

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

**Avaliação do Desempenho de Fibras Óticas de Plástico**

**PEDRO MIGUEL FERNANDES SOARES**  
(Licenciado)

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

**Orientadores:**

Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes  
Doutor Pedro Renato Tavares de Pinho

**Júri:**

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias

**Vogais:**

Doutor Alexandre Pereira Cabral (FCUL)  
Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes  
Doutor Pedro Renato Tavares de Pinho

**Dezembro de 2012**



*“Eles não sabem, nem sonham,  
que o sonho comanda a vida.  
Que sempre que um homem sonha  
o mundo pula e avança  
como bola colorida  
entre as mãos de uma criança.”*

António Gedeão, Pedra Filosofal



*Aos meus pais.*



## *agradecimentos*

Começo por agradecer à Prof.<sup>a</sup> Paula Louro Antunes e ao Prof. Pedro Pinho pela excelente orientação que me deram para concluir esta dissertação com sucesso, por toda a disponibilidade que tiveram para me ajudar sempre que precisei, nomeadamente na sugestão do melhor caminho a seguir e no esclarecimento de dúvidas.

Ao Telmo Almeida, investigador do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro, que me ajudou na abordagem de problemas relacionados com o simulador VPI, assim como no esclarecimento de questões relacionadas com fibras óticas de plástico e fontes óticas.

Aos meus colegas do ISEL, que de alguma forma contribuíram para a conclusão de disciplinas, principalmente ao meu colega e amigo João Pinto que me acompanhou ao longo de praticamente todo o meu percurso universitário.

A todos os meus amigos que ao longo dos anos me apoiaram, tanto a nível pessoal como académico. Sem querer fazer distinções, nunca esquecerei quem esteve a meu lado nas alturas em que mais precisei.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha família, em particular à minha mãe Lurdes Fernandes por todo o apoio incondicional que sempre me deu, por sempre me incentivar a nunca desistir das dificuldades e por ter sempre acreditado em mim.

*A todos, um obrigado que tende para mais infinito!*



## Resumo

A fibra ótica de plástico (POF) tem despertado um grande interesse nas comunicações de banda larga em curtas distâncias, devido à sua simplicidade de instalação, grande flexibilidade e custo reduzido. Por estas razões consiste numa boa alternativa ao cabo coaxial, de par entrelaçado ou mesmo à fibra ótica de sílica (GOF) multimodo.

As POFs trabalham na região do visível do espectro eletromagnético ao contrário das GOFs que operam no infravermelho. O valor do índice de refração do núcleo de uma POF depende do tipo de material constituinte, em que o mais comum é o polimetilmetacrilato (PMMA) e o polímero de flúor (PF). O perfil do índice de refração do núcleo pode ser índice em degrau (SI) ou índice gradual (GI). Por serem constituídas por materiais poliméricos, a atenuação e dispersão do sinal é muito maior do que nas GOFs, levando a que só possam ser utilizadas em ligações de distâncias inferiores a 1 km.

De forma a fazer a análise do desempenho de sistemas de comunicação ótica com POF, foi utilizado o *software* de simulação VPIphotonics™ com o qual se fez a parametrização dos componentes, nomeadamente a fonte ótica, a fibra e o fotodetector. A qualidade do sinal foi analisada através de figuras de mérito como o BER, o diagrama de olho, o diagrama da constelação QAM e o EVM.

Dos resultados obtidos concluiu-se que a POF Lucina™ é a que apresenta o melhor desempenho para transmissão de dados com elevados débitos binários (até 40 Gbps), devido a ser constituída por PF e ter um perfil do índice de refração do núcleo do tipo GI. Como tal, esta POF foi escolhida para se implementar na simulação de uma arquitetura DVB-c FTTH, juntamente com uma GOF monomodo, onde os sinais QAM transmitidos a partir da central do operador foram recebidos com sucesso na casa do cliente.

Palavras-chave: fibra ótica de plástico (POF), fibra ótica de sílica (GOF), fonte ótica, fotodetector, sistema de comunicação ótica.



## ***Abstract***

*Plastic optical fiber (POF) has attracted a great interest in broadband communications over short distances, due to its ease of installation, great flexibility and lower cost. For these reasons it is a good alternative to coaxial cable, twisted pair or multimode glass optical fiber (GOF).*

*POF works with visible light unlike GOF that operates in the infrared region of the electromagnetic spectrum. The value of the core's refractive index of a POF depends on the constituent material, which the most common is polymethylmethacrylate (PMMA) and perfluorinated polymer (PF). The core's refractive index profile can be step index (SI) or graded index (GI). Because they are made of polymeric materials, the signal's attenuation and dispersion are much higher than in GOFs, causing them to be useful only in links with distances less than 1 km.*

*To analyze the performance of optical communication systems with POF, the VPIphotonics™ simulation software was used to do the parameterization of the components, including the optical source, the fiber and the photodetector. The signal quality was measured by figures of merit such as BER, eye diagram, QAM constellation diagram and EVM.*

*From the results it was concluded that the Lucina™ POF shows the best performance for data transmission at high bit rates (up to 40 Gbps), since it's made up of PF and the core's refractive index profile is GI-type. As such, this POF was chosen to implement the simulation of a DVB-c FTTH architecture, along with a single mode GOF, where QAM signals transmitted from the central office were successfully received at the customer's home.*

*Keywords: plastic optical fiber (POF), glass optical fiber (GOF), optical source, photodetector, optical communication system.*



# Índice

Capítulo 1	Introdução .....	1
1.2	Motivação e objetivos.....	2
1.3	Enquadramento histórico .....	2
1.4	Vantagens e desvantagens.....	5
1.5	Método de instalação .....	6
1.6	Perspetivas de mercado .....	7
1.7	Divulgação em Portugal .....	9
1.8	Estrutura da dissertação .....	9
1.9	Principais contribuições.....	10
Capítulo 2	Fibra Ótica de Plástico .....	11
2.1	Estrutura física .....	11
2.2	Espectro eletromagnético.....	12
2.3	Fundamentos de propagação em fibras óticas .....	12
2.3.1	Refracção e reflexão da luz numa fibra ótica .....	12
2.3.2	Ângulo de aceitação.....	13
2.3.3	Abertura numérica .....	15
2.3.4	Regime monomodal e multimodal (parâmetro $V$ ).....	15
2.4	Tipos de POF .....	16
2.4.1	SI-POF .....	16
2.4.2	MC-POF .....	17
2.4.3	GI-POF .....	17
2.4.4	MSI-POF .....	18
2.4.5	Comparação entre os tipos de POF .....	18
2.4.6	Materiais constituintes .....	20
2.4.6.1	PMMA-POF.....	20
2.4.6.2	PC-POF .....	21
2.4.6.3	PS-POF .....	21
2.4.6.4	PF-POF .....	22
2.5	Técnicas de produção .....	24
2.6	Atenuação .....	24
2.6.1	Fatores intrínsecos .....	26
2.6.1.1	Absorção material – Vibrações moleculares .....	26
2.6.1.2	Absorção material – Transições eletrónicas .....	26
2.6.1.3	Espalhamento de Rayleigh.....	26
2.6.2	Fatores extrínsecos .....	27
2.6.2.1	Absorção material – Metais de transição .....	27
2.6.2.2	Absorção material – Impurezas orgânicas .....	27
2.6.2.3	Radiação – Macrocurvaturas.....	27
2.6.2.4	Radiação – Microcurvaturas .....	28
2.6.2.5	Espalhamento de Mie.....	29

