



**Cláudia Sofia
de Sousa Mendonça**

Requisitos para Redes NG-PON2



**Cláudia Sofia
de Sousa Mendonça**

Requisitos para Redes NG-PON2

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica dos professores Doutores António Teixeira e Mário Lima, do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática e do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão, namorado e amigos por todo o seu incansável e incondicional apoio e por me guiarem sempre na direcção correcta.

O júri

Presidente

Doutor Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Orientador

Doutor António Luís Jesus Teixeira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Co-orientador

Doutor Mário José Neves de Lima
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Co-Orientador)

Vogal

Jorge Costa de Sousa e Castro
Investigador Sénior do INESC Porto

Agradecimentos

Desde logo gostaria de agradecer aos meus Pais, Irmão e Namorado pelo bom senso, sabedoria e dedicação que revelaram estando sempre ao meu lado, encorajando-me nas horas difíceis e aplaudindo-me nos momentos de glória o meu enorme obrigado.

Aos Professores António Teixeira e Mário Lima, meus orientadores, pela oportunidade que me proporcionaram, pela disponibilidade, orientação e motivação ao longo desta jornada, indispensáveis para a conclusão deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

A todos os meus colegas de curso e amigos que me rodeiam e que me apoiaram, um grande obrigado.

Por fim, agradeço à Universidade de Aveiro, em particular ao Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, por me ter proporcionado uma experiência de vida que jamais esquecerei.

Palavras-chave

Comunicações ópticas, redes PON, G-PON, GE-PON, 10GE-PON, NG-PON, XG-PON1, XG-PON2, PIEMAN, SARDANA, ACCORDANCE, GEYSERS, MAINS, OASE, WDM-PON, CWDM-PON, DWDM-PON, OCDMA-PON, OFDM-PON, Coherent-PON, UD-WDM-PON, requisitos NG-PON2.

Resumo

Hoje em dia, o comum entendimento é que as novas redes de acesso em fibra óptica poderão fornecer capacidades ilimitadas; no entanto, na realidade, os aspectos práticos de implementação, as opções arquitecturais e de desempenho de equipamentos de rede levam quase sempre a uma capacidade limitada, embora bastante superior à actualmente disponível pelas redes de cobre.

Sendo assim, é preciso continuar a progredir na descoberta de novas soluções que permitam superar estas questões. Para que isso seja possível, será aqui apresentado um estudo das redes de próxima geração em termos das opções para existentes para combater as limitações actuais tentando obter uma direcção para os próximos anos. Neste documento é apresentado um estudo das redes de acesso anteriores a NG-PON2, são procuradas em projectos actuais de grande envergadura e em publicações actuais de grupos de investigação de relevo tendências que contribuam para os vários requisitos de NG-PON2.

Keywords

Optical communications, PON networks, G-PON, GE-PON, 10GE-PON, NG-PON, XG-PON1, XG-PON2, PIEMAN , SARDANA, ACCORDANCE, GEYSERS, MAINS, OASE, WDM-PON, CWDM-PON, DWDM-PON, OCDMA-PON, OFDM-PON, Coherent-PON, UD-WDM-PON,NG-PON2 requisites.

Abstract

Nowadays, the common understanding is that the new access networks in optical fiber can provide unlimited capabilities; however, in reality, the practical aspects of the implementation, the architectural and network equipment performance options often lead to limited capacity values, although far superior to those currently available for copper networks.

Therefore, we must continue to progress in finding new solutions to address these issues. To make this possible, a study of next-generation networks will be presented here, presenting the options available to tackle the existing constraints and to try to get a direction for the following years. In this document, a study of the access networks prior to NG-PON2 is presented, as well as trends in current projects in major publications and in relevant current research groups that contribute to the various requirements for NG-PON2.

Índice

ÍNDICE.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS.....	V
ACRÓNIMOS.....	VI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.1.1 <i>Evolução de serviços</i>	4
1.2 OBJECTIVOS.....	5
1.3 ESTRUTURA.....	5
1.4 CONTRIBUIÇÕES.....	5
2 ESTADO DA ARTE.....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 MOTIVAÇÃO PARA PASSIVE OPTICAL NETWORKS (PON).....	7
2.3 GIGABIT PASSIVE OPTICAL NETWORKS (G-PON).....	8
2.3.1 <i>História do grupo ITU</i>	8
2.3.2 <i>Arquitectura da rede Óptica de Acesso</i>	9
2.3.3 <i>Requisitos da rede óptica</i>	13
2.3.4 <i>Transmissão G-PON</i>	14
2.3.5 <i>Resumo das características do G-PON</i>	18
2.4 GIGABIT ETHERNET PASSIVE OPTICAL NETWORKS (G-EPON).....	19
2.4.1 <i>História do grupo IEEE</i>	19
2.4.2 <i>Arquitectura da rede Óptica de Acesso</i>	20
2.5 10 GIGABIT ETHERNET PASSIVE OPTICAL NETWORKS (10G-EPON):.....	23
2.5.1 <i>Arquitectura da rede Óptica de Acesso</i>	23
2.5.2 <i>Comparação das características do G-EPON e do 10G-EPON</i>	24
2.6 NG-PON.....	26
2.6.1 <i>História do Grupo FSAN</i>	27
2.6.2 <i>Evolução do Gigabit PON para NG-PON</i>	27
2.6.3 <i>Cenários de Migração</i>	27
2.6.3.1 <i>Service-Oriented</i>	27
2.6.3.2 <i>Service-independent</i>	28
2.6.4 <i>NG-PON Roadmap</i>	28
2.6.4.1 <i>Tecnologias de NG-PON1</i>	29
2.6.4.2 <i>Tecnologias de NG-PON2</i>	29
2.7 10 GIGABIT CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORK (XG-PON).....	30
2.7.1 <i>Arquitectura da rede óptica de acesso</i>	30
2.7.2 <i>Cenários de Migração</i>	33
2.7.3 <i>Requisitos de Serviços</i>	35
2.7.4 <i>Requisitos da Camada Física</i>	36
2.7.5 <i>Requisitos de Sistema</i>	37
2.7.6 <i>Requisitos Operacionais</i>	38
2.7.7 <i>Requisitos da Rede óptica</i>	39
2.8 COMPARAÇÃO ENTRE O G-PON, O G-EPON E O XG-PON.....	40

3	REQUISITOS E CONTRIBUIÇÕES PARA NG-PON2.....	41
3.1	PROBLEMAS DAS REDES DE ACESSO ACTUAIS.....	41
3.2	REQUISITOS PARA NG-PON2.....	43
3.3	CONTRIBUIÇÕES DE PROJECTOS PARA REQUISITOS DE NG-PON2.....	45
3.3.1	<i>Photonic Integrated Extended Metro and Access Network (PIEMAN)</i>	46
3.3.1.1	Arquitectura de Sistema.....	46
3.3.1.2	Design do Túnel ONU.....	49
3.3.1.3	ONU Reflective.....	51
3.3.1.4	Utilizando R-ONUs em arquitecturas existem duas contribuições de RB.....	52
3.3.1.5	Conclusão.....	52
3.3.2	<i>Scalable Advanced Ring-based passive Dense Access Network Architecture (SARDANA)</i>	53
3.3.2.1	Abordagem Técnica.....	54
3.3.2.2	Arquitectura.....	55
3.3.2.3	Benefícios do SARDANA.....	56
3.3.2.4	Conclusões SARDANA.....	57
3.3.3	<i>A Converged Copper-Optical-Radio OFDMA-based access Network with high Capacity and Flexibility (ACCORDANCE)</i>	58
3.3.3.1	Arquitectura.....	58
3.3.3.2	Aspectos da camada física.....	60
3.3.3.3	CONCLUSÕES.....	61
3.3.4	<i>Generalized Architecture for Dynamic Infrastructure Services (GEYSERS)</i>	61
3.3.4.1	Arquitectura.....	62
3.3.4.2	Conclusão.....	63
3.3.5	<i>Metro Architectures enablINg Subwavelengths (MAINS)</i>	63
3.3.5.1	Conclusões.....	64
3.3.6	<i>Optical Access Seamless Evolution (OASE)</i>	64
3.3.6.1	Conclusão.....	64
3.3.7	Resumo.....	64
4	TECNOLOGIAS PARA NG-PON2.....	66
4.1	INTRODUÇÃO.....	66
4.2	IM-WDM- PONS.....	66
4.2.1	<i>CWDM-PON: 4 x 10 Gb/s</i>	70
4.3	OCDMA-PON.....	72
4.3.1	<i>Arquitectura OCDMA</i>	72
4.3.2	<i>10 Gbps sistema OCDMA-PON com colorless e sourceless ONUs</i>	73
4.4	OFDM -PON.....	76
4.4.1	<i>Sistema óptico OFDM</i>	77
4.4.2	<i>108 Gb/s OFDMA-PON</i>	78
4.4.3	<i>Abordagem híbrida WDM-OFDM</i>	83
4.5	COHERENT – PON.....	87
4.5.1	<i>Coerente WDM-PON baseado na detecção heteródina</i>	88
4.5.2	<i>WDM PON empregando auto-deteccção homódina</i>	91
4.5.3	<i>UD-WDM PONs</i>	94
4.6	VANTAGENS / DESVANTAGENS DE CADA TECNOLOGIA APRESENTADA.....	96
4.6.1	<i>IM-WDM</i>	96
4.6.2	<i>OCDMA</i>	97
4.6.3	<i>OFDM</i>	97
4.6.4	<i>Coerente</i>	98
4.7	PROPOSTA DE TECNOLOGIA PARA NG-PON2.....	99
5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	102
6	REFERÊNCIAS.....	104

Lista de Figuras

FIGURA 1.1: SERVIÇOS EXISTENTES E AS FUTURAS NECESSIDADES DE LARGURA DE BANDA. [FTTH, 2010].....	1
FIGURA 1.2: NÚMEROS DE CLIENTES DE BANDA LARGA NA COMUNIDADE EUROPEIA [SIEMENS].....	2
FIGURA 1.3: EVOLUÇÃO PROVISÓRIA PON [ANALYSYS MASON, 2010].....	3
FIGURA 1.4: TENDÊNCIA FTTH PARA ACOMPANHAR A EVOLUÇÃO ÉTHERNET [MITSUBISHI ELECTRIC, 2010].....	3
FIGURA 1.5: EVOLUÇÃO DOS SERVIÇOS EM RELAÇÃO À LARGURA DE BANDA PREVISTA [ANALYSYS MASON, 2010].....	4
FIGURA 2.1: ARQUITECTURA PON [ANALYSYS MASON, 2010].	8
FIGURA 2.2 ARQUITECTURA DA REDE G-PON [ITU G-PON, 2008].....	10
FIGURA 2.3: TÍPICA ARQUITECTURA G-PON [ITU G-PON, 2008].	11
FIGURA 2.4 ARQUITECTURA DE REDE FÍSICA G-PON [TUTORIAL, 2008].	11
FIGURA 2.5: ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA [GPON, 2007].	14
FIGURA 2.6: GTC LAYER FRAMING [ITU G-PON, 2008].....	15
FIGURA 2.7: MAPEAMENTO T-CONT [ITU G-PON, 2008].....	16
FIGURA 2.8: ARQUITECTURA DE MULTIPLEXAÇÃO DOWNSTREAM [ITU G-PON, 2008].....	17
FIGURA 2.9: ARQUITECTURA DE MULTIPLEXAÇÃO UPSTREAM [ITU G-PON, 2008].....	18
FIGURA 2.10: DESENVOLVIMENTO DE G-PON E E-PON NO MUNDO.....	19
FIGURA 2.11: ARQUITECTURA DA REDE G-EPON [G-EPON, 2009].....	21
FIGURA 2.12: MODELO DE CABO DE FIBRA ÓPTICA [IEEE 10G-EPON, 2009].	22
FIGURA 2.13: ALOCAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA PARA G-EPON E 10G-EPON [G-EPON, 2009].	25
FIGURA 2.14: COEXISTÊNCIA ENTRE G-EPON E 10G-EPON [G-EPON, 2009].	25
FIGURA 2.15: REPRESENTAÇÃO DO ROADMAP PARA NG-PON1 E NG-PON2 [NG-PON PART I, 2009].	29
FIGURA 2.16: ARQUITECTURA DA REDE XG-PON [ITU XG-PON, 2010].	30
FIGURA 2.17: RESUMO DE ALGUNS CENÁRIOS DE XG-PON [ITU XG-PON, 2010].	32
FIGURA 2.18: ALOCAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA [ITU XG-PON, 2010].	33
FIGURA 2.19: EXEMPLO DE MIGRAÇÃO DE G-PON PARA XG-PON1 [NG-PON FSAN, 2009].	34
FIGURA 2.20: IMPLEMENTAÇÃO GENÉRICA DE G-PON [ITU XG-PON, 2010].....	36
FIGURA 2.21: OPÇÕES DE DIVISORES PARA A ARQUITECTURA XG-PON [ITU XG-PON, 2010].	37
FIGURA 3.1: VISTA DE ALTO-NÍVEL DA ARQUITECTURA ALVO DO PIEMAN [PIEMAN, NOC].	47
FIGURA 3.2: PIEMAN LOCAL EXCHANGE NODE AMPLIFIER PLACING FOR THE DOWNSTREAM DIRECTION [PIEMAN, NOC].	47
FIGURA 3.3: LOCAL PARA A COLOCAÇÃO DO NÓ DE TROCA DE AMPLIFICADOR NO PIEMAN PARA A DIRECÇÃO UPSTREAM [PIEMAN, NOC].	48
FIGURA 3.4: PLANO DE COMPRIMENTO DE ONDA [PIEMAN, NOC].	49
FIGURA 3.5: COMPARAÇÃO DOS CUSTOS AJUSTÁVEIS DAS TECNOLOGIAS DOS TRANSMISSORES [PIEMAN, 2006].....	50
FIGURA 3.6: DESENHO ESQUEMÁTICO DO R-ONU [PIEMAN, 2006].	51
FIGURA 3.7: ESQUEMA DE ARQUITECTURAS COM R-ONU USANDO UM ALARGAMENTO TEMPORAL PM E MOSTRANDO COMPONENTES CB E SB RAYLEIGH [PIEMAN, 2006].	52
FIGURA 3.8 EQUIPAMENTO DO SARDANA [SARDANA, 2008].....	54
FIGURA 3.9: ARQUITECTURA DO PROJECTO SARDANA. [SARDANA].....	55
FIGURA 3.10: ARQUITECTURA DO PROJECTO ACCORDANCE. [ACCORDANCE_2,2010].....	59

FIGURA 4.1: SISTEMA WDM [WDM, 2010].	67
FIGURA 4.2: DISPOSITIVO AWG [WDM, 2010].	68
FIGURA 4.3: 20 NM DE GRADE DE CWDM [WDM, 2010].	69
FIGURA 4.4: MONTAGEM EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA PON HÍBRIDO COM 40 Gb/s DE CAPACIDADE EM AMBAS AS DIRECÇÕES [CWDM, 2009].	70
FIGURA 4.5: PERFORMANCE DA TAXA DE ERRO DE BITS (BER) QUANDO SE UTILIZA OS OITO COMPRIMENTOS DE ONDA. (OS SÍMBOLOS ESCUROS E ABERTOS REPRESENTAM A LINHA BASE BACK-TO-BACK DO RECEPTOR COMERCIAL APD E DOS DADOS DE CANAL ÚNICO CORRESPONDENTES AO LONGO DO SISTEMA DE 20 KM) [CWDM, 2009].	71
FIGURA 4.6: ARQUITECTURA BASE NxN OCDMA [OCDMA, 2005].	72
FIGURA 4.7: ESQUEMA EXPERIMENTAL DO SISTEMA OCDMA [OCDMA, 2009].	73
FIGURA 4.9: DOWN-LINK [OCDMA, 2009].	75
FIGURA 4.10: UP-LINK [OCDMA, 2009].	75
FIGURA 4.11: EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO DE 3 SUB-PORTADORAS UTILIZANDO OFDM [OFDM].	76
FIGURA 4.13: ARQUITECTURA OFDMA-PON PARA SERVIÇOS HETEROGÉNEOS [OFDM, 2010].	79
FIGURA 4.14: SETUP EXPERIMENTAL DOS 40Gb/s MIMO-OFDMA-PON E ESPECTROS RELEVANTES DO SINAL [OFDM, 2010].	80
FIGURA 4.15 SETUP EXPERIMENTAL DOS 108Gb/s MIMO-OFDMA-PON E ESPECTROS RELEVANTES DO SINAL. [OFDM, 2010].	81
FIGURA 4.16: RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE BER PARA 40 Gb/s E 108 Gb/s MIMO-OFDMA-PON [OFDM, 2010].	82
FIGURA 4.17: ARQUITECTURA PROPOSTA PARA WDM-OFDM-POM [WDM_OFDM, 2010].	84
FIGURA 4.19: CURVA BER E RESPECTIVO DIAGRAMA DE OLHO PARA SINAL DOWNSTREAM COM OU SEM TRANSMISSÃO DO SINAL POLSK. [WDM_OFDM, 2010].	86
FIGURA 4.20: CURVA BER E RESPECTIVO DIAGRAMA DE OLHO PARA SINAL UPSTREAM [WDM_OFDM, 2010].	87
FIGURA 4.21: ARQUITECTURA DO SISTEMA WDM-PON COM DETECÇÃO COERENTE [COHERENT WDM, 2009].	89
FIGURA 4.22: CURVA BER [COHERENT WDM, 2009].	90
FIGURA 4.23: DIAGRAMAS DE OLHO. A) DESMODULAÇÃO ANALÓGICA. B) DESMODULAÇÃO DIGITAL [COHERENT WDM, 2009].	90
FIGURA 4.24: DIAGRAMA DA PROPOSTA WDM-PON UTILIZANDO O RECEPTOR AUTO-HOMÓDINO [RSOA WDM-PON, 2009].	92
FIGURA 4.26: CURVAS BER EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE TRANSMISSÃO [RSOA WDM-PON, 2009].	93
FIGURA 4.27: ARQUITECTURA UD-WDM COM DETECÇÃO HETERODYNE [UD-WDM, 2009].	95
FIGURA 4.28: MÓDULO DA ONU [UD-WDM, 2009].	95

Lista de Tabelas

TABELA 2.1: SERVIÇOS OFERECIDOS PELAS VÁRIAS ARQUITECTURAS DE G-PON.	10
TABELA 2.2: G-PON VELOCIDADE BINÁRIA NOMINAL.	13
TABELA 2.3: TIPOS DE PMD.....	22
TABELA 2.4.	22
TABELA 2.5.	23
TABELA 2.6.	23
TABELA 2.7: G-EPON VERSUS 10G-EPON.....	26
TABELA 2.8: SERVIÇOS OFERECIDOS PELAS VÁRIAS ARQUITECTURAS DE XG-PON.	31
TABELA 2.9: EXEMPLO DE SERVIÇOS DE NG-PON1.	35
TABELA 2.10:TABELA COMPARATIVO DAS VÁRIAS TECNOLOGIAS ABORDADAS NO CAPÍTULO.	40
TABELA 3.1: TABELA COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES COM NG-PON2 (ND-NÃO DESCRITO).	45
TABELA 3.2: RESUMO DA CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS PROJECTOS PARA OS REQUISITOS GENÉRICOS DA PRÓXIMA GERAÇÃO DE REDES (ND-NÃO DESCRITO).	65
TABELA 3.3: RESUMO DA CONTRIBUIÇÃO DOS VÁRIOS PROJECTOS PARA OS REQUISITOS DE NG-PON2 (ND- NÃO DESCRITO).	65
TABELA 4.1: ENQUADRAMENTO DOS REQUISITOS PARA NG-PON 2 COM AS PROPOSTAS DE TECNOLOGIAS RELEVANTES(ND-NÃO DESCRITO).....	99
TABELA 4.2: ENQUADRAMENTO DAS TECNOLOGIAS PROPOSTAS PARA NG-PON 2 COM AS CAPACIDADES ESTUDADAS ACTUALMENTE NUMA PERSPECTIVA PARA O FUTURO.	99

Acrónimos

#		
	1G-EPON	<i>1Gb/s Ethernet Passive Optical Network</i> (Rede Óptica Passiva <i>Ethernet</i> 1Gb/s)
	10G-EPON	<i>10Gb/s Ethernet Passive Optical Network</i> (Rede Óptica Passiva <i>Ethernet</i> 10Gb/s)
	3DTV	<i>3D Television</i> (Televisão 3D)
A		
	ACCORDANCE	<i>A Converged Copper-Optical-Radio OFDMA-based Access Network with high Capacity and flexibility</i>
	ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
	AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> (Standard de Encriptação Avançada)
	AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
	Alloc-ID	<i>Allocation Identifier</i> (Identificador de Alocação)
	APD	<i>Avalanche Photodiode</i> (Foto-Díodo Avalanche)
	ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
	ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> (Modo de Transferência Assíncrono)
	AWG	<i>Array Waveguide Gratings</i>
B		
	BER	<i>Bit error rate</i> (Rácio de Erro de bit)
	BPF	<i>Band-Pass Filter</i> (Filtro Passa-Banda)
	BS	<i>Base Station</i> (Estação Base)
C		
	CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
	CATV	<i>Cable Television</i> (Televisão por Cabo)
	CDR	(detector)
	CO	<i>Central Office</i>
	CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
D		
	DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i> (Conversor Digital-Analógico)
	DBA	<i>Dynamic bandwidth assignment</i> (Atribuição Dinâmica de Largura de Banda)
	DBR	(Laser)
	DESMUX	<i>Desmultiplexer</i>
	DFB	<i>Distributed feedback laser</i>

DKPS	(Detector)
DoF	<i>Digital Over Fiber</i> (Digital sobre Fibra)
DMT	<i>Discrete Multitone Modulation</i>
DSB	(Duplo da forma de Banda lateral)
DSCA	<i>Dynamic Sub-Carrier Attribution</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DSLAM	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i> (Multiplexador de Acesso à Linha Digital do Assistente)
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador de Sinal Digital)
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> (multiplexação por divisão do comprimento de onda denso)

E

EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
E/O	<i>Optical/Electrical</i> (Óptico/Eléctrico)
EPON	<i>Ethernet Passive optical network</i>

F

FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FDM	<i>Frequency Divison Multiplex</i> (Multiplexador de Divisão de Frequência)
FSAN	<i>Full Service Access Network</i> (Rede de Acesso de Serviço Completo)
FTTB	<i>Fiber to the Building</i>
FTTC	<i>Fiber to the Cub</i>
FTTCab	<i>Fiber to the Cabinet</i>
FTTCell	<i>Fibre to the Cell site base stations</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i> (Fibra até Casa)
FTTP	<i>Fiber to the Premises</i>

G

GEM	<i>G-PON Encapsulation Method</i> (Método de Encapsulamento de G-PON)
GEYSERS	<i>Generalized Architecture for Dynamic Infrastructure Services</i> (Arquitetura Generalizada para Infra-estruturas de Serviços Dinâmicas)
G-PON	<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i> (ITU-T G.984 Series)
G-EPON	<i>Gigabit Ethernet Passive Optical Network</i>
GTC	<i>G-PON Transmission Convergence</i> (Convergência de Transmissão G-PON)

H

HDTV	<i>High-Definition TV (Tv de Alta Definição)</i>
HPF	<i>High-Pass Filter (Filtro Passa-Alto)</i>

I

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEEE-SA	<i>Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association</i>
IF	<i>Intermediary Frequency (Frequência Intermédia)</i>
IM	<i>Intensity Modulator (Modulador de Intensidade)</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol TV</i>
IQ	<i>(Modulador)</i>
IRE	<i>Institute of Radio Engineers</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network (Rede Digital de Serviços Integrados)</i>
IT	<i>Information Technology (Tecnologias de Informação)</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-T	<i>Telecommunication Standardization Sector</i>

L

LLC	<i>Logical Link Control (Controlo de Enlace Lógico)</i>
LO	<i>Local Oscillator (Oscilador Local)</i>
LO-LD	<i>Local Oscillator Laser Diode (Díodo laser oscilador local)</i>

M

MAC	<i>Medium Access Control (Control de Acesso ao Meio)</i>
MAINS	<i>Metro Architecture Enabling Sub-wavelength</i>
MDI	<i>Medium Dependent Interface</i>
MDU	<i>Multi-dwelling Unit</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MSk	<i>Minimum-shift keying</i>
MUSE	<i>Multi-Service Access Everywhere</i>
MUX	<i>Multiplexer</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder</i>

N

NGA	<i>Next Generation Access</i>
NGN	<i>Next Generation Network</i>
NGOA	<i>Next Generation Optical Access</i>
NG-PON	<i>Next Generation Passive Optical Network</i>
NG-PON1	Definido neste documento
NG-PON2	Definido neste documento

O

NRZ	<i>Non-Return-to-Zero</i> (Não Retorno a Zero)
OAN	<i>Optical Access Network</i> (Rede de Acesso Óptico)
OASE	<i>Optical Access Seamless Evolution</i>
OCDMA	<i>Optical Code Division Multiple Access</i>
ODN	<i>Optical Distribution Network</i> (Rede de Distribuição Óptica)
OEO	<i>Optical to Electronic to Optical</i> (Óptico para Eléctrico para Óptico)
OF	<i>Optical Filter</i> (Filtro Óptico)
OFDM	<i>Orthogonal frequency Division Multiple</i> (Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais)
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OLT	<i>Optical Line Termination</i> (Terminação de Linha Óptica)
OMCI	<i>Optical Network Unit Management and Control Interface</i> (Interface de Controlo e Gestão da ONU)
ONT	<i>Optical Network Termination</i> (Terminação da Rede Óptica)
ONU	<i>Optical Network Unit</i> (Unidade de Rede Óptica)
OOK	<i>On-off keying</i>
OPEX	Operational Expenditure
OSNR	<i>Optical signal noise ratio</i>

P

P2MP	<i>Peer to Multi-Peer</i> (Conexão Ponto-Multiponto)
P2P	<i>Peer-to-Peer</i> (Conexão Ponto a Ponto)
PCBd	<i>Physical Control Block downstream</i> (Bloco de Controlo Físico <i>downstream</i>)
PHY	<i>Physical Layer</i> (Camada Física)
PIEMAN	<i>Photonic Integrated Extended Metro and Access Network</i>
PIN	<i>Photodiode Without Internal Avalanche</i>
PLOu	<i>Physical Layer Overhead Upstream</i>
PM	<i>Phase Modulator</i> (Modulador de Fase)
PMD	Physical Medium Dependent
POLMUX-DD	Polarization Detection with Direct Detection (Técnica de Multiplexação de Polarização com Detecção Directa)
PON	<i>Passive Optical Network</i> (Rede Óptica Passiva)
Port-ID	<i>Port identifier</i> (Identificador do Porto)
POTS	<i>Plain Old Telephone Service</i> (Serviço Telefónico Tradicional)
Px10	Class G-EPON
Px20	Class G-EPON

Q

QAM	<i>Quadrature-Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service (Qualidade de Serviço)</i>

R

RB	<i>Raylling Back-Scattering</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RN	<i>Remote Node (Nó Remoto)</i>
RoF	<i>Radio-over-Fiber (Rádio sobre Fibra)</i>
R-ONU	<i>Reflected ONU (ONU Refletido)</i>
RSOA	<i>Reflective Semiconductor Optical Amplifier</i>
Rx	<i>Receiver (Receptor)</i>

S

SARDANA	<i>Scalable Advanced Ring-based Passive Dense Access Network Architecture</i>
SOA	<i>Semiconductor optical amplifier</i>

T

TC	<i>Transmission Convergence</i>
T-CONT	<i>Transmission Container</i>
TDM	<i>Time division multiplexing (Multiplexação por Divisão de Tempo)</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo)</i>

U

UDWDM	<i>Ultra Dense Wavelength Divison Multiplexing Passive Optical Network</i>
UNI	<i>User Network Interface</i>

V

VoIP	<i>Voice over IP (Voz sobre IP)</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>

W

WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing (Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda)</i>
-----	--

X

xDSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
XG-PON	<i>10 Gigabit Capable Passive Optical, G.987 series</i>

1 Introdução

Um dos temas mais discutidos entre os actores nas telecomunicações é a nova geração de redes (NGN, *Next Generation Network*) de aplicações multimédia. Pretende-se concretizar um sonho antigo de uma plataforma de transporte comum para vídeo, voz e dados. As NGN permitirão muitas das aplicações já existentes e proverão uma maior largura de banda capaz de abrir novos horizontes a nível dos serviços.

1.1 Motivação

Com a necessidade crescente dos consumidores disporem de uma crescente largura de banda em virtude dos serviços serem cada vez mais avançados e agregadores de funcionalidades como se pode observar na figura 1.1, os operadores de telecomunicações bem como os governos estão a investir grandemente na implementação de redes de fibra óptica.

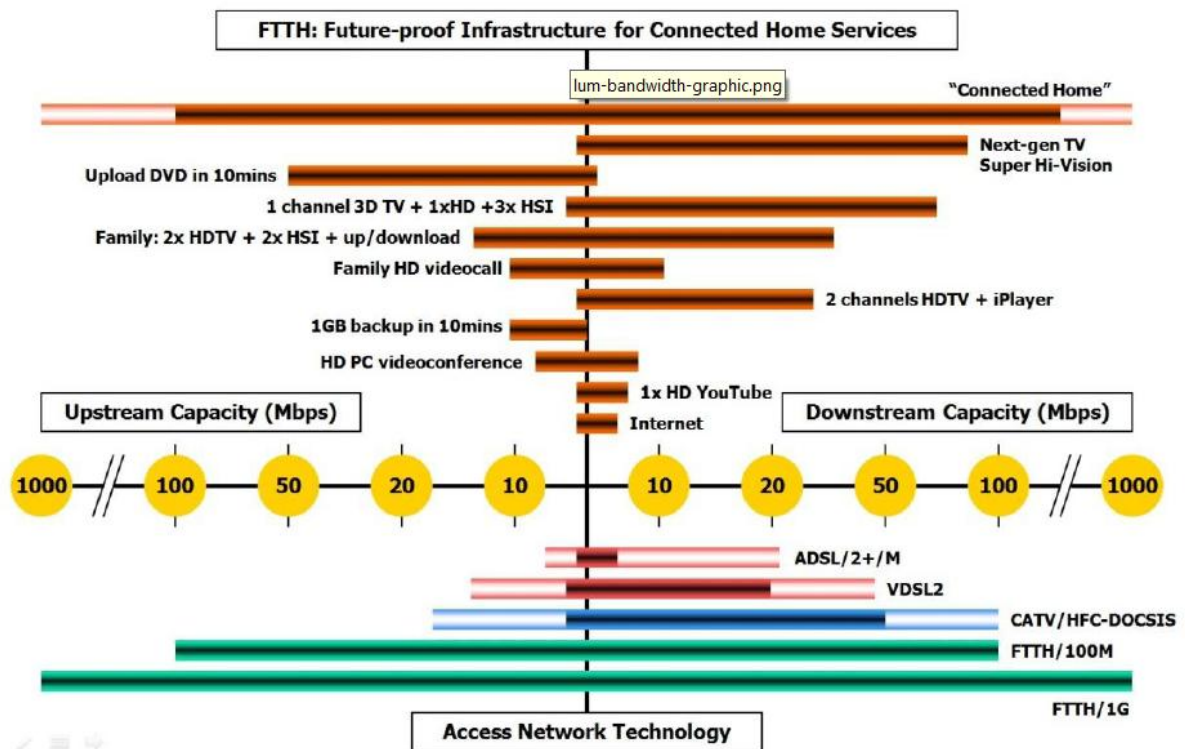


Figura 1.1: Serviços existentes e as futuras necessidades de largura de banda. [FTTH, 2010].

A título de exemplo, na Europa, a figura 1.2 ilustra tendências de evolução e crescimento na percentagem de pessoas que aderem aos serviços de banda larga. Esta

tendência crescente é o suporte para o desenvolvimento e implementação de novas redes e paradigmas.

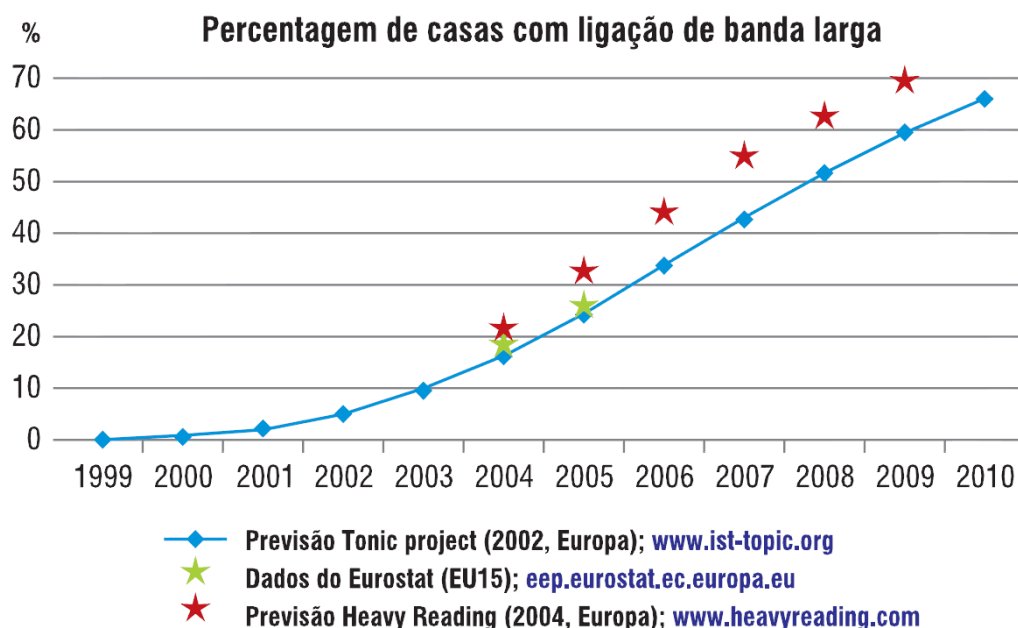


Figura 1.2: Números de clientes de banda larga na comunidade europeia [Siemens].

Hoje em dia ao implementar as novas redes de fibra óptica, com tecnologias como XG-PON e 10GE-PON, é comum pensar-se que estas poderão fornecer capacidades ilimitadas, mas porém, e na realidade, os aspectos práticos de implementação, as opções arquiteturais e as limitações de desempenho de equipamentos de rede pode levar a uma capacidade limitada. Sendo assim é preciso continuar o processo de evolução nas infra-estruturas e tecnologias que levem a superar estas limitações. Para que isso seja possível será aqui apresentado um estudo que pretende indicar possíveis caminhos para a próxima geração de redes em termos das melhores opções para combater as limitações das arquitecturas actuais.

Cada tecnologia FTTH tem vantagens e desvantagens. A decisão de escolher uma determinada tecnologia depende muito das condições do mercado, da rede de infra-estrutura existente, do alcance, do tipo de serviço a ser prestado (simétrico ou assimétrico) e do potencial de evolução que poderá ter para satisfazer futuras redes de acesso. Nas figuras 1.3 e 1.4 observa-se as tendências provisórias da evolução da PON e da Ethernet para os próximos anos [Analysys Mason, 2010].

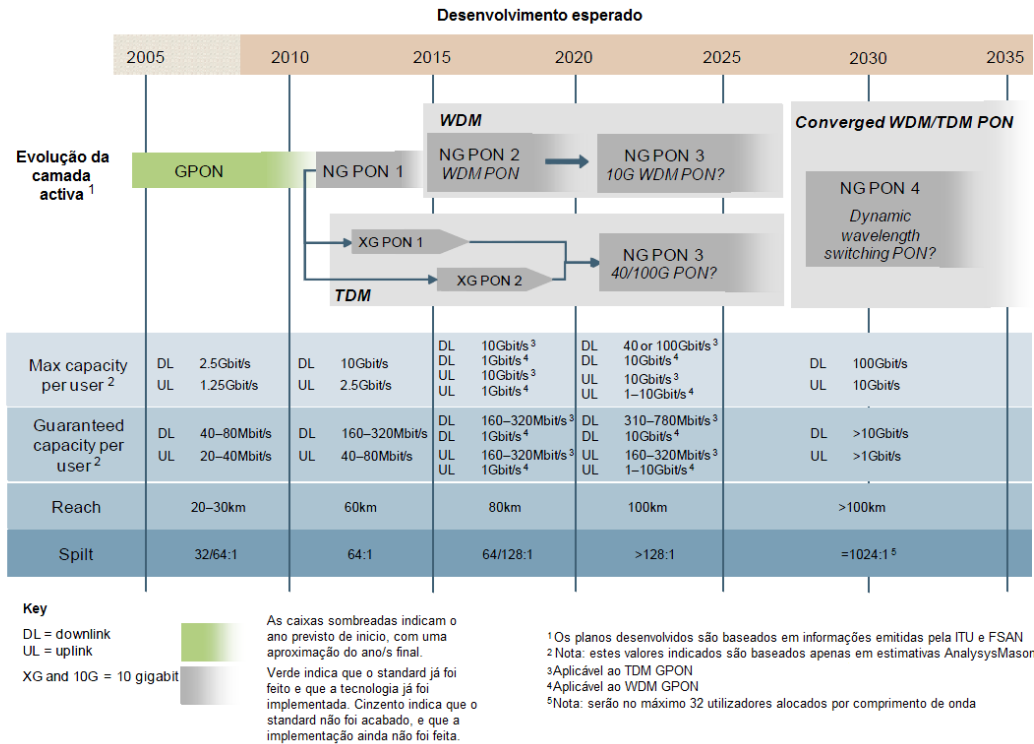


Figura 1.3: Evolução provisória PON [Analysis Mason, 2010].

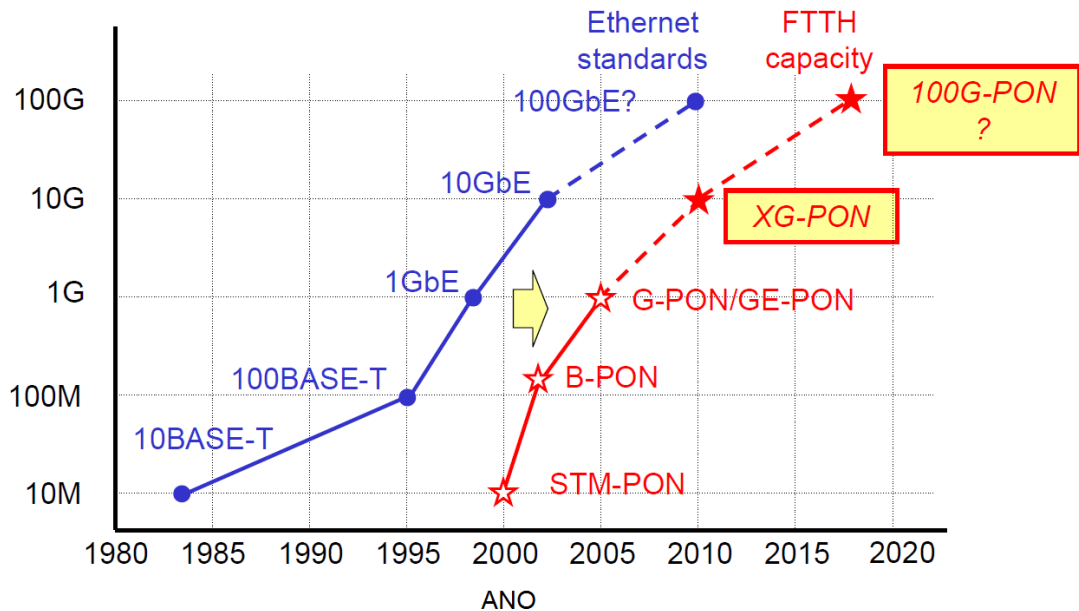


Figura 1.4: Tendência FTTH para acompanhar a evolução Ethernet [MITSUBISHI ELECTRIC, 2010].

