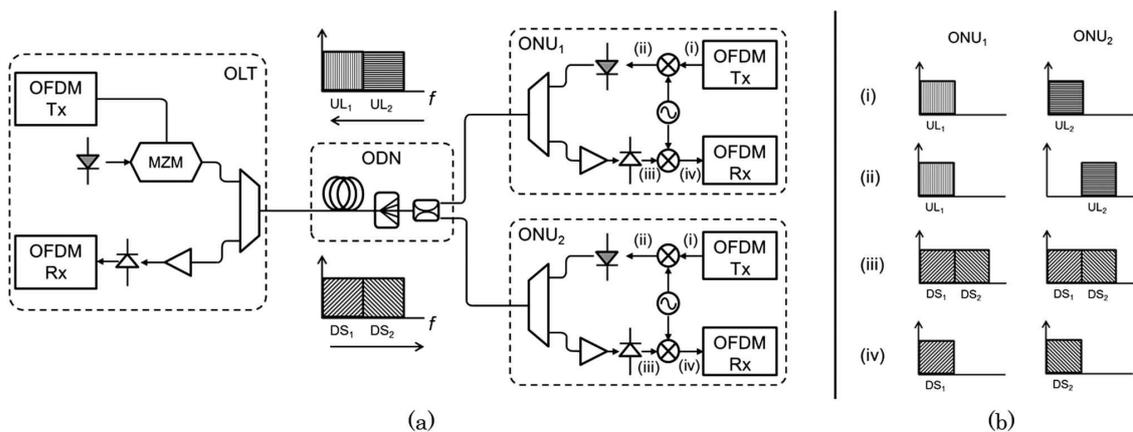


Figura 3.13: Configuração experimental com transmissão de ONUs usando comprimentos de onda diferentes. Fonte Ref. [44].

Como visto até aqui, as arquiteturas para PON baseada em OFDM apresentam soluções das mais variadas, algumas com custo e complexidade elevados, mas com alcance para longas distâncias, outros com complexidade reduzida, porém com uso de modulação adicional em RF, reduzindo a granularidade e flexibilidade do sistema. Além destas, há ainda uma proposta, inicialmente apresentada por [4], cujos resultados foram obtidos através de simulações, que se mostrou bastante promissora para uso em redes ópticas passivas de

acesso, pois possibilita a redução do custo por ONU e maximiza a granularidade na alocação de largura de banda, uma vez que utiliza simetria Hermitiana em lugar da modulação adicional em RF. Esta proposta, reformulada neste trabalho, é descrita no Capítulo ??, e sua verificação experimental é apresentada e discutida no Capítulo 5.

3.5.2 Arquitetura MAC das OFDM PONs

Diversos estudiosos têm publicado propostas de arquitetura de acesso ao meio para redes ópticas passivas, que procuram ressaltar a necessidade da utilização de técnicas de compartilhamento de canal que aproveitem a eficiência espectral e a granularidade da tecnologia OFDM [50, 51, 52].

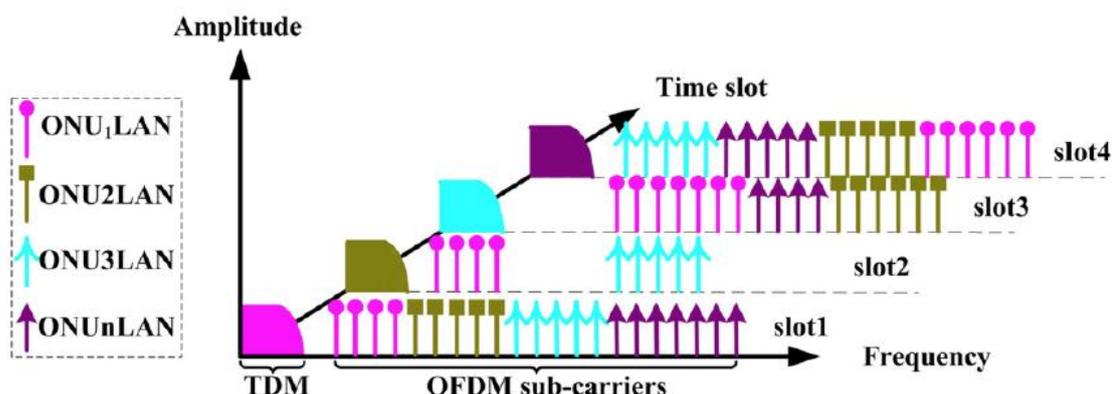


Figura 3.14: Alocação dinâmica de slots de tempo e subportadoras. Fonte Ref. [50].

Em [50], uma arquitetura híbrida de PON de longo alcance é suportada por um protocolo de transmissão para tráfego de redes locais (*LANs - Local Area Networks*), que permite distribuir a capacidade do canal tanto em slots de tempo quanto em número de frequências ortogonais. A Figura 3.14 mostra como as diferentes subportadoras são alocadas a diferentes ONUs durante os slots de tempo, e como a largura de banda do tráfego e rede local das ONUs também podem ser flexivelmente ajustadas pela alocação de subportadoras. Note que há uma faixa de largura de banda que é compartilhada por TDMA. Além disso, o autor não deixa claro como é feito o controle de alocação de banda e o sincronismo.

Em [51], os autores tentam explorar as transmissões paralelas por subportadoras OFDM, propondo dois tipos de protocolo MAC: transmissão por rajada fixada (*FBT - Fixed Burst*

Transmission) e transmissão por circuito dinâmico (DCT - Dynamic Circuit Transmission).

O primeiro trata cada transmissão de dados como uma estrutura de quadro com duração

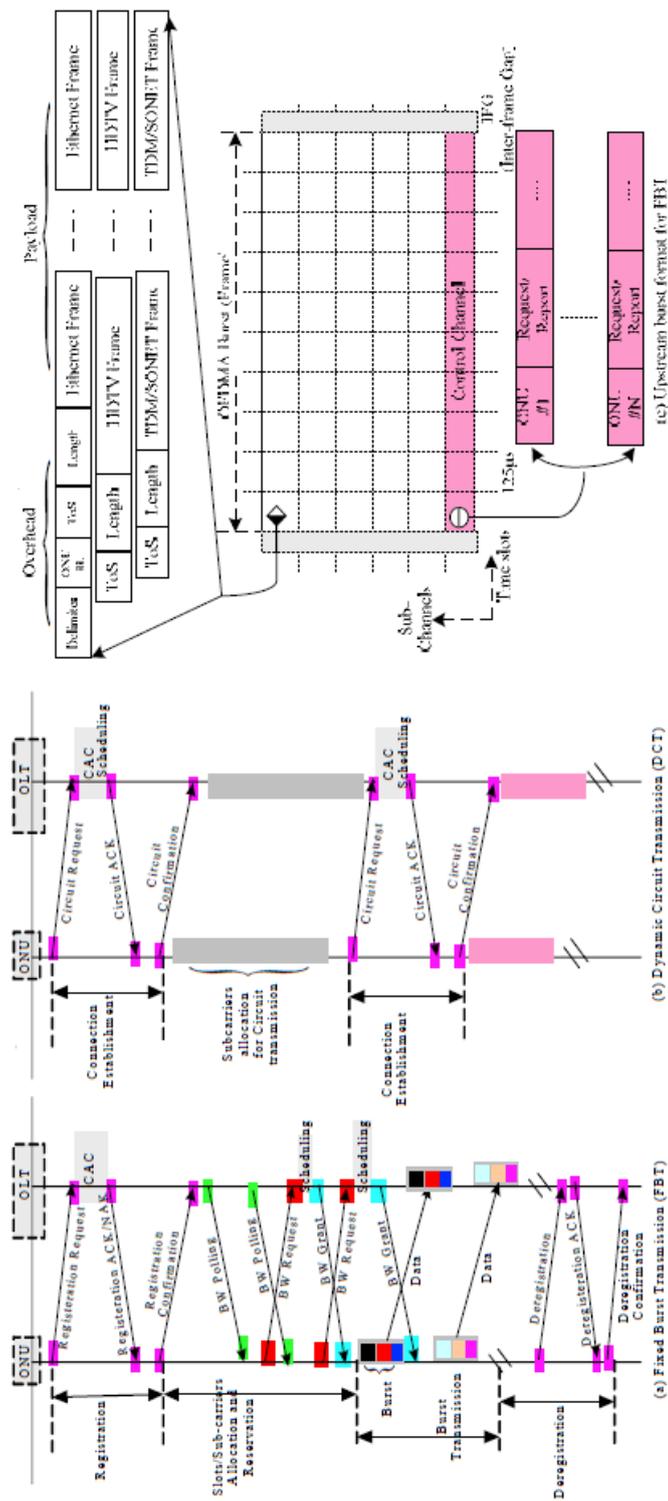


Figura 3.15: Protocolo MAC e estrutura de frame. Fonte Ref. [51].

fixa, com valor entre 1 e 10 milissegundos (estabelecido previamente), durante a qual, são alocados blocos diferentes de subportadoras consecutivas para cada ONU. Essa estrutura agrega vários pacotes das camadas superiores em uma mesma transmissão. Após seu registro, admitido através de sinalização de três vias (*Request/Ack/Confirmation*), a ONU torna-se apta a participar do processo de reserva de largura de banda, que emprega uma sinalização do tipo *Polling/Request/Grant*.

O segundo trata cada transmissão de dados como um circuito dinâmico de curta/longa duração, baseado em um serviço orientado a conexão com sinalização de três vias. Um algoritmo de controle de admissão de chamada (*CAC - Call Admission Control*) fornece uma estimativa de largura de banda, que atenda aos requisitos de QoS, conservadora o suficiente para não ser necessária uma renegociação durante uma conexão. Entretanto, a arquitetura física sob estes protocolos prevê o uso de ONUs com laser sintonizável e a utilização de um comprimento de onda por ONU no uplink, a fim de evitar a OBI. A Figura 3.15 apresenta um diagrama temporal que faz um paralelo entre os dois protocolos. Note que as mensagens de sinalização são transmitidas por um canal de controle dedicado, ou seja, um bloco específico de subportadoras.

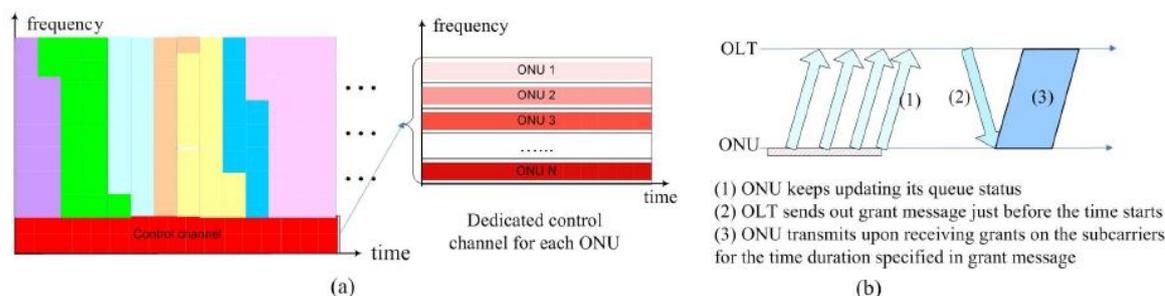


Figura 3.16: (a) Compartilhamento OFDMA com bloco de controle específico; (b) alocação de banda com *handshake* em três vias. Fonte Ref. [52].

Em [52], três esquemas de controle de acesso foram submetidos a uma avaliação de desempenho. A simulação compara TDMA, como nas GPONs e EPONs, porém com modulação OFDM para aumentar a eficiência espectral, FDMA, no qual subconjuntos disjuntos de subportadoras são alocados a cada ONU, e uma proposta de OFDMA semelhante a discutida em [51]. A Figura 3.16 ilustra o compartilhamento de canal por OFDMA.

Todos esses modelos de MAC, ou estão atrelados a configurações que usam as sub-

bandas de *upstream* com modulação preliminar de portadora de RF, ou não descrevem detalhes com soluções para o sincronismo de quadros no uplink. Assim, não poderiam ser aplicados à arquitetura proposta por [4]. No próximo Capítulo, nas Seções 4.3, 4.4 e 4.5, são apresentadas três propostas de MAC que podem ser aplicadas também à arquitetura BS OFDMA PON.

Capítulo 4

Arquitetura BS OFDMA PON

4.1 Arquitetura Física BS OFDMA PON

A proposta de arquitetura de rede BS OFDM PON [4, 21] considera uma topologia em árvore que utiliza componentes ópticos passivos do tipo divisores/combinadores ópticos (*PSC - passive splitters/combiners*). Segundo estudos realizados em [53] esta topologia garante melhor relação entre a quantidade de *splitters* utilizados e consumo de fibra, além de apresentar boa margem de queda de potência para ODNs com até 64 ONUs. A proposta sugere o uso de um comprimento de onda para *downlink* (λ_{down}) e outro comprimento de onda (λ_{up}) para *uplink*. Em ambas as direções de tráfego, o sistema BS OFDM PON divide a largura de banda total em N sub-bandas, cada uma contendo a quantidade de subportadoras necessárias para atender o respectivo assinante. No sentido de *downstream*, cada ONU, recebe uma cópia dos símbolos OFDM e extrai os dados somente das subportadoras destinadas a ela. No sentido de *upstream*, cada ONU gera um sinal OFDM com um dado número de subportadoras reservadas para sua transmissão. Os sinais de cada unidade de rede óptica são combinados opticamente através do PSC para gerar um sinal óptico OFDM que é transmitido de volta à OLT [4, 21, 23].

4.1.1 Estruturas da OLT, PSC e ONU

As estruturas da OLT, PSC e ONU, bem como, as fibras ópticas usadas na rede, são mostradas na Figura 4.1 e descritas completamente em [4, 21].

A OLT consiste de quatro elementos principais: transmissor, receptor, multiplexador óptico e controlador. O transmissor tem incorporado: um transmissor OFDM, um conversor eletro-óptico (E/O) e um laser diodo de onda contínua (CW) para modulação remota da portadora de *uplink*. O receptor tem um conversor opto-elétrico (O/E), o circuito de sincronismo e um receptor OFDM para todos os dados e sinais de controle do *uplink*. O multiplexador óptico é responsável por combinar os comprimentos de onda de *downlink* e *uplink* e enviá-los para o PSC através da fibra de *downlink*. O elemento controlador tem a responsabilidade de executar o procedimento de alocação de largura de banda a partir das informações de cada ONU, além de controlar as demais partes da OLT. O controlador também lida com acordo de QoS entre OLT e ONUs a nível físico.

O PSC é um elemento passivo composto de divisores/combinadores ópticos, cuja finalidade é distribuir o sinal de *downlink* entre as ONUs e combinar o sinal de *uplink* oriundo das ONUs e destinado à OLT. Este elemento tem um importante papel na arquitetura proposta, uma vez que ele define o número máximo de ONUs presentes na rede. Alternativamente, amplificadores ópticos podem se usados a fim de atender os requisitos do orçamento de potência.

A estrutura da ONU é similar a da OLT, diferindo apenas no uso de um demodulador óptico para separar os comprimentos de onda de *uplink* e de *downlink*, enviando o λ_{down} para o receptor que converte o sinal óptico para o domínio elétrico e o receptor OFDM recebe a sub-banda selecionada para a ONU em questão, a banda de controle e descarta as demais subportadoras. O comprimento de onda de *uplink* é encaminhado ao modulador óptico. Após a modulação óptica, o λ_{up} é enviado para a OLT através da fibra de *uplink*, como mostra a Figura 4.1. O transmissor OFDM envia os dados e os sinais de controle usando a sub-banda disponibilizada. O controlador é encarregado de trocar mensagens de controle com a OLT e gerenciar todos os processos da ONU, inclusive QoS.

A proposta BS OFDM PON proporciona um controle de alocação de largura de banda

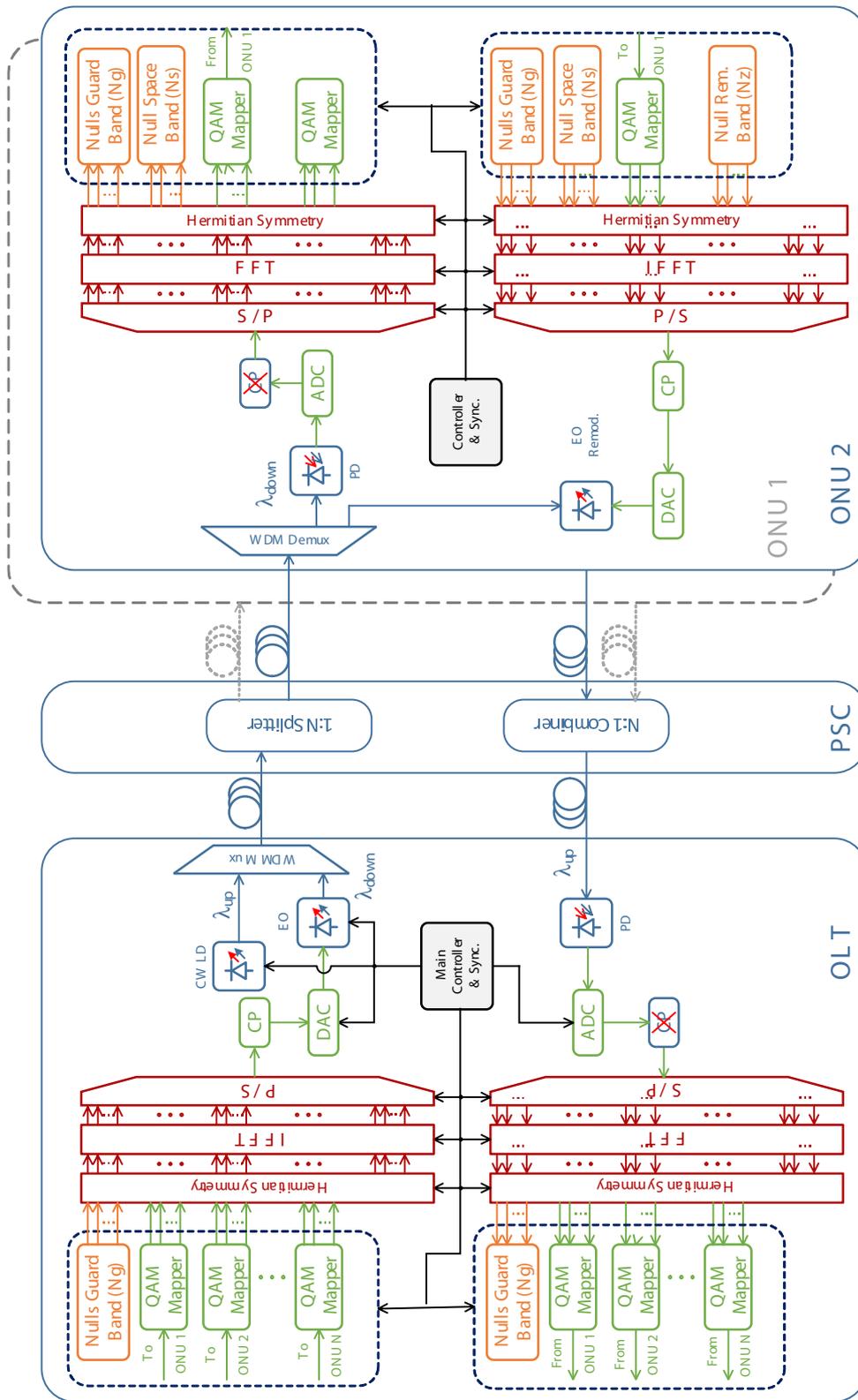


Figura 4.1: Diagrama de blocos da arquitetura BS OFDMA PON.

flexível em ambas as direções, pode adotar filas de prioridades diferenciadas e utilizar alocação dinâmica de largura de banda para os diversos serviços dos assinantes. Com base nas solicitações das ONUs, a OLT pode determinar que quantidade de tráfego de *downstream* e de *upstream* é necessária para cada ONU e distribuir a largura de banda em cada direção através da alocação de sub-bandas e janelas de tempo. Uma pequena quantidade de sub-portadoras pode ser utilizada para enviar informações de controle para todas as ONUs e o restante é dividido para suprir suas demandas. As ONUs podem solicitar tantas sub-bandas de frequência quanto possível. A OLT também determina a taxa de dados ótima, isto é, faz a alocação de sub-banda e de janelas de tempo a partir de um algoritmo de DBA. Cabe ao controlador na OLT decidir quando as ONUs podem enviar informações sobre o *uplink* de controle e a quantidade de largura de banda alocada para *upstream* de dados [21].

4.1.2 Análise de Desempenho da BS OFDMA PON

Uma simulação Monte Carlo utilizando linguagem de computação técnica *MATLAB*[®] foi realizada em [4], para avaliar os parâmetros de projeto e o desempenho em termos da relação sinal-ruído (*SNR - Signal to Noise Ratio*), da taxa de erros de bit (*BER - Bit Error Rate*) e da magnitude do vetor de erro (*EVM - Error Vector Magnitude*). A EVM pode ser definida como o valor RMS (*root-mean-square*) da diferença entre o conjunto de símbolos transmitidos e recebidos, e sua relação com a BER será demonstrada no Capítulo 5. Nesta simulação foram randomizadas, além da geração de bits, a distância e a largura de banda de cada ONU. Em cada simulação foram transmitidos cerca de 3000 símbolos OFDM, considerando uma largura de banda total $B_w = 10$ GHz, que é igual à largura de banda efetiva para um feixe óptico, no comprimento de onda de 1550 nm, em uma fibra óptica monomodo padrão (SSMF) [13] com 20 km de comprimento. Devido à operação em banda base elétrica, foi necessário incluir uma operação Hermitiana na geração do sinal OFDM, a fim de torná-lo real. As subportadoras posicionadas na frequência de Nyquist, a primeira subportadora (posição da frequência de corrente contínua) e as bandas de guarda entre os sinais OFDM são zeradas. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos parâmetros OFDM utilizados nas simulações.

Para ambos, *uplink* e *downlink*, foi usado um sistema óptico OFDM com modulação

Tabela 4.1: Parâmetros Utilizados nas Simulações da Camada Física.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
N° de subportadoras	8192
Subportadoras úteis	3686
Tempo do Símbolo OFDM	415,8 ns
Prefixo Cíclico	6,397 ns
Modulações	16-QAM / 64-QAM
Taxa total	35,5 Gbps / 53,2 Gbps
Taxa/ONU	1,10 Gbps / 1,66 Gbps
λ_{down}	1550 nm
λ_{up}	1552 nm
N° de ONUs	32
Distância OLT-ONU	10 km / 20 km

Foram realizadas simulações com estes parâmetros para situações de SNR= 20, 24, 28 e 32 dB

em intensidade e detecção direta (IM/DD). O transmissor da OLT converte o sinal OFDM para o domínio óptico usando um modulador externo Mach-Zehnder em $\lambda_{down} = 1550$ nm. O transmissor da ONU recebe o comprimento de onda $\lambda_{up} = 1552$ nm, da fonte de luz centralizada de *uplink* e usa um Amplificador óptico de semiconductor reflexivo (*RSOA - Reflective Semiconductor Optical Amplifier*) para produzir o sinal óptico [23]. Os parâmetros relevantes da linha de transmissão óptica usados em todas as simulações são: coeficiente de dispersão $D = 17$ ps/nm/km, coeficiente de atenuação da fibra $\alpha = 0.2$ dB/km nm e potência óptica transmitida de 0 dBm. Cabe ressaltar que, com exceção do CP, não foram utilizadas formas de compensação de dispersão óptica.

A fim de estabelecer a influência do comprimento da fibra e da SNR no EVM e na BER, foram realizadas simulações em ambos os sentidos de transmissão com comprimento de fibra $L = 10$ e 20 km para diversos valores de SNR, considerando o mapeamento de subportadoras nas modulações 16 e 64-QAM. A Figura 4.2 a. mostra a EVM versus número de ONUs, para a transmissão de ONU para OLT. As linhas com quadrado cheio representam os resultados para $L = 20$ km e as linhas com o círculo vazio para $L = 10$ km. Observa-se que o aumento da SNR diminui o EVM na proporção inversa.

Como esperado, para a maioria das ONUs o desempenho não apresenta variação significativa no EVM, com exceção das ONUs para as quais foram atribuídas frequências mais altas, onde o EVM sobe para -27 dB quando $SNR = 28$ dB. Isto ocorre devido à influência da função de transferência da fibra. É importante notar que, para 20 km, a largura de banda de

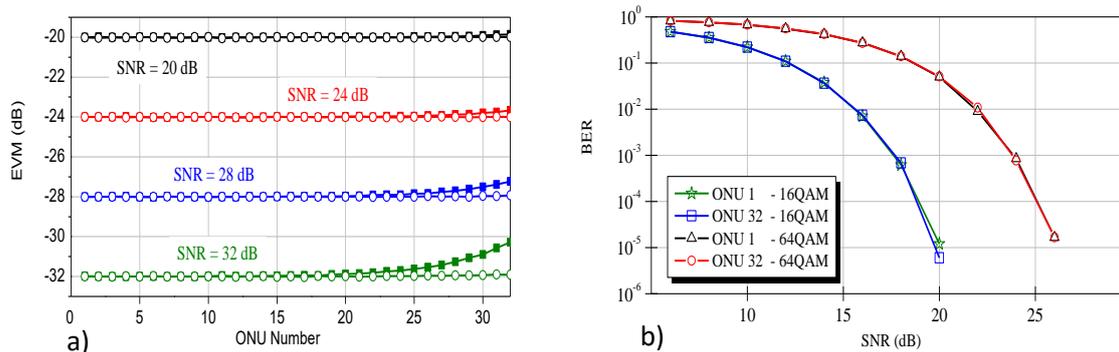


Figura 4.2: (a) EVM x número de ONUs; (b) BER x SNR para 16 e 64 QAM. Fonte Ref. [21].

3 dB da SSMF é de 9,5 GHz [15] e foi alocada uma largura de banda total de 10 GHz. Além disto, foi também calculada a BER versus SNR para 16 e 64-QAM considerando $L = 20$ km e $L_{ONU} = 2$ km (distância do PSC às ONUs). Pode-se observar na Figura 4.2 b. que o desempenho em termos de BER para as ONU#1 e #32 são quase os mesmos em ambas as modulações. Entretanto, é possível notar que 64-QAM requer uma melhoria de 6 dB na SNR se comparado com 16-QAM quando $BER = 10^{-5}$.

A análise da escalabilidade da largura de banda foi realizada através de simulações considerando cem configurações aleatórias para as ONUs, com variação da largura de banda alocada às ONUs e da distância delas ao PSC. A Figura 4.3 a. mostra o EVM versus o número da ONU (número maior indica ONU mais distante) para todas as configurações aleatórias e para SNR fixada em 20 dB. A Figura 4.3 b. mostra a EVM versus número da ONU para as mesmas configurações aleatórias. Porém neste caso, as ONUs mais próximas receberam as sub-bandas de maior frequência. Note que a degradação devido à resposta da fibra foi reduzida quando o processo de alocação de sub-bandas considerou a distância entre ONU e OLT.

4.2 Arquitetura da Camada de Acesso ao Meio

A construção de um protocolo de acesso ao meio eficiente deve considerar diversos fatores. Dentre eles estão: as características inerentes ao meio utilizado, a área de atuação do protocolo, o tipo de acesso requerido, a correta interpretação dos serviços indispensáveis

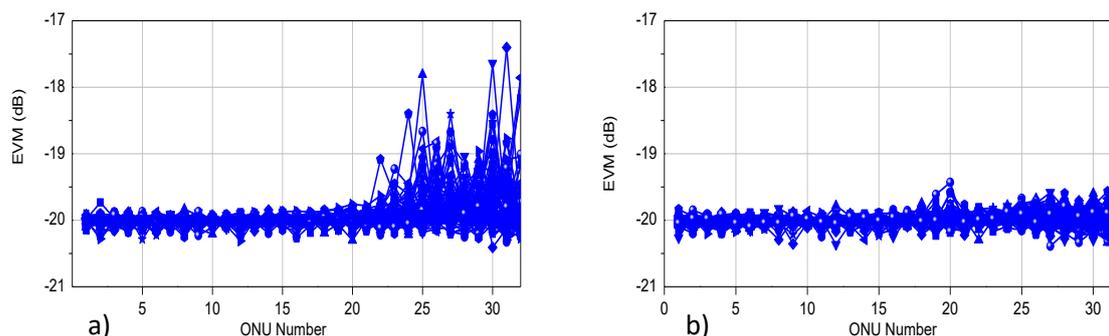


Figura 4.3: EVM x número da ONUs: a) Configuração aleatória; b) ONUs próximas - frequências altas. Fonte Ref. [21].

e acessórios que a camada deve prover e o uso de ferramentas adequadas para testes e simulações [54]. Aspectos, como atraso de propagação e capacidade máxima de transferência de dados, estão relacionados às características do meio, enquanto taxas de dados necessárias e qualidade de serviço estão ligados à área de ação do protocolo. Normalmente o tipo de acesso que exige protocolos mais complexos é o requerido por canais de *broadcast* de alta velocidade, onde a sincronização e o tempo de permissão de acesso ou o tempo de contenção do meio tornam-se críticos e determinantes na escolha do modelo de MAC apropriada. Além disto, delimitar e definir as principais funcionalidades oferecidas pela camada, distinguindo os serviços principais e os serviços adicionais, são regras básicas para elaboração de um protocolo enxuto, prático e eficiente. Finalmente, diante das possibilidades levantadas na análise dos fatores mencionados anteriormente, o uso de ferramentas adequadas de simulação vem fornecer dados indispensáveis para escolha do melhor modelo.

Como visto no Capítulo 2, as arquiteturas EPON e GPON da ITU-T, e suas sucessoras 10G EPON, XGPON e NG-PON2 são as tecnologias atualmente utilizadas, sendo a última mais recentemente padronizadas. Estes padrões especificam os protocolos equivalentes às camadas 1 e 2 do modelo OSI, tendo suas técnicas de acesso ao meio fundamentadas no uso de TDMA e de TWDM. A proposta BS OFDMA PON faz uso da combinação dos métodos de acesso TDMA e OFDMA e busca propiciar maior flexibilidade na alocação de banda especialmente no sentido de *upstream*. Já no sentido *downstream*, a OLT tem conhecimento das demandas para cada ONU e é a única fonte de dados. Assim, as informações podem ser difundidas por *broadcast*. Porém, se for este o caso, a OLT não poderá atribuir às ONUs

mais distantes os blocos de subportadoras de menor frequência.