2.7	Dispersão .....	29
2.7.1	Dispersão intramodal (ou cromática).....	30
2.7.1.1	Dispersão material.....	30
2.7.1.2	Dispersão de guia de onda.....	30
2.7.2	Dispersão intermodal .....	31
2.8	Resistência térmica .....	32
2.9	Resistência química .....	32
2.10	Áreas de aplicação .....	32
2.10.1	Automóveis .....	33
2.10.1.1	Normas para automóveis.....	33
2.10.2	Estacionamento assistido por câmaras .....	35
2.10.3	Sensores de colisão.....	36
2.10.4	Interligação de componentes .....	37
2.10.5	Habitações .....	37
2.10.6	LANs domésticas e empresariais.....	38
2.10.7	Controlo industrial.....	39
2.10.8	Iluminação artificial .....	39
2.10.9	Transportes terrestres, aéreos e marítimos.....	40
2.10.10	Medicina.....	40
2.11	Norma IEC 60793-2-40 .....	41
Capítulo 3	Sistema de Comunicação Ótica com POF.....	43
3.1	Componentes de um sistema com POF .....	43
3.2	Fontes óticas .....	44
3.2.1	LEDs.....	44
3.2.1.1	Tipos de LED .....	46
3.2.2	Lasers.....	47
3.2.2.1	Laser Fabry-Perót.....	49
3.2.2.2	Laser DFB.....	50
3.2.2.3	VCSEL.....	51
3.3	Fotodetetores .....	52
3.3.1	Fotodíodo PIN .....	53
3.3.2	Fotodíodo de avalanche .....	53
3.4	Figuras de mérito .....	54
3.4.1	BER .....	55
3.4.2	Diagrama de olho.....	56
3.4.3	Diagrama de constelação QAM.....	57
3.4.4	EVM .....	57
Capítulo 4	Análise do Desempenho de Sistemas com POF.....	59
4.1	Considerações iniciais .....	59
4.2	Introdução ao VPI.....	60
4.2.1	Interface gráfica do simulador .....	60
4.2.2	Interface gráfica do analisador de sinais .....	61

4.2.3	Hierarquia dos módulos.....	62
4.2.4	Principais parâmetros das simulações.....	63
4.2.4.1	Parâmetros individuais.....	64
4.2.4.2	Parâmetros globais.....	65
4.2.4.3	Restrições nos parâmetros globais.....	67
4.3	Arquitetura do sistema.....	67
4.3.1	Primeira simulação.....	68
4.3.2	Melhoramentos no sistema.....	70
4.4	Parametrização do sistema.....	73
4.4.1	Parâmetros da fonte ótica.....	73
4.4.2	Parâmetros do fotodetector.....	78
4.4.3	Parâmetros da fibra ótica.....	79
4.4.4	Parâmetros globais.....	83
4.5	Avaliação do desempenho do sistema.....	84
4.5.1	Avaliação das fontes óticas.....	85
4.5.1.1	Desempenho do LD variando o comprimento de onda.....	85
4.5.1.2	Comparação do desempenho entre fontes óticas.....	88
4.5.2	Avaliação das fibras óticas.....	90
4.5.3	Avaliação de sistemas com POF para transmissão de sinais QAM.....	94
4.5.3.1	Desempenho de um sistema QAM simples.....	94
4.5.3.2	Desempenho de um sistema DVB-c com POF na “última milha”.....	97
Capítulo 5	Considerações Finais.....	107
5.1	Conclusões.....	107
5.2	Trabalho futuro.....	111



# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Instalação de uma POF [5].	7
Figura 1.2 – Despesas efetuadas na tecnologia das POFs, em milhões de dólares [3] (adap.).	8
Figura 1.3 – Total de custos para uma instalação P2P em 2012 (esq.) e em 2020 (dir.) [7] (adap.).	8
Figura 2.1 – Estrutura típica de uma fibra ótica de plástico [9] (adap.).	11
Figura 2.2 – Zonas de operação das POFs e GOFs no espectro eletromagnético [10] (adap.).	12
Figura 2.3 – Refração e reflexão da luz numa fibra ótica [2] (adap.).	13
Figura 2.4 – Cone de aceitação de uma fibra ótica [6] (adap.).	14
Figura 2.5 – Comparação da dimensão do núcleo, bainha e cone de aceitação de GOF e POF [6] (adap.).	14
Figura 2.6 – Estrutura do perfil do índice de refração de uma SI-POF [6].	16
Figura 2.7 – Exemplos de MC-POFs com 37, 217 e 631 núcleos [6].	17
Figura 2.8 – Estrutura do perfil do índice de refração de uma GI-POF [6].	17
Figura 2.9 – Estrutura do perfil do índice de refração de uma MSI-POF [6].	18
Figura 2.10 – Curva de atenuação típica para uma PMMA-POF [13] (adap.).	20
Figura 2.11 – Comparação das curvas de atenuação de POFs de PC e de PMMA [6] (adap.).	21
Figura 2.12 – Curvas de atenuação de PS-POFs [6] (adap.).	22
Figura 2.13 – Curvas de atenuação de PF-POFs [6] (adap.).	23
Figura 2.14 – Evolução histórica de materiais utilizados para produção de POF [6] (adap.).	23
Figura 2.15 – Fabrico de uma POF [6] (adap.).	24
Figura 2.16 – Classificação dos principais fatores responsáveis pela atenuação numa POF.	25
Figura 2.17 – Perdas de radiação por macrocurvatura [2].	28
Figura 2.18 – Perdas de radiação por microcurvaturas [15] (adap.).	28
Figura 2.19 – Alargamento de um impulso devido à dispersão [6] (adap.).	29
Figura 2.20 – Dispersão material, de guia de onda e intramodal de uma SM-GOF [16] (adap.).	30
Figura 2.21 – Efeito da dispersão intermodal em: a) SI-POF, b) GI-POF (parabólica) e c) SM-GOF [3] (adap.).	31
Figura 2.22 – Exemplo de áreas de aplicação das normas num automóvel [19] (adap.).	34
Figura 2.23 – Evolução das normas para o setor automóvel ao longo dos anos [6] (adap.).	35
Figura 2.24 – Veículo pesado de mercadorias com sistema de estacionamento assistido por câmaras [6] (adap.).	36
Figura 2.25 – Sensor para colisão de peões num automóvel (a) e sua estrutura (b) [6] (adap.).	36
Figura 2.26 – Interligação de dois <i>chips</i> de uma <i>motherboard</i> através de POFs em paralelo [6].	37
Figura 2.27 – Habitação com tecnologia POF [21] (adap.).	38
Figura 2.28 – Exemplos de equipamentos de LAN Ethernet com interfaces para POF [6] (adap.).	38
Figura 2.29 – Equipamentos de uma fábrica interligados por POF [22] (adap.).	39
Figura 2.30 – Utilização de POFs para iluminação artificial [6].	39
Figura 2.31 – Exemplos de transportes que usam ou podem vir a incorporar POFs [23] [24] [25] [26] [27].	40
Figura 2.32 – Aparelho para medir a tensão arterial, com POF incorporada [28].	41
Figura 3.1 – Exemplo de um sistema de comunicação ótica com POF [6].	44
Figura 3.2 – Junção <i>pn</i> [31] (adap.).	45
Figura 3.3 – Estrutura de um LED [34] (adap.).	45
Figura 3.4 – Emissão espontânea (esq.) vs. emissão estimulada (dir.) [33] (adap.).	47
Figura 3.5 – Estrutura de um laser [38] (adap.).	48
Figura 3.6 – Exemplo de um sistema de comunicação ótica com modulação externa [6] (adap.).	49
Figura 3.7 – Comparação da largura espectral entre SM-LD, MM-LD e LED [39] (adap.).	50
Figura 3.8 – Estrutura de um DFB-LD [33] (adap.).	50
Figura 3.9 – Estrutura de um VCSEL [6] (adap.).	51
Figura 3.10 – Estrutura de um PIN-PD [34] (adap.).	53
Figura 3.11 – Estrutura de um APD [34] (adap.).	53
Figura 3.12 – Codificação NRZ [44] (adap.).	55
Figura 3.13 – Diagrama de olho [44] (adap.).	56
Figura 3.14 – Diagrama de uma constelação 16-QAM [47].	57
Figura 3.15 – Constelação 16-QAM com distorção [46] (adap.).	58
Figura 4.1 – Interface gráfica do simulador (VPItransmissionMaker™ 8.5).	60
Figura 4.2 – Interface gráfica do analisador de sinais (VPIphotonicsAnalyzer™ 8.5).	62
Figura 4.3 – Hierarquia do VPI [50].	63
Figura 4.4 – Janela de edição de parâmetros do módulo <i>MultiModeFiber.vtms</i> .	64

