



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO E PUBLICAÇÕES

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores

Fibras Óticas de Plástico em Redes de Acesso

MARINO OLIVEIRA RODRIGUES
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações

Orientador:

Doutor Pedro Renato Tavares de Pinho

Júri:

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias

Vogais:

Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes

Doutor Pedro Renato Tavares de Pinho

Novembro de 2013

*“Prestes, larguei a vela
E disse adeus ao cais, à paz tolhida.
Desmedida,
A revolta imensidão
Transforma dia a dia a embarcação
Numa errante e alada sepultura...
Mas corto as ondas sem desanimar.
Em qualquer aventura.
O que importa é partir, não é chegar.”*

Miguel Torga, Viagem

Aos meus queridos pais.

agradecimentos

Terminar esta importante etapa da vida sem referir todos aqueles que me apoiaram e contribuíram à sua maneira ao longo deste percurso, seria um ato de ingratidão e desonestidade.

Quero começar por agradecer ao meu orientador de Mestrado, Professor Doutor Pedro Pinho, pelas suas sugestões do melhor caminho a seguir, pela sua disponibilidade e material técnico disponibilizado.

Um agradecimento especial ao Pedro Soares, colega e aluno formado no ISEL, que deu uma forte contribuição no arranque deste trabalho, ajudando no processo de familiarização com o simulador *VPI Photonics* e pela partilha de conhecimento acerca do mundo das fibras óticas de plástico.

Quero também agradecer aos meus colegas de trabalho da Refer Telecom, em particular ao André Rio pela oportunidade de discutir diversos assuntos técnicos relacionados com o tema desta dissertação. Um agradecimento especial ao Engenheiro Luís Figueiredo pela partilha do seu conhecimento técnico na área das fibras óticas.

À minha namorada pelo companheirismo, carinho e força nesta longa caminhada.

Aos meus amigos em geral, que me acompanharam ao longo da vida académica e partilharam comigo bons e maus momentos.

Por último e mais importante, um agradecimento muito especial aos meus pais, por todo o esforço que fizeram para me proporcionar todas as condições necessárias para que fosse possível ingressar e concluir um curso superior. Pelo carinho, por todo o apoio incondicional, orientação para a vida e educação.

Muito Obrigado!

Resumo

O aumento crescente da largura de banda necessária por parte dos utilizadores residenciais e empresariais tem sido um desafio nos últimos anos para os operadores de telecomunicações. Por esse motivo, a fibra ótica tornou-se uma fortíssima candidata às redes de acesso, permitindo débitos binários muitos superiores quando comparado com as infraestruturas até então existentes, nomeadamente o par de cobre e cabo coaxial ou mesmo com os sistemas de comunicação sem fios.

As fibras óticas podem existir em diferentes materiais: fibra ótica de sílica (GOF) e fibra ótica de plástico (POF). As primeiras possuem baixas atenuações permitindo transmissões de longa distância, mas são frágeis. As de plástico neste momento têm atenuações mais altas, no entanto são de menor custo, mais flexíveis e robustas.

Pretende-se com esta dissertação estudar a viabilidade da utilização da fibra ótica de plástico numa rede de acesso garantindo os requisitos mínimos especificados pelas normas das tecnologias. Para tal, utilizou-se o programa *VPIphotonicsTM* de modo a simular uma rede de acesso com vários tipos de fibras. Elaboraram-se dois cenários: o primeiro consiste na implementação de uma rede GPON com POF e GOF na rede de acesso e o segundo na análise do desempenho da POF num cenário onde a tecnologia GPON e 10G-PON coexistem na mesma rede de distribuição ótica (ODN). Efetuou-se o cálculo teórico do *power budget* do sistema, onde teve-se em conta as características de todos os componentes passivos e ativos que constituem a rede. As fibras consideradas para teste e comparação foram uma fibra monomodo *G.657 ClearCurve* da *Corning*, uma fibra multimodo *ClearCurve* e uma POF designada por *Fontex* da *Asahi Glass*.

A qualidade do sinal ótico recebido foi analisada recorrendo a figuras de mérito como o BER e o diagrama de olho. A distância máxima conseguida na última milha com POF foi de 115 metros para o primeiro cenário e de 40 metros para o segundo cenário. Na situação atual, devido à elevada atenuação que as POF ainda possuem só se justifica quando a atenuação do ODN é cerca de 15 dB.

Palavras-chave: fibra ótica de sílica (GOF), fibra ótica de plástico (POF), rede de acesso, GPON, 10 GPON, *power budget*, FTTH.

Abstract

The increasing bandwidth needed by the business and residential users has been a challenge in recent years for telecom operators. For this reason, optical fiber became a strong candidate to access networks, allowing high transmission rates when compared with existing infrastructures, especially the twisted pair and coaxial cable or even with wireless communication systems.

Optical fibers can exist in different materials: glass optical fiber (GOF) and plastic optical fiber (POF). The GOF have low attenuation allowing long-distance transmission, but are fragile. The POF currently have a higher attenuation, however is less expensive and is more flexible and robust.

The purpose of this thesis is to study the feasibility of using plastic optical fiber in the access network ensuring the minimum requirements specified by the standards of technologies. For this purpose, it was used a program called VPIphotonicsTM to simulate an access network with different types of fibers. Two scenarios were taken into account: the first one is an implementation of a GPON network with POF and GOF in access network and the second scenario consists on the analysis of the performance of POF in an environment where GPON and 10G-PON coexists on the same optical distribution network (ODN). It was necessary a theoretical calculation of the power budget of the system, which took into account the characteristics of all passive and active components that forms the network. The fibers that were considered for testing and comparison were a singlemode fiber G.657 ClearCurve by Corning, ClearCurve multimode fiber and POF called Fontex developed by Asahi Glass.

The quality of the optical received signal was analyzed using figures of merit such as BER and eye diagram. The maximum distance achieved in the last mile with POF was 115 meters to the first scenario and 40 meters for the second scenario. In the current situation, due to the high attenuation of POF is only viable when the ODN attenuation is about 15 dB.

Keywords: Glass optical fiber (GOF), plastic optical fiber (POF), access network, GPON, 10 GPON, power budget, fiber to the home (FTTH).

Índice

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Contextualização histórica	4
1.4 Estrutura da dissertação	7
1.5 Principais contribuições	8
CAPÍTULO 2 FIBRAS ÓTICAS.....	9
2.1 Espectro ótico	10
2.2 Fundamentos de propagação em fibras óticas.....	11
2.2.1 Índice de Refração.....	11
2.2.2 Refração e reflexão.....	11
2.2.3 Ângulo de aceitação	12
2.2.4 Abertura numérica.....	13
2.2.5 Regime monomodal e multimodal (parâmetro V)	13
2.3 Fibra ótica de sílica.....	14
2.3.1 Fibras monomodo.....	14
2.3.2 Fibras multimodo	15
2.3.2.1 Índice degrau (step-index).....	15
2.3.2.2 Índice gradual (graded-index).....	16
2.3.3 Comparação entre várias normas de fibras de sílica	16
2.4 Fibra ótica de plástico	17
2.4.1 Tipos de POFs.....	17
2.4.1.1 SI-POF (Step index – POF).....	18
2.4.1.2 MC-POF (Multi core – POF)	18
2.4.1.3 GI-POF (Graded index – POF)	19
2.4.1.4 MSI-POF (Multi step index – POF).....	19
2.4.2 Comparação entre os tipos de POFs.....	20
2.4.3 Normas existentes para POFs	21
2.4.4 POFs disponíveis no mercado.....	22
2.4.5 Vantagens e desvantagens da POF.....	24
2.5 Atenuação	25
2.6 Dispersão	26

2.6.1	Dispersão intramodal (cromática)	26
2.6.2	Dispersão intermodal	27
CAPÍTULO 3 REDES DE ACESSO.....		29
3.1	Estrutura de uma rede telecomunicações	30
3.2	Cenários evolutivos das redes de acesso.....	31
3.3	Rede de acesso usando fibra ótica	33
3.3.1	Graus de penetração da fibra ótica	33
3.3.1.1	FTTN – Fiber to the Node.....	34
3.3.1.2	FTTC – Fiber to the Curb.....	34
3.3.1.3	FTTP – Fiber to the Premises.....	35
3.3.2	Rede ótica passiva (PON)	35
3.3.3	Rede ótica ativa (AON)	36
3.3.4	Comparação entre PON e AON	37
3.3.5	Equipamento ativo.....	37
3.3.5.1	OLT – Optical Line Terminal	37
3.3.5.2	ONT – Optical Network Terminal	38
3.3.6	Equipamento passivo.....	39
3.3.6.1	Divisor ótico (splitter)	39
3.3.6.2	Caixas de junção.....	40
3.3.6.3	Distribuidor ótico	40
3.3.6.4	Patch cord / Pigtail	41
3.3.6.5	Acoplador WDM.....	42
3.3.7	Arquiteturas das redes PON	42
3.3.8	Topologias das redes PON.....	43
3.3.8.1	Topologia em barramento	43
3.3.8.2	Topologia em anel.....	44
3.3.8.3	Topologia em árvore	45
3.4	Tecnologias das redes PON	46
3.4.1	APON	47
3.4.2	BPON	48
3.4.3	GPON	49
3.4.4	10G-PON	50
3.4.5	EPON.....	51
3.4.6	10G-EPON.....	53
3.4.7	Comparação das tecnologias TDM-PON.....	54

3.4.8	WDM-PON.....	55
3.4.8.1	CWDM.....	56
3.4.8.2	DWDM	56
3.4.8.3	Comparação entre CWDM e DWDM.....	56
3.5	<i>Power budget</i>	57
3.5.1	Perdas convencionais dos componentes passivos	58
3.5.2	Dimensionamento de uma rede PON	60
3.6	Figuras de mérito.....	63
3.6.1	BER.....	63
3.6.2	Diagrama de olho	64
CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO DE UMA REDE DE ACESSO COM POF		65
4.1	Introdução ao <i>software</i> VPI.....	66
4.1.1	Interface gráfica	66
4.1.2	Hierarquia dos módulos.....	68
4.2	Cenários propostos	69
4.2.1	Primeiro cenário – Implementação de uma GPON com POF.....	70
4.2.2	Segundo cenário – Coexistência 10G-PON e GPON com POF	71
4.2.3	Cálculo teórico do power budget	72
4.3	Componentes e parametrização no VPI.....	77
4.3.1	Limitações encontradas no VPI	77
4.3.2	Módulos e componentes do VPI.....	78
4.3.3	Parâmetros individuais e globais.....	81
4.3.4	Parametrização do sistema.....	83
4.4	Implementação e simulação dos cenários propostos.....	86
4.4.1	Primeira implementação	87
4.4.2	Construção de galáxias	89
4.4.3	Implementação da técnica TDMA no VPI	91
4.4.4	Simulação do cenário 1 – GPON com POF.....	95
4.4.4.1	Implementação.....	95
4.4.4.2	Resultados obtidos	99
4.4.5	Simulação do cenário 2 – Coexistência GPON e 10G-PON com POF.....	106
4.4.5.1	Implementação.....	106
4.4.5.2	Resultados obtidos	109

CAPÍTULO 5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
5.1	Conclusões.....	115
5.2	Trabalho futuro	119

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Convergência de rede e de serviços.	3
Figura 2.1 - Constituição da fibra ótica [10].	10
Figura 2.2 - Comprimento de onda de operação das GOFs e POFs (adapt. de [11]).	10
Figura 2.3 - Refração e reflexão interna total e parcial da luz [13].	12
Figura 2.4 - Propagação da luz na fibra ótica [12].	13
Figura 2.5 - Fibra multimodo de índice de degrau (adaptado de [13]).	15
Figura 2.6 - Fibra multimodo de índice gradual (adaptado de [13]).	16
Figura 2.7 - Perfil de índice de refração de uma SI-POF [6].	18
Figura 2.8 - MC-POFs com 37, 217 e 631 núcleos [6].	18
Figura 2.9 - Perfil de índice de refração de uma GI-POF [6].	19
Figura 2.10 - Perfil de índice de refração de uma MSI-POF [6].	20
Figura 2.11 - Gráfico da atenuação da <i>Fontex</i> [20].	24
Figura 2.12 - Efeito da dispersão cromática [21].	27
Figura 2.13 - Efeito da dispersão intermodal nas POFs [6].	28
Figura 3.1 - Esquema simplificado de uma rede telecomunicações com fibra ótica.	31
Figura 3.2 - Evolução das tecnologias da rede de acesso.	32
Figura 3.3 - Arquiteturas FTTx.	33
Figura 3.4 - FTTC / FTTN.	34
Figura 3.5 - Rede ótica passiva [2].	36
Figura 3.6 - Rede ótica ativa [2].	36
Figura 3.7 - OLT7-8CH [25].	38
Figura 3.8 - ONT7-SFU [25].	39
Figura 3.9 - <i>Splitter</i> ótico de 1:64 [26].	40

Figura 3.10 - Caixa de junção [26].	40
Figura 3.11 - Distribuidor ótico [26].	41
Figura 3.12 - Patch cord / Pigtail [27].	41
Figura 3.13 - Acoplador WDM [28].	42
Figura 3.14 - Redes P2P (ponto-a-ponto) e P2MP (ponto-a-multiponto).	43
Figura 3.15 - Topologia em barramento.	44
Figura 3.16 - Topologia em anel.	44
Figura 3.17 - Topologia em árvore.	45
Figura 3.18 - Esquema das tecnologias PON.	46
Figura 3.19 - Topologia híbrida WDM/TDM [29].	47
Figura 3.20 - Gama de operação APON/BPON (adpt. de [24]).	48
Figura 3.21 - Rede GPON.	49
Figura 3.22 - Gama de comprimento de onda GPON/10G-PON [2].	50
Figura 3.23 - Coexistência GPON/10G-PON.	51
Figura 3.24 - Rede EPON.	52
Figura 3.25 - Gama de comprimento de onda EPON/10GE PON [2].	53
Figura 3.26 - Rede WDM-PON [30].	55
Figura 3.27 - Espaçamento entre canais CWDM [2].	56
Figura 3.28 - Espaçamento entre canais DWDM [2].	56
Figura 3.29 - <i>Link Power Budget vs Loss Power Budget</i> (adpt. de [4]).	58
Figura 3.30 - Dimensionamento de uma PON (adapt. de [4]).	62
Figura 3.31 - Codificação NRZ [6].	63
Figura 3.32 - Diagrama de olho [6].	64
Figura 4.1 - Interface gráfica do VPItransmissionMaker.	67

Figura 4.2 - Interface gráfica do VPItransmissionAnalyser.	68
Figura 4.3 - Hierarquia de módulos do VPI [32].	69
Figura 4.4 - Primeiro cenário prático - GPON.	70
Figura 4.5 - Sistema dentro da casa do utilizador [6].	71
Figura 4.6 - Segundo cenário prático - Coexistência 10G-PON e GPON.	72
Figura 4.7 - Dimensionamento do balanço de potência.	73
Figura 4.8 - Cálculo do <i>power budget</i> no sentido descendente (1490 nm) - GPON.	75
Figura 4.9 - Cálculo do <i>power budget</i> no sentido ascendente (1310 nm).	76
Figura 4.10 - Cálculo do <i>power budget</i> no sentido descendente (1575 nm) - 10GPON.	77
Figura 4.11 - Janela de edição do módulo de uma fibra multimodo.	81
Figura 4.12 - Janela de edição dos parâmetros globais.	82
Figura 4.13 - Primeira simulação no VPI.	87
Figura 4.14 - Resultados da primeira implementação.	88
Figura 4.15 - Galáxia construída para o OLT.	90
Figura 4.16 - Galáxia para o <i>splitter</i> 1:8.	90
Figura 4.17 - Modificação da galáxia do OLT.	93
Figura 4.18 - Códigos binários atribuídos aos fluxos no OLT.	93
Figura 4.19 - Galáxia do ONT.	94
Figura 4.20 - Código binário atribuído ao ONT 2.	95
Figura 4.21 - Esquema implementado no simulador para o cenário 1.	96
Figura 4.22 - Parametrização final do ONT1.	97
Figura 4.23 - Janela de edição da POF Fontex (@1310nm).	98
Figura 4.24 - Resultados para o ONT2 com POF <i>Fontex</i>	100
Figura 4.25 - Variação do BER em função do comprimento da POF (@1490 nm).	101

Figura 4.26 - Resultados no OLT/ sinal ascendente do ONT2.....	102
Figura 4.27 - Resultados para o ONT1 com fibra G.657 <i>ClearCurve</i>	103
Figura 4.28 - Resultados para o ONT3 com fibra multimodo <i>ClearCurve</i>	105
Figura 4.29 - Esquema implementado no simulador para o cenário 2.....	107
Figura 4.30 - Janela de edição de parâmetros globais do cenário 2.....	108
Figura 4.31 - Janelas de edição da GPON (esquerda) e 10G-PON (direita).....	109
Figura 4.32 - Resultados para o ONT_GPON do sinal descendente.	110
Figura 4.33 - Resultados para o ONT_10GPON do sinal descendente.	111
Figura 4.34 - Resultados para o OLT_GPON do sinal ascendente.....	112
Figura 4.35 - Resultados para o OLT_10GPON do sinal ascendente.....	113

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Datas importantes das tecnologias óticas de redes de acesso [5].	5
Tabela 1.2 - Datas importantes das fibras óticas [7] [8] [9].	6
Tabela 2.1 - Normas da ITU-T para fibras óticas de sílica [15] [16] [17].	17
Tabela 2.2 - Características dos vários tipos de POFs [6] [17].	21
Tabela 2.3 - Especificações da norma IEC 60793-2-40 [6].	22
Tabela 2.4 - Parâmetros de POFs disponíveis no mercado [6].	22
Tabela 2.5 - Fabricantes de POFs no mercado atual [18].	23
Tabela 2.6 - Comparação entre POFs de diversos fabricantes [6] [19].	23
Tabela 2.7 - Comparação das características entre POF, GOF e cobre [6].	25
Tabela 3.1 - Comparação entre tecnologias TDM-PON [2] [24].	54
Tabela 3.2 - Comparação entre CWDM e DWDM [2].	57
Tabela 3.3 - Valores típicos do Power Budget [24] [26].	59
Tabela 3.4 - Atenuações de <i>splitters</i> [24].	60
Tabela 3.5 - <i>Power budget</i> das várias classes para BPON e GPON [4].	61
Tabela 3.6 - Valores típicos dos emissores e recetores do OLT e ONU [31].	61
Tabela 4.1 - Atenuações dos componentes considerados para simulação [24] [26] [33].	74
Tabela 4.2 - Parâmetros definidos para o OLT.	84
Tabela 4.3 - Parâmetros definidos para o ONT.	84
Tabela 4.4 - Parâmetros para a POF <i>Fontex</i> [34].	85
Tabela 4.5 - Parâmetros para as GOFs da <i>Corning</i> [33].	85
Tabela 4.6 - Parâmetros sugeridos pelo VPI para modulação NRZ [32].	86
Tabela 4.7 - Códigos binários atribuídos para fluxos no sentido ascendente.	92
Tabela 4.8 - Códigos binários atribuídos para fluxos no sentido descendente.	94

Tabela 4.9 - Atenuação total para definir nos atenuadores.....	97
Tabela 4.10 - Comparativo entre as potências teóricas e práticas do <i>power budget</i>	99

Lista de Acrónimos

10G-EPON	<i>10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network</i>
10G-PON	<i>10 Gigabit - Passive Optical Network</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AON	<i>Active Optical Network</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
APON	<i>ATM Passive Optical Network</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPON	<i>Broadband Passive Optical Network</i>
CDMA	<i>Code-Division Multiple Access</i>
CO	<i>Central Office</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
DBA	<i>Dynamic Bandwidth Allocation</i>
DFB	<i>Distributed Feedback Laser</i>
DL	<i>Downlink</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
FC	<i>Ferrule Connector</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FP	<i>Fabry-Pérot</i>
FSAN	<i>Full Service Access Network</i>
FTTB	<i>Fiber To The Building</i>
FTTC	<i>Fiber To The Curb</i>

FTTCab	<i>Fiber To The Cabinet</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
FTTN	<i>Fiber To The Node</i>
FTTP	<i>Fiber To The Premises</i>
FTTx	<i>Fiber To The x</i>
GEM	<i>GPON Encapsulation Method</i>
GI	<i>Graded-Index</i>
GI-POF	<i>Graded-Index Plastic Optical Fiber</i>
GOF	<i>Glass Optical Fiber</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
HDTV	<i>High-Definition Television</i>
HFC	<i>Hybrid Fiber Coax</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector</i>
LC	<i>Lucent Connector</i>
LD	<i>Laser Diode</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MC-POF	<i>Multi Core Plastic Optical Fiber</i>
MPCP	<i>Multi-Point Control Protocol</i>
MSI-POF	<i>Multi Step Index Plastic Optical Fiber</i>
NRZ	<i>Non-Return-to-Zero</i>
ODF	<i>Optical Distribution Frame</i>
ODN	<i>Optical Distribution Network</i>

OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OSA	<i>Oscilloscope Signal Analyzer</i>
P2MP	<i>Point to multipoint</i>
P2P	<i>Point to point</i>
PDO	<i>Optical Distribution Point</i>
PF	<i>Fluor Polymer</i>
PIN	<i>Positive-Intrinsic-Negative</i>
PLOAM	<i>Physical Layer Operations and Maintenance</i>
PMMA	<i>Polymethyl methacrylate</i>
POF	<i>Plastic Optical Fiber</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
PRBS	<i>Pseudo-Random Binary Sequence</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RN	<i>Remote Node</i>
SC	<i>Subscriber Connector</i>
SCMA	<i>Subcarrier-Division Multiple Access</i>
SI	<i>Step-Index</i>
SI-POF	<i>Step-Index Plastic Optical Fiber</i>
SM-GOF	<i>Single Mode - Glass Optical Fiber</i>
ST	<i>Straight Tip</i>
TDM	<i>Time-Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDM-PON	<i>Time-Division Multiplexing - Passive Optical Network</i>

TDT	<i>Televisão Digital Terrestre</i>
TV	<i>Television</i>
UL	<i>Uplink</i>
VCSEL	<i>Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser</i>
VDSL	<i>Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line</i>
VoD	<i>Video on Demand</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
WBF	<i>Wavelength Blocking Filter</i>
WDMA	<i>Wavelength-Division Multiple Access</i>
WDM-PON	<i>Wavelength-Division Multiplexing - Passive Optical Network</i>

Lista de Símbolos

a	Raio do núcleo da fibra ótica (m)
c	Velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s)
J	Perdas por fusão térmica da fibra (dB)
l	Comprimento da fibra ótica (m)
M	Número de modos propagados
$M_{operacional}$	Margem operacional do sistema (dB)
$M_{segurança}$	Margem de segurança do sistema (dB)
n	Índice de refração de um meio
n_0	Índice de refração do meio externo
n_1	Índice de refração do núcleo
n_2	Índice de refração da bainha
NA	Abertura numérica
\emptyset	Diâmetro do núcleo da fibra ótica (m)
P_{Budget}	<i>Power budget</i> (dB)
$P_{disponível}$	Potência de sinal disponível (W)
P_{in}	Potência do sinal à entrada (W)
P_{out}	Potência do sinal à saída (W)
P_R	Potência recebida (W)
P_T	Potência de transmissão (W)
V	Frequência normalizada
v_n	Velocidade da luz num meio (m/s)
W	Perdas do acoplador WDM (dB)
α	Coefficiente de atenuação (dB/km)
α_T	Atenuação total do sistema (dB)

θ_a	Ângulo de aceitação (graus)
θ_c	Ângulo crítico (graus)
θ_i	Ângulo de incidência (graus)
θ_r	Ângulo de reflexão (graus)
θ_t	Ângulo de refração (graus)
λ	Comprimento de onda (m)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de comunicação entre os humanos é uma necessidade fulcral para o nosso dia-a-dia, desde os nossos primórdios. Como é típico do homem, a atitude crítica perante o mundo e otimizar cada vez mais os recursos que o rodeia, permitiu o desenvolvimento de mecanismos e tecnologias otimizadas capazes de tornar o processo de comunicação mais simples, rápido e eficaz [1].

O segmento da rede que permite a interligação aos diversos tipos de serviços e à partilha de informação é designado por rede de acesso. Ao longo do tempo várias tecnologias foram adotadas para as redes de acesso, com o intuito de fornecer uma largura de banda e uma qualidade de serviço (QoS) adequado aos serviços de voz, televisão e dados [2].

Serviços como *Internet Protocol Television* (IPTV) exigem grande largura de banda, uma vez que possibilitam a visualização de canais em alta definição, funcionalidades interativas e de *Video on Demand* (VoD). Dadas as vantagens que a fibra ótica apresenta e o aumento da necessidade de largura de banda, levaram os operadores de telecomunicações e os países a investir em grande escala na implementação de fibra ótica nas redes de acesso. Este tipo de infraestrutura não só suporta as aplicações já existentes, como também abriu novas

oportunidades de negócio e desenvolvimento a nível de serviços, devido à elevada largura de banda que a fibra pode oferecer [1].

1.1 Enquadramento e motivação

A evolução e a otimização são processos que atuam de forma constante no ramo tecnológico. Nesse sentido, a área das telecomunicações não fica imune a esse processo. As infraestruturas de cobre e cabo coaxial existentes nas redes de acesso demonstraram algumas limitações nos últimos anos, nomeadamente no potencial de evolução de forma a satisfazer as necessidades dos utilizadores.

As redes de acesso possuem várias soluções tecnológicas, e cada uma tem vantagens e desvantagens associadas. A seleção de uma determinada tecnologia depende da infraestrutura existente. Nestes últimos anos, tem-se assistido à implementação de fibra ótica baseada nas premissas *Fiber to the x* (FTTx) [2].

As redes de acesso enfrentaram vários desafios nos últimos anos. Um desses grandes desafios prende-se com a convergência dos serviços de voz, dados e televisão (TV) sob a mesma infraestrutura física. Começou-se por utilizar infraestruturas híbridas, isto é, a rede de distribuição é constituída por fibra ótica e a rede de acesso utilizava o cabo de cobre e coaxial para transmitir os sinais provenientes dos três tipos de serviços disponibilizados. Atualmente, as redes óticas passivas têm-se estendido até às instalações dos próprios utilizadores, permitindo débitos e distâncias elevadas.

Na Figura 1.1 pode-se verificar que a convergência pode ser dividida em dois campos. Convergência de rede e convergência de serviços.

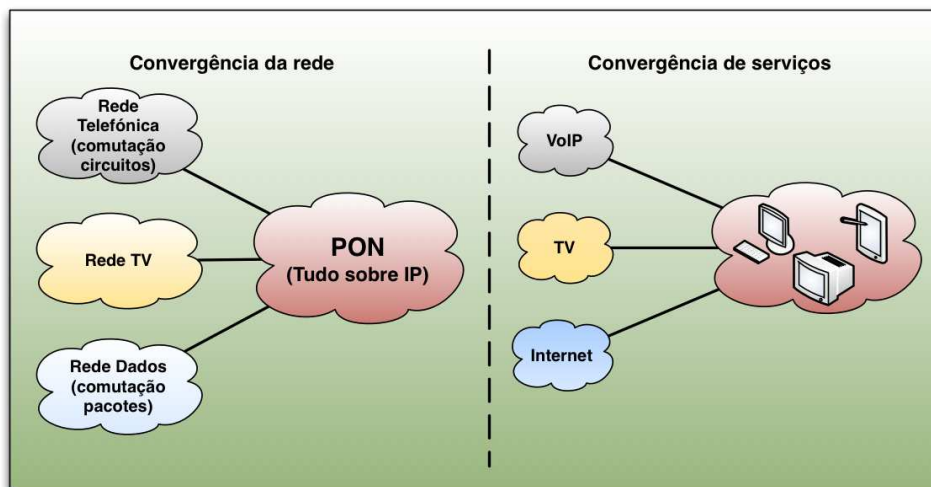


Figura 1.1 - Convergência de rede e de serviços.

A convergência de rede significa a migração de todos os serviços sob a mesma infraestrutura física, enquanto a convergência de serviços prende-se ao facto de num único equipamento (computador por exemplo) ser possível obter os vários serviços disponíveis.

O segundo desafio que as redes de acesso enfrentam, está associado à substituição progressiva das infraestruturas de cobre e cabo coaxial por fibra ótica. A sua substituição trás algumas vantagens ao utilizador final, nomeadamente capacidade para débitos mais elevados e imunidade à interferência eletromagnética. Contudo, fornecer fibra ótica de sílica (GOF) neste segmento da rede pode representar um grande investimento para um operador de telecomunicações. É nesse sentido que as fibras óticas de plástico (POF) podem surgir como uma alternativa mais económica às GOF, embora com um menor desempenho e para distâncias curtas.

1.2 Objetivos

O âmbito desta dissertação passa por estudar as tecnologias atuais e emergentes das redes de acesso, e o estudo da viabilidade da utilização de POF neste segmento da rede. Mais especificamente, os objetivos são:

- Adquirir conhecimento acerca o estado da arte das atuais redes de acesso e das fibras óticas de sílica e de plástico;

- Compreender a arquitetura de uma rede ótica passiva (PON) e os componentes que a constituem;
- Estudo das tecnologias PON atuais assim como também outras que se encontram em desenvolvimento;
- Desenvolver cenários que permitem estudar e comparar o desempenho de três tipos de fibras óticas, entre as quais a POF;
- Dimensionar e calcular o *power budget* para os cenários propostos;
- Implementar os cenários propostos no programa de simulação *VPIphotonicsTM*;
- Executar diversas simulações e comparar o desempenho entre os três tipos de fibras, estudando os limites de operação da POF;
- Estudar as circunstâncias que tornam viáveis a utilização da fibra ótica de plástico em detrimento da de sílica.

1.3 Contextualização histórica

A conceção da fibra ótica contribuiu para uma das maiores revoluções das telecomunicações nas últimas décadas. Desde o seu surgimento que o mercado das telecomunicações tem-se desenvolvido e criado novos ramos de negócio a um ritmo vertiginoso.

A explosão da internet levou à procura de novas soluções tecnológicas, nomeadamente infraestruturas capazes de garantir um acesso em banda larga e um QoS adequado aos utilizadores domésticos e empresariais. Foi por volta de 1990 que se iniciaram as primeiras implementações de fibra ótica nas redes de acesso, quando alguns operadores de telecomunicações e fornecedores de equipamento se juntaram e formaram a *Full Service Access Network* (FSAN) [3]. Desde então, várias arquiteturas e tecnologias foram especificadas no sentido de aproveitar ao máximo os recursos que a fibra ótica pode oferecer a nível de débito binário e distância de transmissão.

Existem dois grandes grupos que estabelecem normas que definem como as redes de telecomunicações operam e se interligam: *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e o *Telecommunication Standardization Sector of the International*

Telecommunication Union (ITU-T). Ambas as organizações produzem especificações separadamente na área das PON, sendo incompatíveis entre ambas [4].

A Tabela 1.1 apresenta as datas que marcam a evolução das tecnologias que utilizam a fibra ótica como meio de transmissão nas redes de acesso.

Tabela 1.1 - Datas importantes das tecnologias óticas de redes de acesso [5].

Ano	Acontecimento
1990	Nascimento da FSAN
1998	FSAN especifica a APON com débitos entre 155-622 Mbps
2001	ITU-T lança versão final da norma G.983 (baseado em APON), designando-a por BPON
2003	ITU-T especifica a GPON G.984 com 2.4 Gbps no sentido descendente e 1.2 Gbps ascendente
2004	IEEE especifica a EPON 802.3ah com 1 Gbps simétrico
2006-09	Massificação de redes GPON na América e na Europa
2007	IEEE especifica a 10G-EPON 802.3av com 10 Gbps simétrico
2010	ITU-T especifica a 10G-PON G.987 com 10 Gbps no sentido descendente e 2.5 Gbps ascendente

As evoluções registadas nas redes de telecomunicações foram obtidas muito à custa da evolução da fibra ótica. Contudo, quando se faz referência à fibra ótica refere-se normalmente às GOF. No entanto, a POF surgiu sensivelmente na mesma altura que a GOF, sendo que a primeira experiência realizada no âmbito das transmissões por fibra ótica, foi feita com POF, em 1955. O primeiro material usado para fazer uma POF foi o polimetilmetacrilato (PMMA) e surgiram no início da década de 60. Trata-se de um material termoplástico rígido e transparente, conhecido como “vidro acrílico”. Por esta altura, a atenuação registada por este tipo de fibras ascendia aos 1000 dB/km. A sua utilização estava então comprometida para as GOF, uma vez que estas apresentavam atenuações consideravelmente mais baixas. Todavia, nos anos seguintes, vários desenvolvimentos foram efetuados, nomeadamente pelas empresas *Mitsubishi Rayon* e *Asahi Chemical*, que conseguiram diminuir a atenuação para valores mínimos de 55 dB/km (a 568 nm), mas ainda assim tratava-se de um valor de comprimento de onda que encontra-se fora da janela típica utilizada em telecomunicações (850 – 1550 nm).

O maior salto na evolução das POF deu-se em cerca de 1995 na Universidade de Keio, quando apresentou-se a POF de índice gradual (GI) com polímero de flúor (PF). Com este tipo de fibra, era possível obter atenuações inferiores a 50 dB/km para comprimentos de onda compreendidos entre os 850 e os 1550 nm [6].

Na Tabela 1.2 registam-se as datas dos acontecimentos mais importantes relacionados com as fibras óticas de sílica e de plástico.

Tabela 1.2 - Datas importantes das fibras óticas [7] [8] [9].

Ano	Acontecimento
1956	Narinder Kanpany inventa a fibra ótica
1958	Arthur Schwalow e Charles Townes inventam o laser
1962	Foi inventado o primeiro fotodetector PIN de silício de alta velocidade
1968	Desenvolvida a primeira POF-PMMA
1976	Primeiro sistema comercial de fibras óticas
1983	Introduzida a GOF monomodo com dispersão nula em 1310 nm – G652
1992	Prof. Koike anuncia 2.5 Gbps com 100m transmissão GI-POF-PMMA utilizando um díodo <i>laser</i> (LD) nos 650nm
1994	Introduzida a GOF de dispersão nula (NZD) em 1500 nm – G655
1999	A Lucent anuncia 11 Gbps em 100 m de POF Lucina™ (PF-GI-POF)
2005	Primeira PMMA-GI-POF disponível comercialmente
2010	A AGC apresenta a PF-GI-POF baseada no polímero CYTOP, com uma estrutura com dupla bainha para reduzir as perdas de potência associadas às curvaturas

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 5 capítulos e estão organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Neste primeiro capítulo é efetuado uma introdução ao tema, apresentando o enquadramento e a motivação desta dissertação. São referidos os objetivos e é efetuado uma contextualização histórica.
- **Capítulo 2 – Fibras óticas:** Neste capítulo é efetuada uma abordagem teórica relativamente às fibras óticas. Começa-se por apresentar o espetro ótico de operação das fibras óticas de sílica e de plástico. Posteriormente faz-se uma pequena introdução aos fundamentos de propagação da luz em fibras óticas e abordam-se os conceitos de atenuação e dispersão. Seguidamente aborda-se as fibras óticas de sílica e de plástico, apresentando várias normas e tipos de fibras existentes no mercado. Por último, enumera-se as vantagens e desvantagens das POFs e compara-se com as GOFs.
- **Capítulo 3 – Redes de acesso:** Pretende-se com este capítulo relatar o atual estado de arte das diferentes tecnologias das redes de acesso. Apresentam-se as evoluções que existiram neste segmento da rede, os graus de penetração da fibra ótica e os componentes que constituem uma rede ótica passiva. Aborda-se os conceitos necessários para efetuar o cálculo do *power budget* de uma rede deste tipo. Enumeram-se algumas figuras de mérito que permitem analisar a qualidade de um sinal NRZ.
- **Capítulo 4 – Simulação de uma rede de acesso com POF:** Este capítulo é dedicado à parte prática. Em primeiro lugar efetua-se uma introdução ao simulador VPI. Posteriormente apresentam-se dois cenários para simulação no programa. Para tal, efetua-se o cálculo de *power budget* assim como também toda a parametrização dos componentes necessários no simulador. Implementam-se os cenários propostos no VPI e analisam-se os resultados obtidos.
- **Capítulo 5 – Considerações finais:** O último capítulo é dedicado às conclusões de todo o trabalho realizado e do conhecimento adquirido acerca deste tema. São também apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro.

1.5 Principais contribuições

No âmbito desta dissertação de Mestrado foi submetida a seguinte publicação:

- M. Rodrigues, P. Pinho, “Plastic optical fiber in Access Networks”, Conference in the broad field of Electronics, Telecommunications and Computers (CETC) 2013, 15 de Novembro, ISEL, Lisboa.

CAPÍTULO 2

FIBRAS ÓTICAS

A fibra ótica assume um papel muito importante na área das telecomunicações nos dias de hoje. Além de ser mais eficiente comparativamente ao seu antecessor, o cobre/cabo coaxial, permite a transmissão de informação a distâncias superiores e com uma maior taxa de transmissão. Independentemente do material que a constitui, o seu princípio de funcionamento é o mesmo: propagação de um feixe de luz através de sucessivas reflexões que ocorrem ao longo da fibra até ao recetor.

Na Figura 2.1 pode-se verificar que a fibra é constituída essencialmente por três camadas: o núcleo é formado por um filamento de vidro de dimensões microscópicas cujo material é geralmente composto por sílica ou até mesmo plástico, de modo permitir a propagação de luz ao longo da fibra. A camada que se segue é designada por bainha, e é constituída por um material dielétrico com um índice de refração inferior ao do núcleo, de modo a que o sinal ótico tenha reflexão total no interior do núcleo, desde que o ângulo de incidência seja superior ao ângulo crítico. Por último, para proteção das camadas anteriormente referidas, é utilizado um revestimento com um material eletricamente isolante para proteção mecânica e ambiental [8].