1.1.1 Evolução de serviços

Nos últimos anos, as redes de acesso têm sofrido um crescimento na oferta de serviços, tanto para *upstream* como para *downstream*. Esses serviços são o IPTV (*downstream*) e as redes sociais e *websites* de conteúdos *user-generated* (*upstream*).

O IPTV exige grande largura de banda devido aos diversos formatos cada vez com mais qualidade eg. Alta definição (HDTV). Com o decorrer dos anos a evolução do IPTV será afectada pelos *codecs* de vídeo para suportar HDTV, HDTV ultra e 3DTV, que exigem largura de banda que não pode ser fornecida pelas tradicionais redes de acesso.

Os conteúdos das redes sociais criados pelos utilizadores têm vindo a exigir cada vez mais largura de banda, mas estes no sentido *upstream*. *Websites* tais como o *Facebook* e o *Youtube* incentivaram a partilha de dados pelos usuários, tais como fotografias e vídeos. Além destes serviços, *web browsing*, *e-mail* e as chamadas VoIP também requerem largura de banda. Na figura 1.5 ilustram-se os requisitos de largura de banda para os diferentes serviços.

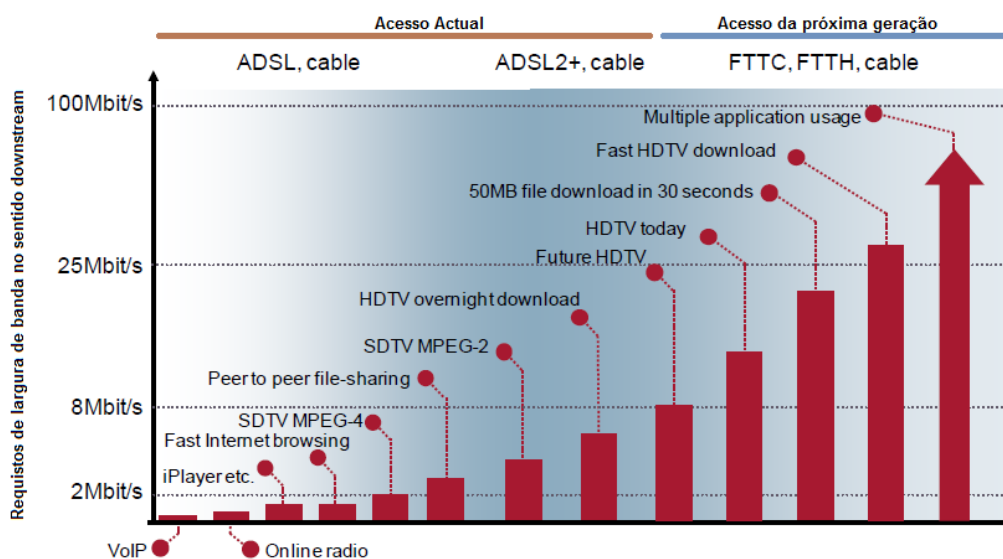


Figura 1.5: Evolução dos serviços em relação à largura de banda prevista [Analysys Mason, 2010].

Actualmente estão em desenvolvimento mais aplicações altamente dependentes de largura de banda, por exemplo a tele-presença, e como consequência disso, uma maior largura de banda disponível é um requisito mínimo para a próxima geração de redes [Analysys Mason, 2010].

1.2 Objectivos

O objectivo principal deste estudo é informar sobre as tecnologias actuais e emergentes para as redes de acesso de fibra óptica e estimar, com base nas tendências observadas, as tecnologias que satisfazem as capacidades futuras de NG-PON2.

Ainda, fazer um estudo alargado das redes de acesso como G-PON, G-EPON, 10G-EPON e NG-PON1 enquadrando-as com as possíveis tendências para NG-PON2.

Compreender os principais aspectos da rede, os princípios e objectivos dos projectos PIEMAN, SARDANA, ACCORDANCE, GEYSERS, MAINS e OASE, de modo a retirar as possíveis contribuições destes projectos para os requisitos de redes NG-PON2.

Além disso, propor as tecnologias que melhor satisfazem as necessidades de NG-PON2.

1.3 Estrutura

Esta dissertação apresenta num primeiro capítulo a evolução e as tendências do mercado actual, de modo a contribuir para as tecnologias e requisitos de NG-PON2.

Como segundo capítulo, expõem-se as várias arquitecturas de redes disponíveis actualmente, e as que se pretendem implementar num futuro muito próximo, culminando num resumo comparativo de cada.

O terceiro capítulo vem enunciar os requisitos para NG-PON2 e enquadrá-los com os vários projectos de investigação que estão a decorrer, de maneira a antever no que estes poderão vir a contribuir para os requisitos de NG-PON2. Os projectos analisados são o PIEMAN, o SARDANA, o ACORDANCE, o GEYSERS, o MAINS e o OASE. Também é feita uma comparação de NG-PON2 com as redes de acesso anteriores.

O capítulo quarto ilustra uma série de tecnologias que são as grandes candidatas para NG-PON2. Para cada uma são propostas várias arquitecturas e apresentados alguns dos resultados da literatura. No final do capítulo, é feita uma comparação sumária de todas as tecnologias, analisando as que maiores aptências têm para NG-PON2.

Por fim, o último capítulo apresenta a conclusão deste trabalho e desenvolvimentos futuros que se poderão fazer.

1.4 Contribuições

Na opinião do autor, as principais contribuições deste trabalho podem ser agrupadas da forma que se segue:

- Compreender os principais aspectos das redes actuais e das que serão implementadas em poucos anos, como G-PON, GE-PON, XG-PON, etc;

- Compreender os principais aspectos e contribuições das arquitecturas de redes SARDANA, PIEMAN, ACCORDANCE, GEYSERS, MAINS e OASE para NG-PON2;
- Explicitar as características potenciais das tecnologias tais como IM-WDM, OCDMA, OFDM e detecção coerente,
- Realizar uma análise aprofundada de quais serão as melhores estratégias a serem seguidas para NG-PON2.

2 Estado da arte

2.1 Introdução

Neste primeiro capítulo são revistas as razões pelas quais uma arquitectura de redes passivas assume tão grande importância. Em seguida, são delimitados, com algum detalhe, as tecnologias utilizadas para implementar essas arquitecturas, como *Gigabit Passive Optical Networks (G-PON)*, *Gigabit Ethernet Passive Optical Networks (GE-PON)* implementadas hoje em dia e também os sistemas avançados PON que fornecem o caminho para a evolução de largura de banda cada vez mais elevada para as *Next Generation Passive Optical Networks (NG-PON)*, das quais é salientada a *10 Gigabit Capable Passive Optical Network (XG-PON)*. No fim do capítulo, será feita uma breve comparação entre as várias tecnologias abordadas anteriormente.

2.2 Motivação para *Passive Optical Networks (PON)*

Uma das decisões mais importantes em qualquer negócio envolve a compra de bens de equipamento. Os operadores querem minimizar os custos de implementação da rede de acesso ao maximizar as receitas provenientes da oferta de serviços. Assim, a decisão mais importante de um operador é feita quando adquire os equipamentos de rede se onde tenta um equilíbrio entre o custo e a largura de banda. A rede óptica passiva é apenas uma de várias tecnologias de acesso utilizada pelos fornecedores de serviços, mas apresenta uma posição dominante no mercado de redes de acesso.

Na PON, os sinais são replicados passivamente pelo divisor. Nestas redes de acesso, a sua planificação envolve gastos de capitais mais baixos do que nas redes de cobre, uma vez que não tem componentes eléctricos no plano de rede. Por outro lado, reduz também os gastos operacionais, já que não há necessidade de os operadores fornecerem a monitorização de energia eléctrica ou manter uma reserva de baterias [PON, 2007].

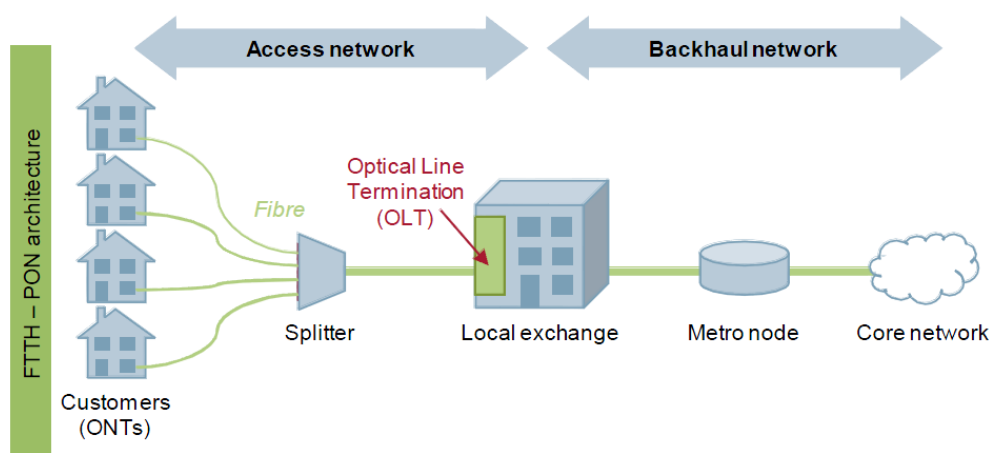


Figura 2.1: Arquitectura PON [Analysys Mason, 2010].

Desta forma, PON traz então duas grandes vantagens. A primeira é pelo facto de ser um sistema passivo, não havendo a necessidade de instalar e manter activos componentes na rede de distribuição de acesso. Assim, os operadores de rede podem reduzir substancialmente as suas necessidades de fornecimento energético fora da *central office* implementando uma PON em vez de um nó activo como um multiplexador de acesso à linha digital do assinante (*digital subscriber line access multiplexer, DSLAM*) ou de um *switch Ethernet*. Por outro lado, as PONs fornecem uma solução de rede de acesso melhor do que o cobre devido à maior fiabilidade da fibra óptica e divisores passivos. A outra grande vantagem corresponde à possível partilha de uma única interface óptica na linha de terminação óptica (OLT, *optical line termination*) entre vários clientes, ajudando a minimizar os requisitos de espaço na *central office*. Mais ainda, o custo da implementação de uma infra-estrutura de acesso óptico é inferior [Standards, 2006].

Pelas razões acima apresentadas, a PON é, de longe, a tecnologia de acesso mais implementada.

2.3 Gigabit Passive Optical Networks (G-PON)

2.3.1 História do grupo ITU

A União de Telecomunicações (UIT, em inglês *ITU, International Telecommunication Union*) é uma organização internacional dedicada a fazer *standards* e regular as ondas de rádio e telecomunicações internacionais [Wikipedia, G-PON].

Durante quase 145 anos, a ITU tem promovido a cooperação internacional na determinação de órbitas de satélites, coordenado a utilização global da partilha de

espectro rádio e trabalhado para melhorar as infra-estruturas das telecomunicações do mundo [ITU, G-PON].

As principais acções desta agência da Organização das Nações Unidas (ONU) com sede em Genebra (Suíça), incluem estabelecer a alocação de espectros de ondas de rádio e organizar arranjos de interconexões entre todos os países, permitindo ligações telefónicas internacionais. Além disso, pretende ainda ultrapassar os problemas impostos por alterações climáticas e questões a nível de segurança [Wikipedia, G-PON].

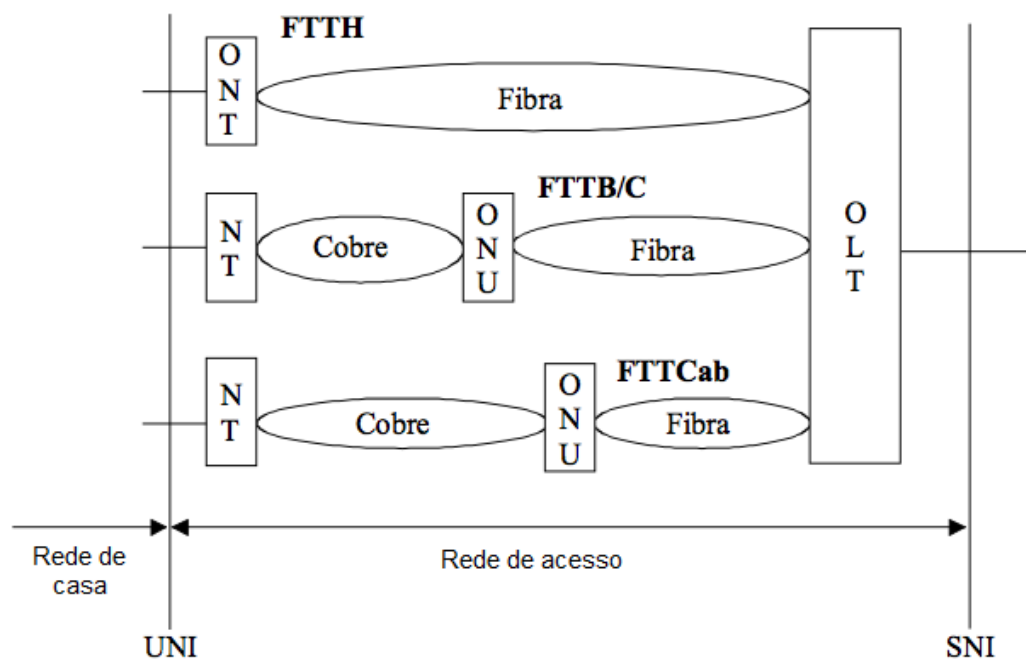
ITU está vocacionada para ligar o mundo da internet de banda larga até à mais recente geração de tecnologias sem fios, da navegação aeronáutica e marinha até rádio baseada em satélites, desde a convergência em telemóveis fixos, acesso à internet, dados, voz e *broadcast* de TV até às redes de próxima geração [ITU, G-PON].

Os padrões internacionais que são produzidos pela ITU são referidos como recomendações. Estes são definidos numa área da ITU denominada Sector de Normalização das Telecomunicações (*Telecommunication Standardization Sector, ITU-T*) [Wikipedia, G-PON]. O ITU-T cria recomendações que são empregadas como referência para o desenvolvimento de soluções tecnológicas envolvendo redes de telecomunicações, garantindo a utilização eficaz do espectro de radiofrequência.

O *Gigabit Passive Optical Network* (G-PON) é definido pela ITU-T numa série de recomendações G.984.x (sendo x=1,2,3,4,5,6) que definem as características gerais de G-PON, bem como as especificações da camada física, da camada de convergência de transmissão, especificação da *interface* de controlo e gestão da terminação da rede óptica (ONT, *Optical Network Termination*) [GPON, 2007].

2.3.2 Arquitectura da rede Óptica de Acesso

A secção óptica de um sistema de rede de acesso local pode ser activa ou passiva e a sua arquitectura pode ser ponto-a-ponto ou ponto-multiponto. A figura 2.2 mostra as arquitecturas disponíveis, que vão da fibra até casa (*fiber to the home, FTTH*), passando pela fibra até aos edifícios/*curb* (*fiber to the building/curb, FTTB/C*) e à fibra até ao gabinete (*fiber to the cabinet, FTTCab*). A rede de acesso óptico (*optical access network, OAN*) é comum em todas as arquitecturas apresentadas na figura 2.2. As diferenças entre as várias arquitecturas estão nos serviços que oferecem e nos custos económicos das suas implementações [ITU G-PON, 2008].



- ONU Unidade de rede óptica (*optical network unit*)
- ONT Terminação da rede óptica (*optical network termination*)
- OLT Terminação da linha óptica (*optical line termination*)
- NT Terminação da rede (*network termination*)

Figura 2.2 Arquitectura da rede G-PON [ITU G-PON, 2008].

	FTTH	FTTB		FTTC e FTTCab
		FTTB para MDU (<i>Multi-dwelling Unit</i>)	FTTB para empresas	
Serviços de banda larga assimétricos	Sim	Sim		Sim
Serviços de banda larga simétricos	Sim	Sim	Sim	Sim
POTS e ISDN	Sim	Sim	Sim	Sim
Linha Privada			Sim	
xDSL backhaul				Sim

Tabela 2.1: Serviços oferecidos pelas várias arquitecturas de G-PON.

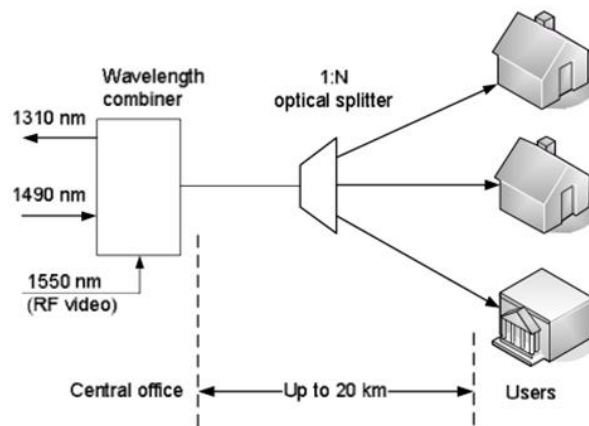


Figura 2.3: Típica arquitectura G-PON [ITU G-PON, 2008].

Começando na *central office* (CO), um único filamento de fibra óptica vai até um divisor de potência óptica (*optical power splitter*) próximo da localização dos utilizadores. Neste ponto, o divisor de separação divide a potência óptica em N caminhos separados. O número de separações, actualmente, pode variar de 2 a 64. O alcance físico desde a CO para cada utilizador pode ser até 20km [GPON, 2007].

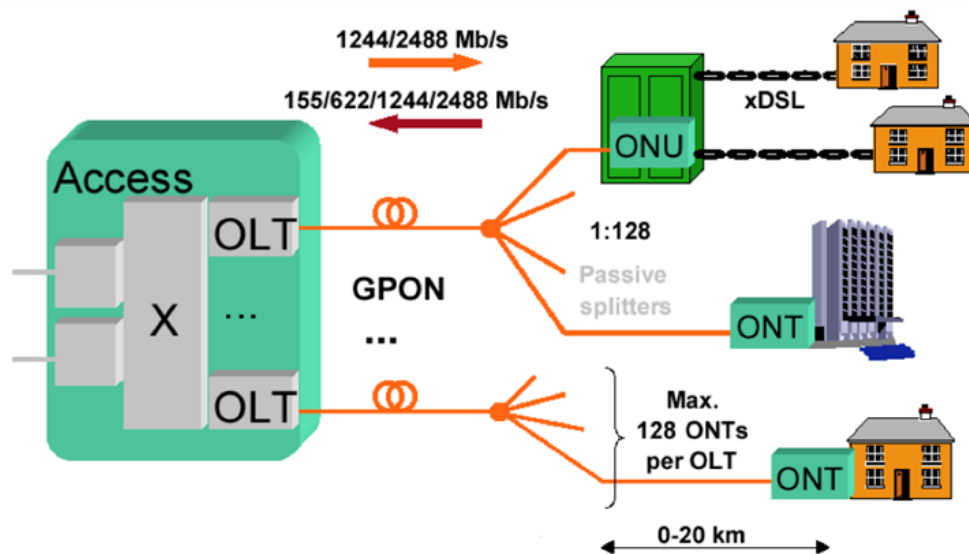


Figura 2.4 Arquitectura de rede física G-PON [Tutorial, 2008].

Velocidade Binária (Bit rate):

- 1.2 Gbit/s up, 2.4 Gbit/s down;
- 2.4 Gbit/s up, 2.4 Gbit/s down.

Alcance lógico (*Logical reach*) máximo: 60 km.

Alcance físico (*Physical reach*) máximo: 10 km e 20km.

Máxima distância de fibra diferencial (*Differential fibre distance*): 20km.

Atraso máximo da transferência de sinal (*Maximum signal transfer delay*): 1.5 ms.

Máxima relação de divisão (*split ratio*): actualmente 1:64, futuramente 1:128.

[ITU G-PON, 2008]

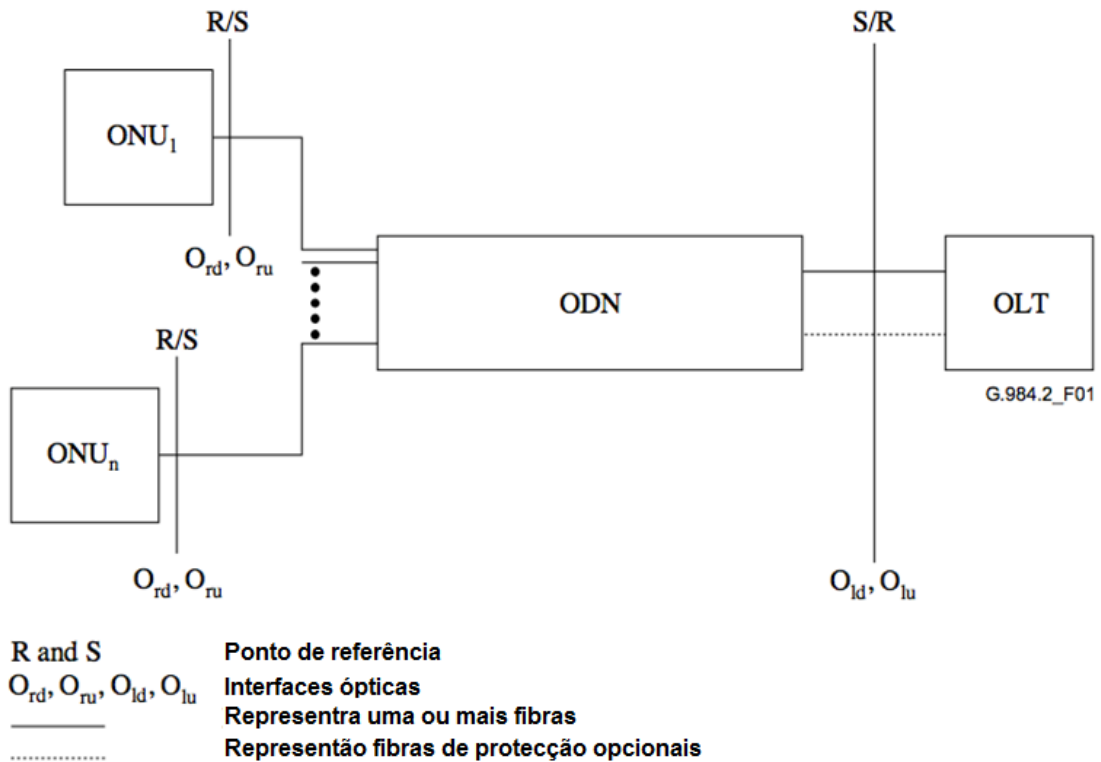


Figura 2.1: Configuração física genérica da rede de distribuição óptica [ITU G-PON, 2008].

Os sentidos de transmissão óptica na ODN definem-se do seguinte modo:

- *Downstream*: Os sinais são transmitidos do OLT até a(s) ONU;
- *Upstream*: Os sinais são transmitidos da(s) ONU até ao OLT.

2.3.3 Requisitos da rede óptica

Velocidade Binária (*Bit rate*)

A norma G-PON define uma série de diferentes de velocidades binárias do sinal:

Sentido da transmissão	Velocidade Binária Nominal
Sentido <i>Downstream</i>	1244.16 Mbit/s
	2488.32 Mbit/s
Sentido <i>Upstream</i>	155.52 Mbit/s
	622.08 Mbit/s
	1244.16 Mbit/s
	2488.32 Mbit/s

Tabela 2.2: G-PON velocidade binária nominal.

Método de transmissão

A transmissão bidireccional utiliza a técnica de multiplexagem por divisão do comprimento de onda (WDM, *wavelength division multiplexing*) numa única fibra ou transmissão unidireccional em duas fibras [ITU G-PON, 2008].

Código de linha

Downstream e *upstream*: código não retorno a zero (NRZ, *non return to zero*) [ITU G-PON, 2008].

Comprimento de onda de trabalho

A gama de funcionamento de comprimento de onda é de 1480-1500 nm para sistemas com uma fibra óptica e de 1260-1360 nm para sistemas com duas fibras ópticas no sentido *downstream*. Para o sentido *upstream*, a gama de trabalho é 1260 nm-1360 nm.

Além disso, os comprimentos de onda 1550-1560 nm podem ser utilizados para distribuição a jusante de vídeo RF [ITU G-PON, 2008].

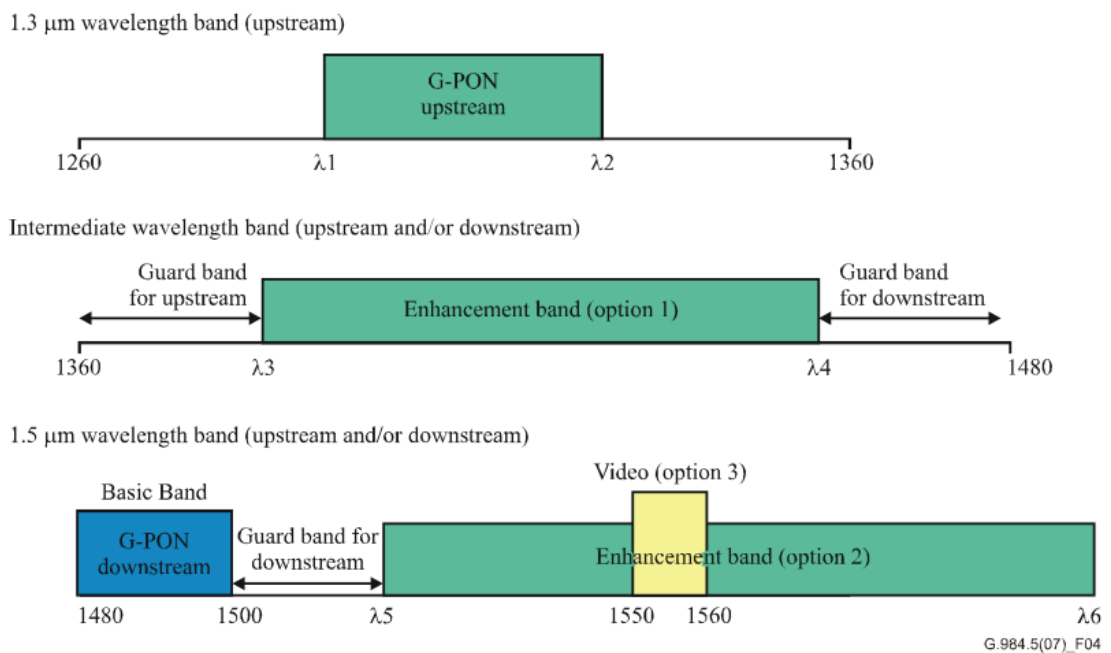


Figura 2.5: Alocação de comprimento de onda [GPON, 2007].

Correcção de erros

A correcção de erros no receptor (FEC, *forward error correction*) é uma técnica de processamento de sinal matemática que codifica os dados de tal forma que os erros possam ser detectados e corrigidos. Com FEC, a informação redundante é transmitida juntamente com a informação original. A quantidade de informação redundante é reduzida, pelo que o FEC não aumenta significativamente o *overhead*. O FEC resulta num aumento do *link budget* por aproximadamente 3/4 dBs, e por isso, maiores *bit rate* e distâncias desde o OLT até ao ONU podem ser suportadas, bem como um maior número de divisões por cada árvore PON [GPON, 2007].

2.3.4 Transmissão G-PON

Atribuição dinâmica de largura de banda

A atribuição dinâmica de largura de banda (DBA) é um processo pelo qual o OLT re-aloca as possibilidades de transmissão de *upstream* para o tráfego rumo a entidades dentro das unidades de rede óptica, com base em indicações de estado das actividades e dos seus contratos de tráfego configurados.

Em comparação com a atribuição de largura de banda estática, o mecanismo de DBA melhora a utilização do G-PON *upstream* por reagir adaptativamente para os

padrões de tráfego de rajadas nas ONUs. Os benefícios práticos de DBA são dois: em primeiro lugar, os operadores de rede podem adicionar mais assinantes para o PON, devido ao uso mais eficiente de largura de banda; em segundo lugar, os assinantes podem desfrutar de serviços avançados, como os que exigem taxa variável, com picos que ultrapassam os níveis que podem ser razoavelmente atribuídos de forma estática.

Método de encapsulamento de dados G-PON

O G-PON usa o GEM (G-PON Encapsulation Method), um método de encapsulamento de transporte de dados, na camada de convergência de transmissão G-PON especificada. GEM fornece um mecanismo orientado à conexão, e com *framing* de tamanho variável, para o transporte de serviços de dados sobre redes PON e que é independente do tipo da interface do serviço no OLT, bem como dos tipos de interfaces UNI nas ONUs [ITU G-PON, 2008].

GTC layer framing

A figura 2.6 mostra a estrutura do GTC para direções *upstream* e *downstream*. A *frame* GTC para *downstream* consiste no bloco físico de controlo *downstream* (PCBd) e na secção de carga do GTC. A *frame upstream* do GTC contém múltiplas rajadas de transmissão. Cada rajada *upstream* consiste numa secção PLOu e num ou mais intervalos de alocações de largura de banda associados a Alloc-ID específicos.

A *frame downstream* do GTC fornece uma referência de tempo comum para o PON e uma sinalização de controlo comum para o *upstream* [ITU G-PON, 2008].

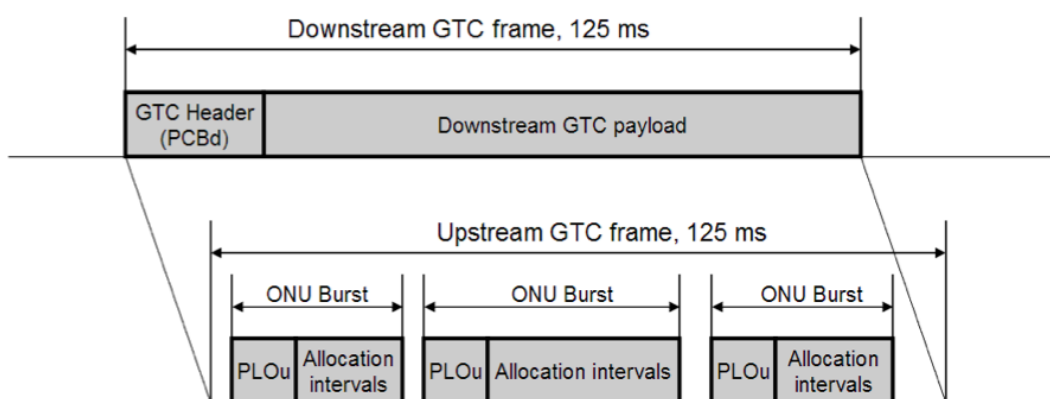


Figura 2.6: GTC layer framing [ITU G-PON, 2008].

Recipientes de transmissão (*T-CONT*, *Transmission container*)

Os recipientes de transmissão (*T-CONT*) representam um grupo de conexões lógicas que são utilizadas para a gestão da atribuição de largura de banda no sentido *upstream* do G-PON.

ONU envia o tráfego através de um ou mais *T-CONTs*. As *T-CONTs* permitem aplicações de qualidade de serviço (*QoS*, *Quality of Service*) na direcção *upstream*.

Na direcção *upstream*, a largura de banda a ser utilizada por uma ONU individual não depende apenas do tráfego do cenário na ONU respectivo, mas também do padrão de tráfego nas outras ONUs na rede. Como o meio é partilhado, qualquer transferência iniciada pela ONU na direcção *upstream* resultaria numa colisão e consecutiva retransmissão, degradando assim a performance. Assim, a informação partilhada é feita de tal forma que se comporte como múltiplas conexões ponto-a-ponto entre a ONU e o OLT por utilização do acesso múltiplo por divisão do tempo (*TDMA*, *Time Division Multiple Access*). O OLT, sendo o ponto central, é informado sobre os requisitos de largura de banda em cada ONU. Baseado no conhecimento de tráfego em todas as ONUs, permite acesso à ONU num *slot* fixo para a *frame downstream*. Para o tráfego *upstream*, pode considerar-se que a *frame* irá ser dividida em vários tipos de recipientes [ITU G-PON, 2008].

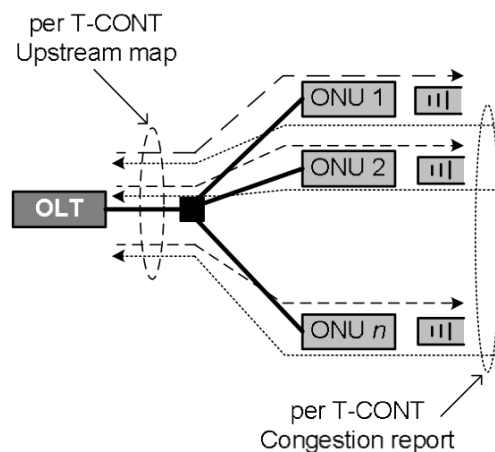


Figura 2.7: Mapeamento T-CONT [ITU G-PON, 2008].

Arquitectura da multiplexação por divisão de tempo G-PON

Na direcção *downstream* a multiplexação de tráfego é centralizada. O OLT multiplexa os *frames* GEM para o meio da transmissão usando GEM Port-ID, para identificar cada *frame* GEM que pertence a diferentes conexões *downstream* lógicas.

Cada ONU filtra as *frames* GEM *downstream* com base nas suas GEM Port-IDs e processa apenas as *frames* GEM que pertencem a essa ONU.

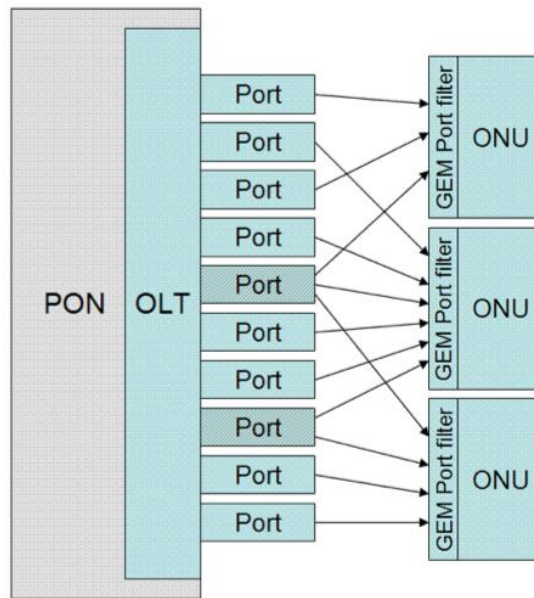


Figura 2.8: Arquitectura de multiplexação *downstream* [ITU G-PON, 2008].

No sentido *upstream* a multiplexação de tráfego é distribuída. O OLT garante oportunidade de transmissão *upstream* ou alocações de largura de banda *upstream* às entidades de tráfego dentro das ONUs subentendidas. Em cada alocação de largura de banda, a ONU utiliza o ID da porta do GEM como uma chave para identificar as *frames* do GEM, que pertencem as diferentes conexões lógicas *upstream*.

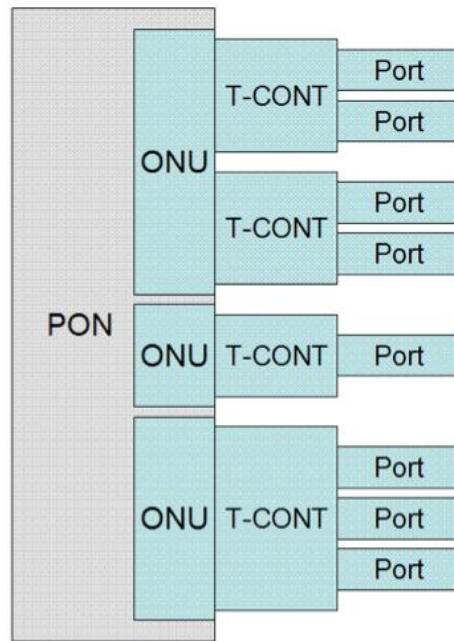


Figura 2.9: Arquitectura de multiplexação *upstream* [ITU G-PON, 2008].

Segurança

A funcionalidade básica de G-PON é de que os dados na direcção *downstream* são enviados em *broadcast* para todas as ONUs e todas as ONUs têm um tempo alocado para quando os dados são para ela (como no TDM). Por causa disso, utilizadores maliciosos podem reprogramar a sua ONU e capturar todos os dados *downstream* pertencentes a todas as ONUs ligadas àquele OLT. Na direcção *upstream*, o G-PON utiliza conexões ponto-a-ponto, pelo que todo o tráfego é protegido de escutas.

Assim, foi criado um mecanismo de segurança de informação para garantir que os utilizadores somente acedam aos dados a que eles são destinados. O algoritmo de criptografia a ser usado é *Advanced Encryption Standard (AES)* [GPON, 2007].

2.3.5 Resumo das características do G-PON

Relativamente à performance de G-PON, este suporta várias taxas de linha para as direcções *upstream* e *downstream*. Também suporta ATM e tem uma capacidade de transporte eficiente de *Ethernet*. Além disto, G-PON suporta a fragmentação de pacotes. G-PON suporta tanto os serviços actuais como futuros. Este é activado pelo método de encapsulamento GEM.

No que diz respeito à escalabilidade, GPON supera EPON com várias opções de taxa de linha e, especialmente, com a maior largura de banda oferecida.

Já a nível de segurança, podem ser implementados com técnicas de criptografia diferentes, entre as quais a AES, que é uma das mais avançadas.

Quanto aos serviços de vídeo de IPTV, oferece-os baseados em IP *multicast*. No modo CATV os sinais analógicos dos programas tradicionais de televisão são transmitidos através dos cabos.

Comparativamente em termos de custo-eficiência, G-PON não pode competir com EPON, devido às exigências mais apertadas dos componentes de transporte físicos.

G-PON é a PON mais complexa, criando vários desafios para a manutenção. No entanto, por outro lado, G-PON é a PON com melhor apoio nas redes heterogêneas permitindo várias arquitecturas no seu sistema e vários métodos de transmissão [GPON, 2007].

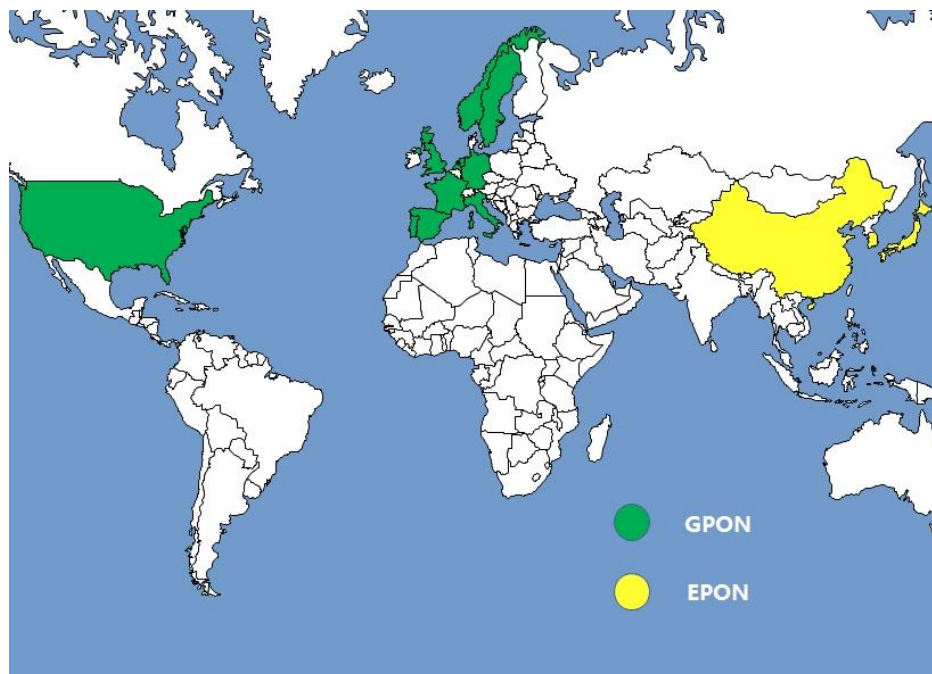


Figura 2.10: Desenvolvimento de G-PON e E-PON no mundo.