Figura 4.5 – Janela de edição de parâmetros globais .....	65
Figura 4.6 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicação ótica com POF .....	67
Figura 4.7 – Sistema utilizado na primeira simulação .....	68
Figura 4.8 – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação .....	69
Figura 4.9 – Sistema utilizado na primeira simulação melhorado .....	70
Figura 4.10 – Função do módulo <i>RiseTimeAdjust.vtms</i> [52] .....	70
Figura 4.11 – Função do módulo <i>FilterEl.vtms</i> (modo LPF) [53] (adap.) .....	71
Figura 4.12 – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação melhorada (sinal elétrico de <i>input</i> )... 71	
Figura 4.13 – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação melhorada (diagrama de olho) .....	72
Figura 4.14 – Arquitetura do sistema com LED .....	74
Figura 4.15 – Arquitetura do sistema com LD .....	74
Figura 4.16 – Arquitetura do sistema com VCSEL .....	74
Figura 4.17 – Interior do módulo <i>LED_WDM.vtmg</i> .....	75
Figura 4.18 – Parametrização de uma fonte ótica no VPI, neste caso o LD (monomodo) .....	78
Figura 4.19 – Parametrização de um fotodetector no VPI, neste caso o PIN 1 (@ 650 nm) .....	79
Figura 4.20 – Parametrização de uma POF no VPI, neste caso a POF Lucina .....	81
Figura 4.21 – Exemplo de parâmetros globais, neste caso para o sistema com LED .....	83
Figura 4.22 – Desempenho do LD para vários comprimentos de onda, com $l = 100$ metros .....	86
Figura 4.23 – Desempenho do LD para vários comprimentos de onda, com $l = 500$ metros .....	86
Figura 4.24 – Desempenho do LD para vários comprimentos de onda, com $l = 1000$ metros .....	87
Figura 4.25 – Comparação do desempenho entre fontes óticas, com $l = 100$ metros .....	88
Figura 4.26 – Comparação do desempenho entre fontes óticas, com $l = 500$ metros .....	89
Figura 4.27 – Comparação do desempenho entre fontes óticas, com $l = 1000$ metros .....	89
Figura 4.28 – Comparação do BER entre fibras óticas com um comprimento de 100 metros .....	91
Figura 4.29 – Comparação do BER entre fibras óticas com um comprimento de 500 metros .....	92
Figura 4.30 – Comparação do BER entre fibras óticas com um comprimento de 1000 metros .....	92
Figura 4.31 – Arquitetura convencional de um sistema de transmissão de sinais QAM por POF .....	94
Figura 4.32 – Sinal 64-QAM transmitido por uma POF de 1 (a), 2 (b) e 3 (c) metros, sem correção de atraso .....	95
Figura 4.33 – Arquitetura típica do método de correção de fase de um sinal QAM [64] .....	96
Figura 4.34 – Arquitetura de um sistema de transmissão de sinais QAM por POF, com correção de fase ... 96	
Figura 4.35 – Sinal 64-QAM transmitido por uma POF de 100 metros, com correção de atraso .....	97
Figura 4.36 – Arquitetura de uma rede HFC [65] (adap.) .....	98
Figura 4.37 – Arquitetura de uma rede FTTH [66] (adap.) .....	98
Figura 4.38 – ONT da <i>Alcatel</i> instalado na casa de um cliente [67] (adap.) .....	99
Figura 4.39 – Arquitetura do sistema dentro da casa do cliente [66] (adap.) .....	100
Figura 4.40 – Parâmetros globais para simulação com QAM, neste caso para 64-QAM .....	101
Figura 4.41 – Arquitetura do sistema FTTH com transmissão de sinais 64-QAM e 256-QAM, no sentido DL .....	103
Figura 4.42 – Arquitetura do sistema FTTH com transmissão de sinais 16-QAM, no sentido UL .....	104
Figura 4.43 – Espectro ótico (a) e EVM da constelação (b) obtidos para a transmissão 16-QAM em UL .....	104
Figura 4.44 – Espectro ótico (a) e EVM da constelação (b) obtidos para a transmissão 64-QAM em DL .....	105
Figura 4.45 – Espectro ótico (a) e EVM da constelação (b) obtidos para a transmissão 256-QAM em DL .....	105

# Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Principais acontecimentos na tecnologia das POFs, por ordem cronológica [2] [3] [4].....	4
Tabela 1.2 – Comparação das características entre cabo de cobre, fibra ótica de plástico e de sílica [3]. .....	6
Tabela 2.1 – Características de transmissão de POFs conforme o seu perfil do índice de refração do núcleo [1]. .....	19
Tabela 2.2 – Exemplos de POFs disponíveis a nível comercial [6] (adap.).....	19
Tabela 2.3 – Fatores e limites de atenuação para três tipos de POF [1]. .....	25
Tabela 2.4 – Principais especificações da norma IEC 60793-2-40 [29] [30]. .....	42
Tabela 4.1 – Características comuns das fontes óticas utilizadas no âmbito de comunicação por POF [6] [54] (adap.).....	76
Tabela 4.2 – Parametrização dos módulos das fontes óticas no VPI. ....	77
Tabela 4.3 – Parametrização dos módulos dos fotodetetores no VPI [6] [56]. .....	79
Tabela 4.4 – Principais características das POFs utilizadas [51]. .....	80
Tabela 4.5 – Principais características das GOFs utilizadas [57] [58] [59] [60]. .....	82
Tabela 4.6 – Parametrização dos módulos das fibras óticas no VPI. ....	83
Tabela 4.7 – Parâmetros globais para as simulações com QAM. ....	102



# Lista de Acrónimos

AGC	<i>Asahi Glass Co., Ltd.</i>
APD	<i>Avalanche PhotoDiode</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BMW	<i>Bayerische Motoren Werke</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CATV	<i>Cable TeleVision</i>
CYTOP	<i>CYclic Transparent Optical Polymer</i>
D2B	<i>Domestic Digital Bus</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DFB	<i>Distributed FeedBack</i>
DL	<i>DownLink</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DVB-c	<i>Digital Video Broadcast – cable</i>
EAM	<i>Electro-Absorption Modulator</i>
ECOC	<i>European Conference and Exhibition on Optical Communication</i>
ELED	<i>Edge emitting LED</i>
EOM	<i>Electro-Optic Modulator</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FB	<i>Floor Box</i>
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FP	<i>Fabry-Pérot</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
GI	<i>Graded Index</i>
GOF	<i>Glass Optical Fiber</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
HDMI	<i>High-Defintion Multimedia Interface</i>
HDTV	<i>High-Defintion Television</i>
HFC	<i>Hybrid Fiber Coax</i>
HSPN	<i>High Speed POF Network</i>
I	<i>In-phase</i>
IDB	<i>ITS (IEEE Transactions on intelligent transportation Systems) Data Bus</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEM	Interferência EletroMagnética
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>IP TeleVision</i>
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

ISI	<i>InterSymbol Interference</i>
KAIST	<i>Korea Advanced Institute of Science and Technology</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LD	<i>Laser Diode</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LPF	<i>Low-Pass Filter</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MC	<i>Multi Core</i>
MM	<i>MultiMode</i>
MOST	<i>Media Orientated Systems Transport</i>
MRS	<i>Materials Research Society</i>
MSAN	<i>Multi-Service Access Node</i>
MSI	<i>Multi Step Index</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
NEC	<i>Nippon Electric Company</i>
NFOEC	<i>National Fiber Optic Engineers Conference</i>
NRZ	<i>Non Return to Zero</i>
NTT	<i>Nippon Telegraph and Telephone corporation</i>
ODF	<i>Optical Distribution Frame</i>
OFC	<i>Optical Fiber Communication</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
P2P	<i>Point-To-Point</i>
PC	<i>PolyCarbonate ou Personal Computer</i>
PDO	<i>Ponto de Distribuição Ótico</i>
PE	<i>PolyEthylene</i>
PF	<i>PerFluorinated</i>
PIN-PD	<i>PIN PhotoDiode</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PMMA	<i>PolyMethylMethAcrylate</i>
POF	<i>Plastic Optical Fiber</i>
PRBS	<i>PseudoRandom Bit Sequence</i>
PS	<i>PolyStyrene</i>
PVC	<i>PolyVinyl Chloride</i>
Q	<i>Quadrature</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RC-LED	<i>Resonant Cavity LED</i>