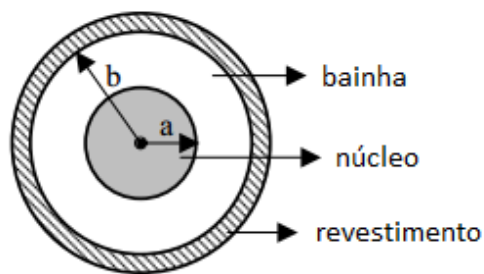


Figura 2.1 - Constituição da fibra ótica [10].

2.1 Espectro ótico

Um sistema de comunicação ótica pode operar em várias gamas de comprimento de onda. Contudo, mediante a distância de transmissão, das características do tipo de fibra utilizada, dos tipos de recetores e emissores, existe um comprimento de onda ótimo para operação do sistema. A Figura 2.2 ilustra a gama de operação típica das fibras óticas de plástico e de sílica. Como se pode constatar, as POFs tipicamente operam na gama do espectro visível, isto é, entre os 400 e os 700 nm, embora existam fibras óticas de plástico designadas de CYTOP (polímeros de flúor) que permitem operar nos 850 e 1300 nm com atenuações relativamente baixas. Já as GOFs operam numa gama compreendida entre os 850 e os 1600 nm, com maior destaque para 1330 e 1550 nm [6].

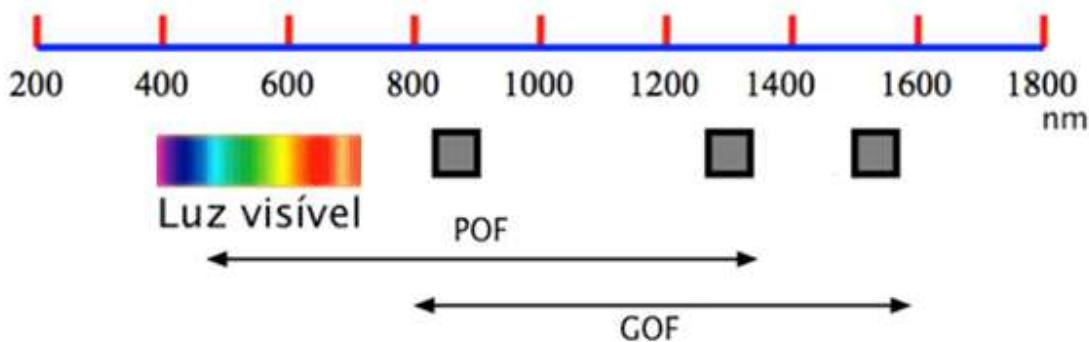


Figura 2.2 - Comprimento de onda de operação das GOFs e POFs (adapt. de [11]).

2.2 Fundamentos de propagação em fibras óticas

A fibra ótica corresponde ao meio onde a luz se propaga no interior do seu núcleo, por meio de reflexões até ao fotorecetor. Nesta secção abordam-se os fundamentos que explicam o fenómeno de propagação em fibras óticas.

2.2.1 Índice de Refração

O índice de refração (n) é uma grandeza que expressa a que velocidade a luz se propaga num determinado meio. Na equação 2.1 pode-se constatar que este pode ser calculado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no meio em questão (v_n).

$$n = \frac{c}{v_n} \quad (2.1)$$

Uma vez que a velocidade de propagação no interior de um material é sempre inferior à velocidade da luz no vácuo, o índice de refração de qualquer material será superior a 1 [12].

2.2.2 Refração e reflexão

A Figura 2.3 representa três casos de propagação da luz numa fibra ótica. Como se pode verificar, o raio luminoso representado a preto incide segundo um ângulo θ_i , e é refratado com ângulo θ_r , relativo à normal ao ponto de incidência num meio transparente mais refringente. Parte da luz é refletida para o interior, com ângulo θ_r . O raio a laranja retrata a situação de aumentar o ângulo de incidência até se atingir o ângulo crítico θ_c . O raio refratado é propagado na interface entre os dois meios. O terceiro caso está representado pelo raio a castanho com um ângulo superior a θ_c . O que acontece é que, invés de ser refratado, este é refletido totalmente. O efeito de reflexão interna total é o mecanismo básico de propagação da luz em fibras óticas [12].

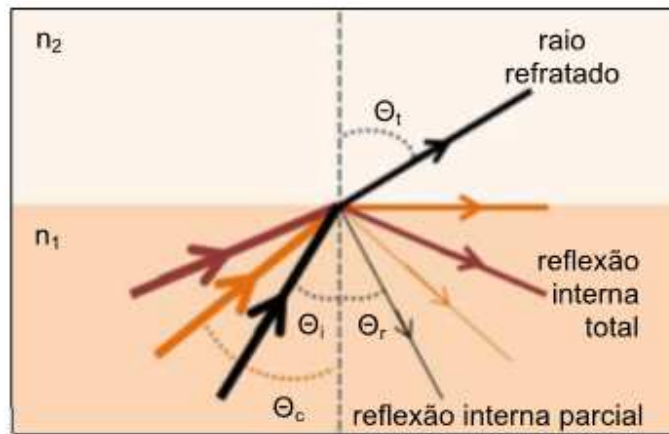


Figura 2.3 - Refração e reflexão interna total e parcial da luz [13].

Para calcular a refração, utiliza-se a lei de Snell, que é dada pela equação 2.2.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2.2)$$

Quanto ao ângulo crítico θ_c , pode ser calculado pela equação 2.3.

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.3)$$

2.2.3 Ângulo de aceitação

A Figura 2.4 ilustra uma fibra ótica constituída por um núcleo com um índice de refração n_1 envolvido por uma bainha com índice de refração n_2 . Considerando uma fonte de luz colocada à entrada da mesma, apenas os raios com ângulos inferiores ao ângulo de aceitação (θ_a) serão propagados no interior da fibra ótica, por reflexões múltiplas. Pode-se ainda constatar vários raios de luz com percursos diferentes dentro da fibra, que são originados pela variação do ângulo de aceitação à entrada [12].

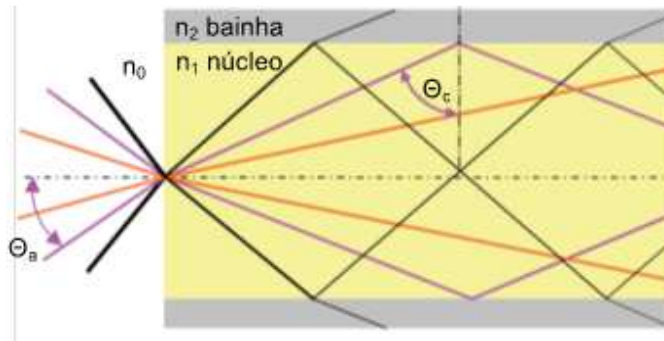


Figura 2.4 - Propagação da luz na fibra ótica [13].

Para cálculo do ângulo de aceitação, utiliza-se a equação 2.4. De modo a garantir que a luz que entra na fibra possa ser guiada através desta, tem de se verificar a condição $n_1 > n_2$. O meio exterior à fibra é o ar, cujo índice de refração é $n_0 \approx 1$ [7]

$$\theta_a = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right) \quad (2.4)$$

2.2.4 Abertura numérica

A abertura numérica (NA) é uma medida da quantidade de luz que pode ser emitida ou recebida por um sistema ótico. Este parâmetro é adimensional e pode ser aplicado a uma lente, uma objetiva microscópica ou uma fibra ótica. Para calcular a abertura numérica, recorre-se à equação 2.5. Considera-se que o meio externo à fibra é o ar ($n_0 \approx 1$).

$$NA = \text{sen} \theta_a^{\text{max}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.5)$$

Assim sendo, quanto maior a NA mais fácil será o acoplamento da fonte ótica à fibra. As POFs são um exemplo desse caso, dado que, tipicamente possuem uma NA até 0,5. Já nas fibras de sílica, os valores de NA encontram-se entre 0,1 e os 0,2. Contudo, uma elevada abertura numérica também traz inconvenientes, pois possibilita um grande número de modos de propagação, aumentando assim o efeito de dispersão intermodal [12].

2.2.5 Regime monomodal e multimodal (parâmetro V)

As fibras óticas podem ser classificadas em dois tipos: monomodo ou multimodo. Um modo corresponde a uma trajetória possível de um raio que se pode propagar no interior da fibra.

Para determinar o regime de funcionamento da fibra ótica, recorre-se ao parâmetro estrutural V , que depende do raio do núcleo (a), do comprimento de onda (λ) e da abertura numérica (NA). O parâmetro V pode ser calculado segundo a equação 2.6.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \times a \times NA \quad (2.6)$$

Valores de V inferiores a 2,4 a fibra diz-se monomodo, uma vez que apenas é permitida a propagação de um único modo designado por modo fundamental. Para valores superiores dir-se-á multimodo. É possível determinar o número de modos (M) de uma fibra utilizando a equação 2.7, no caso de esta ser de índice em degrau (SI) [6].

$$M \approx \frac{V^2}{2} \quad (2.7)$$

Para fibras de índice gradual (GI) com perfil parabólico, recorre-se à equação 2.8.

$$M \approx \frac{V^2}{4} \quad (2.8)$$

2.3 Fibra ótica de sílica

As fibras óticas podem ser diferenciadas consoante as suas características físicas, como por exemplo a dimensão do núcleo que dita o seu perfil de índice de refração e a sua capacidade de propagar um ou mais modos de propagação. Assim sendo, podemos distinguir dois tipos: as monomodo e multimodo.

2.3.1 Fibras monomodo

As fibras monomodo, comparativamente às multimodo, têm um núcleo com menor dimensão e uma maior capacidade de transmissão, sendo apropriadas para longas distâncias. Estas permitem apenas um sinal de luz pela fibra, pois possuem um único modo de propagação. Tal acontece, porque o diâmetro do núcleo é pequeno quando comparado com o comprimento de onda do sinal ótico, resultando uma diminuição da dispersão do impulso luminoso e conseqüentemente a transmissão apenas do raio axial. Contudo, o facto de o núcleo ter dimensões pequenas, torna-se difícil o acoplamento da luz na entrada e na saída da fibra. Por essa razão, geralmente são utilizados fontes óticas coerentes, como é o caso dos lasers, dado que conseguem ser mais direcionais e de maior precisão. Tipicamente as

dimensões associadas ao núcleo são entre os 5 e 10 μm e a bainha em torno dos 125 μm . Relativamente à atenuação, apresentam perdas baixas, facilitando desta forma a transmissão para longas distâncias sem utilização de repetidores. Tipicamente os valores concentram-se na ordem dos 0,5 dB/km para 1300 nm e 0,2 dB/km para 1550 nm [14].

2.3.2 Fibras multimodo

As fibras multimodo são normalmente utilizadas para curtas distâncias, uma vez que para longa distância introduz muitas perdas. Comparativamente às de monomodo têm uma dimensão maior relativamente ao diâmetro do núcleo, o que facilita o acoplamento de fontes óticas incoerentes, tais como os *Light-emitting diode* (LED). As fibras multimodo podem ainda ser de dois tipos: índice degrau (SI) e de índice gradual (GI). Este tipo de fibras, tipicamente possui uma atenuação entre 2,5 a 4 dB/km nos 850 nm.

2.3.2.1 Índice degrau (*step-index*)

As fibras multimodo de índice em degrau foram as primeiras a serem comercializadas. A sua estrutura é simples, o seu núcleo é constituído basicamente por um único tipo de sílica com índice de refração constante e superior ao da bainha. As dimensões do núcleo podem variar entre os 50 e os 100 μm .

A Figura 2.5 ilustra o comportamento dos raios de luz no interior de uma fibra deste tipo. Uma vez que existe uma diferença nos índices de refração da bainha e do núcleo, os raios afastam-se do eixo da normal causando dispersão modal. As refrações só acontecem quando verifica-se a condição $\sin \phi < n_2/n_1$, onde n_1 é o índice de refração do núcleo e n_2 da bainha [14] [15].

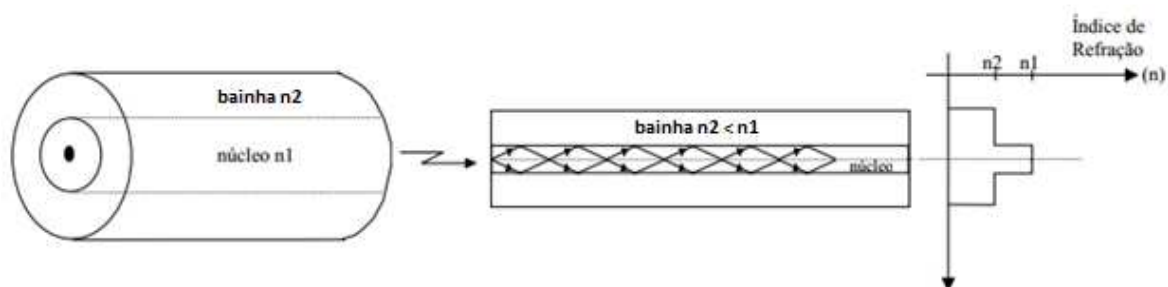


Figura 2.5 - Fibra multimodo de índice de degrau (adaptado de [15]).

2.3.2.2 Índice gradual (graded-index)

Quanto às fibras multimodo de índice gradual, o núcleo é composto por materiais com índices de refração variáveis. O objetivo desta variação está associado à redução das diferenças de tempos de propagação da luz no núcleo. O seu processo de fabricação é mais complexo, dado que para se conseguir um núcleo com índice de refração variável, é necessário dopar o núcleo da fibra com doses diferentes, para que este diminua do centro do núcleo até à bainha.

Contudo, como se pode constatar pela Figura 2.6, continuam a existir caminhos diferentes na propagação da luz. Comparativamente com as fibras de índice em degrau, estas apresentam melhores condições para transmissão a débitos elevados, dado que diminui a dispersão do impulso [14] [15].

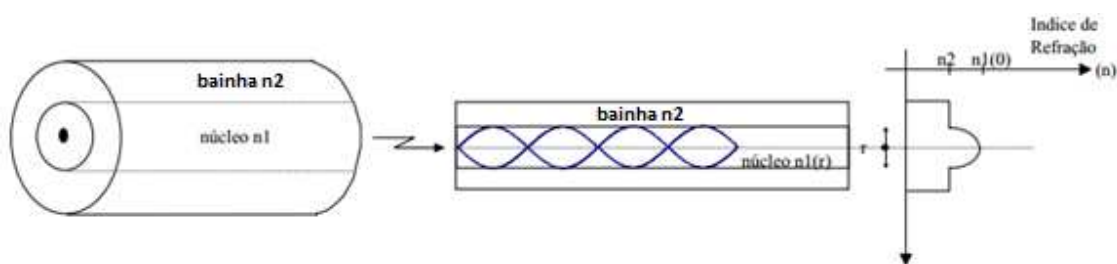


Figura 2.6 - Fibra multimodo de índice gradual (adaptado de [15]).

2.3.3 Comparação entre várias normas de fibras de sílica

A ITU-T, que é uma organização de normalização global de telecomunicações, normalizou vários tipos de fibras nas últimas décadas, desde a G.651 até à G.659. Em termos de fibra multimodo, existe a norma G.651, cujo raio do núcleo é 50 μm e de índice gradual. Relativamente às fibras monomodo, a mais utilizada é a G.652 que é otimizada para operar nos 1310 nm, enquanto a G.655 foi otimizada para operar nos 1550 nm [16]. A especificação G.657 descreve duas categorias de fibra monomodo, que são adequadas para o uso nas redes de acesso, dada a otimização que foi efetuada a nível de perdas devido às curvaturas.

A Tabela 2.1 resume as características principais de cada norma da ITU-T para as principais fibras de sílica.

Tabela 2.1 - Normas da ITU-T para fibras óticas de sílica [17] [18] [19].

Norma	G.651	G.652C	G.655	G.657
Designação	<i>Multimode Fiber with a 50-Micron Core</i>	<i>Nondispersion-Shifted Fiber – Low OH Peak</i>	<i>Non-zero Dispersion-shifted Fiber</i>	<i>Bending-loss insensitive single-mode</i>
Tipo	Multimodo	Monomodo	Monomodo	Monomodo
Diâmetro núcleo [µm]	50	6 ~ 10	6 ~ 10	6 ~ 10
Diâmetro modal de campo (MFD)	-	8.6-9.5 µm	8-11 µm	6.3-9.5 µm
Atenuação @ 850 nm (dB/km)	4	-	-	-
Atenuação @ 1310 nm (dB/km)	2	0,4	0,4	0,4
Atenuação @ 1550 nm (dB/km)	-	0,3	0,2	0,3
Capacidade de transmissão (B.L)	~2000 MHz.km	~100 THz.km	~100 THz.km	~100 THz.km

2.4 Fibra ótica de plástico

A fibra ótica de plástico, tal como o seu nome indica, é constituída por materiais poliméricos. Tal como as fibras normais de sílica, é formada por um núcleo, uma bainha e um revestimento para proteção. Relativamente ao núcleo, os materiais podem variar. Consoante o tipo de material utilizado a atenuação pode ser maior ou menor, sendo que o melhor caso atual verifica-se com o polímero de flúor, com atenuações de cerca 10 dB/km para um comprimento de onda de 1300 nm [6].

2.4.1 Tipos de POFs

As fibras de plástico podem ser de vários tipos. Estas são classificadas segundo critérios como: distribuição do índice de refração do núcleo, número de modos propagados, número de núcleos e material que constitui o núcleo. Nas seções seguintes abordam-se alguns desses tipos [7].

2.4.1.1 SI-POF (Step index – POF)

Tal como as GOFs, as primeiras POFs apresentavam um perfil do índice em degrau (SI-POF). O núcleo é constituído por um material homogéneo, isto é, com índice de refração constante. A sua grande abertura numérica e diâmetro do núcleo permitem o uso de fontes óticas de baixa coerência e mais baratas (como o caso dos LEDs). O processo de acoplamento é melhor e requer pouca precisão com os conetores [6].

A Figura 2.7 ilustra o comportamento dos raios dentro de uma SI-POF.

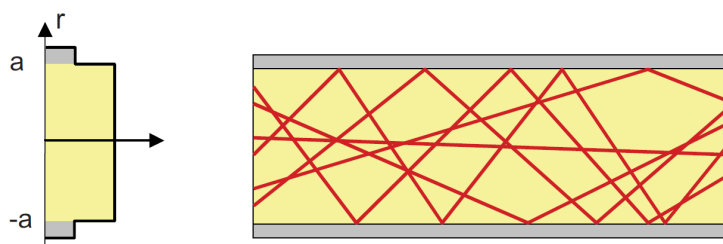


Figura 2.7 - Perfil de índice de refração de uma SI-POF [6].

2.4.1.2 MC-POF (Multi core – POF)

Neste tipo de fibras, existe uma agregação de vários núcleos numa única fibra durante o processo de fabrico. O diâmetro total de uma fibra deste género é de 1 mm. As suas principais vantagens consistem no facto de suportarem elevada largura de banda e sofrerem baixas perdas devido a curvaturas.

A Figura 2.8 ilustra três exemplos de MC-POFs comercializadas pela AGC Asahi Chemical [6].

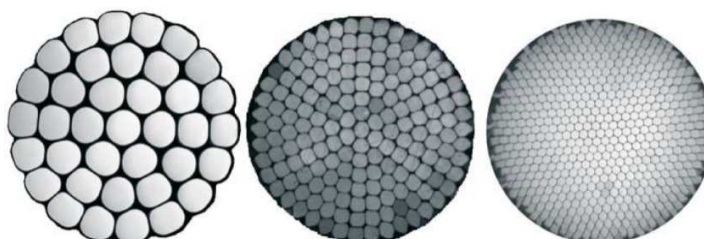


Figura 2.8 - MC-POFs com 37, 217 e 631 núcleos [6].

2.4.1.3 GI-POF (Graded index – POF)

Tal como o seu nome indica, este tipo de fibra possui um núcleo composto por materiais poliméricos com índices de refração variáveis. Essa variação de gradiente do índice de refração acontece à medida que a distância ao eixo da fibra aumenta, enquanto a bainha mantém um índice de refração constante. Na Figura 2.9 pode-se verificar que no centro do núcleo, os raios percorrem distâncias menores, mas possuem uma velocidade de propagação menor derivado ao índice de refração ser superior. Por outro lado, uma vez que os valores de índice de refração junto à bainha são inferiores, os raios são propagados a uma velocidade e distâncias superiores [6].

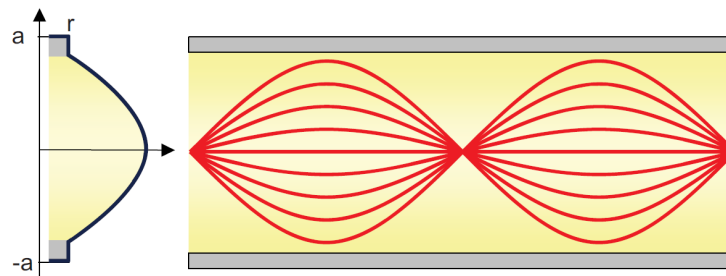


Figura 2.9 - Perfil de índice de refração de uma GI-POF [6].

2.4.1.4 MSI-POF (Multi step index – POF)

As fibras óticas de plástico com índice em múltiplos degraus (MSI-POF) apresentam um núcleo formado por várias camadas, como ilustra a Figura 2.10. Este tipo de fibras nasceram do facto de as GI-POFs introduzir algumas dificuldades tecnológicas no seu processo de produção.

Como é possível constatar pela Figura 2.10, os raios luminosos não se propagam com trajetórias continuamente curvas, mas sim com trajetórias definidas pelos índices de refração dos vários degraus [6].

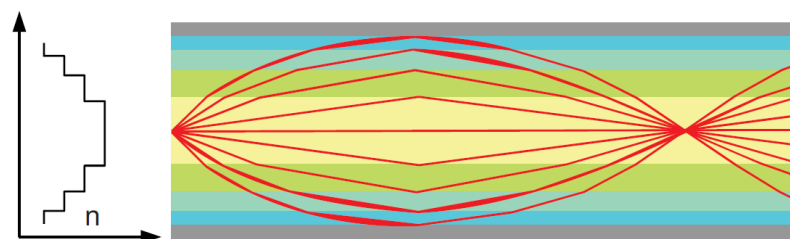


Figura 2.10 - Perfil de índice de refração de uma MSI-POF [6].

2.4.2 Comparação entre os tipos de POFs

Como se viu anteriormente as POFs podem ser classificadas consoante o seu perfil refrativo. Cada tipo possui características diferentes, influenciando assim a área de aplicação das mesmas. Começando pela SI-POF, dada à sua elevada dispersão intermodal, é normalmente utilizada para transmissão de dados de curta distância ou em iluminação. Relativamente à GI-POF, apresenta uma grande melhoria comparativamente à SI-POF. Possui uma baixa dispersão intermodal e uma atenuação inferior comparativamente à SI-POF, devido ao seu perfil do índice de refração, permitindo assim a transferência de dados mais robustas [6].

A Tabela 2.2 resume as principais características das POFs que foram apresentadas anteriormente.

Tabela 2.2 - Características dos vários tipos de POFs [6] [20].

Perfil Refrativo	Capacidade de transmissão (B.L)	Características
Índice em degrau (SI-POF)	5 MHz.km	- Comunicações de curtas distâncias (< km) - Elevada dispersão intermodal - Fácil acoplamento com a fonte ótica
Índice multi-degrau (MSI-POF)	30 MHz.km	- Comunicações de curtas e médias distâncias (< km) - Baixa dispersão intermodal - Fabrico relativamente simples
Multi-núcleo (MC-POF)	55 MHz.km	- Alta estabilidade de atenuação para curvaturas
Índice gradual (GI-POF)	600 MHz.km	- Comunicações de curtas e médias distâncias (< km) - Baixa dispersão intermodal - Suporte a elevados débitos binários

2.4.3 Normas existentes para POFs

No ramo das telecomunicações, existem organizações a nível mundial responsáveis por publicar especificações que servem como referência para os fabricantes desenvolverem soluções tecnológicas. No caso das fibras óticas de plástico, os fabricantes podem contar com a norma IEC 60793-2-40 (*International Electrotechnical Commission*).

A Tabela 2.3 apresenta duas especificações da norma referida anteriormente. Apesar de existirem outras especificações, estas são as que originam mais interesse no âmbito desta dissertação e serão necessárias para a parametrização da POF no programa de simulação.

Tabela 2.3 - Especificações da norma IEC 60793-2-40 [6].

Classe	A4g	A4h
Perfil do índice	GI	GI
Ø núcleo [µm]	120 ± 10	62,5 ± 5
Ø bainha [µm]	490 ± 10	245 ± 5
Ø revestimento [µm]	n. d.	n. d.
Comprimento de onda de operação [nm]	650, 850, 1300	850, 1300
Perdas @ 650 nm [dB/km]	≤ 100	–
Perdas @ 850 nm [dB/km]	≤ 33	≤ 33
Perdas @ 1300 nm [dB/km]	≤ 33	≤ 33
B.L @ 650 nm [MHz.100m]	≥ 800	–
B.L @ 850 nm [MHz.100m]	1880 – 5000	1880 – 5000
B.L @ 1300 nm [MHz.100m]	1880 – 5000	1880 – 5000
Abertura numérica (NA)	0,19 ± 0,015	0,19 ± 0,015

2.4.4 POFs disponíveis no mercado

No capítulo anterior verificou-se que consoante o tipo de POF utilizada, as características da fibra diferem. Essas diferenças são justificadas pelos parâmetros de propagação que cada tipo de fibra possui. A Tabela 2.4 apresenta a parametrização de algumas POFs.

Tabela 2.4 - Parâmetros de POFs disponíveis no mercado [6].

Tipo de fibra	Perfil	NA	a [µm]	λ [nm]	V	M
SI-POF padrão	SI	0,50	490	650	2368	$2,8 \times 10^6$
POF <i>Optimedia</i>	GI	0,30	450	650	1305	$6,48 \times 10^5$
MC37-POF (cada núcleo)	SI	0,50	65	650	314	$4,93 \times 10^4$
MC613-POF (cada núcleo)	SI	0,50	18,5	650	89	3961
Lucina™ (GI-POF)	GI	0,20	60	1300	58	841
GI-POF (Europa)	GI	0,17	25	850	31	240

Como se pode verificar na tabela anterior, as POFs do tipo GI têm uma abertura numérica (NA) e raio de núcleo (a) menores que os restantes, à exceção da POF *Optimedia* que apesar de ter um NA baixo tem um raio de núcleo maior. É importante também referir que valores de V elevados resultam também um elevado número de modos propagados (M) [6].

Existem vários fabricantes de POFs com diferentes tipos de materiais e perfil refrativo. Na Tabela 2.5 pode-se constatar a lista dos principais fabricantes de POFs a nível mundial.

Tabela 2.5 - Fabricantes de POFs no mercado atual [21].

Fibra SI (PMMA)	Fibra GI (PMMA)	Fibra GI (PF)
Asahi Chemical	FiberFin	Asahi Glass
Lucent	Fuji Photo Film Co	Chromis Fiberoptics
Mitsubishi International Corp.	Nuvitech	
Nuvitech	Optimedia	
Toray Industries	COMOSS	
COMOSS		

Na Tabela 2.6 é possível verificar alguns exemplos de POFs que estão disponíveis no mercado.

Tabela 2.6 - Comparação entre POFs de diversos fabricantes [6] [22].

POF	Fabricante	Perfil	Material	Atenuação (dB/km)	λ [nm]	a [μ m]	Débito
ESKA Mega	Mitsubishi	SI	PMMA	180	650	980	300Mbps/50m
OM-Giga	Optimedia	GI	PMMA	200	650	900	3Gbps/50m
GigaPOF® 62LD	Chromis	GI	PF	<60	850, 1300	62.5	1Gbps/100m
GigaPOF® 50SR	Chromis	GI	PF	<60	850, 1300	50	100Mbps/200m
Lucina®	Asahi Glass	GI	PF	20~40	850, 1300	120	1Gbps/200m
Fontex®	Asahi Glass	GI	PF	18~120	850 - 1490	120	40Gbps/100m

Segundo informações do fabricante *Chromis*, a GigaPOF-62LD pode ser usada diretamente com fibras de sílica multimodo padrão, e poderão ser utilizados emissores óticos de baixo custo tais como o *vertical-cavity surface-emitting laser* (VCSEL) nos 850 nm. Quanto à GigaPOF-50SR, possui um raio de núcleo e uma abertura numérica muito próxima de uma fibra multimodo de sílica de 50 μm .

Relativamente às fibras óticas produzidas pela *Asahi Glass*, é importante referir que a *Lucina* foi descontinuada, dando lugar a um novo modelo designado por *Fontex*. O fabricante anuncia débitos teóricos de 10 Gbps para 100 metros, embora testes em laboratório revelaram um desempenho de 40 Gbps para a mesma distância utilizando a modulação DQPSK e OOK [23]. A *Fontex* possui um revestimento duplo, permitindo assim uma redução das perdas associadas às curvaturas [21]. A Figura 2.11 ilustra o gráfico da atenuação em função do comprimento de onda desta fibra.

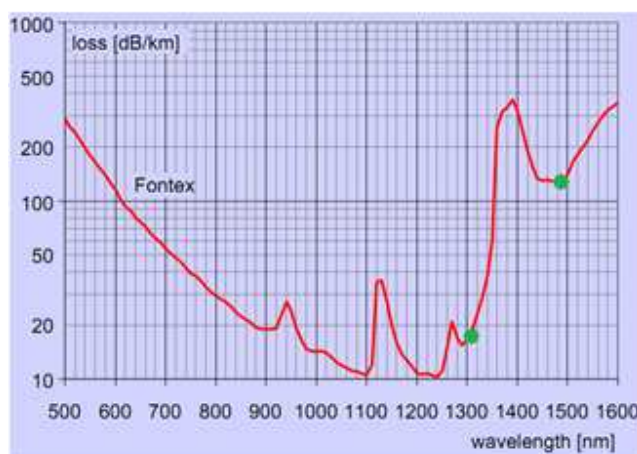


Figura 2.11 - Gráfico da atenuação da *Fontex* [23].

2.4.5 Vantagens e desvantagens da POF

A utilização da POF enquanto meio de transmissão de dados oferece algumas vantagens e desvantagens. Uma das suas grandes vantagens vai para o facto de se poder utilizar componentes mais simples e menos dispendiosos. As suas características físicas permitem uma maior flexibilidade e uma grande capacidade de resistência a dobras.

Por outro lado, as POFs também possuem algumas desvantagens, nomeadamente o suporte a altas temperaturas ($> 125^{\circ}\text{C}$), e às suas perdas durante a transmissão (quando comparadas com as GOFs).

Na Tabela 2.7 pode-se verificar com mais detalhe a comparação de algumas características entre a POF, GOF e o cobre.

Tabela 2.7 - Comparação das características entre POF, GOF e cobre [6].

	POF	GOF	Cobre
Custos dos componentes	Relativamente baixo	Alto	Baixo
Atenuação	Alta (curtas distâncias)	Baixa (longas distâncias)	Alta
Instalação	Fácil de instalar; não requer muita experiência nem ferramentas especiais	Mais tempo para instalar; requer muita experiência e ferramentas especiais	Algum tempo para instalar; requer experiência e ferramentas especiais
Manuseamento	Fácil	Fácil	Requer experiência e cuidados especiais
Flexibilidade	Muito flexível	Relativamente frágil	Flexível
Gama de comprimento de onda	Visível e infravermelho	Infravermelho	Ondas rádio
Abertura numérica	Elevada (0,5)	Baixa (0,1 – 0,2)	n. a.
Débito binário	Algumas dezenas de Gbps em curtas distâncias	Várias dezenas de Gbps em longas distâncias	Algumas centenas de Mbps em curtas distâncias
Custo dos equipamentos de testes	Baixo	Alto	Médio
Custo do sistema	Baixo	Elevado	Médio

2.5 Atenuação

A atenuação consiste na perda gradual da intensidade de energia de um sinal que se propaga num determinado meio de transmissão. O seu cálculo pode ser efetuado através da equação 2.9.

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha l} \quad (2.9)$$

Aplicando este conceito à propagação de luz nas fibras óticas, a variável P_{in} representa a potência do sinal injetado na fibra, P_{out} a potência à saída da mesma, α o coeficiente de atenuação e l o comprimento da fibra. A expressão do coeficiente de atenuação em dB é dada pela equação 2.10.

$$\alpha_{dB} = \frac{10}{l} \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.10)$$

Contudo, nas fibras óticas a atenuação varia de acordo com o comprimento de onda utilizado. Existe uma dependência direta com o processo de fabrico das mesmas e com o material que estas são constituídas. A atenuação torna-se um factor muito importante nas comunicações óticas, dado que o objetivo principal é obter alcances cada vez maiores, o que implica ter atenuações muito baixas. Relativamente às POFs normalmente possuem uma atenuação superior comparativamente às GOFs, derivado à absorção intrínseca do material da fibra [6].

2.6 Dispersão

A dispersão é um fenómeno que ocorre nas fibras óticas quando um determinado impulso de luz se propaga ao longo da fibra e sofre um efeito de alargamento temporal. Este alargamento determina a largura de banda da fibra ótica (dada em MHz.km), e está relacionada com a capacidade de transmissão de informação das fibras [14]. No caso da transmissão digital, o alargamento de um impulso pode sobrepor-se a impulsos adjacentes, um efeito conhecido por interferência intersimbólica (ISI) [6].

Existem dois mecanismos básicos de dispersão: intramodal e intermodal. A primeira pode ainda subdividir-se em dispersão material e dispersão de guia de onda. Relativamente à dispersão intermodal, apenas se aplica às fibras multimodo (índice degrau e gradual).

2.6.1 Dispersão intramodal (cromática)

A dispersão intramodal resulta do atraso diferencial que as várias componentes espectrais do pulso possuem quando estas propagam-se ao longo da fibra. A Figura 2.12 ilustra o efeito deste tipo de dispersão, onde pode-se constatar que cada comprimento de onda propaga-se a uma velocidade diferente [6].



Figura 2.12 - Efeito da dispersão cromática [24].

A dispersão cromática resulta das propriedades que o material apresenta, dado que possui diferentes valores de índice de refração em função do comprimento de onda, originando uma velocidade de propagação diferente para cada comprimento de onda. O tipo de fonte utilizada também pode contribuir para este efeito (por exemplo os LEDs). Relativamente à dispersão de guia de onda, resulta principalmente da dependência do parâmetro V com o comprimento de onda. É particularmente importante em fibras monomodo de sílica, em que a dispersão material não é significativa. No caso das POFs, a dispersão de guia de onda é geralmente muito pequena comparada à dispersão material, podendo ser desprezada [6].

2.6.2 Dispersão intermodal

A dispersão intermodal, também conhecida por dispersão modal, deve-se à existência de vários modos de propagação ao longo da fibra ótica. Por esse motivo, este tipo de dispersão afeta significativamente as fibras multimodo, uma vez que as suas características permitem a propagação de vários modos (para um mesmo comprimento de onda).

A Figura 2.13 ilustra o efeito da dispersão modal nas POFs. Como se pode constatar, nas SI-POFs existem vários modos de propagação, em que o modo de propagação de ordem mais baixa percorre o caminho mais curto (em linha reta) dentro do núcleo da fibra chegando, ao final da fibra, antes do modo de ordem mais alta. As SI-POFs são altamente afetadas por este tipo de dispersão, derivado ao seu perfil do índice de refração. As GI-POFs surgiram para minimizar os efeitos da dispersão intermodal que ocorrem nas SI-POFs. O perfil gradual do núcleo minimiza esse efeito, fazendo com que os modos de propagação cheguem à extremidade da fibra ótica em instantes muito próximos [6].

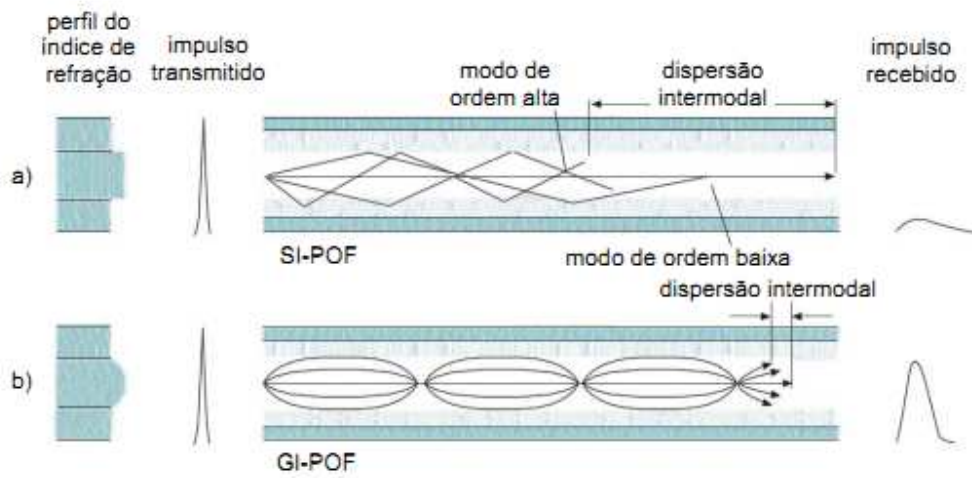


Figura 2.13 - Efeito da dispersão intermodal nas POFs [6].

CAPÍTULO 3

REDES DE ACESSO

Pretende-se com este capítulo abordar as várias tecnologias de redes de acesso em fibra ótica. Para tal, é necessário compreender melhor o que são as redes de acesso e quais as suas estruturas atuais.

A rede de acesso é um segmento da rede de telecomunicações que faz a interligação entre os clientes e as centrais locais. Ao longo do tempo, este segmento de rede sofreu várias evoluções, tanto a nível do tipo de infraestrutura física, como no protocolo utilizado. Inicialmente as redes de acesso foram desenvolvidas para transporte de tráfego de voz, numa era totalmente analógica. Após passar o processo de digitalização, rapidamente evoluiu-se para tráfego de dados.