2.4 Gigabit Ethernet Passive Optical Networks (G-EPON)

2.4.1 História do grupo IEEE

O instituto de Engenheiros Electricistas e Electrónicos (IEEE) é uma organização profissional sem fins lucrativos, fundada nos Estados Unidos. É a maior organização profissional do mundo que promove a inovação e a excelência tecnológica em benefício da humanidade [IEEE, G-EPON]. O IEEE foi formado em 1963 pela fusão do Instituto de Engenheiros de Rádio (IRE) com o Instituto Americano de Engenheiros Electricistas (AIEE, *American Institute of Electrical Engineers*). O IEEE tem filiais em muitas partes do mundo,

sendo seus sócios engenheiros electricistas, engenheiros de computação, cientistas da computação, profissionais de telecomunicações, etc. A sua meta é promover conhecimentos no campo da engenharia eléctrica, electrónica e computação. Um dos seus papéis mais importantes é o estabelecimento de padrões, formatos de computadores e dispositivos.

O IEEE inspira os seus membros para serem uma comunidade global de inovações para um amanhã melhor, através das suas publicações. Geralmente participa em todas as actividades associadas a organizações profissionais editando e publicando jornais, estabelecendo actividades de padrões baseados em consenso, organizando conferências e promovendo publicações técnicas dos seus próprios jornais, padrões e textos de membros.

O IEEE promove, através dos seus ramos estudantis, oportunidades para os universitários desenvolverem actividades sociais e científicas nas suas universidades [Wikipedia, G-EPON].

Os *standards* IEEE são desenvolvidos dentro da sociedade IEEE e *Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board* [IEEE , G-EPON]. Os padrões IEEE 802 são referentes às redes locais e redes metropolitanas. As camadas da arquitectura IEEE 802 são três: camada física (*PHY, physical layer*), controlo de acesso ao meio (*MAC, médium access control*) e controlo de enlace lógico (*LLC, logical link control*).

Os sub-padrões referidos nesta secção serão o IEEE 802.3ah que produz o *standard* do G-EPON e o IEEE 802.3.av que produz o *standard* dos 10 Gb/s EPON usados na fibra óptica [Wikipedia, G-EPON].

2.4.2 Arquitectura da rede Óptica de Acesso

O sistema de acesso G-EPON foi produzido pelo IEEE como uma solução económica para a obtenção de alto débito e uma solução de largura de banda para uma primeira fase de redes de acesso FTTH. Um exemplo da configuração da rede G-EPON está ilustrado na figura 2.11:

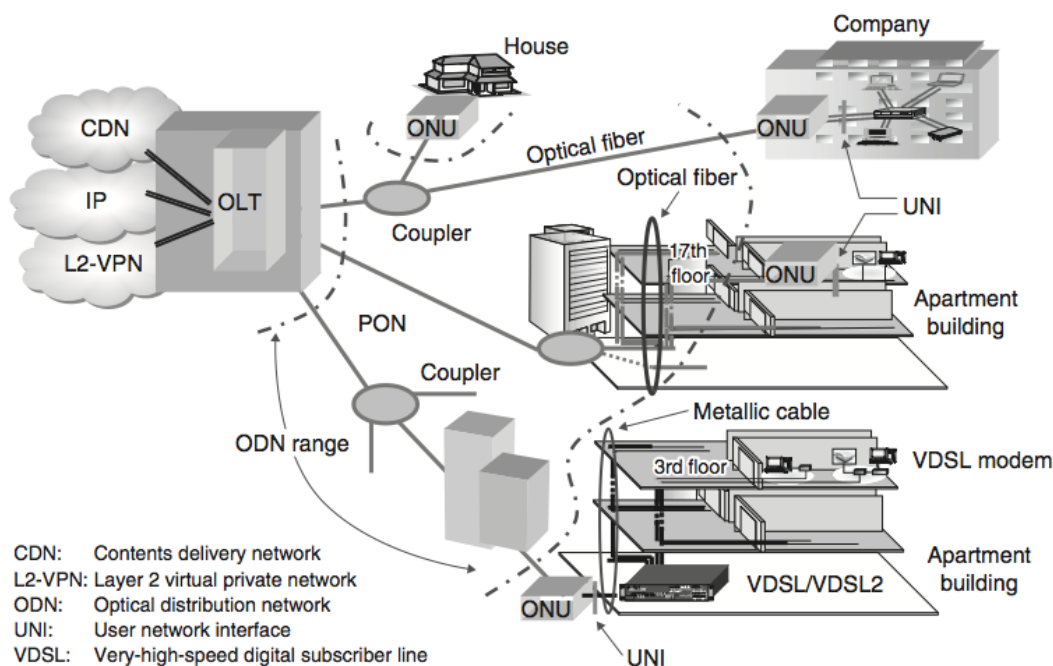


Figura 2.11: Arquitetura da rede G-EPON [G-EPON, 2009].

Este sistema, como se pode observar pela figura 2.11, compreende um OLT e várias ONUs que encerra o equipamento; estes estão relacionados por um acoplador em estrela. O OLT pode adaptar múltiplas ONUs que se ligam por fibras ópticas; esta medida consegue um uso mais eficiente da fibra óptica. Além disso, há uma utilização mais eficaz do espaço do CO da operadora [G-EPON, 2009].

No modo G-EPON existem duas classes: a PX10 e a PX20, que diferem no alcance máximo que podem atingir. O 1000BASE-PX10 e 1000BASE-PX20 são sub-camadas do PMD que fornecem conexões ponto-multiponto (P2MP) sobre redes PON até pelo menos 10 km e 20km, respectivamente, e com uma relação típica de 1:16. Numa *Ethernet* PON, uma única transmissão *downstream* (D) PMD para múltiplas *upstream* (U) PMDs recebe rajadas de cada “U” através de uma única topologia ramificada da rede da fibra monomodo. As mesmas fibras são utilizadas em ambas as direcções. Os sufixos D e U indicam os PMDs usados em cada extremidade de um *link*. Ou seja, um *link* 1000BASE-PX10 usa um 1000BASE-PX10-D numa extremidade e na outra usa 1000BASE-PX10-U PMD. O mesmo acontece para a classe PX20. A tabela 2.3 ilustra os vários atributos de cada PMD.

Descrição	1000BASE-PX10-U	1000BASE-PX10-D	1000BASE-PX20-U	1000BASE-PX20-D
Tipo de fibra	B1.1, B1.3 SMF			
Comprimento de onda nominal de transmissão	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm
Direcção de transmissão	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>
Alcance mínimo	0.5m – 10km		0.5m – 20km	

Tabela 2.3: Tipos de PMD.

Medium Dependent Interface (MDI)

O 1000BASE-PX10 ou 1000BASE-PX20 PMD são acoplados ao cabeamento de fibra no MDI. O MDI é a interface entre os PMD e os cabos de fibra óptica, como mostrado na figura 2.12.

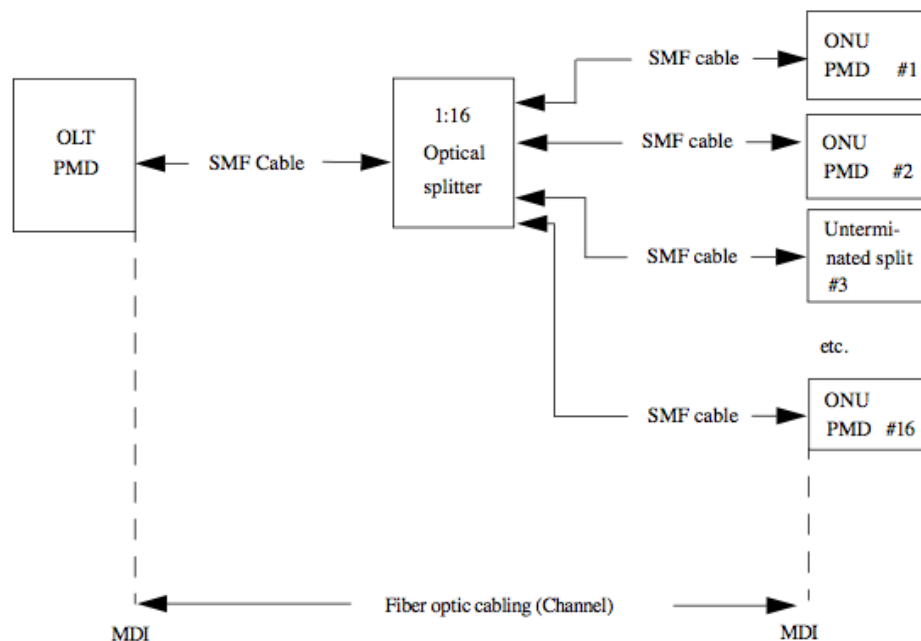


Figura 2.12: Modelo de cabo de fibra óptica [IEEE 10G-EPON, 2009].

Especificações ópticas de PMD para MDI para 1000BASE-PX10-D e 1000BASE-PX10-U ou para 1000BASE-PX20-D e 1000BASE-PX20-U

Especificações do Transmissor óptico:

	Comprimento de onda
1000BASE-PX-10-D ou 1000BASE-PX-20-D	1480 a 1500 nm
1000BASE-PX-10-U ou 1000BASE-PX-20-U	1260 a 1360 nm

Tabela 2.4.

Especificações do Receptor óptico:

	Comprimento de onda
1000BASE-PX-10-D ou 1000BASE-PX-20-D	1260 a 1360 nm
1000BASE-PX-10-U ou 1000BASE-PX-20-U	1480 a 1500 nm

Tabela 2.5.

Correcção de erros

O FEC é um mecanismo para aumentar o *budget* do *link* óptico ou a distância da fibra. O FEC adiciona à *frame* da *Ethernet* dados adicionais que são resultado de funções aritméticas não binárias (conhecidas como aritmética de Galois) efectuadas aos dados da *frame* da *Ethernet*. Estes dados adicionais (conhecidos como octeto de paridade do FEC) são utilizados para corrigir erros no fim da recepção do *link*, que podem ocorrer quando os dados são transferidos pelo *link* [IEEE 10G-EPON, 2009].

2.5 10 Gigabit Ethernet Passive Optical Networks (10G-EPON):

2.5.1 Arquitectura da rede Óptica de Acesso

No Japão, a plataforma de acesso por detrás de FTTH é o G-EPON, mas estudos recentes revelaram uma versão ainda mais rápida, o *10 Gb/s Ethernet passive optical network* (10G-EPON), desenvolvido também pelo IEEE.

No modo 10G-EPON existem seis classes subdivididas em dois grupos: no grupo das classes simétricas temos as classes PR10, PR20 e PR30, enquanto no grupo das classes assimétricas temos as classes PRX10, PRX20 e PRX30.

As classes PRXs são para taxas de 10Gb/s *downstream* e 1Gb/s *upstream*; quanto às classes PRs, são para 10Gb/s em ambas as direcções. A cada classe está associado um número, 10, 20, 30 que correspondem a orçamentos de potência, baixa, média e alta, respectivamente.

Descrição	PRX10	PR10	PRX20	PR20	PRX30	PR30
Comprimento de onda <i>upstream</i> nominal de transmissão	1310 nm	1270 nm	1310 nm	1270 nm	1310 nm	1270 nm
Comprimento de onda <i>downstream</i> nominal de transmissão	1577 nm					
Alcance máximo	≥10km		≥20km		≥20km	

Tabela 2.6.

Para diferenciar OLT PMDs da ONU PMDs, o OLT PMD tem o sufixo “D” anexado a ele, que representa a direcção *downstream*, por exemplo 10GBASE-PR-D1, enquanto as ONU PMDs têm o sufixo “U” associado a elas, que representa a direcção *upstream*, por exemplo 10GBASE-PR-U1.

Na direcção *downstream*, o sinal é transmitido pela PMD do tipo D e recebido por todos os PMDs do tipo U, enquanto na direcção *upstream* o PMD do tipo D recebe as rajadas de dados enviados dos PMDs do tipo U [IEEE 10G-EPON, 2009].

2.5.2 Comparação das características do G-EPON e do 10G-EPON

Os sistemas G-EPON e 10G-EPON partilham as seguintes características:

- Transporte de *frames* de dados por *Ethernet*;
- Uma fibra bidireccional com transmissão por multiplexagem por divisão do comprimento de onda (WDM);
- Acesso múltiplo por divisão de termo na direcção *upstream* (TDMA) e sinal contínuo na direcção *downstream*;
- Alcance da fibra de 20km ou mais;
- 16 ou mais ramos [G-EPON, 2009].

Por outro lado, diferem em vários aspectos, como:

- A faixa de comprimento de onda na direcção *downstream* é 1575-1580 nm e na direcção *upstream* é 1260-1280 nm, como se pode observar na figura 2.13 [IEEE 10G-EPON, 2009].
- O sistema 10G-EPON suporta tanto o modo de transmissão simétrico como o assimétrico. O modo assimétrico fornece 10Gb/s *downstream* e 1Gb/s *upstream* como o G-EPON, já o modo simétrico fornece 10Gb/s em ambas as direcções;
- O FEC é obrigatório em 10G-EPON, enquanto em G-EPON é facultativo.

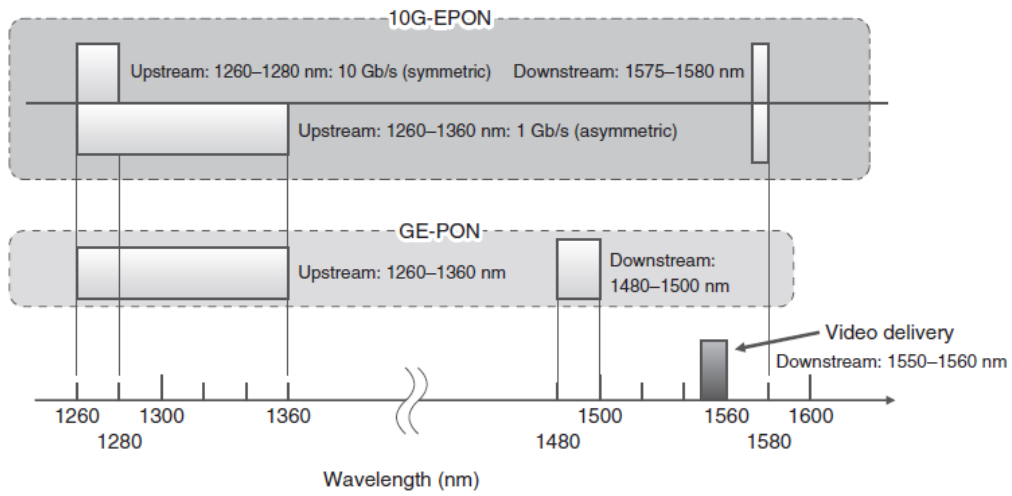


Figura 2.13: Alocação do comprimento de onda para G-EPON e 10G-EPON [G-EPON, 2009].

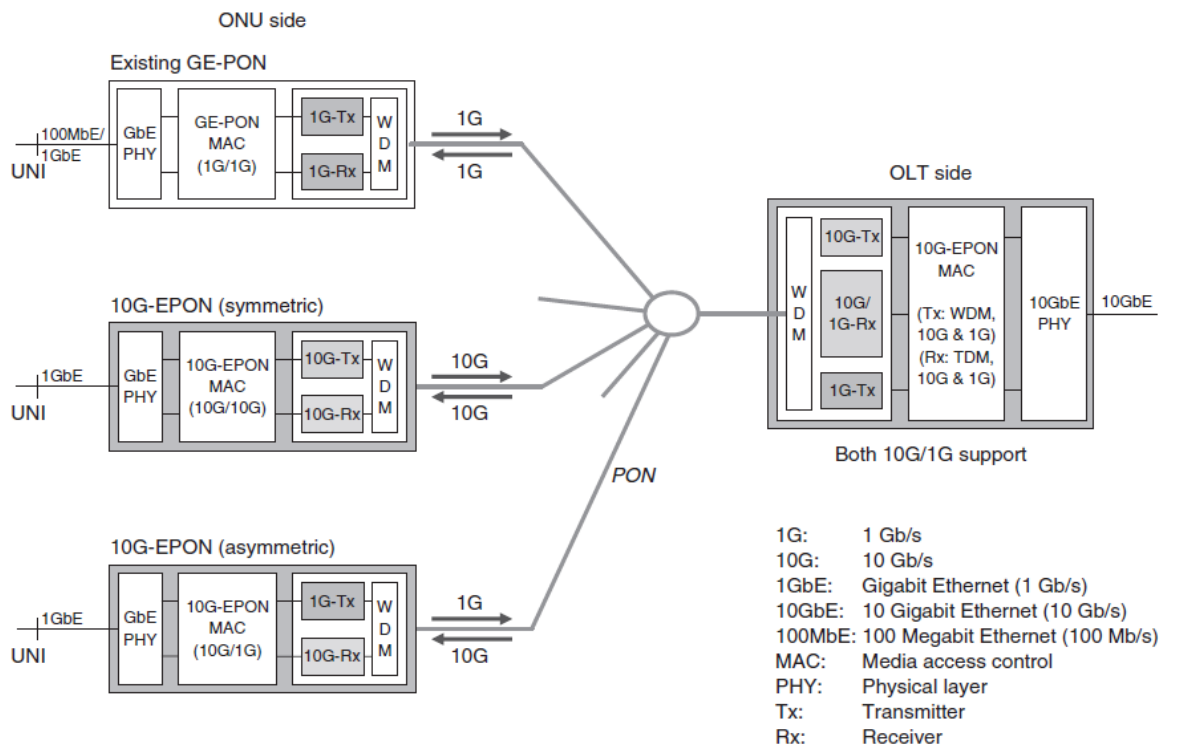


Figura 2.14: Coexistência entre G-EPON e 10G-EPON [G-EPON, 2009].

Na arquitectura do sistema 10GE-PON existem três tipos de ONUs:

- A ONU 1G/1G do sistema G-EPON, que permite 1Gb/s em ambas as direcções;
- A ONU 1G/10G assimétrica que fornece 1Gb/s na direcção *upstream* e 10Gb/s na direcção *downstream*;
- E a ONU 10G/10G simétrica que proporciona 10Gb/s em ambas as direcções [G-EPON, 2009].

		G-EPON	10G-EPON
Standard		IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av
Classes		PX10/PX20	PR10/PR20/PR30 (simétrico)
			PRX10/PRX20/PRX30 (assimétrico)
Camada MAC	Serviço	Dados <i>Ethernet</i>	Dados <i>Ethernet</i>
	Frame	<i>Frame Ethernet</i>	<i>Frame Ethernet</i>
	Alcance	10 ou 20 km por uma fibra monomodo	10 ou 20 km por uma fibra monomodo
Camada Física	Máximos ramos (Branches)	16 ou mais	16 ou 32 ou mais
	Velocidade de transmissão	<i>Upstream: 1.25Gb/s</i>	<i>Upstream: 1.25Gb/s ou 10Gb/s</i>
		<i>Downstream: 1.25Gb/s</i>	<i>Downstream: 10Gb/s</i>
	Comprimento de onda	<i>Upstream: 1260-1360 nm</i>	<i>Upstream: 1260-1280 nm (10G/bs)/PR suporte</i> <i>Upstream: 1260-1360 nm (10G/bs)/PRX suporte</i>
		<i>Downstream: 1480-1500 nm</i>	<i>Downstream: 15750-1580 nm (10G/bs)/PR/PRX suporte</i>
FEC	Opcional	Obrigatório	
Co-existência			GE-PON

Tabela 2.7: G-EPON versus 10G-EPON.

2.6 NG-PON

Esta secção apresenta os possíveis cenários de migração rumo a *Next-Generation PON* e propõe um roteiro de tecnologia: evolução de crescimento (determinado por NG-PON1) *versus* mudança revolucionária (chamado de NG-PON2). Também aborda superficialmente a migração de Gigabit-PON [NG-PON Part I, 2009].

2.6.1 História do Grupo FSAN

O grupo *Full Service Access Network* (FSAN) foi fundado em 1995, com a missão de conduzir os *standards* aplicáveis aos serviços e produtos da indústria e simultaneamente desenvolver novas especificações técnicas para redes PON com o objectivo de melhorar e definir as redes de acesso de serviço completo [FSAN, NG-PON].

O grupo FSAN é a principal organização a conduzir o trabalho nas redes de acesso da família G-PON e em gerações futuras, produzindo as diversas especializações na forma de *white papers*. Dentro desta organização existe um grupo de trabalho técnico para o desenvolvimento de *Next Generation Passive Optical Network* (NG-PON) [NG-PON, Teixeira].

2.6.2 Evolução do Gigabit PON para NG-PON

As classes de Gigabit-PON, como G-PON (ITU-T G.984) e 1G-EPON (IEEE 802.3ah), foram definidas em *standards* e agora começam a ser implementadas devido à necessidade de largura de banda, que vem ao longo do tempo a aumentar, tanto para consumidores como para aplicações de negócios. O maior requisito para NG-PON é promover uma maior largura de banda agregada do que o Gigabit-PON. Além disso, devido a grandes investimentos feitos pelos operadores actualmente com o Gigabit-PON, deve-se garantir uma migração tranquila de assistente de Gigabit-PON para NG-PON. [NG-PON Part I, 2009].

2.6.3 Cenários de Migração

Existem vários cenários de migração para atender às necessidades de serviços. Nesta secção serão abordados dois cenários de migração mais prováveis.

2.6.3.1 Service-Oriented

Neste cenário, propõe-se que os operadores de rede aproveitem as infra-estruturas já existentes de fibra para introduzirem um novo serviço de transporte mais elevado usando NG-PON. Alguns clientes de sistemas Gigabit-PON podem querer ser actualizados para o novo sistema de maior velocidade e o operador de rede pode escolher mover os seus clientes para NG-PON, enquanto outros clientes poderão continuar com o Gigabit-PON. Apesar disso, alguns operadores de rede poderão fazer uma migração “forçada” de todos os seus clientes para o sistema NG-PON, quando o número de assinantes do serviço Gigabit-PON for muito baixo. Gigabit-PON e NG-PON provavelmente terão de coexistir durante um período de tempo longo.

Os requisitos mais gerais que este cenário serão expostos como se indica:

- Deve haver co-existência no mesmo ODN de Gigabit-PON e NG-PON para abranger os casos em que os recursos de fibra são limitados;
- A interrupção de serviços deve ser minimizada para clientes que não adiram ao NG-PON;
- NG-PON deve emular todos os serviços de G-PON, no caso de uma migração por completo.

2.6.3.2 Service-independent

Neste cenário é proposta uma renovação da rede de acesso, por exemplo para *fiber to the home* ou *fiber to the curb*, ou seja, para uma infra-estrutura FTTx. Isto é um grande investimento por parte dos provedores de serviços, o que pode levar muito tempo.

Quando NG-PON atingir uma certa maturidade, os provedores de serviços poderão estar interessados nesta renovação. Esta será feita em zonas onde não existe Gigabit-PON, ou substituir as já existentes Gigabit-PON para atender às necessidades, como por exemplo tirar partido da maior largura de banda e/ou do maior *splitting ratio*.

A grande vantagem deste cenário é a ajuda que irá proporcionar aos prestadores de serviço em termos de economia, e ao mesmo tempo, a contribuição para uma melhor oferta de banda larga.

Neste cenário, a coexistência com Gigabit PONs pode não ser necessária, porque a substituição pode ser feita num prazo relativamente curto de forma sistemática [NG-PON FSAN, 2009].

2.6.4 NG-PON Roadmap

A tecnologia NG-PON está dividida em duas categorias: NG-PON1 e NG-PON2.

NG-PON1 é uma evolução do Gigabit-PON e suporta a coexistência com este no mesmo ODN. Desta forma, os clientes individuais podem ser actualizados para NG-PON no mesmo ODN e viver em compartilha com os clientes de G-PON, sem interromper os serviços para outros clientes.

A segunda categoria, NG-PON2 propõe uma mudança completamente disruptiva de NG-PON, pelo que não tem qualquer exigência em termos de convivência com G-PON no mesmo ODN.

A figura 2.15 ilustra o *roadmap* para NG-PON1 e NG-PON2, sendo NG-PON1 vista como uma actualização intercalar de NG-PON2 vista como uma solução a longo prazo.

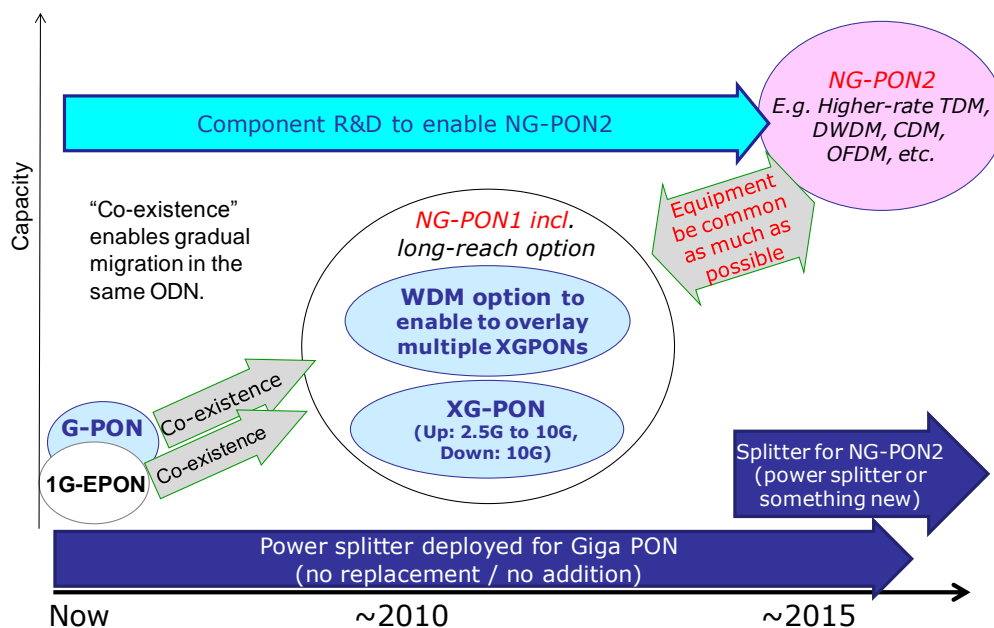


Figura 2.15: Representação do *roadmap* para NG-PON1 e NG-PON2 [NG-PON Part I, 2009].

2.6.4.1 Tecnologias de NG-PON1

NG-PON1 possui várias opções de tecnologias, como é mostrado na figura 2.15, ou seja, existe sobreposição de múltiplos XG-PON ao longo de uma fibra alimentada com múltiplos canais de comprimento de onda. XG-PON representa um sistema PON, com capacidade para 10 Gb/s pelo menos no sentido *downstream*. Já para *upstream* dependendo das aplicações-alvo, pode ser de 2,5 Gb/s ou de 10Gb/s *line rate*. Caso tenhamos 10Gb/s *line rate downstream* e 2.5 Gbt/s *line rate upstream* estamos perante XG-PON1, caso seja simétrico, isto é 10Gb/s para ambos os lados, estamos diante de XG-PON2.

2.6.4.2 Tecnologias de NG-PON2

Como é ilustrado na figura 2.15, NG-PON2 é uma solução proposta após NG-PON1 e apresenta-se como sendo uma solução a longo prazo com custo eficaz. NG-PON2 não é restringida por requisitos de coexistência, embora esta não esteja completamente excluída.

Existem muitas tecnologias candidatas, como mostrado na figura 2.15. Exemplos dessas tecnologias são *Dense WDM* (DWDM), maior taxa de dados TDM, etc.

A primeira geração de *splitters* e fibra podem ser compartilhados por G-PON e NG-PON1, dada a alocação do espectro óptico. Relativamente a NG-PON2, esta tecnologia

pode usar *splitters* e fibras diferentes e futuramente poderá usar diferentes dispositivos no lugar dos actuais *splitters* [NG-PON Part I, 2009].

2.7 10 Gigabit Capable Passive Optical Network (XG-PON)

O 10 Gigabit Capable Passive Optical Network (XG-PON) é uma tecnologia de NG-PON1 desenvolvida pelo ITU-T. Esta tecnologia promove a compatibilidade com as versões anteriores e além disso apresenta um mecanismo que permite que os clientes de G-PON migrem para XG-PON usando WDM. Existem dois tipos de XG-PONs com base na taxa de linha na direcção *upstream*:

- XG-PON1 com uma taxa de 2,5 Gb/s *upstream*;
- XG-PON2 com uma taxa de 10Gb/s *upstream* [ITU XG-PON, 2010].

2.7.1 Arquitectura da rede óptica de acesso

Tal como foi referido anteriormente em G-PON, em XG-PON a secção óptica de um sistema de rede de acesso local pode ser activa ou passiva e a sua arquitectura pode ser ponto-a-ponto ou ponto-multiponto. Na figura 2.16 são mostradas as várias arquitecturas suportadas por XG-PON:

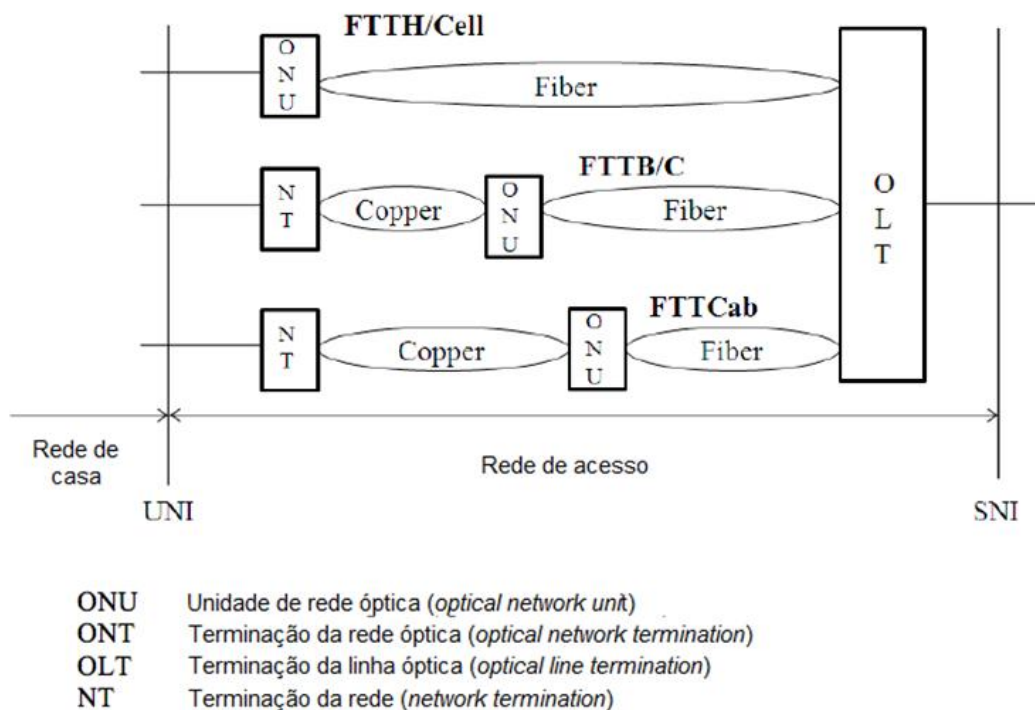


Figura 2.16: Arquitectura da rede XG-PON [ITU XG-PON, 2010].

	FTTH	FTTB		FTTC e FTTCab	FTTO	FTTCell wireless
		FTTB para MDU	FTTB para empresas			
Serviços de banda larga assimétricos	Sim	Sim		Sim		
Serviços de banda larga simétricos	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	
POTS e ISDN	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	
Linha Privada			Sim		Sim	
<i>xDSL backhaul</i>				Sim		
Serviços TDM simétricos						Sim
<i>Hot spots</i>						Sim
Serviço banda larga baseados em pacotes simétricos/assimétricos						Sim

Tabela 2.8: Serviços oferecidos pelas várias arquitecturas de XG-PON.

Foram introduzidos novos cenários em XG-PON em comparação a G-PON. Esses cenários são o FTTO dedicado a clientes de pequenas empresas e o FTTCell *wireless*.

A figura 2.17 representa cenários de aplicações de XG-PON. Notar que na figura 2.17 a ONU será chamada de CBU e terá de oferecer conectividade sem fios para fora da *base station*.

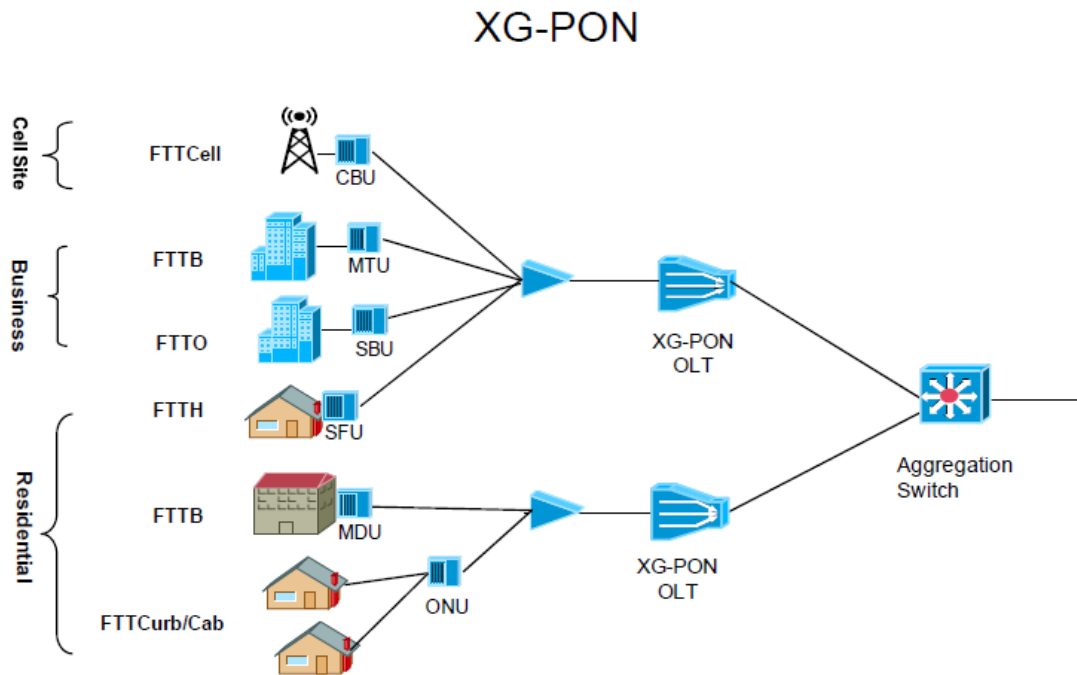


Figura 2.17: Resumo de alguns cenários de XG-PON [ITU XG-PON, 2010].

Comprimento de onda de operação de G-PON e XG-PON

A gama de comprimento de onda do sinal XG-PON1 na direcção *downstream* é 1575 nm a 1580 nm (ou 1577nm a 1581 nm no caso de serem aplicações ao ar livre), e na direcção *upstream* é de 1260 nm a 1280nm. Na figura 2.18, é definido o plano de atribuição de comprimento de onda para XG-PON1 e serviços adicionais, como por exemplo, o G-PON.

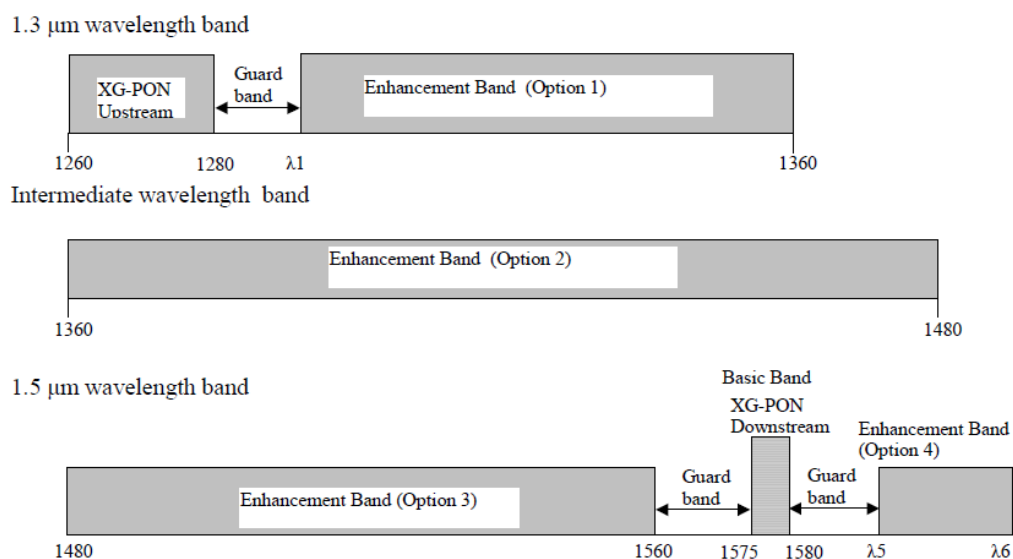


Figura 2.18: Alocação do comprimento de onda [ITU XG-PON, 2010].

Relativamente às opções assinaladas na figura 2.18, serão para os seguintes usos:

- Opção 1: para a direcção *upstream* do G-PON;
- Opção 2: para utilizações futuras;
- Opção 3: para a direcção *downstream* do G-PON e/ou serviço de distribuição de vídeo;
- Opção 4: para utilizações futuras.

2.7.2 Cenários de Migração

Actualmente estão a ser implementadas em todo o mundo as tecnologias G-PON e 1G-EPON. Com a necessidade cada vez maior de largura de banda por parte de consumidores e aplicações de negócio, este é um requisito geral para uma próxima geração de redes de acesso. Além disso, devido ao grande investimento gasto em tempo e dinheiro na implementação de G-PON, NG-PON deve ter como requisito, nesta primeira fase, a coexistência de G-PON com XG-PON e promover uma migração suave dos clientes.

Existem dois cenários de migração possíveis para atender às necessidades dos operadores de serviços:

- Cenário de migração PON *brown field*;
- Cenário de migração PON *Green field*.

Cenário de migração PON *brown field*

O cenário de migração PON *brown field* refere-se ao cenário de implementação onde um sistema PON já foi implementado e os operadores de rede decidem aproveitar a infra-estrutura de fibra já existente para oferecer mais serviços, utilizando XG-PON. Alguns clientes de G-PON podem exigir uma actualização do alto ritmo de transmissão, passando assim para o sistema XG-PON, enquanto outros clientes permanecem no sistema G-PON. Em determinada altura, alguns operadores de rede podem, eventualmente, executar uma migração “forçada” de G-PON para XG-PON quando o número de clientes G-PON ficar baixo.

Os requisitos gerais para este cenário são:

- A co-existência entre G-PON e XG-PON na mesma fibra;
- A interrupção de serviços para os clientes que ainda não migraram deve ser minimizada;
- O XG-PON deve suportar/emular todos os serviços de G-PON no caso de migração completa [ITU XG-PON, 2010].