4.2.1 Coexistência com Outras Tecnologias de PON

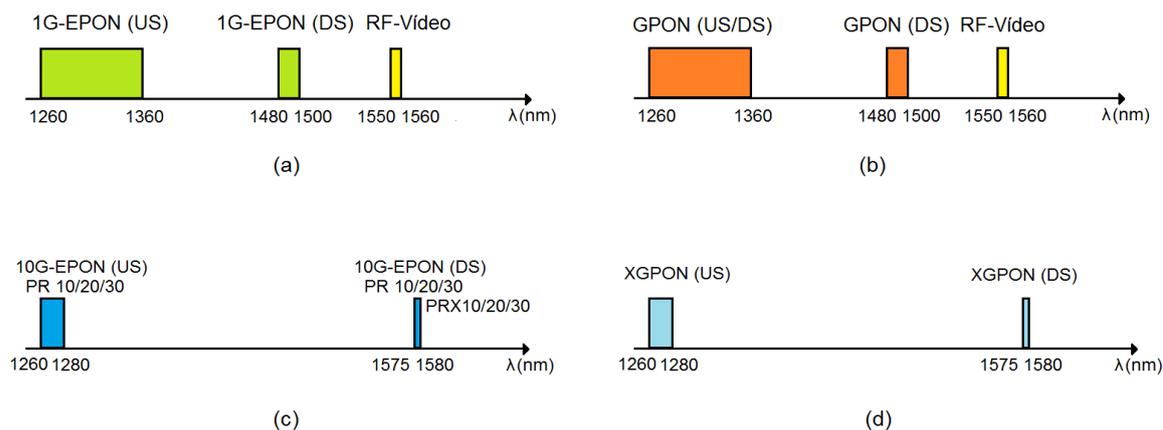


Figura 4.4: Comprimentos de onda utilizados pelos padrões de PON do IEEE e do ITU.

A Figura 4.4 ilustra a faixa de comprimentos de onda adotados pelas PONs em uso atualmente. É possível que a escolha adequada de um comprimento de onda oriundo da fonte de luz centralizada [23], também permita a coexistência deste tipo de tecnologia com outras PONs em uma mesma ODN.

A Figura 4.5 ilustra a utilização de filtros de bloqueio de comprimentos de onda (*WBFs* - *Wavelength Block Filter*) para manter a compatibilidade com as tecnologias já aplicadas sem afetar a configurações existentes. Os comprimentos de onda λ_{down} e λ_{up} exigidos pela BS OFDM PON são selecionados pela OLT no *downlink*. Depois da multiplexação óptica com o transmissor multiplexador óptico *WDM1r* e posterior divisão de potência óptica realizada pelo *splitter*, os comprimentos de onda da BS OFDM PON são separados em cada ONU por demultiplexadores ópticos *WDM B* e *WBFs*.

4.2.2 Alocação Dinâmica de Largura de Banda

A alocação dinâmica de largura de banda é a característica que permite repartir rapidamente a largura de banda da PON baseada nas demandas de tráfego [55]. Uma das grandes

vantagens das TDMA-PONs é sua capacidade de alocar banda de transmissão de uma ONU para outra em função de parâmetros como prioridade de tráfego e tamanho de fila. Nas TDMA-PONs isso é feito, usando apenas uma dimensão, isto é, através da distribuição diferenciada de intervalos de tempo de transmissão.

A BS OFDMA PON, conforme concebida em [21], permite utilizar duas dimensões para realizar a distribuição de largura de banda. Pois, além de alocar intervalos de tempo, também é capaz de distribuir blocos com quantidades variadas de subportadoras. Assim, ONUs com maior prioridade ou com maior quantidade de tráfego podem ser atendidas com um número superior de subportadoras. A operação de aumentar ou diminuir a banda de transmissão de uma ONU é bastante simples. Basta modificar o tamanho dos conversores série/paralelos e paralelos/série da OLT e das ONUs, de modo a incluir ou excluir subportadoras que já se encontram digitalizadas e demoduladas. Isto pode ser feito através de programação no

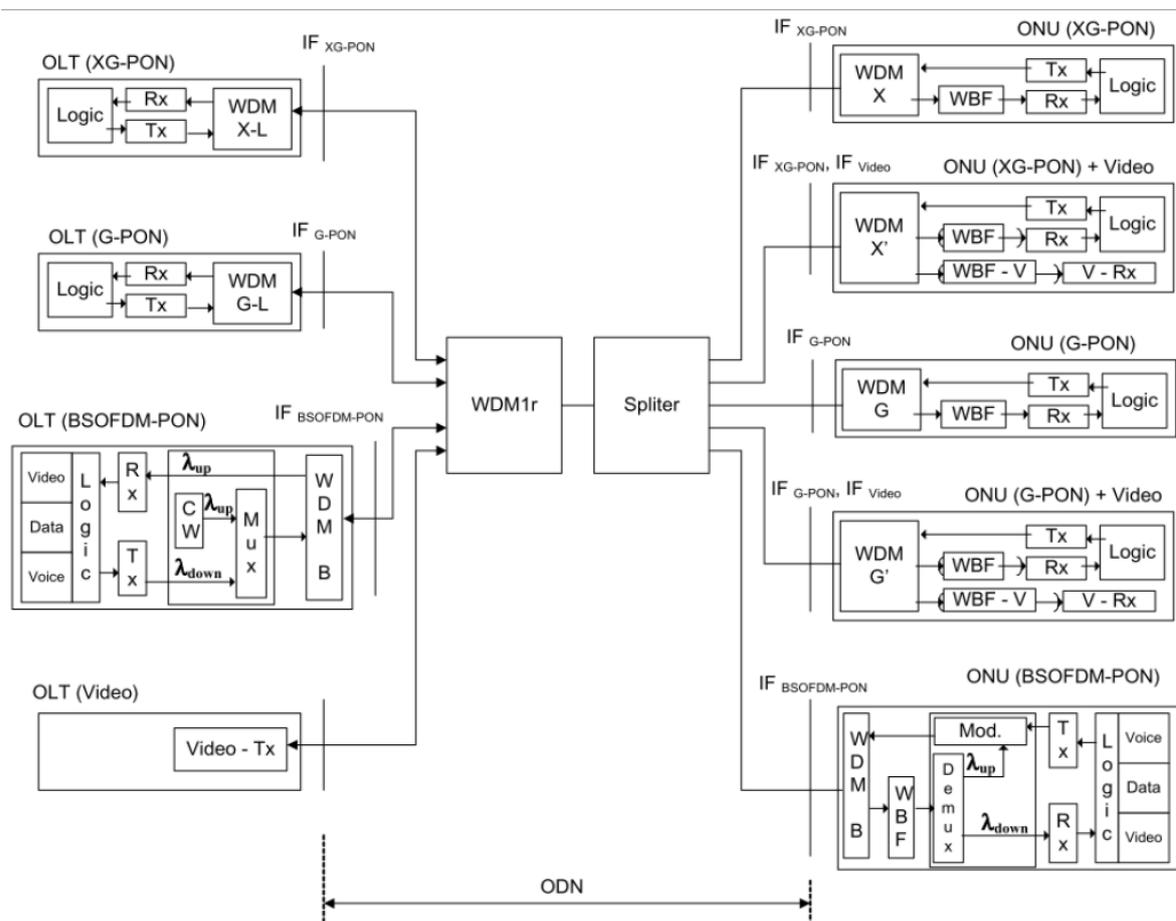


Figura 4.5: Coexistência entre a BS OFDMA PON e outras tecnologias.

dispositivo que trata digitalmente o sinal OFDM, sem que seja necessária mudança alguma na parte física dos transceptores.

A atribuição de recursos da rede às ONUs é sempre crítica, uma vez que é necessário não só garantir uma utilização eficiente de recursos, como também estabelecer uma gestão de largura de banda e escalonamento equitativo (*fair scheduling*) de diferentes fluxos de tráfego gerados pelas ONUs. Assim, a alocação dinâmica a ser adotada na arquitetura BS OFDMA PON deve considerar alguns fatores importantes como:

- Tamanho da FFT/IFFT, pois determina a granularidade das alterações na distribuição de largura de banda. Quanto maior a FFT menor será a porção de banda que pode ser passada de uma ONU para outra;
- Quantidade de subportadoras úteis, que são as subportadoras que podem carregar os dados das ONUs, excluindo-se as que são utilizadas para envio de pilotos, banda de guarda no início e no fim do símbolo OFDM;
- Intervalo de tempo em que as distribuições são realizadas. Quanto menor o intervalo mais rapidamente a rede pode responder à variação de demanda das ONUs, isto é, a troca de informação sobre filas, e como consequência a redistribuição de subportadoras ocorrerá em intervalos menores;
- Distância entre a OLT e a ONU, pois quanto maior a distância menor é a taxa de transmissão de bits que a ONU pode utilizar para enviar seus tráfegos. Além disso, distâncias maiores significam aumento do tempo de ida e volta *RTT - Round Trip Time* ou atraso de ida e volta *RTD - Round Trip Delay* dos pacotes, consequentemente a informação da ONU sobre demanda retrata a situação em instantes num passado cada vez mais distante.

As seções que seguem apresentam três propostas para construção de protocolo MAC para ser utilizado em conjunto com a arquitetura física da BS OFDMA PON. A primeira trata-se de uma adaptação das especificações IEEE adotadas na 10G EPON. A segunda utiliza como base as especificações ITU-T usadas na XGPON. A Terceira proposta apresenta uma

estrutura de camada MAC específica, na tentativa de explorar ao máximo as potencialidades da proposta de camada física descrita em [21].

4.3 Adaptação da MAC EPON para BS OFDMA PON

Esta proposta MAC utiliza, além do acesso ao meio por TDMA, semelhante ao usado nas redes 10G EPON [5], ainda emprega a técnica OFDM. Assim, relaxa algumas restrições próprias das EPONs TDMA/WDM e considera as novas restrições impostas pela arquitetura BS OFDMA PON [21].

Neste modelo, no sentido de *downstream*, a transmissão de dados é realizado por *broadcast*. A OLT utiliza todas as subportadoras OFDM enviando pacotes *Ethernet*, assim como é feito na 10G EPON. Cabe às ONUs recebê-los, extrair o identificador *LLID* contido no cabeçalho e, com base neste, decidir utilizar ou descartar seus respectivos *payloads*.

No sentido de *upstream*, a OLT determina quais blocos de subportadoras cada ONU deve utilizar. As ONUs preenchem seus blocos de subportadoras com dados no formato de pacotes *Ethernet*. A diferença é que os blocos de subportadoras designados às ONUs se mantêm inalterados durante uma porção de tempo (*Grant Time* = $N \cdot T_s$), onde N é um valor inteiro variável, que também é previamente determinado na OLT, e T_s é o tempo do símbolo OFDM (Figura 4.6). Outra diferença básica é que o *Grant Time* não inclui os tempos para ligar e desligar o laser, devido a implementação de camada física diferente, o que reduz os tempos de guarda entre as alocações de tempos consecutivas.

4.3.1 Mecanismo de Controle

Considerando que as ONUs estão localizadas a diferentes distâncias da OLT, o acesso ao canal de *upstream*, requer que a OLT determine o instante em que cada ONU iniciará sua transmissão. Para isso, é preciso conhecer o *RTT* e o tempo de processamento demandado por cada ONU. Estes parâmetros podem ser obtidos usando as mesmas marcas temporais (*time stamp*) utilizadas pelo MPCP [5, 7], a partir das quais será possível determinar o valor

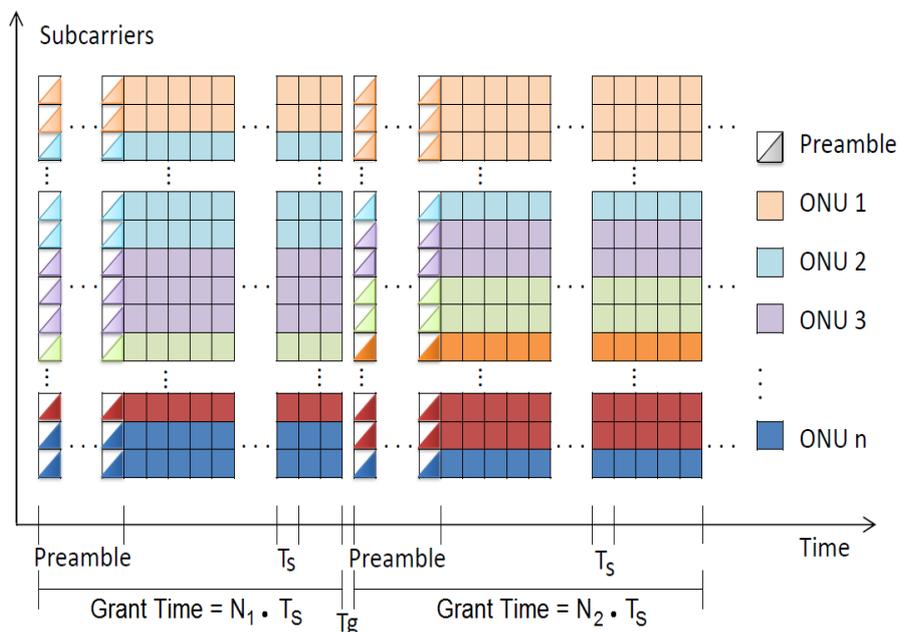


Figura 4.6: Distribuição de subportadoras no *upstream* e *grant times*.

do *wait time* que cada ONU deve esperar para iniciar a transmissão, após a chegada do *Grant Time* correspondente. Note que, na 10G EPON, a OLT envia um *GATE* para dar início a transmissão de cada ONU de maneira a não haver sobreposição das rajadas. Aqui, os diferentes *wait times* tentam garantir a total sobreposição dos símbolos transmitidos pelas diferentes ONUs.

Assim como é feito na 10G EPON, a demanda das ONUs é informada por quadros do tipo *REPORT*. Os quadros do tipo *GATE* gerados na OLT informam início e fim do bloco de subportadoras e o *wait time* de cada ONU, bem como o valor do *Grant Time* para esta distribuição de subportadoras. A Figura 4.7 ilustra as alterações propostas (em lilás) para os quadros de Controle (*GATE* e *REPORT*) utilizados nesta proposta.

Onde o campo *Opcode* indica o tipo de quadro de controle, por exemplo, *Opcode* = 00 – 02 para quadros do tipo *GATE*. Neste quadro, o campo *Message/PAD* contém os seguintes subcampos: *Number of Grants*, indicando a quantidade de *grants* que a mensagem carrega (um máximo de 8), *Grant Bitmap*, campo adicionado para indicar os *Grants* de quais as filas estão presentes. *Grant length #n*, que informa o número de bytes que a ONU deve retirar da fila "n" (*Queue #n*) para transmitir, *SC – INI* e *SC – FIN*, campos adicionados para indicar o início e o final do bloco de subportadoras que a ONU deve utilizar, *Wait Time* e *Grant Time*,

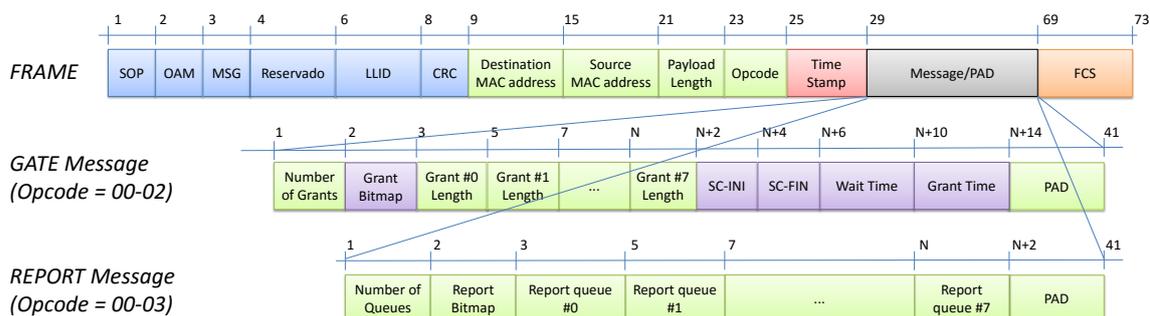


Figura 4.7: Quadros de controle *GATE* e *REPORT*.

também inseridos e já definidos anteriormente, e o *PAD*, que pode variar de de 10 a 39 bytes como enchimento para manter o *payload* com 64 bytes. O quadro tipo *REPORT* não sofreu alteração e o campo *Message/PAD* contém: *Number of Queue*, indicando o número de filas que possuem dados a enviar (um máximo de 8 filas), *Report Bitmap*, indica quais filas estão presentes ou não no *REPORT*, *Report Queue #n*, informa a quantidade de bytes a fila "n", e o *PAD*.

O Cálculo do *wait time* utiliza as mesmas marcas temporais definidas na Seção 2.1.1. Como exemplo, suponha um cenário com 3 ONUs dispostas a distâncias diferentes e com tempos de processamento diferentes. A Tabela 4.2 apresenta os dados relativos ao cenário proposto.

Tabela 4.2: Cenário Proposto como Exemplo de Cálculo do *Wait Time*.

	<i>ONU#1</i>	<i>ONU#2</i>	<i>ONU#3</i>
Distância da ONU até o PSC	0 km	5 km	10 km
Distância OLT - PSC	10 km	10 km	10 km
Tempo de processamento ($T_4 - T_1$)*	35 μ s	35 μ s	35 μ s
Varição do tempo de processamento	± 10 μ s	± 10 μ s	± 10 μ s
Tempo de propagação ($T_5 - T_4$)*	100 μ s	150 μ s	200 μ s
Escorregamento devido a Dispersão Cromática	0.34 ns	0.51 ns	0.68 ns
Varição do Tempo de propagação devido ao meio ambiente**	± 2 ns	± 3 ns	± 4 ns

* Tempo de processamento médio adotado pela ITU em [9]

** De acordo com [56] a variação é menor que 0.2 ns por km

Considere que o *GATE* da *ONU#3* parta da OLT no instante T_0 , como determinar os instantes em que os *Gates* das *ONU#1* e *ONU#2* devem partir?

Como visto na Tabela 4.2, o maior RTT é o $RTT_3 = 235 \pm 10.0 \mu s$, e as diferenças entre os RTT s são $d_{1-3} = 100 \pm 10.0 \mu s$ e $d_{2-3} = 50 \pm 10.0 \mu s$. Logo o instante de partida do $GATE_1$ deveria ser em $T1 = T0 + d_{1-3}$, e do $GATE_2$ em $T2 = T0 + d_{2-3}$. Entretanto, a fim de acomodar as variações dos tempos de propagação e de processamento, é necessário inserir um adicional de tempo, para equalização, maior ou igual à máxima variação observada ($10.0 \mu s$). Além disso, ONUs com o mesmo RTT exigiriam que os seus respectivos $GATE$ s partissem simultaneamente da OLT, gerando uma impossibilidade técnica. Em consequência disso foi proposta a inserção do campo *Wait Time*, indicando o tempo de espera que a ONU, após ter recebido seu respectivo $GATE$, deve adotar antes de começar a transmitir. Cabe ressaltar que incertezas, como as impostas pela dispersão cromática e pelas condições do ambiente no tempo de propagação, podem ser desprezadas, uma vez que, variações menores que o prefixo cíclico (CP) podem ser facilmente corrigidas na recepção. A Figura 4.8 apresenta um diagrama temporal ilustrando o procedimento de sincronismo.

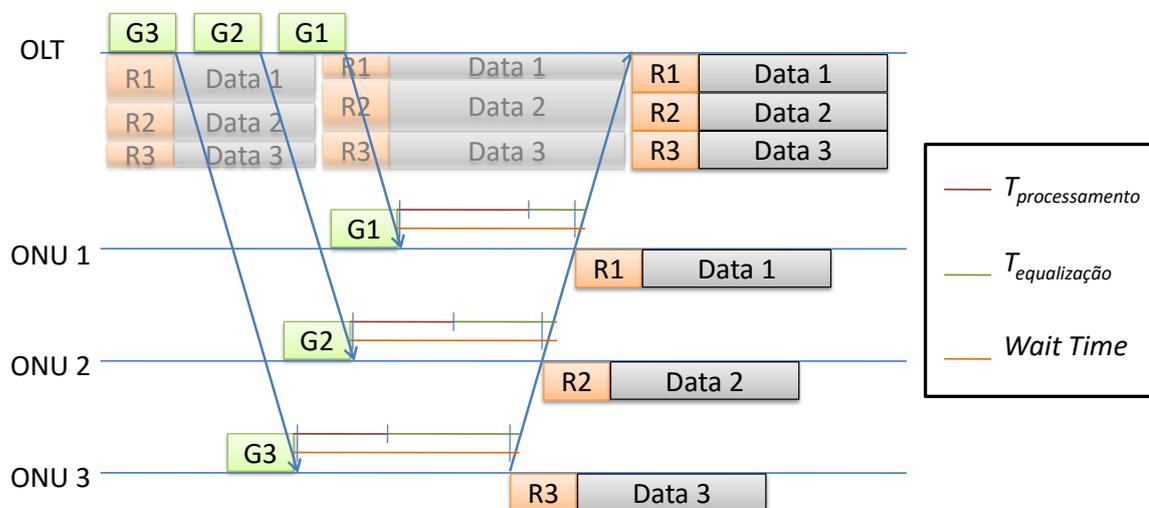


Figura 4.8: Diagrama de tempo - controle e sincronismo.

4.3.2 Processo de Registro das ONUs

O processo de registro das ONUs também é feito como na MAC da 10G EPON [5] e é usado de maneira similar. Neste esquema, a ONU só poderá enviar um quadro *REGISTER-REQ* durante o tempo garantido pelo $GATE$, com *LLID* de *broadcast*, enviado pela OLT, uma vez que a ONU não registrada ainda não possui um *LLID* próprio. Considerando que

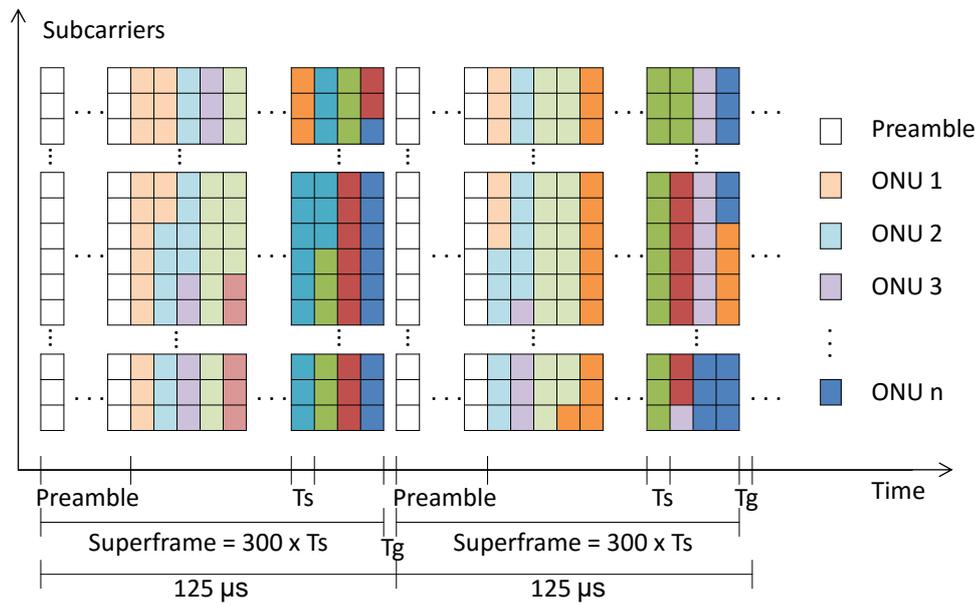
este modelo difere do adotado na 10G EPON apenas no cálculo do *Wait Time* e no uso de subportadoras OFDM, outras informações sobre este processo podem ser vistas na seção 2.1.1 ou obtidas em [5, 25].

4.4 Adaptação da MAC GPON para BS OFDMA PON

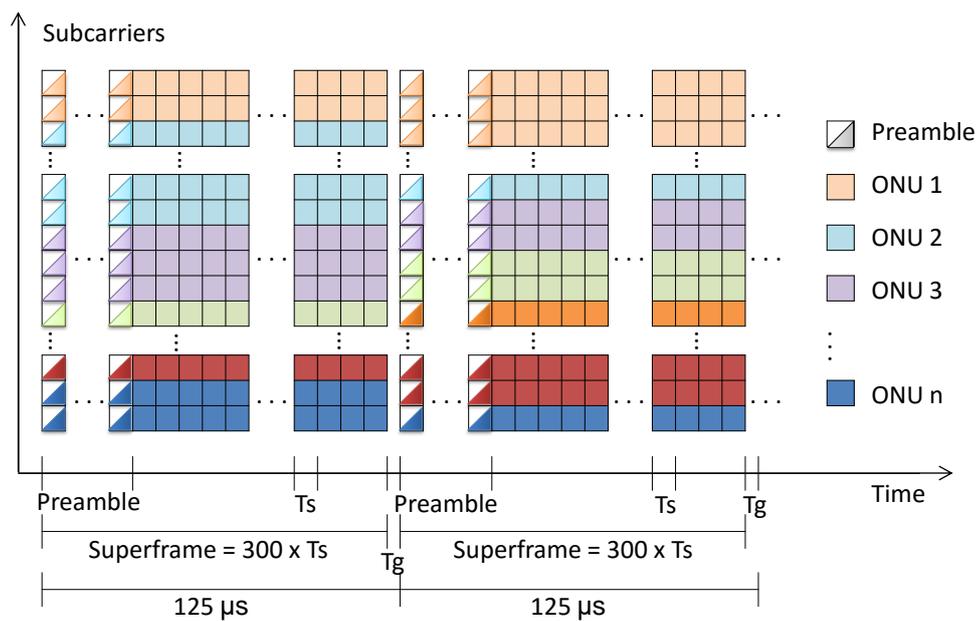
Nesta proposta de adaptação, descrevemos as alterações necessárias para transformar uma camada MAC puramente TDMA da XGPON, para uma arquitetura híbrida que emprega uma combinação de TDMA e OFDMA. As Figuras 4.9 a. e b. ilustram a alocação de subportadoras durante cada quadro (*superframe*).

Neste protocolo, na transmissão de *downstream*, a OLT também usa o conjunto de subportadoras úteis para enviar dados às ONUs por um canal de *broadcast*. Os símbolos OFDM são encapsulados em *superframes*, enviados para todas as ONUs a cada $125 \mu\text{s}$, exatamente como na XGPON. Tal como proposto em [4], os símbolos OFDM têm duração de $T_S = 415,8 \text{ ns}$ e são compostos por 3.686 subportadoras úteis. Portanto, cada *superframe* transmite 300 símbolos OFDM, mantendo um intervalo de guarda de $T_g = 260 \text{ ns}$ entre *superframes*. A capacidade total do *superframe* gira em torno de 550 kBytes, se o mapeamento das subportadoras for em 16-QAM. Símbolos de treinamento (*Preamble*) são utilizados no início de cada *superframe* para realização da equalização e do sincronismo de símbolos e de quadro.

Na direção de *upstream*, as ONUs compartilham os símbolos OFDM usando blocos de subportadoras com tamanhos compatíveis com suas demandas. As SDUs e os símbolos de treinamento também são encapsulados em um *superframe* de $125 \mu\text{s}$. Os blocos de subportadoras são definidos na OLT através de um DBA que satisfaça as restrições de QoS. Assim como na proposta anterior, a OLT necessita conhecer os *RTTs* das ONUs para determinar o início das transmissões. Para isto, utiliza os mecanismos de temporização e sincronismo presentes no processo de ativação da ONUs usado na XGPON (Seção 2.2.2).



(a) Downstream



(b) Upstream

Figura 4.9: Diagrama de alocação de subportadoras:(a) *Downstream*; (b) *Upstream*.

4.4.1 Descrição do Mecanismo de Controle

Como na XGPON, o *superframe* contém cabeçalhos que são tratados em diferentes subcamadas como mostra a Figura 4.10. Os detalhes e as modificações necessárias para adaptação estão descritas a seguir.

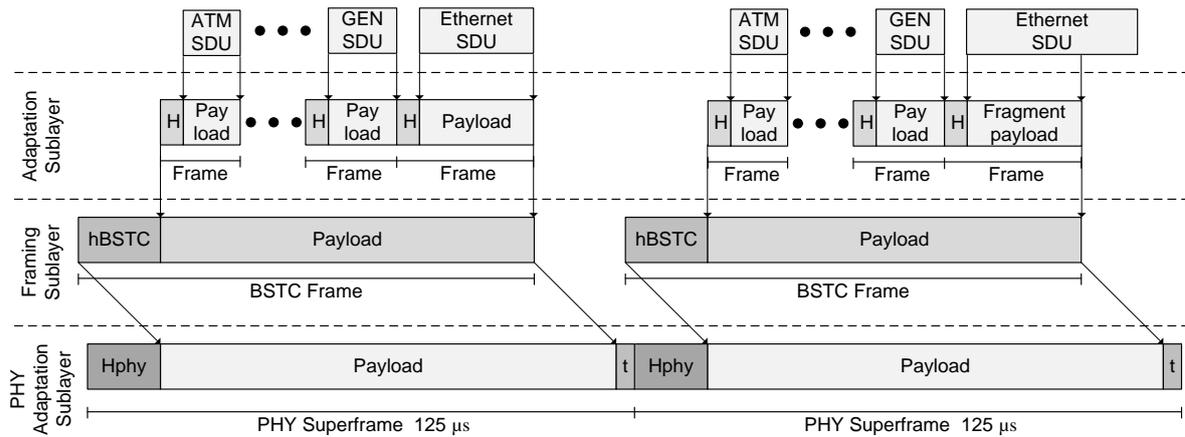
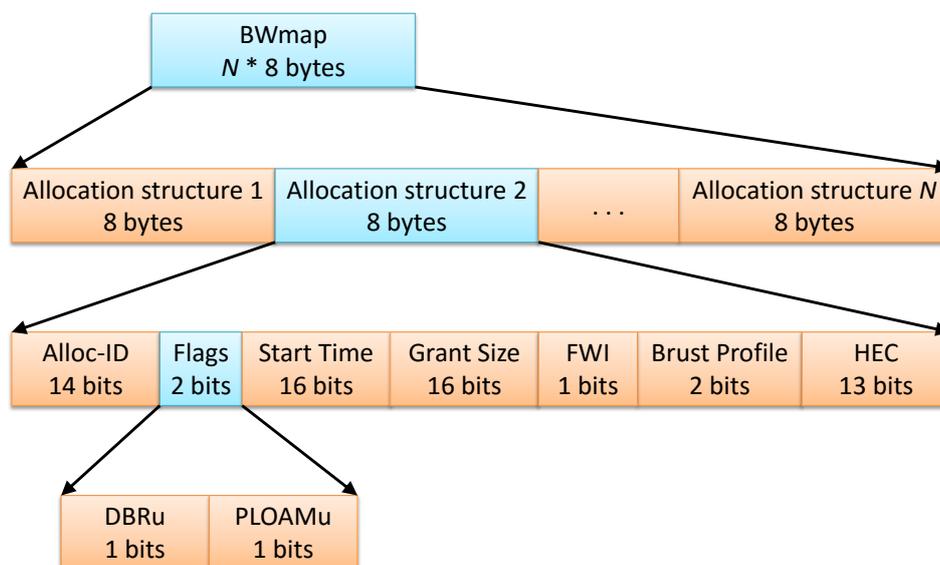
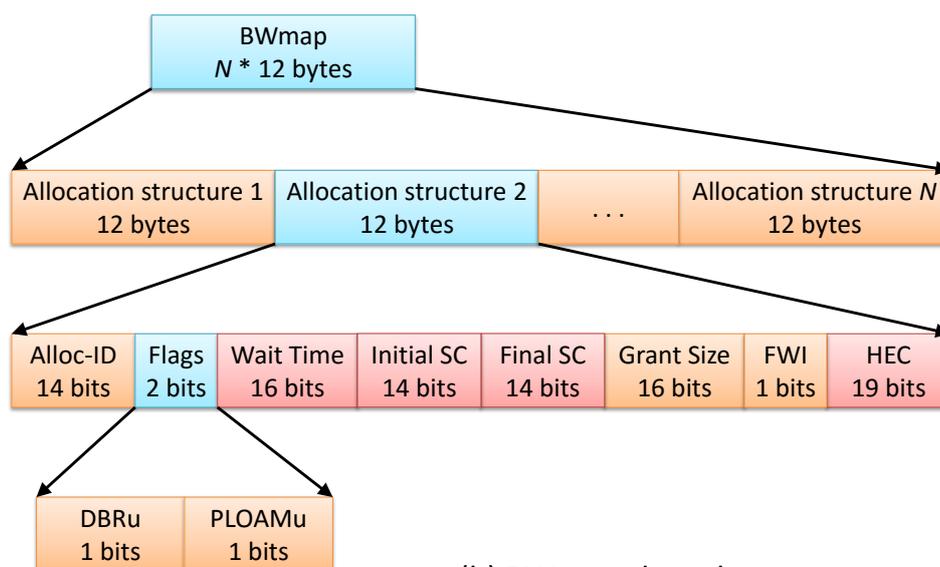


Figura 4.10: Estrutura de quadros da MAC BS OFDMA em três subcamadas.