As primeiras soluções tecnológicas de transmissão de dados nas redes de acesso baseavam-se em *Dial-up*, isto é, não permitiam o utilizador usufruir do serviço de voz e de dados em simultâneo. Surge então a *Digital Subscriber Line* (xDSL) que permite a existência simultânea de vários tipos de tráfego [2]. Existem várias versões xDSL. A mais comum é designada por *Assymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL), e o seu primeiro padrão foi publicado pela *American National Standards Institute* (ANSI) com a sigla ANSI T1.413. Contudo, mais tarde foram publicadas outras normas, nomeadamente pela ITU-T G.992/993.

Paralelamente à evolução das tecnologias que utilizavam o par de cobre surgiu também a *Hybrid Fiber-Coaxial* (HFC). Esta tecnologia foi desenvolvida com o propósito de suportar a difusão televisiva por cabo, mas rapidamente tornou-se uma alternativa à xDSL, permitindo também o transporte de tráfego de voz e dados.

Nestes últimos anos, tem-se assistido a um forte investimento por parte dos operadores na implementação de fibra ótica nas redes de acesso, no sentido de aumentar a largura de banda disponível aos clientes. Surgem então as tecnologias FTTx que permitem uma grande variedade de serviços com uma qualidade inatingível pelo cobre ou cabo coaxial [25].

3.1 Estrutura de uma rede telecomunicações

O avanço tecnológico e a crescente oferta de serviços tornaram o acesso à informação e a conteúdos multimédia num hábito para a sociedade atual, e tem sido um fator essencial para o crescimento económico e da cultura intelectual. Consequentemente as redes de telecomunicações tornaram-se mais complexas, necessitando de uma arquitetura consistente e bem definida.

Para se entender melhor o enquadramento das redes de acesso numa rede de telecomunicações, elaborou-se o esquema que se encontra representado na Figura 3.1 que ilustra a estrutura típica de uma rede de telecomunicações com vários serviços. Esta pode ser dividida em três camadas: Nuclear (*Core*), distribuição e acesso.

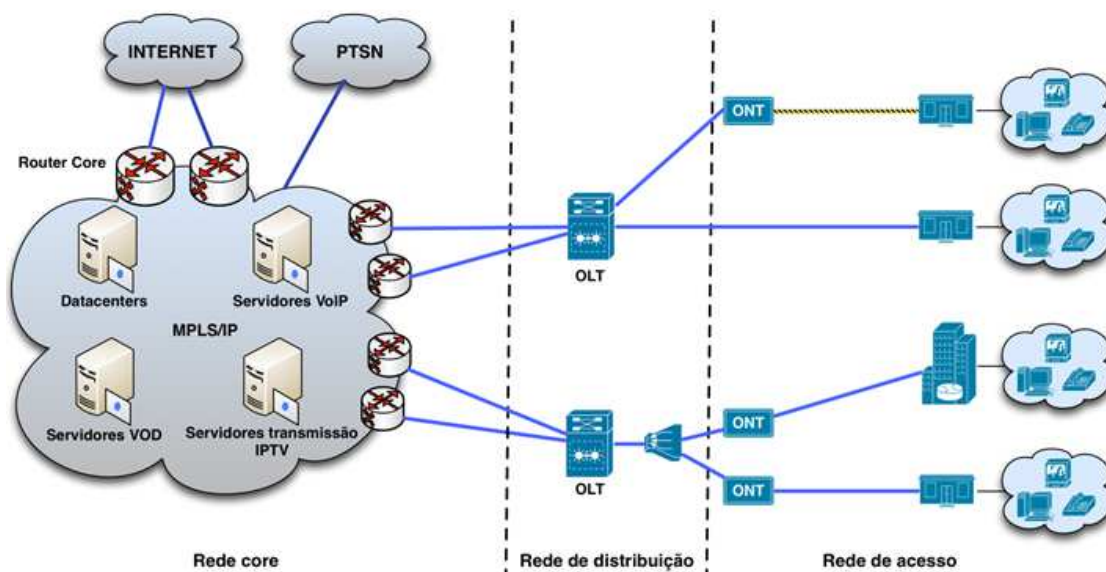


Figura 3.1 - Esquema simplificado de uma rede telecomunicações com fibra ótica.

A *core* concentra todos os serviços e servidores para voz, dados e transmissão de vídeo e TV, assim como também faz a interligação com outros operadores de telecomunicações. De seguida tem-se a rede de distribuição, cuja função serve para agregar as ligações provenientes da rede de acesso e as interligar com a rede nuclear. A rede nuclear e a de distribuição, uma vez que aglomeram grandes quantidades de tráfego são constituídas tipicamente por fibra ótica. Por último, a rede de acesso, que é a área de estudo de interesse desta dissertação, serve para interligação ao utilizador final. Neste segmento da rede, são utilizados o cabo de cobre ou o coaxial numa fase inicial e que posteriormente foi substituído por fibra ótica até à rede de acesso para responder as necessidades de largura de banda dos utilizadores.

3.2 Cenários evolutivos das redes de acesso

O avanço tecnológico, a diversificação de serviços e a massificação no acesso à internet, foram algumas das causas que provocaram ao longo do tempo um aumento gradual de largura de banda, tanto por parte dos clientes residenciais como dos clientes empresariais. Na Figura 3.2 pode-se verificar que essa evolução gradual da largura de banda teve obviamente reflexo no tipo de tecnologia utilizada e do tipo de infraestrutura que a suporta.

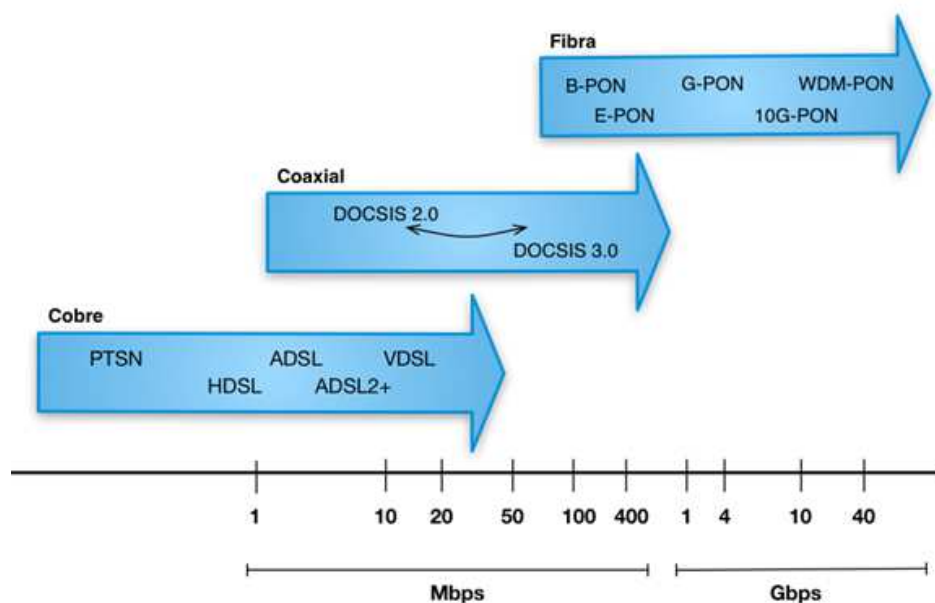


Figura 3.2 - Evolução das tecnologias da rede de acesso.

Como é possível constatar pelo diagrama anterior, as tecnologias que utilizam o par de cobre estão de facto limitadas em largura de banda, atingindo um máximo de cerca de 50 Mbit/s no sentido descendente com a tecnologia *Very-high-bit-rate digital subscriber line* (VDSL). Relativamente às tecnologias que utilizam o cabo coaxial, o desempenho é significativamente melhor dado que se trata de uma arquitetura híbrida.

As tecnologias que utilizam o par de cobre ou cabo coaxial apresentam algumas limitações, nomeadamente no débito binário e na distância de transmissão. Inúmeros fatores fazem com que a fibra ótica seja um meio de transmissão preferível em relação ao cobre, cabo coaxial ou a comunicação sem fios. A substituição dos meios de transmissão por cabos de fibra na rede melhora a qualidade de serviço e reduz o custo de operação e manutenção da rede de acesso [26].

3.3 Rede de acesso usando fibra ótica

Neste capítulo abordam-se os graus de penetração de fibra ótica, as redes óticas passivas e ativas e as várias topologias existentes.

3.3.1 Graus de penetração da fibra ótica

À medida que a fibra ótica começou a tornar-se economicamente viável para a sua implementação no mercado, tornou-se um forte concorrente às tecnologias de cobre e de cabo coaxial nas redes de acesso. A designação FTTx é um termo que permite definir vários graus de profundidade penetração da fibra ótica e permite agregar vários serviços sobre o mesmo suporte físico, como por exemplo voz, televisão e internet. Estas redes podem ser ativas (AON) ou passivas (PON) [26].

Consoante o grau de penetração da fibra ótica, a designação FTTx pode tomar algumas variantes. A Figura 3.3 ilustra algumas das arquiteturas mais conhecidas e implementadas atualmente.

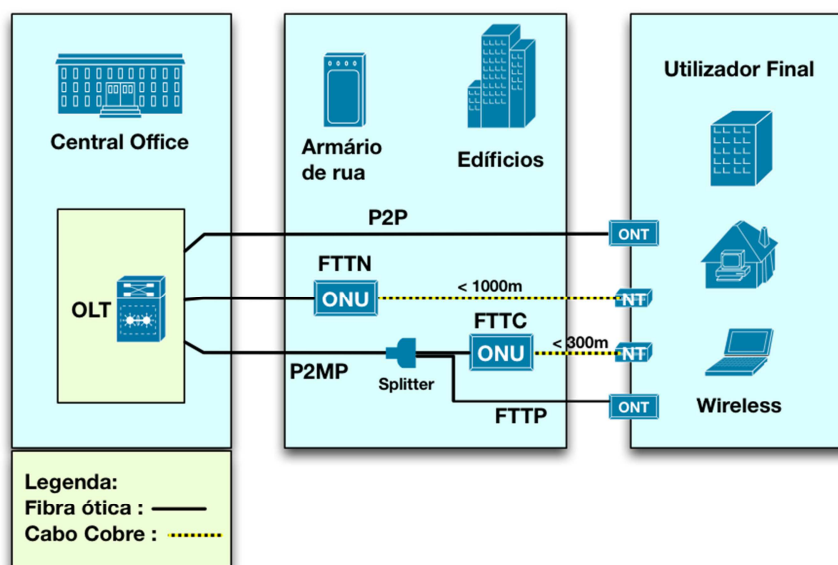


Figura 3.3 - Arquiteturas FTTx.

Pode-se também afirmar que a razão de existirem várias soluções e configurações para as redes óticas passivas, deve-se ao facto de esta ter evoluído de uma forma gradual. Isto é, em primeiro lugar a fibra ótica foi implementada na rede de distribuição, ou seja, entre os equipamentos que se encontram na central principal e os equipamentos que se encontram nas

centrais secundárias. Posteriormente convergiu-se para uma solução onde a fibra passou a substituir os lacetes de cabos de cobre das redes de acesso, e chegou-se a soluções onde o todo o circuito entre o cliente final e a central principal é constituído por fibra. Assim sendo, podem existir soluções onde o acesso através de fibra é ponto-a-ponto (P2P) ou ponto-multiponto (P2MP), sendo que neste último caso é necessário a utilização de *splitters* passivos para distribuição de sinal entre as várias fibras para os vários utilizadores [2].

3.3.1.1 FTTN – Fiber to the Node

A arquitetura *Fiber to the Node* (FTTN) é também conhecida por *Fiber to the Cabinet* (FTTCab) e é utilizada para descrever uma topologia híbrida. Na Figura 3.4 pode-se constatar que neste tipo de arquitetura a fibra ótica encontra-se implementada entre a central local e os armários de rua, e por sua vez, faz uso das infraestruturas de cabo de cobre existentes para alcançar as residências dos utilizadores. Habitualmente, neste tipo de arquitetura os armários de rua têm um alcance de cerca de 1000 metros de raio, sendo por isso indicado para zonas onde existe alguma densidade populacional [2] [26].

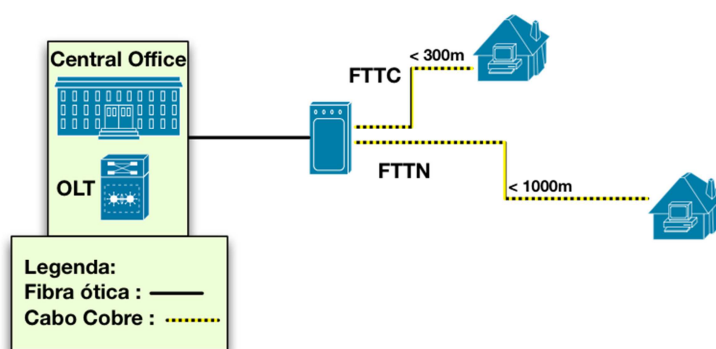


Figura 3.4 - FTTC / FTTN.

3.3.1.2 FTTC – Fiber to the Curb

A designação *Fiber to the Curb* (FTTC) é um termo que, tal como o FTTN, utiliza uma arquitetura híbrida como já foi descrito na secção anterior. Comparativamente ao FTTN, no FTTC a fibra alcança armários de rua que se situam mais próximos das residências, tipicamente numa área com raio de 300 metros. Este tipo de arquitetura é por isso indicado para áreas onde existe uma densidade populacional menor [2] [26].

3.3.1.3 FTTP – *Fiber to the Premises*

O termo FTTP é muitas das vezes utilizado para designar dois níveis de penetração, que são o *Fiber to the Home* (FTTH) e o *Fiber to the Building* (FTTB). O que distingue um termo do outro é que no caso do FTTH, tal como o seu nome indica, é uma solução que é utilizada para descrever uma ligação em fibra até à residência do utilizador final, enquanto no FTTB se baseia numa conexão até a um determinado edifício empresarial, sendo depois necessário a utilização de cabos de cobre ou outras soluções de redes sem fios para conectividade aos equipamentos finais [2] [26].

3.3.2 Rede ótica passiva (PON)

Existem várias tecnologias de redes de acesso, mas uma das mais conhecidas atualmente são as PON. Tal como o seu nome indica, a rede está equipada com elementos passivos, com a exceção dos equipamentos terminais (que se encontram na central local ou no equipamento terminal do utilizador). Assim sendo, a rede de transporte não requer qualquer consumo de energia, permitindo um planeamento de rede simplificado e uma redução de custos de operação e manutenção.

A Figura 3.5 ilustra a estrutura de uma PON. A arquitetura de rede utilizada é ponto-multiponto, onde o meio é partilhado por vários utilizadores. Os elementos passivos existentes nestas redes, tal como é o caso do *splitter*, divide a largura de banda de uma única fibra até 128 utilizadores, numa distância máxima de 20 km [2].

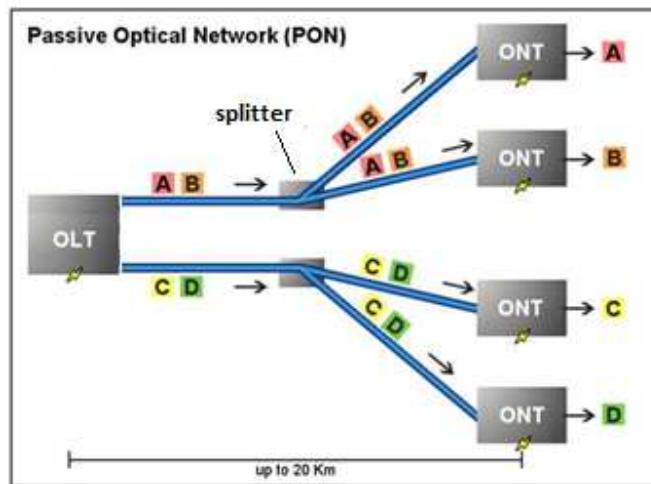


Figura 3.5 - Rede ótica passiva [2].

3.3.3 Rede ótica ativa (AON)

As redes óticas ativas diferem das passivas, nomeadamente por necessitarem de equipamentos ativos no ponto de distribuição (*switches*, *routers* ou multiplexers), sendo necessário alimentação elétrica para distribuir o sinal ótico.

As topologias podem ser ponto-a-ponto, em que uma fibra é dedicada ao utilizador final, ou ponto-a-multiponto, que necessitam de equipamentos ativos implementados no ponto de distribuição. Como é possível verificar na Figura 3.6, neste tipo de redes os sinais são enviados apenas para os utilizadores a que se destinam. Por esse motivo, os equipamentos de distribuição necessitam de *buffers*, de modo evitar colisões [2].

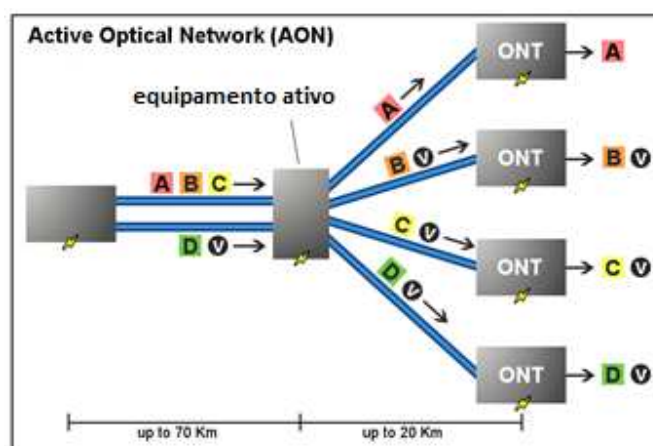


Figura 3.6 - Rede ótica ativa [2].

3.3.4 Comparação entre PON e AON

A principal vantagem das redes PON relativamente às AON prende-se pelo facto de não existir equipamentos ativos entre a central local e o equipamento do utilizador final, não sendo necessária energia elétrica na rede de distribuição. Por esse motivo, conclui-se que a rede PON é financeiramente mais atrativa que a AON, uma vez que os custos iniciais de instalação de uma rede PON são mais baixos. O mesmo já não poderá ser dito numa rede AON, cujos custos de manutenção e de operação dos equipamentos ativos são mais elevados [26].

As redes AON introduzem latência comparativamente às redes PON, dado que a informação recebida nos equipamentos ativos de distribuição não é reenviada para todos os utilizadores em *broadcast*, sendo necessário uma conversão ótico-elétrico-ótico. Como foi possível verificar na secção anterior, existe um tratamento da informação e esta é enviada apenas para o utilizador que a solicitou [2].

Contudo, as redes PON também possuem desvantagens. O equipamento terminal ótico que é designado por *Optical Network Terminal* (ONT) requer maior largura de banda e equipamentos óticos de maior qualidade. É também necessário a implementação de um protocolo de acesso ao meio, por forma garantir que a informação de cada utilizador seja sincronizada [26].

3.3.5 Equipamento ativo

Uma rede PON consiste numa central local equipada com um equipamento designado por OLT (*Optical line terminal*) interligado a vários ONUs (*Optical network unit*) ou ONTs (*Optical network terminal*). A sigla “ONT” é um termo da ITU-T que descreve um único ONU para um único utilizador.

3.3.5.1 OLT – Optical Line Terminal

O OLT trata-se de um equipamento ativo que está localizado nas instalações do operador de telecomunicações, nomeadamente na central local (CO). Possui interfaces para agregar vários tipos de serviços. Faz o controlo e administração dos vários ONTs, regulando todo o processo de transmissão e operação da rede. Tipicamente os ONTs estão colocados a

distâncias diferentes do OLT, o que significa que é necessário regular o nível de potência do sinal. Todo o processo de registo dos ONTs é controlado pelo OLT.

O comprimento de onda de operação entre o OLT e o ONT no sentido descendente é os 1490 nm para tráfego de voz e dados e 1550 nm para tráfego de vídeo. Já no sentido ascendente utiliza-se os 1310 nm [27].

Relativamente aos emissores e recetores, tipicamente o OLT utiliza o *laser* DFB como emissor de luz e o fotodíodo de avalanche (APD) para o recetor [28].

A Figura 3.7 ilustra um exemplo de um equipamento deste tipo. Neste caso em particular trata-se de um OLT com designação de OLT7-8CH que é utilizado pela PT para fornecimento de serviço FTTH aos seus clientes. Contudo, podem existir outros modelos mais robustos e modulares.



Figura 3.7 - OLT7-8CH [29].

3.3.5.2 ONT – *Optical Network Terminal*

O ONT é um equipamento ativo que tipicamente é colocado nas instalações dos utilizadores ou então nos armários de rua que se encontram junto às urbanizações e edifícios. Numa rede passiva, o sinal que é emitido pelo OLT é recebido por todos os ONTs, mas cada um seleciona a informação que lhe pertence (através de etiquetas que são colocadas nos pacotes). No sentido ascendente, a informação proveniente dos vários ONTs é multiplexada no tempo através da técnica *Time Division Multiple Access* (TDMA), dado que estes partilham o mesmo suporte físico [27]. Este equipamento permite também converter o sinal ótico em elétrico, e vice-versa.

Quanto aos emissores e recetores, tipicamente o ONT utiliza dispositivos de mais baixo custo quando comparados com os do OLT. Normalmente é utilizado o *laser* de *Fabry-Pérot* (FP) como emissor de luz nos 1310 nm e o fotodíodo PIN como recetor [28]. Na Figura 3.8 pode-

se verificar um exemplo de um ONT, neste caso em particular o que é utilizado pela Portugal Telecom (PT).



Figura 3.8 - ONT7-SFU [29].

3.3.6 Equipamento passivo

A interligação dos equipamentos ativos (OLT e ONT) é efetuada através de uma rede ótica de distribuição (ODN), onde são utilizados diversos tipos de componentes passivos. Estes podem ser divisores óticos (*splitters*), caixas de junção, distribuidores óticos (ODF), *patch cords* ou *pigtails* e acopladores WDM.

3.3.6.1 Divisor ótico (*splitter*)

Os *splitters* são equipamentos passivos que permite efetuar a divisão de potência do sinal ótico para vários ONTs. Nos primeiros sistemas óticos, este tipo de componente não era necessário dado que a comunicação era efetuada apenas entre dois pontos. Hoje em dia, existem vários serviços e o número de clientes que utilizam fibra ótica está em constante crescimento, o que implica o acesso a vários equipamentos e a divisão do sinal ótico. Neste momento, no mercado, existem *splitters* desde 1:2 até 1:64, e já se fala, com a atualização para 10 Gbps, no *splitter* de 1:128, sendo que quanto maior for a relação de divisão do *splitter* mais atenuação será introduzida ao sinal transmitido [27]. Um exemplo comum de um *splitter* de 1:64 está representado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - *Splitter* ótico de 1:64 [30].

3.3.6.2 *Caixas de junção*

As caixas de junção permitem proteger as juntas de cabos de fibra ótica por fusão, tal como ilustra a Figura 3.10. Este tipo de material possui uma estrutura rígida resistente a impactos e a infiltrações de água, pois são instalados em locais como condutas, armários de rua ou até mesmo enterradas na terra. Permite a entrada de vários cabos de fibra, com capacidade padrão máxima de 48 fusões [30].



Figura 3.10 - Caixa de junção [30].

3.3.6.3 *Distribuidor ótico*

Um ODF é um equipamento passivo que permite fazer a interligação entre vários cabos de fibra ótica. São amplamente utilizados nas redes de fibra ótica e são normalmente instalados em bastidores ou pequenos armários onde terminam as fibras óticas. Como se pode constatar na Figura 3.11, existe vários cabos de fibra ótica a terminar na parte interior do equipamento, e no painel frontal poderão ser utilizados *patch cords* para interligar as várias posições. O

painel frontal está apto para adaptadores do tipo *Subscriber Connector* (SC), *Ferrule Connector* (FC), *Straight Tip* (ST) ou E-2000 [30].

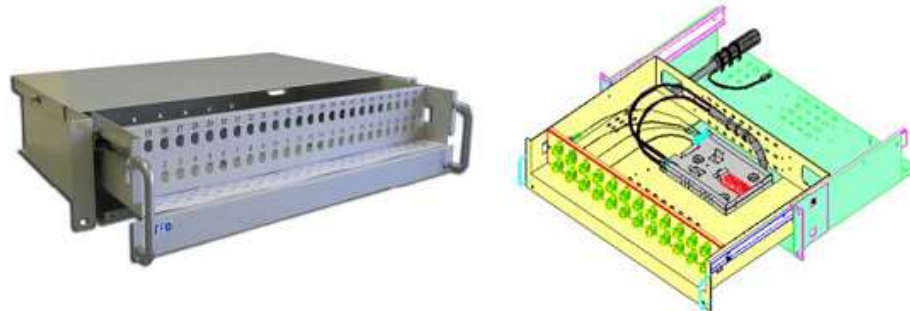


Figura 3.11 - Distribuidor ótico [30].

3.3.6.4 *Patch cord / Pigtail*

O *patch cord* é uma designação para os cabos óticos utilizados entre equipamentos ativos e os distribuidores óticos. Estes podem possuir diferentes conetores nas extremidades, tal como se pode constatar na Figura 3.12. Tipicamente os cabos de cor amarela são fibras óticas de monomodo, enquanto os laranja são multimodo.

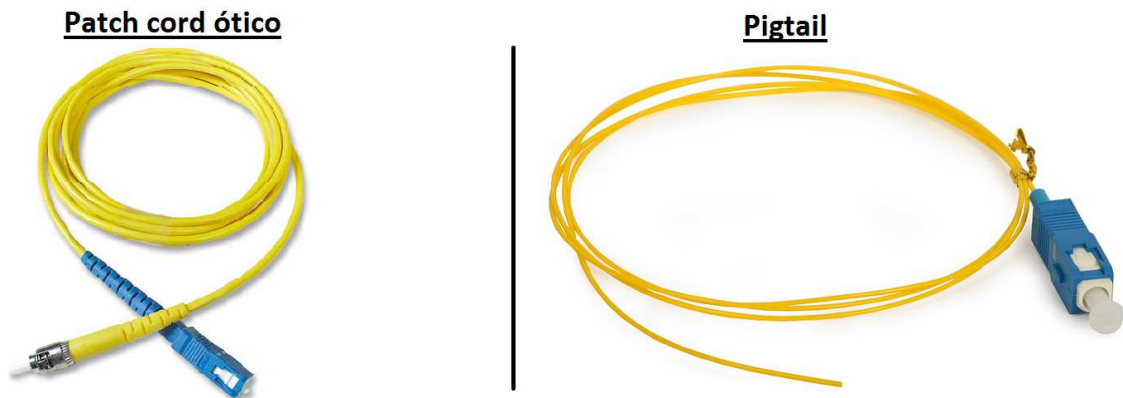


Figura 3.12 - Patch cord / Pigtail [31].

Relativamente ao *pigtail* é basicamente um *patch cord* em que numa das extremidades existe um conetor (LC, FC, ST por exemplo) e na outra extremidade encontra-se sem conetor que será utilizada para uma fusão. Tipicamente, nas aplicações FTTH são utilizados *pigtails* monomodo [30].

3.3.6.5 Acoplador WDM

O acoplador WDM tem a função de multiplexar comprimentos de onda na mesma fibra ótica. Os mais típicos são os que permitem multiplexar o sinal descendente nos 1490 nm e o sinal de TV analógico nos 1550 nm. Um exemplo deste tipo de equipamento encontra-se representado na Figura 3.13. Dependendo do fabricante, este tipo de componente introduz uma atenuação de cerca de 0,8 dB [30].

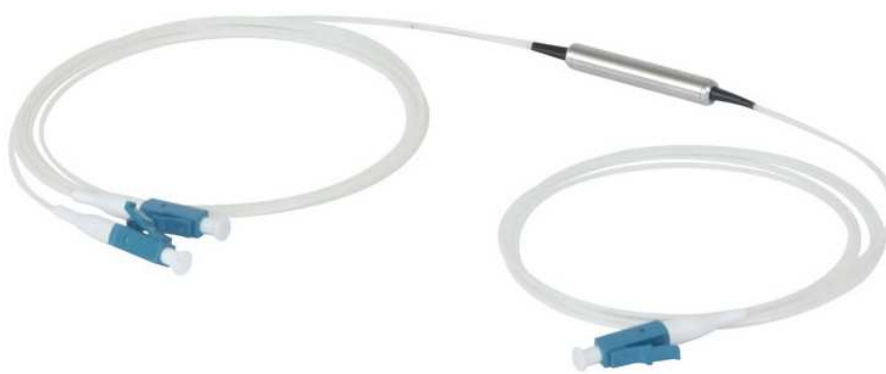


Figura 3.13 - Acoplador WDM [32].

3.3.7 Arquiteturas das redes PON

Nas PON poderão ser utilizadas dois tipos de arquiteturas de rede: Ponto-a-ponto (P2P) e ponto-multiponto (P2MP). Tipicamente, a mais utilizada nas redes PON é a ponto-multiponto, dado que é uma arquitetura que exige menos custos de infraestrutura. A quantidade de fibra na arquitetura P2MP é consideravelmente mais baixa quando comparada com a arquitetura P2P. Por outro lado, nas redes P2P a largura de banda é totalmente dedicada ao utilizador que recebe a ligação, enquanto na P2MP a largura de banda é partilhada por vários utilizadores.

A Figura 3.14 ilustra o esquema dos dois tipos de arquiteturas. Como se pode constatar na arquitetura P2MP existe um *splitter* responsável por dividir o sinal ótico pelos vários utilizadores.

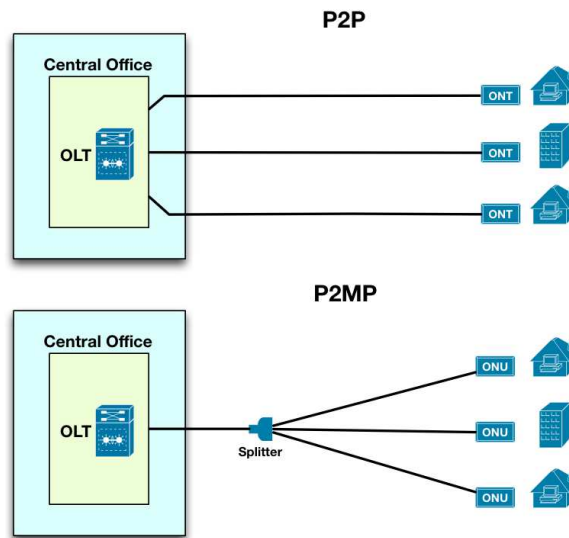


Figura 3.14 - Redes P2P (ponto-a-ponto) e P2MP (ponto-a-multiponto).

3.3.8 Topologias das redes PON

As redes óticas passivas podem ser implementadas em três topologias físicas: em barramento, anel ou árvore. As topologias referidas possuem uma arquitetura ponto-multiponto. Cada topologia apresenta características distintas, sendo implementadas conforme a necessidade.

3.3.8.1 Topologia em barramento

Numa topologia em barramento os ONUs são interligados ao OLT de acordo com o esquema da Figura 3.15. Como é possível constatar, existe um cabo de fibras ligado ao OLT e posteriormente cada ONU recebe uma fibra proveniente de um *splitter* com fator de derivação de 1:2. Por cada *splitter* introduzido na rede, existe uma perda de potência do sinal ótico. Por esse motivo, os ONUs mais afastados do OLT recebem um sinal ótico mais fraco [33].

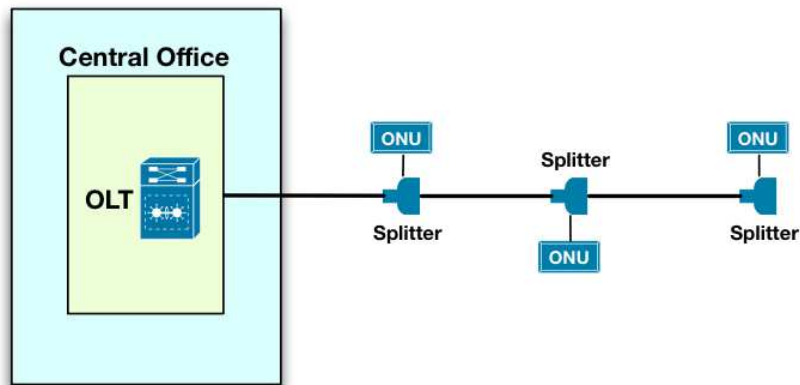


Figura 3.15 - Topologia em barramento.

Esta topologia tem a vantagem de utilizar pouca quantidade de fibra e é útil quando se pretende instalar diversos armários de rua junto a urbanizações (FTTC). Deste modo pode-se efetuar a distribuição de fibras para os vários ONUs utilizando vários *splitters* de 1:2. Por outro lado, um corte na fibra principal implica a perda de serviço em todos os ONUs [27].

3.3.8.2 Topologia em anel

Numa topologia em anel, a interligação da fibra é efetuada de ONU para ONU, criando um percurso circular de acordo com a Figura 3.16. A informação passa de *splitter* em *splitter* até chegar ao destino.

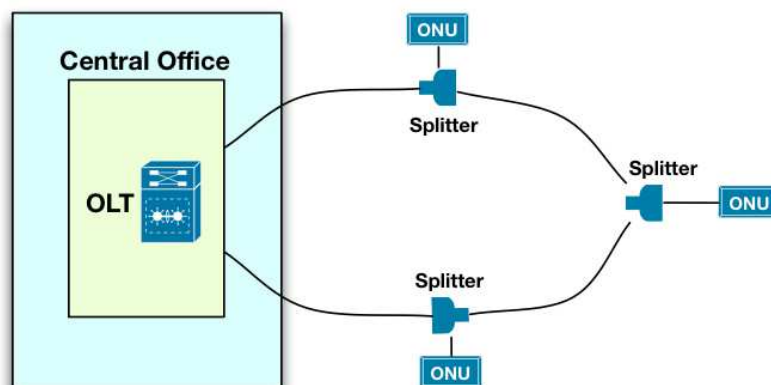


Figura 3.16 - Topologia em anel.

Uma vantagem da utilização desta topologia é a redundância da rede e a possibilidade de configurar métricas para o tráfego. Desta forma é possível indicar a direção mais rápida ou

preferencial para o tráfego. Contudo apresenta a mesma desvantagem que a topologia em barramento, visto que o sinal ótico é atenuado sempre que passa por um *splitter* [27].

3.3.8.3 Topologia em árvore

Na topologia em árvore os ONUs estão interligados ao OLT através de um nó principal, tal como está representado na Figura 3.17. São utilizados *splitters* para ramificar as várias ligações para os ONUs. Se a distância de cada ONU ao OLT for semelhante, o dimensionamento da rede é simples e todos os ONUs vão receber um sinal ótico com a mesma qualidade. Por outro lado, se a distância for diferente, implica a utilização de amplificadores óticos para compensar as perdas [33].

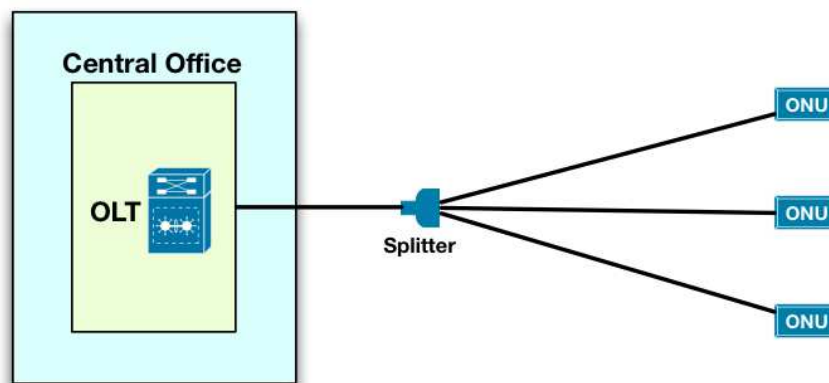


Figura 3.17 - Topologia em árvore.

Esta topologia é a mais utilizada nas redes PON, derivado à sua simplicidade e ao seu baixo custo de implementação e manutenção. Tipicamente as tecnologias PON existentes, como por exemplo a *Gigabit Passive Optical Network* (GPON) permite alcançar distâncias de 20 km entre o ONU e o OLT. Apresenta a desvantagem de toda a rede depender de uma única fibra (entre o OLT e o primeiro *splitter*), que em caso de falha coloca toda a rede em baixo [27].

3.4 Tecnologias das redes PON

Neste capítulo pretende-se apresentar as tecnologias PON existentes e as suas características. Existem várias técnicas de acesso ao meio que podem ser utilizadas nas redes PON: *Time-Division Multiple Access* (TDMA), *Wavelength-Division Multiple Access* (WDMA), *Subcarrier-Division Multiple Access* (SCMA) e *Code-Division Multiple Access* (CDMA). De entre as técnicas referidas, as mais utilizadas são as *Time-division multiplexing – PON* (TDM-PON) e *Wavelength-division multiplexing – PON* (WDM-PON). O diagrama da Figura 3.18 ilustra as tecnologias PON existentes atualmente [33].

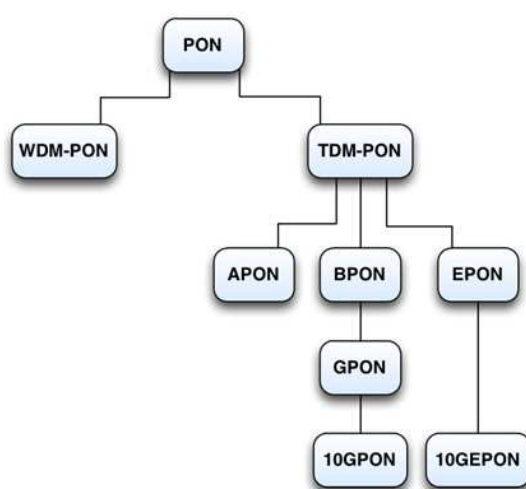


Figura 3.18 - Esquema das tecnologias PON.

A WDM-PON permite operar vários comprimentos de onda em simultâneo no sentido ascendente e descendente para um determinado ONU. As tecnologias TDM-PON utilizam um único comprimento de onda em cada uma das direções e o tráfego é multiplexado no tempo.