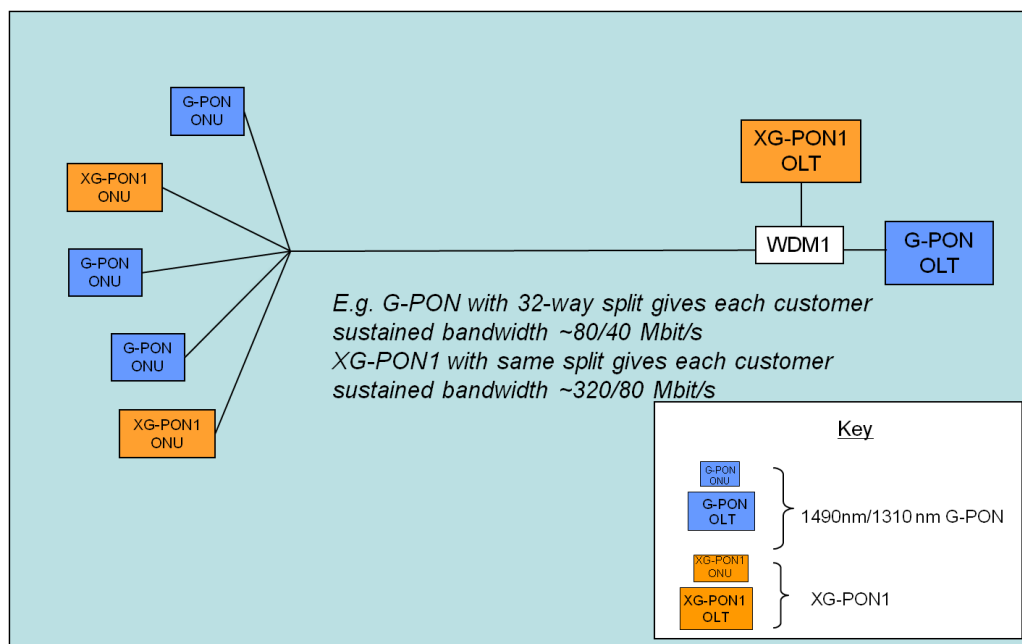


Figura 2.19: Exemplo de migração de G-PON para XG-PON1 [NG-PON FSAN, 2009].

Neste exemplo da figura 2.19, um OLT G-PON e várias ONUs G-PON são implementadas em primeiro lugar, depois as OLT/ONUs XG-PON são colocadas para a

migração mais tarde. A fibra e o *splitter* implementados para G-PON não são substituídos ou alterados durante a migração para NG-PON1 [NG-PON FSAN, 2009].

Cenário de migração PON *Green field*

Este cenário propõe a renovação da rede de acesso à infra-estrutura FTTx; é o maior investimento dos operadores de serviços e pode levar muito tempo. Neste cenário, a exigência de co-existência com Gigabit PONs não é necessário [ITU XG-PON, 2010].

2.7.3 Requisitos de Serviços

O NG-PON é necessário, devido à sua grande qualidade de serviço e à sua elevada capacidade de *bitrate*, de forma a suportar totalmente vários serviços para clientes residenciais, empresários e também para *mobile backhauling application*. Deve ser capaz de suportar serviços hierárquicos, tais como POTS e T1/E1, utilizando emulação e/ou simulação, tal como apresentado na tabela 2.9, de forma a harmonizar o conceito de redes de próxima geração.

Serviços	Telefónicos	VoIP
		POTS
		ISDN
	TV (tempo real)	IPTV
		TV digital <i>broadcasting</i>
	Linhas alugadas	T1/E1
	Internet de alta velocidade	-
	<i>Backhaul</i> móvel	-
	L2 VPN Serviços	-
Serviços IP	-	

Tabela 2.9: Exemplo de serviços de NG-PON1.

Atraso médio de transferência do sinal: 1,5 ms.

Tamanho máximo de pacotes *Ethernet*: 2000 bytes.

2.7.4 Requisitos da Camada Física

A arquitectura XG-PON é baseada numa única fibra de transmissão.

Comprimento de onda de trabalho

A gama de comprimento de onda de funcionamento para a direcção *upstream* usando “Banda O-” vai de 1260 a 1280 nm. Para o sentido *downstream*, a gama de trabalho vai de 1575 a 1580 nm (a extensão para o exterior é de 1575 a 1581 nm).

Velocidade Binária (*Bit rate*)

XG-PON tem dois conjuntos de velocidade de transmissão, nomeados da seguinte forma:

- XG-PON1: com 10 Gbit/s na direcção *downstream* e 2.5 Gbit/s na direcção *upstream*;
- XG-PON2: com 10 Gbit/s na direcção *downstream* e 10 Gbit/s na direcção *upstream*.

Relação de divisão (*split ratio*)

Muitos operadores de rede têm construído as suas infra-estruturas ODNs com a divisão de 1:32 até 1:64, então para XG-PON um requisito mínimo será de 1:64 para cumprir a co-existência com outras redes PON.

Na figura 2.20 é mostrada a implementação genérica de G-PON. Neste modelo uma arquitectura de divisão única é um caso especial, onde $m = 64$ e $n = 1$ e não é necessária a divisão do nó de acesso. Aumentando para além da divisão 1:64 (por exemplo, 1:128 ou 1:256) é atraente, de modo que possivelmente melhora a economia global de NG-PON, comparado com G-PON. A relação de divisão pode ser realizada na secção *backhaul* e/ou para utilizadores finais, como é mostrado nas figuras 2.20 e 2.21:

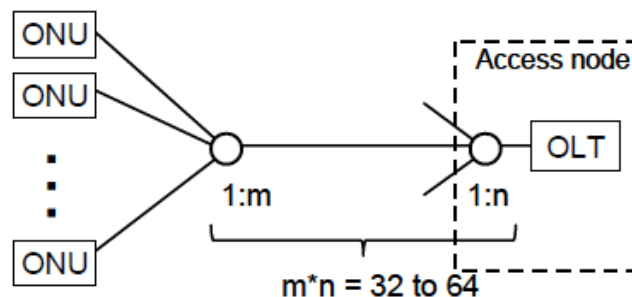


Figura 2.20: Implementação genérica de G-PON [ITU XG-PON, 2010].

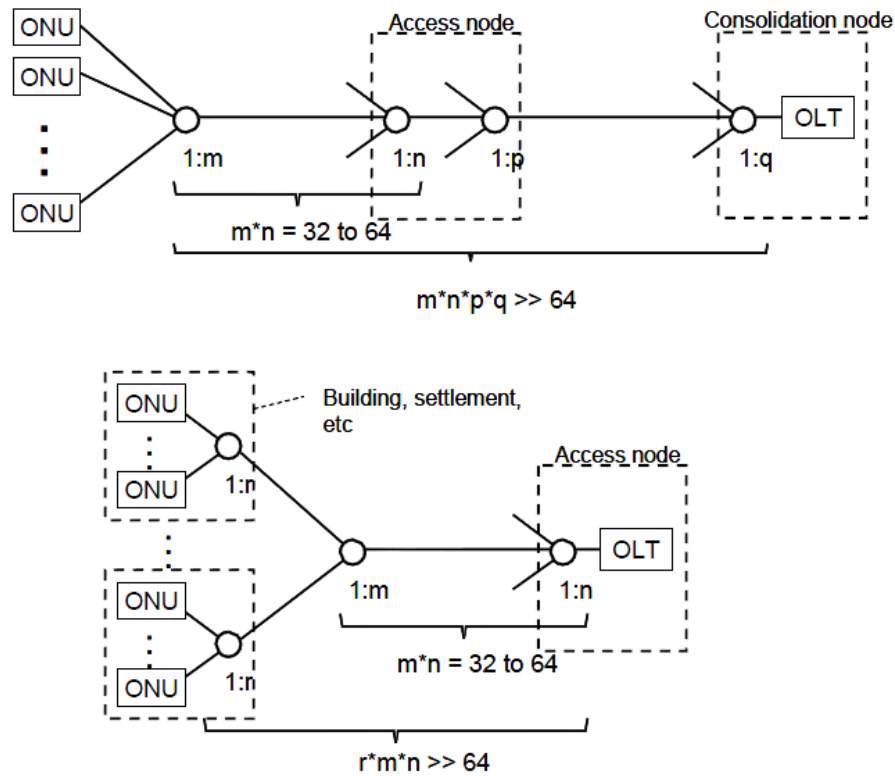


Figura 2.21: Opções de divisores para a arquitectura XG-PON [ITU XG-PON, 2010].

Alcance

XG-PON deve suportar um alcance de pelo menos 20km. Além disso, a camada TC de XG-PON precisa de suportar uma distância de fibra de 60km. A camada TC também precisa de apoiar a distância da fibra diferencial máxima de 40km e ser capaz de configurar a distância diferencial máxima da fibra de 20km [ITU XG-PON, 2010].

2.7.5 Requisitos de Sistema

Economia de energia e eficiência energética

A poupança de energia em sistemas de redes de telecomunicações tem-se tornado uma preocupação cada vez mais importante, no interesse de reduzir o OPEX e reduzir a contribuição dos gases para o efeito de estufa. O principal objectivo das funcionalidades de poupança de energia nas redes de acesso é o de conseguir fornecer serviços de emergência, tais como chamadas de voz, durante o maior intervalo de tempo possível, através da utilização de uma bateria de reserva quando o fornecimento de

electricidade quebra. Devido a isto, XG-PON tem uma eficiência energética melhor que G-PON. O objectivo secundário é a redução do consumo energético durante todo o funcionamento [ITU XG-PON, 2010].

Autenticação/Identificação/Criptografia

Como em G-PON, XG-PON é um sistema de partilha visto que todas as ONUs no mesmo PON recebem os dados completos. Assim, para evitar problemas, devem ser utilizados mecanismos de autenticação, identificação e criptografia. Estes mecanismos no sistema XG-PON são opcionais, incluindo por exemplo a identificação da ONU através do número de série e/ou de um registo de identificação utilizado para a inscrição da ONU no processo de transferência de dados [ITU XG-PON, 2010].

Atribuição dinâmica de largura de banda (DBA)

O OLT do sistema XG-PON deve suportar DBA de forma a permitir a partilha eficiente de largura de banda na direcção *upstream* entre os ONUs ligados à intensidade que suportam tráfego dentro dos ONUs individuais, baseado na indicação dinâmica da sua actividade. A indicação dinâmica da actividade poderá ser baseada nos seguintes métodos:

- Relatórios de estado (SR);
- Monitorização do tráfego (TM).

O OLT pode apoiar qualquer um dos métodos ou utilizar uma combinação de ambos [ITU XG-PON, 2010].

2.7.6 Requisitos Operacionais

Supervisão PON

Embora seja essencial para minimizar as despesas de capital, é cada vez mais importante para reduzir despesas operacionais. Esta supervisão do sistema PON executa testes de diagnóstico sem interferir com os utilizadores e sem comprometer a largura de banda disponível para os serviços. Permite, assim, verificar falhas ópticas e eléctricas de maneira a reduzir os custos operacionais [NG-PON FSAN, 2009].

Serviços de protecção em ODN

Serviços de resiliência ao longo de gerações anteriores a XG-PON não têm sido exigidos por parte dos operadores mas nesta geração é necessário para suportar uma

gama diversificada de serviços para residências e também para aplicações de negócio [ITU XG-PON, 2010].

2.7.7 Requisitos da Rede óptica

Taxa de linha

As taxas de linha para XG-PON1 são:

- Direcção *downstream*: 9,95328 Gbit/s;
- Direcção *upstream*: 2,48832 Gbit/s.

Meios físicos e método de transmissão

Direcção de transmissão:

O sinal tanto é transmitido na direcção *upstream* e *downstream*.

Metodologia de transmissão:

A transmissão bidireccional é realizada através da técnica de multiplicação por divisão do comprimento de onda (WDM) numa única fibra.

Código de linha

Downstream e *upstream*: código não retorno a zero (NRZ, *non return to zero*) [ITU XG-PON, 2010].

2.8 Comparação entre o G-PON, o G-EPON e o XG-PON

		G-PON	G-EPON	10G-EPON	XG-PON
Standard		ITU G.984	IEEE802.3ah	IEEE 802.3av	ITU G.987
Classes		-	PX10/PX20	PR10/PR20/P R30 (simétrico) PRX10/PRX20 /PRX30 (assimétrico)	-
Camada MAC	Serviço	Full Service (POTS, <i>Ethernet</i> , TDM)	Dados <i>Ethernet</i>	Dados <i>Ethernet</i>	Full Service (POTS, <i>Ethernet</i> , TDM)
	Frame	GEM <i>frame</i>	<i>Frame Ethernet</i>	<i>Frame Ethernet</i>	XGEM <i>frame</i>
	Alcance	20 km (lógico: 60km)	10 ou 20 km por fibra monomodo	10 ou 20 km por fibra monomodo	No mínimo 20 km
Camada Física	Velocidade de transmissão	<i>Upstream</i> : 1.2 GB/s ou 2,4 Gb/s	<i>Upstream</i> : 1.25Gb/s	<i>Upstream</i> : 1.25Gb/s ou 10Gb/s	<i>Upstream</i> : -XG-PON1 2,5Gb/s -XG-PON2 10Gb/s
		<i>Downstream</i> : 2,4Gb/s	<i>Downstream</i> : 1.25Gb/s	<i>Downstream</i> : 10Gb/s	<i>Downstream</i> : XG-PON1 e XG- PON2 10 Gb/s
	Comprimento de onda	<i>Upstream</i> : 1260-1360 nm	<i>Upstream</i> : 1260- 1360 nm	<i>Upstream</i> : 1260-1280 nm (10G/bs)/PR suporte <i>Upstream</i> : 1260-1360 nm (10G/bs)/PRX suporte	<i>Upstream</i> : 1260-1280 nm
		<i>Downstream</i> : 1480-1500 nm	<i>Downstream</i> : 1480-1500 nm	<i>Downstream</i> : 1575-1580 nm (10G/bs)/PR/ PRX suporte	<i>Downstream</i> : 1575-1580 nm
		Vídeo RF: 1550 nm	Vídeo RF: 1550 nm	Vídeo RF: 1550 nm	Vídeo RF: 1550 nm
	Número de utilizadores	2 a 64	16 ou mais	16 ou 32 ou mais	No mínimo 64
	FEC	Opcional	Opcional	Obrigatório	Opcional
Coexistência		-	-	G-EPON	G-PON

Tabela 2.10: Tabela comparativo das várias tecnologias abordadas no capítulo.

3 Requisitos e contribuições para NG-PON2

Os requisitos genéricos para as futuras redes de acesso passam por terem arquitecturas economicamente viáveis, fazendo uma redução das despesas de capital e de custo operacional. Tais reduções poderão passar por uma diminuição significativa em equipamentos electrónicos por unidade de largura de banda do cliente, ou seja, reduzir o número de nós, portas, conversões OEO e cartões de linha, tendo também que reduzir o consumo energético. É necessário que também as infra-estruturas de acesso sejam reutilizadas para evoluções podendo se utilizar a mesma arquitectura para implementar maiores funcionalidades, como por exemplo aumento de velocidade. Assim, com este aproveitamento da construção da rede consegue-se um corte grandioso nas despesas dos operadores de rede. Na rede de acesso a entrega de largura de banda deve ser escalada até aos limites da tecnologia da fibra, além disso, as actualizações não devem interromper os serviços dos clientes já existentes. Por fim, o custo por unidade de largura de banda deve descer com o crescimento da largura de banda.

Para as futuras redes existem várias arquitecturas possíveis, como *Fiber to the premises* (FTTP) que é necessária para os futuros requisitos de serviços e largura de banda; eliminação da maioria das *central offices / local exchanges*, o que reduz o número de portas e cartões de linha; redes *Bypass Metro*, que permitem um acesso longo e directo ao *core*; e por fim *Optical core network with optical circuit switching* (núcleo de rede óptica com um circuito de comutação óptica) que reduz as conversões OEO e minimiza o tamanho do pacote do *core* no *router*.

As opções de hoje em dia quanto a redes de acesso óptico subdividem-se em duas classes: as soluções ponto a ponto e ponto a multi-ponto, WDM PON e *Active Star* e as soluções de PON (*Passive Optical Network*) como G-EPON e GPON. Este início de capítulo foca a última solução para os aspectos negativos que apresenta cada subcategoria e as lições que se podem retirar para aplicar a uma nova geração de rede de acesso [IAT, 2009].

3.1 Problemas das redes de acesso actuais

Actualmente, o mercado de PON está dividido em três zonas/tipos de distribuição: o G-EPON, no Japão e ao redor de países do Leste asiático, o G-PON implementado pela Verizon e o G-PON implementado por operadores nacionais no resto do mundo. Cada uma das implementações possui ambientes substancialmente diferentes, tanto económicos como políticos, sendo que assim a escala e os prazos das implementações diferem.

As actuais gerações de PONs pertencem a dois sistemas: o GE-PON do IEEE e o G-PON do ITU. Estes sistemas utilizam basicamente a mesma tecnologia, utilizando WDM

duplexing, TDM para *downstream*, TDMA para *upstream* e *packet-based*. As diferenças no tipo dos *standards* derivam de quem os criou, uma vez que IEEE é uma organização de “terreno” (“*grass roots*” – os vendedores dirigem os processos) enquanto o ITU é uma organização “*top down*” (os operadores dirigem directamente os processos).

O IEEE foi o primeiro a fazer implantações em massa, dado que teve a pressão de uma concorrência significativa, como as influências da administração reguladora do Japão. Isto levou a um cronograma de implantação muito rápido. Em contrapartida, o G-PON do ITU foi orientado de uma forma mais económica, atrasando-se relativamente ao GE-PON. Mas hoje em dia apresenta uma “pegada” muito superior em todo o mundo.

O IEEE 802.3 (*Ethernet*) apresenta uma grande facilidade de controlo de MAC, tem a vantagem de tornar os dados mais simples e é o mais económico possível em cada ligação, apresentando uma gama ampla de projectos. Todavia apresenta aspectos negativos, uma vez que é o vendedor a dominar os *standards*, o que pode implicar falta de interesse por parte dos operadores, ou seja, os vendedores estão a “construir” algo que os operadores não desejam. O orçamento óptico está errado, porque os vendedores têm uma ideia má da aparência da rede de acesso real. Em cima destes problemas, há todo um grupo de questões técnicas importantes que nem sequer são mencionadas, ou são discutidas muito brevemente na norma.

Os resultados obtidos para o *standard* são reduzidos e incompletos, apresentando limitações na camada “PHY” e provocando problemas a nível de alocação dinâmica de largura de banda, a nível de segurança, a nível de gestão da ONU e de alcance. Isso provocou no GE-PON muitas lacunas na descrição do seu sistema. Devido a estes problemas, fez com que cada operador no mundo criasse o seu próprio padrão para conseguir solucionar tais lacunas, criando-se assim outro problema, o da não interoperabilidade entre as GE-PON do Japão, Coreia e China.

Relativamente ao ITU, este apresenta um sistema completo de normas que cobre quase todos os requisitos e aspectos da concepção do sistema PON (camada física, protocolos, sinalização, gerência) e também segue a tendência do mercado e da tecnologia. Contudo, apresenta aspectos negativos, uma vez que sendo o operador a dominar as normas, este irá solicitar sempre mais capacidade e terá sempre uma tendência para querer o “sistema perfeito” em vez do “sistema bom” que apresenta um orçamento inferior. Outro problema é que a norma permite mais do que uma solução para um determinado problema. A título de exemplo, no G-PON podemos utilizar PINs ou APDs e *single* ou *multiple* T-Conts.

Da análise anterior, a maior lição que podemos extrair é a que os grupos IEEE e ITU são muito complementares. O grupo 802.3 está no seu melhor quando se consideram questões de baixo nível detalhadas na camada PHY e MAC; já o grupo ITU faz melhor trabalho quando se trata de considerar o *design* geral do sistema, os requisitos e funções especializadas da PON. Sendo assim, a melhor maneira de avançar para a próxima geração de *standards* GE-PON ou G-PON, é tentar que os dois grupos trabalhem

cooperativamente. Nesse sentido, já existe um conjunto de declarações entre o IEEE e o ITU de forma a garantir uma ampla comunicação e troca de ideias. Claro que cada grupo deve interiorizar a informação que recebe de outros grupos.

Olhando para o futuro, é bem possível que o *standard* 10G-EPON possa vir a ser utilizado como uma camada física e MAC dentro do *framework* do ITU. Os *standards* do ITU iriam preencher as lacunas dos processos do IEEE, produzindo um sistema muito completo. Em troca o sistema ITU iria ganhar um elevado volume de reduções de custo [Huawei, 2009].

Em suma, deve-se mudar radicalmente a arquitectura da rede de acesso para reduzir consideravelmente as despesas de capital e custos operacionais, diminuir o consumo energético e revolucionar a experiência com o cliente. Contudo, há que fornecer uma infra-estrutura reutilizável e continuamente actualizável fisicamente para a Próxima Geração de Redes do Século 21 [IAT, 2009].

3.2 Requisitos para NG-PON2

O grupo ITU-T tem definido um “reach extender” para aumentar o alcance de G-PON para o limite máximo do seu protocolo (60 km); embora possuindo vários equipamentos para melhorar algumas das necessidades, nem sempre é apreciado pelos operadores de rede. Para permitir uma maior largura de banda para os clientes e/ou uma maior proporção de divisão, surgiram outras arquitecturas de rede de acesso, o XG-PON desenvolvido pela ITU e o 10G-EPON desenvolvido pelo IEEE. Estes sistemas equilibram a divisão da ODN e permitem a co-existência da família de GPON/EPON e do novo XG-PON/10G-EPON sobre a mesma infra-estrutura de fibra. O *standard* IEEE 802.3av 10G-EPON foi aprovado em Setembro de 2009 e relativamente ao *standard* XG-PON1 da ITU, ele será aprovado no decorrer do ano 2010.

Os sistemas XG-PON/10G-EPON contribuíram para aumentar a vida útil dos sistemas TDMA PON. Relativamente a uma configuração híbrida entre G-PON/XG-PON e canal RF, não é possível para já, dado que as bandas de frequências não suportam tal extensão. Além disso, os ONTs não têm filtros bloqueantes correctos para permitir uma actualização sem comprimentos de onda GPON/XGPON.

Novas soluções para além de XG-PON/10G-EPON são motivadas pelo crescimento constante do tráfego no mercado residencial, comercial e *backhaul*. A difusão de aplicações multimédia de alta qualidade, juntamente com uma mudança de serviços de *broadcast* para *unicast*, requer uma solução que seja escalável de forma a manter os rácios de dados por utilizador maiores que 1Gb/s. Uma única plataforma para aplicações residenciais, empresárias e *backhaul*, a consolidação de *local exchange offices* e a minimização do equipamento activo no campo são outros factores para rede de acesso de próxima geração (NGA). Tal conduta não leva apenas a uma maior simplificação no

planeamento da rede e a uma maior integração, como também a custos de energia reduzidos.

Os requisitos para uma próxima geração de redes de acesso além dos de XG-PON/10G-EPON são 100km de alcance, ter 1000 utilizadores e uma velocidade de transmissão maior ou igual a 1Gb/s. Um factor importante a salientar é que há uma relação entre o número de utilizadores e o alcance; por exemplo, em zonas em que o número de utilizadores é reduzido, o alcance poderá ser superior e vice-versa. [Requisitos2, 2010].

Requisitos gerais para NG-PON2 que poderão ser cumpridos até 2015:

- 40 Gbit/s de capacidade agregada;
- Simetria sustentável de 1Gbit/s por ONU;
- 64 divisores passivos;
- 20 km básicos de alcance;
- 60 km de alcance de extensão;
- Maior segurança;
- Design custo-eficiência para *downstream*;
- Design custo-eficiência para *upstream*;
- Redução dos custos energéticos.

[Requisitos, 2010]

Serviços de Futuro:

- Vídeo: 3D + HD+ Ultra HD+ visão livre;
- Ambientes *on-line* virtuais;
- *Grid* computação;
- Jogos.

		G-PON	G-EPON	10G-EPON	XG-PON	NG-PON2
<i>Standard</i>		ITU G.984	IEEE802.3ah	IEEE 802.3av	ITU G.987	Nenhum
Camada MAC	Frame	GEM <i>frame</i>	<i>Frame</i> Ethernet	<i>Frame</i> Ethernet	XGEM <i>frame</i>	ND
	Alcance	20 km (lógico: 60km)	10 ou 20 km por fibra monomodo	10 ou 20 km por fibra monomodo	No mínimo 20 km	No mínimo 20 km
Camada Física	Velocidade de transmissão	<i>Upstream</i> : 1.2 GB/s ou 2,4 Gb/s	<i>Upstream</i> : 1.25Gb/s	<i>Upstream</i> : 1.25Gb/s ou 10Gb/s	<i>Upstream</i> : -XG-PON1 2,5Gb/s -XG-PON2 10Gb/s	<i>Upstream</i> : 40 Gb/s
		<i>Downstream</i> : 2,4Gb/s	<i>Downstream</i> : 1.25Gb/s	<i>Downstream</i> : 10Gb/s	<i>Downstream</i> : XG-PON1 e XG-PON2 10 Gb/s	<i>Downstream</i> : 40 Gb/s
	Comprimento de onda	<i>Upstream</i> : 1260-1360 nm	<i>Upstream</i> : 1260-1360 nm	<i>Upstream</i> : 1260-1280 nm (10G/bs)/PR suporte <i>Upstream</i> : 1260-1360 nm (10G/bs)/PR X suporte	<i>Upstream</i> : 1260-1280 nm	ND
		<i>Downstream</i> : 1480-1500 nm	<i>Downstream</i> : 1480-1500 nm	<i>Downstream</i> : 1575-1580 nm (10G/bs)/PR/PRX suporte	<i>Downstream</i> : 1575-1580 nm	ND
		Vídeo RF: 1550 nm	Vídeo RF: 1550 nm	Vídeo RF: 1550 nm	Vídeo RF: 1550 nm	ND
	Número de utilizadores	2 a 64	16 ou mais	16 ou 32 ou mais	No mínimo 64	No mínimo 64
Custo de desenvolvimento		Médio	Baixo	Alto	Alto	ND

Tabela 3.1: Tabela comparativa das tecnologias existentes com NG-PON2 (ND-Não Descrito).

3.3 Contribuições de projectos para requisitos de NG-PON2

Nesta secção serão apresentados vários projectos de investigação em novas tecnologias de redes de comunicação e como estes poderão contribuir para os requisitos e tecnologias de NG-PON2.

Os projectos apresentados serão o PIEMAN, o SARDANA, o ACCORDANCE, o GEYSERS, o MAINS e o OASE.

3.3.1 Photonic Integrated Extended Metro and Access Network (PIEMAN)

O sistema de fibra óptica começou a ser desenvolvido no IST, no projecto PIEMAN e permitirá que os clientes individuais acedam directamente a larguras de banda até 10 Gbit/s *upstream* e *downstream*. O projecto PIEMAN realiza pesquisas na camada física para uma rede óptica futura com capacidade de largura de banda e alcance muito superiores aos de hoje em dia.

Actualmente, a rede de acesso e a rede metropolitana encontram-se em sistemas separados. No entanto, a necessidade de se ter uma largura de banda cada vez maior à medida que os anos passam faz com que uma arquitectura deste tipo se torne muito dispendiosa. O CAPEX é dispendioso devido ao aumento do número de elementos e *interfaces* que são necessárias para conectar todos os elementos que ligam esta rede de acesso. Do ponto de vista do OPEX, também é oneroso devido ao aumento da complexidade por parte do grande número de elementos que a rede irá conter. Assim, o *footprint* de consumo de electricidade vai alargar excessivamente.

Devido a estes factos, o projecto PIEMAN propõe construir um sistema de comunicações fotónicos (*photonic*) que integre a rede de acesso e rede metropolitana num único sistema, o que acarreta uma simplificação das redes de acesso e, portanto, levará a uma redução de custos em serviços para os clientes.

O comprimento de onda de 10 Gbit/s é partilhado no máximo por 512 clientes. O uso significativo de DWDM consegue produzir ainda melhor eficiência de fibra até 32 comprimentos de onda, cada um suportando 10Gbit/s. Este projecto irá ter uma aproximação WDM/TDMA híbrida.

Como título de exemplo, na Europa, o projecto PIEMAN tem como *design* de arquitectura de rede colocar um intervalo de 100km entre um cliente e um nó de acesso.

O foco do projecto PIEMAN é na camada física onde actualmente encontram-se as maiores dificuldades; irão também ser estudados em paralelo as camadas superiores e o protocolo Mac no projecto complementar do IST, o MUSE (*Multi Service Access Everywhere*) [PIEMAN, 2006].

3.3.1.1 Arquitectura de Sistema

Como mencionado anteriormente, PIEMAN está a realizar pesquisas na camada física, com o intuito de desenvolver uma nova geração de PONs com recursos que estão muito além da capacidade da tecnologia de ponta de PONs de hoje. Alguns deles, já mencionados, são: o aumento da largura de banda para clientes; 10 Gbit/s de comprimento de onda que é partilhada por até 512 clientes; um aumento completo do alcance óptico por 100km utilizando amplificadores ópticos e um aumento da

eficiência da fibra óptica devido ao uso de DWDM (PIEMAN terá uma abordagem híbrida WDM/TDMA).

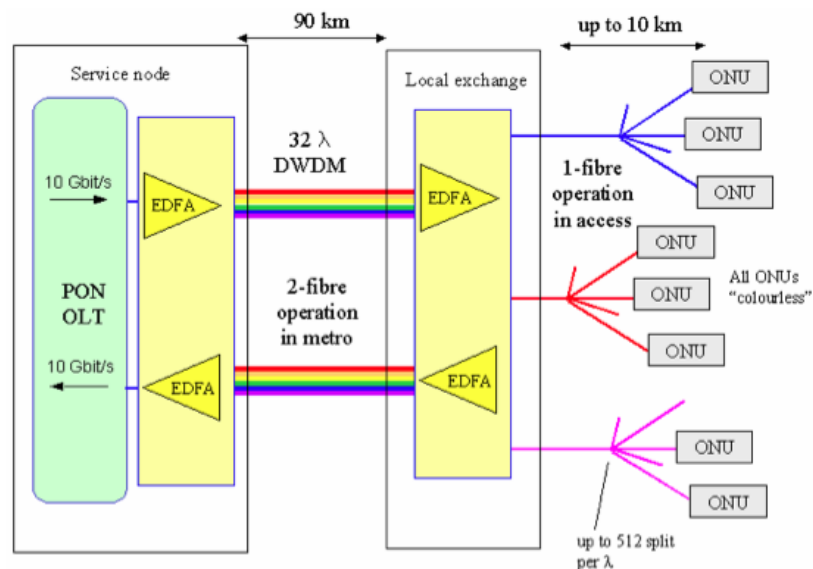


Figura 3.1: Vista de alto-nível da arquitetura alvo do PIEMAN [PIEMAN, NOC].

A figura 3.1 mostra uma vista de alto-nível da arquitetura do sistema PIEMAN. Enquanto a arquitetura do PIEMAN irá suportar FTTP; irá também, de forma a evoluir, ser capaz de alimentar arquiteturas híbridas como a FTTC. O foco do projeto PIEMAN é na camada física, onde se encontram alguns grandes desafios. A camada superior e os protocolos MAC serão estudados paralelamente com o projeto MUSE.

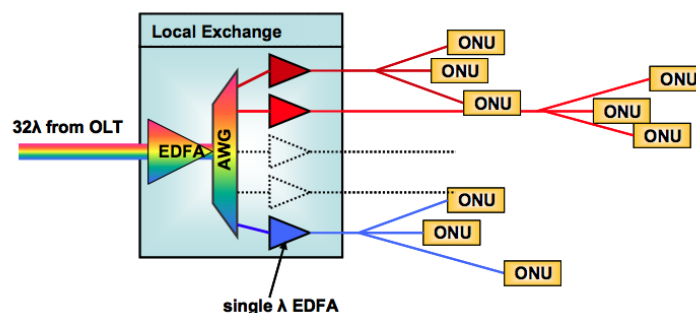


Figura 3.2: PIEMAN local exchange node amplifier placing for the downstream direction [PIEMAN, NOC].

A partir da figura 3.2, é possível ver a configuração escolhida para o PIEMAN. Nesta configuração, podemos observar que:

- O sinal WDM do OLT é primeiro re-amplificado após 90KM de fibra *standard de single mode*;
- Desmultiplexado por um AWG em comprimentos de onda únicos;

- Amplificado por um EDFA de comprimento de onda único.

Esta foi a configuração escolhida, uma vez que fornece a melhor relação custo/desempenho em comparação com as outras alternativas propostas (um poderoso EDFA antes de AWG ou tendo amplificadores de comprimentos de onda únicos depois do AWG).

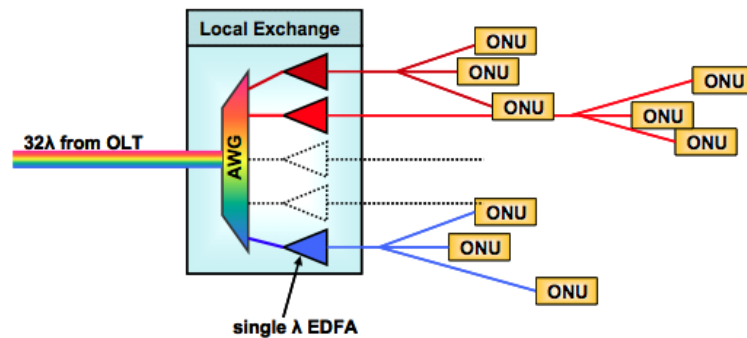


Figura 3.3: Local para a colocação do nó de troca de amplificador no PIEMAN para a direção *upstream* [PIEMAN, NOC].

Para *upstream*, a solução escolhida consiste em amplificar cada comprimento único de onda com um EDFA dedicado, antes de ser multiplexado pelo AWG. Em vez de vários EDFAs, pode utilizar-se apenas um único WDM EDFA para *upstream*, mas os transientes introduzidos pelos canais vizinhos fazem desistir desta opção.

Quanto à decisão sobre que plano de comprimento de onda deve ser usado para o nó de serviço e o local de troca nas fibras de *backhaul*, verificou-se, depois de vários testes, que quer em questões de grande complexidade técnica, quer no preço, a melhor escolha é um puro C-Band. O C-Band abrange 32 comprimentos de onda para *upstream* e mais de 32 comprimentos de onda para *downstream* numa grelha de 50GHz. Este plano de comprimento de onda é mostrado na figura 3.4, onde os comprimentos de onda de *upstream* e *downstream* são claramente visíveis. Há também no meio uma banda guarda de 10nm.

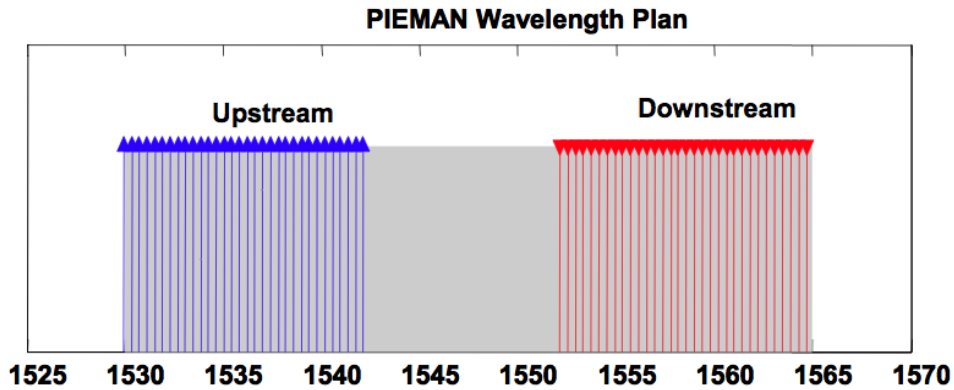


Figura 3.4: Plano de comprimento de onda [PIEMAN, NOC].

A fim de evitar problemas com os 32 tipos diferentes de ONU, foram implementadas no projecto *colourless* ONUs. Existem actualmente duas abordagens para o OLT determinar o respectivo comprimento de onda *upstream* para a ONU. A primeira abordagem é feita por *optically delivering*, para um transportador de comprimento de onda específico, enquanto a segunda abordagem consiste em programar um *tunable laser* na ONU. Ainda não está escolhida qual das duas é a melhor solução, presentemente ambas ainda estão a ser estudadas [PIEMAN, NOC].

3.3.1.2 Design do Túnel ONU

A arquitectura do PIEMAN requer que a ONU seja capaz de transmitir 10 Gbit/s de dados em formato NRZ sobre 100km de fibras ópticas *standard* e que seja capaz de seleccionar 32 canais de comprimento de onda espaçados de 50GHz.

Embora actualmente sejam possíveis estes tipos de níveis de desempenho de transmissores de engenharia de longa distância para sistemas DWDM, novos desafios surgem quando estes requisitos devem ser cumpridos para as redes de acesso com um custo aceitável.

Adicionalmente, outros problemas são introduzidos com o controlo do comprimento de onda numa rede PON com tempo de partilha, devido ao facto de ser necessário acrescentar recursos adicionais para o protocolo de transmissão, com o propósito de ajudar os *lasers* da ONU a bloquear os sinais de referência do comprimento de onda antes de haver uma explosão de dados. Para evitar este problema, esta a considerar-se uma aproximação de “definir e esquecer” (“*set and forget*”) para a sustentabilidade do comprimento de onda.

Para atingir o alcance longo que é exigido no PIEMAN, é necessário utilizar modulação externa para ajudar no controlo da dispersão.

Uma grande variedade de abordagens para transmissores sintonizáveis (*tunable transmitters*) foi exposta e podem ser divididas em regimes discretos, monolíticos e híbridos.

A primeira classe, transmissores discretos, possui um *laser* DFB ou DBR para sintonizar um subconjunto de canais dentro da banda através de um simples ajuste da temperatura. Assim, irão ser necessários 2 a 4 lasers para sintonizar metade da banda C de forma a cumprir o requisito do PIEMAN.

A segunda, classe dos monolíticos, fornece uma faixa de *tuning* necessária para o dispositivo usando uma estrutura mais avançada de DBR, onde diversas secções podem ser individualmente controladas por electricidade. No entanto, esta classe de transmissores requer uma caracterização mais intensa durante o fabrico dos extensos sistemas de controlo, como também uma área maior no *chip*.

A terceira classe, híbrida, consiste em dispositivos onde os blocos de ganho dos amplificadores ópticos semicondutores são acoplados por uma cavidade externa com um elemento selectivo de comprimento de onda.

Na figura 3.5 podemos ver um sumário comparativo do custo ajustável, incluindo as duas variantes conhecidas dos *lasers* DBR multi-secção monolíticos.

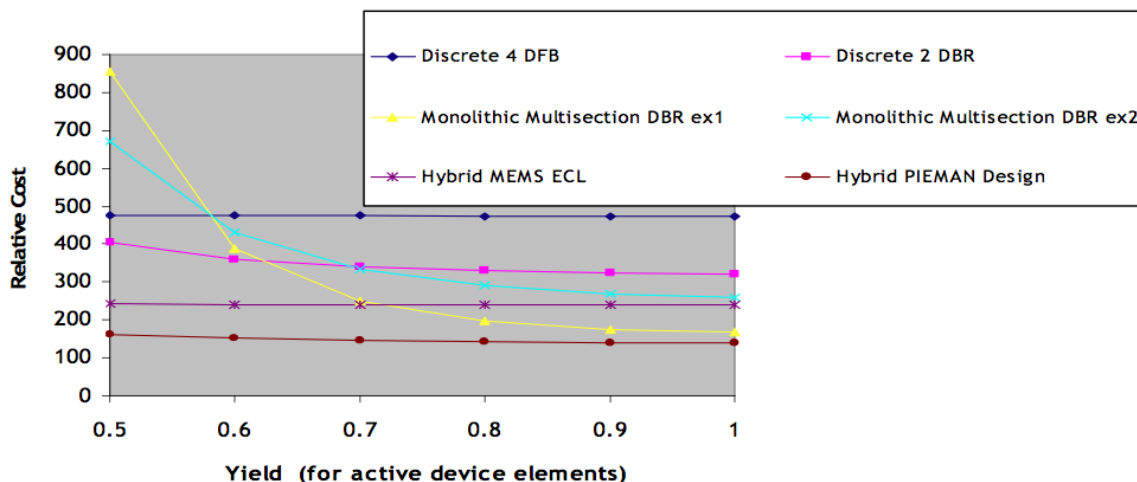


Figura 3.5: Comparação dos custos ajustáveis das tecnologias dos transmissores [PIEMAN, 2006].