RF	<i>Radio Frequency</i>
SDTV	<i>StanDard TeleVision</i>
SI	<i>Step Index</i>
SLED	<i>Surface emitting LED</i>
SM	<i>Single Mode</i>
SRO	<i>Sub-Repertidor Ótico</i>
STB	<i>Set-Top Box</i>
TC	<i>Transmission &amp; Component</i>
TDT	<i>Televisão Digital Terrestre</i>
TLM	<i>Transmission Like Matrix</i>
UL	<i>UpLink</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
VCSEL	<i>Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser</i>
VoD	<i>Video-on-Demand</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VPI	<i>Virtual Photonics Integrated</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>



# Lista de Símbolos

$a$	Raio do núcleo da fibra ótica [m]
$B.L$	Produto entre largura de banda e comprimento [Hz.m]
$c$	Velocidade da luz no vácuo ( $3.10^8$ [m/s])
$e$	Carga do elétron ( $1,6.10^{-19}$ [C])
$E_g$	Hiato energético [eV]
$f_c$	Frequência central [Hz]
$f_{max}$	Frequência máxima [Hz]
$h$	Constante de Planck ( $6,63.10^{-34}$ [J/s])
$I_{ph}$	Fotocorrente [A]
$I_{ph(M)}$	Fotocorrente multiplicada [A]
$I_{th}$	Corrente de <i>threshold</i> [A]
$l$	Comprimento da fibra ótica [m]
$M$	Número de modos propagados
$M_{APD}$	Ganho da multiplicação por avalanche
$n$	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
$N^{\circ}amostras$	Número de amostras do sinal
$N^{\circ}símbolos$	Número de símbolos da constelação QAM
$\emptyset$	Diâmetro do núcleo da fibra ótica [m]
$\overline{P_{erro}}$	Potência média do erro [W]
$\overline{P_{ideal}}$	Potência média do sinal ideal [W]
$P_{in}$	Potência do sinal à entrada [W]
$P_{out}$	Potência do sinal à saída [W]
$\mathfrak{R}$	Responsividade do fotodetector [A/W]
$R_b$	Débito binário [bps]
$SR$	Débito de símbolo [Sps]
$t_{in}$	Período de tempo do impulso à entrada da fibra ótica [s]
$t_{out}$	Período de tempo do impulso à saída da fibra ótica [s]
$V$	Frequência normalizada
$v_n$	Velocidade da luz num meio [m/s]
$\alpha$	Coefficiente de atenuação (linear) [ $m^{-1}$ ]
$\alpha_{dB}$	Coefficiente de atenuação (dB) [dB/m]
$\Delta$	Contraste
$\eta$	Eficiência do fotodetector
$\theta_a$	Ângulo de aceitação [ $^{\circ}$ (graus)]

$\theta_c$	Ângulo crítico [° (graus)]
$\theta_i$	Ângulo de incidência [° (graus)]
$\theta_r$	Ângulo de reflexão [° (graus)]
$\theta_t$	Ângulo de refração [° (graus)]
$\lambda$	Comprimento de onda [m]

# Capítulo 1

---

## Introdução

### 1.1 O que é a fibra ótica de plástico?

Nos dias de hoje, cada vez mais se ouve falar na necessidade de aquisição de altos débitos binários para transferência de dados. Com o contínuo desenvolvimento das comunicações multimédia (vídeo, áudio, voz, dados) requer-se que haja um avanço no domínio dos meios de transmissão. Estes requisitos devem-se ao facto do número de utilizadores deste tipo de serviços estar sempre a aumentar, assim como a própria dimensão dos dados a ser transmitidos. Num futuro próximo, estima-se que os requisitos mínimos para as aplicações domésticas sejam da ordem dos 100 Mbps a 1 Gbps [1].

No que diz respeito à transferência de dados em curtas distâncias, os meios metálicos de transmissão (cabo coaxial, par entrelaçado, etc.) suportam débitos binários limitados e não garantem a imunidade a interferências eletromagnéticas, para além dos seus custos poderem ser um pouco elevados. Com o aparecimento das fibras óticas de sílica, muitas das anteriores limitações puderam ser ultrapassadas, embora a questão dos custos elevados continuasse a ser um inconveniente. Todas estas condições fizeram com que se realizassem pesquisas em meios físicos alternativos, estando a tecnologia das fibras óticas baseada em materiais poliméricos entre as possíveis candidatas. É por estas razões que nos últimos anos as fibras óticas de plástico (tipo de polímero) têm chamado a atenção das áreas científicas e comerciais, impulsionando a sua investigação e desenvolvimento para aplicações onde estas possam ter um bom desempenho.

A fibra ótica de plástico (POF) não surgiu com o intuito de um dia poder substituir a fibra ótica de sílica monomodo, uma vez que as características físicas da fibra de plástico não são adequadas para a comunicação a longa distância. Pelo contrário, as POFs consistem numa boa alternativa futura para as ligações a curtas distâncias (até cerca de 1 km), podendo substituir com sucesso os cabos coaxiais, os de par entrelaçado ou até as fibras óticas de sílica multimodo. Para além disto, as POFs têm ainda as vantagens de serem leves e flexíveis, para além de não sofrerem efeitos prejudiciais às comunicações causados pelo ruído eletromagnético, entre outras [1].

## 1.2 Motivação e objetivos

Pelas razões anteriores, o tema da avaliação do desempenho das POFs tendo como fim uma possível implementação tanto a nível empresarial como doméstico, apresenta uma boa motivação para o estudo das mesmas.

Assim, a presente dissertação tem dois objetivos principais. O primeiro passa pela pesquisa relativa ao estado da arte sobre as fibras óticas de plástico, assim como os componentes necessários para a sua implementação num sistema de comunicação ótica. O segundo passa por, a partir da recolha do máximo de informação adquirida na primeira fase, se proceder à realização de testes com vista a determinar o desempenho dos componentes dos sistemas apresentados. Estes cenários de avaliação serão elaborados na ferramenta de simulação VPIphotonics™, a qual permite testar e parametrizar os diversos componentes de um sistema de comunicação ótica. Após a elaboração de vários cenários de teste, poderão ser retiradas conclusões quanto aos melhores parâmetros a ser utilizados em cada caso.

## 1.3 Enquadramento histórico

Quando se fala em fibra ótica, normalmente associa-se o termo ao tipo mais utilizado no mundo atualmente, que é a fibra ótica de sílica (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 fibras óticas de plástico, em 1955. A razão pela qual, inicialmente, as POFs não conquistaram a atenção da comunidade científica foi porque as GOFs apresentavam muito mais vantagens, nomeadamente devido à sua baixa atenuação. Algumas das características das POFs que as fizeram começar a

ser consideradas como uma alternativa possível para os meios de comunicação de dados são, em grande parte, devido aos baixos custos dos materiais (polímeros), da sua produção e da instalação e manutenção das mesmas.

O primeiro material usado para fazer uma POF foi o polimetilmetacrilato (PMMA). Trata-se de um material termoplástico rígido e transparente, que também é conhecido como “vidro acrílico”. As POFs de PMMA tiveram a sua origem no início da década de 60, tendo sido divulgadas inicialmente pela empresa *Pilot Chemical of Boston* e mais tarde pela *DuPont*, uma das maiores empresas de fabrico de produtos químicos do mundo, entre eles os polímeros.