Existe ainda a rede híbrida que é uma combinação da TDM e WDM. Este tipo de arquitetura permite melhorar a escalabilidade da rede permitindo rácios de *splitting* até 1:1000. Como se pode verificar pela Figura 3.19, a rede híbrida WDM/TDM consiste em agregar uma TDM-PON numa WDM-PON, resultando uma rede de elevada densidade capaz de oferecer conectividade a um grande número de utilizadores [33].

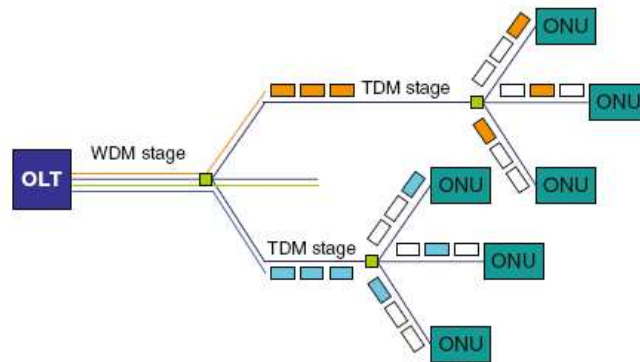


Figura 3.19 - Topologia híbrida WDM/TDM [33].

3.4.1 APON

A *ATM Passive Optical Network* (APON) foi a primeira tecnologia ótica passiva a surgir (por volta de 1998), definida pelo ITU-T segundo a norma G.983.1. É baseada no protocolo *Asynchronous transfer mode* (ATM), e permite débitos de 622 Mbps no sentido descendente e 155 Mbps no sentido ascendente. A distância máxima de ligação é de 20 km (atenuação total entre 10 e 30 dB) e suporta *splitters* com um fator de divisão até 1:64. Como exemplo, APON a operar a 622 Mbps com um *splitter* de 1:32 pode fornecer um débito de cerca de 20 Mbps a cada cliente. Apesar de ser um protocolo baseado na técnica TDMA, poderá ser utilizado dois comprimentos de onda sobre a mesma fibra ótica, usando os 1310 nm para o tráfego ascendente e os 1550 para o tráfego descendente.

Uma vez que a distância entre cada ONU e o OLT pode ser diferente, é necessário existir mecanismos para evitar colisões no sentido ascendente. Por esse motivo são utilizadas células PLOAM (*Physical Layer Operation, Administration and Maintenance*) entre o OLT e ONU, por forma sincronizar as transmissões e estabelecer a largura de banda necessária para cada ONU. Estas células são enviadas de forma periódica nos dois sentidos. No sentido ascendente as células PLOAM são usadas para o ONU transmitir o tamanho das filas de espera. No sentido descendente serve para o OLT mapear a transmissão dos vários ONUs. Esse processo é efetuado através de mapas designados por *grants*. Cada *grant* é uma permissão única para um ONU transmitir carga útil em cada célula ATM [2] [33].

3.4.2 BPON

A *Broadband Passive Optical Network* (BPON) é uma evolução da APON, mas com funcionalidades extras. Foi definida pela ITU-T em 2001 com a norma G.983.3. À semelhança da APON é baseada também no protocolo ATM, permitindo débitos no sentido ascendente de 155 Mbps. Já no sentido descendente permite débitos até 1244 Mbps [28].

Esta tecnologia tem a capacidade de fornecer diferentes prioridades na atribuição da largura de banda aos seus utilizadores, dependendo dos serviços/aplicações desejados e suportados, uma vez que implementa o mecanismo *Dynamic Bandwidth Allocation* (DBA) [2].

A Figura 3.20 ilustra as diferenças que existem relativamente à gama de comprimento de onda de operação da APON e da BPON. Enquanto a APON tem uma largura de banda de 100 nm em cada sentido, a BPON vê reduzida a sua largura de banda no sentido descendente para 20 nm e reserva uma banda de 10 nm nos 1550 nm para transmissão de vídeo [28].

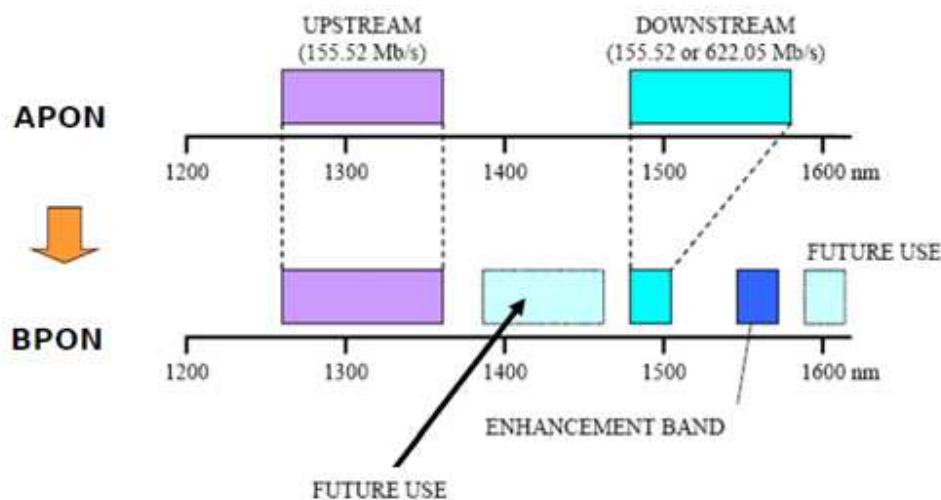


Figura 3.20 - Gama de operação APON/BPON (adpt. de [28]).

A atenuação total do ODN pode ser dividida em classes. Existem 3 classes, que são a classe A, B e C. A primeira possui uma atenuação no intervalo de 5 a 20 dB. A classe B especifica uma atenuação total no intervalo de 10 a 25 dB e a classe C de 15 a 30 dB [28].

3.4.3 GPON

A tecnologia GPON é uma evolução da BPON e é definida segundo a norma ITU-T G.984. Existem uma série de recomendações G.984.n ($n = 1,2,3,4,5,6$) que definem as características gerais da GPON, nomeadamente da camada física, da camada de convergência de transmissão e interface de controlo e de gestão. Permite débitos superiores comparativamente à tecnologia anterior, suportando 2.5 Gbps no sentido descendente e 1.25 ou 2.5 Gbps no sentido ascendente. Apesar da evolução, a GPON é compatível com os débitos binários dos seus antecessores. A Figura 3.21 apresenta a estrutura de uma rede GPON.

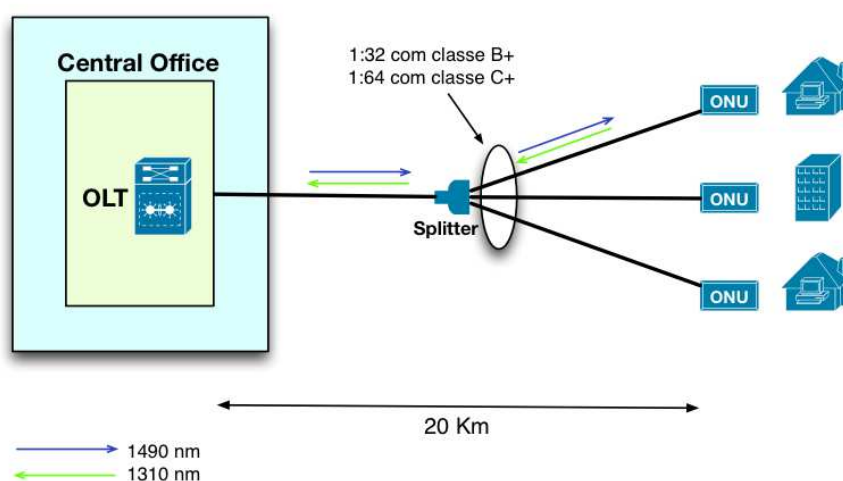


Figura 3.21 - Rede GPON.

Além dos serviços tradicionalmente fornecidos pelas tecnologias anteriores, como os canais televisivos, tráfego de dados e de voz, surgem novos serviços como *Voice over IP* (VoIP), IPTV, VoD ou Televisão digital terrestre (TDT). Todo este tipo de tráfego pode ser encapsulado utilizando o protocolo *Ethernet*, ATM, ou através do método de encapsulamento *GPON Encapsulation method* (GEM). A utilização do método de encapsulamento GEM permite uma utilização eficiente do meio de transporte, uma vez que suporta a fragmentação de pacotes de modo permitir um QoS acessível a tráfego sensível ao atraso (voz e vídeo). O código de linha utilizado quer para comunicações no sentido ascendente ou descendente é o código NRZ (Non-return-to-zero). Esta tecnologia implementa também mecanismos de segurança, tais como encriptação o *Advanced encryption standard* (AES).

Relativamente às gamas de comprimento de onda de operação, utiliza os 1480-1500 nm no sentido descendente e os 1260-1360 nm no sentido ascendente. À semelhança da BPON utiliza adicionalmente os 1550-1560 nm para distribuição de vídeo no sentido descendente, recorrendo à técnica WDM.

O alcance físico máximo é de 20 km, suportando também um alcance lógico de 60 km. Relativamente ao rácio do *splitter*, esta tecnologia suporta fatores de derivação lógicos de 1:128, embora na prática o máximo implementado é de 1:64 [2].

Quanto às classes de rede de distribuição ótica que definem a atenuação total, tal como a BPON suporta as classes A, B e C. Em adição são ainda especificadas as classes B+ (atenuação total entre 13 a 28 dB) e C+ (atenuação total entre 17 a 32 dB) na especificação G.984.2 [28] [33].

3.4.4 10G-PON

A tecnologia 10G-PON é baseada na GPON e é definida pela norma ITU-T G.987. Como se pode constatar na Figura 3.22, a transmissão no sentido descendente ocorre na banda de 1575-1580 nm com um débito de 10 Gbps. Já no sentido ascendente, opera nos 1260-1280 nm suportando débitos de 2,5 Gbps. Contudo, esta tecnologia também suporta débitos simétricos, isto é, 10 Gbps no sentido ascendente e descendente, sendo que neste caso será necessária a utilização de emissores mais caros nos ONUs [2]. A tecnologia 10G-PON é capaz de suportar os serviços de distribuição de vídeo em alta definição (HDTV), e ao mesmo tempo suportar a gama de serviços já suportada pelo seu antecessor [1].

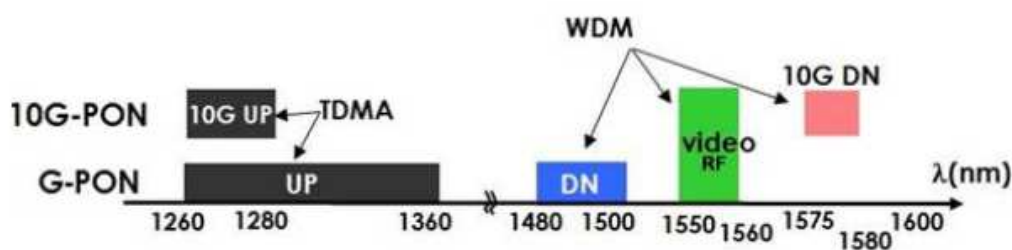


Figura 3.22 - Gama de comprimento de onda GPON/10G-PON [2].

A tecnologia 10G-PON coexiste com a GPON, tal se pode verificar na Figura 3.23. A coexistência é viabilizada através da alocação do sistema 10G-PON em comprimentos de

onda diferentes daqueles utilizados pelo sistema GPON. Isto permite uma reutilização da infraestrutura e de equipamentos, facilitando a migração da GPON para 10G-PON. São utilizados componentes designados por *Wavelength blocking filters* (WBF) e *Wavelength division multiplexers* (WDM) para que a GPON e 10G-PON partilhem a mesma rede de distribuição ótica (ODN). Estes equipamentos têm a função de combinar/isolar os comprimentos de onda das diferentes tecnologias [2].

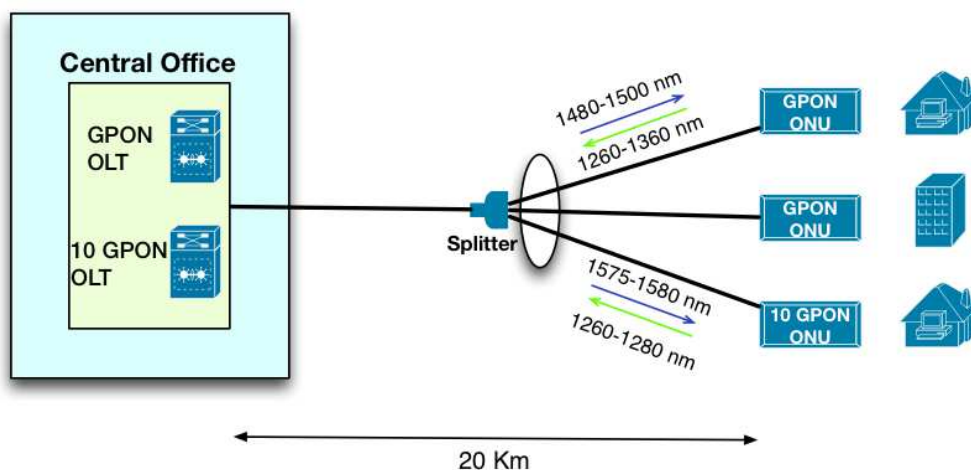


Figura 3.23 - Coexistência GPON/10G-PON.

Relativamente ao alcance físico da fibra é de 20 km e o lógico é de 60 km, tal como acontece na GPON. Suporta rácios de *splitting* de 1:64 (1:128 até 1:256 a nível lógico). O recurso ao *Forward Error Correction* (FEC) é obrigatório para todos os canais de transmissão ascendentes e descendentes [2].

3.4.5 EPON

Paralelamente às evoluções por parte da ITU, o IEEE também normalizou uma tecnologia de rede passiva. Surge então a *Ethernet PON* (EPON) com a norma IEEE 802.3ah, que possibilita débitos simétricos de 1 Gbps e um alcance de 20 km. Tal como o nome indica, esta tecnologia é baseada no protocolo *Ethernet*, enquanto os protocolos apresentados anteriormente são baseados em ATM. Isto implica que as tramas *Ethernet* são transportadas no seu formato nativo. Esse facto permite a utilização de equipamentos IP, tornando estas redes adequadas ao transporte de qualquer tipo de tráfego [1].

Como se pode constatar pela Figura 3.24 a estrutura da rede EPON é semelhante a uma GPON, isto é, os equipamentos ativos também são OLTs e ONUs. A gama de comprimentos de onda de funcionamento é idêntica à da GPON. No sentido descendente opera no intervalo de 1480-1500 nm e no ascendente é de 1260-1360 nm. No sentido ascendente, o acesso ao meio também é em TDMA, ou seja, apenas é permitido o acesso a cada ONU individualmente no *timeslot* que lhe é dedicado. O intervalo de comprimento de onda de 1550 a 1560 nm é utilizado para distribuição de vídeo. O rácio de *splitting* máximo suportado é de 1:32 [2].

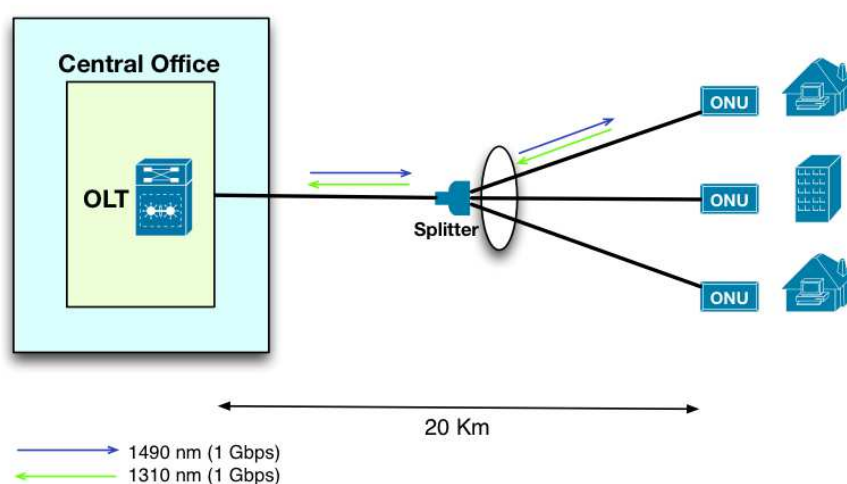


Figura 3.24 - Rede EPON.

Apesar das semelhanças com a GPON, a EPON também apresenta algumas diferenças. Nomeadamente utiliza uma codificação de linha 8b/10b. Isto significa que por cada grupo de 8 bits é codificado um sinal de 10 bits, permitindo assegurar uma extração do relógio mais fácil. Com este tipo de codificação, implica um aumento 20% de *overhead*, o que significa que apesar de suportar uma taxa de transmissão de linha de 1,25 Gbps, a sua capacidade máxima será de 1 Gbps, tanto no sentido ascendente como no descendente.

Na EPON, é definido o *Multi-Point Control Protocol* (MPCP) que é o protocolo responsável pela atribuição de largura de banda e procura automática de dispositivos. O nível de segurança implementa o algoritmo de encriptação AES. Já para correção de erros, a utilização do FECs é opcional [2].

3.4.6 10G-EPON

A evolução da EPON deu-se para o *10 Gigabit - Ethernet PON* (10G-EPON) e é definida pela norma IEEE 802.3av. Esta norma permite a operação a 10 Gbps de forma simétrica ou então de forma assimétrica, sendo 10 Gbps no sentido descendente e 1 Gbps no sentido ascendente.

A Figura 3.25 ilustra a gama de comprimento de onda de operação da 10G-EPON. Para que a migração para a tecnologia 10G-EPON não seja muito dispendiosa para o operador, é necessário que as duas tecnologias coexistam no mesmo ODN. Para que isso aconteça, a 10G-EPON utiliza um comprimento de onda diferente no sentido descendente, situando-se na gama dos 1575-1580 nm. Já no sentido ascendente, as gamas sobrepõem-se sendo necessário o recurso à técnica de acesso ao meio TDMA. Contudo, a largura de banda é mais pequena comparativamente à EPON, entre 1260-1280 nm.

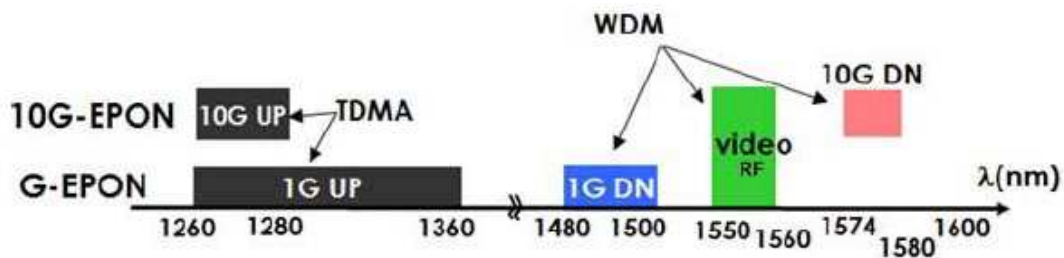


Figura 3.25 - Gama de comprimento de onda EPON/10GE PON [2].

A 10G-EPON permite distâncias de 20 km e rácios de *splitting* de 1:32. O recurso ao FEC é obrigatório para todos os canais que operam a um ritmo de 10 Gbps. Esta tecnologia utiliza uma codificação 64b/66b, o que significa que por cada grupo de 64 bits é codificado um sinal de 66 bits [2].

3.4.7 Comparação das tecnologias TDM-PON

Pretende-se com este capítulo comparar as várias tecnologias TDM-PON apresentadas anteriormente. Para o efeito elaborou-se a Tabela 3.1 que resume as características mais importantes das várias tecnologias. É importante referir que a distância física máxima suportada por cada PON depende do *power budget* e das perdas introduzidas pelos diversos componentes, enquanto a distância lógica é limitada a nível de execução da tecnologia, isto é, depende de quantos mapas têm de ser armazenados no OLT para que este possa mapear apropriadamente as tramas no sentido ascendente.

Tabela 3.1 - Comparação entre tecnologias TDM-PON [2] [28].

	BPON	GPON	10G-PON	EPON	10G-EPON
Norma	ITU G.983	ITU G.984	ITU G.987	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av
Protocolo	ATM	GEM/ATM/ Ethernet	XGEM/ATM/ Ethernet	Ethernet	Ethernet
Alcance físico	20 Km	20 Km	20 Km	20 Km	20 Km
Débito descendente	1,25 Gbps	2,5 Gbps	10 Gbps	1,25 Gbps	10 Gbps
Débito ascendente	622 Mbps	1,25 / 2,5 Gbps	10 Gbps	1,25 Gbps	10 Gbps
Comprimento de onda ascendente	1260-1360 nm	1260-1360 nm	1260-1280 nm	1260-1360 nm	1260-1280 nm
Comprimento de onda descendente	1480-1500 nm	1480-1500 nm	1575-1580 nm	1480-1500 nm	1575-1580 nm
Comprimento de onda vídeo RF	1550-1560 nm	1550-1560 nm	1550-1560 nm	1550-1560 nm	1550-1560 nm
FEC	Facultativo	Facultativo	Obrigatório	Facultativo	Obrigatório
Rácio <i>splitting</i>	1:32	1:64 (1:128 a nível lógico)	1:64 (1:256 a nível lógico)	1:32	1:32 ou mais
Codificação	NRZ	NRZ	NRZ	8b/10b	64b/66b
Encriptação	Não especificado	AES	AES	Não especificado	Não especificado
Custo desenvolvimento	Baixo	Médio	Elevado	Baixo	Elevado

3.4.8 WDM-PON

As tecnologias TDM-PON operam segundo o princípio em que o acesso ao meio é efetuado no domínio no tempo, cuja largura de banda é partilhada por todos os utilizadores. Contudo, existe uma gama de comprimento de onda diferente para cada sentido do fluxo de tráfego (ascendente e descendente), o que constitui uma semelhança ao funcionamento da tecnologia WDM.

Uma rede WDM-PON permite a transmissão de múltiplos comprimentos de onda no sentido descendente e ascendente entre o ONU e o OLT. Deste modo, é possível aumentar a largura de banda disponível a cada utilizador final. A Figura 3.26 ilustra a forma de como ocorre a comunicação entre o OLT e os vários ONUs no sistema WDM-PON. Como é possível constatar, cada ONU tem um comprimento de onda reservado para comunicar com o OLT, permitindo redes ponto-a-ponto numa infraestrutura PON.

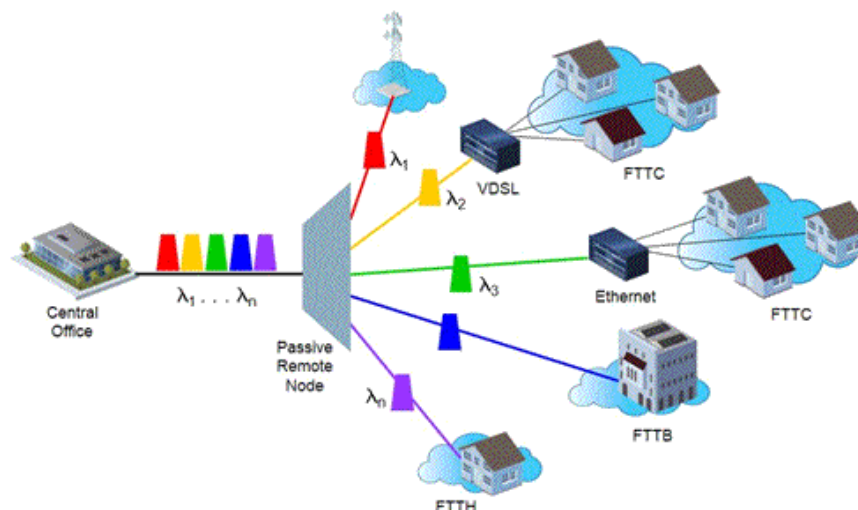


Figura 3.26 - Rede WDM-PON [34].

No sentido descendente, os vários comprimentos de onda são encaminhados para um *router* designado por *Passive Arrayed Waveguide Grating* (AWG) que é implementado no nó remoto (RN). No OLT, é necessário um emissor capaz de emitir múltiplos comprimentos de onda para os vários ONUs [34].

As redes WDM-PON subdividem-se em duas redes de transporte: *Coarse-WDM* (CWDM) e *Dense-WDM* (DWDM) [2].

3.4.8.1 CWDM

O CWDM é um sistema WDM de baixa densidade em termos de comprimento de onda sendo definido pela norma ITU-T G.694.2. A Figura 3.27 ilustra o princípio de funcionamento deste sistema. Opera na gama de comprimento de onda de 1271-1611 nm e a distância entre canais é de 20 nm [2].

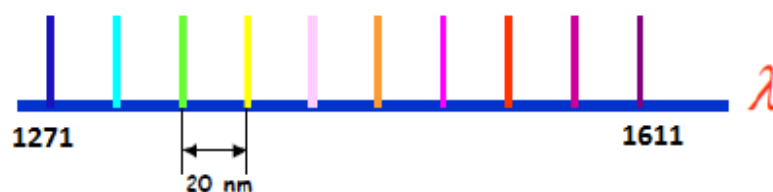


Figura 3.27 - Espaçamento entre canais CWDM [2].

3.4.8.2 DWDM

O DWDM é um sistema WDM de alta densidade em termos de comprimento de onda e é definido pela norma ITU-T G.694.1. Como se pode verificar na Figura 3.28, tem o mesmo princípio de funcionamento que o CWDM. Opera na gama de comprimento de onda de 1530-1624 nm e a distância entre canais pode ser de 1,6 nm, 0,8 nm ou até 0,4 nm [2].



Figura 3.28 - Espaçamento entre canais DWDM [2].

3.4.8.3 Comparação entre CWDM e DWDM

Os sistemas CWDM e DWDM são tecnologias que apresentam o mesmo princípio de funcionamento de combinar múltiplos comprimentos de onda numa única fibra. Contudo, existem diversas diferenças entre os dois sistemas. A Tabela 3.2 resume as principais vantagens e desvantagens de ambas as tecnologias.

Tabela 3.2 - Comparação entre CWDM e DWDM [2].

	Vantagens	Desvantagens
CWDM	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo potência reduzida; • Necessita menor espaço; • Pode usar LED ou <i>Laser</i>; • Custos iniciais mais baixos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor capacidade; • Menor alcance; • Regeneração do sinal.
DWDM	<ul style="list-style-type: none"> • Disponível máxima capacidade; • Mais de 80 canais; • Suporta débitos por ONT muito elevados; • Fácil integração de amplificação ótica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos iniciais mais elevados; • Requer mais espaço e potência; • <i>Lasers</i> e filtros muito precisos.

3.5 Power budget

O conceito de *power budget* consiste em determinar a distância máxima que a fibra poderá ser distribuída sem a colocação de repetidores ou amplificadores. É calculado usualmente em decibéis (dB) e tem como objetivo garantir que existe sinal suficiente no recetor para cobrir todas as perdas na distribuição da fibra ótica.

Existem dois conceitos importantes relativos ao *power budget*: *Link Power Budget* e o *Link Loss Budget*. O primeiro é a diferença entre a potência introduzida na fibra e a sensibilidade do recetor ligado ao cabo de fibra ótica. O *Link Loss Budget* é o valor total das perdas de qualquer componente da ligação. Em todos os casos, o *Link Loss Budget* deve ser sempre inferior ao *Link Power Budget*. Como pode ser constatado na Figura 3.29, o total do *Link Power Budget* é a soma do *Link Loss Budget* e a margem de segurança para futuros requisitos e também considerando o envelhecimento do sistema de fibra ótica ou possíveis reparações [30].

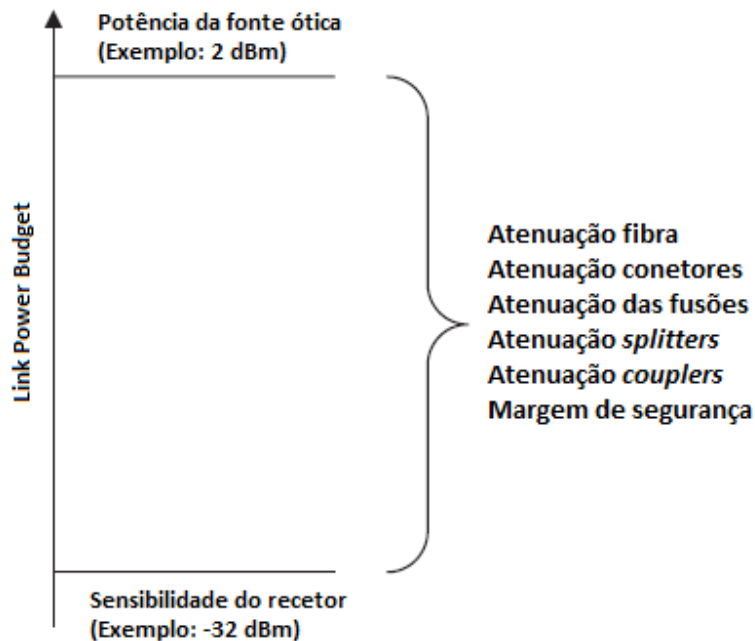


Figura 3.29 - *Link Power Budget vs Loss Power Budget* (adpt. de [4]).

3.5.1 Perdas convencionais dos componentes passivos

Pretende-se com esta secção apresentar os valores típicos de atenuação dos vários componentes passivos que podem ser utilizados numa PON.

Como foi possível constatar na secção 3.4, o tráfego de vídeo e de dados (ascendente e descendente) é transmitido em comprimentos de onda distintos numa rede PON. Para que isso seja possível, são utilizados componentes designados por *WDM couplers*. Este tipo de dispositivos permitem combinar e separar os vários comprimentos de onda (1310, 1490 e 1550) na entrada e na saída de uma fibra ótica. Existem dois locais possíveis de colocação destes dispositivos. Tipicamente numa PON são necessárias duas unidades, sendo uma instalada depois do OLT e outra antes do ONU.

Relativamente à fibra ótica de sílica, tipicamente é utilizada a monomodo G.652C ou G.652D nas PONs. A fusão de fibras é um procedimento que é necessário na implementação da rede de distribuição ótica, e que introduz uma pequena atenuação (tipicamente 0,1 dB) devido a impurezas ou desalinhamento entre as fibras. Além das atenuações referidas anteriormente,

segundo a recomendação da ITU-T G.957 especifica uma margem entre 3 a 4,8 dB para ter em conta a degradação dos equipamentos e de possíveis reparações [4].

A Tabela 3.3 resume os vários fatores que influenciam o *power budget* e o seu respetivo valor.

Tabela 3.3 - Valores típicos do Power Budget [28] [30].

Fatores do <i>Power Budget</i>	Valores típicos
Atenuação fibra G.652C (@1310 nm)	0,4 dB/km
Atenuação fibra G.652C (@1550 nm)	0,3 dB/km
Atenuação padrão por par de conetores	0,75 dB
Atenuação por fusão	0,1 dB
Atenuação WDM <i>coupler</i>	1,5 dB
Margem de segurança	Até 3 dB

Num *splitter* a potência ótica de entrada é dividida pelos vários caminhos de saída que o componente possui. Quanto mais caminhos de saída o *splitter* possuir, maior será a divisão de potência (N) e por isso mais atenuação será introduzida. Idealmente a atenuação de um *splitter* ótico é calculado segundo a equação 3.1.

$$\text{Splitter Loss} = 10 \times \log(N) \quad (3.1)$$

Na Tabela 3.4 tem-se a representação dos valores de atenuação para os vários fatores de derivação dos *splitters* óticos existentes [4].

Tabela 3.4 - Atenuações de *splitters* [28].

<i>Splitter</i>	Atenuação (dB)
1:2	3,4
1:4	6,8
1:8	10,2
1:16	13,6
1:32	17
1:64	20,4
1:128	23,8

3.5.2 Dimensionamento de uma rede PON

O primeiro passo para dimensionar uma rede PON consiste em decidir qual o comprimento de onda para transmitir e seleccionar os componentes para operar nessa região. Nas redes FTTx pode-se contar com 3 comprimentos de onda: 1310, 1490 e 1550 nm. O cálculo do *power budget* terá que ser efetuado para os três comprimentos de onda, dado que a atenuação da fibra varia com o mesmo [4].

Para o cálculo do *power budget* em primeiro lugar é importante saber as características dos componentes óticos que se encontram em cada uma das extremidades da fibra ótica (OLT e ONU). A quantidade de luz disponível no sistema é calculada através da equação 3.2. A variável P_T representa a potência do sinal que é emitido na fibra e P_R é a sensibilidade do recetor.

$$P_{Budget} = P_T - P_R \quad (3.2)$$

Através do *power budget* sabe-se qual é a atenuação máxima que pode existir na rede distribuição ótica, entre o emissor e o recetor. Existem várias classes que caracterizam a atenuação máxima permitida numa rede de distribuição ótica. A Tabela 3.5 serve como exemplo para ilustrar o par de emissores e recetores que se utilizam numa rede BPON/GPON, consoante a classe do *power budget*.

Tabela 3.5 - Power budget das várias classes para BPON e GPON [4].

	Emissor/Recetor OLT	Emissor/Recetor ONU	P _{Budget} (dB)
Classe A	DFB/APD	FP/PIN	20
Classe B	DFB/APD	FP/PIN	25
Classe B+	DFB/APD	DFB/APD	28
Classe C	DFB/APD	DFB/APD	30
Classe C+	DFB/APD	DFB/APD	33

Para que se possa cumprir com o *power budget* é necessário que os emissores e recetores sejam capazes de fornecer a potência necessária para que o sinal seja transmitido e chegue ao recetor com um nível de sinal aceitável para sua deteção. A Tabela 3.6 ilustra os valores típicos para cada classe dos emissores e recetores para o ONU e para o OLT. Contudo, é importante referir que a respetiva tabela apenas constitui uma pequena amostra das soluções existentes no mercado atual.

Tabela 3.6 - Valores típicos dos emissores e recetores do OLT e ONU [35].

	Potência TX (dBm)	Sensibilidade RX (dBm)	Classe
OLT (DFB+APD)	+1,5 ~ +5	< - 28	B+
ONU (DFB+APD)	+0,5 ~ +5	< - 28	B+
OLT (DFB+APD)	+3,5 ~ +7,5	< - 33	C+
ONU (DFB+APD)	+0,5 ~ +5	< - 28	C+

A Figura 3.30 ilustra um exemplo do dimensionamento de uma rede PON. O cálculo da atenuação total introduzida é efetuado através da equação 3.3.

$$\text{Link Loss Budget (dB)} = (\alpha_\lambda \times L) + (n \times C) + (c \times J) + (W) + M_s \quad (3.3)$$

A variável α_λ depende do comprimento de onda e representa a atenuação da fibra (dB/km) e L o comprimento de fibra (km). A variável C representa as perdas por par de conetores. Quanto à variável J representa as perdas por fusão de fibra, W as perdas por cada WDM coupler e por último M_s que representa a margem de segurança.

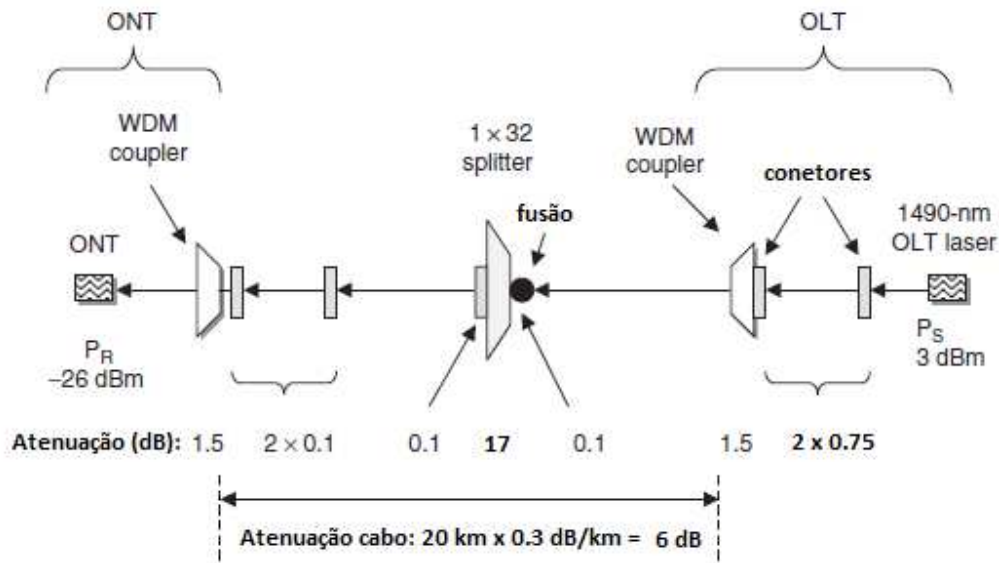


Figura 3.30 - Dimensionamento de uma PON (adapt. de [4]).

Desta forma, caso não se verifique a condição de *Link power budget* > *Link loss budget*, significa que o emissor e o recetor não irão funcionar corretamente, pois não terão potencia suficiente. No recetor é desejável receber um sinal com uma taxa de erros (BER) baixa, tipicamente de 10^{-11} neste tipo de sistemas [4].

Outro fator importante a considerar no cálculo do *Link loss budget* são os cortes de fibra que poderão ocorrer após a implementação da rede distribuição ótica. Embora os cabos de fibra possuam alguma proteção, são vulneráveis a inundações e escavações que podem danificar a fibra, sendo necessário novas fusões [30].

Tanto a EPON como a GPON possuem um dimensionamento e cálculo de *power budget* muito semelhante, uma vez que a infraestrutura física é muito semelhante.

3.6 Figuras de mérito

As figuras de mérito são ferramentas essenciais para se analisar o desempenho de um sistema de comunicação por fibra ótica. Dependendo do tipo de teste a efetuar, existem diferentes tipos de figuras de mérito. Para realizar um teste ao ritmo binário máximo suportado pelo meio físico, utiliza-se uma codificação digital designada por NRZ, e posteriormente recorre-se à análise do BER ou do diagrama de olho, para analisar a qualidade do sinal recebido [6].