No gráfico ilustrado na figura 3.5, as curvas parecem estar alinhadas com os valores actuais da indústria na abordagem monolítica. Relativamente às soluções híbridas, há um equilíbrio entre o que é feito no exterior e o que é no monolítico.

3.3.1.3 ONU Reflective

A ONU reflectora também está a ser considerada no PIEMAN; trata-se de uma abordagem alternativa para a oferta de canais para *upstream*, eliminando a necessidade de uma referência interna de comprimento de onda e também a função de controlo, conseguindo assim reduzir o custo da ONU. Em vez disso, será utilizado um portador óptico CW distribuído a partir do *central exchange* e partilhado entre múltiplos utilizadores em cada *power splitter* PON individual. Os sinais de *upstream* são gerados a partir de portadora CW utilizando moduladores reflectivos *colourless* que operam na gama total do comprimento de onda *upstream*. O ONU reflectido (R-ONU) desenvolvido no PIEMAN será baseado em combinações monolíticas integradas de SOAs e EAMs, ou uma variante básica desta configuração.

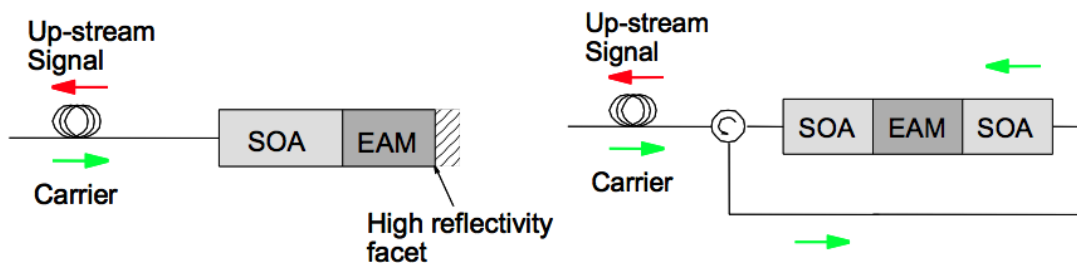


Figura 3.6: Desenho esquemático do R-ONU [PIEMAN, 2006].

Uma potencial desvantagem desta abordagem é que, visto que pelo menos uma parte do caminho da fibra óptica entre o cliente e o Rx *upstream* são partilhados pela transportadora óptica e pelo sinal *upstream*, então o *Rayleigh back-scattering* (RB) e o *Fresnel back-reflections* podem levar a interferências devido ao ruído de batimento, limitando o *split* que pode ser alcançado na rede. No entanto, apesar do nível de reflexão no sentido inverso poder ser, em princípio, controlado, o RB é um fenómeno intrínseco na propagação da fibra e assim sendo, o seu nível é determinado pelo tipo e configuração utilizada na fibra. Desta forma, é importante para o PIEMAN que se consiga alcançar um conhecimento dos fundamentos da geração do ruído de *Rayleigh* e simultaneamente desenvolver estratégias de migração adequadas.

3.3.1.4 Utilizando R-ONUs em arquitecturas existem duas contribuições de RB

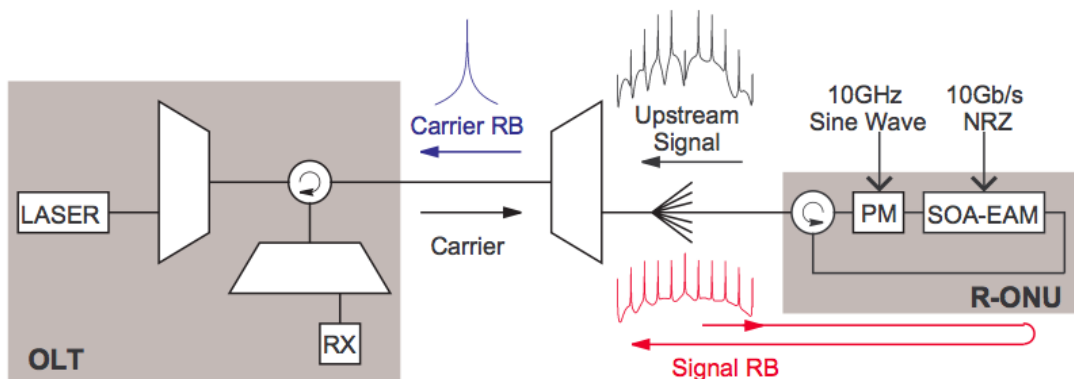


Figura 3.7: Esquema de arquitecturas com R-ONU usando um alargamento temporal PM e mostrando componentes CB e SB Rayleigh [PIEMAN, 2006].

Um exemplo de uma possível técnica de atenuação que está actualmente em estudo no PIEMAN acrescenta um modulador de fase (PM) na ONU, com o objectivo de reformular o espectro do sinal *upstream*. O PM é propositadamente levado ao limite com uma sinusóide de 10GHz de forma a gerar várias bandas e para suprimir comprimento de onda de centro. Isto reduz a sobreposição com luz reflectida no sentido inverso, diminuindo assim o ruído de batimento localizado na largura de banda do receptor (Rx).

Outra possível abordagem para este problema é simples, no entanto é bastante eficiente: utiliza uma segunda fibra *feeder* de forma a entregar o *carrier*, reduzindo assim a potência total do RB no receptor.

Foi desenvolvida uma rede PIEMAN para efeitos de teste, levando em conta ambos os métodos previamente descritos de forma a obter a potencial extensão do *splitting ratio* através da redução do ruído de *Rayleigh*.

Há uma pesquisa a ser presentemente desenvolvida de forma a determinar qual o método óptimo de atenuação de *Rayleigh* e o design R-ONU associado para a rede PIEMAN [PIEMAN, 2006].

3.3.1.5 Conclusão

O projecto PIEMAN contribuiu para abranger larguras de banda na ordem dos 10Gb/s, tanto na direcção *upstream* como *downstream*; além disso, atingiu uma redução de custos energéticos e operacionais devidos à junção da rede de acesso e metropolitana, que são, de um modo geral, os requisitos para as tecnologias XG-PON e 10 G-EPON.

Para a tecnologia NG-PON2, este projecto provou que pode ter 10 Gbit/s compartilhado com 512 clientes, o que leva a que para os 1000 clientes desejados para a tecnologia seja uma realidade a atingir e também para os 40Gbit/s agregados de capacidade.

Outro facto importante, vindo do projecto PIEMAN é o design proposto de uma distância de 100km entre o cliente e o nó de acesso que pode contribuir para um dos requisitos que é o alcance da próxima geração de redes.

Como foi referido anteriormente, a tecnologia WDM não tem sido utilizada em FTTH devido aos altos custos que tem, mas com a descoberta de novos componentes para a sua arquitectura, torna-se atractiva. O PIEMAN tem contribuído para isso com os amplificadores incolor SOA-REM para o transmissor reflectivo da ONU ou, como alternativa, com o uso de *tuneable lasers*.

O projecto utilizou DWDM (abordagem híbrida WDM/TDMA) e como satisfaz alguns requisitos mínimos para NG-PON2, pode ser uma boa tecnologia candidata para este; além disso, propõe componentes para melhorar as despesas de WDM.

Por fim, elaborou estratégias que reduziram os custos dos componentes para a próxima geração de acesso de fibra.

3.3.2 Scalable Advanced Ring-based passive Dense Access Network Architecture (SARDANA)

As redes fibra-até-casa (*fiber-to-the-home*) constituem um segmento fundamental, com o potencial necessário para corresponder à enorme capacidade das redes de transporte, para responder às novas exigências de utilizadores de comunicações, segundo uma investigação mais profunda que está a ser realizada. *Dense FTTH Passive Optical Networks* são muito eficientes em termos de custo para a construção de fibras de acesso, enquanto SARDANA é uma forma de demonstrar como, a um custo eficiente e de uma forma confiável, a largura de banda disponível através das redes de acesso de fibra óptica pode ser explorada. Este projecto pretende mudar radicalmente a escalabilidade e a robustez. A primeira é alcançada através de nós remotos em cascata, numa nova arquitectura híbrida. Isso permitirá uma migração e um crescimento mais suave, bem como a adopção de amplificação feita por impulsos remotos, a sobreposição WDM/TDM, e nós remotos em cascata numa nova arquitectura híbrida, mantendo o PON passivo e a redução do investimento na construção civil. A rede resultante será capaz de servir mais de 1000 utilizadores com simétrica na ordem das centenas de Mbit/s, distribuídos ao longo de uma distância de até 100km, em 10 Gbit/s, de uma forma flexível. Por seu lado, a robustez é alcançada através do desenvolvimento de novas estratégias de monitoramento e compensação electrónica sobre a PON, bem como pela protecção do anel central passivo.

O uso intensivo da transparência óptica e das tecnologias mais recentes optoelectrónicas permite ampliar o desempenho e a funcionalidade do PON, minimizando as necessidades de infra-estruturas em ambas as áreas urbanas e rurais.

O projecto SARDANA irá definir um caminho evolutivo para G/E-PON e para as futuras gerações de 10 Gbit/s incorporando funcionalidades de redes metropolitanas e prevendo a convergência das redes de acesso e metro [SARDANA, 2008].

3.3.2.1 Abordagem Técnica

A rede SARDANA combina WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e TDM (*Time Division Multiplexing*) para alcançar uma densidade extra-grande de utilizadores. Esta rede FTTH propõe um transporte de grandes quantidades no sentido *downstream* que é baseado num anel de WDM e árvores TDM.

Na rede SARDANA os nós remotos passivos (RN) são implementados em cascata de 2-1 de fibra óptica apresentando funcionalidades de Add&Drop e distribuição de comprimentos de onda diferentes para cada uma das árvores de acesso; a amplificação remota é introduzida no RN através de fibras dopadas de *Erbium* de forma a compensar as perdas do Add/Drop; os impulsos ópticos para a amplificação remota são feitos por lasers localizados no CO providenciando um ganho extra de Raman ao longo do anel. Relativamente aos terminais digitais, o projecto SARDANA propõem-se a reutilizar, tanto quanto possível, o equipamento *standard* G/E-PON da próxima e actual versão 10G, efectuando uma sobreposição quase transparente entre as camadas TDM e WDM.

Durante o decorrer do projecto, será construído um demonstrador da rede SARDANA planificado e operadores em multi-camadas. Os recursos do projecto também serão demonstrados num teste de campo, proporcionando a geração de novos serviços bidireccionais para clientes residenciais.

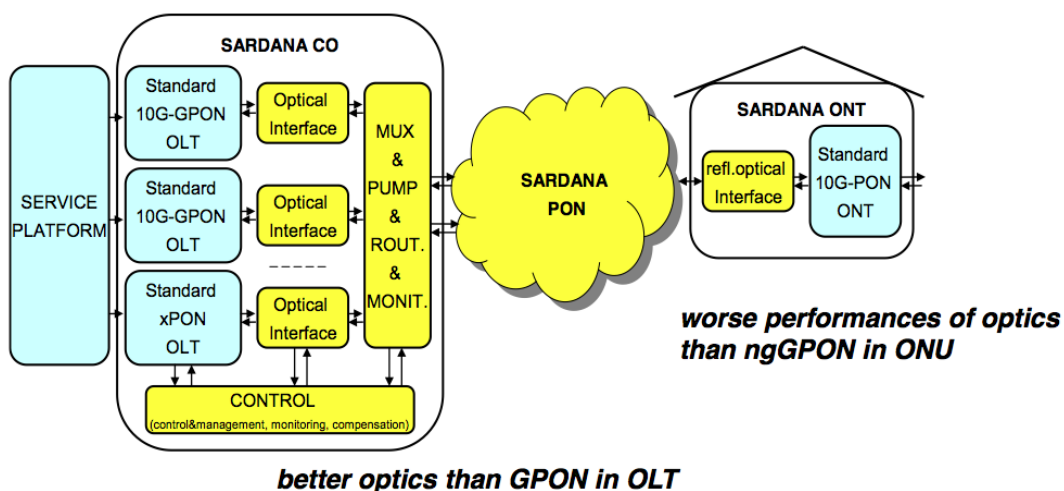


Figura 3.8 Equipamento do SARDANA [SARDANA, 2008].

3.3.2.2 Arquitectura

A fim de abordar os interesses dos prestadores de serviços (largura de banda, distância, custos da ONT, potência/energia dos clientes e a segurança da rede) estão a ser desenvolvidas novas pesquisas em *Wavelength Division Multiplexing* PON ou WDM-PON.

Esta nova arquitectura de acesso (WDM-PON) utiliza uma tecnologia que os operadores de serviços implementaram por muitos anos nas suas redes de transporte, tecnologia *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM). Os sistemas de transporte DWDM geralmente enviam 32 sinais distintos numa única fibra óptica, com cada sinal operando em 10Gbps, para um total de 320Gbps por fibra em cada direcção.

Na figura 3.9, demonstra-se que a arquitectura aborda as características já mencionadas. A figura 3.9 mostra o sistema do OLT no CO, este está ligado a múltiplos RN através de duplos anéis ópticos. Cada nó remoto liga-se à ONU através de um ponto-multiponto óptico, em árvore semelhante a uma topologia ponto-multiponto como no sistema G-PON.

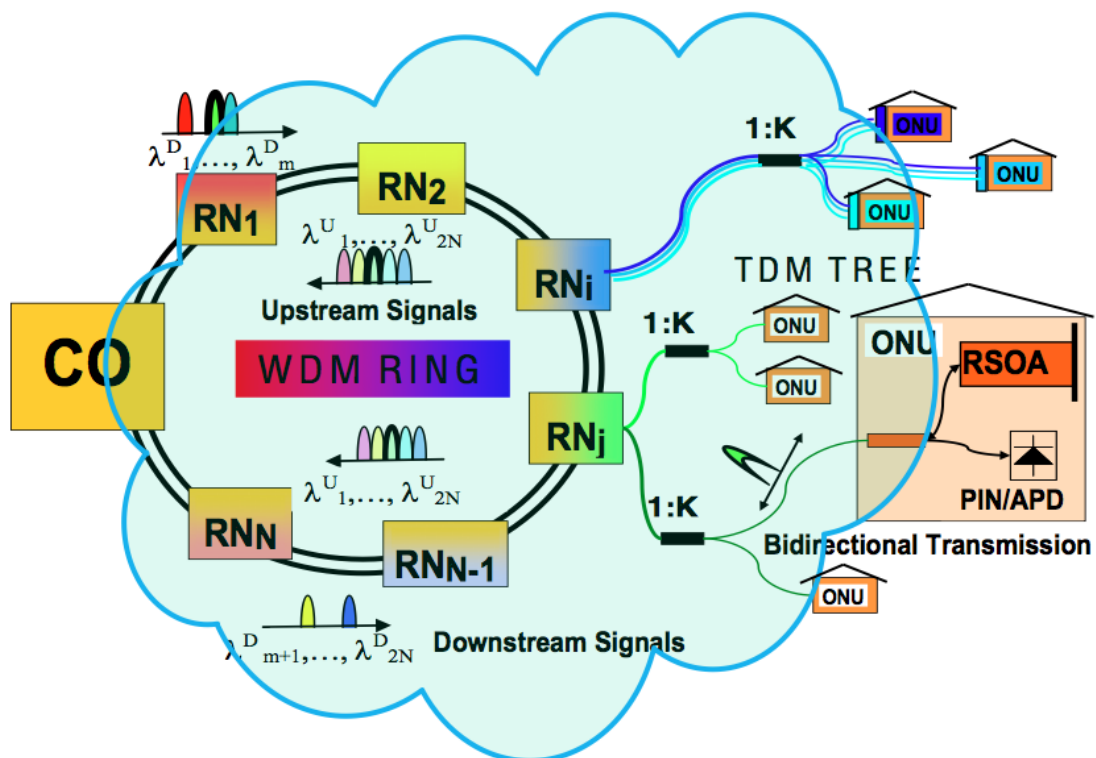


Figura 3.9: Arquitectura do projecto SARDANA. [SARDANA].

Na rede SARDANA, o sistema do OLT tem um *array* fixo de comprimentos de onda distribuídos de *feedback lasers* DWDM, modulados com 10Gbps de sinal *downstream*. Antes de serem transportados para o anel de comprimentos de onda diferentes, são combinados com *Array Waveguide Gratings* (AWG). Os comprimentos de onda também

podem ser transportados na direcção oposta, fornecendo protecção da fibra de possíveis cortes no anel. Todo o RN tem filtros DWDM para soltar um ou mais comprimentos de onda interessantes para o cliente. O OLT contém um *laser* bomba que lança sinais DWDM de *downstream*, fornecendo à rede características de um sistema completamente passivo a partir do CO da ONU até ao local do cliente. O RN contém fibras dopadas com *erbium* (EDF) que amplifica os comprimentos de onda DWDM para superar as perdas ópticas, devido à propagação e divisão. O sinal amplificado será então encaminhado da secção ponto-multiponto óptica em árvore da rede para a ONU do cliente, permitindo que as ONUs estejam até 100Km de distância do OLT no CO e continuem a funcionar correctamente.

Quando um comprimento de onda atinge a ONU, a sua potência será dividida em dois sinais. Um vai para um fotodiodo para detectar o sinal *downstream*, e o outro será usado como uma semente de comprimento de onda a ser modulado com um sinal *upstream* de até 10Gbps. O sinal *upstream* modulado é então amplificado e reflectido de volta com um amplificador óptico remoto semiconductor. O comprimento de onda do RSOA é agnóstico, por isso pode amplificar qualquer comprimento de onda DWDM. Futuramente, na direcção *upstream*, o sinal *upstream* será amplificado no RN onde será combinado com outros comprimentos de onda *upstream* no segundo anel da rede antes de chegar à OLT [SARDANA].

3.3.2.3 Benefícios do SARDANA

A rede SARDANA tem recursos suficientes para se tornar uma solução a longo prazo. A arquitectura combina ambas as redes de acesso e metro e permite que o OLT atinja os clientes com uma distância de 100km deles até à *central office*, permitindo aos fornecedores de serviços alcançar clientes em zonas remotas e também minimizar o número de *central offices* com os OLTs.

A arquitectura é totalmente escalável, em cascata, e é também compatível com os sistemas G-PON actuais. Os comprimentos de onda na CO e nos nós remotos podem ser adicionados conforme necessário. Na rede G-PON de hoje em dia pode ser implementada com o comprimento de onda de 1490 nm na direcção *downstream* e 1310 nm na direcção *upstream*. À medida que a rede SARDANA cresce, poderá utilizar comprimentos de onda aproximados aos dois do G-PON, e fornecer serviços WDM-PON, enquanto os serviços G-PON são ainda fornecidos aos clientes G-PON já existentes, garantindo assim que não irá haver quebra de serviços à medida que a rede WDM-PON é aplicada

Por outro lado, fazendo uso da tecnologia DWDM permite-se um grande aumento da largura de banda total disponível em cada *interface* do OLT. O comprimento de onda pode ser dedicado aos “clientes mais importantes” (por exemplo, os clientes de negócios) que exigem taxas de dados até 10Gbps. Alternativamente, o comprimento de onda pode

ser compartilhado entre 32 clientes para fornecer 312Mbps dedicados por cliente, ou ainda entre 64 clientes para oferecer 155 Mbps dedicados por cliente.

Outro benefício do projecto SARDANA é o uso de um dispositivo reflectivo na ONU, a fim de tornar a arquitectura tão rentável quanto possível. Embora existem várias outras soluções para dispositivos reflectivos, mas a que tem um desempenho mais próximo da solução desejada é o RSOA. Ao eliminar a necessidade de um laser caro no sentido *upstream*, a ONU necessita de menor energia, o que faz com que seja mais barata do que as equivalentes que hoje existem no G-PON.

A rede WDM-PON SARDANA é totalmente passiva, incluindo a concepção do nó remoto. Futuramente, o ganho previsto no nó remoto permitirá aumentos significativos na densidade do OLT, servindo até 1000 ONUs por cada porta OLT.

Finalmente, o OLT terá uma gestão centralizada para ser capaz de manter um acompanhamento contínuo dos parâmetros-chave e, assim, compensar qualquer degradação no desempenho, causando por exemplo, a dispersão ou reflexões de *backscattering* [SARDANA].

3.3.2.4 Conclusões SARDANA

O projecto SARDANA propõe uma nova arquitectura híbrida WDM/TDM, em que a rede é capaz de servir 1000 utilizadores com simetria na ordem dos Mbit/s, distribuídos ao longo de uma fibra de 100km, em 10 Gbit/s de uma forma flexível, o que pode contribuir para alguns dos requisitos de NG-PON2, tais como o servir 1000 utilizadores, numa distância de 100km e com uma velocidade superior a 1Gbit/s.

O projecto SARDANA usa a arquitectura WDM-PON que utiliza uma tecnologia de transporte denominada DWDM. O uso de DWDM permite um aumento da largura de banda total disponível em cada interface do OLT, o que pode fazer com a que se atinja o requisito de 40 Gbit/s agregados para NG-PON2 em 2015.

Este projecto também pode vir a contribuir com as arquitecturas reflectivas na ONU, que fazem a rede ter um menor custo possível, podendo assim ser utilizadas para a futura NG-PON2.

Em suma, a arquitectura do projecto SARDANA é uma boa proposta para ser utilizada em NG-PON2, uma vez que cumpre vários requisitos mínimos; oferece flexibilidade, escalabilidade, resiliência, maior densidade de usuários e largura de banda, robustez e alcance estendido, que são características importantes para a próxima geração de FTTH.

3.3.3 A Converged Copper-Optical-Radio OFDMA-based access Network with high Capacity and Flexibility (ACCORDANCE)

ACCORDANCE introduz a tecnologia OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) no campo da óptica. A arquitectura de rede proposta tem um alcance estendido e traz capacidades muito elevadas. Além disto, esta não destina-se apenas a oferecer um melhor desempenho comparativamente com arquitecturas que utilizem TDM, mas também proporcionará a convergência entre as redes de acesso da óptica, da rádio e do cobre.

ACCORDANCE propõem-se a oferecer uma variedade de características desejadas para as novas redes de acesso com a introdução dos conceitos da tecnologia e protocolos OFDMA. Assim sendo, este projecto será capaz de fornecer um aumento da largura de banda agregada e estabilidade maior, reforça a flexibilidade na atribuição de recursos, maior alcance, menor energia e um menor custo/complexidade de equipamento. Além disso, também apoiará a operação multi-comprimento de onda.

O ACCORDANCE irá trazer como grande novidade para as arquitecturas de rede a convergência da infra-estrutura óptica com os padrões das soluções sem fios (*wireless*), oferecendo assim uma maneira de integrar as tecnologias sem fios numa rede híbrida [ACCORDANCE_2, 2010]

Os principais objectivos do projecto ACCORDANCE são:

- Definir uma nova arquitectura de rede de acesso e atingir uma convergência entre tecnologias heterogéneas (cobre, sem fio, óptica), proporcionando um baixo custo/complexidade para permitir um alto ritmo de transmissão de dados na rede de acesso (até 100 Gbps agregados e mais 10 Gbps em cada segmento);
- Introduzir conceitos de alocação de largura de banda flexível;
- Proporcionar uma migração sem problemas de coexistência com soluções de acesso anteriores e um suporte multi-operador e multi-serviço;
- Contribuir para as actividades de normalizações da próxima geração de redes de acesso [ACCORDANCE, 2010].

3.3.3.1 Arquitectura

A figura 3.10 mostra um exemplo da arquitectura global do projecto ACCORDANCE:

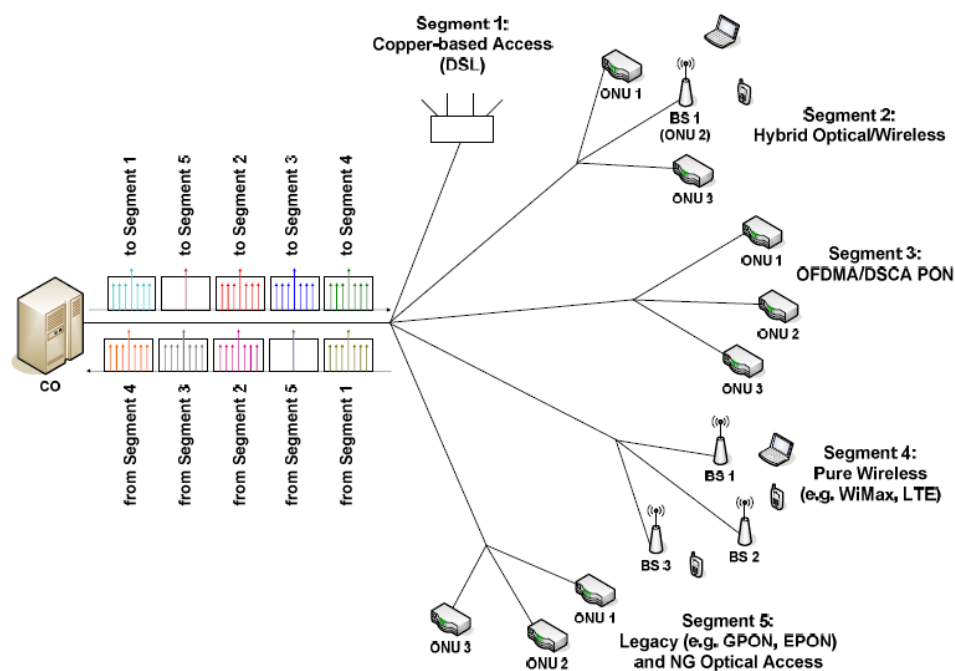


Figura 3.10: Arquitetura do projecto ACCORDANCE.
[ACCORDANCE_2,2010].

A topologia consiste na linha óptica de terminação (OLT) localizada na *central office* (CO) e várias unidades de rede óptica (ONUs) localizadas tanto para as instalações para clientes (particulares ou empresariais) ou para *wireless Base Station* (BSs) que são utilizadas para fornecer conectividade para terminais móveis. Uma única fibra óptica é alimentada pelo OLT para ser utilizada para transportar todos os sinais *upstream* e *downstream* até ao divisor de potência, que os transmite para os vários segmentos de rede. Alternativamente, algumas dessas fibras podem ser ligadas directamente a antenas *wireless*, ou a *interfaces switches* com DSL (no caso do FTTB). Portanto, o OLT gere a atribuição de tráfego para um grande número de sub-portadoras que viajam ao longo de toda a rede de distribuição óptica (ODN), que será apenas desmultiplexada no lado dos clientes e vice-versa. As sub-portadoras são agrupadas para formar canais de FDM, sendo que este pode conter várias centenas de sub-portadoras que constituem apenas um canal; cada canal pode ser utilizado para o transportar tráfego por diferentes operadores utilizando diferentes tecnologias, tais como, por exemplo GPON, EPON, etc.

Resumindo, a CO pode ser visualizada como sendo um OLT PON, mas onde combina funcionalidades adicionais de um DSLAM ou de uma BS *wireless*. Utiliza multiplexagem por divisão da frequência (FDM) para endereçar diferentes segmentos de rede, que podem ser classificados da seguinte forma, como ilustrado na figura 3.10:

- OFDMA/DSCA PONs: o termo implica segmentos de rede onde em cada janela de sub-portadoras FDM são atribuídos dinamicamente (Dynamic Sub-Carrier Attribution - DSCA) segmentos para diferentes ONUs, ou seja, a

multiplexação ocorre na maior parte na sub-portadora. É também possível seguir a proposta TDMA, para que cada sub-portadora seja compartilhada entre ONUs no domínio do tempo.

- *Pure Wireless*: Neste caso, um conjunto de sub-portadoras numa janela de FDM é dedicado a um grupo sem fio de estações base (BS), que realmente incorporam a funcionalidade de uma ONU. Então, as técnicas de *rádio-over-fiber* (RoF) ou *digital-over-fiber* (DoF) podem ser usadas para transportar os sinais correspondentes de OFDM *wireless* através da infraestrutura óptica.
- *Hybrid Optical – Wireless*: Este tipo de acesso pode ser visto como uma mistura dos casos referidos anteriormente, segundo o qual os clientes de *wireless* podem coexistir e partilhar as sub-portadoras dentro da mesma janela FDM.
- *Legacy or Next-Generation Optical Access*: Neste caso de tecnologias como o EPON ou G-PON, bem como as actualizações dos protocolos base de TDMA, OFDM só podem ser utilizados como um método de modulação, em vez de acesso múltiplo.
- *Copper-based Access*: Isto é conseguido usando janelas FDM como tubos transparentes para a transmissão do sinal correspondente DMT até aos clientes DSL e vice-versa [ACCORDANCE_2, 2010]

3.3.3.2 Aspectos da camada física

O principal benefício do OFDM é que cada uma das sub-portadoras que transmite em paralelo tem um *bitrate* muito inferior do que o do agregado, tornando-as menos susceptíveis a deficiências como a dispersão cromática e a resposta E/O. Logo, dados agregados de vários Gbps podem viajar a distâncias muito maiores sem a necessidade de módulos de compensação de dispersão e rácios de separação elevados, enquanto outros trabalhos têm mostrado que sinais OFDM são mais robustos relativamente à luz *backscattered* do *Rayleigh* do que sinais NRZ, utilizados em típicas arquiteturas PON. Devido a isto, uma maior base de clientes pode ser coberta por cada CO reduzindo o custo de implementação e manutenção das COs. Mais ainda, os clientes distantes podem ter cobertura facilmente. Adicionalmente, o OFDM permite uma eficiência espectral superior, uma vez que, a ortogonalidade das sub-portadoras lhes permitem serem colocadas muito próximas umas das outras e terem uma interferência baixa. Além disso, há a possibilidade de alocação de bits por cada sub-portadora e de estes serem flexíveis e adaptativos em adição à escolha específica da sub-portadora. Isso permite ao sistema adaptar o formato de modulação e distribuir a potência disponível às diferentes ONUs, ao

mesmo tempo que leva em conta a qualidade do *link*, bem como o rácio de dados necessários em cada um [ACCORDANCE, 2010].

3.3.3.3 CONCLUSÕES

O projecto ACCORDANCE propõe uma arquitectura que, através do uso de FDM combinado com a multiplexação OFDM, pode acomodar ao mesmo tempo qualquer cliente de qualquer tipo de tecnologia de rede de acesso o que é uma boa hipótese para NG-PON2, fazendo com que esta, tenha uma globalização de todas as tecnologias existentes numa única infra-estrutura.

O ACCORDANCE adopta uma abordagem em que o sinal OFDM é dividido em várias sub-portadoras de *bitrate* baixo, o que melhora a propriedade de transmissão do sinal. Desta forma, a modulação de dados OFDM pode agregar vários Gbps em longas distâncias. O resultado final é que cada CO pode cobrir uma base muito maior de utilizadores, o que reduz desta forma o custo da rede em termos de CAPEX e OPEX o que será sempre um objectivo a cumprir para novas redes de acesso.

Esta rede oferece altos ritmos de transmissão que podem chegar a atingir até 100Gbps, com mais de 10 Gbps para cada segmento de rede além disso apresenta um baixo custo/complexidade e também maiores alcances o que contribuirá para a criação do *standard* de NG-PON2 e também para que tipo de tecnologia esta irá utilizar.

3.3.4 Generalized Architecture for Dynamic Infrastructure Services (GEYSERS)

Actualmente, pretende-se criar uma arquitectura de rede que englobe quase todas as tecnologias de acesso, ou seja, deverá existir uma infra-estrutura de fibra óptica conjugada com as tecnologias de informação (IT, *information technology*) de forma a suportar uma globalização de serviços. No decorrer dos anos, a escala de processamento de informação cresce cada vez mais, como também a necessidades de largura de banda para os clientes. Além disto, o aparecimento de serviços cada vez mais exigentes, tais como o IPTV, jogos 3D, mundos virtuais, etc impulsiona a uma grande performance e qualidade dos recursos IT, que actualmente não existem. Assim sendo, as futuras redes de acesso serão pressionadas a efectuar alterações/inovações, de forma a melhorar a actual resposta ao crescendo de novos serviços.

Devido aos factos enunciados anteriormente, a nova arquitectura de rede deverá integrar os recursos IT com as várias tecnologias de redes ópticas. Além disto, deve também fornecer uma infra-estrutura de serviços personalizados, para facilitar a integração perfeita dos segmentos ópticos com as tecnologias de rede. Por fim, os operadores de telecomunicações deverão ainda fornecer maior largura de banda e recursos com alto desempenho de serviços de conectividade para aos utilizadores.

Em suma, o projecto GEYSERS tem como objectivo principal o fornecimento de uma nova arquitectura com capacidade de articulação de recursos IT e de rede de fibra óptica. Este novo conceito de rede permite que os operadores e fornecedores de rede operem dinamicamente e rentavelmente as suas diversas aplicações. Esta proposta também é complementada com os estudos de novos modelos de negócio, criando uma forma mais eficaz e económica de articular o fornecimento de serviços e de IT da rede, de forma a superar as limitações que existem nos modelos estáticos actuais [Biancani, 2010].

3.3.4.1 Arquitectura

Um dos objectivos do projecto GEYSERS é definir uma futura arquitectura de rede que permita serviços ponta-a-ponta, uma composição perfeita e energeticamente eficientes e uma prestação de serviços complexos feitos de ambos os recursos ópticos e IT.

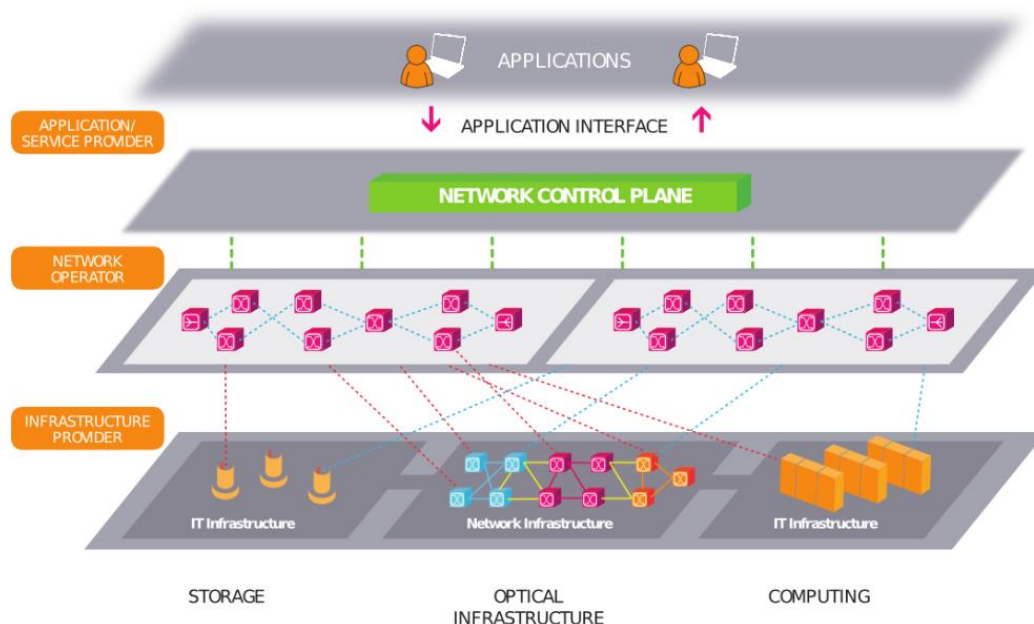


Figura 3.11: Arquitectura do projecto GEYSERS [Biancani, 2010].

O projecto GEYSERS propõe uma visão de arquitectura sobre uma abordagem evolutiva, que segue a estratégia apresentada na figura 3.11 de rede central de baixo para cima, começando pela infra-estrutura passando pelo operador de rede e por fim pelas aplicações.

A infra-estrutura fotónica será dividida de forma a criar infra-estruturas lógicas especificadas as compostas por elementos de rede óptica e recursos IT, o que conseguirá ultrapassar as limitações das redes actuais. Cada infra-estrutura é controlada por um

plano de controlo de rede, capaz de fornecer os serviços da rede óptica conjuntamente com os recursos IT à medida que são pedidos. Assim, através do GEYSERES o fornecedor da infra-estrutura será capaz de fornecer um conjunto de serviços que englobe os serviços de rede óptico com os recursos IT [Biancani, 2010].

Este projecto permitirá que os fornecedores de infra-estrutura possam desenvolver infra-estruturas lógicas, que serão fornecidas aos operadores de rede. Por sua vez, os operadores de rede irão utilizar redes específicas com técnicas de controlo integradas e com um custo eficiente. Assim, permite que os fornecedores de infra-estruturas, os operadores de rede e os fornecedores de aplicações possam participar em novos cenário de migração, em requisitos de largura de banda e serviços complexos [GEYSERS, 2010].

3.3.4.2 Conclusão

O projecto GEYSRES irá fornecer um plano de controlo melhorado da rede que permitirá aos operadores de rede fornecer serviços complexos de ponta-a-ponta, controlados por uma rede de fibra óptica e de recursos IT, com alocação dinâmica de funcionalidade e capacidades de comprimento de onda. Isto contribui com o facto de poder ter várias tecnologias e recursos IT a trabalharem em conjunto numa única arquitectura. Esta característica que permite uma globalização de serviços, recursos e tecnologias é desejada para as futuras redes de acesso.

3.3.5 Metro Architectures enabling Subwavelengths (MAINS)

O projecto MAINS tem como objectivo criar uma arquitectura de rede metro-regional pré-comercial. Além disto, esta arquitectura também será capaz de oferecer eficiência em termos de custos para os futuros serviços, uma grande escalabilidade, menor consumo de recursos, maior fiabilidade e menor latência comparativamente com as redes metro actuais.

A arquitectura da rede metro proposta no MAINS é fundamentalmente baseada em duas tecnologias fundamentais: Tecnologias de comunicação óptica no *subwavelength* (*subwavelength optical switching technologies*) no plano de dados (ou seja rajadas de pacotes ópticas), e numa arquitectura que reforce o controlo de sub-lambdas que facilite a interacção entre a rede e os recursos IT. Por outro lado, também é proposto que se facilite a introdução de novos serviços juntamente com os recursos de rede (banda larga) e recursos IT (armazenamento de conteúdo e computação) fornecidos pelos operadores de rede.

As questões que o MAINS visa resolver são o custo-eficiência, propor uma nova rede baseada na combinação de dados e soluções inovadoras no plano de controlo, sugerir um novo *standard* no plano de controlo e implementar protótipos na rede metro

que compõem o software de dados e de controlo e implementações de hardware [MAINS, 2010].

3.3.5.1 Conclusões

A grande contribuição que o projecto MAINS poderá fornecer para as novas redes de acesso são as capacidades avançadas de controlo que oferece para a interacção de várias aplicações de rede. Além disso, este projecto visa um aumento da eficiência económica no acesso de infra-estruturas de transporte, dado que é capaz de enfrentar o aumento de tráfego esperado de uma forma mais escalável que as actuais arquitecturas baseadas em IP.

3.3.6 Optical Access Seamless Evolution (OASE)

O projecto OASE tem como objectivo o desenvolvimento e a avaliação da arquitectura de rede de próxima geração. Estes conceitos serão avaliados para o ano 2020. OASE irá analisar soluções baseadas em regulação, aspectos financeiros, técnicas e modelos de negócio em arquitecturas FTTH.