Depois de muitos anos de desenvolvimento, em 1978, a *DuPont* decidiu vender o negócio das POFs à empresa japonesa *Mitsubishi Rayon*, estando na altura o nível de atenuação em cerca de 1000 dB/km. Nos anos seguintes, esta empresa conseguiu reduzir os índices de atenuação para 300 dB/km (a 650 nm) e pôs à venda no mercado a primeira POF de índice em degrau com PMMA (PMMA-SI-POF) denominada de ESKA™. Com esta fibra conseguiu-se um débito binário de 50 Mbps (em 100 metros). Em 1983, as empresas *Toray*, *Asahi Chemical* e NTT, que hoje em dia detêm 90% do mercado das POFs, investiram na comercialização desta tecnologia. Nessa altura, a atenuação das fibras de plástico tinha alcançado valores mínimos de 55 dB/km (a 568 nm).

O principal desenvolvimento seguinte foi feito em 1990 pelo Prof. Koike *et al.* na Universidade de Keio (em Tóquio), onde desenvolveram um processo para fabricar POFs de índice gradual com PMMA (PMMA-GI-POF). Foi registada uma capacidade de transmissão de 3 GHz.km com perdas de 150 dB/km (a 650 nm). Os progressos de Koike foram importantes, mas não resolveram o problema da atenuação que continuava a ser elevada.

O grande passo seguinte foi o desenvolvimento de uma POF de índice gradual com polímero de flúor (PF-GI-POF), que também foi criada por Koike *et al.* na Universidade de Keio, em 1995. Esta fibra tinha perdas inferiores a 50 dB/km para comprimentos de onda de 650 a 1300 nm. Em 2001, foi apresentada a primeira POF microestruturada resultante de uma cooperação entre grupos de investigação da Austrália e da Coreia. Em 2004, a primeira PMMA-GI-POF tornou-se disponível no mercado pela empresa coreana *Optimedia Company*. A PF-GI-POF tornou-se disponível apenas em 2005 pela *Chromis Optical Fiber*, uma empresa emergente da *Optical Fiber Solutions* e da *Bell Laboratories*, que licenciou a produção da fibra ótica Lucina™ da *Asahi Glass*. A *Chromis* desenvolveu então um processo de produção contínuo para o fabrico de PF-GI-POF que permitia a

produção de POF de alta qualidade a baixo custo [2].

Na Tabela 1.1 são apresentados os principais acontecimentos, ordenados cronologicamente, relativos à tecnologia das POFs.

Tabela 1.1 – Principais acontecimentos na tecnologia das POFs, por ordem cronológica [2] [3] [4].

Ano	Acontecimento
1968	A <i>DuPont</i> desenvolve a primeira POF em PMMA.
1978	A <i>DuPont</i> vende todos os produtos e patentes à <i>Mitsubishi Rayon</i> .
1990	O Prof. Koike da Universidade de Keio anuncia o desenvolvimento de uma PMMA-GI-POF com capacidade de transmissão de 3 GHz.km.
1992	O Prof. Koike <i>et al.</i> anunciam que foram atingidos 2,5 Gbps em 100 m de POF, utilizando laser vermelho.
1992	O Prof. Koike anuncia o desenvolvimento de uma PMMA-GI-POF com capacidade de transmissão superior a 19 GHz.km.
1993	Sasaki <i>et al.</i> desenvolvem um amplificador ótico em POF.
1994	A entidade DARPA atribui um prémio a uma rede em POF de alto débito (HSPN).
1995	O Prof. Koike <i>et al.</i> , em parceria com a KAIST, desenvolvem a primeira POF em PF.
1997	Yamazaki, da empresa NEC, divulga uma POF para uma ligação IEEE1394 com débito de 400 Mbps em 70 m.
1997	A <i>Asahi Glass</i> apresenta uma PF-GI-POF com cerca de um terço das perdas de potência associadas às convencionais PMMA-GI-POFs.
1997	Imai, da Fujitsu, anuncia 2,5 Gbps em 200 m de GI-POF, utilizando um FP-LD, InGaAs e laser <i>Fabry-Pérot</i> de 1300 nm.
1999	A <i>Lucent</i> anuncia 11 Gbps em 100 m de POF Lucina™ (PF-GI-POF).
2001	A <i>Redfern Optics</i> e a KAIST anunciam o desenvolvimento da primeira POF de cristais fotónicos.
2002	A norma IEEE1394b foi redefinida e a IDB-1394 foi concluída.
2004	Primeira PMMA-GI-POF disponível comercialmente, anunciada na POF 2004.
2005	Primeira PF-GI-POF disponível comercialmente, anunciada pela <i>Chromis Fiberoptics</i> .
2008	Polley e Nuccio <i>et al.</i> apresentam nas conferências OFC/NFOEC e ECOC, respetivamente, a possibilidade de transmitir 40 Gbps em 100 m, em sistemas baseados em POF Lucina™ [2].
2010	A AGC apresenta a Fontex™, uma PF-GI-POF baseada no polímero CYTOP®, que com uma estrutura com dupla bainha reduz as perdas de potência associadas às curvaturas [2].
2012	Em setembro de 2012 decorre na Geórgia a POF 2012, onde participantes de todo o mundo discutem avanços científicos e aplicações para as POFs em áreas como a Gigabit POF, POFs para altas temperaturas, setor automóvel e aeroespacial, redes domésticas, IPTV, aparelhos para o consumidor, sensores de POF, entre outros [4].

## 1.4 Vantagens e desvantagens

De seguida, apresentam-se vantagens e desvantagens no uso de fibras óticas de plástico, em detrimento de outros meios de transmissão como os cabos de cobre (coaxial, par entrelaçado, etc.) ou a fibra ótica de sílica [3].

De entre as vantagens destacam-se:

- Componentes mais simples e menos dispendiosos;
- Mais leves;
- Operação no domínio do visível (permite visualizar a olho nu o sinal transmitido);
- Abertura numérica grande (acoplamento com a fonte ótica mais simples);
- Maior flexibilidade e capacidade de resistência às dobras do cabo, choques e vibrações;
- Imunidade às interferências eletromagnéticas (IEM);
- Facilidade no manuseamento e conectorização (as POFs têm diâmetros de cerca de 1 mm em comparação com os 8 – 100  $\mu\text{m}$  das fibras de sílica);
- Utilização de equipamento de teste simples e barato;
- Maior segurança do que a fibra de sílica (a constituição de plástico é mais segura de manusear do que a de vidro);
- Os *transceivers* das POFs requerem baixos custos energéticos.

Algumas das desvantagens são:

- Grandes perdas durante a transmissão (em comparação com as GOFs);
- Existem poucos fornecedores para todos os componentes do sistema;
- Falta de normas;
- Falta de conhecimentos da sua utilidade por parte dos utilizadores;
- Produção limitada;
- Investigação nas áreas de possível aplicação está incompleta;
- Programas de certificação incompletos por parte dos instaladores;
- Falta de fibras com suporte a altas temperaturas ( $> 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Para se perceber melhor as diferenças entre os cabos de cobre, as fibras óticas de plástico e as de sílica, foi elaborada a Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Comparação das características entre cabo de cobre, fibra ótica de plástico e de sílica [3].

	Cobre	POF	GOF
Custo dos componentes	Baixo	Relativamente baixo	Elevado
Atenuação	Elevada	Média (distâncias curtas)	Baixa (distâncias longas)
Dificuldade de instalação	Algum tempo para instalar; requer experiência e ferramentas especiais	Fácil de instalar; não requer muita experiência nem ferramentas especiais	Mais tempo para instalar; requer muita experiência e ferramentas especiais
Manuseamento	Fácil	Fácil	Requer experiência e cuidados especiais
Flexibilidade	Flexível	Muito flexível	Frágil
Zona espectral de funcionamento (aprop.)	Ondas rádio	Visível	Infravermelho
Abertura numérica	n. a.	Elevada (0,5)	Baixa (0,1 – 0,2)
Débito binário	Algumas centenas de Mbps em curtas distâncias	Algumas dezenas de Gbps em curtas distâncias	Várias dezenas de Gbps em longas distâncias
Custo do equip. de teste	Médio	Relativamente baixo	Caro
Custo total do sistema	Médio	Baixo	Elevado

## 1.5 Método de instalação

No âmbito das redes domésticas, com a POF é muito mais fácil fazer-se a instalação. Por exemplo, um utilizador vulgar consegue facilmente ligar um conversor eletro-ótico a uma POF em cerca de dois minutos, necessitando apenas de conhecimentos básicos e de uma ferramenta que custa cerca de 5 € ou, caso não se pretenda ser tão minucioso, pode-se mesmo utilizar uma tesoura normal [5].