3.6.1 BER

Quando a informação transmitida é formada por uma sequência de bits, a codificação digital mais simples a utilizar é a NRZ. A Figura 3.31 ilustra o funcionamento deste tipo de codificação. O bit “1” é representado com a presença de luz emitida pela fonte ótica e o bit “0” pela ausência da mesma.



Figura 3.31 - Codificação NRZ [6].

Um dos critérios mais utilizados para analisar o desempenho de sistemas digitais é o BER. Como se pode constatar pela equação 3.4, este é dado pela razão entre o número de bits errados obtidos na receção e o número de bits transmitidos originalmente.

$$BER = \frac{N^{\circ} \text{ de bits errados recebidos}}{N^{\circ} \text{ de bits transmitidos}} \quad (3.4)$$

A existência de erros em sistemas de comunicação são acontecimentos normais. Existem vários fatores que podem influenciar o BER, tais como o ritmo binário da ligação, potência de emissão, distância de transmissão e quantidade de ruído. Normalmente é expresso por números com notação exponencial negativa com base 10, como por exemplo 10^{-6} , o que neste caso significa que se detetou um bit errado em um milhão de bits transmitidos.

Um BER na ordem dos 10^{-15} seria o desejado para uma transmissão de dados ideal. No entanto, um $BER = 10^{-10}$ consiste num valor bastante aceitável que é normalmente o limite máximo para uma transmissão de dados fiável [6]. Contudo, cada tecnologia de transmissão

de dados possui um valor limite de BER que normalmente vem especificado na sua norma [36].

3.6.2 Diagrama de olho

O diagrama de olho é outra figura de mérito que pode ser utilizada para avaliar a receção de sequências binárias NRZ. Esta técnica de medida é feita no domínio do tempo e consiste em várias (de centenas a milhões) instâncias do sinal recebido sobrepostas, permitindo comparar os seus períodos de bit. Este tipo de medida permite também uma visualização da distorção do sinal transmitido. A Figura 3.32 exemplifica a representação de um diagrama de olho [6].

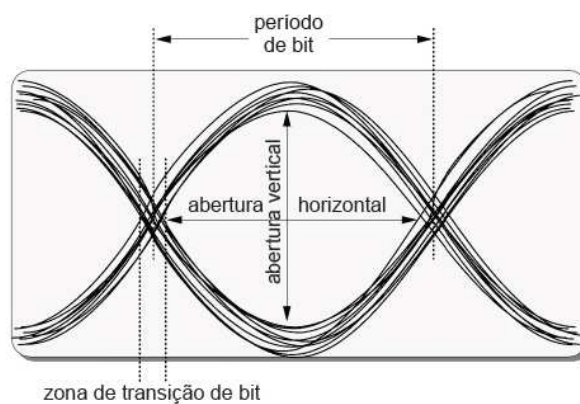


Figura 3.32 - Diagrama de olho [6].

Através da análise desta técnica de medida, pode-se obter informações acerca da distorção de amplitude e do *jitter* (variação do atraso). A sua análise tem os seguintes fundamentos [6]:

- A abertura vertical indica a diferença de amplitude entre os bits a “1” e a “0” do sinal. Quanto maior for esta abertura mais fácil será diferenciar os bits.
- A abertura horizontal permite quantificar o *jitter* presente no sinal. Quanto maior for esta abertura menor será o *jitter*.
- A zona de transição de bit também indica a medida de *jitter* no sinal. Quanto mais estreita esta for menor será o *jitter*.
- A melhor indicação da qualidade do sinal é a abertura do olho em si. Quanto maior esta for mais fácil será a deteção dos bits e menor será o BER. Se o olho estiver praticamente fechado, será muito difícil ou mesmo impossível interpretar os dados corretamente.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO DE UMA REDE DE ACESSO COM POF

Neste capítulo será abordado todo o procedimento para dimensionar e gerar uma simulação de uma rede de acesso com POF e GOF no programa de simulação *VPIphotonicsTM* [37].

Em primeiro lugar será efetuada uma introdução ao modo de funcionamento do programa de simulação referindo algumas limitações encontradas.

Seguidamente são propostos dois cenários para teste e comparação do desempenho da POF com a GOF na rede de acesso. O primeiro cenário consiste numa rede de acesso baseada na tecnologia GPON, onde são consideradas diferentes tipos de fibras para interligação ao cliente final, que são uma fibra ótica monomodo G.657 *ClearCurve* da *Corning*, uma fibra ótica de plástico designada por *Fontex* da *Asahi Glass* e uma fibra multimodo *ClearCurve* da *Corning*. No segundo cenário apenas se considera a utilização de POF no último segmento da rede para interligação ao cliente, e analisa-se o desempenho da mesma quando na mesma rede de distribuição ótica coexistem as tecnologias GPON e 10G-PON.

Para os cenários propostos efetua-se o dimensionamento do *power budget*, que permite determinar a atenuação da rede distribuição ótica.

Para análise de resultados recorrem-se às figuras de mérito, comparando o desempenho do sistema com os diferentes tipos de fibra e verifica-se a distância máxima suportada pela POF na rede de acesso em ambos os cenários.

4.1 Introdução ao *software* VPI

O programa de simulação *VPIphotonics*TM foi desenvolvido pela *VPIsystems*[®] e é uma ferramenta que permite a implementação e simulação de uma vasta gama de circuitos, incluindo os de fibra ótica.

O VPI é constituído por duas aplicações. A implementação da rede de acesso em fibra ótica e toda a parametrização necessária dos vários componentes é efetuada recorrendo à aplicação *VPItransmissionMaker*TM 8.5. A aplicação disponibiliza vários sistemas de transmissão para demonstração, o que permite uma melhor familiarização com a ferramenta.

Para simulação e geração de gráficos é utilizado o *VPItransmissionAnalyzer*TM 8.5 e este é executado sempre que no projeto exista algum módulo para análise de sinais. À semelhança da grande maioria dos programas de simulação aplicados à área de engenharia, o VPI possui um manual de utilizador onde pode ser encontrada informação mais detalhada acerca do seu funcionamento [37].

4.1.1 Interface gráfica

A interface gráfica do VPI é simples de utilizar e intuitiva. Na Figura 4.1 pode-se constatar que o ambiente gráfico do *VPItransmissionMaker*TM pode ser dividido basicamente em três áreas distintas. Na área que está assinalada com o retângulo a vermelho encontra-se todos os módulos que o programa possui para a simulação de um circuito. Os módulos e componentes encontram-se organizados por categorias, mas existe a funcionalidade de permitir executar uma pesquisa rápida de um determinado módulo. Nesta mesma área, encontram-se também vários cenários de demonstração que são úteis para a construção de sistemas personalizados. Por sua vez, o retângulo a laranja representa a área onde é permitido a construção e elaboração de uma vasta gama de circuitos. Por último, no retângulo assinalado com a cor amarela, tem-se a barra típica de ferramentas de um programa de simulação. Nesta área

encontram-se os atalhos para executar/parar uma simulação, abrir um novo ficheiro para um novo cenário, salvar ficheiros, etc. [6].

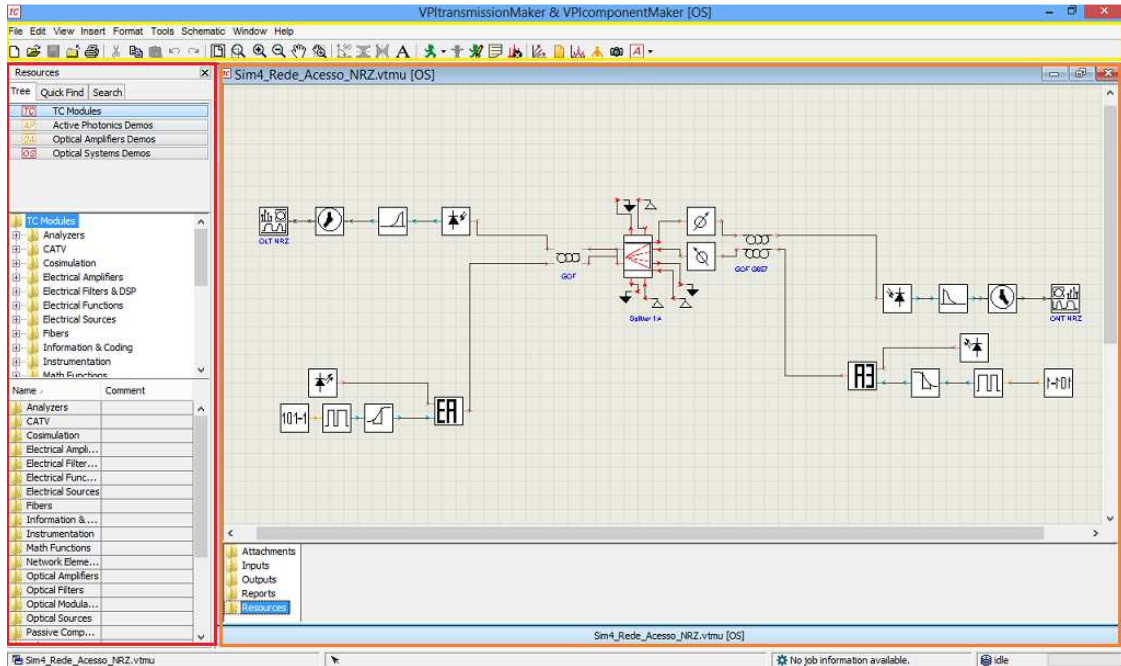


Figura 4.1 - Interface gráfica do VPItransmissionMaker.

Como já foi referido anteriormente, para analisar os sinais é utilizado *VPItransmissionAnalyzerTM*. Na Figura 4.2 pode-se verificar que a área que está assinalada com a cor laranja é a secção onde se visualizam os resultados obtidos. Existem vários modos de visualização, entre os quais se podem destacar: o analisador de espectro ótico (OSA), o osciloscópio (*Scope*) e o analisador do diagrama de olho (*Eye*) [6]. A comutação entre os vários modos pode ser efetuada através dos atalhos que se encontram na caixa assinalada com a cor verde. Do lado direito assinalado com a cor vermelha, existe um menu que permite a personalização de gráficos, personalização de parâmetros da análise do diagrama de olho, ativação da análise BER e análise no domínio do tempo e em amplitude do respetivo sinal.

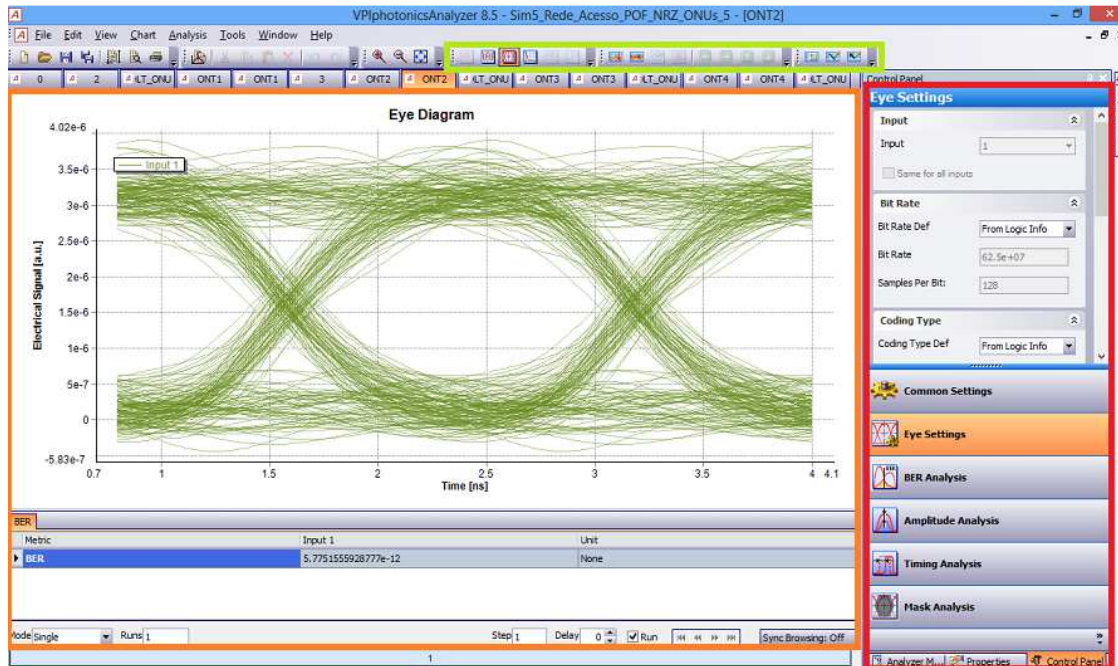


Figura 4.2 - Interface gráfica do VPItransmissionAnalyser.

4.1.2 Hierarquia dos módulos

O VPI possui uma hierarquia de módulos organizada, facilitando assim a manipulação e a implementação de um determinado esquemático [6].

Como se pode constatar na Figura 4.3, existem três níveis hierárquicos: universo, galáxia e estrela. Tal como o seu nome sugere, o nível universo é o mais alto da simulação, o que significa que pode ser representado por uma rede de estrelas e de galáxias interligadas.

Uma galáxia representa o segundo nível mais elevado, e pode ser formada por um conjunto de estrelas ou até mesmo galáxias interligadas. Para construir uma galáxia é necessário que exista pelo menos um porto de *input* e outro porto de *output*, tal como exemplifica a Figura 4.3. Do ponto de vista do universo, uma galáxia atua como um módulo único e os módulos nela contidos apenas podem ser vistos recorrendo à opção *Look inside* [6].

Por sua vez o nível designado por estrela é o nível mais baixo de uma simulação, pois não pode representar outros esquemáticos. Tipicamente representam componentes base simples, como por exemplo uma fibra ótica [37].

Tendo em conta a hierarquia descrita, os ficheiros podem ter as seguintes extensões: “.vtms”, “.vtmg” ou “.vtmu”, correspondendo a uma estrela, galáxia ou universo, respetivamente [6].

Neste projeto esta estrutura hierárquica revelou-se ser uma mais-valia para o desenvolvimento e simulação de uma rede de acesso, dado que se criou algumas galáxias com o intuito de simplificar e estruturar a implementação dos módulos necessários no programa.

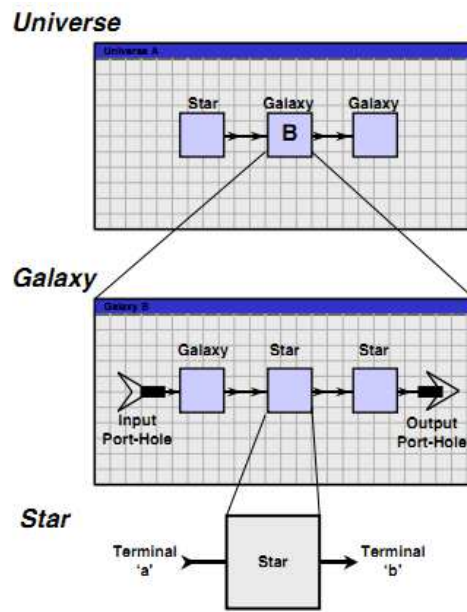


Figura 4.3 - Hierarquia de módulos do VPI [37].

4.2 Cenários propostos

Pretende-se com este capítulo apresentar dois cenários para simulação de uma rede de acesso com fibra ótica de plástico no VPI. Para ambos os cenários foi necessário ter em conta o equipamento passivo necessário para o cálculo do *power budget*.

É importante referir que os cenários propostos são meramente exemplificativos, uma vez que numa situação real estes podem ser variáveis consoante as condições físicas e a localização específica dos utilizadores.

4.2.1 Primeiro cenário – Implementação de uma GPON com POF

O primeiro cenário consiste numa rede de acesso baseada na tecnologia GPON. Esta tecnologia permite débitos de 2,5 Gbps no sentido descendente e de 1,25 Gbps no sentido ascendente. Tal como se pode constatar pela Figura 4.4, pretende-se fornecer serviço FTTH (com serviço de VoIP, internet e IPTV) a três clientes que se encontram no mesmo edifício a uma distância de 8 km da central local. Neste caso optou-se pela utilização de uma fibra monomodo G.652C da *Corning*, dado que possui uma baixa atenuação e dispersão nula nos 1310 nm. A topologia adotada foi em árvore, visto que é a mais utilizada nas redes PON e a mais simples de implementar.

Uma vez que o objeto de estudo é averiguar os limites de operação da POF na última milha (vulgo “*last mile*”), consideraram-se três utilizadores sendo que cada um possui um tipo de fibra distinta. O primeiro utilizador irá receber a sua ligação através de uma fibra ótica multimodo *ClearCurve* da *Corning*, o segundo utilizador através de uma fibra ótica monomodo G.657 *ClearCurve* da *Corning* e o terceiro através de uma fibra de plástico designada por *Fontex* da *Asahi Glass*. Pressupõe-se que a instalação das fibras é efetuada entre o ponto de distribuição ótico (PDO) que encontra-se no edifício e ao ONT que é colocado dentro das casas dos utilizadores. O facto de se atribuir diferentes tipos de fibras aos três utilizadores permitirá comparar a qualidade do sinal em cada um dos utilizadores. Todas as características necessárias para a parametrização das fibras no programa de simulação foram obtidas através do próprio fabricante.

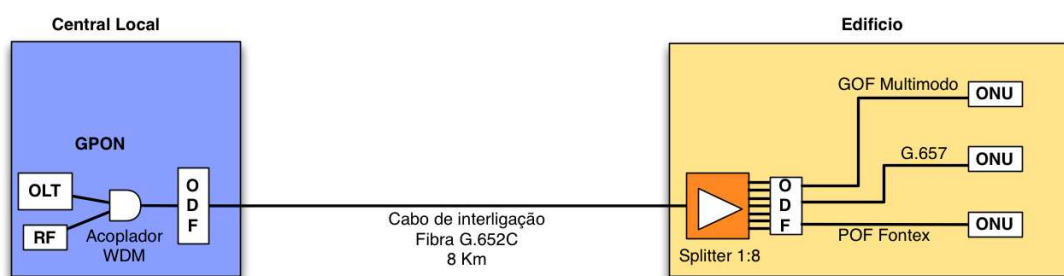


Figura 4.4 - Primeiro cenário prático - GPON.

O cenário da Figura 4.4 representa a rede ótica passiva a implementar no programa de simulação, embora depois na prática na casa do utilizador final o que existe é algo

semelhante ao que se encontra representado na Figura 4.5. Como se pode constatar, o sinal ótico é recebido pelo ONT através de uma POF (ou GOF), sendo depois convertido por este para elétrico e distribuído pelos vários equipamentos existentes na casa. Embora os equipamentos representados na figura sejam distintos, a informação que é enviada e recebida por estes é toda sobre IP (VoIP, IPTV e Dados).

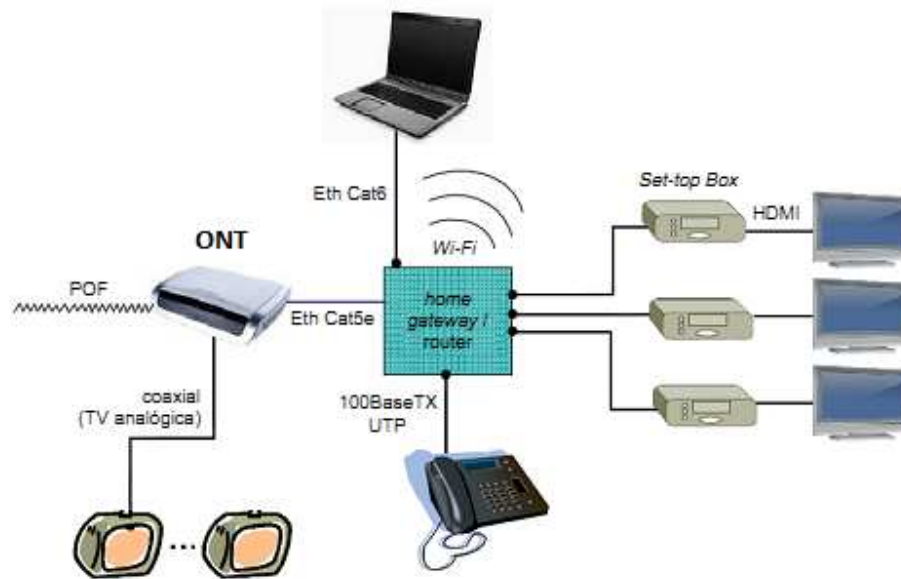


Figura 4.5 - Sistema dentro da casa do utilizador [6].

4.2.2 Segundo cenário – Coexistência 10G-PON e GPON com POF

O segundo cenário consiste na análise de desempenho da POF na última milha mas para débitos superiores aos que são praticados pela GPON. Para tal, considerou-se um cenário onde as tecnologias 10G-PON e GPON coexistem no mesmo ODN. Tal como se pode constatar na Figura 4.6, existe um par de OLT/ONT para cada tipo de tecnologia (GPON e 10G-PON).

Contudo, para que seja possível implementar este cenário é preciso ter em conta alguns aspetos essenciais. É importante lembrar que a GPON opera nos 1490 nm no sentido descendente com um débito de 2,5 Gbps e nos 1310 nm no sentido ascendente com um débito de 1,25 Gbps. Já a 10G-PON opera nos 1575 nm no sentido descendente e nos 1310 nm no sentido ascendente com débitos de 10 Gbps simétricos. Para que as duas tecnologias

possam operar em simultâneo no mesmo ODN, é necessário a utilização de um acoplador WDM de modo a multiplexar os dois comprimentos de onda no sentido descendente (1490 nm e 1575 nm). No sentido ascendente, uma vez que ambas utilizam o mesmo comprimento de onda (1310 nm), recorre-se à técnica de multiplexação no tempo TDMA.

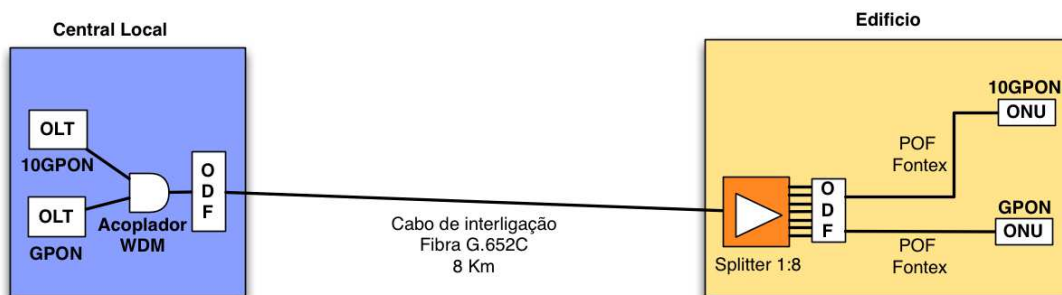


Figura 4.6 - Segundo cenário prático - Coexistência 10G-PON e GPON

O objetivo da implementação deste cenário prende-se em averiguar o desempenho da POF para débitos binários superiores, neste caso de 10 Gbps. Uma vez que a tecnologia 10G-PON suporta esses débitos, será uma forma de testar os valores anunciados e estudar a sua viabilidade com a tecnologia 10G-PON.

Relativamente ao cálculo do *power budget*, terá que ser calculado para os 1575 nm, visto que a atenuação da POF é de 200 dB/km neste comprimento de onda. No entanto o cálculo para os 1310 nm é comum às duas tecnologias, uma vez que as atenuações dos componentes e fibras óticas são idênticas.

4.2.3 Cálculo teórico do *power budget*

O cálculo do *power budget* é o processo mais importante para o dimensionamento de uma rede PON. Como já foi referido na secção 3.5.2, o cálculo do *power budget* deve ser feito nos três comprimentos de onda de operação, que são os 1550 nm, os 1490 nm e os 1310 nm, caso a rede ótica passiva seja uma GPON. Caso se trate de uma rede 10G-PON, deverá ser efetuado o dimensionamento nos 1575 nm (sentido descendente), em vez dos 1490 nm que são utilizados na GPON.

Contudo, na prática será apenas efetuado o cálculo do *power budget* nos 1575 nm, 1490 nm e nos 1310 nm, visto que por limitação do simulador não se utilizará a transmissão do sinal de TV nos 1550 nm. Tanto no comprimento de onda descendente como o ascendente, a margem

de potência operacional deve ser positiva, para que o sistema opere com níveis de sinal dentro dos limites suportados pelas classes dos componentes óticos que estão a ser utilizados no mesmo.

Para elaboração do cálculo do *power budget* é de boa prática a elaboração de esquemas simples com os componentes que constituem a ODN. Esse procedimento foi efetuado, e elaborou-se o esquema da Figura 4.7 que ilustra o número de pares de conetores necessários e de fusões térmicas, assim como também o valor das perdas inerentes a cada componente. Em ambos os cenários foram considerados emissores e receptores óticos de classe B+, o que significa que com este tipo de emissores e receptores permitem uma atenuação de 28 dB na rede de distribuição ótica.

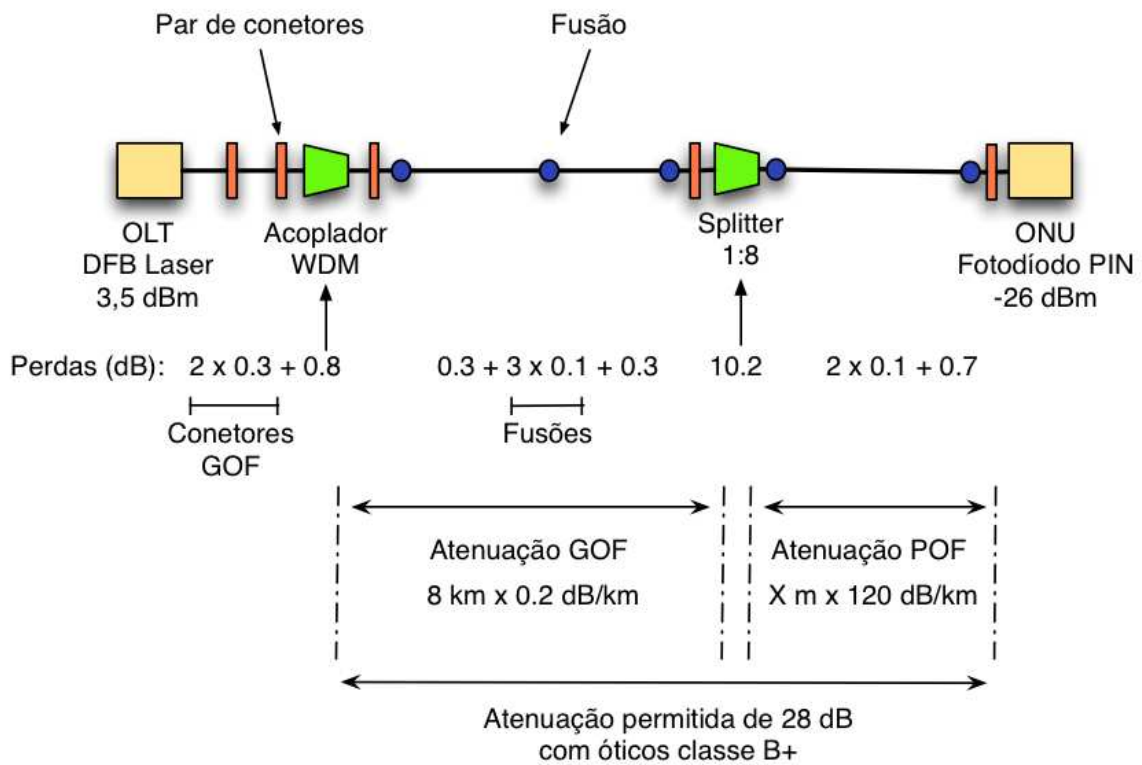


Figura 4.7 - Dimensionamento do balanço de potência.

Relativamente ao primeiro cenário, é importante referir que o cálculo do *power budget* foi efetuado para o pior caso, isto é, o caso em que é utilizada a POF na rede de acesso (fibra com maior atenuação). A Tabela 4.1 resume os componentes e as atenuações que foram consideradas para o cálculo do *power budget* para os dois cenários. Os valores foram obtidos

através de vários fabricantes, em que por exemplo no caso das fibras foram considerados a *Corning* e a *Asahi Glass*.

Tabela 4.1 - Atenuações dos componentes considerados para simulação [28] [30] [38].

Componentes da PON	Atenuação
Atenuação fibra SMF-28LL G.652C <i>Corning</i> (@1310 nm)	0,3 dB/km
Atenuação fibra SMF-28LL G.652C <i>Corning</i> (@1490 nm)	0,2 dB/km
Atenuação fibra SMF-28LL G.652C <i>Corning</i> (@1575 nm)	0,2 dB/km
Atenuação fibra <i>ClearCurve</i> G.657 <i>Corning</i> (@1310 nm)	0,35 dB/km
Atenuação fibra <i>ClearCurve</i> G.657 <i>Corning</i> (@1490 nm)	0,25 dB/km
Atenuação fibra <i>ClearCurve</i> G.651 <i>Corning</i> (@1310 nm)	0,6 dB/km
Atenuação fibra <i>ClearCurve</i> G.651 <i>Corning</i> (@1490 nm)	0,4 dB/km
Atenuação fibra <i>Fontex</i> AGC (@1310 nm)	18 dB/km
Atenuação fibra <i>Fontex</i> AGC (@1490 nm)	120 dB/km
Atenuação fibra <i>Fontex</i> AGC (@1575 nm)	200 dB/km
Atenuação padrão por par de conetores GOF	0,3 dB
Atenuação padrão por par de conetores POF	0,7 dB
Atenuação por fusão	0,1 dB
Atenuação acoplador WDM	0,8 dB
Distância máxima entre fusões	6 km

Tendo em conta os cenários propostos e os valores de atenuações dos componentes representados na tabela anterior, reúnem-se todas as condições necessárias para o cálculo do *power budget*. Para o efeito, recorreu-se ao programa *Excel* da *Microsoft* onde se começou por efetuar o cálculo do *power budget* para o sentido descendente da GPON (1490 nm). Tal como se pode constatar na Figura 4.8, em primeiro lugar considerou-se uma potência mínima de transmissão do OLT de 3,5 dBm e uma sensibilidade mínima do ONT de -26 dBm. Estes valores foram escolhidos tendo em conta os intervalos de potência dos recetores óticos de classe B+,.. Através destes valores e tendo em conta a equação 3.2 da secção 3.5.2, é possível determinar a potência disponível no sistema, que neste caso é de 29,5 dB.

A distância máxima considerada entre fusões foi de 6 km [30], dado que foi esse valor de distância que foi considerado para as bobinas de fibra monomodo G.652C.

Seguidamente somam-se as atenuações dos equipamentos passivos que constituem a rede PON do cenário apresentado. É importante referir que a atenuação da POF foi o único valor que ficou por determinar aquando o processo de cálculo do *power budget*. Isto é, foram considerados todos os valores de atenuação e quantidades dos equipamentos passivos exceto a distância teórica da POF. O seu valor foi determinado tendo em conta a margem operacional do sistema, ou seja, o comprimento da POF foi ajustado até ao limite pela qual a margem operacional do sistema mantém-se positiva.

A margem operacional do sistema é calculada através da equação 4.1 e deve ser sempre um valor positivo. Caso seja um valor negativo, todo o dimensionamento deve ser revisto.

$$M_{operacional} = P_{disponível} - \alpha_T - M_S \quad (4.1)$$

A soma de todas as atenuações dos vários componentes (α_T) totalizou um valor de cerca 27 dB, o que significa que a atenuação total respeita o limite previsto pelos emissores e recetores ópticos de classe B+ que são os 28 dB.

Cálculo do Power Budget @ 1490 nm (Downstream GPON)						
		Potência mínima transmissão (OLT)		3,5	dBm	
		Sensibilidade mínima recetor (ONU)		-26	dBm	
		Potência disponível		29,5	dB	

Componentes	Atenuação		Quantidades			
Fibra G.652C @ 1490 nm	0,2	dB/Km	8	Km	1,6	dB
Fusões	0,1	dB	5	fusões	0,5	dB
Splitter 1:8	10,2	dB	1	splitters	10,2	dB
POF Fontex @ 1490 nm	120	dB/Km	0,1	Km	12	dB
Acoplador WDM	0,8	dB	1	acopladores	0,8	dB
Par de conetores (GOF)	0,3	dB	4	pares	1,2	dB
Par de conetores (POF)	0,7	dB	1	pares	0,7	dB

Atenuação total (α)	27	dB
Margem de segurança	2	dB
Margem operacional	0,5	dB

Figura 4.8 - Cálculo do *power budget* no sentido descendente (1490 nm) - GPON.

Relativamente ao cálculo do *power budget* no sentido ascendente (1310 nm), este é efetuado da mesma forma que foi efetuado no sentido descendente. A única diferença é que para este caso não é considerado o acoplador WDM, uma vez que no sentido ascendente a informação

é multiplexada no tempo. Por esse motivo, a potência mínima de emissão do ONT é tipicamente mais baixa. Neste caso, considerou-se uma potência de emissão de 1 dBm no ONT e uma sensibilidade mínima de -27 dBm no OLT.

Cálculo do Power Budget @ 1310 nm (Upstream GPON & 10G-PON)						
Potência mínima transmissão (ONU)		1			dBm	
Sensibilidade mínima recetor (OLT)		-27			dBm	
Potência disponível		28			dB	

Componentes	Atenuação		Quantidades			
Fibra G.652C @ 1310 nm	0,3	dB/Km	8	Km	2,4	dB
Fusões	0,1	dB	5	fusões	0,5	dB
Splitter 1:8	10,2	dB	1	splitters	10,2	dB
POF Fontex @ 1310 nm	18	dB/Km	0,1	Km	1,8	dB
Par de conetores (GOF)	0,3	dB	4	pares	1,2	dB
Par de conetores (POF)	0,7	dB	1	pares	0,7	dB

Atenuação total (α)	16,1	dB
Margem de segurança	2	dB
Margem operacional	9,9	dB

Figura 4.9 - Cálculo do *power budget* no sentido ascendente (1310 nm).

Como se pode constatar pela Figura 4.9, a margem do sistema é muito maior do que a que foi obtida no sentido descendente. Isto deve-se ao facto da atenuação da POF ser muito menor nos 1310 nm, resultando uma atenuação total do sistema mais baixa (cerca de 16 dB) quando comparada com a que foi obtida no sentido descendente. De qualquer das formas, o mais importante é que o valor de potência está em excesso, o que significa que o sinal chegará ao recetor em excelentes condições para a sua detecção.

Também foi necessário o cálculo do *power budget* nos 1575 nm, uma vez que é este comprimento de onda que a tecnologia 10G-PON utiliza para transmitir no sentido descendente. Como se pode constatar na Figura 4.10 a única diferença para o cálculo dos 1490 nm da GPON prende-se no valor de atenuação da POF, que neste caso foi considerado 200 dB/km.

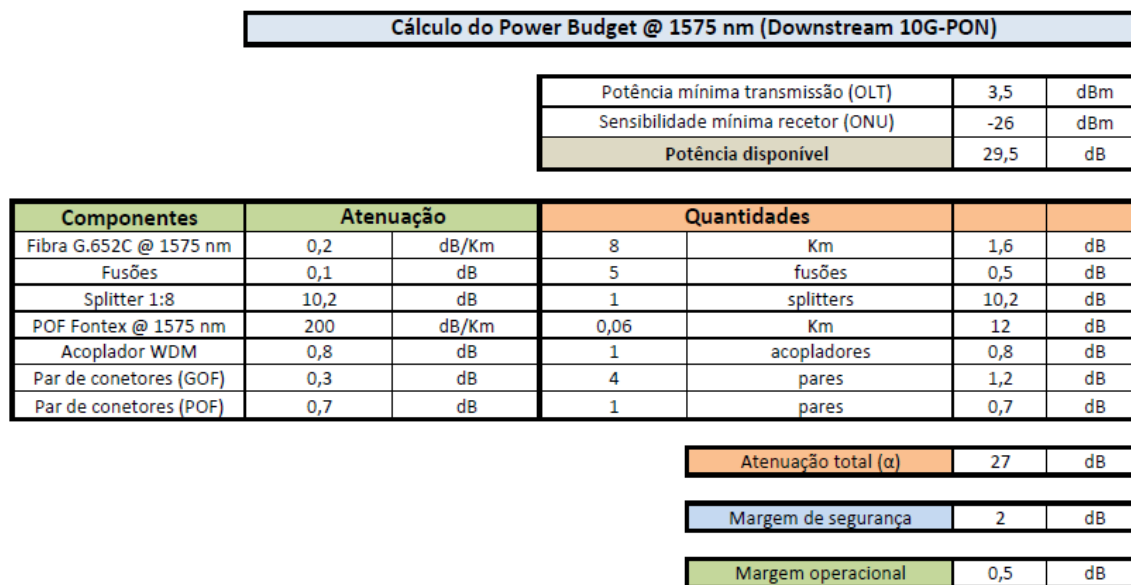


Figura 4.10 - Cálculo do power budget no sentido descendente (1575 nm) - 10GPON.

4.3 Componentes e parametrização no VPI

Neste capítulo pretende-se relatar algumas limitações encontradas no VPI. Abordam-se os módulos e componentes mais importantes para a implementação dos cenários propostos, assim como também a parametrização necessária para o correto funcionamento do sistema.

4.3.1 Limitações encontradas no VPI

Embora o VPI seja bastante útil para simulação de uma grande variedade de circuitos óticos, foram registadas algumas limitações.