Assim, a arquitectura de próxima geração de redes de acesso deverá permitir a custo eficientes, pelo menos 1Gb/s de velocidade por cada cliente, permitir também ter 1000 clientes alimentados por fibra e ter um alcance de transmissão de pelo menos 100km.

Assim, OASE será um projecto que irá fazer um estudo operacional, económico e comercial das redes de acesso. Com base nisto, poderá propor arquitecturas de rede que cumpram os requisitos enunciados anteriormente, como também propor redes que sejam eficientes em termos energéticos e que também apresentem baixos custos técnicos [OASE, 2010].

3.3.6.1 Conclusão

Este projecto ainda se encontra numa fase inicial, mas a longo tempo contribuirá para NG-PON2 com o estudo económico da rede, uma vez que um dos requisitos é ter uma nova rede com custos em termos de CAPEX e OPEX mais baixos que as redes anteriores.

3.3.7 Resumo

	FP6	FP7	FP7	FP7	FP7	FP7
Requisitos	PIEMAN	SARDANA	ACCORDANCE	GEYSERS	MAINS	OASE
1Gbit/s	✓	x	✓	ND	ND	✓
1000 Utilizadores	x	✓	ND	ND	ND	✓
100 km	✓	✓	✓	ND	ND	✓

Tabela 3.2: Resumo da contribuição dos vários projectos para os requisitos genéricos da próxima geração de redes (ND-Não Descrito).

	FP6	FP7	FP7	FP7	FP7	FP7
Requisitos NG-PON2	PIEMAN	SARDANA	ACCORDANCE	GEYSERS	MAINS	OASE
40 Gbit/s de capacidade agregada	✓	✓	✓	ND	ND	ND
Simetria sustentável de 1Gbit/s por ONU	x	x	✓	ND	ND	ND
64 divisores passivos	ND	ND	ND	ND	ND	ND
20 km Básicos de alcance	✓	✓	✓	ND	ND	✓
60 km de alcance extendido	✓	✓	✓	ND	ND	✓
Redução dos custos energéticos	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabela 3.3: Resumo da contribuição dos vários projectos para os requisitos de NG-PON2 (ND- Não Descrito).

4 Tecnologias para NG-PON2

4.1 Introdução

Esta secção tem como propósito apresentar as várias tecnologias para NG-PON2, tais como Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda da Rede Óptica Passiva (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network*, DWDM-PON), Acesso Óptico Múltiplo por divisão de Código da Rede Óptica Passiva (*Optical Code Division Multiple Access Passive Optical Network*, OCDMA PON), Multiplexagem por Divisão da Frequência Ortogonal na Rede Óptica Passiva (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network*, OFDM-PON), Detecção Coerente de Rede Óptica Passiva (*Coherent Detection Passive Optical network*, Coherent PON) e Ultra Densa Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda da Rede Óptica Passiva (*Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network*, UD-WDM PON). Por fim, propor as melhores tecnologias que se adequem aos requisitos para NG-PON2.

4.2 IM-WDM- PONS

As redes ópticas passivas utilizam o WDM desde os finais da década de 80, dado que este disponibiliza um método de partilhar a capacidade de um PON entre vários utilizadores e oferece vantagens em termos de capacidade, baixa latência e serviços transparentes. Embora tenha surgido há alguns anos, só recentemente é que se tornou comerciável esta tecnologia. O interesse em IM-WDM-PONs, ultimamente, tem crescido significativamente, especialmente em partes da Ásia, e é proposto como válido para as próximas gerações de PONs [WDM].

A multiplexação por divisão do comprimento de onda é uma tecnologia onde vários sinais ópticos são multiplexados numa única fibra de transporte. Estes vão utilizar diferentes comprimentos de onda laser (cores de luz) para o transporte de vários sinais diferentes. Isto possibilita as comunicações bidireccionais ao longo de um fio de fibra, permitindo também uma multiplicação da capacidade disponibilizada [Wikipedia, WDM].

No sistema WDM cada canal de comprimento de onda pode operar a uma taxa abaixo da taxa transmitida pela fibra, o efeito é o de aumentar dramaticamente a capacidade do *link* de transmissão. Isto é muito útil quando existe uma falta de fibra de reposição numa determinada rota. Por estes motivos, os sistemas WDM tornaram-se muito conhecidos. Os sistemas actuais e WDM permitem centenas de canais de alta velocidade TDM (multiplexação na divisão do tempo, *time division multiplexing*) para ser multiplexados juntos numa única fibra.

O princípio desta tecnologia é ilustrado na figura 4.1. Nesta figura observa-se três canais TDM, onde cada um dos três canais de TDM é modulado utilizando diferentes comprimentos de onda e multiplexados juntos. Cada comprimento de onda propaga-se de forma independente ao longo da fibra.

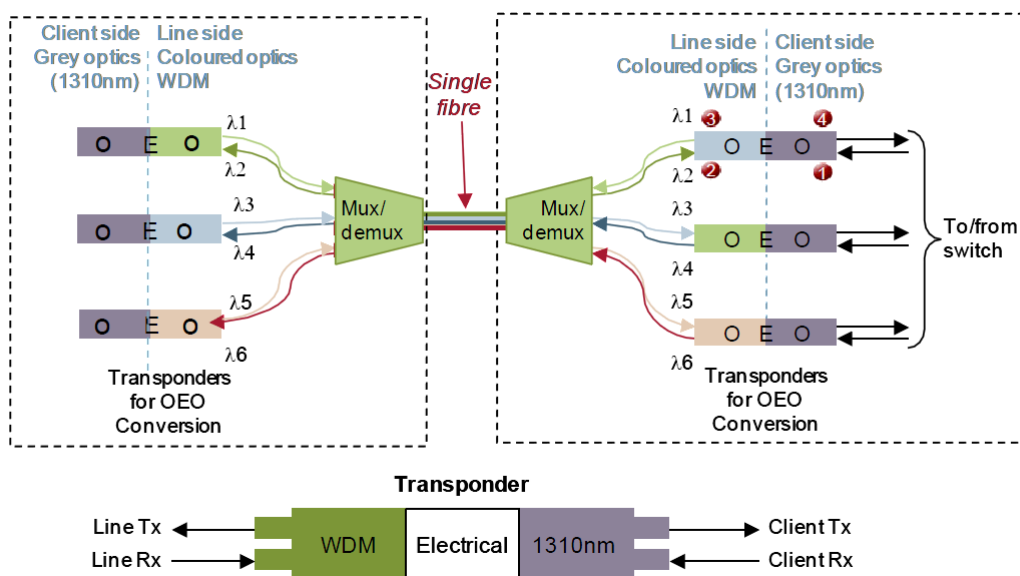


Figura 4.1: Sistema WDM [WDM, 2010].

Como observa-se na figura 4.1, um dos componentes principais dos sistemas WDM é um *transponder*. Entende-se *transponder* como sendo um dispositivo que adapta um sinal óptico de sem comprimento de onda especificado a um com comprimento de onda especificado em 1310nm, ou seja realiza-se uma conversão OEO (óptico para electrónico para óptico, *optical to electronic to optical*), como ilustrado na figura 4.1.

Para uma melhor compreensão do funcionamento de um *transponder* pode-se ver pela figura 4.1 que o sinal *downstream* é recebido desde o switch até à porta 1, com um comprimento de onda de normalmente 1310 nm. De seguida o sinal passa através do conversor OEO sendo retransmitido com comprimento de onda λ2 e enviado através da porta 2 indicada na figura 4.1. O sinal é então de seguida multiplexado através de um multiplexador WDM e encaminhado para o seu destino. Analisando o sentido inverso (*upstream*), o sinal é recebido pelo transponder na porta 3 com o comprimento de onda λ1, sendo de seguida submetido a uma conversão OEO. No fim o sinal será encaminhado para o switch com um novo comprimento de onda de 1310nm imposto pelo *transponder*.

Fundamentais também para os sistemas WDM são os multiplexadores e desmultiplexadores de comprimento de onda, utilizados para multiplexar vários comprimentos de onda provenientes de vários clientes ou CO, permitindo que estes sejam transportados ao longo de uma única fibra. Estes são implementados através de vários dispositivos AWG.

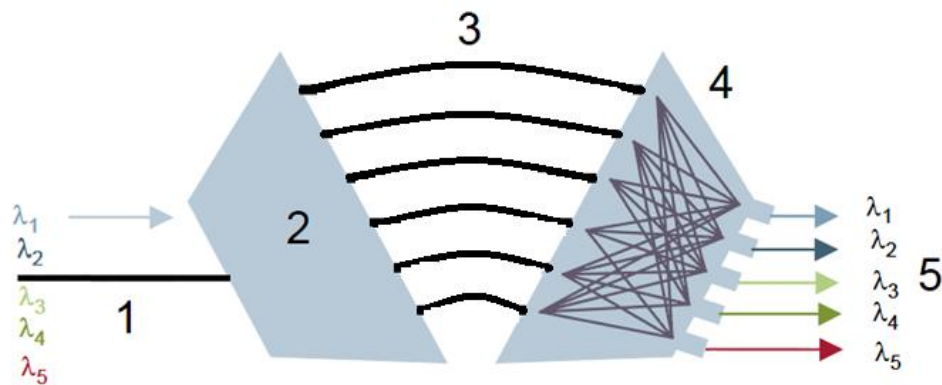


Figura 4.2: Dispositivo AWG [WDM, 2010].

Este dispositivo, cujo funcionamento é exemplificado na figura 4.2, baseia-se na propriedade construtiva e destrutiva da interferência entre ondas. O funcionamento apresentado na figura pode ser explicado através dos seguintes pontos:

1. Quando a luz é recebida por os comprimentos de onda atravessa um espaço livre;
2. Entra de seguida na série de guias de onda do canal;
3. Cada guia de onda tem um tamanho próprio, uma vez que são feitos para comprimentos de onda diferentes, implicando que à saída os comprimentos de onda irão ter fases diferentes;
4. Os sinais provenientes dos guias de onda seguem para um novo espaço livre;
5. Com base no princípio de interferência das ondas de luz, cada porta de saída receberá um único comprimento de onda.

O mesmo processo pode-se repetir no sentido oposto [WDM, 2010].

Então, com base nos diferentes espaçamentos dos comprimentos de onda multiplexados, diferentes classificações podem ser atribuídas aos sistemas WDM:

- Sistemas *coarse* WDM (CWDM);
- Sistemas *dense* WDM (DWDM).

Nestas duas classificações, os sistemas CWDM suportam menos de 16 comprimentos de onda multiplexados por fibra, enquanto que os sistemas DWDM suportam mais de 32 multiplexações de comprimento de onda por fibra. Estes últimos podem ainda ser estendidos até 320 multiplexações de comprimento de onda por fibra em aplicações de longa distância.

Os sistemas CWDM são menos sofisticados, possuindo comprimentos de onda com um maior espaçamento do que os sistemas DWDM. Desta forma tornam-se menos dispendiosos do que os sistemas DWDM. Um transmissor típico para estes sistemas é um laser *Fabry Perot*. Foi desenvolvido pela ITU um canal de 20 nm de espaçamento de grade

para os sistemas CWDM, utilizando comprimentos de onda de sinal entre 1271 nm e 1611 nm, tal como ilustrado na figura 4.3:

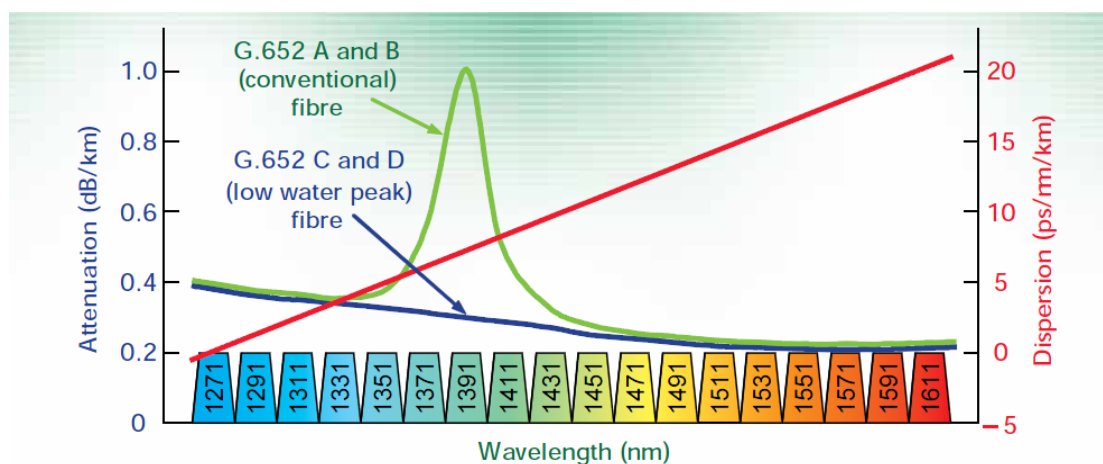


Figura 4.3: 20 nm de grade de CWDM [WDM, 2010].

A resultante tecnologia CWDM pode então suportar até 16 canais por cada fibra convencional (no máximo 18 canais por fibra *water peak* como também ilustrado na figura 4.3). Um facto importante a realçar é a baixa absorção do *water peak* que é preferível para sistemas CWDM, uma vez que estes utilizam a banda E. O largo espaçamento de canal foi feito para se conseguir uma *framework* WDM eficiente em termos de custos e que ao mesmo tempo seja capaz de acomodar lasers mais baratos [WDM, 2010].

A principal desvantagem dos sistemas CWDM é o número de canais limitado, criando problema de escalabilidade em comparação com os sistemas DWDM. Por outro lado, quanto menor for o comprimento de onda dos canais, maior é a perda, limitando assim a distância de transmissão ou relação de separação. Isto pode ser observado na figura 4.3 [WDM, 2005].

Já os sistemas com DWDM tendem a ser utilizados para níveis mais elevados na infra-estrutura de rede, uma vez que possuem uma maior capacidade comparativamente aos sistemas CWDM. Isto deve-se ao facto de suportarem uma gama mais vasta de comprimentos de onda, dependendo do espaçamento variável que utilizam. A ITU especificou uma grade de frequências para sistemas DWDM, que consiste em 0,8 nm (100GHz) de espaçamento entre canais. De forma a esta grade ser mais prática, foi estendida para fornecer 50 GHz (0,4nm) e 25GHz (0,2 nm) de espaçamento. Actualmente, alguns sistemas comerciais de DWDM utilizam a grade de 25Ghz, capaz de fornecer até 160 comprimentos de onda na banda C e outros 160 comprimentos de onda na banda L. São assim, fornecidos no máximo até 320 comprimentos de onda por fibra para as mais diversificadas aplicações.

Os lasers usados em sistemas DWDM tem de ser mais estáveis do que os que se utilizam nos sistemas CWDM. Isto é justificado pelo facto de que o espaçamento do canal é inferior, pelo que é necessário uma maior precisão no instante em que o comprimento de onda necessário. Estes também devem ter um controlo preciso da temperatura para evitar dispersão do comprimento de onda central muito estreito [WDM, 2010].

Dos sistemas com DWDM-PON é esperado que sejam muitos úteis para o fornecimento de largura de banda suficiente para muitos clientes.

Portanto, o DWDM-PON custa mais em termos de implementação de campo do que os sistemas CWDM, uma vez que necessita de dispositivos de comprimento de onda ajustados e controle de temperatura. No entanto, por outro lado, fornece um número significativo de comprimentos de onda [WDM, 2005].

4.2.1 CWDM-PON: 4 x 10 Gb/s

Desde de alguns anos que as capacidades das redes PON tem vindo a aumentar continuamente desde de velocidades de 155Mb/s para 622Mb/s até à G-PON de hoje em dia e até à próxima geração de normas da ITU e do IEEE de 10 Gb/s TDM PON.

Para atingir a velocidade de 40Gb/s de capacidade simétrica (4 x 10 Gb/s) é proposta nesta secção um sistema CWDM-TDM PON híbrido. Apresenta-se uma arquitectura com um nó remoto simplificado (RN, *remote node*) que é activado por um ciclo de 1:4 CDWM *multiplexer/demultiplexer* (mux/dmux).

A montagem experimental da arquitectura para atingir-se 40Gb/s de capacidade agregada é ilustrada na figura 4.4.

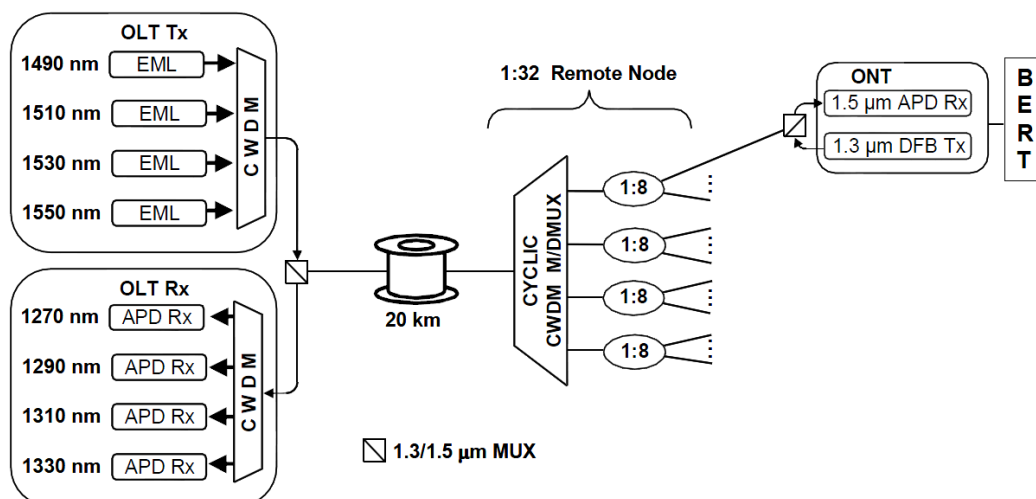


Figura 4.4: Montagem experimental de um sistema PON híbrido com 40 Gb/s de capacidade em ambas as direcções [CWDM, 2009].

O terminal de linha óptica (OLT) que se encontra na *central office* está ligado ao ONT através de um fibra com distância de 20 km e por um *remote node* de 1:32. A fibra de 20km utilizada é uma *water peak* para poder reduzir a absorção. O RN está ligado a 32 terminais de rede óptica é constituído por um *cyclic* de 1:4 mux/dmux CWDM e por divisores passivos de 1:8.

Tal como se pode observar na figura 4.5 os resultados experimentais mostram que a utilização dos oito comprimentos de onda não degrada significativamente o desempenho do sistema:

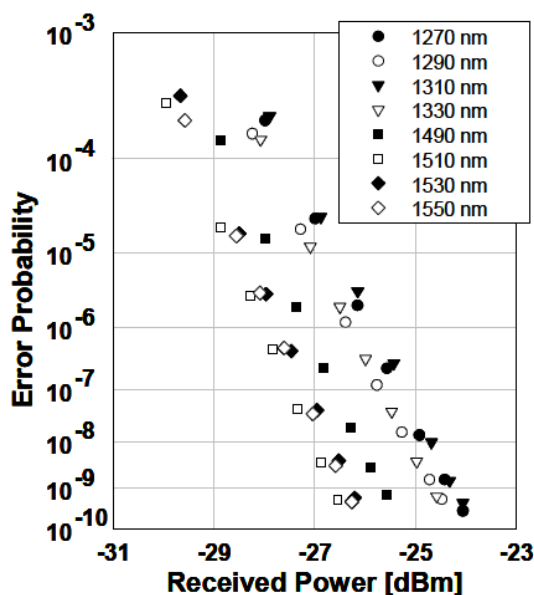


Figura 4.5: Performance da taxa de erro de bits (BER) quando se utiliza os oito comprimentos de onda. (Os símbolos escuros e abertos representam a linha base *back-to-back* do receptor comercial APD e dos dados de canal único correspondentes ao longo do sistema de 20 km) [CWDM, 2009].

Após a realização experimental desta arquitectura e a observação dos resultados conclui-se que o sistema de 40 Gb/s CWDM-TDM PON utilizando um *cyclic CWDM mux/dmux* aproveita as tecnologias de *transceivers* que já estão a ser actualmente desenvolvidos comercialmente para 10 Gb/s em sistemas TDM PON. Se, se desenvolver um sistema baseado neste projecto será provavelmente exigido FEC [CWDM, 2009].

Atingir o 40Gb/s também é possível com a técnica DWDM mas como foi referido anteriormente um sistema com esta técnica fica sempre mais dispendioso e por consequente não será referida essa hipótese.

Existe outras técnicas com os sistemas WDM-PON, tais como o uso de RSOAs, o uso de *colourless* ONT, transmissores *tunable* mais RSOA e *bit-stacked* mas não serão referenciadas uma vez que não conseguem atingir a largura de banda necessária nem os outros requisitos que estão salientados na secção 3 para NG-PON2 num prazo até 2015.

4.3 OCDMA-PON

As actividades recentes no campo de investigação têm vindo a propor que a divisão de código de acesso óptico de múltiplas tecnologias (OCDMA) seja uma alternativa à ideia global de que a próxima geração de redes terá uma evolução geral para a tecnologia WDM-PON. OCDMA, bem como WDM, oferecem classes de gigabits em ambos os sentidos. No entanto, esta traz como grandes vantagens, comparativamente com a tecnologia WDM, uma maior flexibilidade e uma redução significativa do custo de equipamento. No entanto, as principais vantagens são a oferta de uma maior segurança óptica e uma maior eficiência espectral. Existe ainda a possibilidade de uma abordagem híbrida entre WDM e OCDMA para se poder estender a capacidade dos sistemas. No entanto esta não será abordada nesta secção.

As principais soluções baseiam-se no desenvolvimento de ONUs *'sourceless'* e *'colourless'*, nos quais o sinal de banda larga centralizado é distribuído a partir do OLT para todos os utilizadores, de forma a permitir que a re-modulação do sinal e a transmissão para *upstream* ocorram, reduzindo desta forma os custos de manutenção, instalação e operação. Outras soluções são fundamentadas na migração e na evolução das redes que utilizam a tecnologia TDMA para redes com tecnologias WDM.

Ao se utilizarem *encoder/decoder* com múltiplas portas, com uma boa relação custo-eficiência no OLT e polarização independente compacta na estrutura de rede de Bragg, valida uma actualização de sistemas com TDM para sistemas que utilizarão OCDMA [OCDMA, 2009].

4.3.1 Arquitectura OCDMA

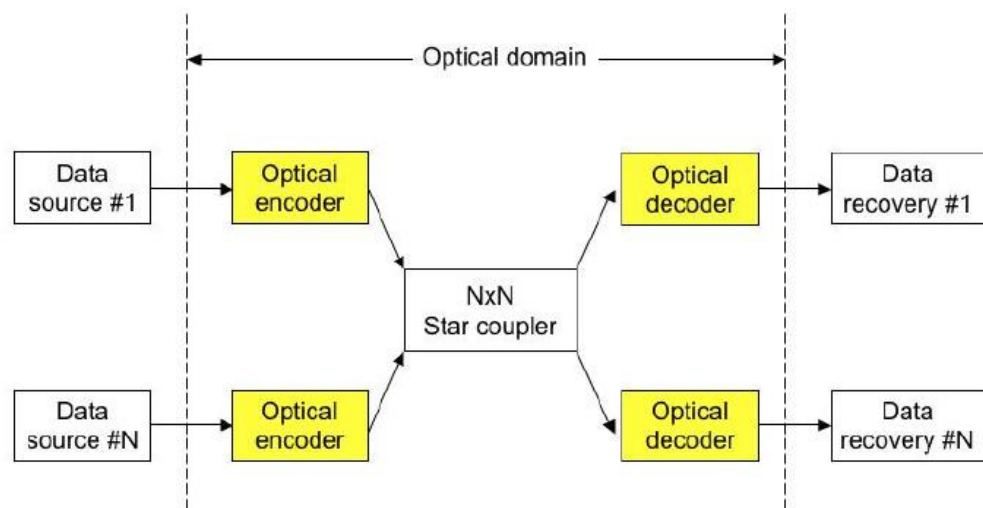


Figura 4.6: Arquitectura base NxN OCDMA [OCDMA, 2005].

Na figura 4.6 é ilustrada uma arquitectura base NxN OCDMA. Neste tipo de rede existem códigos ópticos que são atribuídos aos utilizadores onde se engloba, por exemplo, o meio de transmissão. Um sistema OCDMA, deste tipo, proporciona segurança de informação o que fará com que o controlo da qualidade de serviço e a eficiência espectral melhorem consideravelmente em comparação com sistemas que usem WDM.

A codificação e decodificação ópticas são realizadas no domínio óptico. Assim sendo, o OCDMA pode suportar um modo de transmissão assíncrono completo com baixa latência e sem utilização de equipamentos eléctricos muito complexos.

Tais características introduzem os sistemas OCDMA com a seguinte vantagem, permitir que os utilizadores partilhem a mesma largura de banda assíncrona, sem limites de taxas de bits devido ao facto de o processamento ser efectuado em domínio óptico e também por a codificação proporcionar segurança.

4.3.2 10 Gbps sistema OCDMA-PON com *colorless* e *sourceless* ONUs

Nesta secção revela-se um sistema de 10Gbps OCDMA com *fullduplex* assíncrono numa configuração incolor e sem *source*, e também sem nenhum laser *source* em todas as ONUs idênticas.

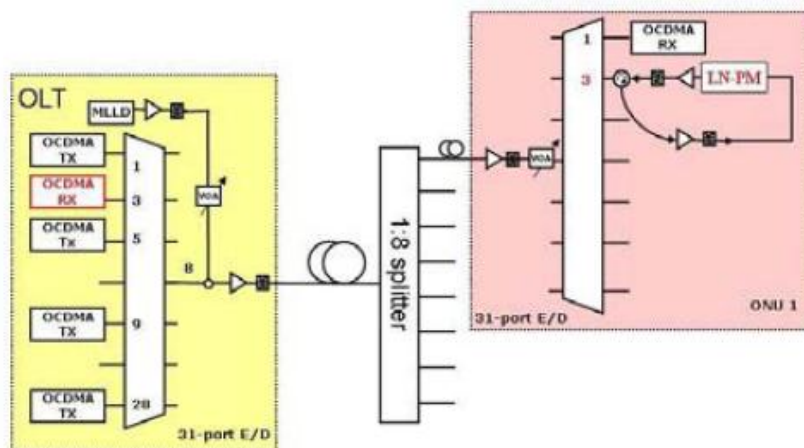


Figura 4.7: Esquema experimental do sistema OCDMA [OCDMA, 2009].

A figura 4.7 ilustra o esquema do sistema OCDMA-PON proposto. Este sistema é composto, basicamente, por um OLT e um 31-port E/O. Com o dispositivo 31-port, podem ser suportados até 15 utilizadores diferentes. No entanto, para reduzir a interferência de múltiplo acesso de ruído, foram utilizadas as portas ímpares. Todas as ONUs são idênticas, assim os assinantes seleccionam os atributos E/D dos portos, o que é um dos requisitos dos operadores de rede. Mas esta arquitectura apresenta-se muito fraca, uma

vez que um utilizador mal intencionado poderia facilmente filtrar os dados direccionados para outro usuário utilizando o correspondente porto E/D. Sendo assim, a arquitectura apresentada nesta secção mostra-se vulnerável em termos de segurança, como os sistemas baseados em TDM.

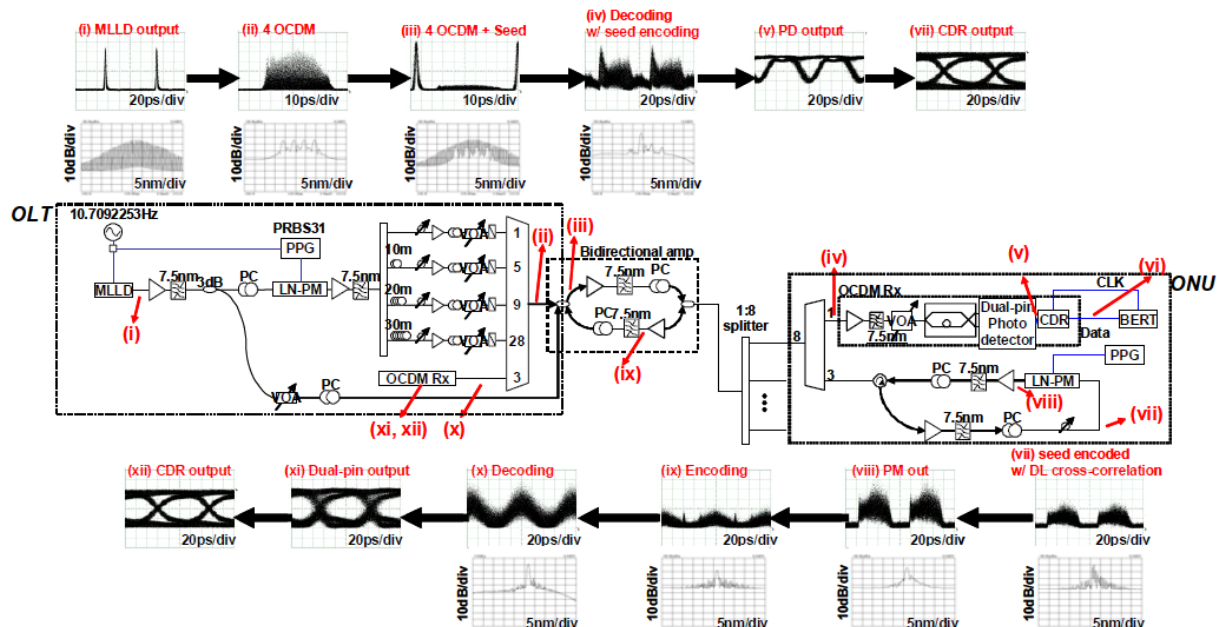


Figura 4.8: *Setup* experimental e resultados [OCDMA, 2009].

A figura 4.8 ilustra o *setup* experimental e os resultados do *full-duplex* a 10 Gbps do sistema DPSK-OCDMA, com 4 utilizadores na direcção *downstream* e 1 utilizador na direcção oposta. O OLT é constituído por um gerador de pulso óptico, com taxa de 10,7 GHz centrado em 1550nm (i), os impulsos gerados serão divididos em duas partes por um acoplador de 3dB e de seguida serão modulados. A fase do sinal modulado é dividida e colocada em 4 portas de entrada das 31 portas E/D. Como resultado disto, 4 sinais OCDMA serão criados nas portas E/D de saída (ii). De forma assíncrona, os 4 sinais serão combinados com os pulsos de outro acoplador para a transmissão *downstream* (iii). O sinal proveniente é amplificado por um amplificador bidireccional. Quando a ONU recebe o sinal *downstream*, este é enviado para a porta de entrada do E/D e no porto correspondente o sinal é decodificado (iv) e detectado por um DPSK (v). Para as medições necessárias, o sinal DPSK detectado é recuperado pelo relógio de recuperação de dados do circuito (vi) e encaminhado para o testador BER. Por outro lado, todas as portas de saída do E/D podem codificar sinais, que correspondem ao ruído e são ilustrados em vii. O sinal na porta de saída 3 é modulado para a transmissão *upstream* (viii). A recuperação do relógio para *uplink* é ajustada manualmente (ix), o sinal será amplificado pelo amplificador bidireccional e enviado para a porta de entrada E/D da OLT.

Por fim, o sinal é decodificado e detectado na porta correspondente, neste caso porta 3, pelo detector DPSK e CDR. As figuras 4.8-xi e 4.8-xii mostram as formas de onda da porta E/D e saídas de CDR, respectivamente.

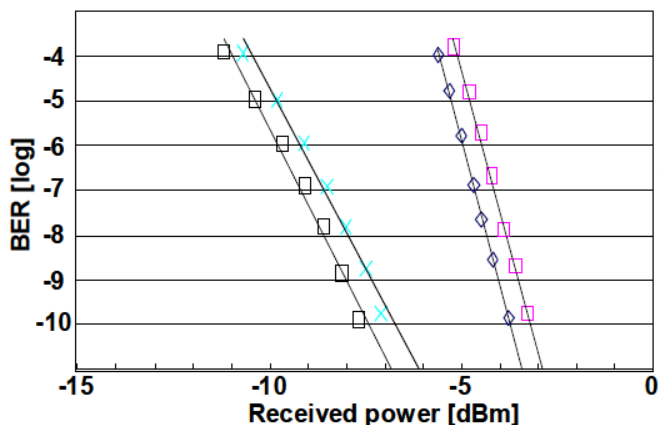


Figura 4.9: *Down-link [OCDMA, 2009].*

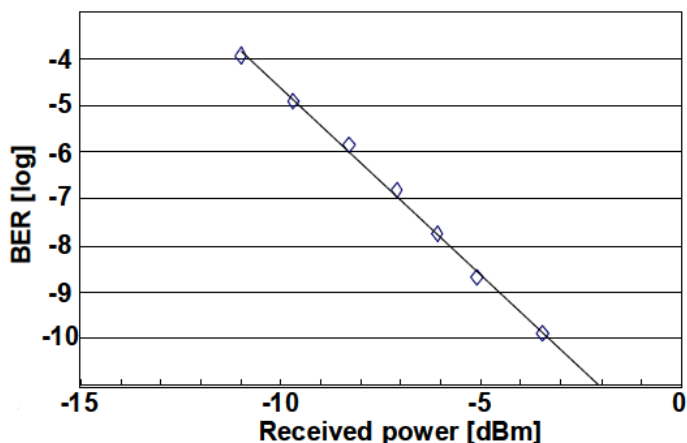


Figura 4.10: *Up-link [OCDMA, 2009].*

Os resultados do BER tanto no caso de *up* como de *down link* mostram que a transmissão foi efectuada para todos os utilizadores e encontra-se livre de erros ($BER < 10^{-9}$).

O sistema mostrado anteriormente é de baixo custo, não exige qualquer fonte laser nos ONUs e a transmissão encontra-se livre de erros tanto na direcção *Up* como *Down [OCDMA, 2009].*

4.4 OFDM -PON

Com o decorrer dos anos há uma necessidade crescente de maior largura de banda. Esta necessidade crescente provém de serviços, como por exemplo, o HD-TV e 3D-TV e de novos serviços que estão a aparecer cada vez mais com o decorrer dos anos. Estas necessidades são a motivação para continuar na progressão da investigação de novas arquitectura de rede. A tecnologia WDM é um exemplo disto, em que permite os operadores de rede fornecerem um determinado comprimento de onda para casas ou para empresas *backbone* com largura de banda. No entanto, esta tecnologia apresenta alguns obstáculos principalmente no que diz respeito ao custo de implementação e de operação. Em cima destes problemas, temos também uma exigência para o futuro que é necessário cumprir para as redes de nova geração, a garantia de uma qualidade de serviço aceitável quando ou onde for necessário. Assim, para contornar os problemas da tecnologia WDM e, de certa maneira, trazer novas qualidades para as redes de acesso surge a tecnologia OFDM. [ACCORDANCE_2, 2010].

O OFDM é uma combinação de modulação, dado que o mapeamento das informações é feito sobre as mudanças na fase da portadora, e multiplexação, uma vez que o método é de partilha de largura de banda com outros canais de dados independentes produzidos por diferentes fontes. Por isso, é uma questão de como partilhar o espectro com esses utilizadores.

Propostas iniciais para OFDM foram feitas na década de 60 e 70. O conceito de OFDM é bastante simples, mas a praticabilidade de aplicação tem muitas complexidades. OFDM é uma técnica de modulação onde múltiplas portadoras de baixa taxa são combinadas para a transmissão numa forma paralela ou compósita, resultando em altas taxas de transmissão.

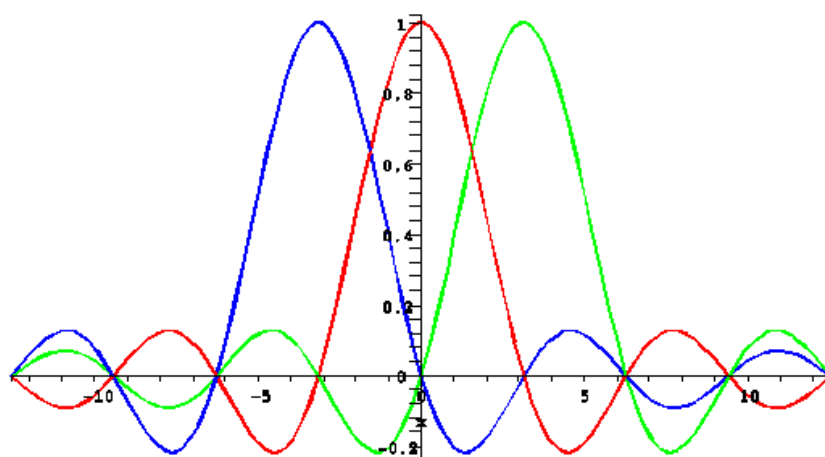


Figura 4.11: Exemplo de distribuição de 3 sub-portadoras utilizando OFDM [OFDM].

No OFDM, o próprio sinal é primeiro dividido em canais independentes, modulados por dados e depois re-multiplexados para criar a portadora OFDM.

OFDM é um caso especial da *Frequency Division Multiplex* (FDM). O FDM está associado ao uso de aparelhos de rádio e televisão, onde, normalmente, cada estação está associada a uma determinada frequência ou canal e deve utilizar isso para realizar a sua transmissão. O OFDM parte desse conceito mas vai mais além pois, como dito anteriormente, divide uma única transmissão em múltiplos sinais com menor ocupação espectral. Esta característica, juntamente com a utilização de técnicas de modulação avançadas, resulta num sinal com grande resistência à interferência. Esta vantagem é que faz o OFDM ser um bom candidato para NG-PON2 [OFDM, 2004].

Quando é utilizado o esquema para permitir múltiplos acessos (OFDMA), diferentes utilizadores são atribuídos a diferentes sub-portadoras OFDM. Recentemente o OFDMA também tem vindo a fazer o seu caminho no mundo da óptica, tanto no *core* como as redes de acesso. No caso das redes de acesso, o OFDM pode oferecer capacidades de grande alcance, longa duração e baixo custo para as novas PONs. A utilização de OFDM também tem sido, principalmente, impulsionada pela necessidade de aumentar a taxa de transmissão sem aumentar a largura de banda de *transceivers* optoelectrónicos [ACCORDANCE_2, 2010].

4.4.1 Sistema óptico OFDM

Na tecnologia OFDM é utilizada a técnica da transformada de *Fourier* para dividir os dados provenientes de uma série de dados transmitidos com alta velocidade para um canal. Assim, surgem blocos de dados que irão ser codificados em sub-portadoras no domínio da frequência.

Na figura 4.12 é ilustrado um sistema geral de um canal óptico que utiliza OFDM. Neste canal cada bloco de dados representa N caminhos possíveis de dados enviados para o transmissor OFDM. Os N caminhos são modulados em N sub-portadoras de igual espaçamento utilizando *Quadrature-Amplitude Modulation* (QAM). Para gerar uma combinação densa de frequências de sub-portadoras é utilizada uma inversora FTT (IFFT), pelo que assim tem-se que cada canal QAM é representado com uma entrada IFFT.

A onda resultante do processo anterior é modulada numa portadora RF, utilizando um modulador IQ que produz uma onda de valor real. De seguida, o sinal é modulado por uma portadora óptica usando um modulador óptico linear. Na saída do modulador óptico o sinal é filtrado para remover todas as frequências que não sejam a banda lateral superior e a portadora é atenuada.