Na Figura 1.1 está ilustrado o exemplo dos passos a seguir para a instalação de uma POF.

1. Cortar a POF com o comprimento desejado



2. Separar as fibras



3. Inserir a POF no *OptoLock*<sup>®</sup>



4. Pressionar para o encaixe



Figura 1.1 – Instalação de uma POF [5].

Como se pode ver pela Figura 1.1, começa-se por cortar a POF com o comprimento que se pretende, com o aparelho de corte apresentado na imagem (1) ou simplesmente com uma tesoura. Depois, separam-se à mão as fibras de transmissão e receção (2) da POF *duplex* (duas fibras em paralelo). De seguida, introduzem-se ambas as fibras nas entradas do conversor eletro-ótico *OptoLock*<sup>®</sup> (3). Por fim, basta fazer-se uma ligeira pressão para que o terminal fique devidamente encaixado no *OptoLock*<sup>®</sup> (4).

No caso da GOF, para se fazer uma junção ou conectorização é necessário uma pessoa experiente e uma máquina que pode ser extremamente cara. As fibras em si têm aproximadamente o mesmo custo, e os *transceivers* (para débitos iguais) custam sensivelmente o mesmo para os dois tipos de fibra. No entanto, uma das principais razões que levam a GOF a não ser usada em mais áreas de aplicação, é devido aos custos elevados para a instalação da mesma [3].

## 1.6 Perspetivas de mercado

Ao contrário das GOFs, que são principalmente usadas no âmbito das telecomunicações, as POFs têm aplicações em muitas áreas. As duas principais indústrias de aplicação das POFs são o setor automóvel e o controlo industrial [3].

Na Figura 1.2 estão apresentados os principais mercados a nível global, em milhões

de dólares, onde as despesas efetuadas em produtos relacionados com a tecnologia das POFs foram mais significativas.

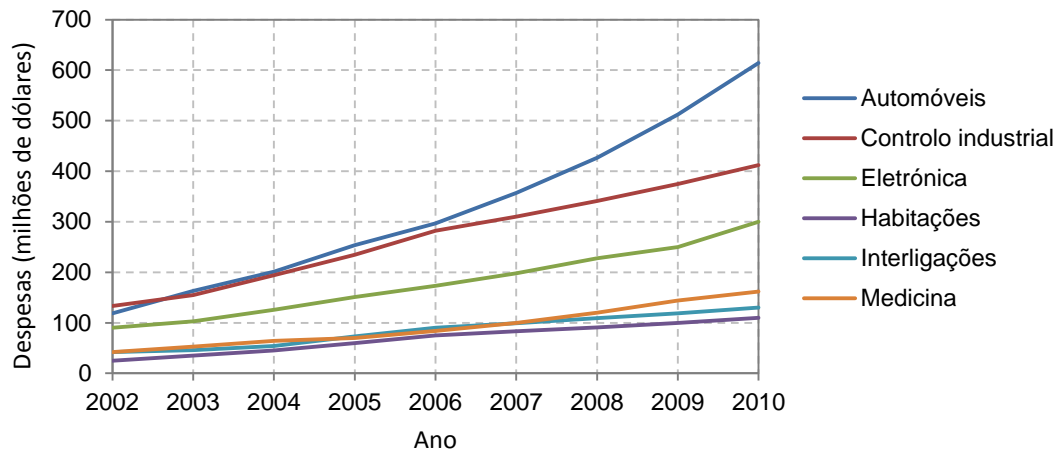


Figura 1.2 – Despesas efetuadas na tecnologia das POFs, em milhões de dólares [3] (adap.).

Como se pode verificar pelo gráfico, o mercado automóvel e o de controlo industrial são as áreas com maior predominância, mantendo-se ambas com receitas anuais muito próximas entre o ano de 2002 a 2006. No entanto, a partir de 2006 deu-se o *boom* no setor automóvel, que se mantém até hoje como a maior fonte de receita para os fabricantes de POF. Num âmbito geral, pode-se observar que de ano para ano existe um aumento contínuo do total de despesas efetuadas em produtos desta área tecnológica, consistindo por isso num mercado em franca expansão.

Mais de 20 países costumam ter presença assídua nas conferências a nível mundial sobre POF, entre os quais o Japão, a Coreia, a Alemanha, a França, o Reino Unido, os EUA e o Brasil têm sedes internacionais dos grupos de cooperação para o desenvolvimento desta tecnologia [6].

Na Figura 1.3 pode-se observar dois gráficos de barras, onde se faz uma comparação dos custos atuais e futuros de diferentes tipos de cabos existentes.

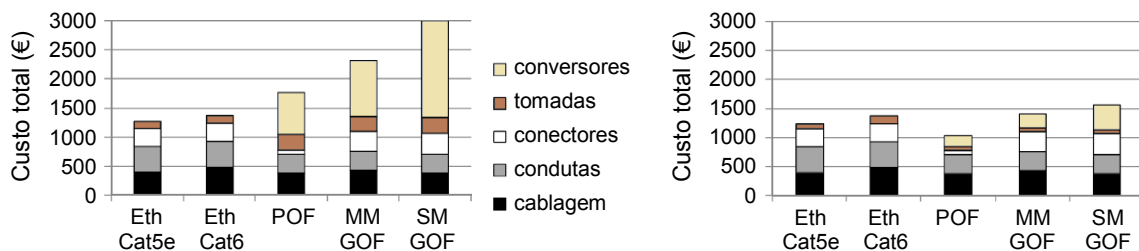


Figura 1.3 – Total de custos para uma instalação P2P em 2012 (esq.) e em 2020 (dir.) [7] (adap.).

Como se pode observar, atualmente os custos totais para a implementação de uma arquitetura ponto-a-ponto (P2P) são ainda mais baixos se esta for feita através de cabo Ethernet Cat5e ou Cat6, já que para as fibras óticas são necessários conversores eletro-óticos. Visto que a tendência é para que no futuro o domínio elétrico seja substituído pelo ótico, pelas estimativas, no ano de 2020 os preços irão reduzir-se de tal forma que as ligações através de POF terão a melhor relação qualidade/preço.

## 1.7 Divulgação em Portugal

A Portugal Telecom iniciou em 2009 testes de fibra ótica de plástico para soluções de aplicações de redes domésticas de IPTV. Os ensaios basearam-se em tecnologia de rede de fibra ótica da empresa irlandesa *Firecomms* e da japonesa *Mitsubishi Rayon*.

A tecnologia *OptoLock*<sup>®</sup> da *Firecomms* e a *Optohome* constituem a principal base dos ensaios para o uso de POFs em redes domésticas. Foram feitos testes de laboratório com análise técnica, seguidos por instalações domésticas nas casas dos portugueses. A *OptoLock*<sup>®</sup> está habilitada para *Set-top Boxes* com suporte IP fornecidas pela *Cisco*, e *gateways* residenciais (*home gateways*) fornecidos pela *Thomson*. Para além destes, foram ainda testados *switches POF Homefibre multipart* da *Netgear* e conversores de multimédia [8].

Com a conclusão destes testes pôde-se começar a disponibilizar em Portugal os serviços *Triple Play* (televisão, telefone e Internet), levando o sinal ótico desde a central do operador até à casa do cliente através de uma arquitetura *Fiber To The Home* (FTTH). O papel da POF consiste em fazer a ligação na “última milha”, a qual anteriormente era feita através de cabo coaxial.

## 1.8 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema, onde é explicado como surgiram as fibras óticas de plástico e quais as suas principais vantagens em detrimento de outros meios de comunicação já existentes.