A - Subcamada de Adaptação - Esta subcamada não sofreu alterações, isto é, os procedimentos de multiplexação e encapsulamento das SDUs são feitos exatamente como no método XGEM do padrão XGPON [9].

B - Subcamada de Enquadramento (*Framing*) - O gerenciamento da rede BS OFDMA PON é realizado nesta subcamada. Identificada como camada de convergência da transmissão com largura de banda escalável (*BSTC - Bandwidth Scalable Transmission Convergence Layer*), ela recebe os quadros da subcamada de adaptação, monta o *payload* e adiciona o cabeçalho *hBSTC*. No *downstream*, este cabeçalho contém o *BWmap* e o *PLOAMd* assim como na XGPON, porém a estrutura de campos contida no *BWmap* foi modificada para indicar os blocos de subportadoras disponíveis para cada ONU utilizar durante a transmissão no upstream. As Figura 4.11 a. e b. mostram as diferenças entre as estruturas do *BWmap* da XGPON e da BS OFDMA PON. Note que no caso da XGPON, o campo *Start Time* está presente para garantir que os tempos alocados às rajadas não se sobreponham, usando a multiplexação TDMA. Entretanto, no caso desta proposta, durante cada *superframe* a multiplexação é feita por OFDMA, ou seja, os *superframes* oriundos das ONUs devem estar totalmente sobrepostos. Assim, o nome e a função do campo foram alterados, passando a indicar quanto tempo cada ONU deve esperar para iniciar sua transmissão (*wait time*), após ter detectado o *superframe* de *downstream*.

A Figura 4.11 b. mostra os dois campos adicionais que indicam o início (*SC inicial*) e o término (*SC final*) do bloco de subportadoras a ser usado pela ONU. O campo de perfil

(a) Bwmap original – G.987.3(10).F8-2¹³

(b) BWmap alterado

Figura 4.11: Comparação entre o *BWmap* XGPON e o *BWmap* BS OFDMA PON.

de rajada original foi removido, uma vez que as ONUs, agora, têm tempo de transmissão fixo correspondente a 300 símbolos OFDM. Assim, para *upstream*, o tamanho em bytes do *payload* de uma ONU depende do formato de modulação e do tamanho do bloco de subportadoras a ela alocado. No *upstream*, a construção do *superframe* se dá similarmente como na XGPON, a diferença é que a duração do *superframe* é também de 300 símbolos OFDM.

C - Subcamada de Adaptação ao Nível Físico - Esta subcamada é responsável pelos procedimentos de adaptação para o nível físico. A estrutura física do *superframe* está retratada na Figura 4.12 - Estrutura física do *superframe*. O preâmbulo é modulado em BPSK e é composto de seis repetições de uma sequência de treinamento curta, utilizada para sincronização do *superframe* e do tempo de símbolo, e de duas repetições de uma sequência de treinamento longa, para que o receptor faça o refinamento do tempo de símbolo. Novamente aqui, foram utilizadas, inicialmente, as recomendações do padrão 802.11a [57]. O campo *RATE*, modulado em BPSK indica qual a modulação utilizada no *Payload*. O campo *Tail* é apenas um indicador do tempo de guarda de 260 ns entre os *superframes*.

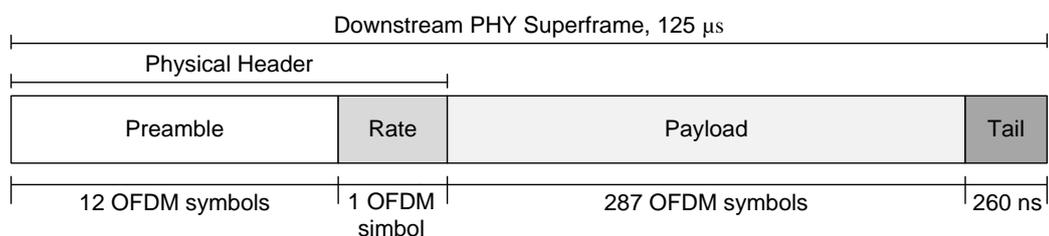


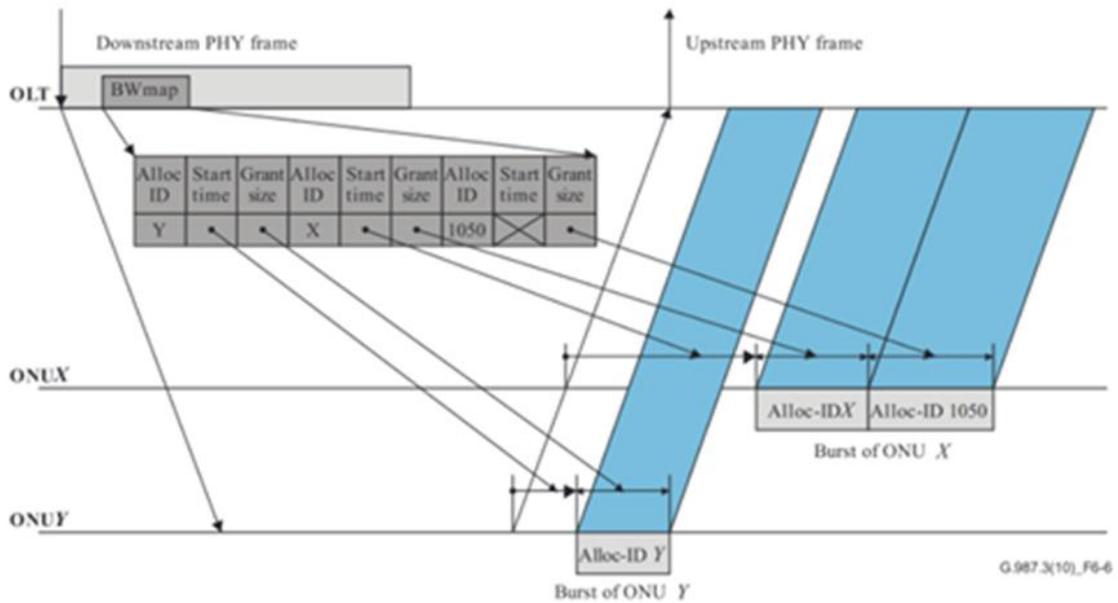
Figura 4.12: Estrutura do *superframe* na subcamada de adaptação ao nível físico.

4.4.2 Ativação das ONUs e Sincronismo

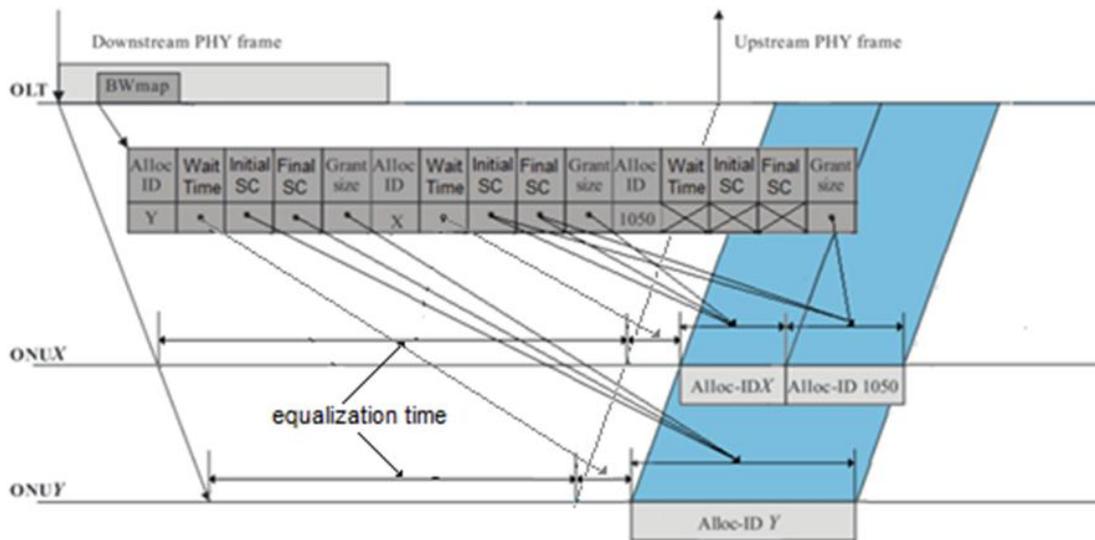
As ONUs que ainda não participam do processo de alocação de banda, seja por que estavam desligadas ou por terem sido excluídas por falha ou falta de sincronismo, devem ter oportunidade de solicitar o registro e ter direito a participar do processo de alocação de banda da rede. Para isto, a cada N *superframes* a OLT envia no *BWmap* com um *Alloc – ID* de *Discovery* (65535 – xFFFF) para ser utilizado pelas ONUs que ainda não possuem um *ONU – ID* específico. O *BWmap* disponibilizará para este *Alloc – ID* um *Grant Size* com um valor suficiente apenas para a ONU ingressante possa enviar o seu cabeçalho hBSTC.

O processo de ativação das ONUs ocorre exatamente como o descrito no padrão XGPON [9]. O *Wait Time* do *Alloc – ID* de *Discovery* será grande o suficiente para que não se haja sobreposição dos quadros no *upstream*. Neste *grant* as ONUs não registradas utilizam a totalidade de subportadoras, o que poderá causar colisões entre duas ou mais ONUs tentando obter registro. Entretanto, há a possibilidade de várias ONUs conseguirem solicitar registro

em um mesmo período, já que existe diferença entre os *RTT*s. Assim como na XGPON, no caso de insucesso na obtenção de registro, devido a possíveis colisões, as ONUs possuem um contador aleatório que evita nova colisão com a mesma ONU da colisão anterior.



(a)



(b)

Figura 4.13: Diagrama de tempo comparando: (a) BWmap original da XGPON e (b) BWmap adaptado para BS OFDMA PON.

O processo de alocação de largura de banda entre as ONUs requer a compensação do *ranging*, Sendo possível tolerar um atraso mínimo (menor que o CP) na transmissão do *superframe* no *upstream*. Portanto, OLT necessita manter atualizados os valores dos tempos de equalização das ONUs. A Figura 4.13 apresenta os diagramas de tempo para *upstream* da XGPON em comparação com a BS OFDMA PON.

4.5 Proposta de MAC Específica para BS OFDMA PON

Esta proposta, descreve uma camada MAC para a arquitetura BSOFDM PON que também emprega uma combinação de TDMA e OFDMA. Entretanto, difere da proposta anterior, visto que, são atribuídos blocos de subportadoras para o tráfego das ONUs também no *downstream*. Além disso, outra diferença é que o controle no *downstream* é realizado fora da banda de dados.

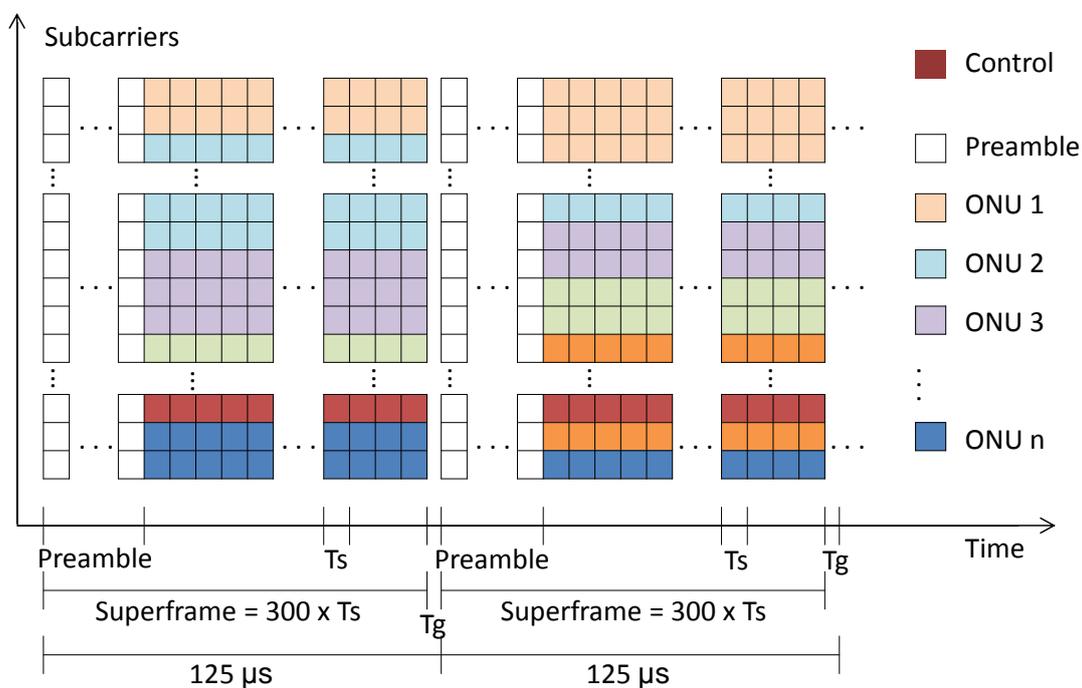


Figura 4.14: Diagrama de alocação de subportadoras BS OFDMA PON no *downstream*.

A Figura 4.14 apresenta um diagrama de alocação de subportadoras em função do tempo. Note que o bloco de subportadoras de controle é fixo e posicionado adequadamente no es-

pectro de modo a transportar as informações de controle com menor probabilidade de erro possível. Uma das vantagens deste modelo é que a distribuição dos blocos de subportadoras, em função da distância ONU - OLT, também pode ser feita na direção de *downlink*, ou seja, é possível distribuir os blocos com frequências mais baixas para as ONUs mais distantes.

4.5.1 Mecanismo de Controle de Acesso

Esta MAC proposta especificamente para a BS OFDMA PON também requer uma arquitetura em três subcamadas. Assim um *superframe* contém cabeçalhos que são tratados em cada uma das subcamadas. A estrutura do *superframe* é a mesma apresentada na Figura 4.10 da Seção 4.4.1.

A - Subcamada de Adaptação - Esta subcamada é responsável por multiplexar e encapsular os SDUs dos diversos tipos de serviços da ONU. O método de encapsulamento em *subframes* e sua multiplexação são realizados a partir dos campos contidos no cabeçalho (H) ilustrado na Figura 4.15. São eles: identificador para o protocolo encapsulado (*SDU – ID*), *Type of service* e *Flags* para encriptação (bit 20) e fragmentação do *payload* (bits 21 e 22) e reservado (bit 23), *Length* com o comprimento do *payload* e *HEC* (*Hybrid Error Correction*) para o cabeçalho.



Figura 4.15: Estrutura do cabeçalho (H) da camada de adaptação.

B - Subcamada de Enquadramento (*Framing*) - Esta subcamada é responsável pelo gerenciamento da BS OFDMA PON. Identificada como subcamada de convergência de transmissão de largura de banda escalável (BSTC), ela recebe os *subframes* e monta o *payload* dos quadros desta subcamada. Adiciona o cabeçalho hBSTC e constroi o quadro BSTC. Os quadros de dados são montados de modo independente para cada ONU, isto é, para cada bloco de subportadora é gerado um quadro BSTC com um conjunto e *subframes* destinado

a determinada ONU. Além disso, esta subcamada gera os quadros de controle de *downstream* a serem transmitidos através do bloco de subportadoras de controle. Assim, o quadro BSTC pode transportar dois tipos de *payloads*: uma sequência de *subframes* da subcamada de adaptação, ou informações de controle para todas as ONUs. O hBSTC consiste dos seguintes campos: *TP – Frm*, identificador para o tipo de *payload*; *ONU – ID*, usado para identificação da ONU; *SF – seq*, que indica o número sequencial do quadro BSTC, e *HEC* (*Hybrid Error Correction*), para detecção e correção de erros do cabeçalho. A Figura 4.16 mostra os campos do cabeçalho dos quadros no *downstream*, e o detalhamento do *payload* quando transporta informações de controle.

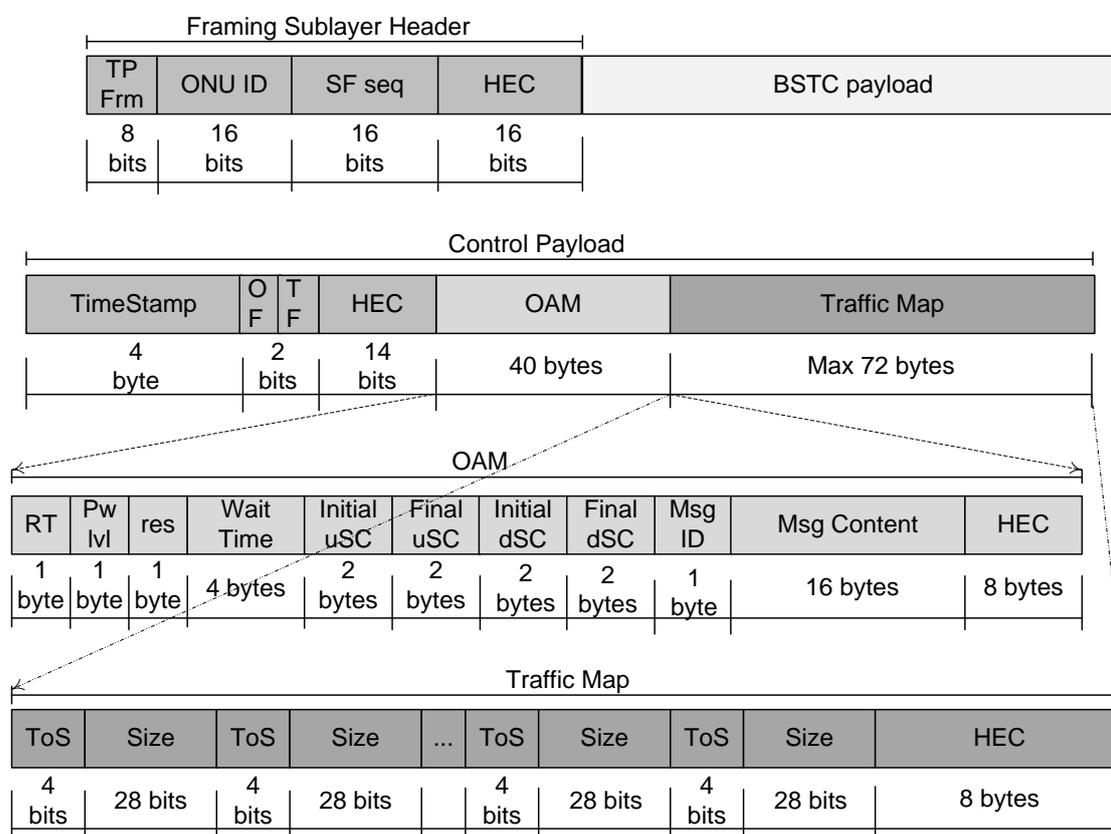


Figura 4.16: BSTC *payload* dos quadros de controle no *downstream*.

O *payload* dos quadros de controle no *downstream* têm tamanho reduzido de 6, 46, 78 ou 118 bytes. Isto ocorre porque os campos do *OAM* e do *TrafficMap* podem ou não estar presentes no *payload*. O primeiro campo, *Time Stamp*, contém o instante em que a transmissão do quadro se inicia; os *flags OF* (*OAM Flag*) e *TF* (*Traffic Flag*) indicam a presença ou não das informações de *OAM* e do mapa de tráfego (*Traffic Map*), e *HEC*

é usado para correção de erros destes três campos. A estrutura de informações de *OAM* é composta de 40 bytes e está dividida nos seguintes campos: *RT*, indicando a taxa de dados que a ONU deve usar, e como consequência o formato de modulação do seu bloco de subportadoras; *PWlvl*, correspondendo ao nível de potência requerida da ONU; *res*, bits de reserva para uso futuro; *Wait Time*, informando quanto tempo a ONU deve esperar para iniciar sua transmissão após detectar o *superframe* de *downstream*; *Initial xSC* e *Final xSC* como início e final do bloco de subportadoras a ser usado pela ONU, onde $x = d$ corresponde a bloco para *downstream* e $x = u$ para *upstream*; *MsgID* é o código da mensagem de OAM contida no campo *Msg Content*; e *HEC* para as informações de OAM.

O mapa de tráfego pode ter até 72 bytes, estruturados em blocos de 4 Bytes, onde os 4 primeiros bits representam o campo *ToS* (*Type of Service*) e os demais 28 bits para o campo *Size*, contendo a quantidade em bytes que a ONU deve retirar da fila correspondente ao *ToS* e transmitir; finalmente o campo *HEC* para corrigir erros ocorridos no *Traffic Map*. Note que com 4 bits é possível atender a até 15 tipos de serviço, uma vez que o $ToS = 15$ indica o fim do mapa de tráfego.

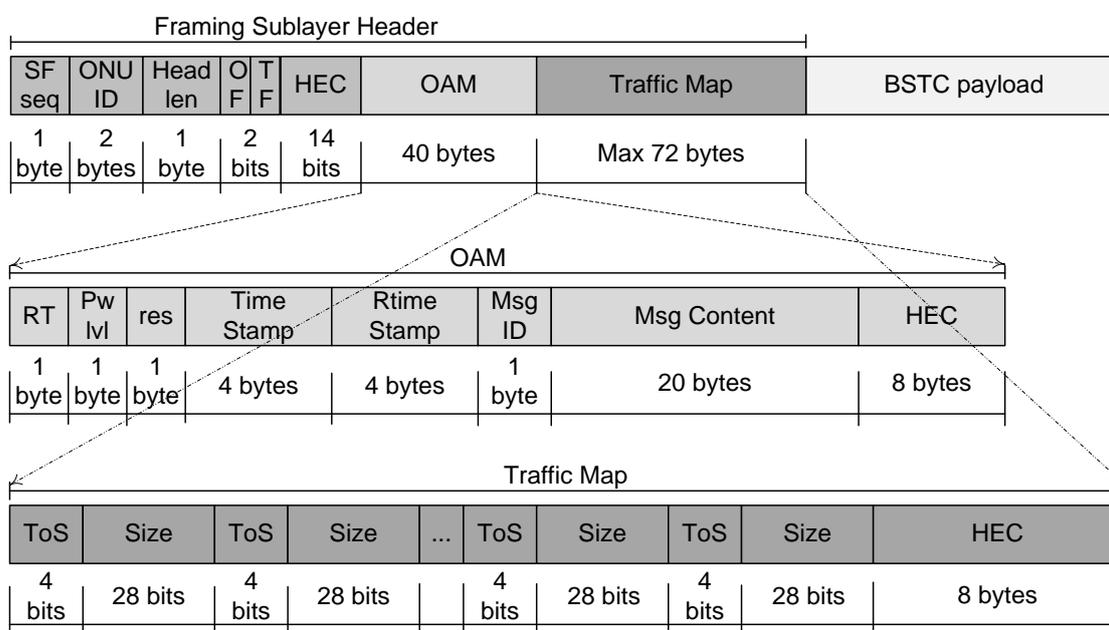


Figura 4.17: Estrutura do quadro na subcamada de enquadramento no *upstream*.

Na direção de *upstream* as ONUs procedem da mesma forma com os *subframes* correspondentes às suas SDUs. Entretanto, o quadro no *upstream* difere do quadro no *downstream*,

pois além dos dados, também carrega as informações de controle dentro da mesma estrutura. Figura 4.17 mostra a estrutura dos quadros no *upstream*. Deste modo, o *SF seq* passa a ser o primeiro campo seguido do identificador da ONU, usado apenas para confirmação. Em seguida os *flags OF* e *TF* indicando a presença ou não de informações de *OAM* e *TrafficMap*. A principal diferença está nas informações de *OAM*, que trazem os campos: *Time Stamp*, onde a ONU informa a diferença entre o instante da chegada do *superframe* de *downstream* e o instante em que o nível físico iniciou a transmissão do *superframe* de *upstream* correspondente; e o campo *RTime Stamp*, utilizado para ONU informar o seu real tempo de processamento, isto é, a diferença entre o instante de chegada do *superframe* de *downstream* na ONU e o instante em que esta ficou pronta para transmitir o *superframe* de *upstream* correspondente. O *Traffic Map* funciona de modo semelhante, porém, no *upstream* o campo *Size* indica a quantidade de bytes armazenada na fila associada ao tipo de serviço *ToS*.

C - Subcamada de Adaptação ao Nível Físico - Esta subcamada especifica os procedimentos para adaptação ao nível físico. as Figuras 4.18 e 4.19 mostram as estruturas dos *superframes* de *downstream* e *upstream*, respectivamente.

O comprimento em bytes de carga útil no *downstream* depende na modulação da subportadora de *downlink*. Enquanto no *upstream*, depende da modulação e do número de subportadoras atribuídos à ONU. Como na Seção 4.4.1, o preâmbulo contém uma sequência de treinamento curta e duas repetições de uma sequência de treinamento longa, utilizadas para sincronização de quadro e de símbolo, respectivamente, de acordo com [57]. Em termos de modulação, o campo *RATE* constituído de um único símbolo OFDM, indica a modulação utilizada na carga útil (BPSK, QPSK, QAM 16 ou 64) [57]. O campo *Delimiter* no *superframe* de *upstream* é usado como delimitador pelas ONUs para confirmar para a OLT o início e término de seu bloco de subportadoras. Cada ONU marca a primeira metade de seu bloco de subportadoras com bits 1 e a última metade com bits 0. Estes campos compõem o cabeçalho físico denominado HPHY. O separador *Tail* é simplesmente um indicador do intervalo de guarda de 260 ns entre os *superframes*.

Note que, para *downstream*, o *payload* é formado por 287 símbolos OFDM, enquanto que no *upstream* são 286, esta diferença ocorre devido ao campo *Delimiter* presente no

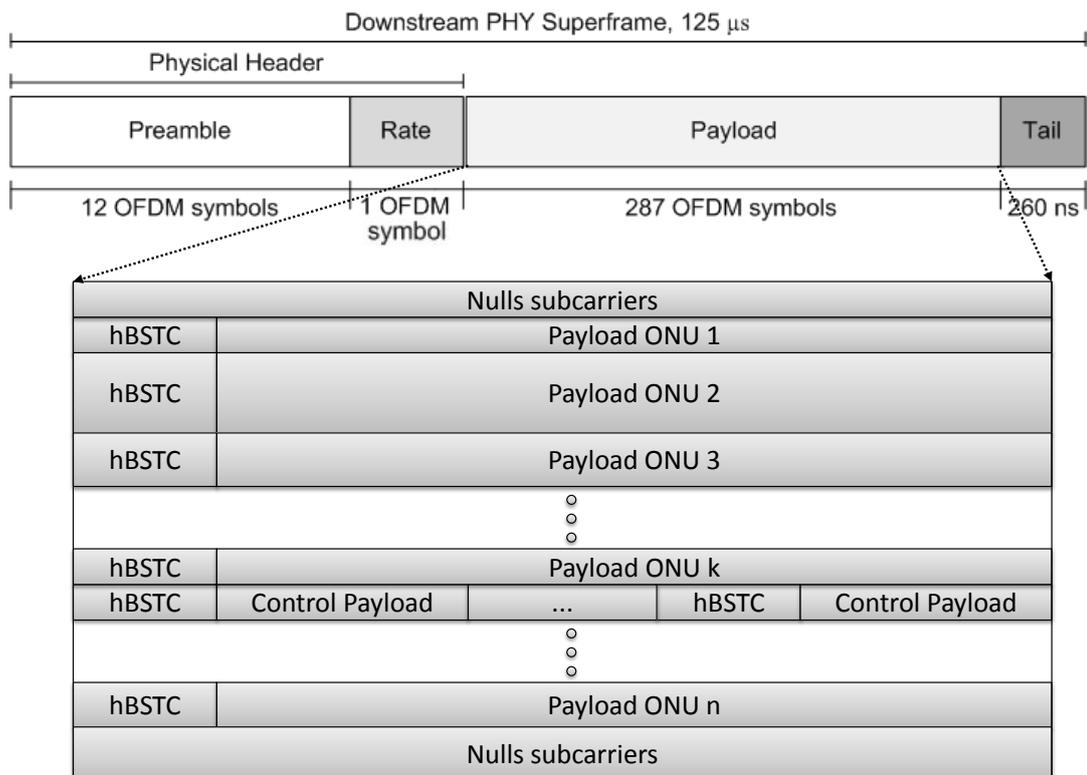


Figura 4.18: Estrutura do *superframe* no *downstream*.

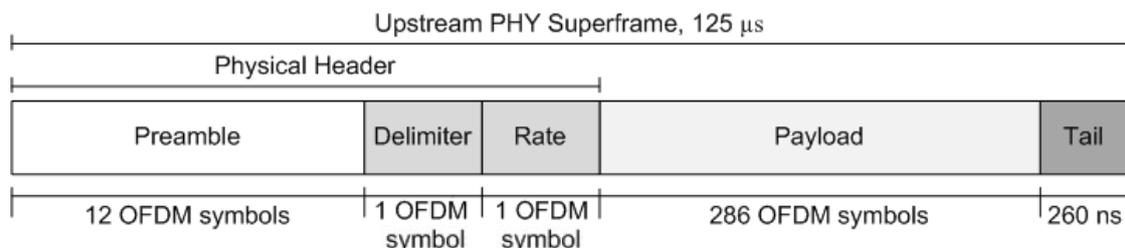


Figura 4.19: Estrutura do *superframe* no *upstream*.

superframe de *upstream*.