A primeira limitação registada prende-se com a utilização de dois fluxos de tráfego com débitos distintos. O VPI não permite a injeção de dois fluxos de tráfego provenientes de fontes distintas com débitos diferentes numa mesma fibra ótica, exceto a situação em que os fluxos obtenham débitos que sejam múltiplos de 2 (ex: 100Mbps e 50 Mbps). Esta limitação implica que no primeiro cenário seja impossível a transmissão simultânea do sinal de vídeo analógico (RF), que é transmitido nos 1550 nm em modo *broadcast* e com um débito de cerca de 40 Mbps constantes, e dos sinais de dados para os vários utilizadores que é transmitido no comprimento de onda (1490 nm) que no limite pode agregar um débito de 2,5 Gbps. Após várias tentativas para contornar este problema, chegou-se à conclusão que o

programa de simulação possui apenas um único *TimeWindow* (parâmetro que permite definir um período de tempo que é representado um bloco de dados) e que é geral para todos os fluxos de tráfego. Por esse motivo, optou-se por lidar apenas com os sinais com codificação NRZ que são transmitidos no sentido descendente (1490 nm) e ascendente (1310 nm).

A segunda limitação está associada ao facto de o VPI não possuir módulos próprios para a implementação de PONs. Por outras palavras, não existe módulos específicos como por exemplo o OLT e o ONT, sendo necessário elaborar o sistema com todos os componentes necessários para construir cada um dos equipamentos ativos. Contudo, esta limitação não impede a implementação dos cenários propostos e recorreu-se à utilização das galáxias para representar cada um dos componentes ativos.

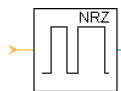
4.3.2 Módulos e componentes do VPI

Dada a apresentação dos cenários e do cálculo teórico do *power budget*, é importante efetuar uma abordagem aos módulos e componentes do VPI que possuem maior relevância para a implementação dos cenários.

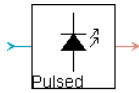
Os módulos que serão abordados de seguida possuem um estatuto de estrela no programa de simulação, o que significa que são os componentes mais simples que podem existir na hierarquia do VPI [6].



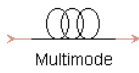
→ **PRBS**: Este módulo serve para gerar os bits “0” e “1” de forma aleatória, representando a informação que se quer transmitir até ao destino. Neste caso em particular cada módulo PRBS (*Pseudo-Random binary sequence*) representa um fluxo de tráfego para um determinado utilizador.



→ **Codificador NRZ**: Tal como o seu nome indica, este módulo converte o sinal digital para um sinal elétrico, segundo uma codificação NRZ (*Non-return-to-zero*).



Fonte ótica: Este módulo representa um emissor ótico, possuindo a função de converter o sinal elétrico recebido para ótico. Por definição do módulo, trata-se de um *laser* do tipo DFB.



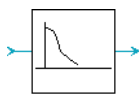
Fibra ótica: Este módulo representa uma fibra ótica que faz a ligação entre o emissor e o recetor ótico. O bloco *MultiModeFiber.vtms* será utilizado para representar POFs e fibras multimodo de sílica, enquanto que para da fibra monomodo será utilizado o bloco *UniversalFiberFwd.vtmg*. É importante referir que este módulo é unidirecional, isto é, o sinal ótico apenas pode circular num sentido.



Fotodetector: Este módulo representa um recetor ótico, possuindo a função de converter o sinal ótico recebido para elétrico. Este recetor pode ser do tipo PIN ou APD.



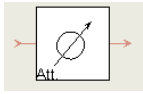
RiseTimeAdjust: Este módulo representa um filtro gaussiano que transforma um impulso retangular elétrico num impulso com contornos mais suaves para que o sinal se adapte melhor ao canal. Na prática, consiste na multiplicação do sinal digital por uma senoide [6].



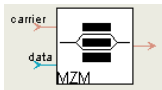
FilterEl: Este módulo representa um filtro elétrico universal, com várias funções de filtragem. O filtro pode ser do tipo passa-baixo, passa-alto ou passa-banda. A nível de funções de transferência, podem ser do tipo: *Bessel*, *Gaussiana*, *Butterworth*, *Chebyshev* e elíptica. Na prática vai ser utilizado o filtro passa-baixo do tipo *Bessel*, para que deixe passar apenas os sinais abaixo da frequência de corte.



ClockRecoveryIdeal: Este módulo tem a funcionalidade de recuperar o *timing* do sinal original. Essa sincronização é efetuada tendo em conta o sinal original transmitido e o sinal que foi recebido no recetor.



Atenuador: Tal como o seu nome indica, permite atenuar o sinal ótico que passa pelo mesmo. O valor da atenuação pode ser definido. Este módulo é muito útil para simular as perdas dos conetores e das fusões que são considerados no cálculo do *power budget*.



Modulador externo: Este módulo representa um modulador externo, mais concretamente o *Mach-zehnder*. Será útil para a implementação da rede de acesso, pois será efetuada uma modulação externa ao sinal que é emitido pelo *laser* DFB. Neste modulador externo é possível definir a razão de extinção (*extinction ratio*). A razão de extinção é dada em dB sendo utilizada para descrever a relação entre a potência utilizada quando transmite o nível lógico “1” com a potência utilizada quando transmite o nível lógico “0”. Para o caso da GPON, o seu valor deverá ser superior a 10 dB [30].

4.3.3 Parâmetros individuais e globais

Os resultados que são gerados por uma simulação no VPI são influenciados por um conjunto de parâmetros que são definidos em cada estrela, galáxia ou no universo. Esses parâmetros podem ser individuais ou globais.

Tal como o seu nome indica, os parâmetros individuais apenas dizem respeito ao próprio componente, isto é, qualquer alteração que se faça neste tipo de parâmetros só produzirá efeito no respetivo módulo. A Figura 4.11 serve como exemplo de uma janela de edição de um módulo de uma fibra multimodo. Como se pode constatar, existem uma série de parâmetros que podem ser modificados. Neste caso em particular, os parâmetros mais relevantes para a simulação de uma fibra são: o comprimento da fibra (*Length*), a atenuação (*Attenuation*), o perfil do índice de refração (*TransversalIndexProfile-Description*), o índice de refração do núcleo (*CoreRefractiveIndex*), o contraste (*IndexContrast*) e o diâmetro do núcleo (*CoreDiameter*) [6].

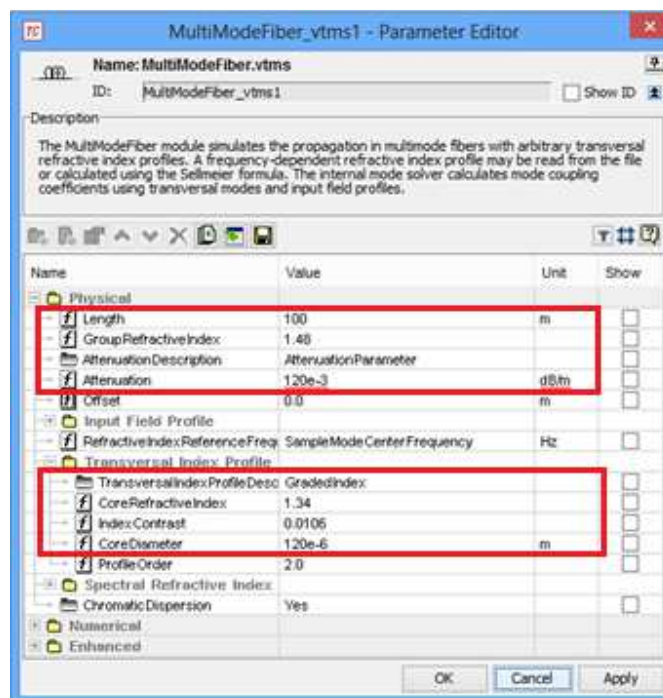


Figura 4.11 - Janela de edição do módulo de uma fibra multimodo.

Quanto aos parâmetros globais permitem simplificar a parametrização de sistemas complexos com um número considerável de componentes. A visualização dos mesmos pode ser efetuada utilizando o duplo clique na área de trabalho onde o esquema se encontra implementado. Após esse procedimento, abre-se uma janela semelhante à que se encontra representada na Figura 4.12.

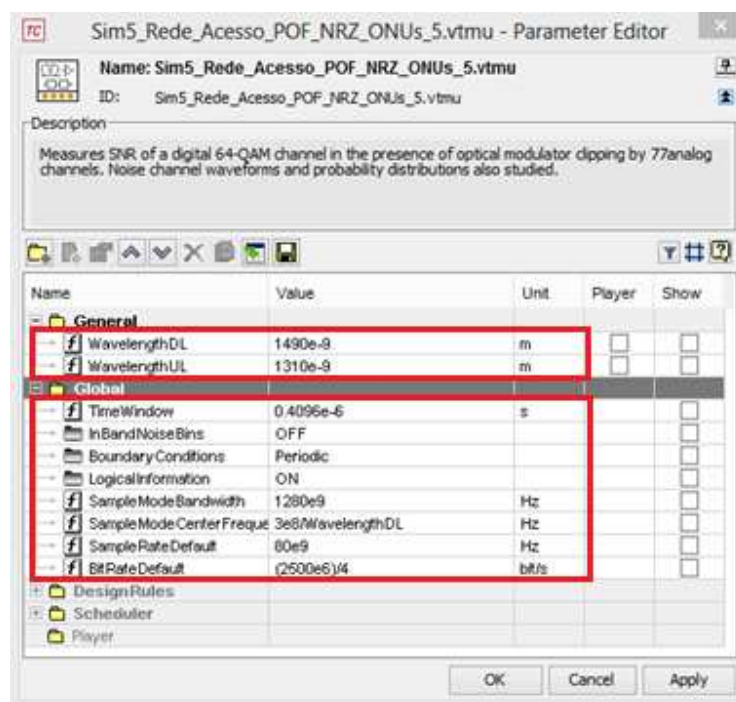


Figura 4.12 - Janela de edição dos parâmetros globais.

A grande vantagem da utilização dos parâmetros globais prende-se com o facto de permitir configurar um determinado parâmetro que é comum a vários componentes, como por exemplo fibras óticas ou emissores e recetores óticos que possuem o mesmo comprimento de onda. Desta forma, sempre que se queira alterar esse parâmetro, basta alterá-lo na janela de edição de parâmetros globais e essa modificação produzirá efeito em todos os módulos que possuem esse parâmetro global definido. Neste projeto, existem alguns parâmetros globais que aparece por defeito no VPI, sendo os mais importantes os seguintes:

TimeWindow - define o período de tempo em que cada bloco de dados é representado [6]. Este parâmetro deverá ser corretamente definido de acordo com o tipo de codificação e débitos utilizados no sistema. Neste projeto foram adotados os valores sugeridos no manual do utilizador.

SampleModeBandwidth – define a largura de banda de amostragem de todos os sinais da simulação [6]. Para efeitos de simulação o seu valor foi deixado por defeito.

SampleModeCenterFrequency – define a frequência central de operação da simulação [6]. Na prática o valor de frequência utilizado foi o do comprimento de onda ascendente, embora poder-se-ia também ter utilizado o descendente.

SampleRateDefault – define o valor por defeito da frequência de amostragem. À semelhança do *TimeWindow*, na prática o valor utilizado foi de acordo com o sugerido pelo manual do utilizador, tendo em conta a codificação e o débito utilizado.

BitRateDefault – tal como o seu nome indica, define o valor por defeito do débito binário de operação. Os módulos que possuem o parâmetro do débito binário podem operar com o valor por defeito da simulação ou com um valor definido manualmente pelo utilizador. Na prática e devido às limitações previamente abordadas do simulador, deve-se ter em atenção aos casos em que os valores são definidos manualmente para que respeitem a condição de o valor ser múltiplo/divisível por 2 do valor por defeito.

Para além dos parâmetros globais que já existem por defeito no VPI foi necessário adicionar dois parâmetros. São eles o comprimento de onda descendente (*WavelengthDL*) e o do comprimento de onda ascendente (*WavelengthUL*). Estes dois parâmetros serão úteis em todos os componentes onde será necessário representar o comprimento de onda de operação.

4.3.4 Parametrização do sistema

A parametrização dos módulos que serão implementados no VPI deve estar de acordo com a norma da tecnologia (que neste caso em particular é a GPON) e com os cenários apresentados.

A Tabela 4.2 ilustra os parâmetros mais importantes definidos para o OLT tanto a nível de emissão como de receção. Tal como se pode constatar, o transmissor do OLT é do tipo DFB com uma potência mínima de transmissão de 1,5 dBm e com uma potência máxima de 5 dBm. No entanto, segundo o cálculo de *power budget* efetuado, será parametrizada no VPI uma potência de transmissão de 3,5 dBm.

Tabela 4.2 - Parâmetros definidos para o OLT.

Transmissor OLT		Recetor OLT	
Débito binário máx.	2,5 Gbps	Débito binário máx.	1,25 Gbps
Comprimento de onda	1490 nm	Comprimento de onda	1310 nm
Código de linha	NRZ	Código de linha	NRZ
Potência transmissão mín.	1,5 dBm	Sensibilidade mín.	-27 dBm
Potência transmissão máx.	5 dBm	Tipo de recetor	APD
Razão de extinção	15 dB	BER mínimo	10^{-10}
Tipo de emissor	DFB	Classe ótico	B+
Classe ótico	B+		

Relativamente às especificações para o ONT, elaborou-se a Tabela 4.3. A potência de emissão é relativamente mais baixa, sendo que no cálculo do *power budget* foi considerado 1 dBm para cada ONT. Apesar do fotodíodo APD ter um melhor desempenho, não foi utilizado como recetor no ONT dado que todos os sistemas com POF a nível comercial funcionam com fotodíodos do tipo PIN [6].

Tabela 4.3 - Parâmetros definidos para o ONT.

Transmissor ONT		Recetor ONT	
Débito binário máx.	1,25 Gbps	Débito binário máx.	2,5 Gbps
Comprimento de onda	1310 nm	Comprimento de onda	1490 nm
Código de linha	NRZ	Código de linha	NRZ
Potência transmissão mín.	0,5 dBm	Sensibilidade mín.	-26 dBm
Potência transmissão máx.	5 dBm	Tipo de recetor	PIN
Razão de extinção	15 dB	BER mínimo	10^{-10}
Tipo de emissor	DFB	Classe ótico	B+
Classe ótico	B+		

À semelhança dos equipamentos ativos que foram abordados anteriormente, as fibras óticas também necessitam de parametrização. No caso da POF cujo modelo utilizado designa-se por *Fontex*, para além da atenuação também é necessário ter em conta outros parâmetros relacionados com as características físicas da mesma. Todos os parâmetros necessários encontram-se apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros para a POF *Fontex* [39].

Parâmetros da POF	Fontex
Material do núcleo	CYTOP®
Densidade da fibra (kg/m ³)	2.03
Diâmetro do núcleo (µm)	120
Área efetiva do núcleo (µm ²)	209
Atenuação @ 1575 nm (dB/km)	200
Atenuação @ 1490 nm (dB/km)	120
Atenuação @ 1310 nm (dB/km)	18
Índice refrativo	1,34
Contraste	0,0106

No caso das GOFs, serão utilizadas três fibras de sílica distintas. A Tabela 4.5 reúne as características necessárias para configuração dos três tipos de fibras no VPI. A fibra G.651 representa a fibra multimodo e a G.652C e G657 são fibras monomodo, sendo a última indicada para FTTH devido ao seu melhor desempenho com os raios de curvatura. A fibra G.652C será utilizada para interligação entre o OLT e o *splitter*.

Tabela 4.5 - Parâmetros para as GOFs da *Corning* [38].

Parâmetros das GOFs	G.651	G.652C/D	G.657
Material do núcleo	Sílica	Sílica	Sílica
Diâmetro do núcleo (µm)	50	8,2	8,2
Coefficiente PMD (ps/√km)	-	0,04	0,06
Declive da dispersão [ps/(nm ² .km)]	0,101	0,092	0,092
Dispersão @ 1490nm [ps/(nm.km)]	-	16	16
Comprimento de onda com dispersão zero (nm)	1295 - 1315	1304 - 1324	1304 - 1324
Atenuação @ 1490 nm (dB/km)	0,4	0,21	0,24
Atenuação @ 1310 nm (dB/km)	0,6	0,32	0,35
Índice refrativo	1,48	1,46	1,46
Contraste	0,018	0,004	0,004

Para além da parametrização das fibras e dos equipamentos ativos, existem alguns parâmetros globais que são importantes ter em conta para uma correta implementação e simulação dos cenários propostos. É o caso do *SampleRate*, do *TimeWindow* e do *Samples per Block* que são parâmetros que definem a frequência de amostragem e o período de tempo que cada bloco de dados é representado. A Tabela 4.6 ilustra os valores que devem de ser utilizados para os parâmetros anteriormente referidos quando se trata de um sistema com codificação NRZ com débitos de 2,5 e 10 Gbps. Esta tabela foi obtida diretamente do manual de utilizador do programa de simulação. Na prática utilizou-se os valores que estão representados dentro do retângulo a vermelho.

Tabela 4.6 - Parâmetros sugeridos pelo VPI para modulação NRZ [37].

System	BitRate	SampleRate	TimeWindow	Samples per Block
2.5 Gbit/s single channel NRZ	2.5e9	8 *2.5e9	64/2.5e9	512
		16*2.5e9	512/2.5e9	8192
		32*2.5e9	1024/2.5e9	32768
10 Gbit/s single channel NRZ	10e9	8 *10e9	64/10e9	512
		16*10e9	512/10e9	8192
		32*10e9	1024/10e9	32768

4.4 Implementação e simulação dos cenários propostos

Depois da introdução aos módulos mais importantes do VPI e da apresentação dos cenários, reúnem-se as condições necessárias para passar à parte da implementação dos cenários propostos no VPI e das respetivas simulações.

Nesta secção da dissertação pretende-se descrever todo o procedimento para a implementação dos cenários no VPI, nomeadamente explicar como foi implementada a técnica TDMA no simulador e a construção de algumas galáxias para representação do OLT/ONT. Posteriormente analisam-se os resultados obtidos pelas simulações dos dois cenários. Comparam-se os resultados obtidos, através da análise do diagrama de olho e do BER e efetua-se uma comparação entre os valores teóricos do *power budget* com os valores práticos da simulação.

4.4.1 Primeira implementação

Apesar da elaboração e planeamento de cenários para simulação de uma rede GPON com POF no VPI com vários ONTs, a sua implementação foi efetuada de forma faseada no simulador. O esquema da primeira simulação encontra-se representado na Figura 4.13.

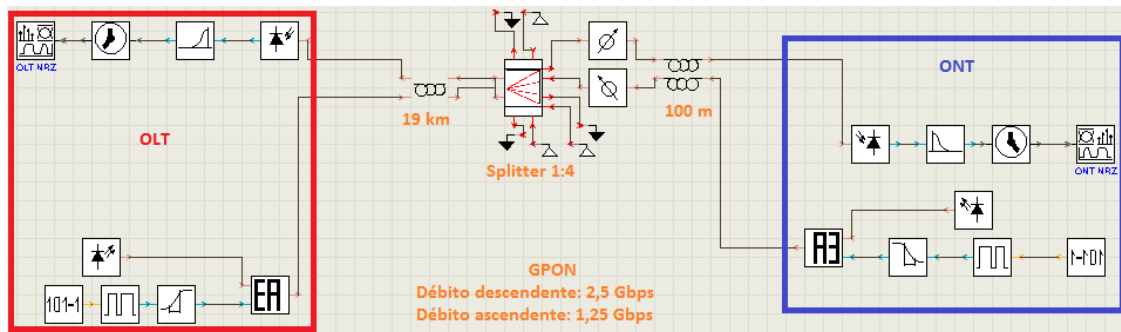


Figura 4.13 - Primeira simulação no VPI.

Como é possível constatar, trata-se de um esquema simples e um pouco diferente quando comparado com o esquema final que se pretende simular. Tanto o OLT como o ONT foram implementados componente a componente, uma vez que o VPI não possui módulos específicos que simulem estes componentes ativos. Existe um conjunto de módulos que é responsável pela receção do sinal ótico, e outro conjunto pela emissão do sinal ótico. A seleção dos módulos necessários para implementação dos dois equipamentos ativos foi efetuada tendo em conta a consulta de bibliografia [40] [41].

O *splitter* utilizado foi um de 1:4 dado que é o que possui maior fator de divisão no simulador. Numa primeira fase, optou-se por não utilizar a POF na última milha para interligação ao ONT de forma averiguar o correto funcionamento da rede GPON. As fibras utilizadas foram fibras de sílica monomodo e a parametrização utilizada foi a que já existia por defeito no respetivo módulo. Relativamente aos débitos, utilizaram-se os débitos padrão da tecnologia GPON, sendo 2,5 Gbps no sentido descendente (do OLT para o ONT) e 1,25 Gbps no sentido ascendente (do ONT para o OLT).

Quanto às potências de emissão, utilizou-se 2 dBm no emissor do OLT e 0,5 dBm no ONT. Estas potências revelaram-se ser suficientes para vencer a distância de 19 km de fibra ótica monomodo cuja atenuação considerada foi de 0,3 dB e um *splitter* de 1:4 com atenuação de 6,8 dB. Para este caso não se teve em consideração os cálculos teóricos do *power budget*,

uma vez que o objetivo deste esquema era começar por uma implementação simples e aos poucos adicionar os componentes necessários até se conseguir cumprir com o que foi planeado nos cenários.

Ao gerar uma simulação com este primeiro esquema implementado, os resultados foram satisfatórios e revelaram uma correta implementação do sistema. Os resultados encontram-se representados na Figura 4.14.

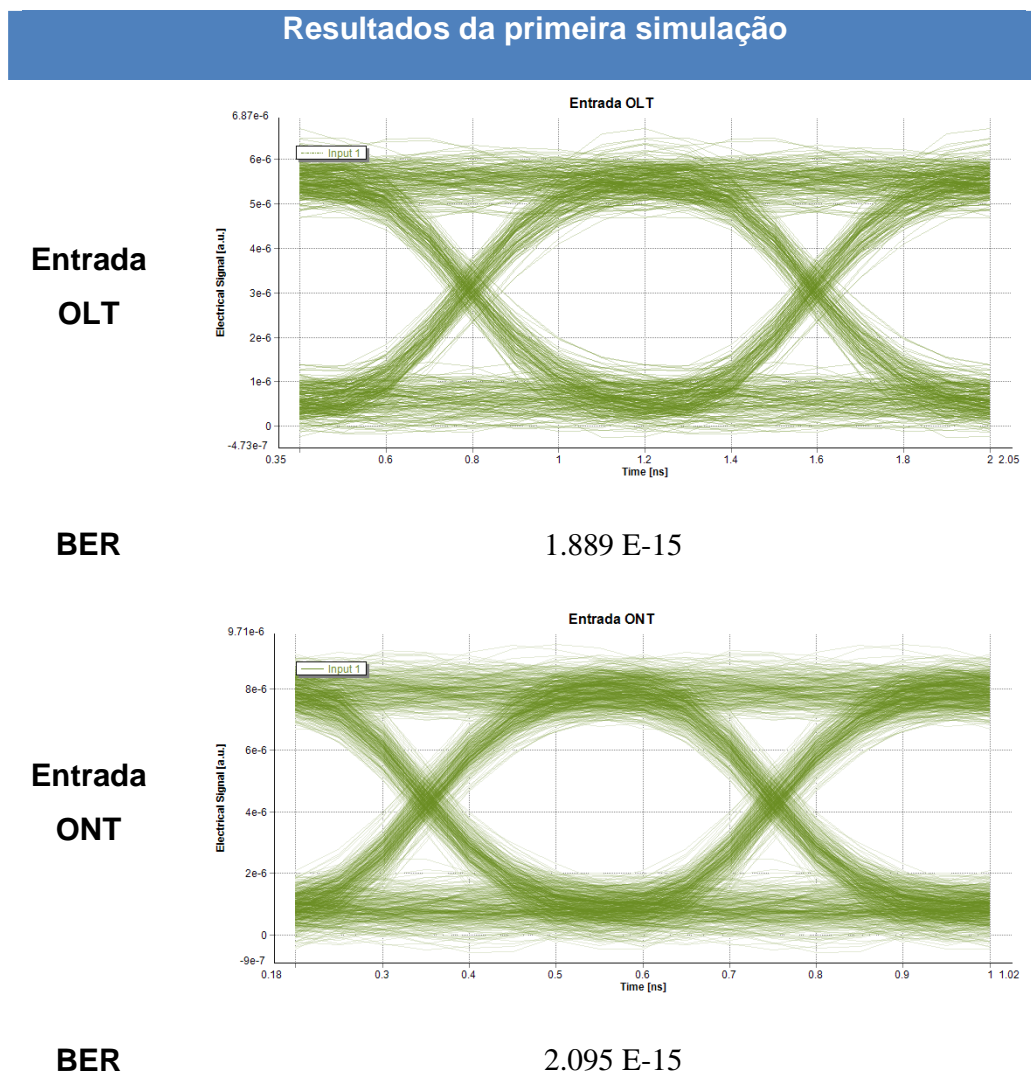


Figura 4.14 - Resultados da primeira implementação.

Verifica-se que o tanto no OLT como no ONT, o sinal chega em boas condições para deteção. Esse resultado é visível tanto pela análise do diagrama de olho como pelos valores obtidos no BER. Os valores de BER registados em ambos os casos respeitam o valor mínimo suportado pela tecnologia GPON (1×10^{-10}).

4.4.2 Construção de galáxias

Após a implementação do primeiro esquema que foi apresentado na secção anterior, foram detetadas várias necessidades para que se conseguisse a implementação dos esquemas dos cenários propostos. Uma dessas necessidades prende-se com a elaboração de galáxias de modo a simplificar os esquemas de simulação. Foram desenvolvidas galáxias para representação do OLT, do ONT e para o *splitter* com fator de divisão de 1:8.

A forma encontrada para criação de uma galáxia foi a seguinte:

1. Selecionar um módulo do esquema;
2. Selecionar a opção *Tools* da barra de menu, de seguida clicar em *Macros* e posteriormente selecionar a opção *Create custom module*;
3. Seguidamente surge uma janela onde se pode definir o nome da galáxia que se pretende construir;
4. Depois da atribuição do nome à galáxia, abre-se uma nova janela para construção de um novo esquema, ou caso o utilizador já possua um pode sempre copiar um conjunto de módulos para dentro da janela na nova galáxia criada. É importante existir pelo menos uma ligação de entrada (*input*) ou uma ligação de saída (*output*) para que a galáxia seja guardada com sucesso.

Depois de entender o procedimento para criação de galáxias, começou-se por criar a galáxia para representar um OLT. O esquema montado encontra-se representado no lado esquerdo da Figura 4.15. Do lado direito da imagem, tem-se a representação do mesmo quando este encontra-se implementado num universo.

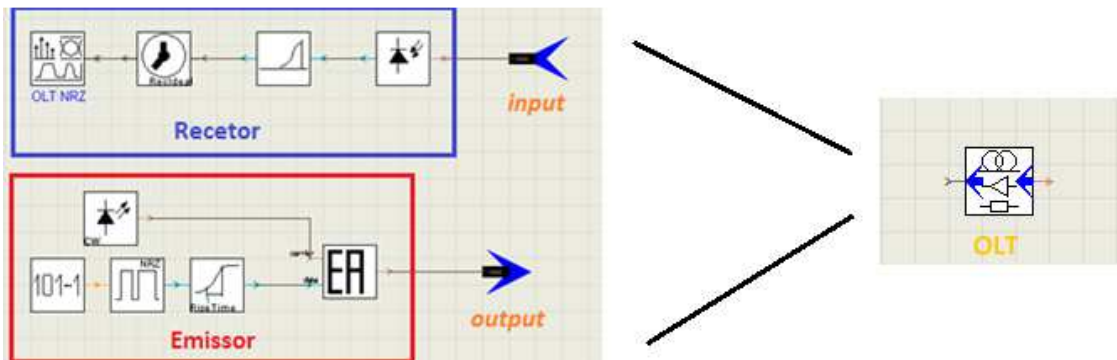


Figura 4.15 - Galáxia construída para o OLT.

Quanto à criação da galáxia para o ONT, o processo e o esquema é totalmente idêntico ao do OLT. Na implementação inicial a única diferença que existe entre os dois equipamentos ativos na simulação consiste na parametrização dos módulos que constituem os mesmos, mas à medida que se convergir para a solução final existirão diferenças entre as duas galáxias.

Relativamente à criação da galáxia para o *splitter* ótico com fator de divisão de 1:8 teve-se que utilizar um módulo de divisão de potência de 1 para N e outro de combinação de potência de N para 1. Como se pode verificar na Figura 4.16, utilizaram-se também dois atenuadores, um para cada direção do sinal ótico (sentido descendente com o comprimento de onda de 1490 nm e sentido ascendente nos 1310 nm). No entanto, o valor de atenuação é comum aos dois módulos, uma vez que o objetivo é introduzir a atenuação correspondente de um *splitter* de 1:8, cujo valor é cerca de 10,2 dB.

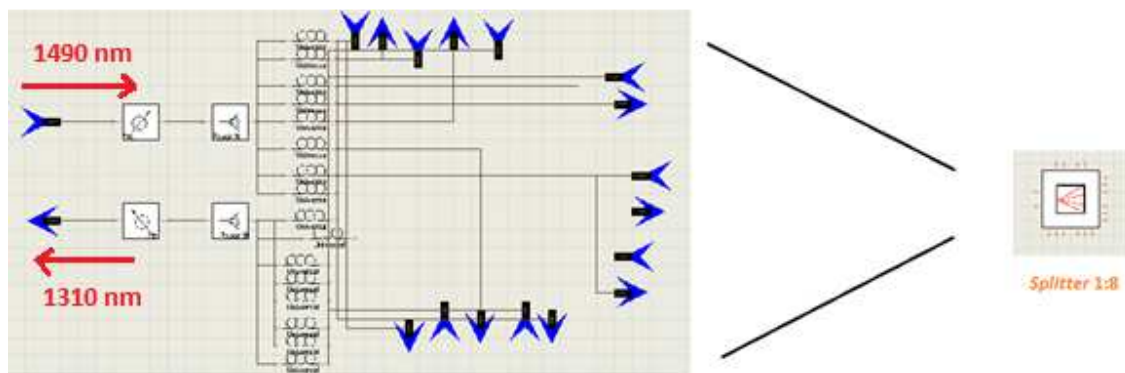


Figura 4.16 - Galáxia para o *splitter* 1:8.

É importante referir que esta era a única forma possível de construir um *splitter* numa galáxia, ou seja, num sentido existir uma combinação e noutra uma divisão de potência. Desta forma, a ligação a um ONT é efetuada com duas fibras no simulador, embora se saiba que na prática e no mundo real é apenas uma fibra. Isto está associado ao facto de no simulador não existir a possibilidade de parametrizar várias atenuações para vários comprimentos de onda no mesmo módulo da fibra ótica. Assim sendo, de forma contornar esse aspecto, teve-se que simular com duas fibras, sendo que uma possui a atenuação respetiva dos 1310 nm e outra a atenuação dos 1490 nm.

4.4.3 Implementação da técnica TDMA no VPI

O esquema da primeira implementação baseia-se numa comunicação simples entre um OLT e um ONT. Sendo uma comunicação entre apenas dois equipamentos ativos, não existe qualquer problema relativamente ao acesso ao meio, isto é, o ONT não necessita de partilhar o meio com outro ONT, tal como acontece na Figura 4.13.

Contudo, de forma cumprir com os requisitos dos cenários propostos, é desejável simular uma rede GPON com POF com vários ONTs. Para que isso aconteça é necessário implementar um mecanismo no simulador que controle a informação dos vários ONTs, dado que o VPI não consegue ter esse grau de abstração quando se implementa esquemas com vários fluxos de dados.

O mecanismo desenvolvido consiste na atribuição de códigos e canais lógicos aos fluxos de dados do OLT e dos vários ONTs. Para tal, foi necessário implementar módulos extra em ambas as galáxias dos equipamentos ativos com o objetivo de multiplexar no tempo os blocos de dados dos vários ONTs para serem transmitidos no mesmo comprimento de onda.

Para transmitir vários fluxos de dados do OLT para vários ONTs (ou vice-versa) é necessário utilizar um módulo designado por *commutator.vtms*. A sua função baseia-se em multiplexar no tempo os blocos de dados que este recebe à entrada proveniente de vários fluxos de dados. Contudo, apenas com a utilização deste módulo não se consegue fazer corresponder um determinado fluxo de dados a determinado ONT. Para que isso aconteça é necessário que cada ONT saiba detetar o fluxo de dados que lhe pertence. Como já foi referido anteriormente, o mecanismo desenvolvido consiste numa atribuição de códigos binários e de

canais lógicos aos fluxos de cada ONT. A Tabela 4.7 ilustra a correspondência utilizada na prática dos respetivos códigos e canais lógicos no recetor do OLT.

Tabela 4.7 - Códigos binários atribuídos para fluxos no sentido ascendente.

Fluxo de dados ONT → OLT	Código binário atribuído	Canal lógico atribuído
ONT 1	0 1 0 0	Ch4
ONT 2	1 0 0 0	Ch3
ONT 3	0 0 1 0	Ch6
ONT4	0 0 0 1	Ch8

Para definir estes códigos binários no simulador, foi necessário utilizar um módulo designado por *SwitchSignal.vtms* acompanhado por um *IntSource.vtmg*. Relativamente ao primeiro, a sua função é encaminhar para uma porta de saída o fluxo de dados selecionado (o fluxo que recebeu o bit “1”) e os restantes fluxos são negados (fluxos que receberam o bit “0”). Este módulo possui uma porta específica pela qual recebe os códigos binários que são definidos no *IntSource.vtmg*.

Para além da atribuição dos códigos binários, foi necessário também atribuir canais lógicos. Estes são definidos em dois módulos específicos. Na emissão define-se no *Coder_NRZ.vtms* e na receção é definido no *ClockRecoveryIdeal.vtms*. O canal lógico funciona como uma etiqueta que é gerada quando é efetuada a codificação NRZ. Cada fluxo possuirá então o seu canal lógico, e tendo em conta que o ONT tem sempre dois fluxos (ascendente e descendente) então este terá pelo menos dois canais lógicos associados.

Para melhor perceção da interligação destes módulos recorre-se à Figura 4.17 onde se pode constatar as modificações que foram efetuadas à galáxia inicial que tinha sido implementada para o OLT. Neste caso em particular o OLT está configurado para receber fluxos de dados de quatro ONTs, mas se fosse necessário um número superior bastava replicar os módulos de *SwitchSignal.vtms* e de *IntSource.vtmg* para um novo ONT com uma nova atribuição de código binário e de um canal lógico.

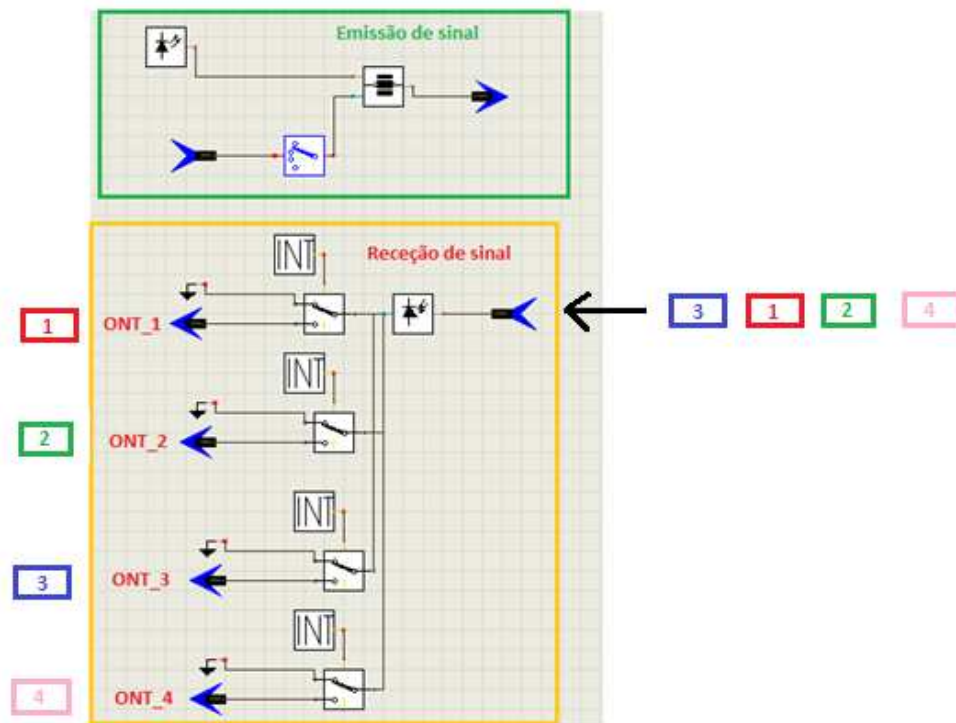


Figura 4.17 - Modificação da galáxia do OLT.

A Figura 4.18 ilustra janela de edição da galáxia do OLT. Os valores dos códigos binários estão de acordo com a Tabela 4.7. Aquando a implementação deste mecanismo, foi necessário existir alguma afinação, isto é, por tentativa e erro alternou-se os códigos binários até selecionar o correto fluxo de dados dos vários ONTs.

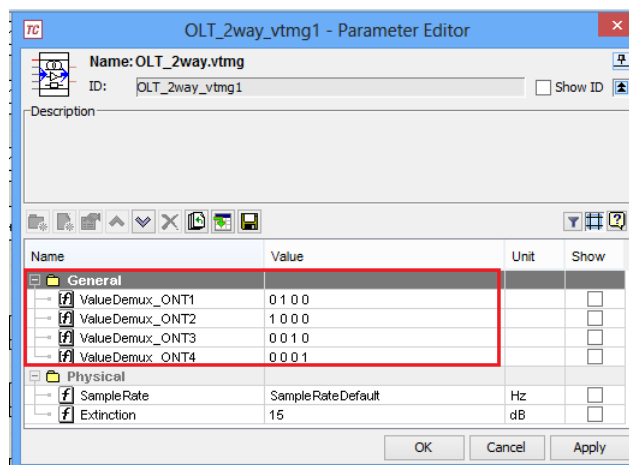


Figura 4.18 - Códigos binários atribuídos aos fluxos no OLT.