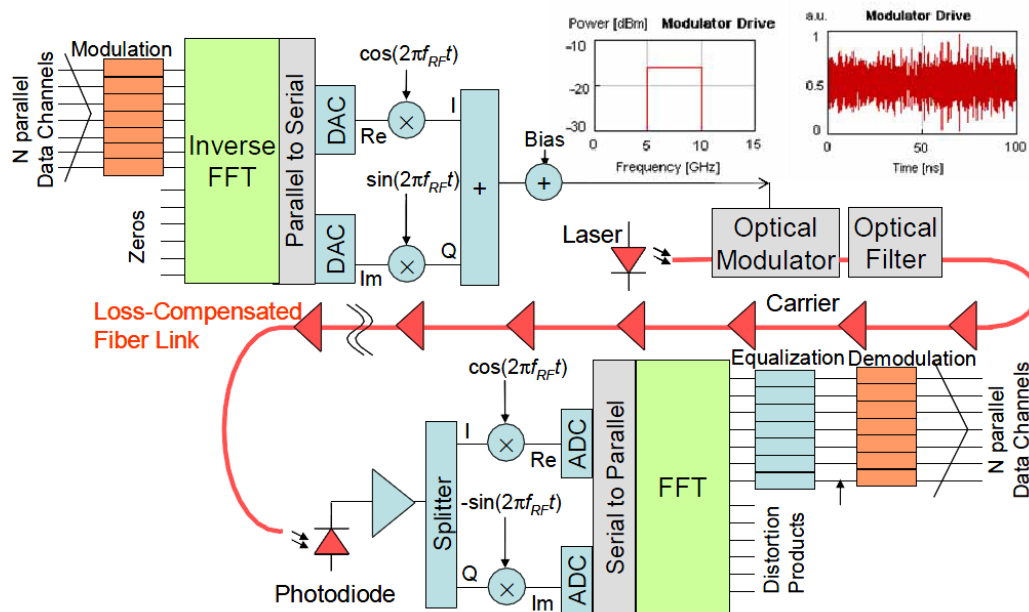


Figura 4.12: Diagrama de blocos de um sistema óptico OFDM [OFDM, 2006].

Depois de o sinal ser propagado através da fibra, o fotodíodo produz uma onda eléctrica. Posteriormente, o sinal é convertido com os componentes I e Q, de seguida são convertidos em sub-portadoras OFDM, utilizando um FFT. Uma vez no domínio da frequência, cada canal é equalizado para compensar a fase e distorção das amplitudes, devido aos caminhos ópticos e eléctricos. Isto é conseguido através de uma multiplicação complexa separada para cada canal. Após a compensação, cada canal QAM é desmodulado para produzir N canais de dados paralelos.

OFDM é uma tecnologia que pode compensar frequências dependentes da amplitude e fase de um canal de comunicação, por isso oferece um sólido método adaptativo de aumentar o desempenho do sistema [OFDM, 2006].

4.4.2 108 Gb/s OFDMA-PON

Devido ao exponencial crescimento de procura de serviços com maior largura de banda e por velocidades de 40 Gb/s para redes PON, tem havido uma deslocação no sentido de encontrar uma arquitectura de rede que forneça o pedido para NG-PON2 e além disso prove ser uma mais-valia para um futuro distante.

Os formatos de modulação avançados são a forma mais rentável de aumentar a taxa de transmissão de dados. Devido à sua resistência à dispersão cromática e modo de polarização, a eficiência espectral e compatibilidade natural com o processamento de sinal baseados na execução óptica, OFDM surgiu como um candidato atraente para os futuros sistemas de transmissão ópticos.

As soluções OFDMA-PON, além de fornecerem altas velocidades, também são economicamente rentáveis.

Fazendo uma pequena abordagem pelas tecnologias utilizadas em redes de acesso, o TDM, actualmente é utilizado em redes como G-PON e GE-PON, apresenta componentes bastante caros e além disso muito sensíveis à latência de pacotes. Referir-se que os receptores *burts* ainda continuam a ser uma tarefa difícil de implementar, por serem dispendiosos.

As abordagens em WDM também apresentam uma barreira de custos, devido à necessidade de alterar fundamentalmente a família de redes de distribuição PON, e adoptar qualquer cor ou comprimento de onda. Além disso, a tecnologia WDM-PON é igualmente incapaz de alocar dinamicamente a largura de banda de cada sub-portadora, o que reduz significativamente a flexibilidade.

Para poder contornar alguns dos problemas anteriores, surge uma arquitectura OFDMA, ilustrada na figura 4.13, que apoia diversas aplicações e permite a alocação de banda dinâmica entre elas [OFDM, 2010].

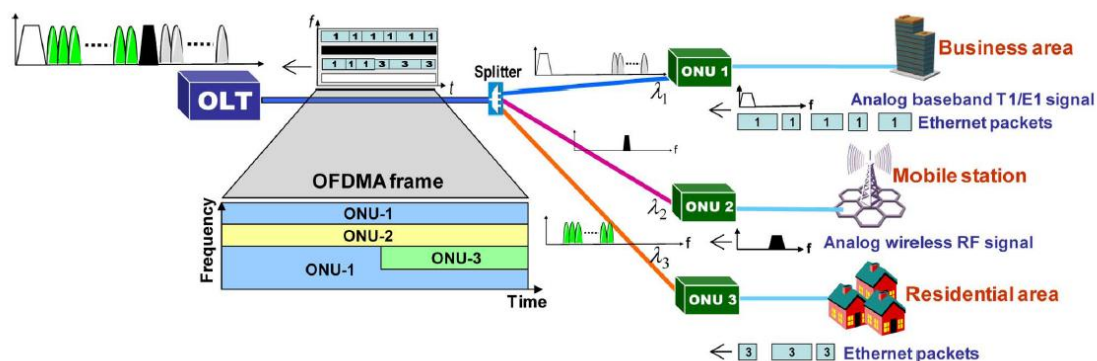


Figura 4.13: Arquitectura OFDMA-PON para serviços heterogêneos [OFDM, 2010].

Será apresentada nesta secção uma proposta de velocidade elevada no sentido *downstream* MIMO-OFDMA-PON usando uma técnica de multiplexação de polarizações com detecção directa (POLMUX-DD). A técnica POLMUX permite a transmissão de 40 Gb/s na banda dos 5 GHz, com 16 QAM. Um sistema MIMO é um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas [OFDM, 2010].

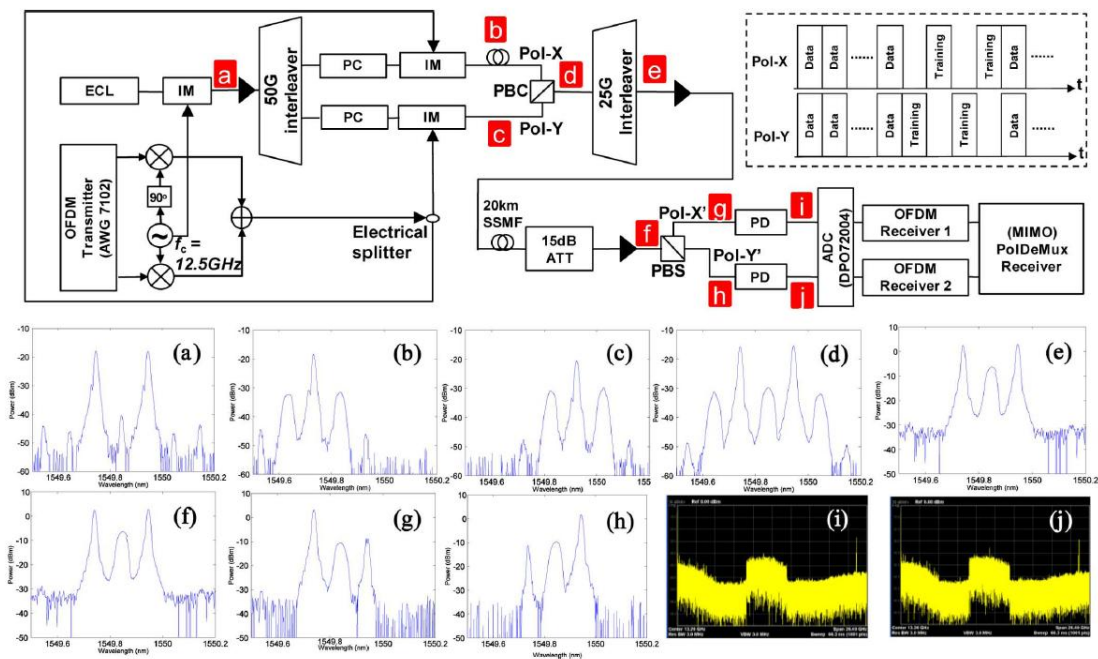


Figura 4.14: Setup experimental dos 40Gb/s MIMO-OFDMA-PON e espectros relevantes do sinal [OFDM, 2010].

A figura 4.14 ilustra a montagem experimental para 40 Gb/s de transmissão MIMO-OFMA-PON. No transmissor OLT foi criado um sinal OFDM *baseband*, com um mapa de bits de dados de 16 QAM para cada sub-portadora. O tamanho do FFT é de $N=256$. O sinal *baseband* OFDM foi carregado no AWG, originando uma onda de 2,8GHz à saída do I/Q. De seguida foi usado um *mixer-IQ* analógico que produz 12,5GHz de sinal banda OFDM, que será modulado por um laser, resultando o sinal ilustrado na figura 4.14 – a. De imediato o sinal que contém duas portadoras ópticas, passa por um *interleaver de 50 G* que separa as portadoras e será adicionado a cada uma um IM. Cada IM foi modulado com um sinal OFDM-RF com larguras de banda centradas em 5,6GHz e 12,5GHz. O espectro óptico depois de modulado é ilustrado na figura 4.14-c e 4.14-b. Os dois sinais resultantes foram combinados num PCB (figura 4.14-d) que passaram por um *interleaver de 25G* (figura 4.14-e) para serem transmitidos e amplificados por uma fibra SSMF de alcance de 20km.

Para satisfazer as necessidades operacionais dos fotodíodos para altas larguras de banda, foi colocado um atenuador, *ATT*, 15 dB antes do PBS, para poder ajustar a potência (figura 4.14 – f). O sinal é separado no PBS em duas ondas (figura 4.14-g e 4.14-h) que são detectadas imediatamente por dois fotodíodos de 20GHz (figura 4.14-i e 4.14-j). Os sinais OFDM-RF são recebidos por dois receptores OFDM, que dentro deles contém um demux IQ e uma FFT. Ambas as saídas dos receptores OFDM foram alimentadas por um MIMO [OFDM, 2010].

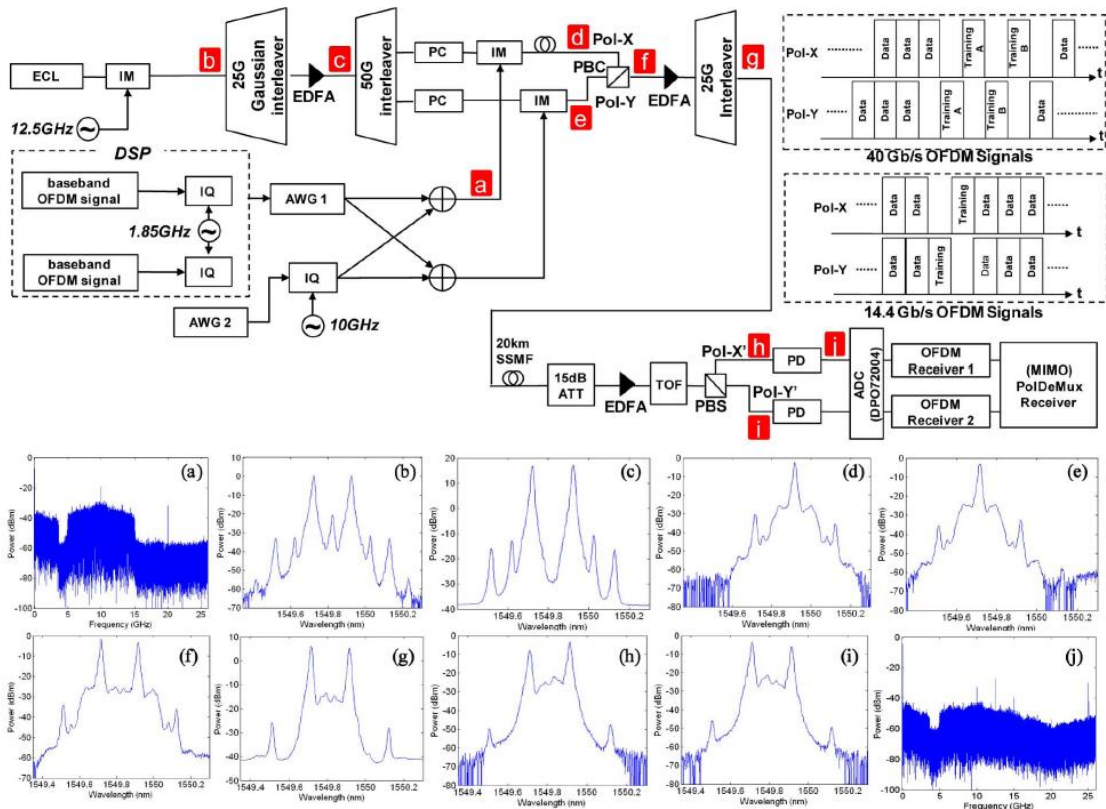


Figura 4.15 *Setup experimental dos 108Gb/s MIMO-OFDMA-PON e espectros relevantes do sinal. [OFDM, 2010].*

Na figura 4.15 está representado um sistema de transmissão *downstream* MIMO-OFDMA-PON de 108Gb/s com detecção directa.

No transmissor OLT, dois sinais independentes *baseband* OFDM de 14,4Gb/s e dois sinais independentes *baseband* OFDM de 40Gb/s foram criados e transmitidos por um AWG. O tamanho da FTT para 14,4 Gb/s é $N=252$ e para os 40Gb/s é $N=200$. Em ambos os casos foi utilizado um mapeamento de símbolos de 16 QAM. Os sinais de 14,4 Gb/S foram digitalmente convertidos para uma frequência intermédia de 1,85GHz e de seguida passam pelo AWG1. Os sinais OFDM de 40Gb/s foram convertidos para 10GHz de forma analógica.

Para gerar o sinal óptico, foi utilizado um ECL juntamente com um modulador com sinal de relógio de 12,5GHz (figura 4.15-b). De imediato foi utilizado um *interleaver gaussian* de 25G para uma atenuação adicional, como ilustrado na figura 4.15-c. Depois, o sinal óptico passa por um EDFA e por um *interleaver de 50 G* para separar as duas subportadoras ópticas, que serão utilizadas para o IM de 20 GHz. Cada IM foi modulado por um sinal OFDM eléctrico independente (figura 4.15-a). Os espectros ópticos após o modulador são ilustrados na figura 4.15-d e 4.15-e. Os dois sinais OFDM ópticos resultantes foram combinados por um PBC, originando o sinal na figura 4.15-f. Os sinais

OFDM de 108Gb/s agregados são compostos por duas polarizações de 54Gb/s de sinais multiplexados.

De seguida, os sinais passam por um EDFA e por um *interleaver de 25G* formando o sinal da figura 4.15- g. Este será propagado por uma fibra SSMF de 20km. Antes do receptor, o sinal é atenuado por um atenuador de 15dB e de seguida é separado por um PBS, originando os sinais das figuras 4.15-h e 4.15-i. É de notar que antes do PBS foi colocado um EDFA e um filtro óptico para ajustar a potência óptica. O receptor OFDM é constituído por um *demux IQ* e uma FTT [OFDM, 2010].

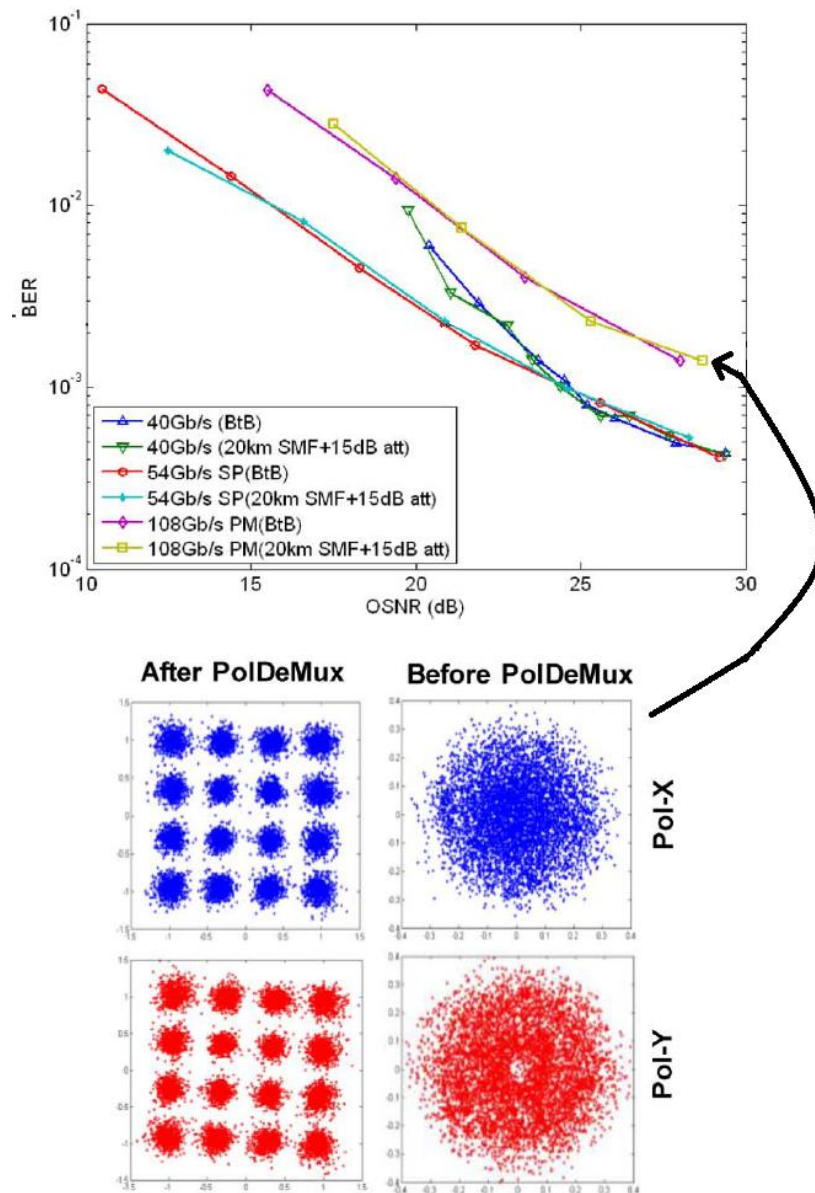


Figura 4.16: Resultados experimentais de BER para 40 Gb/s e 108 Gb/s MIMO-OFDMA-PON [OFDM, 2010].

A figura 4.16, ilustra gráficos de OSNR *versus bit error rate* (BER) tanto para *back-to-back* e 20 km de transmissão numa fibra SSMF com velocidade de 40 Gb/s e 108Gb/s do sistema MIMO-OFDMA-PON. Também é ilustrado um resultado de 54Gb/s na figura 4.16, que corresponde a uma única transmissão no sistema de 108Gb/s.

Como se pode observar, os melhores resultados de performance BER de 40Gb/s MIMO-OFDMA-PON foram alcançados após 20 km de transporte e atenuação adicional foi $BER=4 \times 10^{-4}$. Além disso, como revelado por uma comparação das curvas de *back-to-back* e transmissão de 20 km, a dispersão da fibra é insignificante. A nova formatação, a estimativa de canal, e métodos de compensação aqui propostos mostram-se altamente eficazes na recuperação da constelação 16-QAM, enquanto simplifica a complexidade final do receptor óptico em relação a sistemas coerentes.

Para os 108Gb/s de transmissão após os 20km de fibra SSMF os melhores resultados foram alcançados para $BER=1,4 \times 10^{-3}$, indicando a operação livre de erros após a FEC. Comparando com as curvas dos 54Gb/s, nota-se uma perda de 3dB, correspondente a uma duplicação da taxa de dados numa potência de transmissão óptica fixa. No entanto, uma comparação das curvas dos 40 Gb/s e dos 54Gb/s revela que não existe nenhuma penalização OSNR com o aumento da taxa de dados. Além disso, como é ilustrado a comparação entre as curvas *back-to-back* e 20 km de transmissão a perda de dispersão das fibras é insignificante nos 54Gb/s e 108 Gb/s de transmissão MIMO-OFDMA-PON.

Em suma, com OFDM e OFDMA são possíveis as alocações dinâmicas da largura de banda o que pode de forma rentável aumentar as taxas de dados e a flexibilidade das redes de acesso PON futuras.

A solução proposta alcançou a maior transmissão num único comprimento de onda *downstream* até agora em qualquer sistema PON; esta arquitectura pode ser vista como uma candidata muito atraente para a próxima geração de acesso óptico [OFDM, 2010].

4.4.3 Abordagem híbrida WDM-OFDM

Como referido anteriormente, WDM-PON é uma técnica que satisfaz os requisitos de rede de acesso futuro. Esta técnica consegue fornecer maior largura de banda de dados, uma transparência de protocolo, uma maior segurança e uma escalabilidade flexível comparativamente com as tecnologias utilizadas hoje em dia pelas redes de acesso actuais. Assim sendo, WDM apresenta-se como uma técnica muito promissora para o futuro.

Nesta secção apresenta-se uma arquitectura WDM-OFDM-PON, em que se impôs 2,5Gb/s de *overlay broadcast* modulado na modulação OFDM 16 QAM de 10 Gb/s de

signal P2P *downstream*. Na ONU o sinal é re-modulado pelo sinal *upstream* de 2,5Gb/s OOK [WDM_OFDM, 2010].

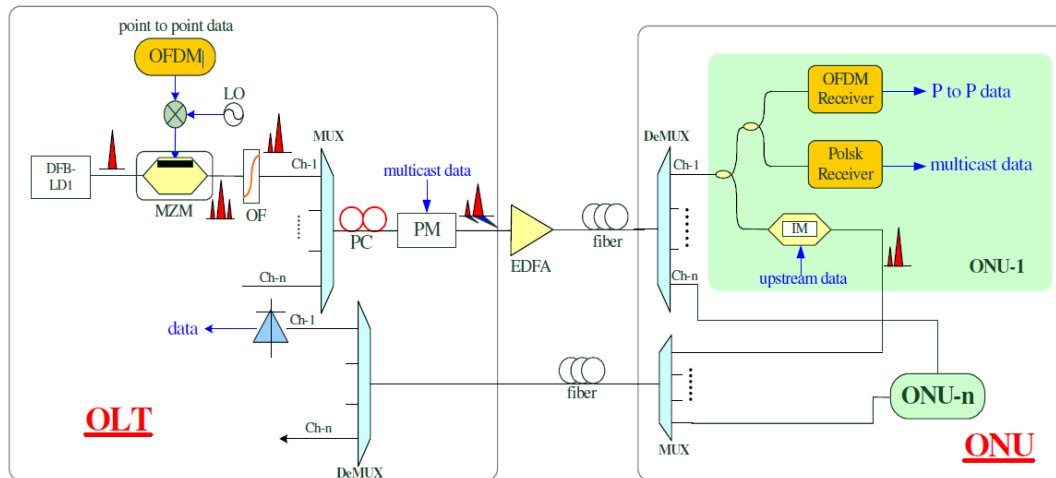


Figura 4.17: Arquitectura proposta para WDM-OFDM-POM [WDM_OFDM, 2010].

O OLT, nesta arquitectura, tem como componentes principais: N canais, um modulador Mach-Zehnder (MZM) em cada canal para criar sinais ópticos 16QAM-OFDM para a transmissão no sentido *downstream*. Através da observação da figura 4.17 verifica-se que o sinal P2P OFDM é misturado com um sinal LO. Esta mistura cria um sinal eléctrico que será adicionado, de seguida, no MZM. A fonte LO é suficiente para carregar o sinal OFDM pelo facto de que a largura de banda do espectro de 16-QAM-OFDM ser muito reduzida em comparação com a modulação OOK.

Após o sinal ter passado pelo MZM, este encontra um filtro óptico (OF) para poder gerar uma banda lateral única (SSB) de sinal de 16 QAM-OFDM, uma vez que à saída do MZM sai um sinal duplo (DSB). Assim sendo, o filtro faz com que se consiga aumentar a eficiência espectral, e conseqüentemente, reduzir o efeito de desvanecimento. De seguida, o sinal resultante deste processo passa por um MUX onde os sinais vão ser combinados para serem enviados para uma modulação *multicast*. Os sinais obtidos serão transmitidos por um modulador Polsk. Este modulador pode ser identificado na figura 4.17 como sendo constituído por um controlador de polarização (PC) e um modulador de fase (PM).

Depois de todo este processo ter sido efectuado dentro da OLT, o sinal resultante é então amplificado por um EDFA e transmitido por uma fibra SSMF de alcance de 25km. Após a transmissão o sinal encontra um DEMUX na entrada do bloco da ONU, tal como se pode observar na figura 4.17. O DEMUX irá separar os canais WDM e de seguida entregá-los aos diferentes ONUs. Quando o sinal entra na ONU no sentido da transmissão *downstream* este passa primeiro por um acoplador de 3dB. Depois, uma das saídas é

utilizada para a transmissão no sentido *upstream*, onde se terá de fazer uma re-modulação do sinal utilizando um sinal OOK através do modulador de intensidade (IM) para poder ocorrer a respectiva transmissão. Relativamente à outra parte do sinal, esta por sua vez, é dividida, novamente, por um acoplador de 3dB. Ora uma das partes resultantes desta segunda divisão será introduzida no receptor OFDM que utiliza detecção directa. Já a outra parte é introduzida no receptor PolSK, onde o sinal PolSK é convertido em sinal OOK para a detecção e análise do desempenho.

A curva da taxa de erro do bit (BER) e constelações 16 QAM com e sem transmissão para a direcção *downstream*, é apresentada na figura 4.18 [WDM_OFDM, 2010].

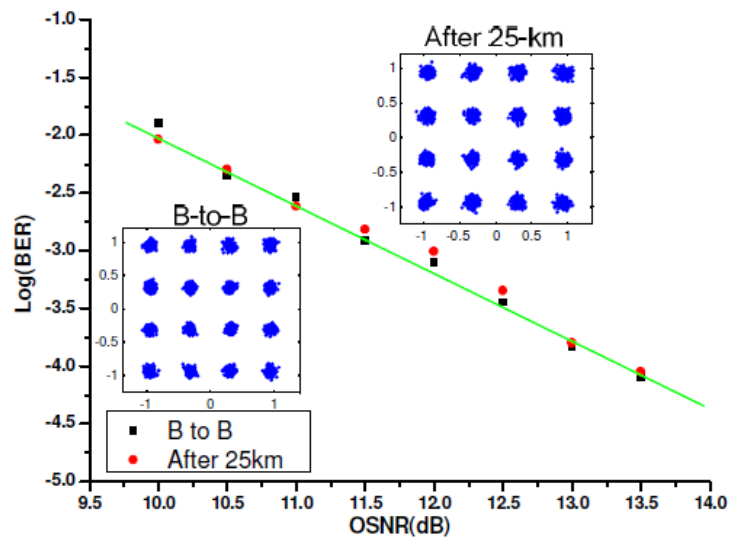


Figura 4.18: Curva BER e respectiva constelação para sinal *downstream* com ou sem transmissão do sinal de 16QAM-OFDM [WDM_OFDM, 2010].

Para a outra parte, obteve-se a intensidade de detecção do PolSK *multicast*. A curva BER e os diagramas de olho estão representados na figura 4.19:

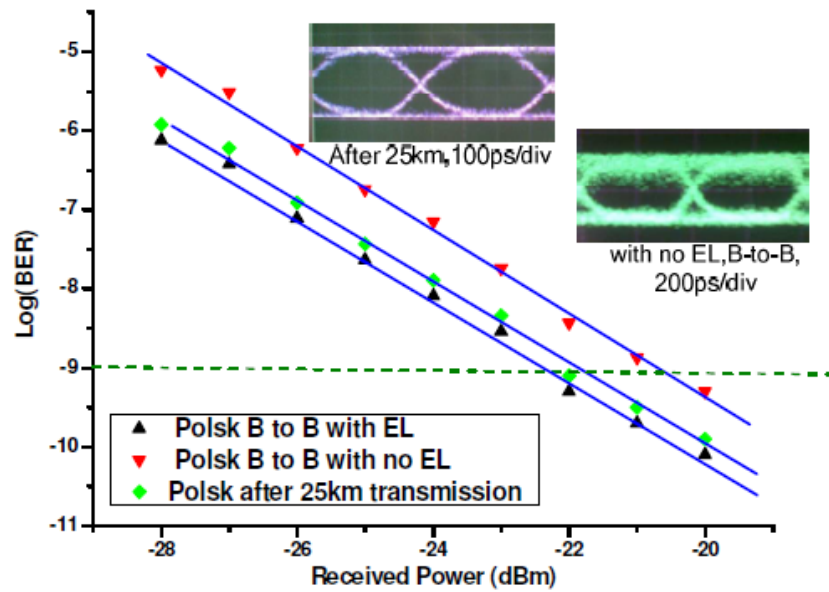


Figura 4.19: Curva BER e respectivo diagrama de olho para sinal *downstream* com ou sem transmissão do sinal Polks. [WDM_OFDM, 2010].

Através da observação da figura 4.19 pode verificar-se que a interferência entre os sinais *downstream* leva a 1.5 dB de penalizações de potência para o sinal Polks na arquitectura que foi apresentada anteriormente. Quanto aos diagramas de olho com ou sem filtro eléctrico passa baixo também indicam diferentes performances. Note-se que o filtro eléctrico mencionado encontra-se incorporado dentro do receptor Polks que na figura 4.17 não é visível. A função deste filtro é eliminar frequências superiores à taxa de *bits rate* do Polks. Assim, pode eliminar a interferência do sinal OFDM e Polks *multicast*.

Para a ligação *upstream*, os diagramas de olho e curva BER são mostrados na figura 4.20:

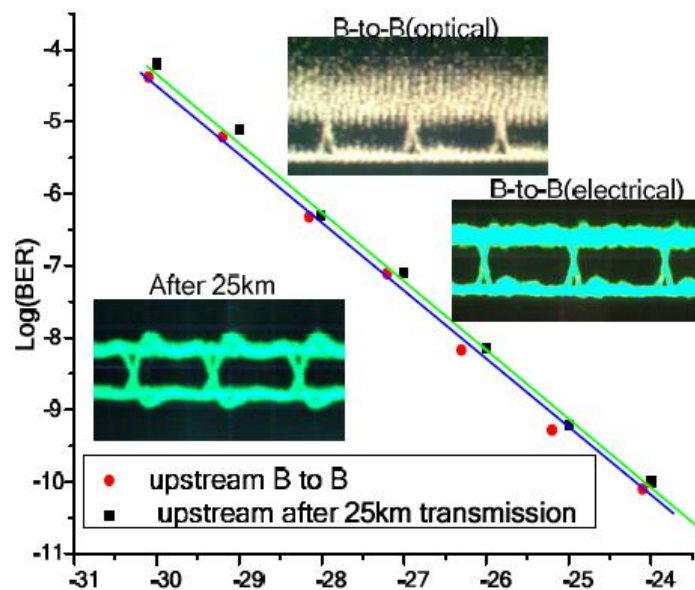


Figura 4.20: Curva BER e respectivo diagrama de olho para sinal *upstream* [WDM_OFDM, 2010].

Um dos problemas desta experiência é o custo da ONU; tem-se tentado várias hipóteses como, por exemplo, utilizar um *software* de conversão para o sinal OFDM em vez de uma conversão que adota fontes RF ou até mesmo um controlador de polarização mecânico de baixo custo, mas nenhuma com grandes sucessos. Devido a um algoritmo de equalização *one tap* do OFDM, a performance após 25-km de transmissão é praticamente a mesma de transmissão *back-to-back*. Quando é transmitida num comprimento maior, o desempenho do sinal OFDM é quase inalterado, mas o sinal Polsk deteriora muito devido ao efeito de rotação de polarização e da dispersão dos modos de polarização [WDM_OFDM, 2010].

4.5 Coherent – PON

Ao utilizar-se a detecção coerente, está-se a transferir as várias informações ópticas, como a amplitude, a fase, a frequência e a polarização para o domínio eléctrico. A detecção coerente ao ser utilizada em sinais ópticos com uma modulação de ordem elevada tem a vantagem de a complexidade óptica em termos de estrutura de desmodulação ser reduzida e além disto, a desmodulação poder ser executada no domínio eléctrico.

Na detecção coerente, o sinal de entrada é “misturado” com uma portadora óptica (laser), gerada localmente (oscilador local). A detecção coerente é bastante eficiente, uma vez que utiliza as informações da fase da portadora para detectar o sinal. Na detecção coerente, dois princípios podem ser distinguidos: detecção homódina e heteródina. No caso da detecção homódina o espectro óptico é convertido directamente

para a banda eléctrica, uma vez que as frequências das portadoras do laser de sinal e as do laser do LO são idênticas. Relativamente à detecção heteródina, é necessário uma portadora eléctrica, com uma frequência intermédia, que corresponda à diferença de frequências entre o laser de sinal e o laser do LO para que ocorra a transferência de informação, dado que as frequências do laser do sinal e do LO são diferentes.

A detecção coerente tem uma série de vantagens importantes, tais como alta resolução espectral; a saída do sinal pode ser amplificada e copiada sem adição significativa de uma quantidade de ruído [Coherent, 2009].

4.5.1 Coerente WDM-PON baseado na detecção heteródina

Nesta secção apresenta-se uma proposta de um sistema WDM-PON coerente que combina as vantagens de WDM-PON com as da detecção heteródina.

WDM-PON proporciona uma redução de custos de alta capacidade e de acesso à rede de transporte através da atribuição de comprimentos de onda aos utilizadores ou serviços compartilhados na fibra entre vários utilizadores. Por outro lado, com a detecção óptica heteródina consegue-se receber alta sensibilidade e uma elevada resolução de comprimento de onda. Devido à elevada sensibilidade de recepção, o número de ramos e distância de transmissão PON pode ser aumentada.

No entanto, por outro lado a detecção óptica heteródina apresenta alguns problemas; um deles é a sua dependência da polarização; outro é a estrutura do receptor complexo. Para superar o primeiro problema foi proposto um *“Transmitter Side Polarization Diversity Technique”*; para o segundo, propôs-se utilização de um DM-LO na ONU para receber e transmitir de modo a reduzir o número de dispositivos ópticos. Em complemento, também será demonstrada uma transmissão bidireccional de 1,25 Gb/s, utilizando um laser local modulado directamente que oferece uma amplitude baixa de funcionamento.

Na figura 4.21 é ilustrada a proposta do sistema WDM-PON com detecção coerente.

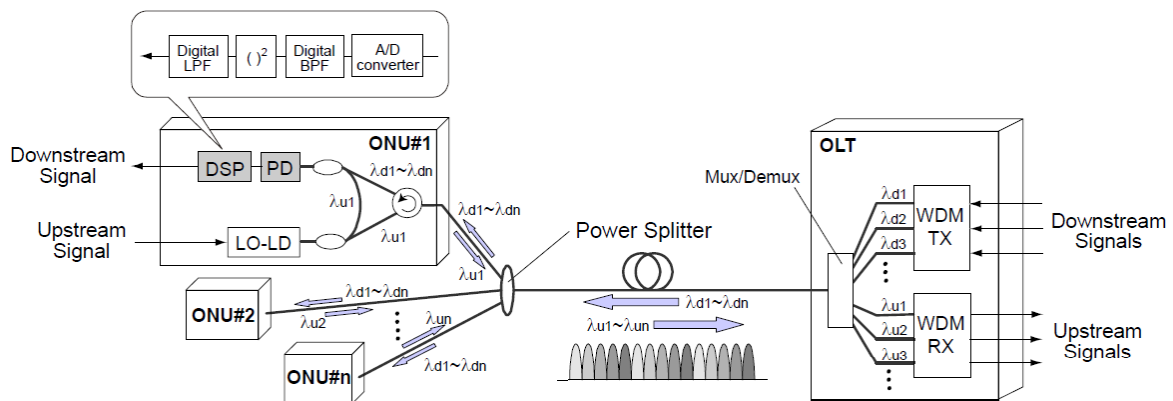


Figura 4.21: Arquitectura do sistema WDM-PON com detecção coerente [Coherent WDM, 2009].

Num sistema deste tipo é necessária a utilização de um díodo laser oscilador local (LO-LD), dispositivos electrónicos de alta frequência, um amplificador de baixo ruído (LNA), um filtro passa-banda (BPF) e um misturador de micro-ondas para desmodular o sinal IF. Assim, como se pode observar, consegue-se um ONU com uma boa diminuição de componentes eléctricos.

Para que ocorra a detecção do sinal da transmissão *downstream* na ONU, este tem de primeiro ser detectado com a detecção heteródina que mistura um sinal originado localmente com o sinal *downstream*. De seguida, o sinal de saída do fotodetector é amostrado por um conversor A/D que se encontra dentro do bloco DSP como ilustrado na figura 4.21. Além disto, o mesmo sinal é processado no modelo de processador de sinal digital. Assim, pode-se verificar que o sinal de banda base transmitido no sentido *downstream* pode ser desmodulado como também sair por uma estrutura bem mais simples do que em sistemas que não utilizem a detecção coerente.

No sistema proposto na figura 4.21, utiliza-se um sinal MSK no sentido de transmissão *upstream* e relativamente ao sentido *downstream* utiliza o formato ASK. Existe diferentes formatos de sinal, devido ao facto, de que qualquer flutuação de frequência e/ou de amplitude iria degradar muito o sinal na recepção, assim utilizando o formato MSK para *upstream* consegue-se ter uma amplitude de flutuação baixa e também um alargamento espectral baixo.

Note-se que foram utilizados um filtro digital e um detector digital para desmodular o sinal IF de banda base de forma a remover os ruídos e ao mesmo tempo alcançar uma desmodulação do sinal como se apresenta na figura 4.22.

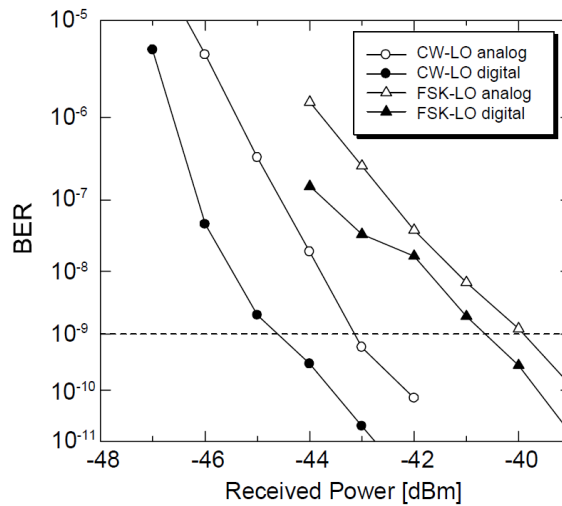


Figura 4.22: Curva BER [Coherent WDM, 2009].

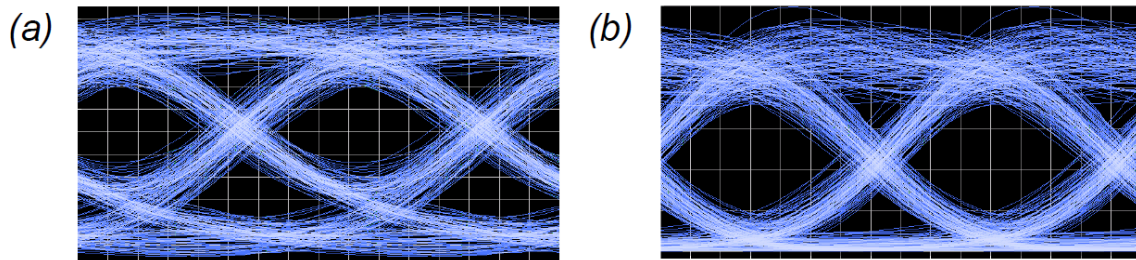


Figura 4.23: Diagramas de olho. a) Desmodulação analógica. b) Desmodulação digital [Coherent WDM, 2009].