4.5.2 Sincronismo dos *Superframes* no *Upstream*

Nesta arquitetura, o processo de divisão da capacidade do canal entre as ONUs no *upstream* também requer que os *superframes* enviados por elas cheguem a OLT com o mínimo de atraso possível. Assim, a OLT utiliza o *Wait Time* das informações de OAM para indicar às ONUs quanto tempo devem esperar após a chegada do *superframe* de *downstream* para

iniciarem a transmissão do *upstream*. Os *RTTs*, os tempos de processamento, os atrasos de propagação e suas variações são parâmetros muito importantes para estimar o valor do *Wait Time* para cada ONU. O *RTT* de uma ONU específica é obtido no processo de registro e ajustado a partir da identificação dos atrasos dos *superframe* pela OLT. Dois diagramas de tempo foram utilizados para ilustrar o processo de sincronismo de ONUs situadas fisicamente a diferentes distâncias da OLT.

A Figura 4.20 a. apresenta os *RTTs* e os tempos de processamento sem o emprego do *Wait Time*. T_{sg} indica o instante em que a OLT inicia a transmissão do *superframe*, T_{p_i} é o tempo de processamento gasto pela ONU_{*i*}, e R_{t_i} representa o instante em que o *superframe* correspondente enviado pela ONU_{*i*} chega à OLT. Em virtude dos diferentes tempos de processamentos e das diferentes distâncias entre a OLT e as ONUs, os *RTTs* gerados também serão diferentes. Assim, para que a chegada dos *superframes* no *upstream* seja simultânea, deve-se designar para cada ONU um tempo de espera (*Wait Time*) adequado para início da transmissão. Além disso, os atrasos e os *Wait Times* devem ser constantemente corrigidos pela OLT com base nos campos *Time Stamp* e *RTime Stamp* das mensagens de OAM.

A Figura 4.20 b. mostra que as quatro ONUs podem ter o mesmo *RTT* se forem adotados diferentes e específicos *Wait Times* (WT_i) para cada ONU de acordo com seu *RTT* original. Para isto, durante o processo de registro das ONUs, a OLT usa um *superframe* específico, denominado *Discovery frame* para calcular o *RTT* original das ONUs a partir da expressão $RTT_i = R_{t_i} - T_{sg}$. Determinado, então, o maior RTT_i entre os *RTTs* de todas as ONUs registradas, este será usado no cálculo do instante mínimo para a possível chegada simultânea dos *superframes* de *upstream*, ou seja, $R_{tg_{min}} = \max[RTT_i] + T_{sg}$. A partir deste $R_{tg_{min}}$, a OLT obtém o tempo que cada ONU_{*i*} deve aguardar para iniciar sua transmissão (*Wait Time*), calculando $WT_i = R_{tg} - RTT_i + T_r$. Onde $T_r > \max[T_{p_i}] - T_{p_n}$ é um *ranging* estimado que considera as variações dos tempos de processamento T_{p_i} s obtidas através do campo de OAM *Rtime Stamp*, e T_{p_n} corresponde ao tempo de processamento da ONU mais distante da OLT.

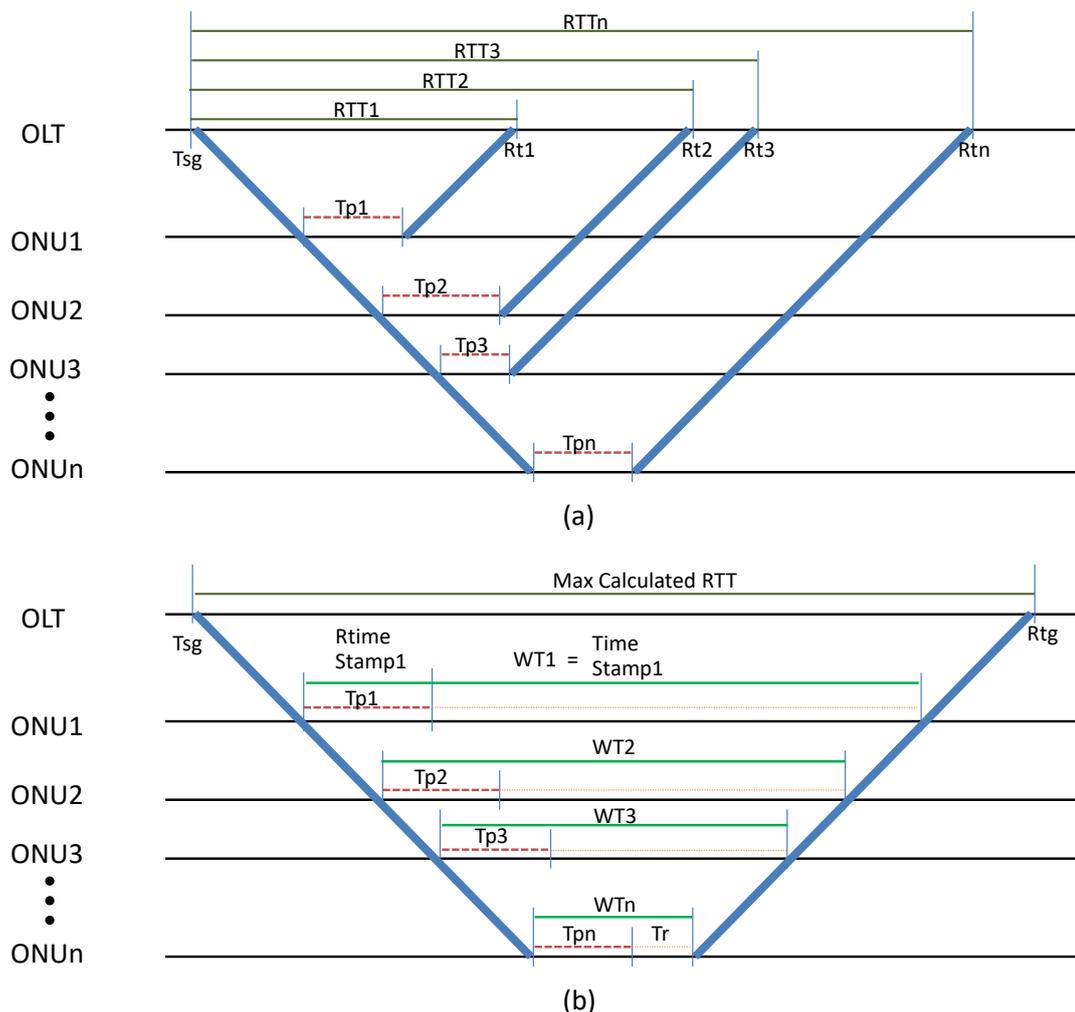


Figura 4.20: Diagrama temporal. (a) Chegada sem *WaitTime*; (b) Sincronismo dos quadros com o uso do *WaitTime*.

4.5.3 Processo de Registro das ONUs

As ONUs inativas ou que tenham, eventualmente, perdido o sincronismo devem ter oportunidade de solicitar seu registro para ter direito a participar do processo de alocação de banda da rede. Para isto, a cada N *superframes* a OLT envia um quadro de controle com um *ONU – ID* de *Discovery* (65535 – xFFFF) para ser utilizado pelas ONUs que ainda não possuem um *ONU – ID* específico. O *Traffic Map* disponibilizará para este *ONU – ID* um *ToS* para registro (15 - xF) com um valor no campo *Size* suficiente apenas para que a ONU ingressante possa enviar o seu cabeçalho hBSTC. Neste caso o *superframe* de *upstream* é denominado *Discovery frame* e é formado de duas partes distintas. A primeira parte tem

exatamente o formato do *superframe* de *upstream* com exceção do tamanho do *payload*, que será de apenas 36 símbolos OFDM - este *payload* é necessário para as aplicações TDM síncronas. Nesta parte as ONUs registradas dividem o canal utilizando seus respectivos blocos de subportadoras. O *Wait Time* do *ONU – ID* de *Discovery* será grande o suficiente para que a segunda parte não se sobreponha à primeira. Como a segunda parte terá o tamanho total de 250 símbolos OFDM, haverá tempo suficiente para que a diferença entre os *RTTs* das ONUs não interfiram com o próximo *superframe*. Nesta parte as ONUs não registradas utilizam a totalidade de subportadoras para responder solicitando o registro, o que poderá causar colisões entre duas ou mais ONUs, como mostra a Figura 4.21. Entretanto, há a possibilidade de varias ONUs conseguirem solicitar registro em um mesmo *Discovery frame*, já que existe diferença entre os *RTTs*, e o número de símbolos de cada ONU para enviar os cabeçalhos *Hphy* e *hBSTC* não passa de 15 símbolos OFDM, tamanho bem menor que os 250 disponíveis. Como este processo considera o intervalo de 125 μ s, existe um limite para diferença das distâncias entre OLT e ONUs.

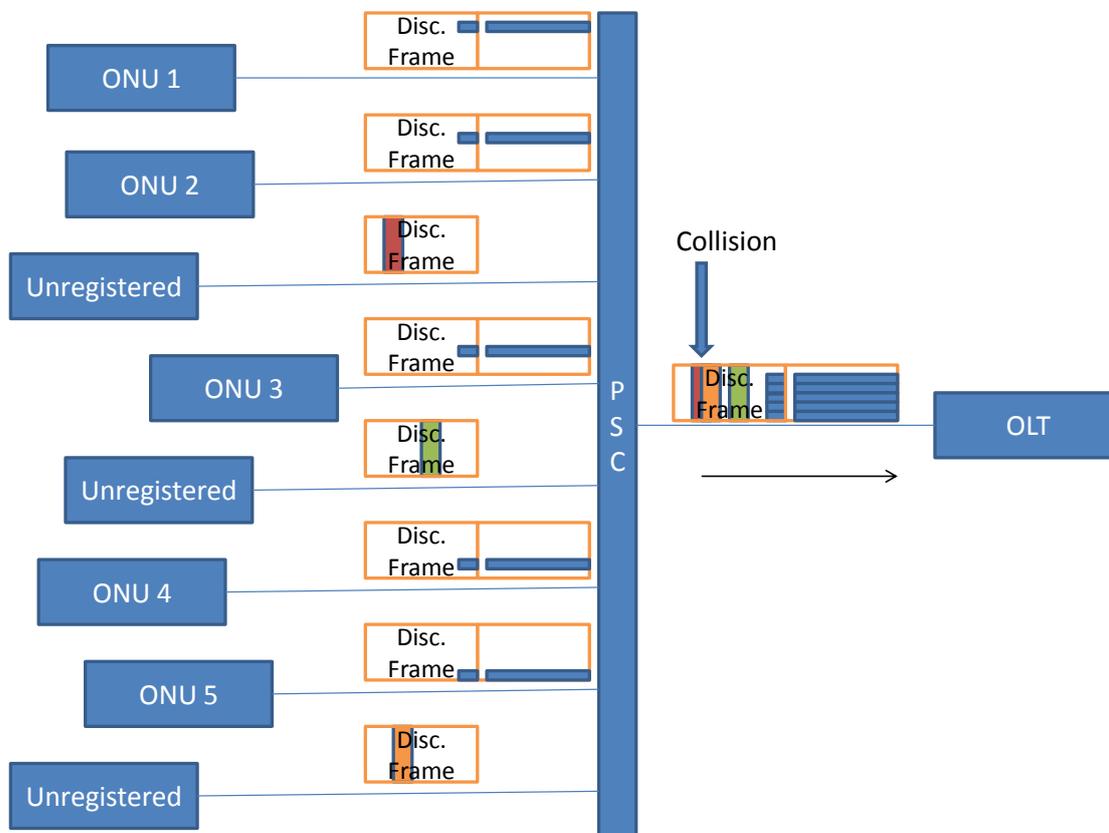


Figura 4.21: Transmissão do *Discovery frame* no *upstream*.

4.5.4 Alocação Dinâmica de Largura de Banda

O gerenciamento eficiente da largura de banda no uplink através do algoritmo dinâmico de alocação de largura de banda permite que o protocolo MAC distribua os recursos da rede de acordo com as demandas de serviço da ONUs. O método de alocação de largura de banda adotado neste artigo é o sistema centralizado e dinâmico descrito em [?]. O DBA é processado e atualizado na OLT. Ele emprega as informações de ocupação de fila recebidas do Traffic Map de upstream, a fim de suportar os padrões de tráfego das ONUs de forma adaptativa. Assim, o algoritmo de DBA gera um Traffic Map no downstream com base nas subportadoras disponíveis e na modulação de subportadora, designa os blocos de subportadora para cada ONU. Neste algoritmo também pode ser definida a posição de cada sub-banda no espectro de frequência considerando as distâncias entre OLT e ONUs. Embora na literatura sejam apresentadas várias técnicas sofisticadas para alocação de largura de banda, como as discutidas em [26] - [28] e [29], algoritmos de DBA não são o foco deste trabalho. Assim, neste trabalho foi utilizado o algoritmo dinâmico de largura de banda mínima (DBM) proposto em [30]. Neste método, o tráfego com a demanda de largura de banda mínima (B_{min}) são programados para cada ToS, calculando $B_{min} = B_a + B_e$, onde B_a e B_e são, respectivamente, a largura de banda assegurada e largura de banda extra a serem designadas para cada ToS. As informações de status das filas recebidas no OLT refletem sua situação em um instante anterior. Portanto, métodos de inferência, tais como regressão linear ou redes neurais podem ser usados para estimar o futuro status das filas.

4.6 Cenários de Simulação da Proposta de MAC

Com o objetivo de validar a proposta de adaptação da MAC BS OFDMA PON quanto à granularidade na distribuição de banda e, principalmente, no atendimento aos requisitos de atraso e temporização de diversos serviços, foram estabelecidos cenários de simulação, onde foram investigadas três técnicas de multiplexação em um simulador de eventos discretos baseado em C, o OMNET++ [58]. Esta ferramenta foi escolhida, especificamente, por tratar-se de uma plataforma de código aberto.

A primeira técnica, denominada E/OFDM, multiplexa todas as ONUs no tempo de maneira semelhante à 10G EPON com período de ciclo máximo de 1 ms, isto é, mesmo com tráfego intenso, cada ONU tem a oportunidade de transmitir a cada 1 ms. Nesta técnica as ONUs utilizam todas as subportadoras durante seu *timeslot*. Para esta simulação o intervalo de guarda entre as rajadas das ONUs foi ajustado para 25,6 ns, valor mínimo adotado em [9].

A segunda, G/OFDM, também multiplexa as ONUs no tempo, porém como na XGPON TDM, com quadros de 125 μ s, ou seja, independente da carga da rede, as ONUs tem oportunidade para transmitir a cada 125 μ s. Como na simulação anterior, o tempo de guarda entre as ONUs também foi de 25,6 ns. Em ambos os casos, por se tratar de divisão do canal por TDMA, o preâmbulo adotado foi reduzido para dois símbolos OFDM apenas.

A terceira técnica utiliza a proposta de MAC específica para BS OFDMA PON com *superframes* de 125 μ s. Foram feitas duas simulações: BS/12 (BS OFDMA/12) - utilizando os 12 símbolos de preâmbulo no cabeçalho da PHY Adaptation Sublayer, apresentado na Seção 4.5.1 C., e BS/4 (BS OFDMA/4) - utilizando apenas 4 símbolos no preâmbulo do cabeçalho físico, visto que, por se tratar de um meio sensivelmente menos sujeito a interferências que o meio não guiado, a utilização de 4 símbolos tem sido a prática em vários trabalhos [22, 30].

Em todos os cenários de simulação a PON foi configurada com uma OLT e 32 ONUs, em uma ODN com um *Splitter/Combiner*, cujas distâncias entre as ONUs e a OLT variam de 2 a 20 km. Foi adotado como tempo de resposta da ONU $T_{processamento} = 35 \mu$ s, de acordo com [9], para cenário foram rodadas 10 instancias de simulação. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros utilizados na simulação.

Segundo [59], a modelagem de tráfego deve considerar três parâmetros principais: distribuição espacial, tamanho e taxa de injeção dos pacotes. Assim, a distribuição espacial considerou apenas demandas no sentido de *upstream*. Quanto aos outros dois parâmetros, foram consideradas 3 classes de serviço: com restrição de banda fixa (voz), stream de vídeo e tráfego de rajada de dados, e a taxa de injeção foi traduzida como tempo entre rajadas. Para o serviço de banda fixa o tráfego foi modelado com um gerador de taxa constante de bits (*CBR - Constant Bit Rate*) com pacotes de 64 bytes. O stream de vídeo utilizou um gerador de taxa variável (*VBR - Variable Bit Rate*) com pacotes distribuídos uniformemente entre 64

Tabela 4.3: Parâmetros de Simulação da PON.

	E/OFDM	G/OFDM	BS/12	BS/4
Max. taxa de bits no <i>upstream</i>	35.4 Gb/s	35.2 Gb/s	35.4 Gb/s	35.4 Gb/s
Número de ONUs	32	32	32	32
ToS por ONU	3	3	3	3
Tamanho do <i>buffer</i> /ToS	30 Mbits	30 Mbits	30 Mbits	30 Mbits
Distância entre OLT e ONU	2 a 20 km	2 a 20 km	2 a 20 km	2 a 20 km
Ciclo do DBA	1 ms	125 μ s	125 μ s	125 μ s
Duração do <i>superframe</i>	-	125 μ s	125 μ s	125 μ s
Período de ciclo max.	1 ms	-	-	-
Tempo de guarda entre ONUs	25.6 ns	25,6 ns	-	-
Tempo de resposta da ONU	35 μ s	35 μ s	35 μ s	35 μ s
Taxa de símbolos no <i>upstream</i>	Up to 2403 S/ms	2389 S/ms	2400 S/ms	2400 S/ms
Tamanho do <i>PHY header</i>	2 símbolos	2 símbolos	14 símbolos	6 símbolos
Número de subportadoras	3686	3686	3686	3686
Formato de modulação por subportadora	16-QAM	16-QAM	16-QAM	16-QAM

e 1500 bytes. A modelagem do tráfego de dados adotou o modelo desenvolvido em [60] e [61], que sugere que o tamanho dos pacotes varia de 64 a 1500 bytes conforme a distribuição Beta e o tempo entre rajadas é determinado pela distribuição de Pareto. A distribuição Beta foi adotada por representar muito bem as características de tráfego bimodal inerentes às redes de computadores baseadas em IP, como as redes de acesso. Já a distribuição de Pareto é fartamente adotada na literatura para representar a taxa de geração de pacotes. Com o intuito de reduzir o tempo de simulação, o período de registro, período no qual as ONUs inativas utilizam-se do *Discovery frame* para se juntarem ao processo de alocação de banda, foi desconsiderado. Assim, foi possível simular por um intervalo de tempo menor sem que houvesse influência do período de configuração na taxa de transmissão efetiva. Como o período de ciclo máximo adotado foi de 1 ms, 10 s foi considerado um tempo suficiente para cada simulação. Portanto, para uma taxa de bits de cerca de 35 Gb/s, cada instância pode atingir até 350 GBytes.

4.6.1 Resultados e Discussões

As simulações colheram dados referentes a vazão (*throughput*) total alcançada no *upstream*, atraso médio dos pacotes desde sua geração até a chegada na OLT e a variação dos atrasos para os serviços de voz e vídeo. Este procedimento foi realizado para a carga da rede variando entre 10% e 120% da capacidade total do canal para cada instancia de simulação.

A - Vazão Total (*Throughput*)

A análise de desempenho em relação ao throughput inicia considerando a taxa útil teórica máxima, descontados os *overheads* gerados pelo diversos cabeçalhos, para cada uma das técnicas apresentadas e conclui comparando com os resultados obtidos nas simulações.

Para E/OFDM são utilizados, no máximo, 2403 símbolos OFDM a cada 1 ms, distribuídos em *slots* para utilização das 32 ONUs. Neste caso teremos 32 cabeçalhos físicos de 2 símbolos, totalizando 64 símbolos. Assim, dos restantes 2339 é preciso descontar o cabeçalho da camada de *Framing*, que corresponde a 72 bytes iniciais do *REPORT*, pois considera apenas três tipos de serviço para cada ONU, totalizando 2304 bytes. Além disso, temos ainda o cabeçalho dos quadro *Ethernet*, onde são utilizados 8 bytes para cada SDU transmitido. Assim, considerando a taxa de geração dos pacotes de voz, vídeo e dados, bem como o tamanho médio dos pacotes para cada tipo de serviço, chega-se a um overhead total nesta subcamada de cerca de 120 kB. Portanto, a taxa útil passa a ser de 33.5 Gbps.

Para G/OFDM, a cada 1 ms, os 2389 símbolos possíveis são reduzidos de $8 \times 32 \times 2$ símbolos de cabeçalho físico, já que a cada 125 μ s todas as ONUs têm oportunidade de transmitir, totalizando 1877 símbolos. A partir das mesmas considerações anteriores, os totais de *overhead* das subcamadas de *Framing* e *Adaptation* são respectivamente $2112 \times 8 = 16896$ bytes e 120 kB. Assim, obtém-se a taxa útil total de 26.6 Gbps.

Para BS/12, a cada 1 ms 2400 símbolos são transmitidos, dos quais reduzindo os $13 \times 8 = 104$ símbolos de cabeçalho físico, devido à transmissão dos 8 *superframes*, obtém-se 2296 símbolos. Os totais de *overhead* das subcamadas de *Framing* e *Adaptation* são respectivamente $2112 \times 8 = 16896$ bytes e cerca de 120 kB. Logo, a taxa útil total passa a ser de 32.6 Gbps.

Finalmente, para BS/4, a cada 1 ms, os 2400 são reduzidos de $5 \times 8 = 40$ símbolos restando 2360. Como na BS/12 os totais de *overhead* das subcamadas de *Framing* e *Adaptation* são 16896 bytes e cerca de 120 kB, respectivamente. Assim, a taxa útil total é de 33.6 Gbps. A tabela 5 apresenta os valores calculados e simulados para taxa de geração de 100 % a 120 % da capacidade do canal. É possível verificar que os erros entre os resultados calculados e simulados são sempre menores que 1.2 %, com exceção do G/OFDM com erro menor que 5 %.

Tabela 4.4: Taxas Úteis Calculadas e Simuladas.

TAXAS	E/OFDM	G/OFDM	BS/12	BS/4
Calculada	33.5 Gb/s	26.6 Gb/s	32.6 Gb/s	33.6 Gb/s
Simulada a ~ 100 %	33.1 Gb/s	25.9 Gb/s	32.7 Gb/s	33.3 Gb/s
Simulada a ~ 110 %	33.5 Gb/s	25.5 Gb/s	32.6 Gb/s	33.5 Gb/s
Simulada a ~ 120 %	33.5 Gb/s	25.5 Gb/s	32.6 Gb/s	33.5 Gb/s

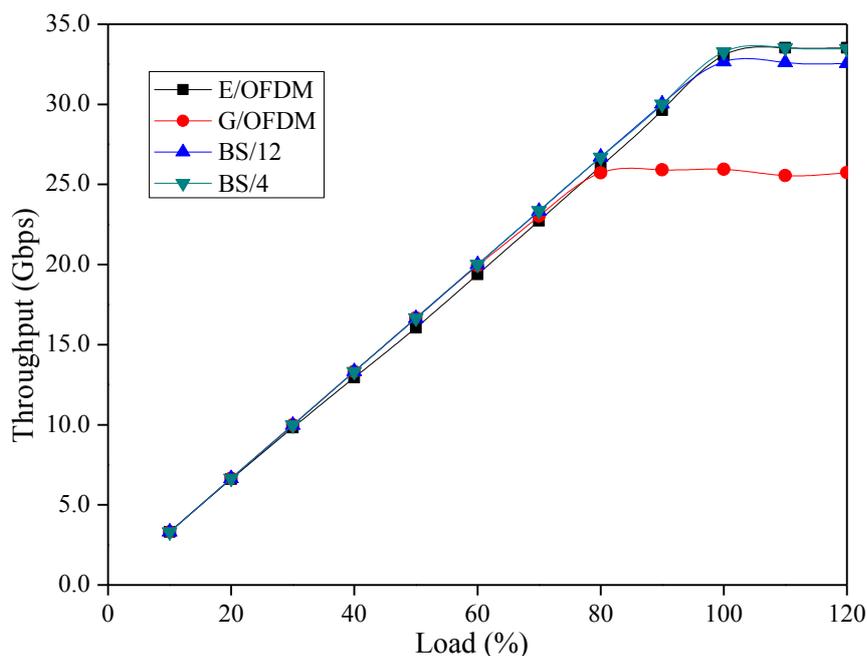


Figura 4.22: *Throughput* no *upstream* - carga entre 10 e 120 % da capacidade do canal.

Observe que as variações das taxas simuladas ocorrem por que existe uma variação estatística na geração dos tráfegos, e o cálculo foi realizado a partir de valores médios cujo desvio padrão $\sigma \approx \pm 0.2$ Gb/s. Além disto, como o percentual de *overhead* do serviço de voz é maior comparado com os demais tipos de serviços, à medida que seu tráfego aumenta é provável que a taxa útil total seja um pouco reduzida para as técnicas que priorizam este

serviço. O gráfico da Figura 4.22 mostra a evolução das taxas de *upstream* obtidas desde cargas equivalentes a 10 % da capacidade do canal. Note que, em termos de throughput, a BS/4 e a E/OFDM são superiores quando a carga da rede é maior ou igual a sua capacidade. A G/OFDM perdeu para valores de carga acima de 70 % devido ao alto *overhead* provocado pela repetição de cabeçalhos a cada 125 μ s, o que não ocorre com as BS/12 e BS/4, mesmo com *superframe* de mesma duração.

B - Atraso Médio (Delay)

As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 mostram os atrasos médios de pacotes para os serviços de voz, vídeo e dados, respectivamente. Neste caso o desvio padrão foi $\sigma \cong \pm 0.5$ ms.

Note que, no serviço de voz, a medida que a carga da rede aumenta, somente a E/OFDM apresenta grande variação no atraso médio. Isto ocorre porque as demais técnicas, além de atribuir banda fixa a este serviço, atendem as restrições de temporização exigidas pelos tráfegos TDM síncrono. Para o vídeo, os atrasos das BS/12 e BS/4 foram bem menores que das técnicas E/OFDM e G/OFDM. O atraso para dados manteve a mesma característica em todas as técnicas utilizadas, apesar das BS/12 e BS/4 apresentarem menores valores na maior parte das cargas.

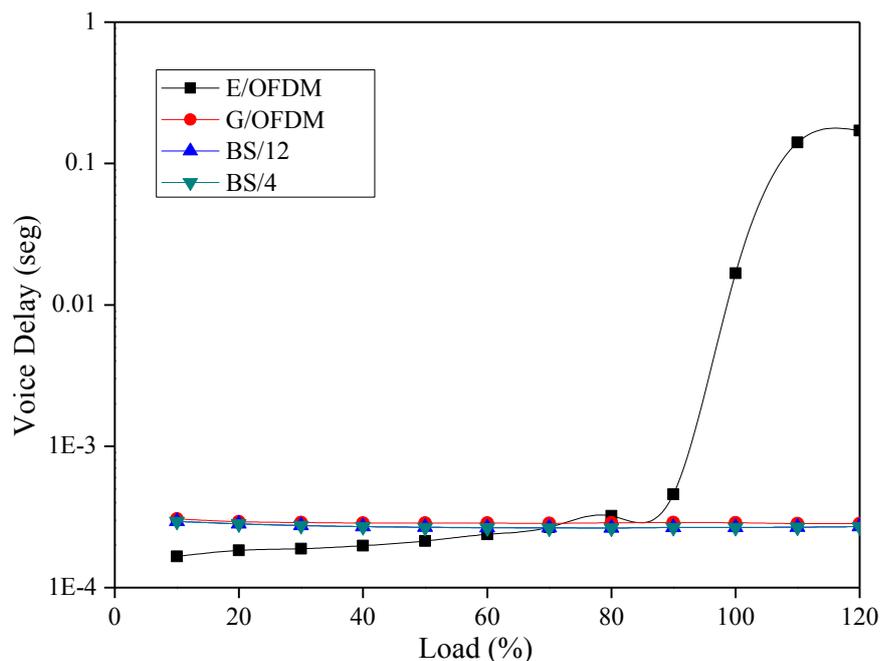


Figura 4.23: Atrasos para o tipo de serviço de voz.

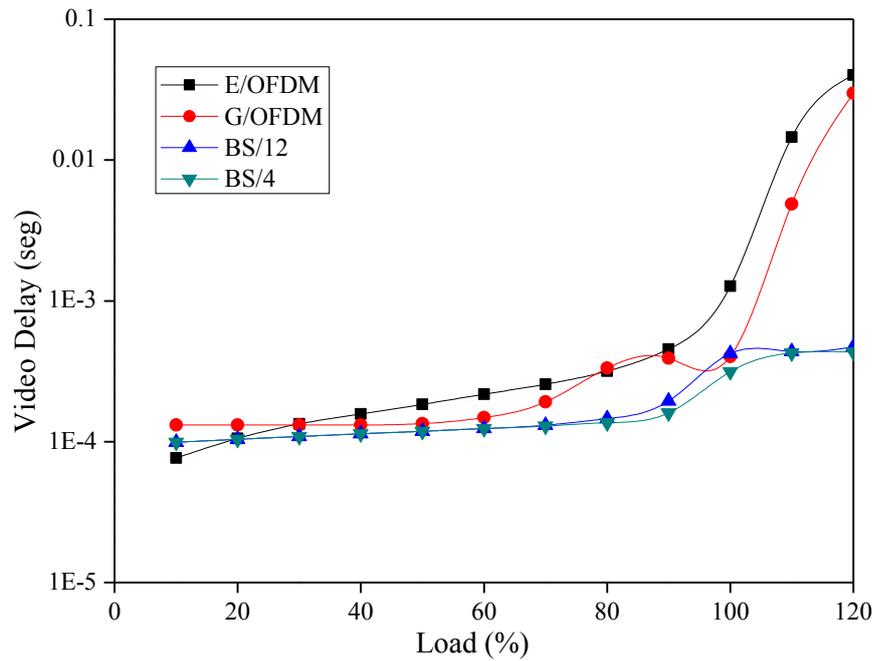


Figura 4.24: Atrasos para o tipo de serviço de vídeo.

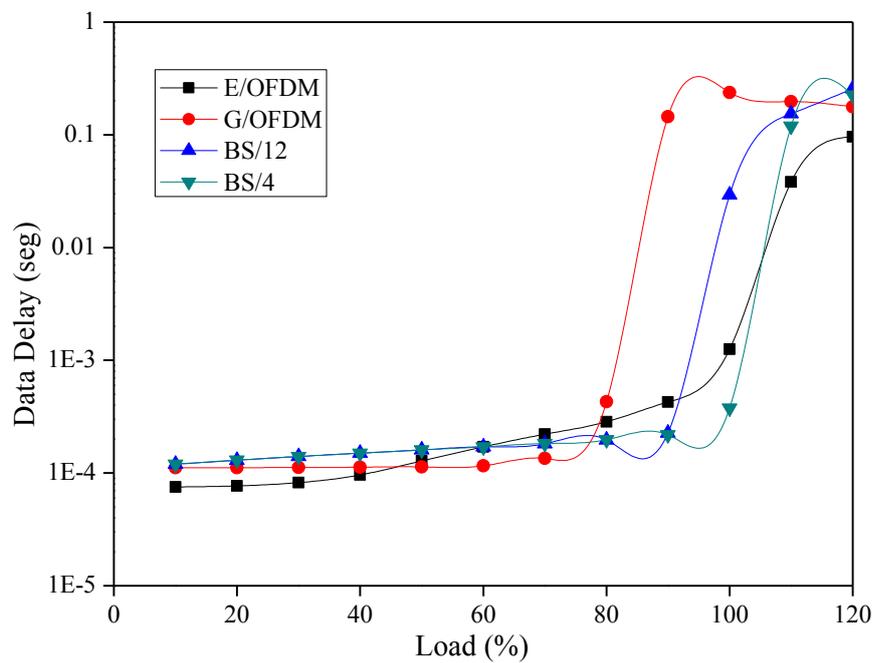


Figura 4.25: Atrasos para o tipo de serviço de dados.