A implementação deste mecanismo também é necessária em cada ONT, isto é, aos fluxos de dados que circulam no sentido descendente (OLT para ONT). Na Tabela 4.8 encontram-se representados os códigos binários que foram atribuídos a cada ONT para o tráfego descendente. Os canais lógicos são diferentes por forma não criar conflito com os que já existem.

Tabela 4.8 - Códigos binários atribuídos para fluxos no sentido descendente.

Fluxo de dados OLT → ONT	Código binário atribuído	Canal lógico atribuído
ONT 1	1 0 0 0	Ch2
ONT 2	0 1 0 0	Ch1
ONT 3	0 0 1 0	Ch5
ONT4	0 0 0 1	Ch7

Relativamente à galáxia do ONT, também foram necessárias alterações para que se conseguisse completar o mecanismo desenvolvido. Na Figura 4.19 pode-se verificar que as modificações efetuadas são idênticas às que foram implementadas no OLT. Neste caso em particular, representou-se um exemplo do funcionamento do ONT 1 que será implementado na prática.

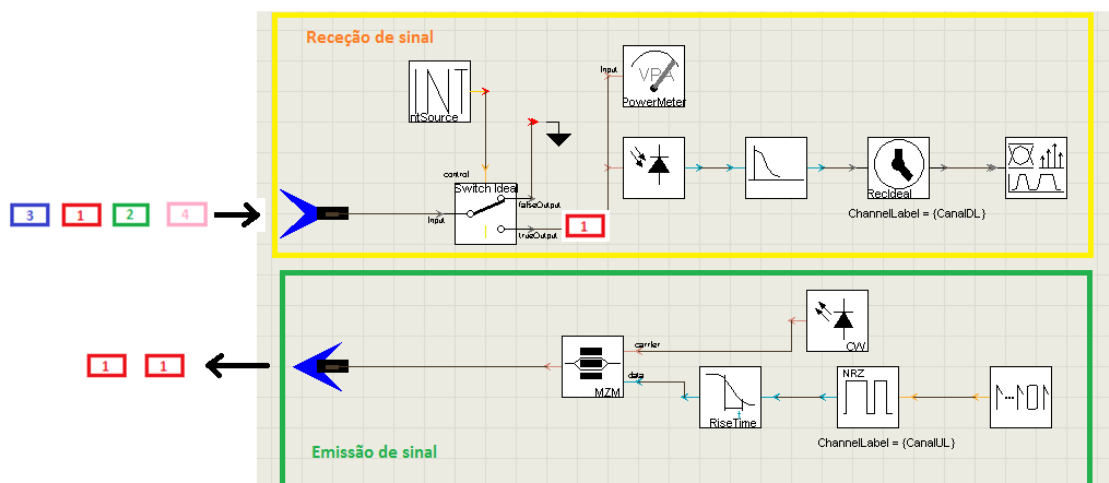


Figura 4.19 - Galáxia do ONT.

Uma vez que o ONT apenas necessita de selecionar o tráfego que lhe pertence e descartar o restante, será apenas necessário configurar um código binário (o que lhe foi atribuído). A Figura 4.20 ilustra um exemplo de uma janela de edição do ONT 2 com o respetivo código binário atribuído.

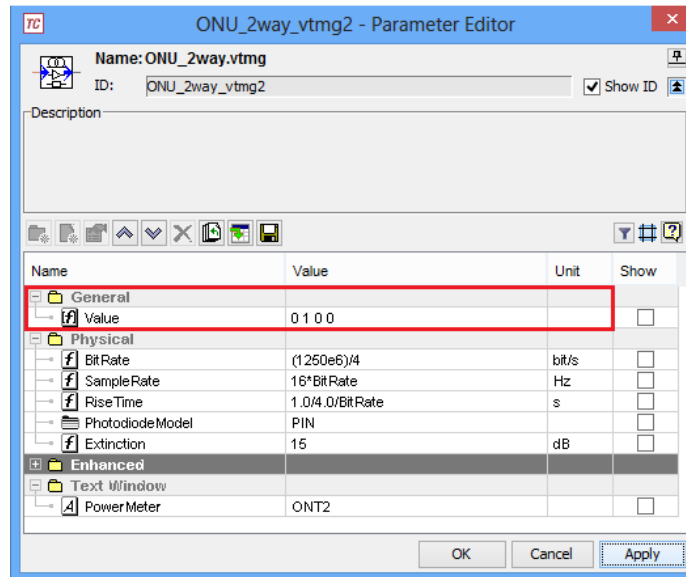


Figura 4.20 - Código binário atribuído ao ONT 2.

4.4.4 Simulação do cenário 1 – GPON com POF

Nesta secção do relatório apresenta-se a implementação do primeiro cenário no VPI. Abordam-se alguns aspetos importantes e opções tomadas na implementação prática deste cenário e posteriormente apresenta-se os resultados obtidos.

4.4.4.1 Implementação

Depois da construção das galáxias necessárias e do desenvolvimento do mecanismo para implementação da técnica TDMA no simulador, encontram-se reunidos todos os requisitos necessários para a implementação dos cenários. O esquema final do primeiro cenário que foi implementado no VPI encontra-se representado na Figura 4.21.

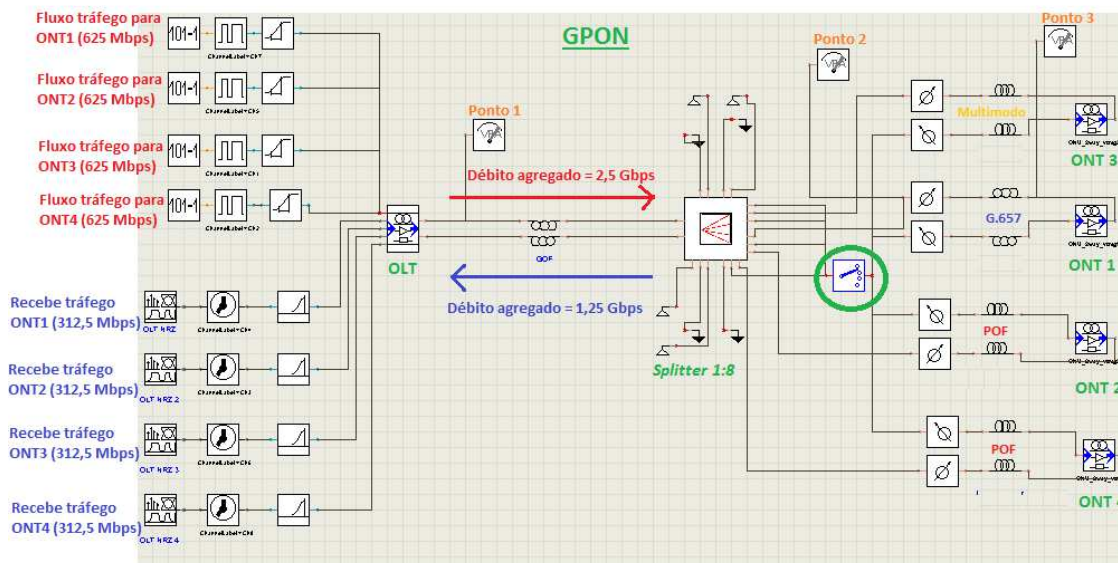


Figura 4.21 - Esquema implementado no simulador para o cenário 1.

Como já foi referido na secção 4.2.1, este primeiro cenário pressupõe a simulação de uma rede GPON com três ONTs, onde cada ONT possui um tipo de fibra diferente. São elas uma POF designada por *Fontex*, uma fibra monomodo G.657 *ClearCurve* e uma fibra multimodo *ClearCurve*. Contudo, como é possível constatar na Figura 4.21 optou-se na prática por efetuar uma implementação com quatro ONTs, sendo dois dos quais interligados através de POF. O motivo pela qual se tomou esta opção prende-se com o débito binário atribuído a cada ONT. Uma vez que se pretende simular o pior caso, isto é, o caso em que a rede GPON opera na sua máxima capacidade (2,5 Gbps no sentido descendente e 1,25 Gbps no ascendente), colocou-se quatro ONTs em que cada um possui um débito de 625 Mbps no sentido descendente e de 312,5 Mbps no ascendente. Como se pode constatar na Figura 4.22 o débito binário definido para o sentido ascendente do ONT1 foi de 1,25/4 Gbps. Desta forma, o débito agregado de todos os ONTs totaliza os valores da capacidade máxima suportada pela GPON. Contudo, sabe-se que na realidade os serviços FTTH vendidos atualmente por parte dos operadores de telecomunicações nunca atingem débitos tão elevados para um utilizador residencial. De qualquer das formas, esta era a única forma de simular a rede na sua capacidade máxima, sem ter que colocar um grande número de ONTs.

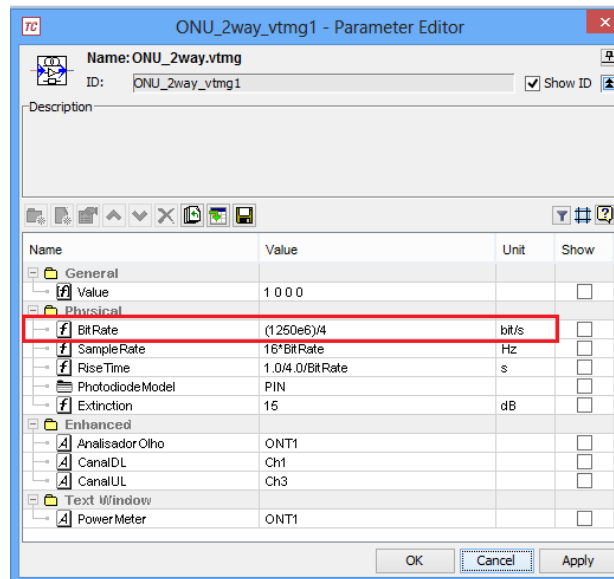


Figura 4.22 - Parametrização final do ONT1.

Optou-se também por implementar módulos de atenuadores ligados às fibras de cada ONT. O propósito destes atenuadores serve para introduzir a atenuação que resulta das fusões térmicas, dos conetores (POF e GOF), da margem de segurança e do acoplador WDM que embora não tenha sido utilizado, também foi considerado para o cálculo do *power budget*. Na Tabela 4.9 pode-se verificar os valores de atenuação que foram definidos nos atenuadores que fazem a ligação no sentido ascendente e descendente. O valor total é diferente nos dois casos porque no sentido ascendente não é contabilizado a atenuação do acoplador WDM, uma vez que este é utilizado apenas para o sentido descendente. Assim sendo, os atenuadores que se encontram no caminho ascendente possuem uma atenuação de 4,4 dB e os que estão no caminho descendente será de 5,2 dB.

Tabela 4.9 - Atenuação total para definir nos atenuadores.

Sentido	Margem segurança	Conetores (POF + GOF)	Acoplador WDM	Fusões	Total
Descendente	2	1,9	0,8	0,5	5,2 dB
Ascendente	2	1,9	-	0,5	4,4 dB

De forma averiguar o correto valor de potência em vários pontos do esquema, foram implementados vários medidores de potência ótica (Ponto 1, 2 e 3 na Figura 4.21), e especialmente em cada ONT para que se possa visualizar a potência ótica recebida e comparar com os valores teóricos do *power budget*.

Assinalado com um círculo de cor verde na Figura 4.21 está representado o módulo *commutator.vtms*. Tal como já foi referido no capítulo anterior, este módulo é necessário para efetuar a multiplexagem no tempo dos vários fluxos de tráfego provenientes dos ONTs (sentido ascendente – 1310 nm).

Relativamente à parametrização das fibras, foi efetuada conforme os dados que foram recolhidos das fichas técnicas dos fabricantes e que se encontram representados na Tabela 4.4 e Tabela 4.5. É importante referir que o módulo *MultimodeFiber.vtms* também foi utilizado para representar a POF no simulador. A Figura 4.23 ilustra a janela de edição da POF no VPI que foi utilizada para a ligação ascendente (1310 nm). A parametrização da POF para o sentido descendente é idêntica excetuando o valor de atenuação que é de 120 dB/km.

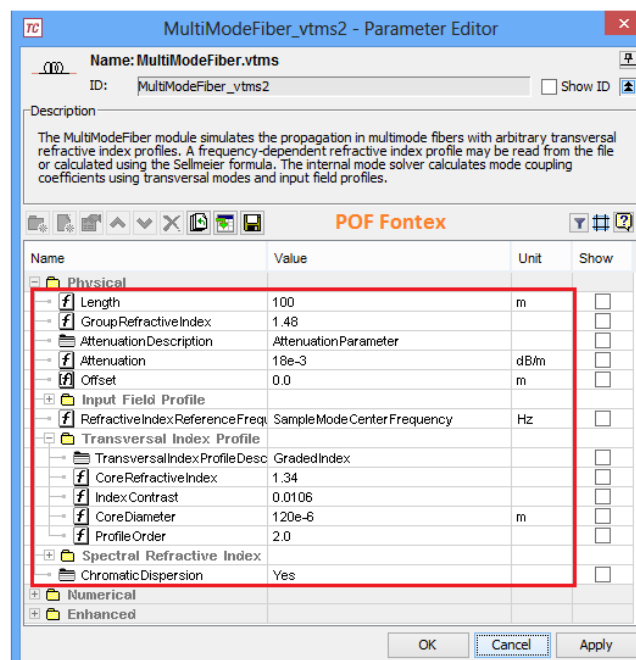


Figura 4.23 - Janela de edição da POF Fontex (@1310nm).

4.4.4.2 Resultados obtidos

Após toda a implementação e parametrização dos respetivos componentes para o primeiro cenário, executaram-se várias simulações para tirar algumas conclusões sobre o estudo pretendido. Em primeiro lugar começou-se por verificar se os valores obtidos nos medidores de potência estavam de acordo com os cálculos do *power budget*. Na Tabela 4.10 pode-se verificar os valores de potência ótica medidos no simulador nos vários ONTs e os respetivos valores teóricos.

Tabela 4.10 - Comparativo entre as potências teóricas e práticas do *power budget*.

	Tipo de fibra	Distância de fibra (m)	Potência teórica (dBm)	Potência prática (dBm)
ONT 1 (@1490 nm)	GOF G.657 <i>ClearCurve</i>	200	$3,5 - 14,4 - 2 =$ $- 12,9$	$- 13,7$
ONT 1 (@1310 nm)	GOF G.657 <i>ClearCurve</i>	200	$1 - 14,43 - 2 =$ $- 15,43$	$- 15,94$
ONT 2 (@1490 nm)	POF <i>Fontex</i>	100	$3,5 - 27,04 - 2 =$ $- 25,54$	$- 25,68$
ONT 2 (@1310 nm)	POF <i>Fontex</i>	100	$1 - 16,16 - 2 =$ $- 17,16$	$- 17,74$
ONT 3 (@1490 nm)	GOF Multimodo	200	$3,5 - 15,12 - 2 =$ $- 13,62$	$- 13,83$
ONT 3 (@1310 nm)	GOF Multimodo	200	$1 - 14,48 - 2 =$ $- 15,48$	$- 16,25$

Como se pode verificar, os valores obtidos foram razoáveis e estão próximos dos valores calculados, o que representa uma correta implementação do cenário do simulador. A potência teórica para os três casos foi efetuada recorrendo à folha do ficheiro *Excel* que já tinha sido elaborada para o cálculo do *power budget*. É importante também referir que estes valores de potência teóricos e práticos pressupõem a utilização de uma determinada distância na última milha, que neste caso em particular foi de 100 metros para a POF e 200 metros para a fibra multimodo e G.657 *ClearCurve*.

Após a verificação dos valores de potência ótica nos vários ONTs, determinou-se a distância máxima com POF mantendo os níveis mínimos de BER normalizados pela tecnologia GPON. Este processo foi efetuado por tentativa e erro, ou seja, efetuou-se várias medições até encontrar o valor máximo de distância. O resultado pode ser visualizado na Figura 4.24.

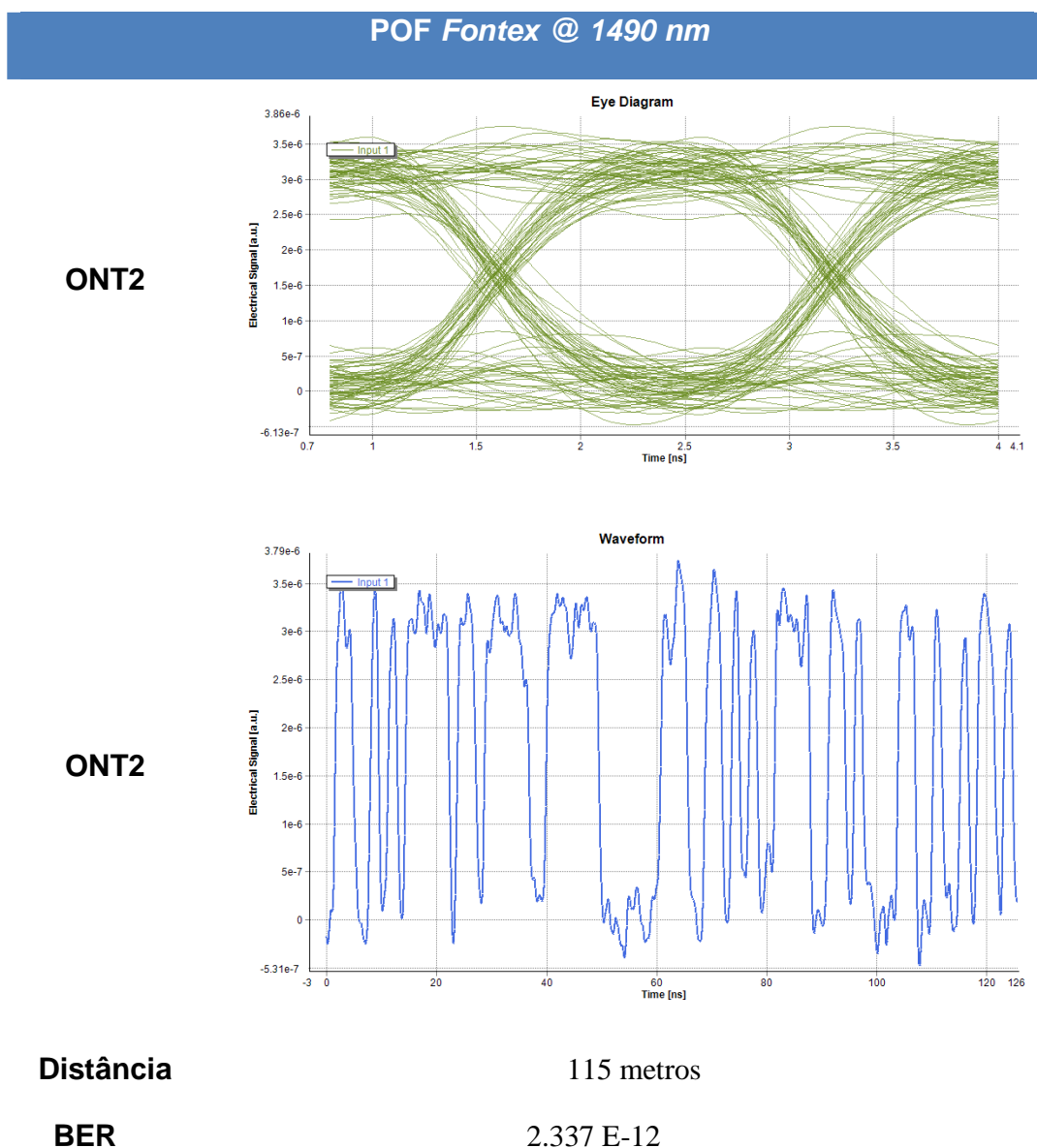


Figura 4.24 - Resultados para o ONT2 com POF Fontex.

De acordo com a Figura 4.24 pode-se constatar que a distância máxima de POF conseguida no simulador no primeiro cenário foi de 115 metros para um valor de BER de 2.337 E-12, obtendo-se assim um valor inferior ao permitido que era de 1×10^{-10} . No diagrama de olho

ainda existe uma boa abertura horizontal e vertical. No segundo gráfico os impulsos elétricos possuem alguma oscilação derivado ao sistema estar a operar no limites, mas ainda assim existe uma boa diferenciação dos bits “1” e “0”.

Contudo, para se perceber como é que o BER evolui à medida que se varia a distância da POF na última milha elaborou-se um gráfico no programa *Excel* com valores que foram recolhidos no simulador. Esse resultado encontra-se representado na Figura 4.25.

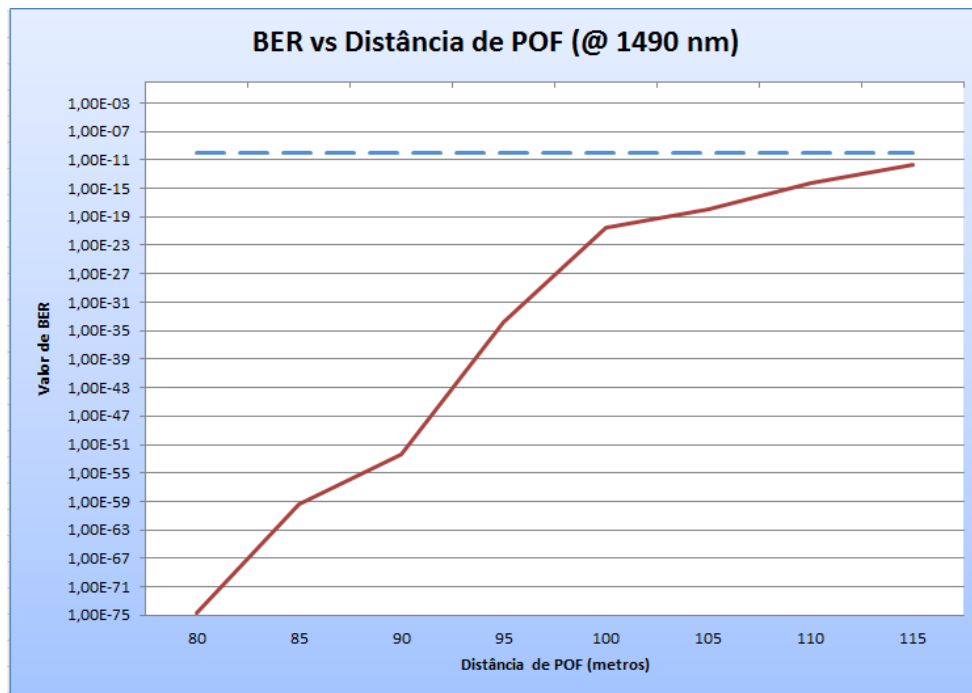


Figura 4.25 - Variação do BER em função do comprimento da POF (@1490 nm).

O gráfico ilustrado encontra-se na escala logarítmica e o traço descontínuo de cor azul representa o limite do nível de BER (1×10^{-10}). É importante referir que estes valores de BER foram medidos no ONT, isto é, o comprimento de onda que está em causa são os 1490 nm. Verifica-se que num intervalo pequeno de distância (80 – 115 metros) o valor de BER aproxima-se rapidamente do nível mínimo permitido pela GPON. Este resultado é explicado pelo facto da POF possuir uma elevada atenuação nos 1490 nm, que são cerca de 120 dB/km. Quanto ao sinal que circula no sentido ascendente (ONT para OLT) também foi analisado. Os resultados encontram-se representados na Figura 4.26.

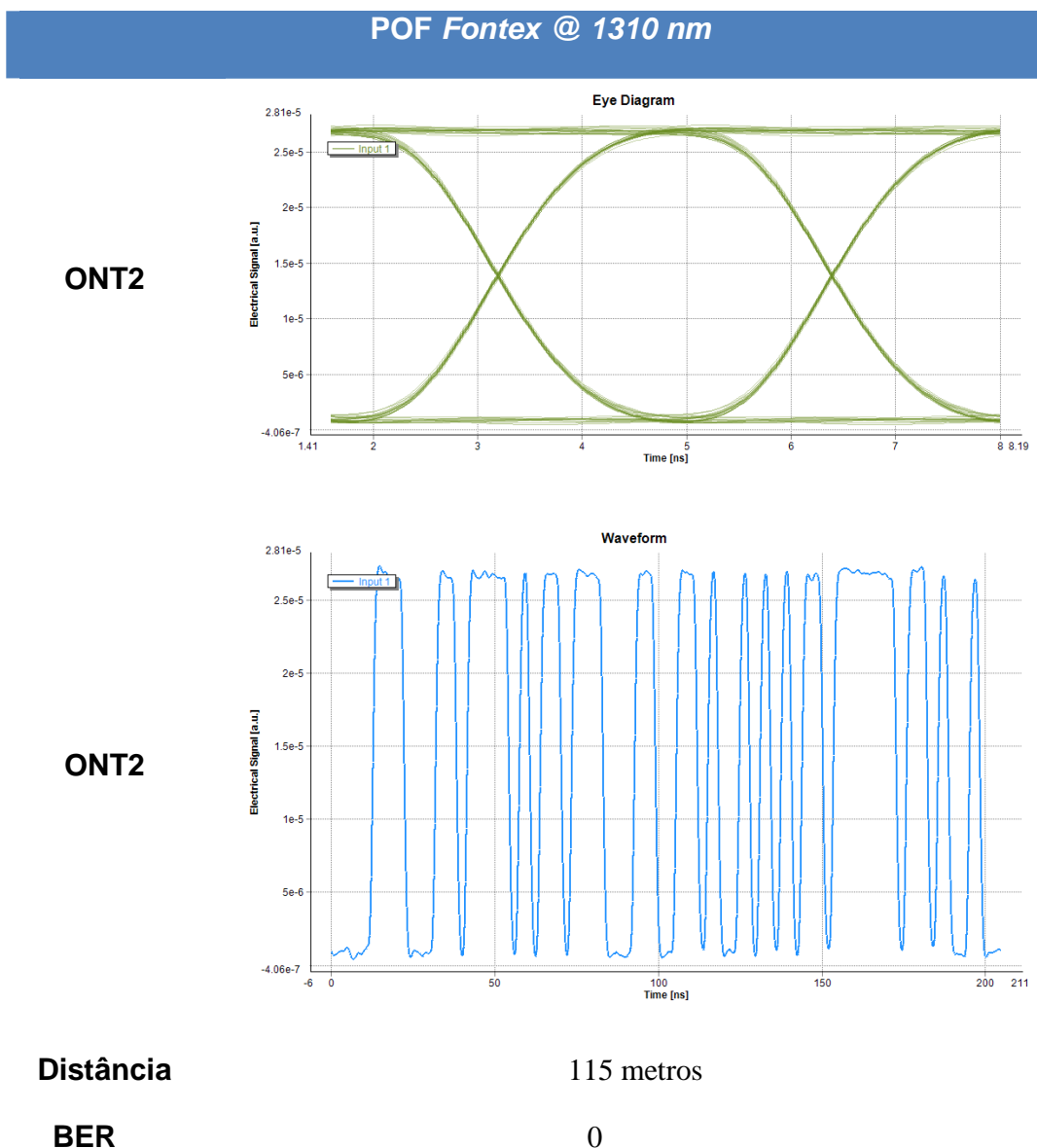


Figura 4.26 - Resultados no OLT/ sinal ascendente do ONT2.

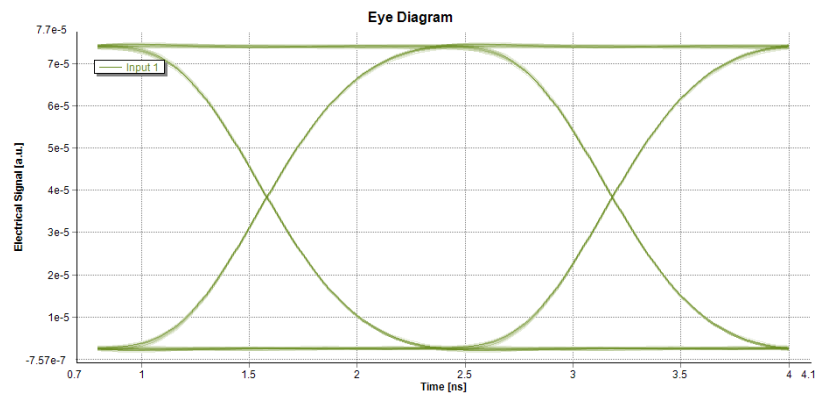
Repare-se que neste caso teve-se que considerar no mínimo a distância que tinha sido determinada anteriormente, os 115 metros. Verifica-se que a qualidade do sinal recebido no OLT foi muito superior do que no caso anterior (sentido descendente). Tanto o diagrama de olho como os impulsos rectangulares estão muito mais bem definidos. O valor de BER obtido foi igual a 0, o que indica que a taxa de bits errados é nula. O facto de haver um melhor desempenho no sentido ascendente comparativamente ao descendente, prende-se pelas características da POF. A *Fontex* possui uma atenuação muito mais baixa nos 1310 nm,

sendo a diferença de cerca 100 dB/km inferior quando comparada com a atenuação registada nos 1490 nm.

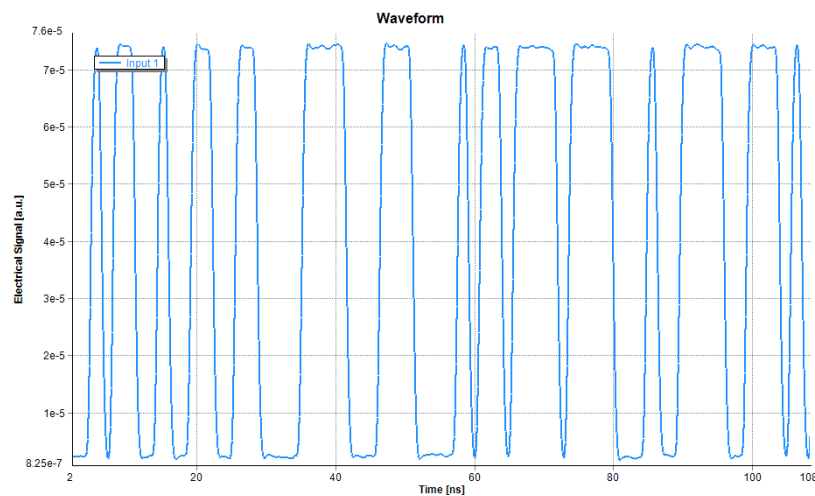
Relativamente às restantes fibras, tiveram um desempenho muito superior comparativamente à POF. A Figura 4.27 ilustra os resultados que foram registados no ONT1 com a fibra G.657 ClearCurve.

Fibra monomodo G.657 ClearCurve da Corning @ 1490 nm

ONT1



ONT1



Distância

200 metros

BER

0

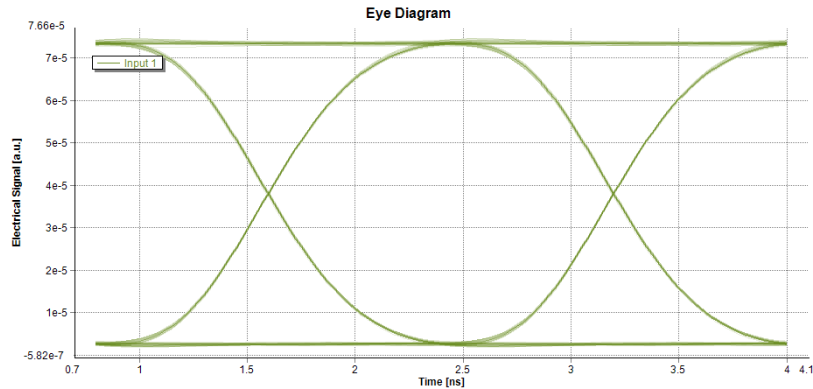
Figura 4.27 - Resultados para o ONT1 com fibra G.657 ClearCurve.

Os resultados obtidos para a fibra monomodo G.657 foram excelentes. Tendo em conta que a distância considerada ser já muito razoável (200 metros) para este tipo instalações (última milha/ interior de edifícios), ainda assim obteve-se um BER igual a 0. Esse resultado também é notável no diagrama de olho visto que apresenta uma linha fina com contornos suaves. Os impulsos rectangulares também estão com melhor definição comparativamente aos que foram obtidos pela POF. Relativamente ao sinal ótico no sentido ascendente, os resultados foram muito semelhantes, isto é, a qualidade do sinal recebida no OLT também foi excelente registando um BER igual a 0. Este resultado já era esperado, visto que trata-se e uma fibra monomodo com atenuações muito mais baixas comparativamente às da POF.

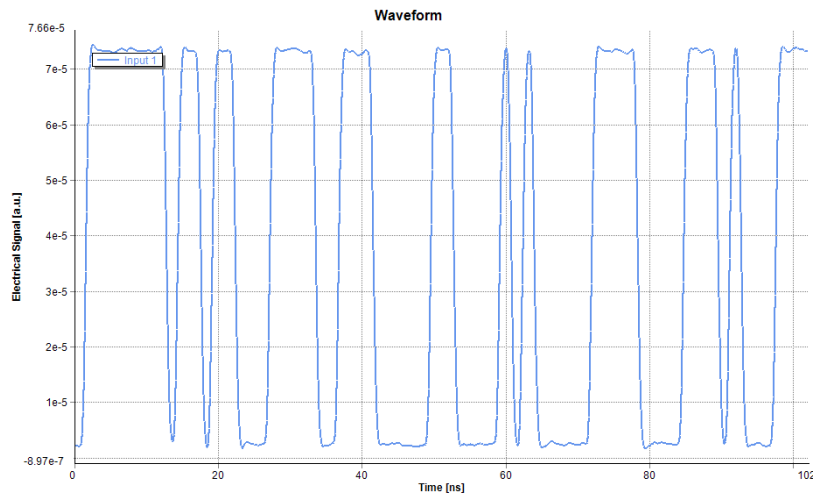
Por último analisaram-se os resultados que foram obtidos com a fibra multimodo *ClearCurve*. Os resultados registados no simulador VPI com este tipo de fibra encontram-se representados na Figura 4.28. Como é possível verificar, os resultados também foram muito satisfatórios. À semelhança do que aconteceu com a fibra G.657, o diagrama de olho e os impulsos rectangulares também estão bem definidos e obteve-se um valor de BER igual a 0.

Fibra Multimodo G.651 *ClearCurve* da *Corning* @ 1490 nm

ONT3



ONT3



Distância

200 metros

BER

0

Figura 4.28 - Resultados para o ONT3 com fibra multimodo *ClearCurve*.

Face aos resultados obtidos foi possível tirar algumas conclusões acerca dos mesmos. Com este primeiro cenário, pretendeu-se simular e analisar o desempenho da POF na rede de acesso (última milha). Para o efeito foram consideradas para além da POF outras duas fibras disponíveis no mercado para este tipo de aplicação, e efetuou-se uma comparação entre as mesmas e determinou-se a melhor solução.

Após várias simulações realizadas, conseguiu-se uma distância de cerca 115 metros de POF para o cenário implementado, mantendo um valor de BER inferior ao permitido que era de 1×10^{-10} . Ainda assim é importante referir que esta distância foi conseguida para este cenário em específico. A grande limitação da POF encontra-se na atenuação na janela dos 1490 – 1550 nm, que é de cerca 120 dB/km. Face a este elevado valor, torna-se difícil efetuar o dimensionamento do *power budget*, apesar de esta possuir outras vantagens quando comparada com fibras de sílica.

Relativamente à fibra monomodo G.657 e à fibra multimodo, os resultados foram bem mais satisfatórios. As simulações revelaram nível de sinal ótimo para os ONTs que possuíam estas fibras. Poder-se-ia até eventualmente adicionar mais atenuação no ODN, através da adição de outros componentes passivos (como por exemplo um *splitter*), mantendo uma boa qualidade de sinal.

Comparando o desempenho dos três tipos de fibras, conclui-se que a fibra G.657 *ClearCurve* constitui uma melhor escolha para aplicações FTTH. A POF para uma distância de 115 metros e para um cenário relativamente simples já operava nos limites permitidos pela GPON. Já com a fibra G.657 obteve-se ótimos resultados e confortáveis para cenários mais complexos com mais atenuação na rede de distribuição ótica.

4.4.5 Simulação do cenário 2 – Coexistência GPON e 10G-PON com POF

Nesta secção do relatório apresenta-se a implementação do segundo cenário no VPI. Abordam-se alguns aspetos importantes e opções tomadas na implementação prática deste cenário e posteriormente apresenta-se os resultados obtidos.

4.4.5.1 Implementação

Como já foi referido, o segundo cenário trata-se da análise do desempenho da POF para débitos superiores aos que foram utilizados no primeiro cenário. Para tal, elaborou-se um esquema onde as tecnologias GPON e 10G-PON coexistem na mesma rede de distribuição ótica. O esquema final do segundo cenário que foi implementado no VPI encontra-se representado na Figura 4.29.

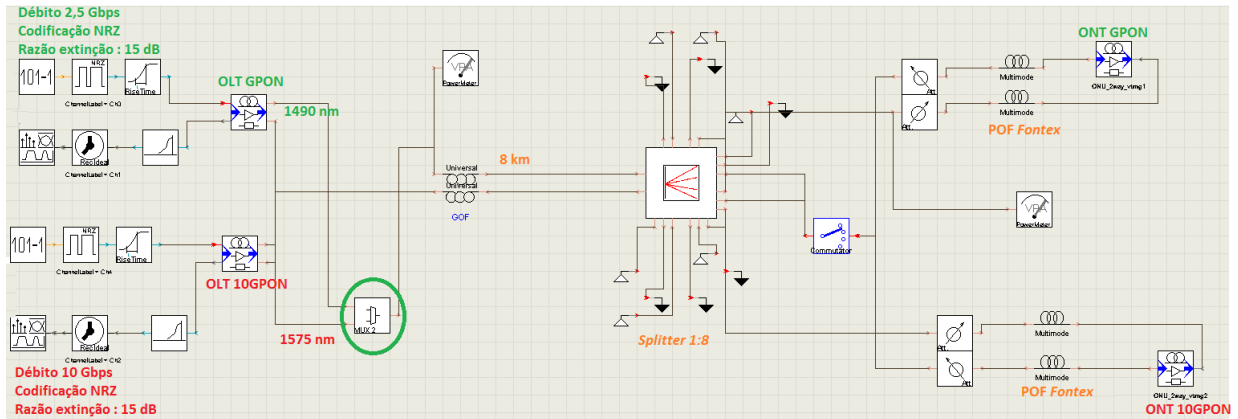


Figura 4.29 - Esquema implementado no simulador para o cenário 2.