O segundo capítulo é completamente dedicado às POFs, no qual é feita uma pequena introdução aos fundamentos de propagação da luz em fibras óticas, seguido da

apresentação dos vários tipos de POFs existentes, referindo as principais causas de perdas de sinal nestas fibras e finalizando com as principais áreas de aplicação das mesmas.

No terceiro capítulo é feita uma abordagem teórica relativamente à implementação de uma POF num sistema de comunicação ótica, sendo referidos os principais componentes utilizados com estas fibras e as figuras de mérito necessárias para a avaliação do sistema.

O quarto capítulo é dedicado à parte prática desta dissertação, onde foi feita a parametrização dos componentes e os testes no simulador que permitiram fazer a avaliação do desempenho das POFs em diferentes sistemas.

O quinto capítulo é dedicado às conclusões finais mais importantes retiradas através dos conhecimentos adquiridos após a realização de todo o trabalho, e apresenta alguns tópicos para trabalho futuro.

## 1.9 Principais contribuições

As principais contribuições científicas do trabalho descrito nesta dissertação são:

- Abordagem teórico-prática extensiva sobre fibras óticas de plástico;
- Cenários testados através do simulador VPIphotonics™, sobre o qual se tentou sempre transmitir o máximo de informação das configurações efetuadas.

Para além disto, foram submetidos para publicação os seguintes artigos:

- P. Louro, P. Soares, H. Ferraz, P. Pinho, M. Vieira, “Design of an optical WDM transmission link using plastic optical fibers”, MRS Spring Meeting 2013 (Symposium A), 1 – 5 de abril de 2013, São Francisco, EUA. (resumo)
- Pedro Soares, Pedro Pinho, P. Louro Antunes, “Performance Comparison of Plastic and Glass Optical Fibers”, ConfTele-2013, 8 – 10 de maio de 2013, Castelo Branco, Portugal.
- Pedro Soares, Pedro Pinho, P. Louro Antunes, “Transmission of QAM signals over a DVB-c FTTH network with Plastic Optical Fiber in the “last mile””, ConfTele-2013, 8 – 10 de maio de 2013, Castelo Branco, Portugal.

## Capítulo 2

# Fibra Ótica de Plástico

### 2.1 Estrutura física

Começando por analisar a sua estrutura física, as fibras óticas de plástico diferenciam-se das fibras óticas de sílica por serem feitas a partir de polímeros, serem mais maleáveis fisicamente e terem um núcleo muito maior.

Os materiais poliméricos mais utilizados para o fabrico de POF são o polimetilmetacrilato (PMMA), o policarbonato (PC), o poliestireno (PS) e o polímero de flúor (PF) [1]. As características constituintes destes materiais serão analisadas com maior pormenor na secção 2.4.6. Para além destes materiais que são usados para fabricar o núcleo e a bainha, numa POF encontram-se revestimentos que podem ser feitos de polietileno (PE) ou policloreto de vinil (PVC).

Na Figura 2.1 está ilustrada a estrutura típica de uma fibra ótica de plástico.

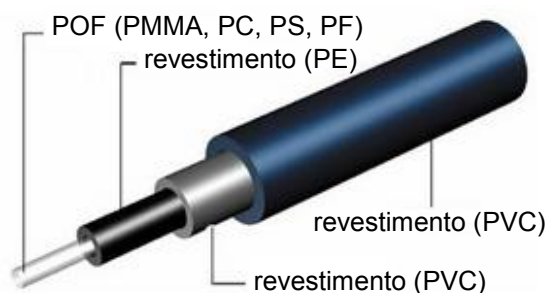


Figura 2.1 – Estrutura típica de uma fibra ótica de plástico [9] (adap.).

## 2.2 Espectro eletromagnético

Os intervalos de interesse do espectro eletromagnético no que diz respeito às comunicações óticas, situam-se nas zonas da radiação infravermelha (850 – 1600 nm) para as fibras óticas de sílica e da visível (520 – 650 nm) para as fibras óticas de plástico, visto que é nestas regiões que se verifica uma menor atenuação do sinal [6].

Pela Figura 2.2 pode-se observar a zona de operação das POFs e das GOFs no espectro eletromagnético.

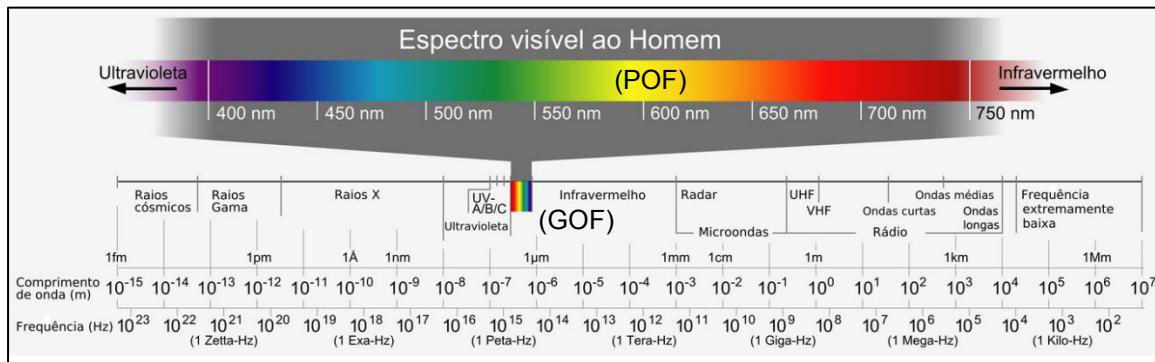


Figura 2.2 – Zonas de operação das POFs e GOFs no espectro eletromagnético [10] (adap.).

## 2.3 Fundamentos de propagação em fibras óticas

Nesta secção apresentam-se os fundamentos principais para transmissão de luz através de uma fibra ótica, nomeadamente quanto à refração e reflexão da luz, ângulo de aceitação, abertura numérica e classificação como monomodo ou multimodo.

### 2.3.1 Refração e reflexão da luz numa fibra ótica

Quando a luz se propaga num meio transparente, como por exemplo um polímero ou vidro, a velocidade da luz decresce. O índice de refração de um meio ( $n$ ) estabelece-se como sendo a razão entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e a velocidade da luz nesse meio ( $v_n$ ), tal como se apresenta na Equação 2.1.

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

A Figura 2.3 ilustra três situações de propagação da luz numa fibra ótica. O raio a preto representa um caso em que a incidência do mesmo é feita com ângulo  $\theta_i$ , e é refratado com ângulo  $\theta_t$ , relativo à normal ao ponto de incidência num meio transparente mais refringente. Parte da luz é refletida para o interior, com ângulo  $\theta_r$ . O raio a castanho claro representa o que acontece quando se aumenta o ângulo de incidência até se atingir o ângulo crítico  $\theta_c$ . O raio refratado é propagado na interface entre os dois meios. A castanho escuro está representado um raio incidente com um ângulo superior a  $\theta_c$ , o qual não será refratado, sendo refletido totalmente. O efeito de reflexão interna total é o mecanismo básico de propagação da luz em fibras óticas [11].

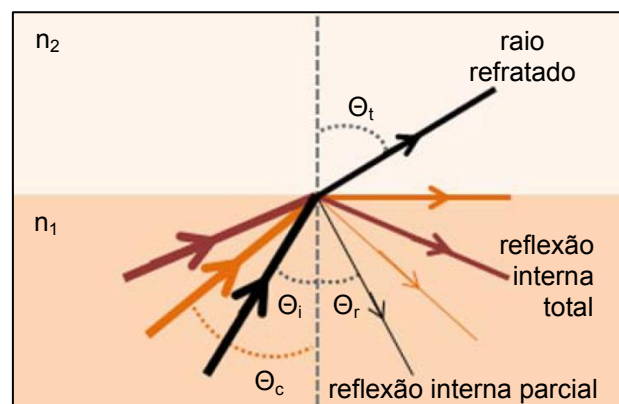


Figura 2.3 – Refração e reflexão da luz numa fibra ótica [2] (adap.).