C - Varição do Atraso (Jitter)

As Figuras 4.26 a. e b. apresentam a média da variação do atraso medido para aplicações sensíveis à este parâmetro, como voz e vídeo. Para este caso o desvio padrão foi $\sigma \cong \pm 3.6 \mu\text{s}$.

Note que as técnicas que garantem os requisitos de temporização mantêm a variação do atraso abaixo de $100 \mu\text{s}$. Isto não ocorre para a E/OFDM, onde cargas maiores da rede, tendem a aumentar esta variação. Para vídeo a vantagem das BS/12 e BS/4 é ainda mais expressiva sobre o E/OFDM, e para valores acima de 50 %, tal vantagem também se consolida em relação a G/OFDM.

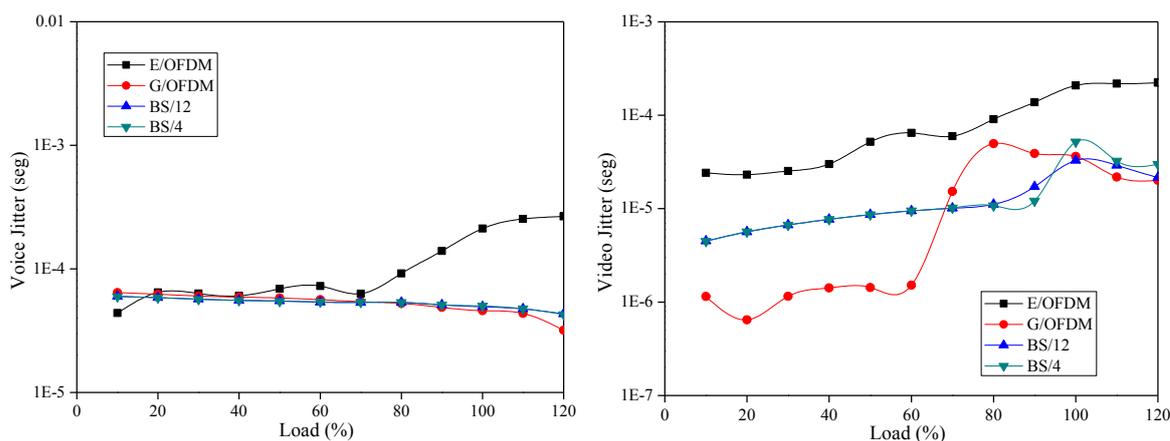


Figura 4.26: Variação do atraso por tipo de serviço - (a) Voz e (b) Vídeo.

4.6.2 Conclusões Sobre a Simulação da MAC

Estas simulações apresentaram resultados para três modelos de compartilhamento de banda: E/OFDM, cujas características assemelham-se às da 10G EPON, porém com taxa superior a 33 Gbps, devido a eficiência espectral da modulação OFDM; G/OFDM, com base na XGPON, capaz de atender aos requisitos do tráfego TDM, mas com a vantagem da taxa acima de 25 Gbps, também obtida graças a eficiência espectral da modulação OFDM e BS OFDMA PON (BS/12 e BS/4), que além de atender os requisitos de atraso e temporização dos diversos tipos de tráfego, alcançou taxas superiores a 33 Gbps.

Capítulo 5

Verificação Experimental da BS OFDMA PON

Os resultados para BS OFDMA PON, apresentados no Capítulo 4, foram alcançados a partir de simulações, considerando modelos matemáticos que retratam o comportamento dos dispositivos, componentes e fenômenos relacionados à transmissão de sinais OFDM em sistemas ópticos. Entretanto, nem sempre é possível considerar todas as variáveis do mundo real nos modelos existentes. Assim, a verificação experimental dos resultados obtidos nas simulações, permite conhecer as reais limitações do sistema e buscar novas soluções, seja com a alteração de parâmetros ou com modificações na concepção inicial da ideia.

Em [36] e [40], foram realizados experimentos que mostram a influência dos diversos parâmetros de projeto no desempenho dos sistemas DDO-OFDM. Parâmetros como: largura de banda de guarda, ponto de polarização do MZM, OMI, comprimento da extensão cíclica (CP) e taxa de amostragem dos conversores AD e DA, foram investigados experimentalmente, considerando resultados obtidos em processos simulados e otimizados através de algoritmos genéticos (*GA - Genetic Algorithms*). A partir destes primeiros testes, foi possível propor uma série de configurações experimentais a fim de verificar as reais contribuições da proposta BS OFDMA PON.

Neste Capítulo são apresentadas configurações experimentais com o objetivo de investigar os principais parâmetros utilizados nas simulações realizadas em [21], seja compro-

vando a viabilidade da arquitetura tal como foi proposta, seja apontando suas deficiências e propondo melhorias na arquitetura. Os testes também avaliam a possibilidade de estender ou a necessidade de reduzir a eficiência espectral previamente obtida. Assim, as seções que seguem abordam as seguintes questões:

- Necessidade da banda de guarda em relação a portadora óptica - a largura da banda de guarda influencia diretamente nos danos impostos pela IMD e OBI. É possível tolerar algum nível de interferência, mas, em contrapartida, aumentar a eficiência espectral do sistema, reduzindo esta banda de guarda?
- Necessidade da guarda entre sub-bandas das ONUs (*frequency gap*) - a interferência entre as sub-bandas, especialmente quando usada a modulação preliminar de portadora de RF, é combatida mantendo um espaçamento entre as portadoras de RF maior que a necessária para acomodar a sub-banda de dados. No caso da BS OFDMA PON, que não usa modulação preliminar de portadora de RF, é possível aumentar a eficiência espectral do sistema, reduzindo ou eliminando este espaçamento, especialmente no *upstream*?
- Uso otimizado de componentes - parâmetros como ponto de polarização, índices de modulação elétrico e óptico, potência óptica na entrada do fotodetector, utilização do espectro de acordo com a resposta em frequência e tantos outros, são muito relevantes durante a implementação real do sistema. A utilização de técnicas de otimização dos parâmetros e técnicas de pré-distorção para compensar a resposta dos componentes e do canal pode, até que ponto, aumentar a eficiência espectral do sistema?
- Sincronismo de símbolo e de quadros - o prefixo cíclico (CP), como mostrado no Capítulo 3, é um importante parâmetro usado para combater a interferência intersimbólica (ISI), especialmente em redes com longos enlaces de fibra. Entretanto, no caso das PONs, que são redes de curto alcance, com abrangência em torno de 40 km, o uso do CP contribui principalmente para o sincronismo dos símbolos OFDM. Na BS OFDMA PON, as ONUs compartilham o mesmo símbolo OFDM também no *upstream*. Isto requer que as transmissões oriundas das ONUs cheguem simultaneamente ao PSC. Assim, qual a influência do CP na compensação de eventuais atrasos provo-

cados por fenômenos físicos e ambientais que não podem ser considerados no cálculo dos *Wait Times*?

- Polarização da fonte de luz centralizada - a BS OFDMA PON utiliza fonte de luz centralizada na OLT e usada para ser modulada nas ONUs para transmissão no *upstream*. Este esquema foi proposto para evitar o batimento óptico causado na combinação de portadoras ópticas geradas por lasers diferentes, mesmo quando aparentemente sincronizados no mesmo comprimento de onda. Entretanto, nas simulações não foram consideradas as variações da polarização da portadora centralizada após percorrer distâncias e enlaces de fibras diferentes. Qual a influência da variabilidade da polarização? como resolver este problema?

Os resultados obtidos, em grande parte dos experimentos, consideram como métrica de desempenho a EVM. De acordo com [62] há uma forte relação entre BER e EVM. Além disso, estudos recentes, relatados em [63], concluem que a EVM é uma medida apropriada para os canais ópticos limitados por ruído branco gaussiano aditivo, especialmente quando são utilizados formatos de modulação diferentes do NRZ (codificação de linha de não retorno a zero). Assim, com o objetivo de apresentar as relações entre estas duas métricas, o leitor pode observar que diversas figuras das seções que seguem contêm linhas pretas e pontilhadas que indicam os limites de BER correspondentes aos valores de EVM. De fato, a EVM definida como o valor RMS (*root-mean-square*) da diferença entre o conjunto de símbolos transmitidos e recebidos, pode ser matematicamente expressa pela relação:

$$EVM = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |Y_k - X_k|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

onde N é o número de símbolos transmitidos, $X_k = X_I + jX_Q$ e $Y_k = Y_I + jY_Q$ são, respectivamente, os símbolos complexos ideal e medido [62]. Em canais com predominância de ruído gaussiano, para constelações M -QAM, a relação entre BER e EVM pode ser aproximada para:

$$BER = \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\log_2(M)} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{EVM^2 \cdot (2M - 2)}} \right) \quad (5.2)$$

onde $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ é a função erro complementar e M representa o mapeamento QAM das subportadoras [63].

A fim de facilitar a análise das figuras, a tabela 5.1 apresenta valores de BER e EVM, correspondentes ao limite de recuperação por FEC (3.8×10^{-3}) e a transmissão considerada livre de erros (1×10^{-12}), para cada formato de modulação utilizada.

Tabela 5.1: Relação BER x EVM em função do formato de modulação.

Formato de Modulação	BER	EVM
4 QAM	3.8×10^{-3} (limite de FEC)	≈ -9.4 dB
4 QAM	1×10^{-12} (livre de Erros)	≈ -14.5 dB
16 QAM	limite de FEC	≈ -16.8 dB
16 QAM	livre de Erros	≈ -22.1 dB
64 QAM	limite de FEC	≈ -22.9 dB
64 QAM	livre de Erros	≈ -27.6 dB

A Seção 5.1 descreve os experimentos realizados utilizando montagens do sistema para transmissão no sentido de *downstream*, bem como os resultados e conclusões destas configurações. A Seção 5.2 descreve os experimentos realizados, resultados e conclusões para propostas de configuração no sentido de *upstream*.

5.1 Configurações Experimentais para *Downstream*

A fim de investigar as principais limitações da BS OFDMA PON no sentido de *downstream*, foram propostos dois cenários básicos. O primeiro faz uma avaliação experimental da influência da banda de guarda projetada para acomodar distorções de intermodulação (IMD) herdadas dos sistemas de detecção óptica direta de sinais OFDM (DDO-OFDM). O segundo explora suas potencialidades relativas à eficiência espectral através da redução da referida banda de guarda e da aplicação de técnicas de pré-distorção para compensação do canal.

5.1.1 Configuração Experimental - 1º Cenário

O esboço geral da configuração experimental de uma rede óptica passiva com taxa de transmissão de até 6 Gbps está apresentado na Figura 5.1. Esta rede é composta por um terminal de linha óptica (OLT) e três unidades de rede óptica (ONUs) localizadas a distâncias entre 25 e 65 quilômetros interligadas por fibras monomodo padrão (SSMF). Os resultados mostram que esta banda de guarda depende fortemente da potência óptica recebida, que varia de acordo com o comprimento da fibra, e do formato de modulação das subportadoras. Obteve-se uma transmissão livre de erros ($BER < 10^{-12}$) em 65 quilômetros de SSMF para uma largura de banda escalável de 3 GHz ocupando 4096 subportadoras mapeados em 4 QAM, sem uso da banda de guarda de frequência. O desempenho da arquitetura foi avaliado em termos de magnitude do vetor de erro (EVM).

O sinal OFDM com informação para as três ONUs é composto de três blocos de subportadoras. Este sinal é gerado no modo off-line no ambiente *MATLAB*[®] e superamostrado a uma taxa de 24 GS/s, máxima taxa de amostragem do gerador de forma de onda arbitrária (*AWG - Arbitrary Waveform Generator*), com resolução de 10 bits por amostra. Na OLT, uma portadora óptica CW sintonizada em $\lambda_{down} = 1565$ nm é modulada por um modulador *Mach-Zehnder* (MZM) de porta única, polarizado no ponto de mais alta linearidade ($V_{bias} = 0.5xV_{\pi} = 4.25$ V). O sinal óptico modulado é dividido em um divisor/combinador (PSC), transmitido através de três diferentes caminhos ópticos e detectado diretamente nos receptores das ONUs. Cada sinal recebido é capturado e digitalizado por um osciloscópio digital (*DPO - Digital Phosphor Oscilloscope*) a 50 GS/s com resolução de 8 bits e, então, é também processado off-line no *MATLAB*[®].

A OLT gera um sinal OFDM com $N = 4096$ subportadoras em uma largura de banda de 3 GHz, como também pode ser visto na Figura 5.1. A largura de banda alocada a cada ONU é de 500 MHz, o equivalente a 680 das 4096 subportadoras. Os três blocos de subportadoras das ONUs são preenchidos com dados no formato de modulação QAM, correspondendo a um total de 1.5 GHz de largura de banda útil. As N subportadoras são formadas por uma quantidade N_g de subportadoras como banda de guarda, N_s subportadoras nulas como banda de espaçamento entre os blocos de subportadoras de dados das ONUs, $N_d = 680$ subportado-

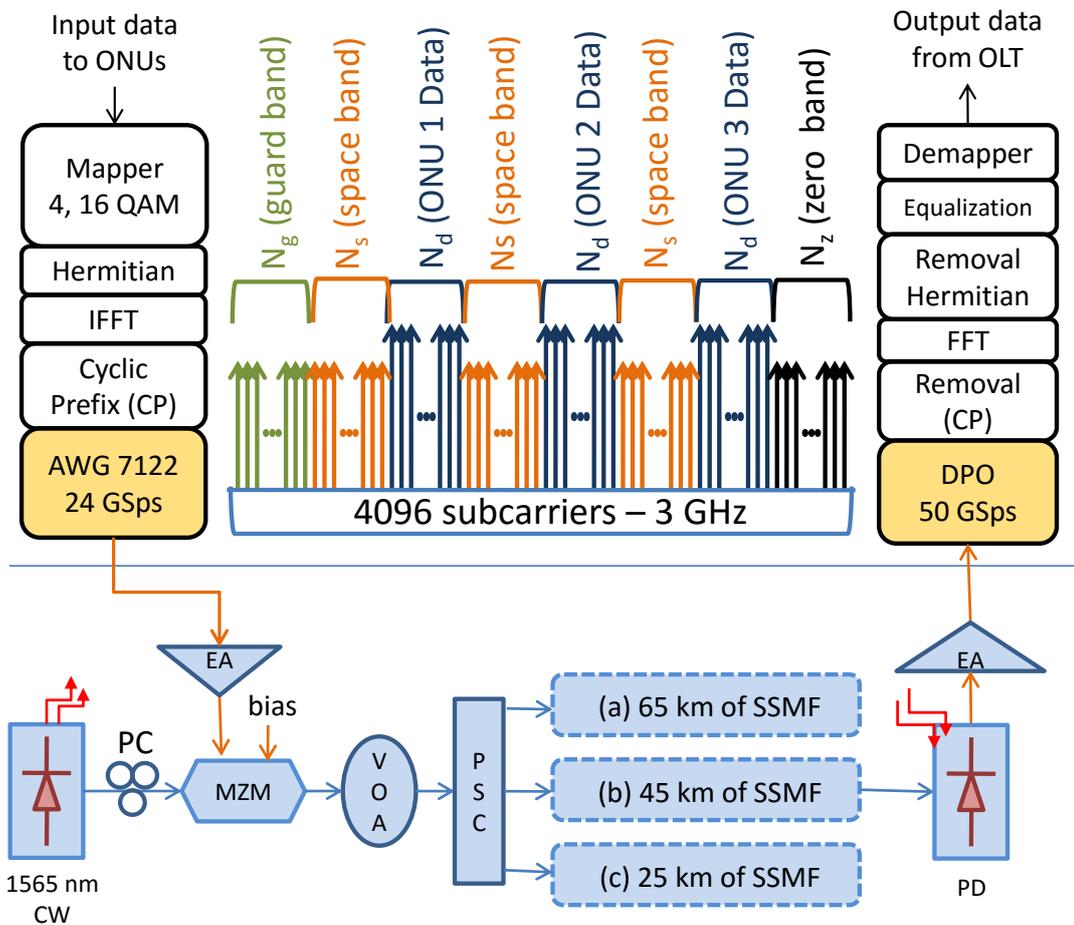


Figura 5.1: Configuração experimental considerando diferentes enlaces de SSMF (a), (b) e (c); Alocação das sub-bandas das três ONUs.

ras de dados por ONU, e N_z subportadoras nulas complementares. A posição das sub-bandas das ONUs depende dos valores de N_g , N_s e N_z . Como o sinal de saída do transmissor OFDM deve ser real, então, o vetor de entrada da IFFT deve ser submetido à simetria Hermitiana. O prefixo cíclico (CP) é usado para eliminar a ISI e manter o sincronismo dos símbolos OFDM. Uma vez que a fonte de informações é centralizada na OLT, as sub-bandas das ONUs foram alocadas adotando a banda de espaçamento $N_s = 0$ para todas as ONUs e em todos os experimentos.

A fim de investigar os efeitos da IMD e da OBI [32, 38, 64], a largura de banda de guarda (B_g) variou de aproximadamente 0 a 1.5 GHz com passo de 50 MHz, o que corresponde a uma variação de N_g de 1 a 2048 subportadoras. Este arranjo foi aplicado a 25, 45 e 65 km de SSMF. A potência óptica média recebida após 25, 45 e 65 km foram -4.5, -9.0 e -12.5 dBm,

respectivamente. O desempenho das ONUs foi avaliado em termos de EVM em função de B_g (N_g), considerando os três diferentes caminhos ópticos, e com formato de modulação de 4 e 16-QAM para as subportadoras de dados.

5.1.2 Resultados do 1º Cenário

A Figura 5.2 apresenta a relação EVM em função da banda de guarda (B_g) para todas as ONUs situadas em diferentes distâncias e usando 4-QAM como formato de modulação das subportadoras. As Figuras 5.2 a., b. e c. representam os resultados obtidos para 25, 45 e 65 km, respectivamente. Em todos os casos, para qualquer valor atribuído a B_g (N_g) foi possível realizar a transmissão dos dados livres de erro. Uma vez que, para os níveis de potência óptica recebidos após os diferentes caminhos ópticos, os efeitos da IMD e da OBI e não são críticos para o desempenho do sistema. Estas condições permitem adotar B_g igual a zero, a fim de melhorar a eficiência espectral global.

As curvas obtidas usando 16-QAM para as mesmas condições anteriores, são mostradas na Figura 5.3. Neste caso, não foi possível alcançar resultados livres de erros para todos os caminhos ópticos. Como esperado, este formato de modulação exige uma relação sinal-ruído (SNR) mais elevada para atingir o mesmo desempenho do formato 4-QAM. Assim, quando os formatos de modulação de alta ordem são utilizados, a degradação imposta pela IMD e OBI torna-se mais relevante.

Note que a influência da IMD e da OBI torna-se mais significativa à medida que a distância entre OLT e ONUs diminuem e a potência óptica na entrada do foto-detector aumenta. Este incremento de potência passa a degradar o desempenho do sistema à proporção que B_g se aproxima de zero. Assim, conclui-se que a melhoria do desempenho para todas as sub-bandas exige um aumento no valor de B_g . Entretanto, aumentar o valor de B_g , além de reduzir a largura de banda útil, também de posiciona esta faixa de banda em valores de altos de frequência, o que é refletido em aumento da EVM causado pela limitação correspondente à sensibilidade do foto-detector e à resposta em frequência dos demais componentes do sistema especialmente quando as distâncias são maiores. Como exemplo, pode-se observar que para as curvas considerando 25 km, a potência recebida no foto-detector é alta, não

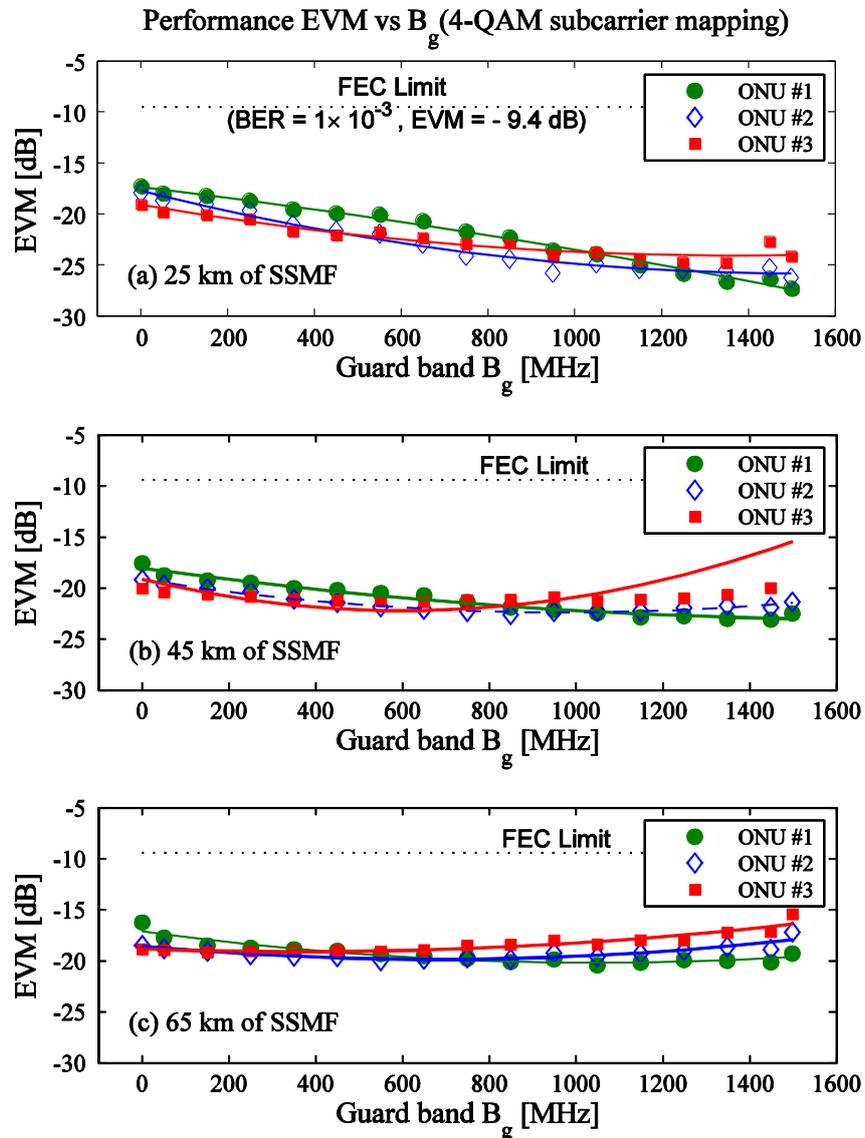


Figura 5.2: EVM em função da banda de guarda B_g para três ONUs usando 4-QAM: (a) 25 km; (b) 45 km; and (c) 65 km de SSMF.

representando problemas para sensibilidade do foto-detector, mas os efeitos da IMD e OBI obrigam a escolher valores maiores para B_g . Já considerando 65 km, a potência no entrada do foto-detector é reduzida pela atenuação na fibra, isto diminui os efeitos da IMD e OBI, porém esta potência não é suficiente que as bandas de mais altas frequências sejam adequadamente recebidas pelo foto-detector, o que leva ao aumento da EVM, com isto o ponto de menor EVM ocorre para $B_g \approx 450$ MHz.

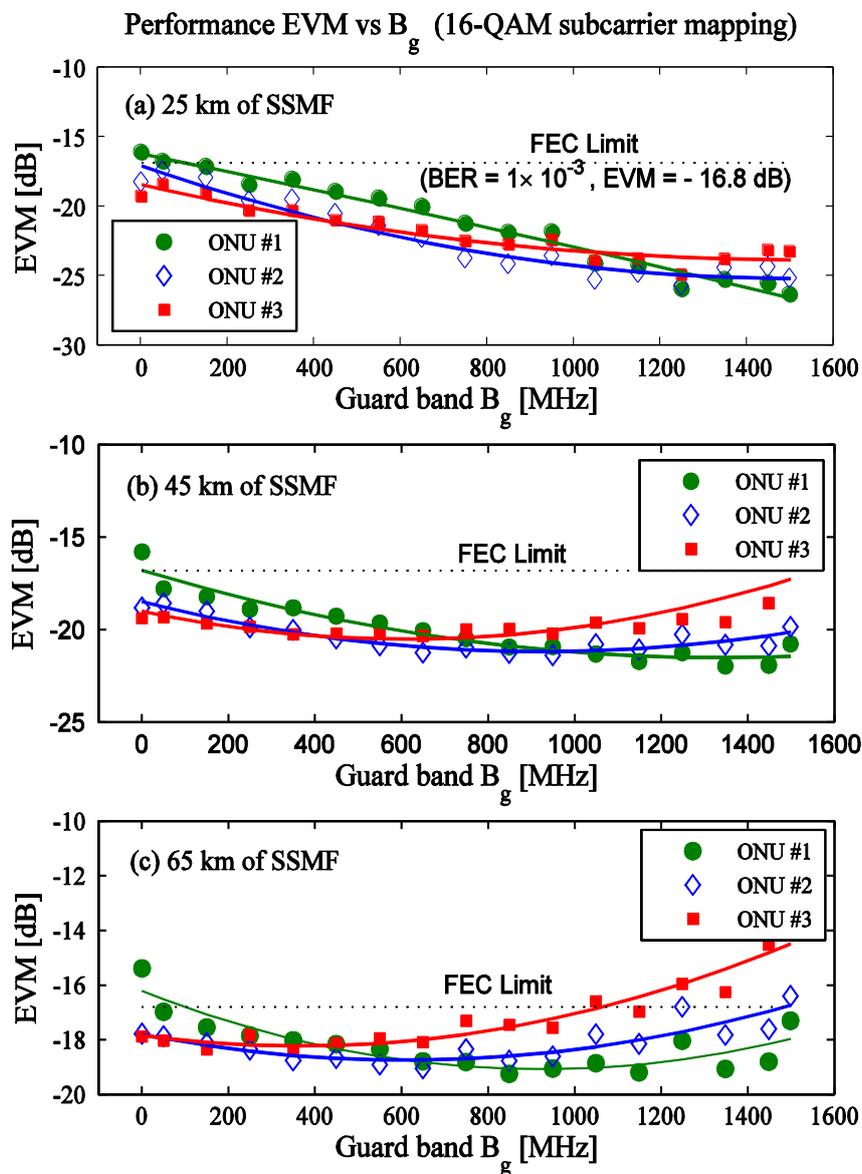


Figura 5.3: EVM em função da banda de guarda B_g para três ONUs usando 16-QAM: (a) 25 km; (b) 45 km; and (c) 65 km de SSMF.

Alguns autores argumentam que a banda de guarda entre a portadora óptica e a banda de sinal necessária para eliminar os efeitos da IMD e da OBI deve ser igual a largura de banda do sinal [32, 64]. Entretanto, os nossos resultados experimentais mostram que na arquitetura BS OFDMA PON, a banda de guarda depende diretamente do nível de potência óptica na entrada do foto-detector e das exigências do formato de modulação escolhido. Para um bom desempenho do sistema a banda de guarda a ser adotada precisa considerar estes fatores.

Embora a transmissão usando 16-QAM não tenha sido livre de erros para todas as situações, é possível escolher um valor de B_g que ofereça uma boa relação entre o uso eficiente da banda e o desempenho em termos de EVM (BER). Observe que um bom compromisso pode ser alcançado tomando $B_g \approx 450$ MHz, isto é, pode ser vantajoso assumir alguma penalidade em termos de EVM para reduzir a banda de guarda aumentando a eficiência espectral do sistema.

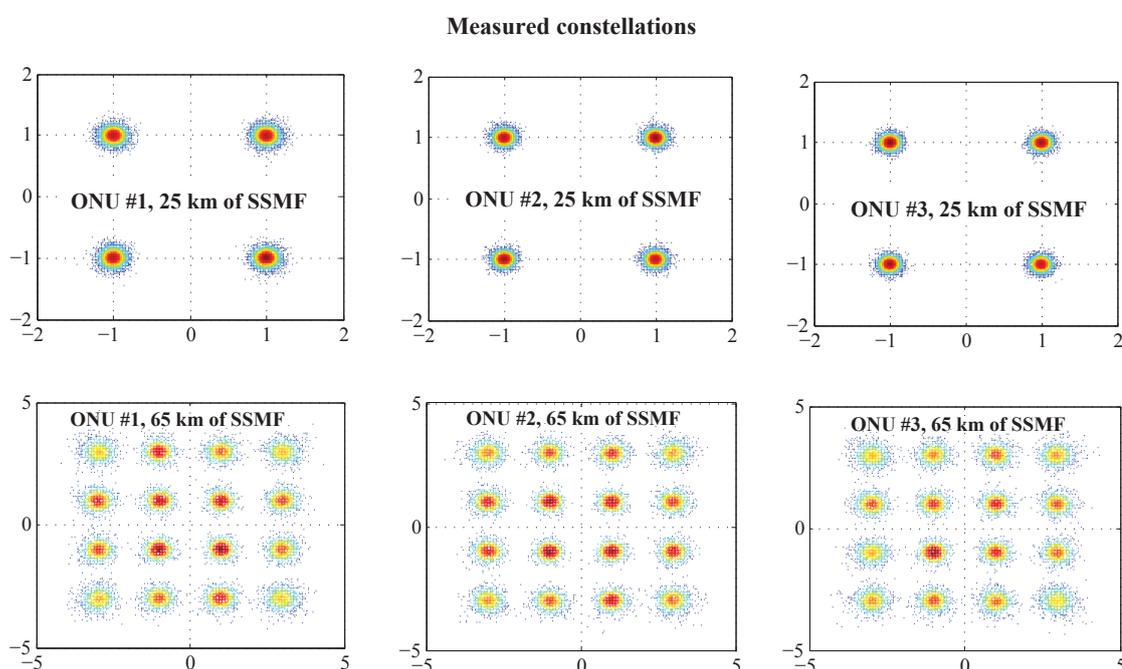


Figura 5.4: Constelações para 4 e 16-QAM com banda de guarda $B_g = 450$ MHz.

A Figura 5.4 mostra os diagramas de constelação para $B_g = 450$ MHz, considerando as situações com menor (4-QAM - 25 km) e maior (16-QAM - 65 km de SSMF) requisitos de sistema. Além disso, quando consideramos as ONUs dispostas a diferentes distâncias, é possível maximizar o desempenho do sistema atribuindo às ONUs mais próximas as sub-bandas de frequência mais elevadas.