Nas figuras 4.22 e 4.23 é ilustrado o desempenho do sistema em termos de BER e diagrama de olho.

Na figura 4.22 observa-se as curvas BER, em que os círculos representam o caso em que foi utilizada a luz contínua. Relativamente aos triângulos, observados na figura 4.22, estes representam o caso de utilizar o sinal MSK modulado directamente. Quanto aos símbolos sólidos e ocios observados, estes correspondem ao caso do processamento analógico e digital, respectivamente. Podem ser recebidos cerca de -40 dBm de potência @ 10^{-9} BER apesar de o sinal de 1,25Gb/s ser modulado por um sinal local. Assim, conclui-se que a performance BER é melhorada com a modulação digital comparativamente com a modulação analógica. Isto acontece, devido ao facto de se utilizar simulação através de um computador, pois consegue-se utilizar filtros e detectores ideais. Como o ruído do amplificador foi gerado na desmodulação analógica pode-se retirar a conclusão enunciada anteriormente. Logo, confirma-se que se pode realizar desmodulação directa de sinal IF para sinal de banda base com o processo de desmodulação digital.

A figura 4.23 ilustra os diagramas de olho ao usar o MSK com modulação directa com sinal local (a) com desmodulação analógica e (b) com desmodulação digital. Aqui a potência óptica recebida foi criada a -40dBm. Tal como no caso da figura 4.22. a abertura do olho foi obtida com a mesma potência recebida, o que confirma que não há degradação da desmodulação entre analógico e digital.

Em suma, foi demonstrado um sistema WDM-PON coerente que transmite 1,25Gb/s bidireccionais, em que os resultados demonstram a possibilidade de ter um sistema WDM com praticamente o mesmo número de dispositivos como um sistema convencional PON, mostrando uma boa redução em termos de custo de material [Coherent WDM, 2009].

4.5.2 WDM PON empregando auto-deteccção homódina

Redes WDM-PON utilizando deteccção coerente são uma conjunção das duas tecnologias candidatas para a próxima geração de redes de acesso. Nesta secção, serão abordadas as redes WDM-POM baseadas em amplificador óptico semiconductor reflectivo, conhecido também por RSOA. A rede apresentada foi configurada numa arquitectura de *loop-back* para melhor explorar as características e vantagens da ONU incolor.

De forma a evitar que o alcance máximo desta arquitectura seja limitado pelo orçamento de potência para o sinal *upstream*, a luz que se fornece às sementes através do CO é modulada por um RSOA e esta é enviada de volta ao CO como um sinal *upstream*. Para melhor o orçamento de energia para o sinal *upstream* há duas hipóteses. Uma das hipóteses consiste em utilizar receptores coerentes com deteccção directa e com pré-amplificação óptica para se conseguir uma melhoria da sensibilidade do receptor. A utilização do receptor coerente ainda não está muito explorada embora apresente um grande potencial. Relativamente à outra solução, passa por aumentar o poder das sementes. No entanto, este aumento pode vir a causar problemas a nível da tolerância de reflexão. Esta poderá ser deteriorada porque a potência da luz reflectida das sementes também é aumentada. Assim, de forma a contornar estes problemas aqui apresentados surge uma proposta de RSOA baseado em WDM-PON que utiliza um receptor com deteccção coerente, mais propriamente um receptor auto-homódino.

Na arquitectura de rede que é aqui proposta, esta irá ter uma fonte de luz no CO para ser utilizada para a luz das sementes como também para a luz do sinal do oscilador local. Assim, evita ter-se uma fonte externa de luz para originar o sinal LO.

A arquitectura de rede é ilustrada na figura 4.24. Esta implementação com 1,25 Gb/s de velocidade baseada em RSOA WDM-PON com um receptor auto-homódino permite uma boa tolerância à reflexão, bem como uma boa sensibilidade de receptor. Além disto, também apresenta um elevado rácio de divisão o que torna a arquitectura uma boa potencial para as diversas aplicações de sistemas com a tecnologia WDM-PON.

O alcance atingido com esta proposta é de 100km sem usar qualquer tipo de amplificação óptica. [RSOA WDM-PON, 2009].

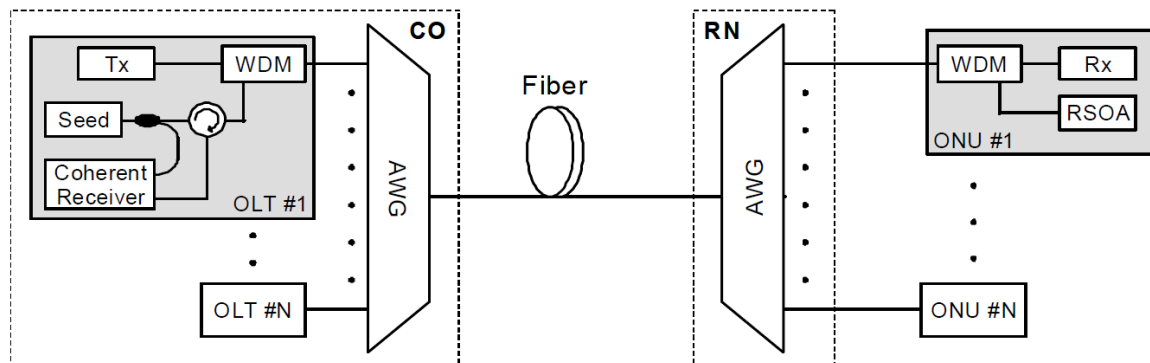


Figura 4.24: Diagrama da proposta WDM-PON utilizando o receptor auto-homódino [RSOA WDM-PON, 2009].

Na figura 4.24 é ilustrado o diagrama da proposta WDM-PON utilizando o receptor auto-homódino. Esta proposta é utilizada para um sinal *upstream*. A luz das sementes que se encontram na ONU provém de uma fonte de luz CW que se encontra no CO. A luz atravessa a arquitectura até ao RSOA que se encarrega de modular os dados com a luz e fornecer luz às sementes. O sinal resultante deste processo é enviado de volta à CO.

Se houvesse um receptor coerente baseado na detecção directa, nesta arquitectura, iria existir uma deterioração grave do desempenho *upstream* pelo facto da existência de interferência óptica de batimento de ruído entre as várias luzes das sementes. No entanto, como se utiliza um receptor com detecção coerente a interferência óptica de batimento entre o LO e a luz das sementes torna-se dominante porque o poder do LO é maior do que o do sinal. Além disto, o ruído de reflexão cai na zona de baixas frequências, perto da componente DC, porque a luz reflectida das sementes tem a mesma frequência que o LO. Por estes factos, o ruído de reflexão pode ser eliminado, utilizando um simples filtro passa alto. Além disto, ainda consegue-se também melhorar a tolerância para a reflexão da luz das sementes.

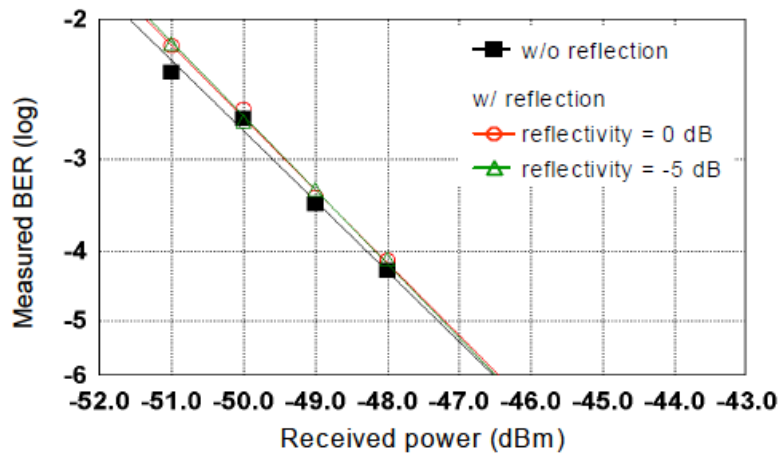


Figura 4.25: Sensibilidade do receptor proposto depois da transmissão de 20 km de fibra [RSOA WDM-PON, 2009].

Na figura 4.25 é ilustrado o desempenho BER após a transmissão de 20 km. É também apresentado dois tipos de curva BER, uma com utilização de um módulo de reflexão e outra sem esse módulo. A sensibilidade obtida no receptor foi de -43.3 bBm para @BER = 10^{-5} . Também se verifica que não houve penalizações entre as duas curvas. Assim, pode-se verificar que existe uma boa imunidade por parte do receptor à reflexão da luz das sementes.

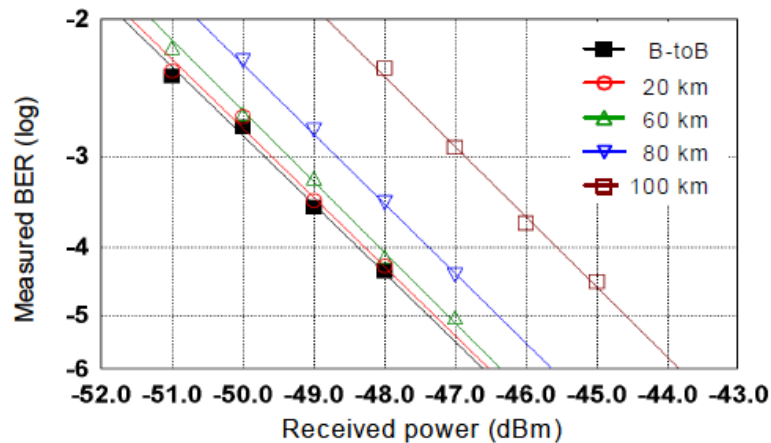


Figura 4.26: Curvas BER em função da distância de transmissão [RSOA WDM-PON, 2009].

Além da experiência anterior, também se realizou outras experiências para analisar o comportamento da transmissão do sinal com um alcance de 20 km a 100 km. Isto pode ser observado na figura 4.26 onde estão representadas as diferentes curvas BER obtidas. A sensibilidade do receptor para a distância de 100 km foi suficiente. Deve-se notar que não se utiliza qualquer tipo de amplificação óptica nesta arquitetura.

Observando-se a figura 4.26, a partir dos 80km pode-se evidenciar que existe uma pequena penalização. Esta é devido à flutuação da polarização que ocorreu durante a transmissão do sinal no sentido *upstream*. Este pequeno problema pode ser resolvido com a utilização de uma técnica de polarização simples.

Através das várias realizações experimentais expostas, pode-se concluir que o receptor auto-homódino se apresenta como simples e estável. Logo, vem confirmar que a detecção coerente é uma técnica bastante boa para eliminar o efeito da reflexão que ocorre na luz das sementes. Além disto, esta arquitectura revelou-se como sendo uma boa solução para a realização do ultra-longo alcance WDM-PON com uma elevada taxa de transmissão, uma vez que conseguiu atingir um alcance de 100km com velocidade de 1,25Gb/s sem grandes problemas [RSOA WDM-PON, 2009].

4.5.3 UD-WDM PONs

Nesta secção será apresentada uma arquitectura que oferece 1Gb/s de taxas de dados simétricas para cada utilizador. Além disso permitirá um alcance de 100km e 1000 utilizadores. É uma nova geração de WDM-PON chamada de *ultra-dense WDM* que permitirá atingir até 1Tb/s de velocidade agregada. Esta tecnologia irá evitar muitas desvantagens dos sistemas convencionais com as tecnologias TDM e WDM.

Analisando o sistema G-PON, este transmite os dados com a tecnologia TDM. Já o NG-PON1 mantém as mesmas características que o G-PON, mas oferece maior velocidade. Para *downstream*, como referido no capítulo 2, este oferece 4 vezes maior velocidade que o sistema G-PON, quanto ao sentido *upstream* oferece até 2 vezes maior velocidade. Além disto, o NG-PON1 terá um factor de divisão maior, 1:512, e também uma capacidade de suportar mais do que um sistema PON através da tecnologia WDM.

Mas mesmo assim, com as melhorias feitas nas características de NG-PON1 comparativamente com G-PON, nenhum dos sistemas consegue permitir a consolidação local e em cima disto, nenhum apresenta uma melhoria das taxas de dados sem grandes investimentos em infra-estruturas ou equipamentos como apresenta a arquitectura UD-WDM.

A principal tecnologia apresentada nesta secção é a detecção coerente. Na detecção corrente, a luz que entra é sobreposta com um laser do oscilador local.

Assim, um receptor com detecção coerente por ser interpretado como um simples receptor clássico que contem um filtro passa banda e um amplificador óptico. O filtro passa banda permite eliminar no divisor os filtros WDM. Já o amplificador permite que se obtenha uma amplificação com um orçamento de potência óptica na ordem dos 45dB. Assim, devido a isto, consegue-se um alcance ultra-longo. O alcance conseguido é de 100km sem qualquer amplificação óptica de intermediários nos nós remotos e nem no

local de troca. Na figura 4.27 é ilustrado o esquema da arquitectura anteriormente mencionada [UD-WDM, 2009].

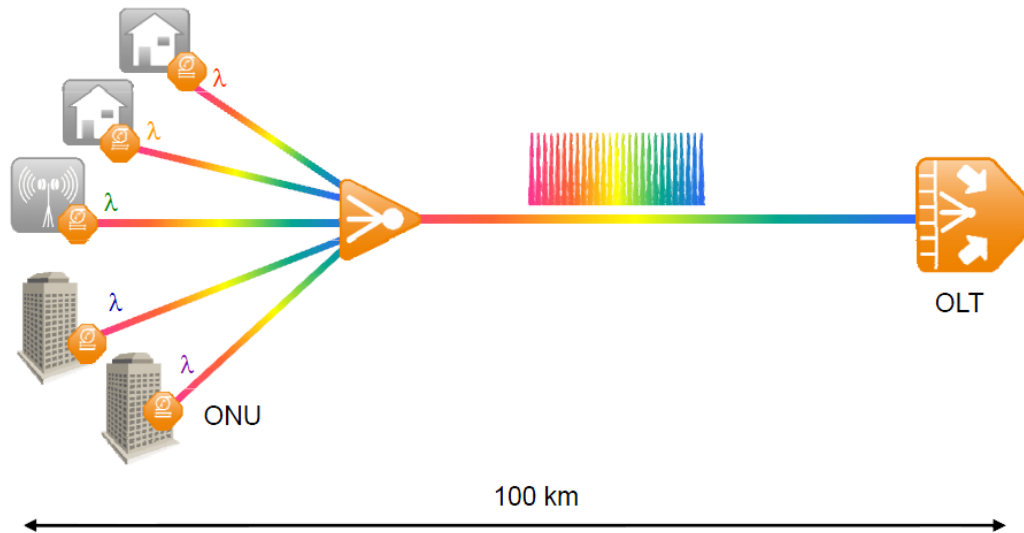


Figura 4.27: Arquitectura UD-WDM com detecção heterodyne [UD-WDM, 2009].

Existe um grande aumento de comprimentos de onda devido à alta selectividade de comprimentos de onda no receptor coerente. Este aumento pode encontrar-se na casa das centenas ou milhares. Os diversos comprimentos de onda da OLT são distribuídos por todas as ONUs. A taxa de dados agregada é 1 Tb/s, e cada cliente terá taxas simétricas de 1Gb/s.

A implementação de um sistema deste tipo é baseada na integração fotónica. Esta é necessária para reduzir o tamanho dos componentes e o custo. Além disso, também ajudará a eliminar distúrbios através da redução do processamento de sinais electrónicos.

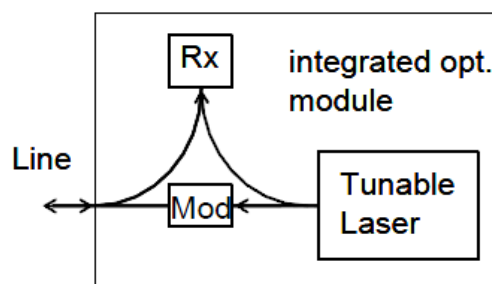


Figura 4.28: Módulo da ONU [UD-WDM, 2009].

Na figura 4.28 está ilustrado o módulo esquemático da ONU. No módulo pode-se observar que a ONU é composta por uma cavidade laser, que serve para transmitir e para oscilar no sentido *upstream*.

Relativamente à OLT, esta tem um elemento de processamento de sinal electrónico e um integrado fotónico. Neste último componente, o laser é utilizado para gerar a modulação de banda lateral única.

Conclui-se assim, que a detecção coerente, juntamente o processamento de sinais electrónicos e os componentes integrados fotónicos oferece a adição contínua de comprimentos de onda e de serviços. Assim satisfaz as necessidades requeridas actualmente, como também numa perspectiva futura oferece capacidades de evoluções. Além disto, esta técnica oferece a possibilidade de construir um sistema de acesso que combina a tecnologia PON com as conexões P2P.

4.6 Vantagens / Desvantagens de cada tecnologia apresentada

4.6.1 IM-WDM

Vantagens:

- Amplia a capacidade de transmissão das fibras, já que combina diversos comprimentos de onda em uma única fibra óptica;
- Fácil integração e amplificação óptica. Necessário para aumento das distâncias máximas;
- Suporta todos os serviços (ATM, Ethernet, TDM, etc) de modo transparente;
- Com a tecnologia CWDM permite baixo custos;
- Com a tecnologia DWDM permite melhor uso do espectro;
- Permite multiplicidade de taxas e independência de sistemas;
- Possibilita o aumento da largura de banda utilizada numa fibra, sem necessidade de alterações estruturais.

Desvantagens:

- Acrescenta custos no equipamento para gerar e filtrar os diferentes comprimentos de onda, eventualmente limitando a sua confidencialidade;
- Não tem QoS aceitável para a próxima geração de redes de acesso;
- A tecnologia CWDM apresenta-se limitada em número de canais, portanto, com pouca escalabilidade;

- A tecnologia DWDM apresenta custos elevados, devido essencialmente aos requisitos de estabilidade dos lasers; alocação dinâmica complexa.

4.6.2 OCDMA

Vantagens:

- Permite taxas de dados e formatos independentes para cada utilizador;
- OCDMA-PON geralmente não necessita de fontes múltiplas ou lasers ajustáveis o que faz com que potencie uma redução de custos;
- Oferece segurança da camada óptica e maior eficiência espectral do que por exemplo sistemas WDM;

Desvantagens:

- Complexidade dos sistemas;
- Impossibilidade de eliminar o ruído de interferência múltipla;

4.6.3 OFDM

Vantagens:

- Um canal de alta velocidade é transformado num conjunto de subcanais independentes com baixa taxa de bits;
- Os canais OFDM podem atingir uma boa performance;
- IFFT e FFT podem ser realizadas através de técnicas de processamento digital, o que torna a implementação de OFDM muito fácil, assegurando que as subportadoras não interferem umas com as outras;
- Óptica simples;
- Alta eficiência de largura de banda;
- Poupança de energia;
- Permite a alocação dinâmica da largura de banda o que de forma rentável aumenta as taxas de dados e a flexibilidade das redes de acesso;
- Tolerância de dispersão, útil para PON de longo alcance;
- A alocação da largura de banda é realizada no domínio eléctrico;

Desvantagens:

- Ruído de fase do laser e frequência de offset da portadora podem levar à degradação do desempenho;
- OFDM é afectado por não linearidades da fibra;
- Energia elevada é necessária para recuperar correctamente a informação;

4.6.4 Coerente

Vantagens:

- Largura de banda individual não partilhada;
- Agregações metro separadas desnecessárias;
- Reutilização da rede metro de fibra já existente;
- *Tunable lasers* avançados, circuitos fotónicos integrados, processamento digital de sinal;
- Alta resolução espectral.

Desvantagens:

- Receptor complexo.

4.7 Proposta de tecnologia para NG-PON2

Requisitos de NG-PON2	IM-WDM	OCDMA	OFDM	Deteccão Coerente com UD-WDM
40 Gg/s de capacidade agregada	✓	x	✓	✓
Simetria sustentável de 1Gb/s por ONU	✓	x	✓	✓
Com 64 divisores passivos	x	x	ND	ND
20 km de alcance básico	✓	ND	✓	✓
Maior segurança	ND	✓	✓	ND
Redução dos custos	x	✓	✓	✓

Tabela 4.1: Enquadramento dos requisitos para NG-PON 2 com as propostas de tecnologias relevantes(ND-Não Descrito).

Futuro	IM-WDM	OCDMA	OFDM	Deteccão Coerente com UD-WDM
Velocidade Agregada	40 Gb/s	10 Gb/s	108 Gb/s	1 Tb/s
Utilizadores	32	15	256	1000
Distância	20km	dezenas	20km	100km
Observações	Proposta CWDM 4x10 Gb/s Aproveita as tecnologias desenvolvidas comercialmente	Sistema de baixo custo que não exige qualquer fonte	Permite alocação dinâmica de banda, faz aumentar a taxa de dados	Permite a consolidação local e melhoria das taxas de dados sem grandes investimentos de infra-estruturas

Tabela 4.2: Enquadramento das tecnologias propostas para NG-PON 2 com as capacidades estudadas actualmente numa perspectiva para o futuro.

NG-PON2 irá incluir o *standard* de WDM-PON ao mesmo tempo da realização do seu *standard*, mas o alcance ainda não foi totalmente aprovado pelo grupo FSAN. Os equipamentos WDM-PON deverão ser disponibilizados de uma forma relativamente rápida após a criação do seu *standard*. Ora, se estes *standards*, NG-PON2 e WDM, são

criados relativamente ao mesmo tempo, a tecnologia WDM mostra-se como uma boa candidata para NG-PON2 pelo facto de ser implementada pouco depois dos padrões. Há que ter também em conta, que não foi apresentado nenhuma barreira tecnologia neste capítulo para a tecnologia WDM. Mas esta tecnologia um pouco dispendiosa.

A proposta apresentada por IM-WDM-PON, CWDM 4*10Gb/s é uma boa arquitectura que cumpre alguns dos requisitos para NG-PON2 e que traz como grande vantagem a economia em infra-estrutura, uma vez que aproveitará as infra-estruturas já existentes para ampliar para NG-PON2. Mas, em contra partida, esta arquitectura não apresenta ser um investimento para futuras redes de acesso, com maior capacidade, alcance e utilizadores. Além disso, a nível de segurança apresenta algumas lacunas, pelo que seriam necessários esforços nesse campo.

Relativamente à tecnologia OCDMA, esta demonstrou-se muito aquém das expectativas. Por um lado, quase não cumpre os requisitos impostos por NG-PON2, enquanto por outro, apresenta problemas de segurança. Embora o sistema demonstrado, OCDMA-PON com colorless e sourceless ONUs seja de baixo custo e sem erros de bits na transmissão, ora com os novos serviços e aplicações emergentes apostar numa tecnologia com graves problemas de segurança não é uma boa escolha. Adicionalmente, apresenta também alta complexidade e alto custo.

Quanto à tecnologia OFDM, esta surgiu recentemente no campo da óptica e está a dar largos passos para se tornar uma forte candidatura para NG-PON2. Os sistemas propostos, 108 Gb/s e 40 Gb/s, apresentam altas velocidades de dados e alocação dinâmica da largura de banda, mostrando ser uma tecnologia muito flexível. No entanto, apresenta dificuldades no orçamento óptico de energia, o que limita o número de separações. Além disso, também precisa de conversores ópticos OFDM para os sinais *up* e *down*. Outro factor negativo desta tecnologia é o ruído de fase do laser e frequência de *offset* da portadora, o que leva a uma grande degradação do desempenho.

Pelos problemas enunciados anteriormente sobre a tecnologia WDM e OFDM e pelo facto de que as vantagens de ambas se completam, tentou-se uma proposta híbrida das duas tecnologias, de forma a se para poder ficar com o melhor de cada uma. Um dos problemas desta experiência é o custo da ONU que não se conseguiu resolver e também pelo facto de que o sinal só é transmitido em boa qualidade num alcance máximo de 25 km. Estes graves problemas fazem com que isto não seja uma boa aposta para NG-PON2.

A última tecnologia proposta é a detecção coerente, que transfere as informações ópticas para o domínio eléctrico. As várias propostas com a detecção coerente com sistemas WDM-PON fazem com que haja uma redução do custo de equipamentos considerável, tornando esta hipótese bastante atractiva para NG-PON2. A proposta de UD-WDM permite uma consolidação local e uma continuação da melhoria de taxas de dados sem que grandes investimentos em infra-estrutura ou equipamentos sejam necessários, revelando-se uma tecnologia promissora para NG-PON2 e para as futuras redes de acesso.

Das várias tecnologias referidas neste documento, existem algumas que poderão oferecer os requisitos mínimos para NG-PON2, tal como se pode observar na tabela 4.1. Estas também permitem evoluções para redes futuras, evitando assim o grande problema que se impõem aos operadores de rede terem de renovar a sua infra-estrutura após a actualização.

As tecnologias cuja implementação é mais provável no NG-PON 2 o OFDM e/ou detecção coerente. Ambas possuem características diferentes, mas com boas garantias, tanto a nível de alcance, largura de banda, número de utilizadores, etc (tabela 4.2). Embora se tenham tentado tecnologias híbridas, neste documento estas acarretam custo acima do necessário para cada tecnologia individual.

Com estas tecnologias as redes de acesso assistirão a uma grande melhoria na eficiência espectral, o que se traduz numa redução de energia e custo relevantes. Estas tecnologias proporcionam a utilização dos recursos de forma muito rentável, pelo que por isso, serão um bom caminho na direcção para a normalização de NG-PON2.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

A evolução da tecnologia PON tem sido grande nestes últimos anos, em que factores como a largura de banda por utilizador têm aumentado constantemente como se pode verificar com a evolução de E-PON para GE-PON ou de G-PON para NG-PON1. Com a necessidade crescente por parte dos consumidores e serviços de aumento de largura de banda, é preciso continuar o estudo da evolução destas redes. Nesta dissertação foi apresentado um estudo das características que uma rede NG-PON2 deverá apresentar para satisfazer estes futuros requisitos de forma rentável, sem custos acrescidos para as operadoras e/ou clientes.

O foco principal da tese é a arquitectura NG-PON2, os seus requisitos, e que tecnologias são propostas para os satisfazer. No entanto, inicialmente foi efectuado um estudo do estado das redes actuais e anteriores, onde se verificou que estas se encontram muito limitadas em termos de escalabilidade de largura de banda. Além disso, estas apresentam tipicamente custos de implementação elevados. Os *standards* GE-PON não abordam todas as questões técnicas importantes causando limitações na camada PHY, o que pode acarretar mais problemas a nível de segurança, alocação dinâmica de largura de banda e alcance. Já no caso da G-PON existem outros problemas, tais como várias normas para um mesmo problema, criando mais do que uma solução possível, provocando diferenças entre os operadores. A título de exemplo, no G-PON podemos utilizar PINs ou APDs e *single* ou *multiple* T-Conts. Outro problema de G-PON é relativo à norma inicial, que apresentava várias larguras de banda ao todo uma combinação de sete opções para a transmissão *up* e *down*, não apresentando uma orientação clara. Assim sendo, há necessidade de se definir uma nova rede de acesso que colmate estes problemas e se mostre rentável, apresentando uma infra-estrutura que possa ser utilizada por largos anos, possibilitando futuros evoluções da mesma.

Os requisitos desta nova rede de acesso (i.e NG-PON2) para 2015 têm sido identificados como os seguintes: atingir-se 40Gb/s de capacidade agregada; simetria sustentável de 1Gb/s por ONU; divisão passiva de 64; 20 km básicos de alcance; 60 km de alcance com extensão; maior segurança e redução dos custos energéticos.

Para se poderem garantir estes requisitos foram efectuados estudos sobre os vários projectos internacionais, tais como o PIEMAN, o SARDANA, o ACCORDANCE, o GEYSERES, o MAINS e o OASE. Estes projectos devotam-se às várias camadas da rede de acesso. Os projectos PIEMAN, SARDANA e ACCORDANCE focam-se em maior detalhe na parte do core da rede de acesso, propondo tecnologias como WDM e OFDM, muito importantes para a evolução de NG-PON2. Já os projectos GEYSERS, MAINS e OASE se focam mais com as diversas tecnologias de informação, que de certo modo contribuem

para os requisitos de segurança e controlo de informação, cuja importância é bastante significativa.

Neste documento, foram ainda evidenciadas da literatura as tecnologias actuais candidatas para NG-PON2. Estas são o IM-WDM, o OCDMA, o OFDM e a detecção coerente. Das várias tecnologias referidas, existem algumas que poderão oferecer os requisitos mínimos para NG-PON2, e, ao mesmo tempo permitirem evoluções para futuras redes, minimizando o grande problema que se impõem aos operadores de rede de terem de modificar as sua infra-estruturas.

As tecnologias mais prováveis para serem implementadas em NG-PON2 são OFDM e/ou detecção coerente. Todas possuem características diferentes, no entanto, ambas apresentam boas garantias a nível de alcance, largura de banda, número de utilizadores, etc.

Com estas tecnologias, as redes de acesso têm uma grande melhoria na eficiência espectral, o que se traduz numa grande economia de custo. Para além disso proporcionam uma utilização dos recursos de forma muito rentável, pelo que desta forma serão um bom caminho a seguir para a normalização de NG-PON2.

Como as propostas de tecnologias foram baseadas em trabalho de simulação de grandes empresas mundiais, deverá-se confirmar tais resultados futuramente e fazer mais testes exaustivos sobre o cumprimento dos requisitos que NG-PON2 exige.

Além disso, é importante fazer uma análise de estratégias futuras para alcançar uma arquitectura de extensão dos 40 Gb/s para 100Gb/s agregados, com um alcance maior, de maneira a se reduzirem os custos operacionais.

6 Referências

[ACCORDANCE, 2010] “A Converged Copper-Optical-Radio OFDMA-based access Network with high Capacity and Flecibility”, FP7 ICT Call 4 Projects Portfolio, January 2010.

[ACCORDANCE_2, 2010] “ACCORDANCE: A Novel OFDMA-PON Paradigm for Ultra-High Capacity Converged Wireline-Wireless Access Networks”, Konstantinos Kanonakis, Ioannis Tomkos, Thomas Pfeiffer, Josep Prat, Pandelis Kourtessis, 2010.

[Analysys Mason, 2010] “Fibre capacity limitations in access networks”, Report of Ofcom, 2010

[Biancani, 2010] “Generalised Architecture for Dynamic Infrastructure Services (GEYSERS)”, Matteo Biancani, 2010;

[Coherent, 2009] “High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission” Matthias Seimetz, 2009, pp 79-81

[Coherent WDM, 2009] “Coherent WDM-PON based on Heterodyne Detection with Digital Signal Processing for Simple ONU Structure” Satoshi Narikawa, Naoya Sakurai, Kiyomi Kumozaki , Takamasa Imai, OFC, 2009

[CWDM, 2009] “A 40Gb/s CWDM-TDM PON with a Cyclic CWDM Multiplexer/Demultiplexer”, P. P. Iannone, K. C. Reichmann, C. R. Doerr, L. L. Buhl, M. A. Cappuzzo, E. Y. Chen, L. T. Gomez, J. E. Johnson, A. M. Kanan, J. L. Lentz, and R. McDonough, ECOC 2009, September 2009, Vienna, Austria

[FSAN, NG-PON] <http://fsanweb.com/>, Abril 2010.

[FTTH, 2010] “ FTTH Business Guide”, Fiber to the Home Council Europe, February 2010.

[G-EPON, 2009] “Optical Access Transport System –GE-PON Platform-”, Yoshinori Ishii, Haruo Yamashita, FUJITSU Sc1, October 2009

[GEYSERS, 2010] “Generalised Architecture for Dynamic Infrastructure Services”, FP7 ICT Call 4 Projects Portfolio, January 2010;

[GPON, 2007] “Gigabit Passive Optical Network-GPON”, Ivica Cale, Aida Salihovic, Matija Ivekovic Int. Conf. on Information Technology Interfaces June 2007, Cavtat Croatia.

[Huawei, 2009] “Next Generation PON: Lessons Learned from G-PON and GE-PON”, Frank J. Effenberger, Huawei Technologies Co., Ltd., ECOC September 2009, Vienna Austria.

[IAT, 2009] “FTTP Deployment Options and Economic Challenges”, Dave Payne, Institute of Advanced Telecommunications, Swansea University, ECOC September 2009, Vienna Austria.

[IEEE 10G-EPON, 2009] “Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks”, 802.3av IEEE Standard for Information technology, September 2009.

[IEEE G-EPON, 2004] “Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks”, 802.3ah IEEE Standard for Information technology, September 2004.

[IEEE , G-EPON] <http://www.ieee.org/web/aboutus/home/index.html>, Março 2010.

[ITU G-PON, 2008] “Gigabit-capable passive optical networks (GPON)”, Recommendation ITU-T,G.984, March 2008.

[ITU, G-PON] <http://www.itu.int/net/about/index.aspx>, Março 2010.

[ITU XG-PON, 2010] “10-Gigabit-capable passive optical network (XGPON) systems”, Recommendation ITU-T, G.987, March 2008.

[MAINS, 2010] “Metro architectures enabling Subwavelengths”, FP7 ICT Call 4 Projects Portfolio, January 2010;

[Mitsubishi electric, 2010] “Study of architecture design of OFDM-PON”, Mitsubishi electric, FSAN NG-PON2 workshop, February 2010.

[NG-PON, Teixeira] “FTTH standardization activities”, Antonio Teixeira, Janeiro 2010.

[NG-PON FSAN, 2009] “FSAN NG-PON White Paper”, Anna Cui, Fabrice Bourgart, Frank Effenberger, Junichi Kani, and Hiroaki Mukai, May 2009.

[NG-PON Part I, 2009] “Next-Generation PON—Part I: Technology Roadmap and General Requirements”, Jun-ichi Kani, Fabrice Bourgart, Anna, Albert Rafel, Malcolm Campbell, Russell Davey, Silvana Rodrigues, IEEE Communications Magazine, November 2009.

[OASE, 2010] “Optical Seamless Evolution”, FP7 ICT Call 4 Projects Portfolio, January 2010;

[OCDMA, 2005] “Gigabit-Symmetric FTTH- OCDMA over WDM PON-”, Ken-ichi Kitayama, Xu Wang, Hideyuki Sotobayashi, 2005

[OCDMA, 2009] “Demonstration of Asynchronous, 10Gbps OCDMA PON system with Colorless and Sourceless ONUs”, Gabriella Cincotti, Nobuyuki Kataoka, Naoya Wada, Xu Wang, Tetsuya Miyazaki, Ken-ichi Kitayama, ECOC 2009, September 2009, Vienna, Austria

[OFDM, 2004] “Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Tutorial”, Intuitive Guide to Principles of Communications, 2004

[OFDM, 2006] “Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems”, Arthur James Lowery and Jean Armstrong, 2006

[OFDM, 2010] “108 Gb/s OFDMA-PON With Polarization Multiplexing and Direct Detection”, Dayou Qian, Neda Cvijetic, Junqiang Hu, Ting Wang, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 28, NO. 4, FEBRUARY 15, 2010

[OFDM]http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_multiplexacao_ortogonal_por_divisao_de_frequencia.php, Maio, 2010.

[PIEMAN, 2006] Progress in IST project PIEMAN towards a 10 Gbit/s, multi-wavelength long reach PON; Russell Davey, Tine De Ridder, Xing-Zhi Qiu, Peter Ossieur, Heinz-Georg Krimmel, David Smith, Ian Lealman, Alistair Poustie, Giuseppe Talli, Chi Wai Chow, Paul Townsend, Sebastian Randel, Harald Rohde; Geneva, Switzerland 11-14 December 2006

[PIEMAN, NOC] Integrated Metro and Access Network: PIEMAN Russell Davey, Tine De Ridder, Xing-Zhi Qiu, Peter Ossieur, Heinz-Georg Krimmel, David Smith, Ian Lealman, Alistair Poustie, Giuseppe Talli, Chi Wai Chow, Paul Townsend, Sebastian Randel, Harald Rohde; 12th European Conference and Optical

[PON, 2007] “An Introduction to PON Technologies”, Frank Effenberger - Huawei Technologies US, Davide Cleary - Cálix Inc., Onn Haran - PMC Sierra, Glen Kramer - Teknovus Inc, Ruo Ding Li - Motorola Inc., MosheOron – Tellabs Inc., Thomans Pfeiffer - Alcatel-Lucent Germany; Topics In Optical Communications, March 2007.

[Requisitos, 2010] “OFDM-based PON for NGPON2”, FSAN NGPON2 Workshop, NEC Laboratories, Feb 2010 San Francisco, America.

[Requisitos2, 2010] “Optical Access Solutions Beyond 10G-EPON/XG-PON”, Jörg-Peter Elbers ADVA AG Optical Networking, Fraunhoferstr. 9a, 82152 Martinsried, Germany, OSA / OFC/NFOEC 2010;

[RSOA WDM-PON, 2009] “Demonstration of RSOA-based WDM PON Employing Self-Homodyne Receiver with High Reflection Tolerance” S. P. Jung, Y. Takushima, K. Y. Cho, S. J. Park, Y. C. Chung, OFC, 2009

[SARDANA, 2008] “Scalable Advanced Ring-based passive Dense Access Network Architecture”, March 2008;

[SARDANA] “The FTTH Prism” Vol. 5, Muneer Zuhdi, Thomas Ruvarac, Tellabs;

[Siemens] “Quebrar a barreira dos 40 Gbit/s uma história de sucesso na investigação em Portugal”, Siemens, S.A.

[Standards, 2006] “Common Technical Specification of the G-PON System among Major Worldwide Access Carriers”, Arnaud Cauvin, France Telecom; Adler Tofanelli, Telecom Italia; Julie Lorentzen, AT&T; Joseph Brannan, BT Exact; Andreas Templin, Deutsche Telekom; Taesang Park, KT; Koichi Saito, Nippon Telegraph and Telephone Corporation; Standards Report, October 2006.

[Tutorial, 2008] “Tutorial: Trends in optical Access and in-building networks”, T. Koonen COBRA, ECOC 2008 September 2008, Brussels, Belgium.

[UD-WDM, 2009] “Next Generation Optical Access: 1 Gbit/s for Everyone” Harald Rohde, Sylvia Smolorz, Erich Gottwald, Karl Kloppe ECOC Vienna, Austria, September, 2009

[Wikipedia, G-EPON] <http://pt.wikipedia.org/wiki/IEEE>, Março 2010.

[Wikipedia, G-PON]

http://pt.wikipedia.org/wiki/União_Internacional_de_Telecomunicações, Março 2010.

[Wikipedia, WDM] http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division_multiplexing, Maio 2010.

[WDM, 2005] “Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access”, Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke and Huan Song, Sunhee Yang, Glen Kramer, Kwangjoon Kim, Biswanath Mukherjee, November 2005;

[WDM, 2010] “Fibre capacity limitations in access networks ”, Report for Ofcom, January 2010;

[WDM] “White Paper WDM-PON Technologies”, CIP technologies;

[WDM_OFDM, 2010] “A WDM-OFDM-PON architecture with centralized lightwave and PolSK-modulated multicast overlay ”, Bo Liu¹, Xiangjun Xin, Lijia Zhang, Jianjun Yu, Qi Zhang¹, Chongxiu Yu, Optical Society of America 2010