É importante relembrar que a tecnologia 10 GPON opera a 10 Gbps simétricos (sentido ascendente e descendente), enquanto a GPON suporta 2,5 Gbps no sentido descendente e 1,25 Gbps no sentido ascendente. Como se pode verificar foram implementados dois OLTs e dois ONTs, sendo atribuído um par OLT/ONT para cada tecnologia. À semelhança do primeiro cenário, foi utilizado o *splitter* de 1:8 e uma distância de fibra de sílica de 8 km entre o OLT e o *splitter*. Na rede de acesso foram utilizadas POFs *Fontex* para interligar ambos os ONTs, para que se possa testar a viabilidade da POF para débitos superiores (10 Gbps).

Os débitos configurados em cada ONT no sentido ascendente foram de 1,25 e 10 Gbps para as tecnologias GPON e 10 GPON, respetivamente. Foram também definidos parâmetros globais, nomeadamente o “*WavelengthG*”, o “*Wavelength10G*” e o “*WavelengthUL*”. Estes parâmetros foram úteis para a definição dos comprimentos de onda de operação de ambas as tecnologias. Como se pode constatar na Figura 4.30 o débito binário definido por defeito foi de 10 Gbps, o que significa que o débito definido nos equipamentos ativos da tecnologia GPON foi efetuado de forma manual sem recurso ao parâmetro global “*BitRateDefault*”.

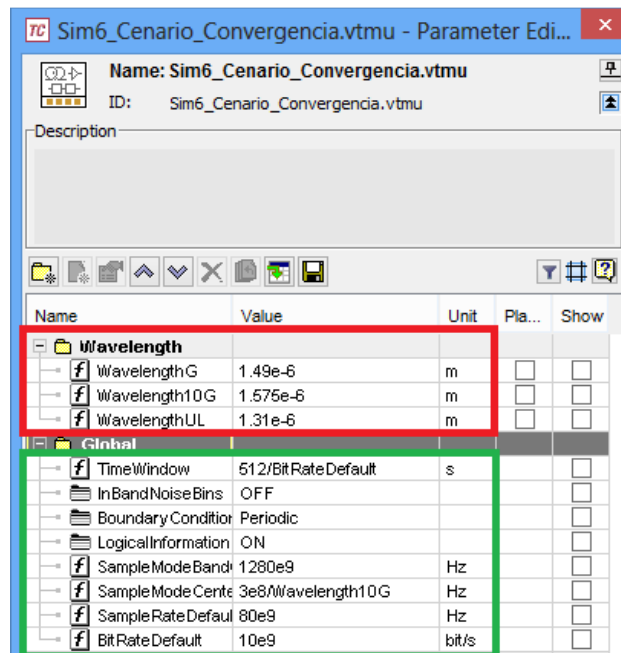


Figura 4.30 - Janela de edição de parâmetros globais do cenário 2.

Uma vez que ambas as tecnologias partilham o mesmo meio físico é necessário existir mecanismos que evitem o conflito de operação entre as mesmas. Para tal, no sentido descendente as duas tecnologias operam em comprimentos de onda diferentes. Esse procedimento pode ser feito através da utilização de um acoplador WDM que encontra-se representado com um círculo de cor verde. Este módulo possui duas entradas e uma saída e tem a função de multiplexar comprimentos de onda num mesmo meio físico (fibra). As entradas encontram-se ligadas aos OLTs das duas tecnologias, sendo que no caso da GPON irá enviar um sinal ótico nos 1490 nm e o da 10 GPON nos 1575 nm. Na saída deste componente os sinais de ambas as tecnologias serão enviados para uma única fibra mas em comprimentos de onda distintos. Tal como tinha sido definido no cálculo do *power budget*, a atenuação introduzida pelo acoplador WDM no simulador é de 0,8 dB.

Relativamente ao sentido ascendente, recorre-se à técnica TDMA e ao mecanismo desenvolvido neste trabalho para a sua implementação no VPI. Os códigos binários atribuídos aos fluxos recebidos no OLT de cada ONT encontram-se ilustrados na Figura 4.31.

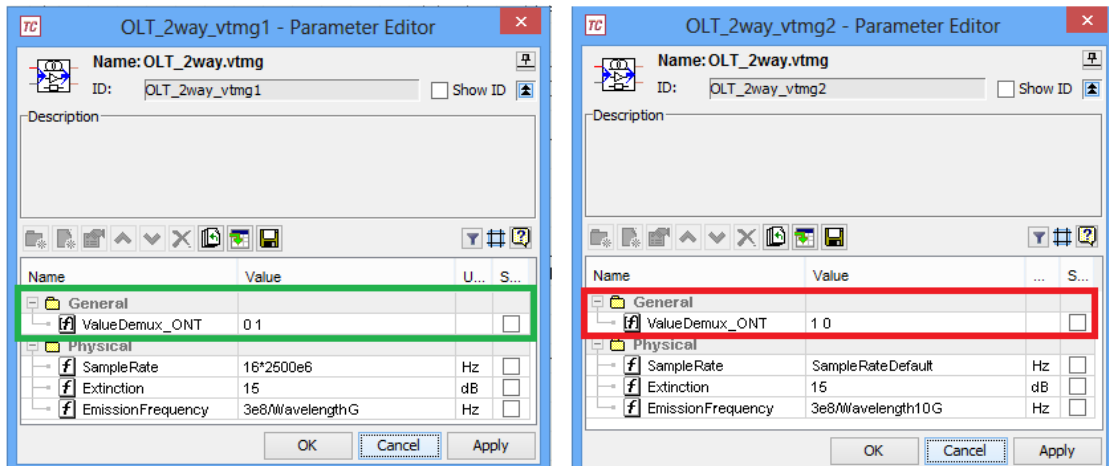


Figura 4.31 - Janelas de edição da GPON (esquerda) e 10G-PON (direita).

4.4.5.2 Resultados obtidos

Depois de toda a implementação e parametrização dos respetivos componentes para o segundo cenário, executaram-se várias simulações para tirar algumas conclusões. Começou-se por analisar a qualidade do sinal ótico recebido em cada recetor. A Figura 4.32 ilustra os resultados registados no simulador para o ONT da GPON.

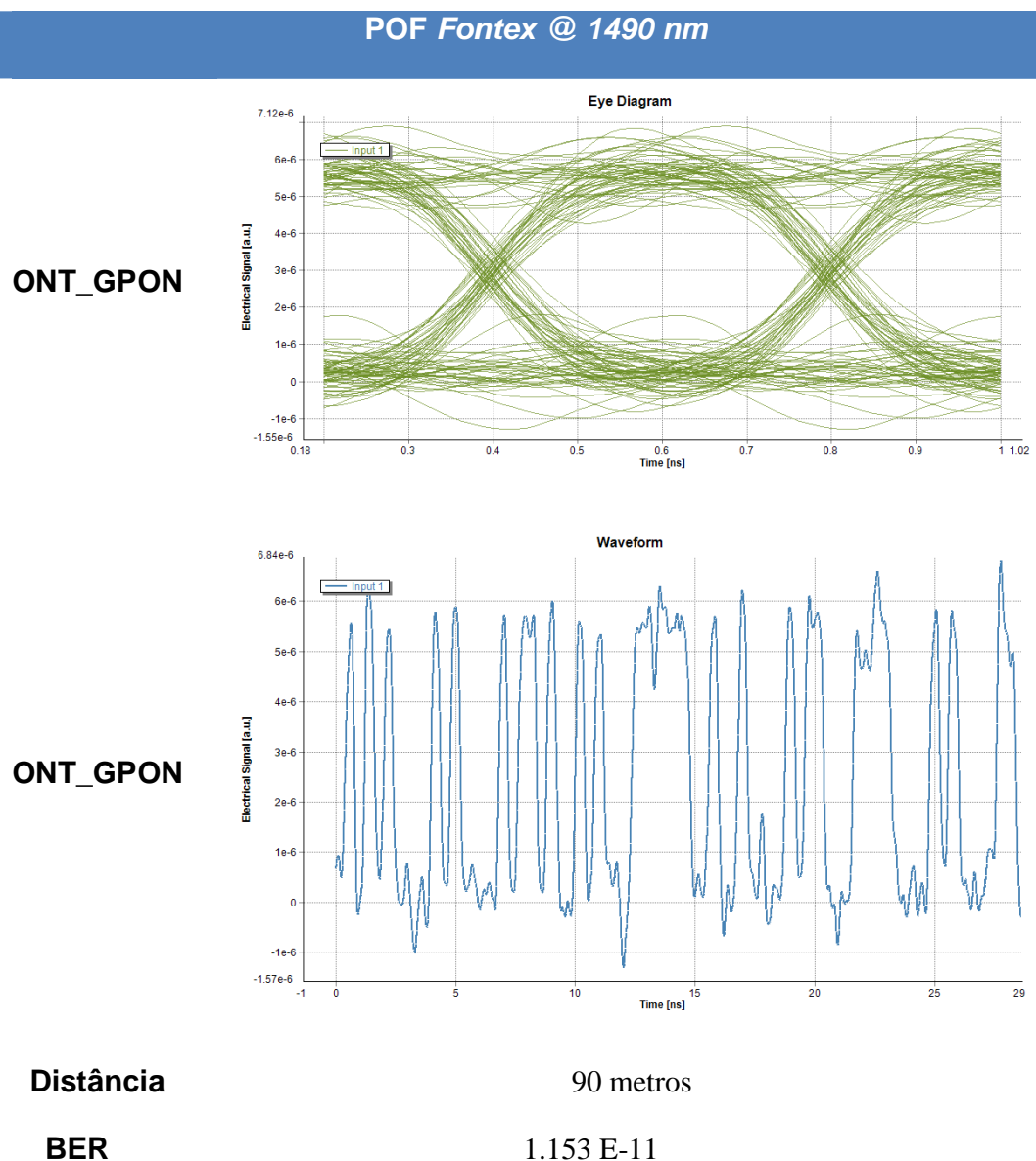


Figura 4.32 - Resultados para o ONT_GPON do sinal descendente.

O procedimento para determinar a distância máxima conseguida com a POF na rede de acesso neste segundo cenário foi idêntico ao que foi efetuado no primeiro cenário. Através de uma série de simulações, atingiu-se um valor máximo de 90 metros de POF para o ONT que opera com a tecnologia GPON. O BER obtido foi de 1.153×10^{-11} situando-se abaixo do limite desejável dos 1×10^{-10} .

Posteriormente recolheram-se os resultados obtidos no ONT que estava associado à tecnologia 10 GPON. Os resultados encontram-se representados na Figura 4.33.

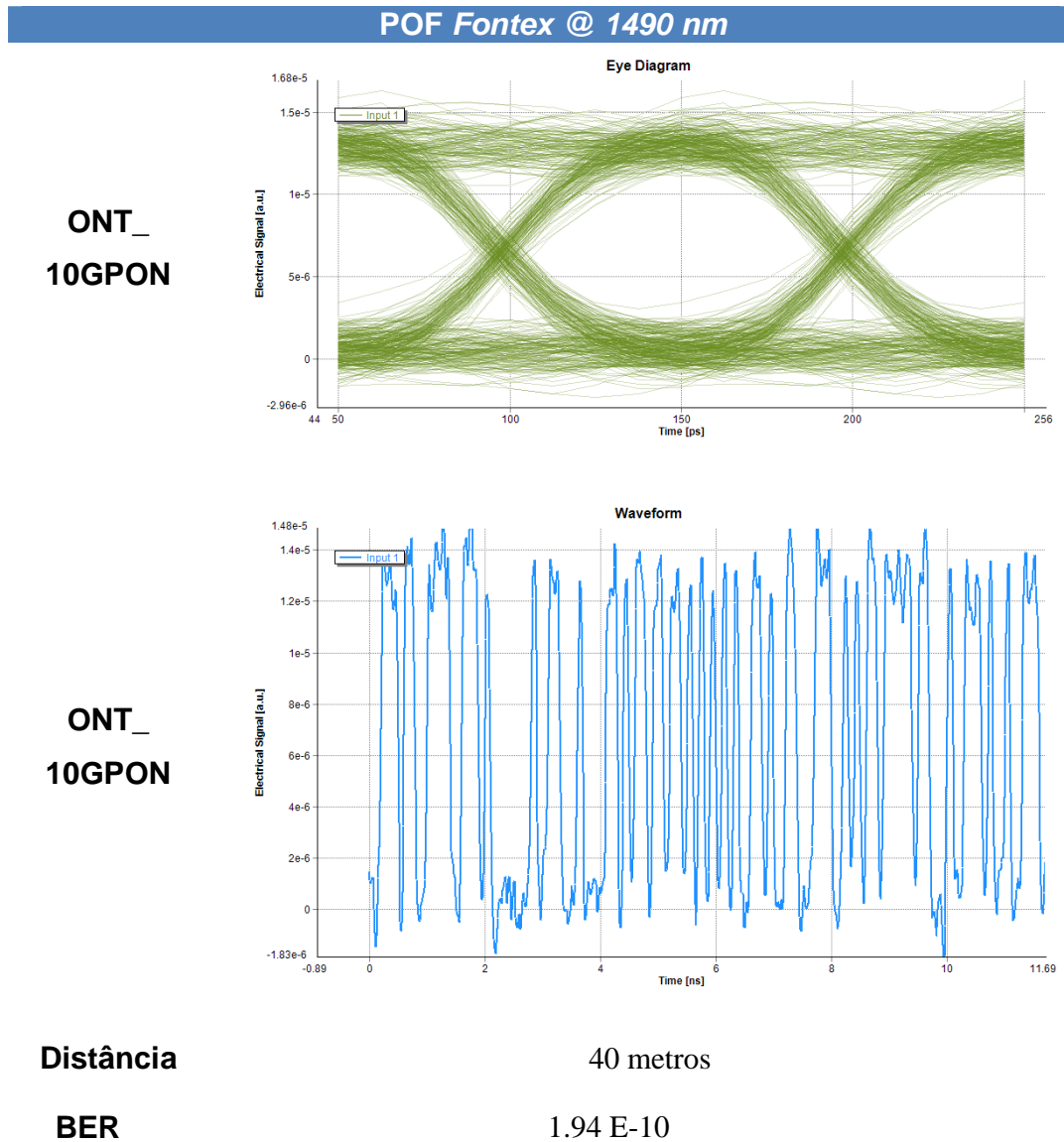


Figura 4.33 - Resultados para o ONT_10GPON do sinal descendente.

No ONT com a tecnologia 10 GPON conseguiu-se uma distância máxima de 40 metros de POF na rede de acesso para um valor de BER de 1.94×10^{-10} . O diagrama de olho apresenta um maior número de linhas quando comparado com o da Figura 4.32. Isto acontece porque o débito binário é quatro vezes superior ao que foi utilizado no primeiro caso.

Relativamente à qualidade do sinal no sentido ascendente de ambos os ONTs, ou seja, o sinal que é recebido no OLT proveniente dos ONTs, também foi analisada. Começando pelo ONT da tecnologia GPON, registou-se um BER igual a 0 para a mesma distância de 90 metros que tinha sido determinada como a distância máxima no sentido descendente. A boa qualidade de sinal recebido também é visível pelo diagrama de olho que encontra-se representado na Figura 4.34.

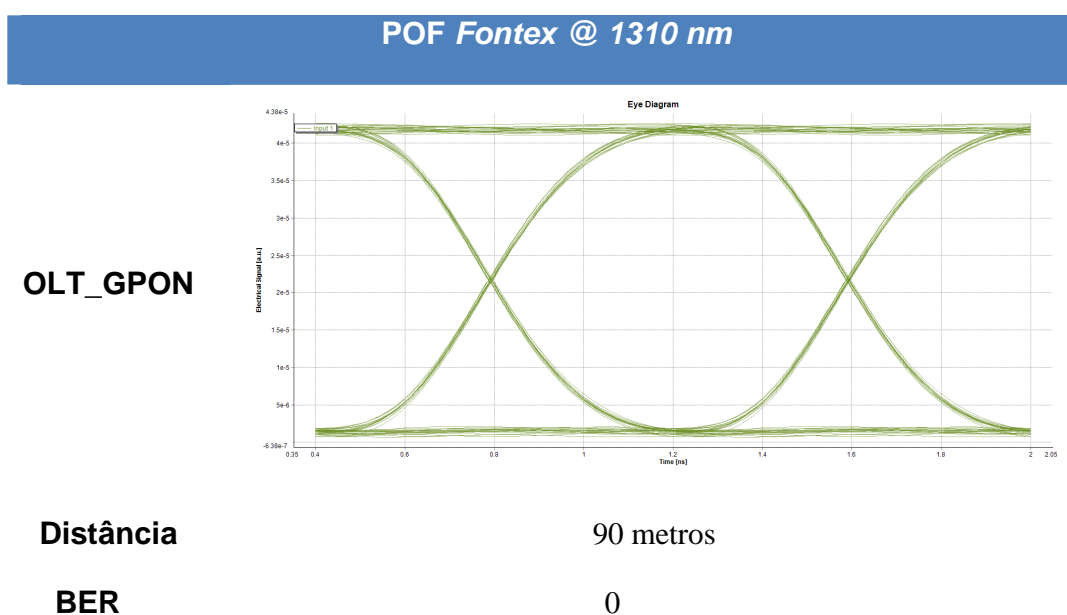


Figura 4.34 - Resultados para o OLT_GPON do sinal ascendente.

Por último, analisou-se o sinal ascendente do ONT que utiliza a tecnologia 10 GPON. O diagrama de olho do respetivo sinal encontra-se representado na Figura 4.35. Para uma distância máxima de 40 metros de POF na rede de acesso, obteve-se um BER de 5.22×10^{-150} . Existe uma grande melhoria do sinal recebido no sentido ascendente, pelo facto de a atenuação da POF nos 1490 nm ser muito superior aos 1310 nm.

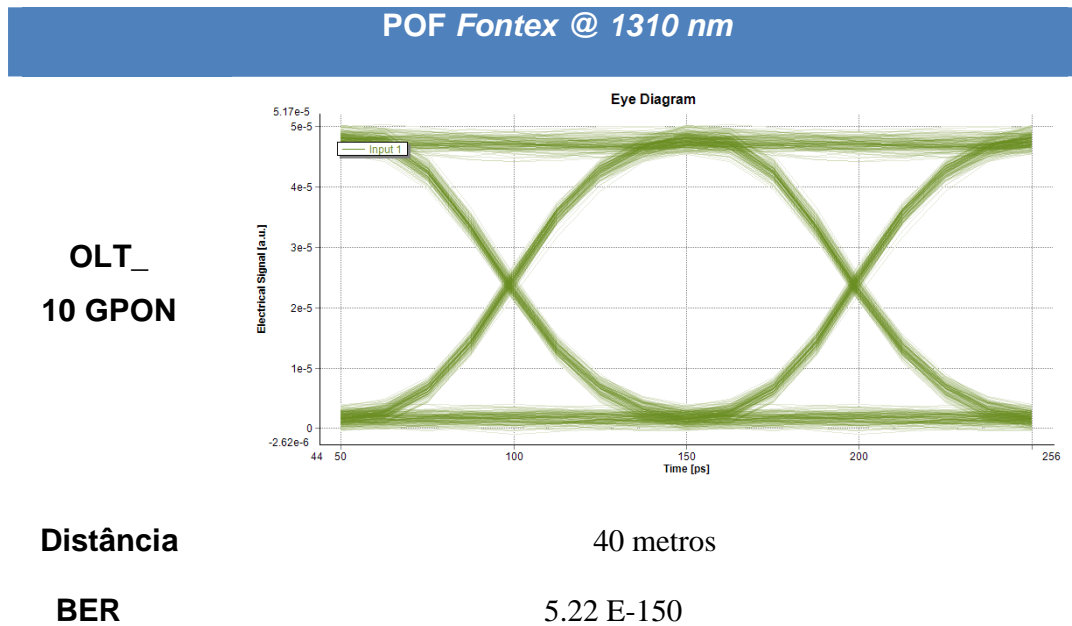


Figura 4.35 - Resultados para o OLT_10GPON do sinal ascendente.

Neste segundo cenário pretendeu-se analisar o desempenho e a viabilidade da POF na rede de acesso com tecnologias que operam com débitos de 10 Gbps. Para tal, de forma também simular uma situação real de um operador de telecomunicações, desenvolveu-se um esquema onde a tecnologia GPON (que já tinha sido implementada no primeiro cenário) e 10 GPON operam no mesmo ODN.

Os resultados das simulações revelaram que é possível utilizar POF na rede de acesso e para débitos de 10 Gbps. Conseguiu-se uma distância de 40 metros utilizando a tecnologia 10 GPON. Esta diminuição do alcance da POF na última milha deve-se a duas razões. A primeira pela utilização de um comprimento de onda diferente (1575 nm), introduzindo uma atenuação superior (200 dB/km) ao sinal transmitido. O segundo motivo deve-se ao facto do débito binário transmitido ser quatro vezes superior ao que foi utilizado no primeiro cenário, aumentando assim a probabilidade de um *bit* estar errado.

Quanto à distância obtida com a tecnologia GPON no mesmo ODN, foi de 90 metros para as mesmas taxas de transferências de dados que tinham sido utilizadas no primeiro cenário. Este resultado significa uma redução na distância que tinha sido determinada no primeiro cenário, que era de 115 metros. Pensa-se que isto está associado ao facto de neste segundo cenário ter-se utilizado o acoplador WDM e ter causado uma perda de desempenho no sistema.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste último capítulo do relatório apresentam-se as conclusões relativas ao trabalho realizado. Sugerem-se algumas propostas para trabalho futuro que podem dar continuidade ao estudo que foi efetuado nesta dissertação.

5.1 Conclusões

O tema desta dissertação incidiu no estudo e simulação do desempenho da fibra ótica de plástico nas redes de acesso. Para o efeito, em primeiro lugar fez-se o estudo do estado da arte atual das fibras óticas e das redes de acesso.

Nas fibras óticas, verificou-se que estas podem ser de vários tipos, sendo as de mais importância para esta dissertação as de sílica e as de plástico. As de sílica podem ser monomodo ou multimodo. As primeiras têm um raio de núcleo pequeno e uma atenuação baixa, sendo por isso utilizadas para longas distâncias. Já as multimodo têm um raio de núcleo e uma atenuação superior, pelo que são utilizadas em distâncias curtas. Relativamente às fibras óticas de plástico, viu-se que estas também existem em vários tipos e com materiais diferentes. As mais atuais e desenvolvidas são as GI-POF com polímero de flúor. Foi efetuado uma pesquisa em vários fabricantes e decidiu-se utilizar para a prática uma POF

designada por *Fontex* da *Asahi Glass*, devido aos valores de atenuação que esta apresenta (120 dB/km nos 1490 nm e 18 dB/km nos 1310 nm).

Nas redes de acesso, começou-se por abordar a estrutura de uma rede de telecomunicações e viu-se que esta pode ser dividida em três segmentos: rede nuclear, rede distribuição e rede de acesso. Constatou-se que existem várias tecnologias de transmissão que são utilizadas nas redes de acesso consoante o tipo de infraestrutura existente (cobre, coaxial ou fibra). O aumento gradual da largura de banda necessária por parte dos utilizadores levou o mercado a desenvolver novas soluções e nestes últimos anos tem-se assistido a um forte investimento por parte dos operadores de telecomunicações na instalação de fibra ótica até à casa dos utilizadores. Existem várias tecnologias PON que permitem o fornecimento do serviço FTTH (voz, televisão e internet) aos utilizadores. Atualmente sabe-se que alguns operadores de telecomunicações em Portugal fornecem este tipo de serviço com base na tecnologia GPON, mas o futuro poderá passar pela utilização da 10G-PON ou WDM-PON.

Após todo o processo de pesquisa e de aquisição de conhecimento sobre o tema, reuniram-se as condições necessárias para prosseguir à parte prática. A ferramenta utilizada para simulação designa-se por *VPIphotonicsTM* 8.5. À medida que se foi explorando o seu funcionamento, foram encontradas algumas limitações. A primeira limitação prende-se com a utilização de vários fluxos de tráfego com débitos distintos. Isto impediu que na prática fosse impossível implementar um fluxo de tráfego com uma modulação QAM (para simular o sinal TV analógico nos 1550 nm) e com um débito totalmente diferente dos que são praticados pelo tráfego com modulação NRZ. A segunda limitação está associada à inexistência de módulos de equipamentos ativos para redes PON (como é o caso do OLT e ONT), pelo que neste caso contornou-se a situação criando manualmente as galáxias necessárias.

Apesar das limitações encontradas no simulador, elaboram-se dois cenários para estudo do desempenho da POF na última milha. A tecnologia escolhida para a elaboração dos cenários foi a GPON. Esta tecnologia tem um débito máximo de 2,5 Gbps no sentido descendente e de 1,25 Gbps no sentido ascendente. O motivo pela qual se escolheu esta tecnologia para simulação no VPI prende-se na existência de muita documentação acerca da mesma, até mesmo artigos com projetos e simulações noutros simuladores. O primeiro cenário consiste numa rede GPON com três utilizadores (ONTs). Cada utilizador possui um tipo de fibra

diferente. As fibras utilizadas foram uma monomodo G.657 *ClearCurve* da *Corning*, uma multimodo G.651 *ClearCurve* da *Corning* e uma POF *Fontex* da *Asahi Glass*. Pressupõe-se que a instalação das fibras é efetuada entre o ponto de distribuição ótico que se encontra no edifício e o ONT que é colocado dentro da casa do utilizador. Neste cenário averiguou-se a distância máxima permitida pela POF para transmissão tendo em conta o limite do valor de BER (1×10^{-10} para a GPON e 10G-PON) e comparou-se o seu desempenho com as restantes fibras.

Relativamente ao segundo cenário trata-se do estudo do desempenho da POF numa situação em que as tecnologias GPON e 10G-PON coexistem no mesmo ODN. Neste cenário pretende-se averiguar o desempenho da POF para débitos superiores (10 Gbps).

Para ambos os cenários foi efetuado o cálculo teórico do *power budget*. Este procedimento é muito importante no dimensionamento de uma rede PON, pois é com base nele que se garante uma qualidade de sinal adequada para cada ONT. Utilizou-se óticos de classe B+, permitindo assim uma atenuação total na rede de distribuição ótica de 28 dB. Apesar do desenvolvimento prévio de vários cenários para implementação no programa de simulação, a sua implementação foi efetuada de forma progressiva. Numa fase inicial, executaram-se alguns testes simples com o intuito de se familiarizar com o funcionamento do programa. Posteriormente foi-se adicionando mais complexidade e desenvolveu-se um mecanismo para implementação da técnica TDMA no simulador e criaram-se algumas galáxias para simplificação do esquema.

A análise de resultados foi efetuada com base nos diagramas de olho e valores de BER gerados pelo simulador para cada ONT e OLT. Os resultados obtidos em ambos os cenários foram satisfatórios. No primeiro conseguiu-se uma distância máxima para a POF de cerca 115 metros, cumprindo o valor mínimo de 1×10^{-10} de BER. No entanto, as fibras multimodo e monomodo G.657 revelaram um desempenho muito superior, dado que estas possuem uma atenuação muito mais baixa. No segundo cenário, com um débito de transmissão de 10 Gbps da tecnologia 10G-PON, conseguiu-se uma distância de 40 metros para a POF na rede de acesso.

Tendo em conta ao estudo efetuado e aos resultados obtidos, conclui-se que atualmente a POF apenas é viável para situações onde a atenuação do ODN é relativamente baixa (por

volta de 15 dB), caso contrário a utilização na última milha não se torna viável. Os resultados obtidos em ambos os cenários revelaram de facto que a principal limitação da POF se prende com a elevada atenuação na janela dos 1490-1550 nm, que mesmo considerando a melhor POF atual do mercado para este tipo de aplicações (*Fontex*), possui uma atenuação de cerca 120 dB/km nos 1490 nm. Por outro lado, os resultados obtidos no sentido ascendente (1310 nm) foram muito satisfatórios derivado à atenuação ser cerca de 100 dB/km inferior à do sentido descendente, resultando margens operacionais dos sistemas muito confortáveis para adição de novos componentes. A sua viabilidade pode tornar-se possível neste segmento de rede, caso sejam desenvolvidos novos tipos de materiais e mais transparentes que possibilitem obter atenuações mais baixas na janela utilizada em telecomunicações.

Das fibras testadas no primeiro cenário, conclui-se que a melhor opção para instalação em redes de acesso e para serviços FTTH é a fibra G.657 *ClearCurve* da *Corning* dado que esta não só possui uma baixa atenuação nos 1310 e 1490 nm como também está otimizada para possuir baixas perdas devido a raios de curvatura.

5.2 Trabalho futuro

No decorrer desta dissertação foram efetuadas algumas opções que determinaram um caminho a seguir, no entanto outras poderiam ter sido tomadas e certamente outros resultados e conclusões se iriam obter. Assim sendo, apresentam-se algumas sugestões para trabalho futuro que podem dar continuidade ao estudo que foi realizado nesta dissertação.

- Aprofundar o tema implementando cenários mais complexos (como por exemplo testar a transmissão do sinal RF analógico de TV nos 1550 nm) utilizando outras ferramentas de simulação direcionadas para PONs e FTTH, como é o caso do *Optisystem* da *Optiwave*;
- Implementação e simulação de uma rede baseada em WDM-PON utilizando POF na rede de acesso;
- Execução de testes em laboratório de um sistema semelhante com POF que permita corroborar os valores teóricos e obtidos pelo simulador. Uma vez que o VPI não tem em conta as perdas devido a raios de curvatura seria interessante testar o desempenho da POF aquando esta faz raios de curvatura iguais ou superiores a 90° dentro das tubagens dos edifícios.

Referências

- [1] A. S. Almeida, “Fibra Óptica na Rede de Acesso – Implicações nos Edifícios,” (Tese de Mestrado) - Universidade de Aveiro, 2009.
- [2] S. Lopes, “Fibra Óptica na Rede de Acesso: Cenários de Evolução,” (Tese de Mestrado), Universidade de Aveiro, 2011.
- [3] Full Service Access Network, [Online]. Available: <http://web.archive.org/web/20091012212936/http://www.fsanweb.org/>. [Acedido em Janeiro 2013].
- [4] G. Keiser, FTTX Concepts and applications, John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [5] M. L. Bonilla, “Redes Ópticas de Acceso de Alta Capacidade,” 2008. [Online]. Available: <http://media.utp.edu.co/crie/archivos/documentos/presentacion-utp.pdf>. [Acedido em 1 Fevereiro 2013].
- [6] P. M. Soares, “Avaliação do Desempenho de Fibras Óticas de Plástico,” (Tese de Mestrado), Instituto Superior Engenharia de Lisboa, 2012.
- [7] L. M. Bilro, “Metrologia Óptica com Fibra Polimérica,” (Tese de Doutoramento), Departamento de Física da Universidade de Aveiro, 2011.
- [8] A. Bastos, C. Pereira, E. Rocha, J. Freitas e J. Santos, “Scribd,” [Online]. Available: <http://pt.scribd.com/doc/8202971/Fibras-Opticas->. [Acedido em 1 Fevereiro 2013].
- [9] P. Polishuk, “Plastic Optical Fibers Branch Out,” 2006. [Online]. Available: <http://www.pofto.com/downloads/ieee/pof.branches.v6.pdf>. [Acedido em 3 Fevereiro 2013].
- [10] “Divisão de bibliotecas e documentação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,” [Online]. Available: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0014235_04_cap_02.pdf. [Acedido em 20 Março 2013].
- [11] “Sistemas de comunicações óticas,” [Online]. Available: <http://www.sj.ifsc.edu.br/~saul/sistemas%20opticos/comunicacoes%20opticas%20I.PDF>. [Acedido em 3 Março 2013].
- [12] J. M. Senior, Optical Fiber Communications Principles and Practice, Pearson Education, 2009.
- [13] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow e D. Werner, POF Handbook Optical Short Range Transmission Systems, 2nd Edition ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

- [14] Info rede, “Paper fibras óticas,” [Online]. Available:
[http://www.inforede.net/Technical/Layer_1/Cabling/Fiber_Optic_1_\(POR\).pdf](http://www.inforede.net/Technical/Layer_1/Cabling/Fiber_Optic_1_(POR).pdf).
[Acedido em 3 Dezembro 2012].
- [15] “Meios de transmissão,” [Online]. Available:
<http://www.lsi.usp.br/~cranieri/pcs2476p1c3.pdf>. [Acedido em 20 Março 2013].
- [16] V. Alwayn, “Cisco - Fiber-Optic Technologies,” [Online]. Available:
<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740&seqNum=7>. [Acedido em 17 Abril 2013].
- [17] Sileccable, “G.655 Singlemode optical fibers,” [Online]. Available:
<http://www.sileccable.com/Portals/france/pdf/en/GB%20G655%20X01%204.pdf>.
[Acedido em 10 Maio 2013].
- [18] The Fiber Optic Association, “Singlemode Fiber Types,” [Online]. Available:
<http://www.thefoa.org/tech/smf.htm>. [Acedido em 10 Maio 2013].
- [19] International Telecommunication Union, “Recommendations: G series,” [Online].
Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/en>. [Acedido em Maio 2013].
- [20] J. Zubia e J. Arrue, “Plastic Optical Fibers: An Introduction to,” 2000. [Online].
Available: <http://infochem.hanyang.ac.kr/files/review1.pdf>. [Acedido em 2013 Fevereiro 3].
- [21] L. Bilro, N. Alberto, J. Pinto e R. Nogueira, “Optical Sensors Based on Plastic Fibers,” [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3478834/>. [Acedido em 17 Abril 2013].
- [22] Optimedia, “PMMA based GI-POF,” [Online]. Available:
http://www.pofac.de/downloads/itgfg/fgt21/FGT21_Oldenburg_Park_GI-POF.pdf.
[Acedido em 17 Abril 2013].
- [23] Asahi Glass Co., Ltd., “The world’s fastest Plastic Optical Fiber,” [Online]. Available:
http://www.lucina.jp/eg_fontex/pdf/Tecnical.pdf. [Acedido em Janeiro 2013].
- [24] Teleco, “Tutoriais Redes Opticas,” [Online]. Available:
http://www.teleco.com.br/imagens/tutoriais/tutorialsdwdm_figura24.gif. [Acedido em 20 Abril 2013].

- [25] L. Kazovsky, N. Cheng, H.-t. Shaw, D. Gutierrez e S.-w. Wong, *Broadband optical access networks*, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [26] N. M. Ferreira, “Análise tecno-económica de serviços,” [Online]. Available: <http://gsbl.det.ua.pt/gsbl/Documentos/Relatorios/MVNO-09-02.pdf>. [Acedido em 3 Dezembro 2012].
- [27] Teleco, “Tutoriais Redes Ópticas,” [Online]. Available: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialsolfo1/pagina_4.asp. [Acedido em 28 Abril 2013].
- [28] F. Neri e J. Finochietto, “Passive Optical Networks,” [Online]. Available: http://materias.fi.uba.ar/7543/download/PON_e1-jorge_finochietto.pdf. [Acedido em 1 Maio 2013].
- [29] PT Inovação, “Plataformas Óticas,” 2011. [Online]. Available: http://eventos.ptinovacao.pt/panorama/pdf/Solucoes_GPON_v1.pdf. [Acedido em 13 Junho 2013].
- [30] C. M. Gonçalves, “GPON/FTTH,” Universidade da Madeira (Tese de Mestrado), 2009.
- [31] Tecra Tools, [Online]. Available: http://www.tecratools.com/pages/fiber/fiber_patchcords.html. [Acedido em Setembro 2013].
- [32] Visint, “Acoplador de fibra óptica,” [Online]. Available: <http://www.fiberopticalproduct.es/3-3-fiber-optical-coupler.html>. [Acedido em Agosto 2013].
- [33] T. J. Carvalho, “Uso das camadas físicas e de acesso para mapeamento de redes PON,” Universidade de Aveiro (Tese Mestrado), 2009.
- [34] R. V. Ribeiro, “Passive Optical Network (PON),” [Online]. Available: http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/rafael_ribeiro/WDM-PON.html. [Acedido em 9 Maio 2013].
- [35] Ligent, “Products: GPON,” [Online]. Available: <http://www.ligentphotonics.com/files/product-list-05.shtml>. [Acedido em 17 Maio 2013].
- [36] International Communication Union, “Recommendation G.984.1,” 2012. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1/>. [Acedido em Maio 2013].

- [37] “VPItransmissionMaker™/VPIcomponentMaker™ Photonic Modules' Manual.”.
- [38] Corning optical fiber, [Online]. Available:
<http://www.corning.com/opticalfiber/products/index.aspx>. [Acedido em 12 Junho 2013].
- [39] M. Dossou, P. Szriftgiser e A. Goffin, “Theoretical study of Stimulated Brillouin Scattering (SBS) in polymer optical fibres,” [Online]. Available: <http://photonics-benelux.org/proc08/s08p175.pdf>. [Acedido em 14 Junho 2013].
- [40] M. Mraković e P. Matavulj, “Analysis of Coexisting GPON and NG-PON1 (10G-PON) Systems,” 2011.
- [41] A. Vukovic, K. Maamoun, H. Hua e M. Savoie, “Performance Characterization of PON Technologies,” [Online]. Available:
http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/Access/PON/PN_07_PON_Technologies.pdf. [Acedido em 1 Fevereiro 2013].
- [42] M. Moura, “Modulação,” [Online]. Available:
http://www.gta.ufrj.br/grad/04_2/Modulacao/index.html#Topic9. [Acedido em 20 Abril 2013].
- [43] L. M. Bilro, “Metrologia Óptica com Fibra Polimérica,” (Tese de Doutoramento), Departamento de Física da Universidade de Aveiro, 2011.