5.1.3 Configuração Experimental - 2º Cenário

A eficiência espectral (*SE - Spectral Efficiency*) é um dos pontos críticos relacionados às redes ópticas passivas. As propostas para as próximas gerações de PONs tem feito uso de técnicas de compensação de canal a fim de maximizar a SE. Nas Seções 4.1 e 4.6, foi demonstrado, através de simulações numéricas, que a BS OFDMA PON é capaz de acomodar 32 ONUs com capacidade total de transmissão de 35.5 Gb/s, em uma ODN com caminho médio de 20 km de SSMF. Esta Seção tem por objetivo demonstrar experimentalmente a capacidade desta arquitetura em termos de SE, considerando os parâmetros utilizados nas simulações (Tabela 4.1 da Seção 4.1), seja minimizando a banda de guarda da portadora óptica, seja empregando técnicas de pré-distorção do canal.

Tabela 5.2: Parâmetros Usados nas Simulações e nos Experimentos.

Parâmetros	Simulado em [4]	Experimental
Subportadoras úteis	4096	4096
Total de subportadoras de dados	3686	2048 a 3686
Subportadoras/ONU	variável	64 a 115
Tempo de símbolo	415.8 ns	415.8 ns
Prefixo cíclico	6.397 ns	6.397 ns
Banda de guarda	500MHz	500 a 2.5 MHz
Largura de banda útil	10 GHz	10 GHz

A fim de avaliar os resultados simulados, foi construído um novo cenário, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 5.2. Neste cenário, a OLT gera sinais OFDM em banda base com largura de banda útil máxima $B_u = 10$ GHz, correspondente a $N_t = 4096$ subportadoras para serem alocadas às ONUs, como apresentado na Figura 5.5. A alocação de largura de banda é igualmente distribuída entre as 32 ONUs. Inicialmente, foram alocados blocos com $N_d = 2048/32 = 64$ subportadoras para cada sub-banda, o que equivale a taxa de bits de 610 Mb/s por ONU. Esta taxa foi gradativamente aumentada, via incremento de subportadoras às sub-bandas, até atingir aproximadamente 1.1 Gb/s ($N_d = 3686/32 \approx 115$ subportadoras) por ONU. Cada subportadora transporta dados, mapeados em 16-QAM, oriundos de uma sequência pseudo-aleatória (*PRBS - pseudo random bit sequence*) de $2^{15} - 1$ bits. A banda de guarda é inicialmente formada por um total de N_g subportadoras, com N_g variando de 1 a 205 subportadoras, o que corresponde a uma variação na largura da banda de guarda de 0.025% a 5% de B_u . Complementando as 4096 subportadoras, N_z subportadoras nulas são

acrescentadas para prevenção de *aliasing*. Em virtude do uso da simetria Hermitiana para obter coeficientes reais na saída da IFFT, a largura de banda máxima ocupada foi de 20 GHz. Uma vez que as informações tem origem centralizada na OLT (*downstream*), é desnecessário utilizar banda de guarda N_s entre as sub-bandas das ONUs ($N_s = 0$).

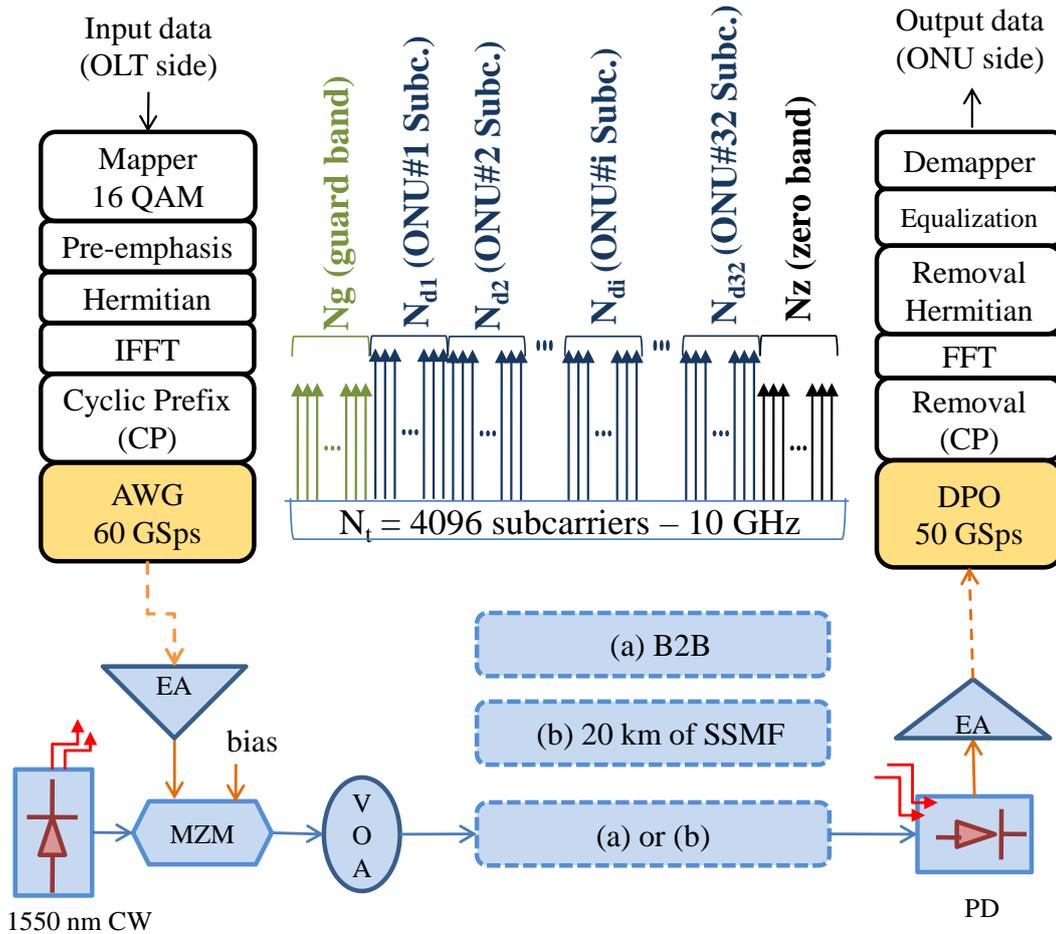


Figura 5.5: Configuração experimental considerando diferentes enlaces de SSMF (a), (b); Alocação das sub-bandas para 32 ONUs.

Os sinais OFDM foram superamostrados usando *MATLAB*[®], e carregados em um AWG de 60 GS/s. Na OLT a portadora óptica, gerada por um laser de largura de linha de 10 MHz e sintonizado em $\lambda_{down} = 1550$ nm, é modulada em intensidade por um modulador de *Mach-Zehnder* (MZM) de largura de banda de 10 GHz. Sua potência de saída atinge 8 dBm quando intencionalmente polarizado ligeiramente acima do seu ponto de quadratura $V_{bias} = 0.5 \times V_{\pi}$, para $V_{\pi} = 3$ V. Com base em sua característica, o MZM é polarizado neste ponto para melhorar o compromisso entre linearidade ($V_{bias} \geq 0.5 \times V_{\pi}$) e sensibilidade ($V_{bias} \leq V_{\pi}$) [38],

considerando o fato que a potência média do sinal OFDM é relativamente baixa (tensão pico-a-pico - $V_{pp} = 1$ V). Além disso, conforme descrito em [38], nos sistemas OFDM de detecção direta, a polarização do MZM próximo a seu ponto de quadratura permite reduzir a banda de guarda da portadora óptica.

De acordo com [9], as perdas na ODN podem ser divididas em: atenuação devido ao comprimento da fibra, perdas nos divisores ópticos, perdas totais dos conectores, perdas totais em fusões, perdas devido aos filtros WDM no nó remoto e perdas por efeito Raman. Neste cenário experimental, foram consideradas todas as perdas típicas de uma ODN simples (ODN classe A - perdas de 0-20 dB), com exceção do filtro WDM. Portanto, foi utilizado um atenuador óptico variável (*VOA - variable optical attenuator*) para emular uma perda de 15 dB, correspondente a inserção do divisor óptico 1:32. Foram realizados testes para dois casos, para back-to-back (*B2B*) óptico e para uma ODN com distância entre OLT e ONUs fixada em 20 km de SSMF. Deste modo, a perda total máxima medida foi de aproximadamente 20 dB. Após a transmissão sobre esta ODN, o sinal modulado é detectado diretamente por um foto-detector com largura de banda de 20 GHz. O sinal recebido é capturado e digitalizado por um DPO de 50 GS/s e também processado *off-line* no *MATLAB*[®].

5.1.4 Resultados do 2º Cenário

A Figura 5.6 mostra a EVM em função da taxa de bit global e da quantidade total de subportadoras de dados, usando uma banda de guarda de 205 subportadoras, o que corresponde a 500 MHz (5% de B_u). A quantidade de subportadoras por ONU (N_{di}) varia de 64 a 115, o que corresponde à taxa de bits entre 610 Mb/s e 1.1 Gb/s por ONU. Isto representa um incremento na taxa de bits total de 19.5 para 35.5 Gb/s. Neste cenário, cada ONU recebe todos os símbolos OFDM, entretanto, extrai somente os dados transportados por seu bloco de subportadoras.

Como esperado, o desempenho do sistema diminui à medida que a largura de banda efetiva atinge valores próximos de 10 GHz. Observe que os valores de EVM excedem o limite de FEC para a taxa de 35.5 Gb/s em B2B e para a taxa de 26.5 Gb/s em 20 km de SSMF. A degradação do sistema a partir do aumento da taxa de bits ocorre devido às

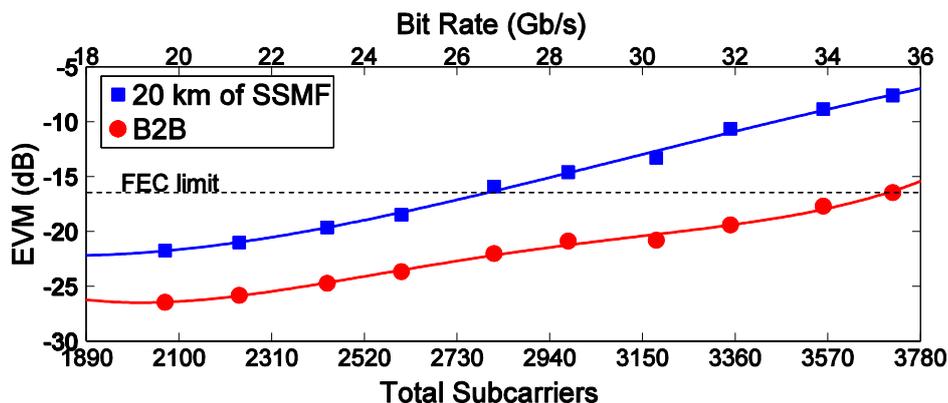


Figura 5.6: EVM em função do total de subportadoras de dados e da taxa total de bits (de 19.5 a 35.5 Gb/s), isto é, N_d variando de 64 a 115 subportadoras de dados por ONU. O limite de recuperação por FEC ($EVM = -16.4$ dB) corresponde a uma $BER = 3.8 \times 10^{-3}$.

distorções impostas pela resposta em frequência do sistema. Em 35.5 Gb/s (equivalente a 9 GHz), os valores de EVM medidos foram, respectivamente, -16.46 e -7.6 dB, em B2B e após 20 km de SSMF.

A fim de explorar a BS OFDM PON na taxa de bits fornecida em [4], avaliou-se o efeito da banda de guarda entre a portadora óptica e a primeira subportadora de dados OFDM, reduzindo N_g de 205 até o mínimo de uma subportadora na tentativa de aumentar SE. A Figura 5.7 representa a EVM como função da banda de guarda para as duas taxas de bits mais elevadas mostradas na Figura 5.6, e que correspondem a 8,6 GHz (33,5 Gb/s) e 9,0 GHz (35,5 Gb/s) de largura de banda útil.

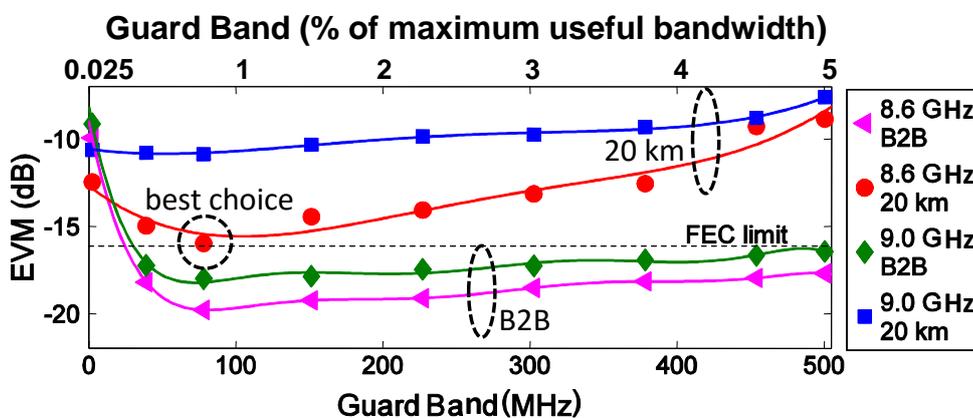


Figura 5.7: EVM em função da banda de guarda B_g variando de 500 a 2.5 MHz (5% a 0.025% de B_u) para as larguras de banda de 8.6 e 9.0 GHz (3520 e 3686 subportadoras de dados no total).

A Figura 5.7 mostra que para B2B, o desempenho do sistema é superior ao exigido para recuperação por FEC para $B_g \geq 35$ MHz ($\geq 0.35\%$ of B_u) para ambas larguras de banda, ou seja os efeitos de IMD e OBI passam a degradar o sistema quando $B_g < 35$ MHz. Para a propagação ao longo de 20 km de SSMF, os resultados experimentais mostram que o desempenho com 9 GHz de largura de banda útil não foi satisfatório, considerando que os valores medidos de EVM foram superiores a -11 dB para qualquer das bandas de guarda avaliadas.

Ainda da Figura 5.7, observa-se na curva de 8.6 GHz (33.5 Gb/s) que o melhor desempenho é obtido para uma banda de guarda $B_g = 78$ MHz (0.78% de B_u), ponto indicado por um círculo tracejado (*best choice*). Note que o pior desempenho para $B_g > 78$ MHz ocorre devido à atenuação do sistema para as altas frequências, enquanto para valores menores, o que prevalece são as distorções por IMD e OBI. Estes resultados estão em conformidade com os resultados obtidos em [40], que mostram que é possível fazer reduções significativas na banda de guarda e ainda manter um bom desempenho, se os parâmetro de projeto dos sistemas DD-OFDM forem adequadamente otimizados.

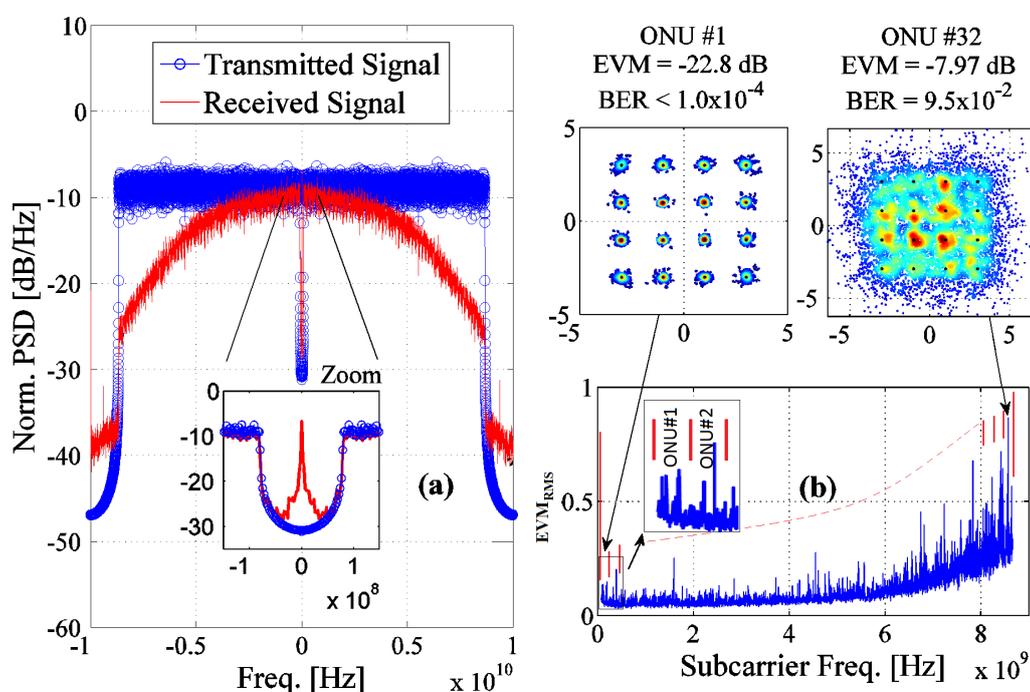


Figura 5.8: (a) Espectros dos sinais transmitido e recebido para 8.6 GHz (33.5 Gb/s) e $B_g = 78$ MHz (0.78% de B_u). (b) EVM_{RMS} medido para todas as subportadoras de dados após 20 km de SSMF.

A Figura 5.8 a. mostra os espectros dos sinais transmitido e recebido para o ponto de melhor desempenho mostrado na Figura 5.7, com destaque para os efeitos de OBI e IMD em zoom. O valor da EVM_{RMS} por subportadora está representado na Figura 5.8 b., mostrando claramente a necessidade de técnicas de pré-distorção para equalizar o erro, já que a resposta em frequência do sistema favorece as subportadoras das primeiras sub-bandas. Isto é reforçado pelos diagramas de constelação para a primeira sub-banda (ONU#1 - $EVM_{RMS} = -22.8$ dB) e para a última sub-banda (ONU#32 - $EVM_{RMS} = -7.97$ dB), cuja diferença de performance chega a ≈ 15 dB.

As taxas de transmissão mais elevadas impõem enormes desafios tanto para o canal como para os dispositivos eletrônicos, resultando em perdas por atenuação ou devido a reflexões [65]. As subportadoras de dados gerados pelo transmissor devem ser adequadamente pré-enfatizadas para superar as perdas no canal dependentes da frequência [65]. Assim, com o objetivo de equalizar o EVM de todas as subportadoras e melhorar o desempenho do sistema, foi desenvolvido, através de processamento digital do sinal, um filtro pré-ênfase polinomial calculado a partir da curva de EVM_{RMS} por subportadora da Figura 5.8 b..

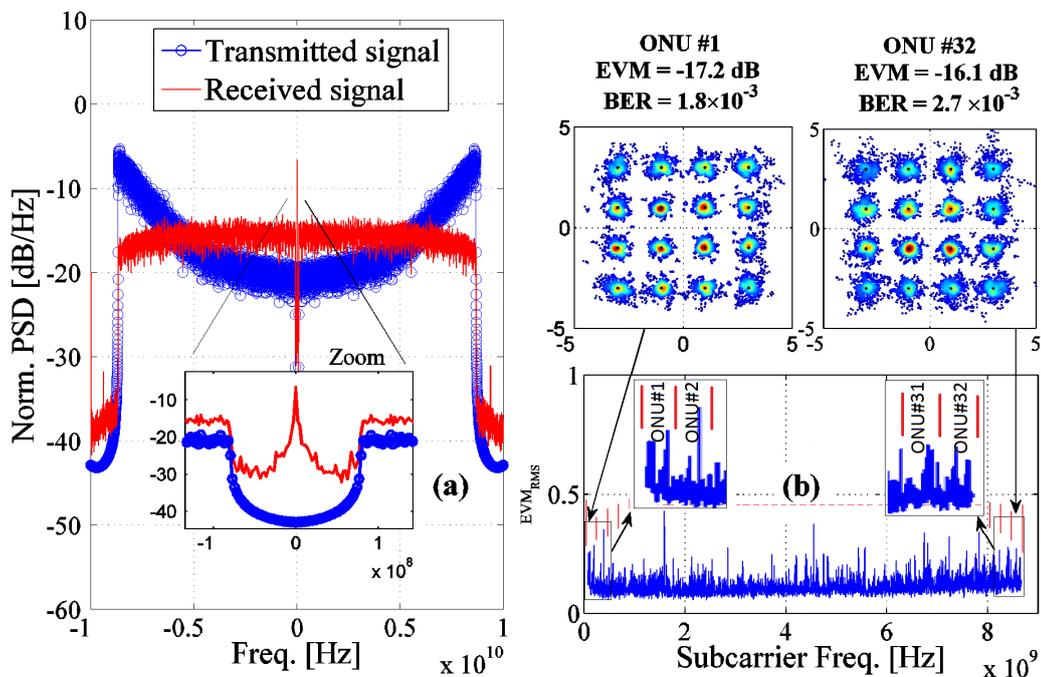


Figura 5.9: (a) Espectros dos sinais transmitido e recebido para 8.6 GHz (33.5 Gb/s) e $B_g = 78$ MHz (0.78% de B_u), usando pré-ênfase. (b) EVM_{RMS} medido para todas as subportadoras de dados após 20 km de SSMF.

A Figura 5.9 a. mostra os espectros dos sinais transmitido pré-enfatizado e recebido. O EVM_{RMS} equalizado representado na Figura 5.9 b. garante que todas as sub-bandas alcancem uma $BER < 3 \times 10^{-3}$, devido à aplicação do filtro digital de pré-ênfase polinomial.

As constelações correspondentes às sub-bandas das ONU#1 e ONU#32, contendo 110 subcarriers cada, são mostradas tanto na Figura 5.8 (sem o uso de pré-distorção), quanto na Figura 5.9 (após o uso da técnica de pré-ênfase). Uma simples comparação entre esses diagramas de dispersão demonstra que o pré-ênfase fornece uma melhoria no desempenho global do sistema. Embora o desempenho da ONU#1 (primeiras subportadoras) em termos de EVM tenha piorado de -22.8 para -17.2 dB, a performance da ONU#32 (últimas subportadoras) teve um ganho de 8 dB. Além disto, todas as ONUs alcançaram um EVM suficiente para que os erros de bits possam ser recuperados por FEC.

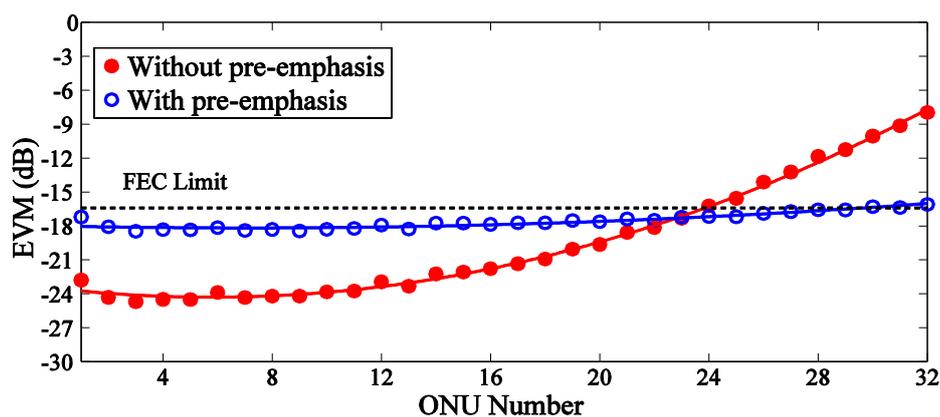


Figura 5.10: EVM por ONU com e sem pré-ênfase. Limite da FEC ($EVM = -16.4$ dB) Corresponde à $BER = 3.8 \times 10^{-3}$.

Esta melhoria no desempenho é confirmada pela curva de EVM medida por ONU e representada na Figura 5.10, onde todas as ONUs atingem um desempenho superior ao limite de FEC após o pré-ênfase. Note que, diferente da análise realizada em [4] e [40], a proposta deste experimento foi maximizar a largura de banda para transportar dados úteis através da redução da banda de guarda da portadora óptica e da aplicação de técnicas de pré-distorção.

5.2 Configurações Experimentais para *Upstream*

Os principais desafios a superar, quando se trata de *upstream*, decorrem da combinação de sinais, que mesmo oriundos da fonte de luz centralizada na OLT, foram submetidos a diferentes condições ao percorrerem diferentes enlaces de fibra. Este sinais após modulados em suas respectivas ONUs, ao retornarem à OLT, chegam ao PSC com diferentes níveis de potência óptica, diferentes atrasos de fase e, principalmente, diferentes estados de polarização. Caso estes sinais sejam combinados sem um tratamento prévio, o sinal resultante sofrerá uma forte degradação devido ao batimento entre as portadoras ópticas. Com o propósito de investigar algumas técnicas utilizadas no combate a estes problemas, são apresentadas nas seções que seguem duas configurações experimentais para o *upstream*.

5.2.1 Configuração de *Upstream I*

A configuração de upstream I foi construída para atender 4 ONUs. Cada ONU gera um sinal OFDM com 4096 subportadoras, das quais somente $N_d = 512$ transportam dados mapeados em 16-QAM, o que corresponde a 750 MHz de largura de banda útil por ONU do total de 6 GHz. A Figura 5.11 mostra o formato do símbolo OFDM gerado em cada ONU, e o resultado de sua combinação após o PSC. O valor de $N_g = 512$ subportadoras foi definido para todas as ONUs e corresponde a quantidade de subportadoras nulas necessárias para acomodar a banda de guarda para a portadora óptica. O valor de N_s , porém, varia conforme a posição de cada sub-banda, e representa a quantidade de subportadoras nulas suficiente para acomodar todas as sub-bandas anteriores no espectro, bem como os espaçamentos entre essas sub-bandas (*frequency gap* Δf_g ou espaçamento entre ONUs em subportadoras Δs). Assim, $N_{s1} = 0$ para a ONU#1, enquanto que para a ONU#2 $N_{s2} = N_{s1} + N_{d1} + \Delta s$, onde N_{di} corresponde a quantidade de subportadoras de dados da ONU#i. Deste modo, sendo $N_{s2} = 576$ subportadoras, correspondendo a 844 MHz, e $N_{d1} = 512$ subportadoras, ocupando 750 MHz, então o espaçamento entre sub-bandas é $\Delta s = 64$ subportadoras o que indica uma *frequency gap* $\Delta f_g = 94$ MHz.

Os sinais OFDM das ONUs são gerados em *MATLAB*[®] amostrados a 12 GS/s e carregados para dois AWGs com dois canais cada. A saída de cada canal modula a portadora

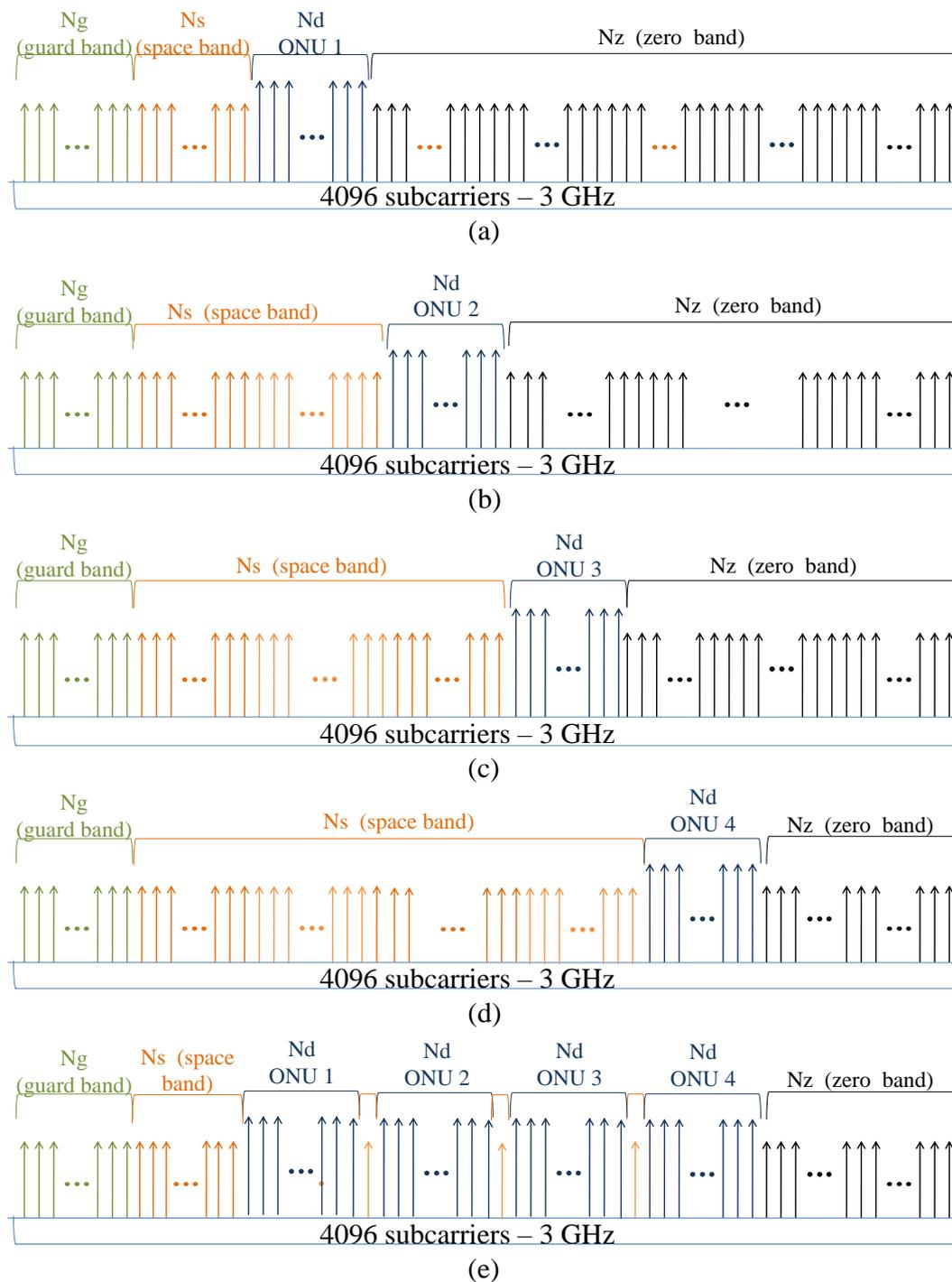


Figura 5.11: Símbolos OFDM no *upstream*. (a) ONU#1; (b) ONU#2; (c) ONU#3; (d) ONU#4; (e) os quatro símbolos combinados após o PSC.

óptica CW sintonizada em 1550 nm, a partir de moduladores de *Mach-Zhender*. O diagrama de blocos da configuração I é apresentado na Figura 5.12. Devido a diferença nos percursos ópticos, os sinais chegam ao PSC descorrelacionados tanto em fase, quanto em polarização.

Assim, de acordo com a diferença de comprimento dos enlaces de fibra, foram adicionados digitalmente diferentes atrasos (*wait times*) para os diversos sinais, a fim de equalizar os tempos de propagação e sincronizar os símbolos OFDM. Com o objetivo de minimizar o efeito dos diferentes estados de polarização, foram utilizados controladores de polarização nas entradas do combinador ligado a um polarizador linear. Na saída do polarizador linear os sinais somados são entregues em uma única polarização reduzindo a OBI. O sinal combinado ópticamente é diretamente detectado por um foto-detector. O sinal elétrico recebido é capturado e digitalizado por um DPO de 50 GS/s e, então, processado *off-line* em *MATLAB*[®].

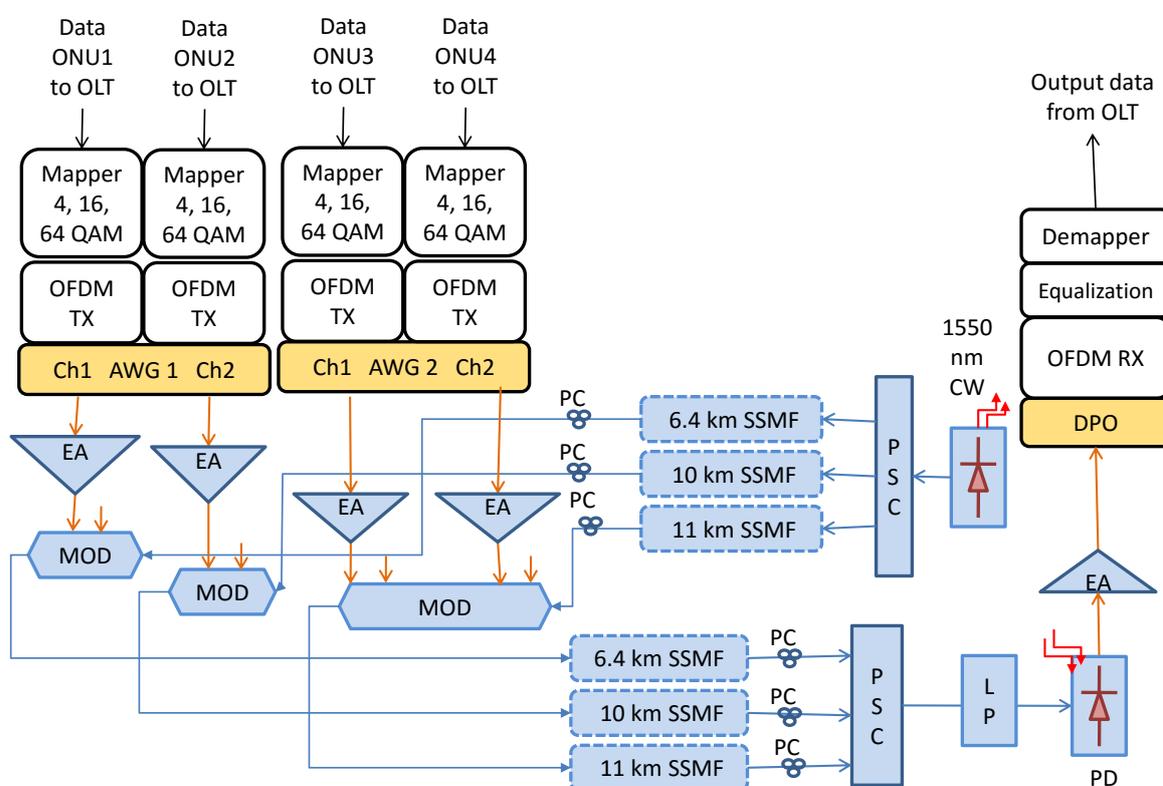


Figura 5.12: Setup experimental para *upstream* BS OFDMA PON. EA: Amplificador elétrico; PC: Controlador de polarização; MOD: Modulador de *Mach-Zehnder*; PSC: Divisor/combinador passivo; LP: Polarizador linear; PD: Foto-detector.

Embora o uso da fonte de luz centralizada na OLT garanta que o comprimento de onda das portadoras seja o mesmo, o desempenho desta configuração foi comprometido devido a distorções causadas pela variação dos estados de polarização das portadoras. Mesmo com a utilização de controladores de polarização e do polarizador linear após o combinador, ainda ocorre variação nas potências das sub-bandas das ONUs ao longo do tempo. As Figuras 5.13 e 5.14 mostram os resultados obtidos para duas capturas em instantes diferentes.

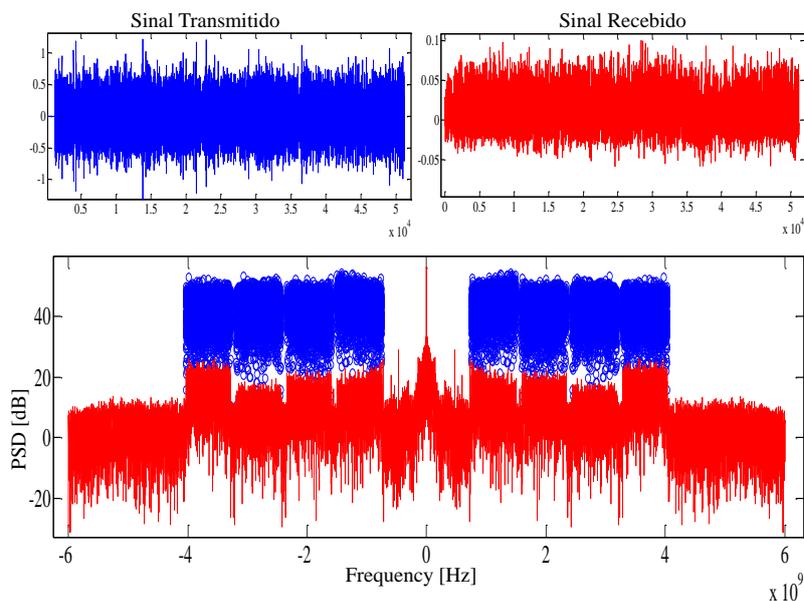


Figura 5.13: Atenuação devido aos diferentes estados de polarização. Terceira sub-banda é mais afetada.

A fim de demonstrar a influência da variação dos estados de polarização, segue um desenvolvimento matemático considerando somente os sinais das portadoras no mesmo comprimento de onda (sem os sinais modulados). A expressão 5.3 descreve o campo elétrico E_i correspondente a portadora óptica retransmitida pela ONU#i:

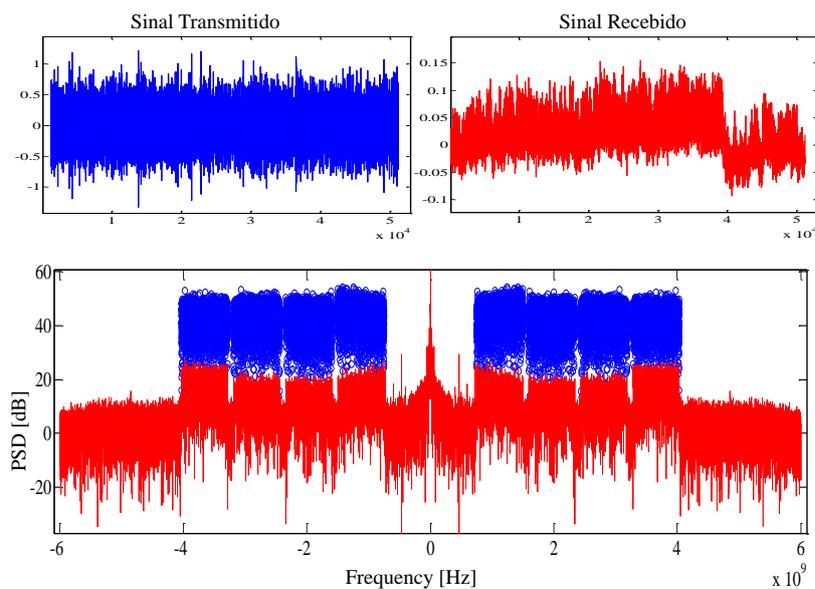


Figura 5.14: Atenuação devido aos diferentes estados de polarização. Segunda sub-banda é mais afetada.

$$E_i(z,t) = \bar{E}_{ix}(z,t) + \bar{E}_{iy}(z,t), \quad (5.3)$$

com

$$E_{ix}(z,t) = \hat{e}_{ix} \cdot \sqrt{P_{ix}} \cdot \cos(\omega \cdot t - \beta \cdot z_i) \cdot \cos(\delta_i), \quad (5.4)$$

e

$$E_{iy}(z,t) = \hat{e}_{iy} \cdot \sqrt{P_{iy}} \cdot \cos(\omega \cdot t - \beta \cdot z_i) \cdot \sin(\delta_i), \quad (5.5)$$

Onde E_{ix} e E_{iy} são respectivamente os campos elétricos nas polarizações X e Y, \hat{e} indica o vetor unitário na direção do campo elétrico, P_i é a potência óptica, ω representa a frequência angular da portadora óptica, $\beta \cdot z_i$ corresponde ao atraso de fase devido ao comprimento do enlace de fibra da $ONU_i(z_i)$, e δ_i tem relação com o estado de polarização. Este último parâmetro pode ser considerado uma variável aleatória, uma vez que depende de fatores tais como temperatura, condições mecânicas impostas à fibra e outros parâmetros que são variantes no tempo. Assumindo, inicialmente, que seja possível ajustar as potências ópticas, a fase e a polarização destas portadoras,

$$P_{ix} = P_x, P_{iy} = P_y, \quad (5.6)$$

e

$$\beta \cdot z_i = \theta, \forall i \quad (5.7)$$

os resultados da adição dos N sinais das ONUs após o combinador são:

$$E_x(z,t) = \hat{e}_x \cdot \sqrt{P_x} \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta) \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i), \quad (5.8)$$

e

$$E_y(z,t) = \hat{e}_y \cdot \sqrt{P_y} \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta) \sum_{i=1}^N \cos(\delta_i). \quad (5.9)$$

Como a polarização varia de forma diferente, já que os campos elétricos trafegam sob condições diferentes até o combinador, os estados de polarização dos sinais referentes a cada ONU são diferentes e representados por δ_i . Além disso, estas variações ocorrem lentamente,

causando desvanecimento do sinal por um intervalo maior que o período de símbolo do sinal OFDM a ser transmitido.

Com o objetivo de facilitar o entendimento, a Figura 5.15 mostra três sinais sujeitos a uma variação rápida dos estados de polarização, bem como o resultado da adição destes sinais ao longo do tempo. A variação rápida foi adotada para possibilitar a representação, entretanto,

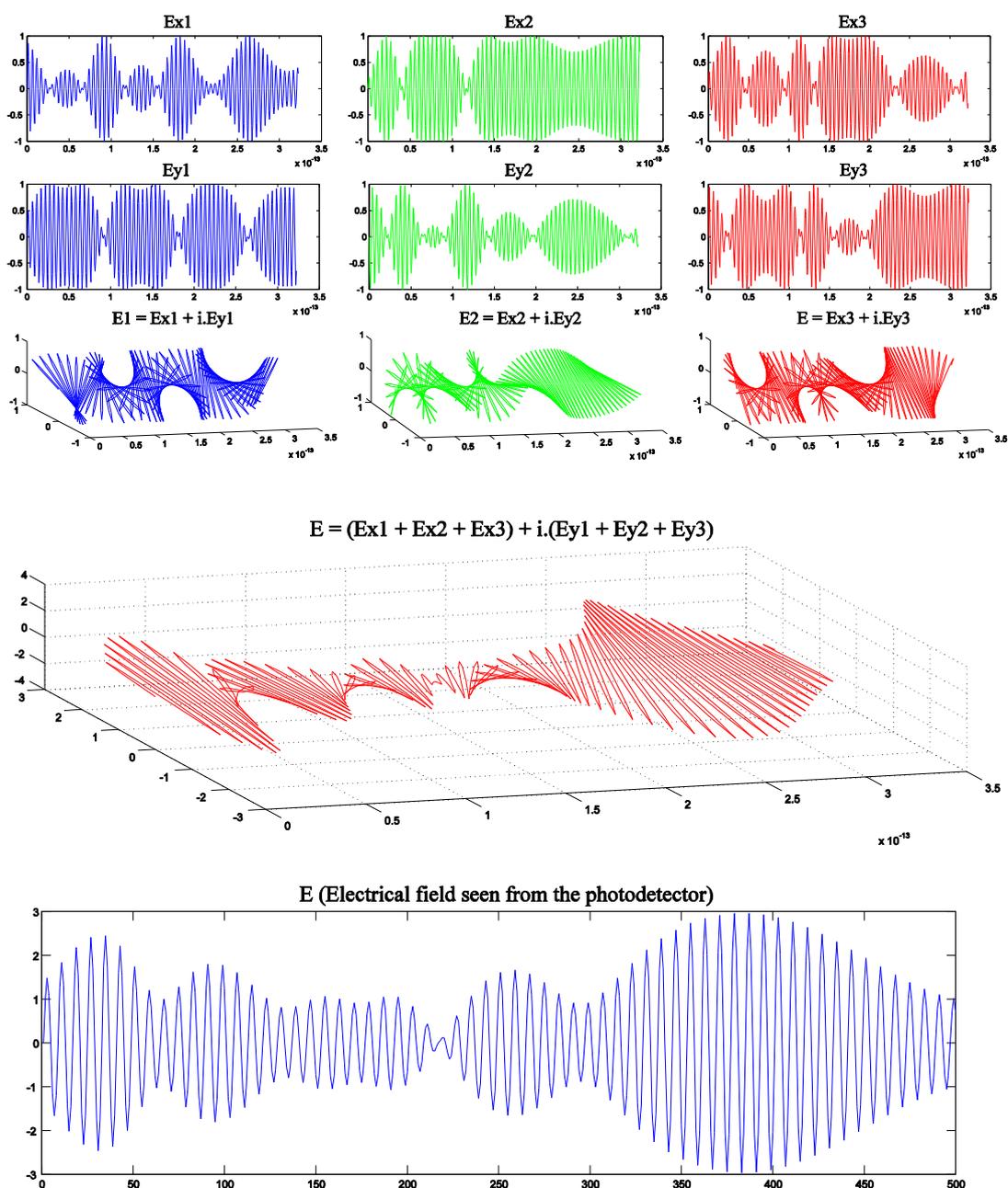


Figura 5.15: Atenuação devido às diferentes variações dos estados de polarização.

na prática esta variação é consideravelmente lenta e o desvanecimento do sinal se mantém por um intervalo sensivelmente longo comparado com o tempo de símbolo. Assim, embora o OFDM seja robusto ao desvanecimento rápido (*fading*) seletivo em frequência, devido a longa duração dos símbolos, mesmo em taxas de transmissão altas, o *fading* de polarização não pode ser recuperado justamente porque seu desvanecimento é lento, com duração maior que o tempo de um ou mais símbolos.

Uma alternativa viável foi apresentada em [46] e usada em uma OFDM PON com modulação preliminar de portadora de RF. Nesta implementação os autores conseguem bons resultados usando supressão da portadora óptica e detecção coerente. Sem dúvida, o uso de detecção coerente aumenta a complexidade e custo da implementação, entretanto esta alteração na proposta sugere o uso desta técnica apenas para *uplink*, isto é, somente na OLT seria empregada a detecção coerente. Neste caso, como a fonte de luz é centralizada, esta também pode ser usada como oscilador local. Outra idéia, seria aplicar alguma perturbação na fibra de maneira a tornar o *fading* de polarização mais rápido que o tempo de símbolo.

5.2.2 Configuração de *Upstream II*

Na Seção 5.2.1 foi demonstrado que os diferentes estados de polarização dos sinais das ONUs quando combinados produzem nulos, causando desvanecimento do sinal por intervalos de tempo superiores ao tempo de símbolo. Este fato impede a recuperação do símbolo e conseqüentemente aumenta a EVM medida. Uma das formas de evitar a combinação das portadoras, seria suprimi-las, enviando somente as bandas laterais, e, após a combinação destas, adicionar nova portadora via oscilador local para realizar detecção coerente na OLT. Entretanto, como detecção coerente não é foco deste trabalho, a configuração anterior foi alterada, com objetivo de comprovar conceitos, especialmente aqueles relacionados ao mecanismo de sincronismo proposto para *upstream*. Deste modo, a fim de evitar o batimento óptico entre as portadoras ópticas utilizamos apenas duas ONUs, cujos sinais são combinados em um combinador de feixe de polarização (*PBC - polarization beam combiner*), garantindo que os sinais das sub-bandas sigam com polarizações ortogonais entre si.

Nesta Configuração, a largura de banda total foi de 3 GHz distribuída em 4096 subpor-

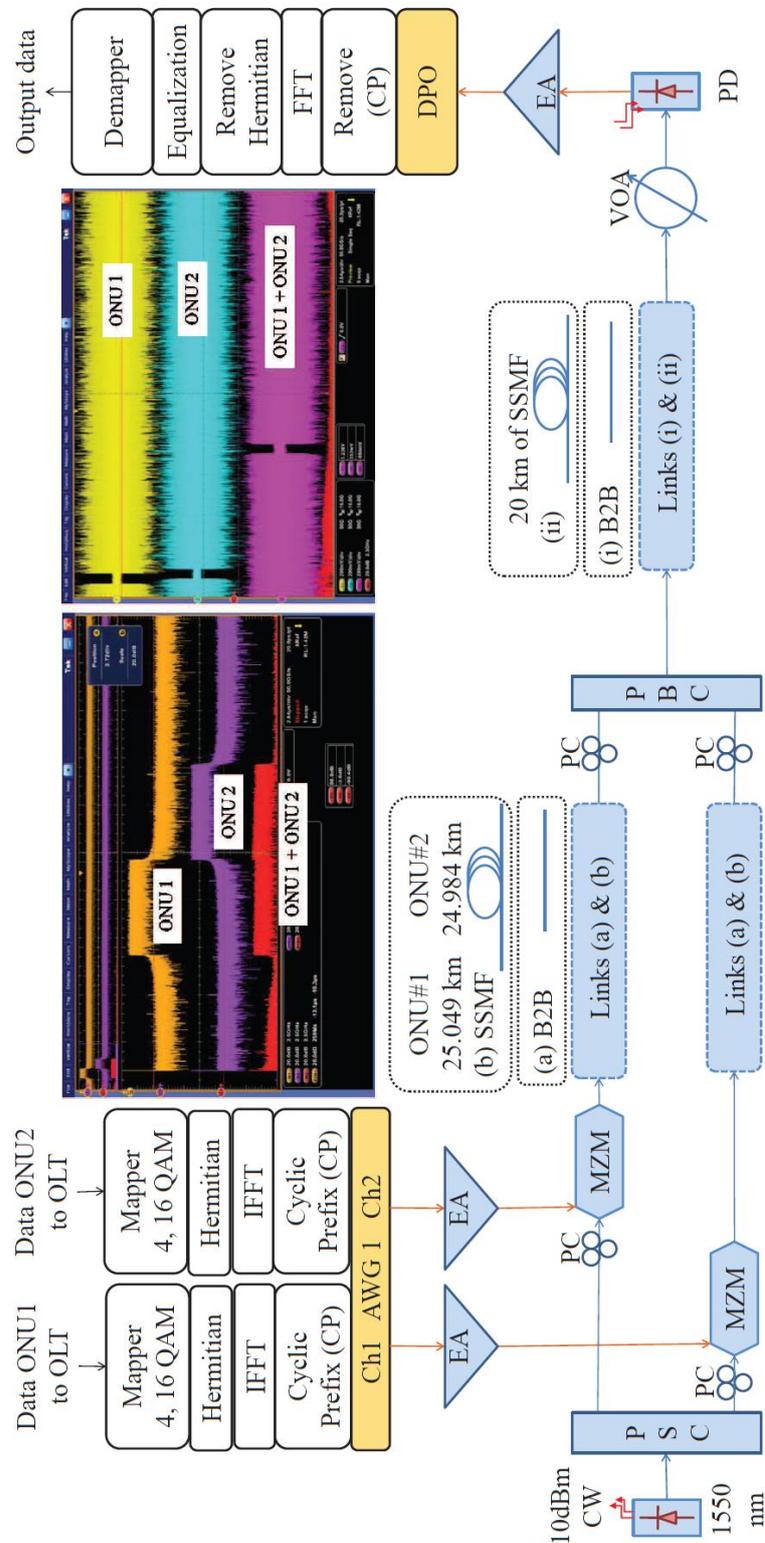


Figura 5.16: Setup experimental para *uplink* BS OFDM PON. EA: Amplificador elétrico; PC: Controlador de polarização; MZM: Modulador de *Mach-Zhender*; PSC: Divisor/combinador passivo; PBC: Combinador de feixe de polarização; PD: Foto-detector.

tadoras, cada ONU preenche $N_d = 680$ subportadoras (500 MHz) com dados QAM, e os valores de N_g e N_{si} têm o mesmo significado apresentado para configuração anterior. Os sinais OFDM das ONUs são gerados em *MATLAB*[®] e carregados para um AWG de 12 GS/s. Após a conversão digital-analógica (DAC), os sinais elétricos dos dois canais do AWG modulam uma portadora de onda contínua (CW), obtida da fonte de luz centralizada na OLT, através de dois moduladores de *Mach-Zhender* de porta única, ambos polarizados em seu ponto de quadratura. Após a transmissão pelos diferentes enlaces de fibra, os sinais são combinados ópticamente pelo PBC e detectados diretamente por um único fotodetector. O sinal elétrico detectado é amostrado por um DPO de 50 GS/s e, então processado off-line. A Figura 5.16 apresenta o diagrama de blocos correspondente à montagem experimental utilizada, os espectros dos sinais das duas ONUs em separado e também o do sinal combinado. Note que, para a parte comum do enlace, foram adotados dois casos: B2B e 20 km de SSMF, e os enlaces específicos das ONUs foram de 25.049 e 24.984 km de SSMF. Os experimentos consideram mapeamento das subportadoras em 4 e 16-QAM.

Para os experimentos desta seção, foi necessário sincronizar os sinais das ONUs a fim de que os símbolos OFDM chegassem simultaneamente no PBC e pudessem compor um único sinal de saída. Note que a diferença de comprimento entre os caminhos é $D_f = 25049 - 24984 = 65$ metros. A fim de investigar experimentalmente a solução para sincronismo de quadros apresentada na Seção 4.5.2, foi adicionado digitalmente ao sinal da ONU mais próxima um atraso elétrico $T_a = 325$ ns (*wait time*), calculado como segue:

$$T_a = \frac{n_s \cdot D_f}{n_0 \cdot c_0}, \quad (5.10)$$

onde c_0 é a velocidade da luz no vácuo, n_0 e n_s são os índices de refração da luz no vácuo e na sílica, respectivamente [66]. Esta solução é facilmente implementada a nível físico a partir das marcas temporais do protocolo MAC. Deste modo, a OLT pode determinar o RTT e o tempo de processamento esperado de cada ONU e, então, calcular seus respectivos atrasos usando a Equação 5.10.

5.2.3 Resultados da Configuração de *Upstream II*

No *upstream*, os diferentes enlaces estão sujeitos a diferentes condições ambientais. Estas condições podem provocar pequenas variações nos tempos de propagação das ONUs. Além disso, as ONUs podem variar seu tempo de processamento a cada quadro. A fim de investigar quão crítica é a sincronização dos símbolos no PSC, foi realizado um experimento para medir o desempenho em termos de EVM em função da variação ΔT_a do atraso elétrico T_a , calculado pela Equação (5.10). Assim, a cada captura o atraso elétrico adicionado passa a ser $T_a + \Delta T_a$, com ΔT_a variando como percentual do prefixo cíclico ($CP \approx 6.4$ ns).

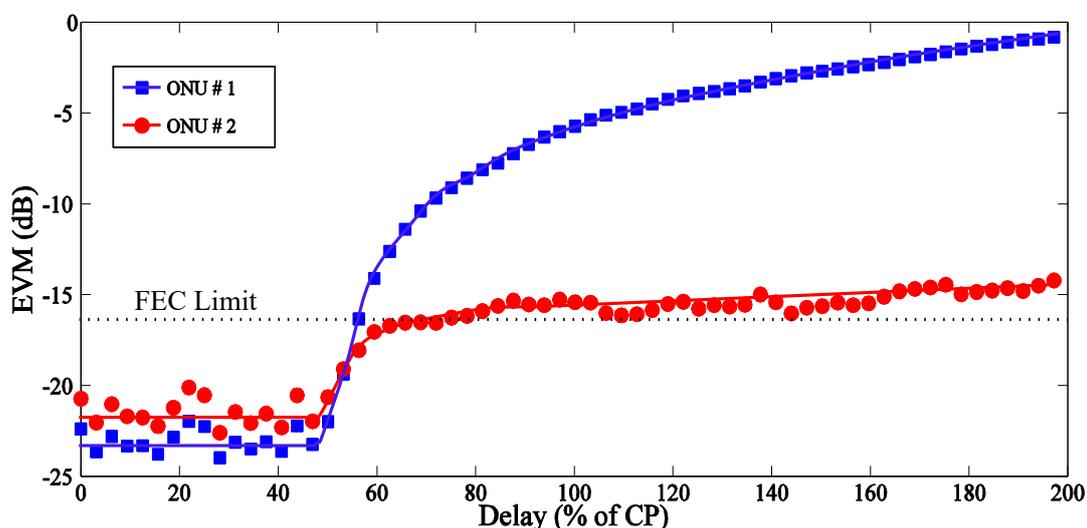


Figura 5.17: EVM em função do atraso elétrico entre as ONUs em % da duração do CP.

A Figura 5.17 mostra a degradação de desempenho em termos de EVM à medida que a variação do atraso aumenta. Atrasos $\Delta T_a < 50$ % de CP não afetam o desempenho. Assim, variações de atraso em torno de 3.2 ns são perfeitamente toleráveis. Em casos mais críticos, pode ser necessário aumentar o comprimento do CP, desde que seja mantido o compromisso entre a degradação imposta pela variação do atraso e o *overhead* adicionado com o novo CP.

Outro problema a ser investigado para o *upstream* é a influência do espaçamento entre as sub-bandas Δf_G (*frequency gap*), uma vez que elas são oriundas de sinais OFDM gerados em diferentes ONUs. A Figura 5.18 mostra a performance em EVM em função de Δf_G para $B_G = 1$ GHz e mapeamento 16 QAM, tanto para B2B como para 25 km de SSMF.

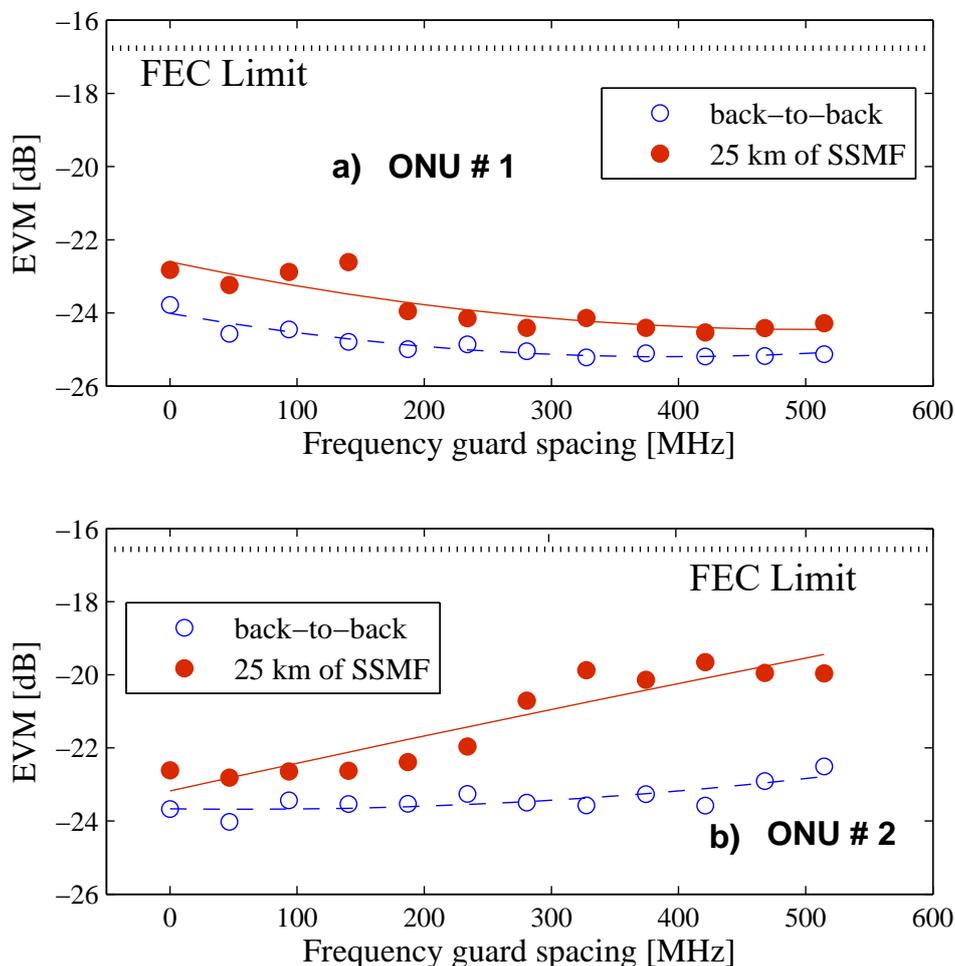


Figura 5.18: EVM em função de Δ_{f_G} (*frequency gap*) para a) ONU#1 e b) ONU#2, considerando B2B e 25 km de SSMF.

Inicialmente, há uma pequena melhoria no desempenho da ONU#1, como mostra a Figura 5.18 a., devido à redução da interferência entre sub-bandas. A partir de $\Delta_{f_G} = 400$ MHz esta interferência torna-se insignificante. Entretanto, o incremento em Δ_{f_G} aumenta a largura de banda total necessária, reduzindo o desempenho das sub-bandas de mais altas frequências. Isto ocorre devido a limitações de largura de banda impostas pela resposta em frequência do canal. Este efeito pode ser observado na Figura 5.18 b. cujo a EVM medida para ONU#2, especialmente para 25 km de SSMF, aumenta cerca de 3 dB. Com base nestes resultados, conclui-se que $\Delta_{f_G} = 0$ Hz representa a melhor escolha para melhorar a eficiência espectral, embora o desempenho do sistema sofra uma pequena penalidade (≈ 1 dB).

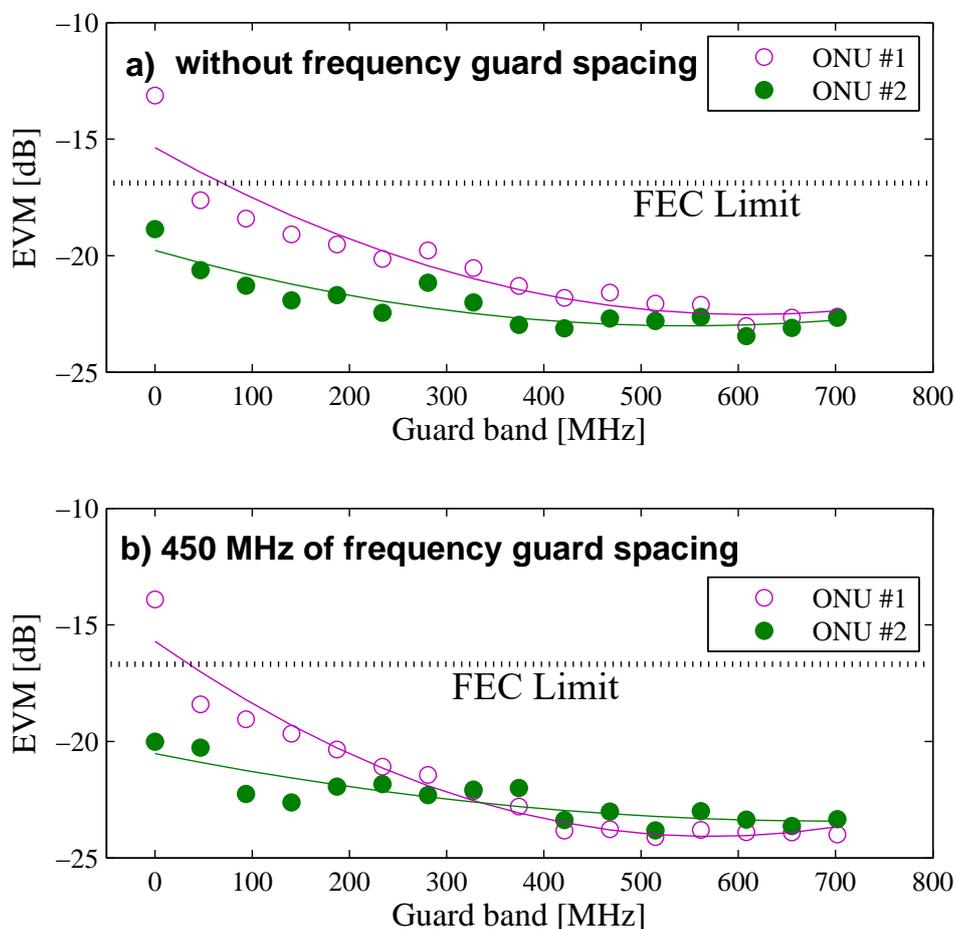


Figura 5.19: EVM em função da banda de guarda B_G para a) $\Delta_{f_G} = 0$ Hz e b) $\Delta_{f_G} = 450$ MHz, considerando B2B e 25 km de SSMF.

A Figura 5.19 ilustra a influência da banda de guarda da portadora óptica B_G no *uplink* para $\Delta_{f_G} = 0$ e 450 MHz. Como esperado, a ONU#1 é mais afetada pela IMD, especialmente para $B_G \leq 400$ MHz e quaisquer dos valores de Δ_{f_G} . Pode-se concluir, a partir destes resultados, que a penalidade no desempenho ao utilizar $\Delta_{f_G} = 0$ Hz é insignificante quando comparada com o uso de $\Delta_{f_G} = 450$ MHz. Assim, é possível melhorar a eficiência espectral reduzindo B_G para aproximadamente a metade da largura de banda do sinal, sem utilizar espaçamento entre as sub-bandas.

A Figura 5.20 mostra o desempenho no *uplink* em termos de EVM em função da potência óptica recebida no fotodetector após 45 km (25 km + 20 km de enlace comum) de SSMF, usando mapeamento 4 e 16 QAM, $B_G = 450$ MHz e $\Delta_{f_G} = 0$ Hz.

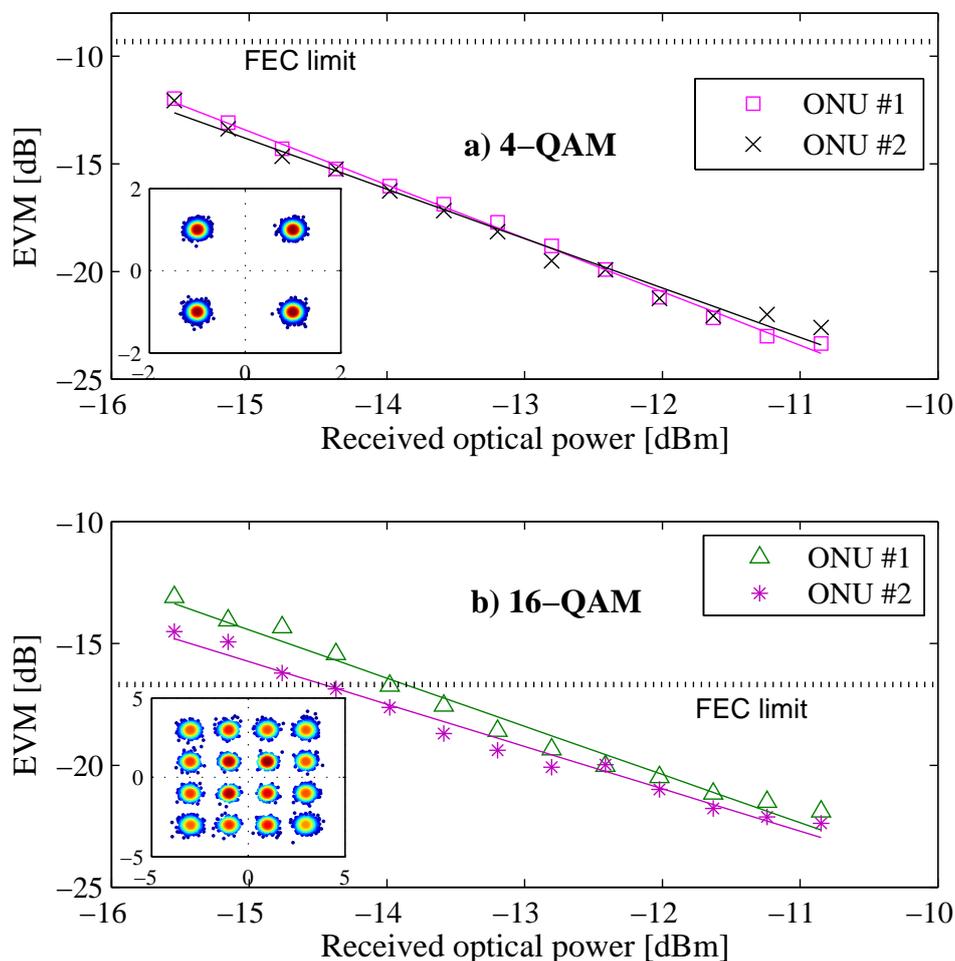


Figura 5.20: EVM em função da potência óptica recebida no B2B óptico e após 45 km de SSMF, para a) 4-QAM e b) 16-QAM.

Os resultados experimentais apresentados na Figura 5.20 a. mostram que, para 4 QAM, a EVM medida se mantém abaixo da linha de limite de FEC ($BER = 3 \times 10^{-3}$) para todas as ONUs e todas as potências recebidas. Isto pode ser confirmado observando a constelação livre de erros da ONU#1, em destaque na figura, para potência de -10.84 dBm. Os resultados para 16 QAM apresentados na Figura 5.20 b. revelam que a EVM fica abaixo do limite de FEC para potências $P_o \geq -12.8$ dBm, como mostra a constelação livre de erros da ONU#2 em $P_o = -12.8$ dBm. Como conclusão, a eficiência espectral pode ser ampliada reduzindo a banda de guarda e/ou aumentando o nível do formato de modulação das subportadoras.

5.3 Conclusões sobre as Configurações Experimentais

Neste capítulo foram apresentados os primeiros resultados experimentais para a arquitetura BS OFDMA PON. Foram realizados experimentos, tanto no sentido e *downstream* como *upstream*, com o intuito de comprovar os resultados obtidos por [4] por meio de simulações.

No sentido de *downstream* dois arranjos experimentais foram construídos. O primeiro consistiu de uma rede óptica passiva, com três unidades de rede óptica (ONU) colocadas após enlaces de fibra de 25 km, 45 km, e 65 km. A OLT gerou um padrão de dados com informações para três ONUs multiplexadas para compor um sinal OFDM único. Este sinal OFDM foi composto por 4096 subportadoras em uma largura de banda de 3 GHz. No entanto, a largura de banda alocada para cada ONU foi de 500 MHz, equivalente a 680 de um total de 4096 subportadoras, onde cada subportadora transportou sinais 4QAM ou 16QAM. A taxa de bits transmitida por meio de um único comprimento de onda chegou a 6 Gb/s. Neste cenário a influência da banda de guarda da portadora óptica foi analisada, o que revelou uma dependência do nível da potência óptica recebida e dos requisitos dos formatos de modulação. Deste modo, é possível reduzir consideravelmente a banda de guarda, otimizando os parâmetros de projeto e admitindo certa penalidade no desempenho do sistema.

No segundo arranjo, os parâmetros de projeto foram otimizados, e a configuração experimental considerou uma ODN classe A com 32 ONUs, ligadas por enlaces de no máximo 20 km de SSMF. Os experimentos demonstraram que o sistema é capaz de transmitir a uma taxa de bits bruta de 33.5 Gb/s. Estes resultados foram obtidos ampliando a largura de banda útil total para 10 GHz, reduzindo a banda de guarda N_g e utilizando um filtro digital de pré-ênfase polinomial, calculado a partir dos valores de EVM_{RMS} por subportadora.

No sentido de *upstream*, os arranjos experimentais realizados levaram a concluir que a OBI e a IMD, resultantes dos diferentes estados de polarização e da variação destes estados, impossibilitam a detecção direta, quando utilizamos o mesmo, ou quase o mesmo, comprimento de onda para as ONUs. Entretanto, é possível utilizar o mesmo comprimento de onda com supressão da portadora, quando da modulação remota na ONU, e detecção coerente somente na OLT. Experimento semelhante foi realizado com sucesso em [46] em uma OFDM PON, porém com uso de modulação preliminar de portadora de RF.

Ainda para *upstream*, uma configuração com mesmo comprimento de onda consistiu de uma rede óptica passiva, com duas ONUs colocadas após enlaces de fibra de 25 km, 45 km, e 65 km. As ONUs geraram padrões de dados nos formatos 4, e 16 QAM preenchendo 680 subportadoras cada (o que equivale a uma largura de banda de 500 MHz por ONU), com objetivo de compor um sinal OFDM único após o combinador. Este sinal OFDM foi composto por 4096 subportadoras em uma largura de banda de 3 GHz. Estes experimentos foram feitos para prova de conceitos, especialmente no que diz respeito a solução para sincronização de símbolos OFDM oriundos de fontes diversas e combinados para formar um único símbolo.

Os resultados revelaram que as variações de atraso entre os símbolos são permitidas até o valor de 50 % do CP sem qualquer prejuízo para o desempenho do sistema, demonstrando que é possível o compartilhamento de símbolos OFDM entre fontes de sinais distintas. Além disso, a influência da banda de espaçamento entre as sub-bandas (*BWS - Bandwidth Spacing*) das ONUs foi analisada, o que revelou uma degradação do sinal de menos de 2 dB na EVM medida para $BWS = 0$ em relação ao melhor valor obtido (BWS em torno de 600 MHz). Assim como no *downstream*, a banda de guarda da portadora óptica pode ser reduzida se for mantido o compromisso entre aproveitamento da largura de banda e desempenho total do sistema.

Capítulo 6

Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma arquitetura capaz de fornecer transporte de dados a taxas superiores a 33 Gbps e oferecer uma gama de perfis de QoS em uma rede de acesso óptica passiva. A BS OFDMA PON apresenta características físicas que indicam reduzido custo por bit, grande eficiência espectral e robustez, além de permitir a construção de uma MAC com alta flexibilidade na alocação de largura de banda, a partir dos recursos oferecidos pelo acesso OFDMA.

A viabilidade da proposta de arquitetura com fonte de luz centralizada foi avaliada e os seguintes fatos foram observados:

- Necessidade da banda de guarda em relação à portadora óptica - a largura da banda de guarda influencia diretamente nos danos impostos pela IMD e OBI. Entretanto, é possível tolerar algum nível de interferência a fim de aumentar a eficiência espectral do sistema. Esta possibilidade de redução da banda de guarda permitiu elevar a eficiência espectral do sistema e atingir uma taxa de bits total em torno de 33.5 Gb/s (cerca de 1.05 Gb/s por ONU), sem comprometer o desempenho global.
- Necessidade da guarda entre sub-bandas das ONUs (*frequency gap*) - a interferência entre as sub-bandas, especialmente quando usada a modulação preliminar de portadora de RF, é combatida mantendo um espaçamento entre as portadoras de RF maior que a necessária para acomodar a subbanda de dados. No caso da BS OFDMA PON, que não

usa modulação preliminar de portadora de RF, é possível aumentar a eficiência espectral do sistema eliminando este espaçamento no *downstream*. Quanto ao *upstream*, ficou comprovado que a perda de desempenho, quando este espaçamento é eliminado, gira em torno de 2 dB. Assim, concluímos que a BS OFDMA PON permite a eliminação da *Frequency gap* considerando um pequeno acréscimo no orçamento de potência da PON.

- Uso otimizado de componentes - parâmetros como ponto de polarização, índice de modulação elétrico ou óptico, potência óptica na entrada, utilização do espectro de acordo com a resposta em frequência e tantos outros, são muito relevantes durante a implementação real do sistema. A utilização de técnicas de otimização de parâmetros e técnicas de pré-distorção para compensar a resposta dos componentes e do canal são de grande importância para aumentar a eficiência espectral do sistema. As técnicas de pré-distorção, especialmente quando a resposta em frequência do canal e dos componentes é limitada, se mostraram fundamentais para equalização das sub-bandas.
- Sincronismo de símbolo e de quadros - o prefixo cíclico (CP), como mostrado no Capítulo 3, é um importante parâmetro usado para combater a interferência intersimbólica (ISI), especialmente em redes com longos enlaces de fibra. Entretanto, no caso das PONs, que são redes de curto alcance, com ordem de abrangência em torno e 40 km, o uso do CP contribui principalmente para o sincronismo dos símbolos OFDM. Na BS OFDMA PON, as ONUs compartilham o mesmo símbolo OFDM também no *upstream*. Isto requer que as transmissões oriundas das ONUs cheguem simultaneamente ao PSC. Como visto nos resultados experimentais de *upstream*, as variações de atrasos, provocados por fenômenos físicos e ambientais que não podem ser considerados no cálculo dos *Wait Times*, podem ser perfeitamente compensadas pelo CP.
- Polarização da fonte de luz centralizada - a BS OFDMA PON utiliza fonte de luz centralizada na OLT e remodulada nas ONUs para transmissão no *upstream*. Este esquema foi proposto para evitar o batimento óptico causado na combinação de portadoras ópticas geradas por lasers diferentes, mesmo quando aparentemente sintonizados no mesmo comprimento de onda. Entretanto, nas simulações não foram consideradas as variações da polarização da portadora centralizada após percorrer distâncias e

enlaces de fibras diferentes.

De fato, a variabilidade da polarização constitui um problema quando utilizada a detecção direta. No entanto, este problema pode ser resolvido utilizando supressão da portadora óptica, durante a modulação remota nas ONUs, e realizando detecção coerente na OLT [46].

- A alocação dos blocos de subportadoras pode ser feita considerando a resposta do sistema de acordo com as distâncias entre a OLT e as ONUs. Não obstante, como visto na Seção 5.1, o uso do pré-ênfase pode eliminar esta preocupação e reduzir a complexidade do algoritmo de DBA, mantendo a excelente granularidade com o uso de apenas duas dimensões (tempo e subportadoras) nos cálculos para distribuição de banda, sem considerar o comprimento dos enlaces.

6.1 Trabalhos Futuros

Os próximos passos na evolução deste trabalho, com relação à infraestrutura física e à camada MAC estão listados a seguir:

1. verificar a viabilidade da redução do preâmbulo do cabeçalho da camada física de 12 símbolos, usados no padrão 802.11a [57], para 4 símbolos, devido ao melhor comportamento do canal óptico. Isto será possível com a implementação em FPGA para realização de experimentos executados on-line;
2. realizar novos experimentos para validação do *uplink*, considerando o uso de supressão de portadora e recepção coerente na OLT;
3. utilizar comprimentos de ondas distintos para cada ONU, com espaçamentos maiores que a largura de banda elétrica do fotodetector, e verificar a eficiência da recepção direta a partir deste arranjo;
4. realizar simulações contemplando também os modelos adaptados da 10 G EPON e da XGPON;

5. Verificar a relação entre custo de implementação da arquitetura em FPGA, o comprimento da FFT e o desempenho em termos de alocação de banda dinâmica;
6. Avaliar a arquitetura considerando custo e consumo de energia, visto que este sistema prevê fonte centralizada, em relação aos sistemas que utilizam fontes independentes em cada ONU trabalhando com transmissão intermitente.

Referências Bibliográficas

- [1] Council Europe Business Committee. *Fibre to the Home Business Guide*. Council Europe, feb 2013. URL <http://www.ftthcouncil.eu/EN/home/forms/form-business-guide>.
- [2] W. P. Sanchez and at all. *Redes Ópticas de Acesso de Baixo Custo*. Teleco, jun 2004. URL http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialpon/pagina_4.asp.
- [3] ITU-T Recommendations. G.983: Broadband optical access system based on Passive Optical Network (PON), 2005. URL <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987/en>.
- [4] D. J. C. Coura. *Arquiteturas de Redes Ópticas Passivas Baseadas nas Modulações por Subportadoras OFDM e SCM*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica UFES - Universidade Federal do ES, 2009.
- [5] IEEE. IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks. *IEEE Std 802.3av-2009 (Amendment to IEEE Std 802.3-2008)*, pages 1–227, Oct 2009.
- [6] G. Kramer. 10G-EPON: Drivers, challenges, and solutions. In *Optical Communication, 2009. ECOC '09. 35th European Conference on*, pages 1 –3, Sep 2009.
- [7] R. Roy, M. Hajduczenia, G. Kramer, and H.J.A. da Silva. 10G-EPON efficiency. In *Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS), 2009 IEEE 3rd International Symposium on*, pages 1–3, Dec 2009.

- [8] K. Tanaka, A. Agata, and Y. Horiuchi. IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4):651–661, Feb 2010. ISSN 0733-8724.
- [9] ITU-T Recommendations. G.987-3: 10-gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission Convergence (TC) layer specification, 2010. URL <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987/en>.
- [10] ITU-T Recommendations. G.987 Series: 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems, 2010. URL <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987/en>.
- [11] ITU-T Recommendations. G.989-2: 40-gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification, 2013. URL <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2/en>.
- [12] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (twdm-pon) for next-generation pon stage 2 (ng-pon2). *Journal of Lightwave Technology*, 31(4):587–593, Feb 2013. ISSN 0733-8724.
- [13] M. E. V. Segatto. (invited paper) Performance Assessment of Subcarrier Multiplexing Transmission Systems and Networks. In *Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, 2008. SEON '08. 6th Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors*, pages 1–4, June 2008.
- [14] Chi-Wai Chow, Chien-Hung Yeh, Chia-Hsuan Wang, Fu-Yuan Shih, Ci-Ling Pan, and Sien Chi. WDM extended reach passive optical networks using OFDM-QAM. *Opt. Express*, 16(16):12096–12101, Aug 2008. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-16-16-12096>.
- [15] Ivan B. Djordjevic and Bane Vasic. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission. *Opt. Express*, 14(9):3767–3775, May 2006. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-14-9-3767>.
- [16] W.H. Chen and W.I. Way. Multichannel single-sideband SCM/DWDM transmission

- systems. *Journal of Lightwave Technology*, 22(7):1679 – 1693, July 2004. ISSN 0733-8724.
- [17] T. Ohtsuki. Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communications. *IEEE Communications Magazine*, 41(3):74–79, Mar 2003. ISSN 0163-6804.
- [18] Hyuk-Choon Kwon, Yong-Yuk Won, and Sang-Kook Han. Bidirectional SCM Transmission Using a Noise-suppressed Fabry Pérot Laser Diode and a Reflective Semiconductor Optical Amplifier in a WDM/SCM-PON Link. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(11):858–860, June 2007. ISSN 1041-1135.
- [19] E.J. Tyler, P. Kourtessis, M. Webster, E. Rochart, T. Quinlan, S.E.M. Dudley, S.D. Walker, R.V. Penty, and I.H. White. Toward terabit-per-second capacities over multimode fiber links using SCM/WDM techniques. *Journal of Lightwave Technology*, 21(12):3237–3243, Dec 2003. ISSN 0733-8724.
- [20] Jea-Hoon Yu, Nam Kim, and Byoung Whi Kim. Remodulation schemes with reflective SOA for colorless DWDM PON. *J. Opt. Netw.*, 6(8):1041–1054, Aug 2007. URL <http://jon.osa.org/abstract.cfm?URI=jon-6-8-1041>.
- [21] Daniel J.C. Coura, Jair A.L. Silva, and Marcelo E.V. Segatto. A bandwidth scalable OFDM passive optical network for future access network. *Photonic Network Communications*, 18(3):409–416, 2009. ISSN 1387-974X. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11107-009-0203-0>.
- [22] N. Cvijetic, M. Cvijetic, Ming-Fang Huang, E. Ip, Yue-Kai Huang, and Ting Wang. Terabit Optical Access Networks Based on WDM-OFDMA-PON. *Journal of Lightwave Technology*, 30(4):493–503, Feb 2012. ISSN 0733-8724.
- [23] 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, June 2009.
- [24] S. Krijestorac and J. Bagby. Comparison of interleaved polling with adaptive cycle time and cyclic demand proportionality algorithms. In *Signal Processing and Information*

- Technology*, 2008. *ISSPIT 2008. IEEE International Symposium on*, pages 464–468, Dec 2008.
- [25] IEEE. IEEE Standard for Ethernet Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for Extended Ethernet Passive Optical Networks. *IEEE Std 802.3bk-2013 (Amendment to IEEE Std 802.3-2012)*, pages 1–103, Aug 2013.
- [26] ITU-T Recommendations. G. 988, ONU management and control interface (OMCI) specification, 2010. URL <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.988/en>.
- [27] P. Begovic, N. Hadziahmetovic, and D. Raca. 10G EPON vs. XG-PON1 efficiency. In *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on*, pages 1–9, Oct 2011.
- [28] L. Valcarenghi, Dung Pham Van, Pier Giorgio Raponi, Piero Castoldi, D.R. Campelo, S. Wong, S. Yen, Leonid G. Kazovsky, and S. Yamashita. Energy efficiency in passive optical networks: where, when, and how? *IEEE Network*, 26(6):61–68, November 2012. ISSN 0890-8044.
- [29] W. Shieh and I. Djordjevic. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications*. Elsevier, 2010. ISBN 9780123748799.
- [30] N. Cvijetic. OFDM for Next-Generation Optical Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 30(4):384–398, Feb 2012. ISSN 0733-8724.
- [31] S.L. Jansen, I. Morita, T.C.W. Schenk, N. Takeda, and H. Tanaka. Coherent Optical 25.8-Gb/s OFDM Transmission Over 4160-km SSMF. *Journal of Lightwave Technology*, 26(1):6–15, Jan 2008. ISSN 0733-8724.
- [32] A. Lowery and J. Armstrong. Adaptation of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) to compensate impairments in optical transmission systems. In *33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication - ECOC 2007*, volume 2, pages 121–152, 2007.
- [33] J. A. L. Silva. *Transmissão de Sinais OFDM com Envelope Constante em Sistemas Ópticos IMDD*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica UFES - Universidade Federal do ES, 2011.

- [34] T. H. Wood and N. K. Shankaranarayanan. Operation of a passive optical network with subcarrier multiplexing in the presence of optical beat interference. *Journal of Lightwave Technology*, 11(10):1632–1640, Oct 1993. ISSN 0733-8724.
- [35] A.J. Lowery and J. Armstrong. Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing for Optical Dispersion Compensation. In *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on*, pages 1–3, March 2007.
- [36] T. M. de Almeida, R. B. Nunes, H. R. de O Rocha, M. E. V. Segatto, and J. A. L. Silva. Performance Optimization of DDO-OFDM Systems through Genetic Algorithms. In *Computational Intelligence and 11th Brazilian Congress on Computational Intelligence (BRICS-CCI CBIC), 2013 BRICS Congress on*, pages 86–91, Sept 2013.
- [37] C. Kachris, E. Giacomidis, and I. Tomkos. Energy-efficiency study of optical OFDM in data centers. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, March 2011.
- [38] J. Leibrich, A. Ali, H. Paul, W. Rosenkranz, and K.-D. Kammeyer. Impact of Modulator Bias on the OSNR Requirement of Direct-Detection Optical OFDM. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(15):1033–1035, Aug 2009. ISSN 1041-1135.
- [39] Wei-Ren Peng, Xiaoxia Wu, V.R. Arbab, Kai-Ming Feng, B. Shamee, L.C. Christen, Jeng-Yuan Yang, A.E. Willner, and Sien Chi. Theoretical and Experimental Investigations of Direct-Detected RF-Tone-Assisted Optical OFDM Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 27(10):1332–1339, May 2009. ISSN 0733-8724.
- [40] E. da V. Pereira, H.R. de O.Rocha, R.B. Nunes, M.E.V. Segatto, and J.A.L. Silva. Impact of Optical Power in the Guard-band Reduction of an Optimized DDO-OFDM System. *Journal of Lightwave Technology*, PP(99):1–8, 2015. ISSN 0733-8724. URL <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7274272&tag=1>.

- [41] B. Schmidt, A.J. Lowery, and J. Armstrong. Experimental demonstrations of electronic dispersion compensation for long-haul transmission using direct-detection optical ofdm. *Journal of Lightwave Technology*, 26(1):196–203, Jan 2008. ISSN 0733-8724.
- [42] J.P.K. Perin, M.R.N. Ribeiro, and A.V.T. Cartaxo. Polynomial-Time Complexity Large-Signal Model for DML-Based OOFDM Transmission Systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(24):2393–2396, Dec 2013. ISSN 1041-1135.
- [43] Keang-Po Ho. *Phase-Modulated Optical Communication Systems*. Springer, 2005. ISBN 978-0387-24392-4. URL <http://www.springer.com/us/book/9780387243924#aboutAuthors>.
- [44] I.N. Cano, X. Escayola, P.C. Schindler, M.C. Santos, V. Polo, J. Leuthold, I. Tomkos, and J. Prat. Experimental demonstration of a statistical ofdm-pon with multiband onus and elastic bandwidth allocation. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 7(1):A73–A79, Jan 2015. ISSN 1943-0620.
- [45] N. Cvijetic, H. Ming-Fang, E. Ip, S. Yin, H. Yue-Kai, M. Cvijetic, and T. Wang. Coherent 40Gb/s ofdma-pon for long-reach (100+ km) high-split ratio (>1:64) optical access/metro networks. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2012: 1–3, 2012*.
- [46] J. von Hoyningen-Huene, H. Griesser, M. Eiselt, and W. Rosenkranz. Experimental demonstration of ofdma-pon uplink-transmission with four individual onus. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013*, pages 1–3, March 2013.
- [47] L. Mehedy, M. Bakaul, A. Nirmalathas, and E. Skafidas. Ofdm versus single carrier towards spectrally efficient 100 gb/s transmission with direct detection. *Journal of Optical Communication Networking*, 4(10):779–789, Oct 2012. ISSN 1943-0620.
- [48] D. Qian, N. Cvijetic, J. Hu, and T. Wang. A novel ofdmapon architecture with source free onus for next-generation optical access networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21, 2009.

- [49] A. Barbieri, G. Colavolpe, T. Foggi, E. Forestieri, and G. Prati. Ofdm versus single-carrier transmission for 100 gbps optical communication. *Journal of Lightwave Technology*, 28(17):2537–2551, Sept 2010. ISSN 0733-8724.
- [50] Deming Liu Yinbo Qian Lei Deng, Minming Zhang and Kang Yang. OFDMA-based LAN emulation in long-reach hybrid PON system. *Optics Communications*, 284(3): 740–746, Feb 2011.
- [51] Wei Wei, Ting Wang, Dayou Qian, and Junqiang Hu. Mac protocols for optical orthogonal frequency division multiple access (ofdma)-based passive optical networks. In *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on*, pages 1–3, Feb 2008.
- [52] Jingjing Zhang, Ting Wang, and N. Ansari. An efficient mac protocol for asynchronous onus in ofdma pons. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, March 2011. ISBN 978-1-4577-0213-6.
- [53] T.V. y Villalba, S.M. Rossi, M.P. Mokarzel, M.R. Salvador, H.M.A. Neto, A.C. Cesar, M.A. Romero, and M. de L. Rocha. Design of Passive Optical Networks using Genetic Algorithm. In *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International*, pages 682–686, Nov 2009.
- [54] Bernardo G. Riso and et all. *Engenharia de protocolos com LOTOS/ISO*. Ed. UFSC - Florianópolis - SC, 2004. ISBN 9788532802811.
- [55] Siddhartha Devadhar and Kevin Ryan. Dynamic bandwidth allocation over passive optical networks. *Lightwave*, Nov 2000.
- [56] L.G. Cohen and J.W. Fleming. Effect of temperature on transmission in lightguides. *The Bell System Technical Journal*, 58(4):945–951, April 1979. ISSN 0005-8580.
- [57] IEEE Standard. Ieee std 802.11a: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. Technical report, IEEE Standards Association, Release 2003. URL http://www.techstreet.com/cgi-bin/browse?publisher_id=95&subgroup_id=36721.

- [58] OMNET. *OMNeT++ 4.2 documentation and tutorials*. OMNeT++ Community, 4.2 edition, 2012. URL <http://www.omnetpp.org/documentation>.
- [59] J. Duato, S. Yalamanchili, and L. Ni. *Interconnection Networks*. The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design. Elsevier Science, 2002. ISBN 9781558608528. URL <http://books.google.com.br/books?id=8QG5RSXGKgAC>.
- [60] E. R. S. Castro. *Modelo para Distribuição de Probabilidade do Comprimento dos Pacotes em Redes de Computadores*. Tese de Doutorado - Universidade federal de Campina Gande, 2011.
- [61] Kumar A. Fonseca I. E. Castro, E. R. S. and M. S. Alencar. A new packet distribution model for computer networks with bimodal traffic. *Journal of Communication and Computer*, 9(2):208–216, Feb 2012. ISSN 1548-7709.
- [62] R.A. Shafik, S. Rahman, and R. Islam. On the extended relationships among evm, ber and snr as performance metrics. In *Electrical and Computer Engineering, 2006. ICECE '06. International Conference on*, pages 408–411, Dec 2006.
- [63] R. Schmogrow, B. Nebendahl, M. Winter, A. Josten, D. Hillerkuss, S. Koenig, J. Meyer, M. Dreschmann, M. Huebner, C. Koos, J. Becker, W. Freude, and J. Leuthold. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats. *IEEE Photonics Technology Letters*, 24(1), 2012.
- [64] A. Ali, H. Paul, J. Leibrich, W. Rosenkranz, and K.-D. Kammeyer. Optical biasing in direct detection optical-ofdm for improving receiver sensitivity. In *Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC)*, pages 1–3, March 2010.
- [65] Yang Gao, Jianjun Yu, Jiangnan Xiao, Zizheng Cao, Fan Li, and Lin Chen. Direct-detection optical ofdm transmission system with pre-emphasis technique. *Journal of Lightwave Technology*, 29(14):2138–2145, July 2011. ISSN 0733-8724.
- [66] Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems, 3rd ed*. John Wiley & Sons, New York, USA, 2002.