A refração é expressa pela lei de Snell, a qual é dada pela Equação 2.2.

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

O ângulo crítico  $\theta_c$  é dado pela Equação 2.3.

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

### 2.3.2 Ângulo de aceitação

Uma fibra ótica é constituída por um núcleo com um índice de refração  $n_1$  envolvido por uma bainha com índice de refração  $n_2$  e, considerando uma fonte de luz colocada à entrada da mesma, apenas os raios com ângulos inferiores ao ângulo de aceitação ( $\theta_a$ ) serão propagados no interior da fibra ótica por reflexão interna total [2].

Considerando o índice de refração do meio externo ( $n_0$ ), tem-se a Equação 2.4.

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

Na Figura 2.4 está ilustrada a forma de propagação de vários raios de luz dentro de uma fibra ótica, cujas diferenças de percurso são causadas pela variação do ângulo de aceitação à entrada da mesma. Para 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  $n_0 \approx 1$ .

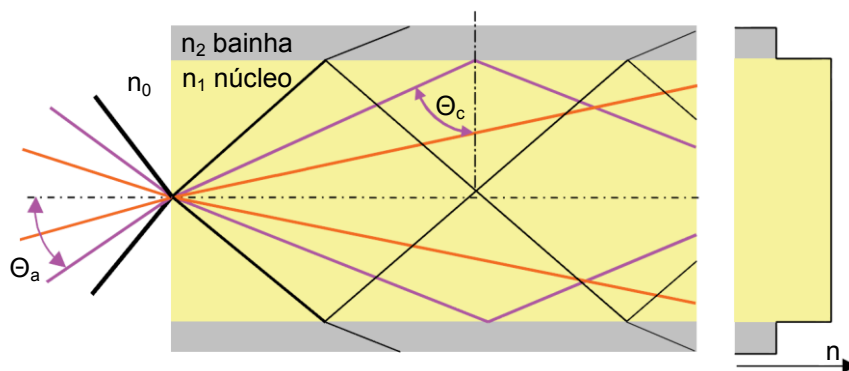


Figura 2.4 – Cone de aceitação de uma fibra ótica [6] (adap.).

Comparativamente a outros tipos de fibra ótica, as POFs têm um diâmetro do núcleo maior. Isto traz vantagens já que a tecnologia para conectorização é mais económica quando comparada com a necessária para as GOFs [2]. A Figura 2.5 ilustra a diferença em termos de dimensão do núcleo, da bainha e do cone de aceitação, entre vários tipos de fibra ótica.

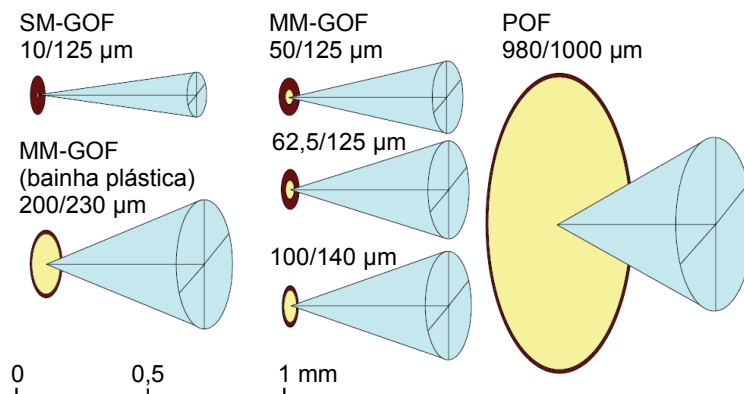


Figura 2.5 – Comparação da dimensão do núcleo, bainha e cone de aceitação de GOF e POF [6] (adap.).

### 2.3.3 Abertura numérica

Uma das características mais importantes de uma fibra ótica é a abertura numérica ( $NA$ ). Trata-se de uma medida da quantidade de luz que pode ser recebida por um sistema ótico, quer seja uma lente, uma objetiva microscópica ou uma fibra ótica [2]. Considerando que o meio externo à fibra é o ar ( $n_0 \approx 1$ ), define-se a  $NA$  de acordo com a Equação 2.5.

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

Como se pode ver pela expressão anterior, a abertura numérica de uma fibra ótica pode ser expressa em termos da diferença relativa dos índices de refração, ou contraste ( $\Delta$ ), entre o núcleo e a bainha [11], o qual é definido pela Equação 2.6.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2.6)$$

Uma  $NA$  grande indica maior capacidade para aceitar a luz, facilitando o acoplamento da POF à fonte ótica. A  $NA$  típica de uma fibra de plástico é muito grande (até 0,5) comparando com as fibras de sílica (0,1 – 0,2). Visto que uma  $NA$  grande possibilita um grande número de modos de propagação, cria-se o inconveniente de aumentar o efeito de dispersão intermodal [1].

### 2.3.4 Regime monomodal e multimodal (parâmetro $V$ )

Numa fibra ótica, um modo corresponde a uma das múltiplas trajetórias possíveis em que um raio se pode propagar no seu interior [12].

As fibras óticas podem ser classificadas, do ponto de vista de propagação de luz, em dois grupos: monomodo (SM) e multimodo (MM). A fronteira entre estes dois tipos de fibra é determinada através do parâmetro estrutural  $V$ , o qual se designa como frequência normalizada. Este depende do raio do núcleo ( $a$ ), do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e da abertura numérica ( $NA$ ), tal como se pode ver pela Equação 2.7.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \times a \times NA \quad (2.7)$$

Para valores de  $V$  inferiores a 2,405 a fibra diz-se SM, uma vez que apenas é permitida a propagação de um único modo, e para valores superiores dir-se-á MM [2]. O número de modos ( $M$ ) de uma fibra ótica é determinado pela Equação 2.8 para fibras do tipo índice em degrau (SI), ou pela Equação 2.9 para fibras de índice gradual (GI) com perfil parabólico [6], para valores de  $V$  superiores a 10.

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

$$M \approx \frac{V^2}{4} \quad (\text{GI}) \quad (2.9)$$

## 2.4 Tipos de POF

Nesta secção serão mencionados os vários tipos de POF existentes, nomeadamente distinguindo os seus perfis do índice de refração do núcleo assim como os materiais utilizados no fabrico do mesmo.

### 2.4.1 SI-POF

Tal como as GOFs, as primeiras POFs que foram desenvolvidas apresentavam um perfil do índice em degrau (SI-POF) em que a bainha envolve um núcleo homogéneo, apresentando um índice de refração uniforme. Este tipo de fibras permite o uso de fontes óticas de baixa coerência (mais baratas), têm aberturas numéricas e diâmetros do núcleo relativamente grandes (melhor acoplamento com a fonte ótica) e requerem pouca precisão nos conectores [11].

A Figura 2.6 representa o perfil do índice de refração de uma SI-POF.

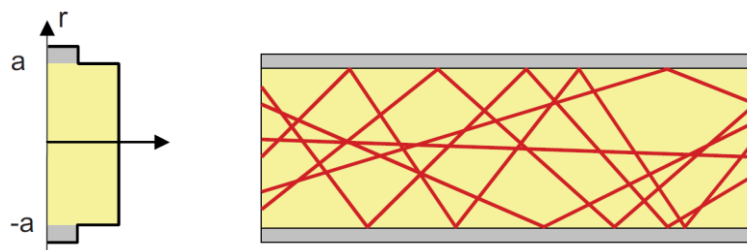


Figura 2.6 – Estrutura do perfil do índice de refração de uma SI-POF [6].

## 2.4.2 MC-POF

Outro tipo de SI-POF é constituído por múltiplos núcleos (MC-POF). Neste tipo de fibras vários núcleos são reunidos durante o processo de fabrico, de tal modo que formam uma POF com diâmetro total de 1 mm. As suas principais vantagens consistem no facto de suportarem elevada largura de banda e sofrerem baixas perdas devido a curvaturas [6].

A Figura 2.7 mostra exemplos de MC-POFs comercializadas pela *AGC Asahi Chemical*.

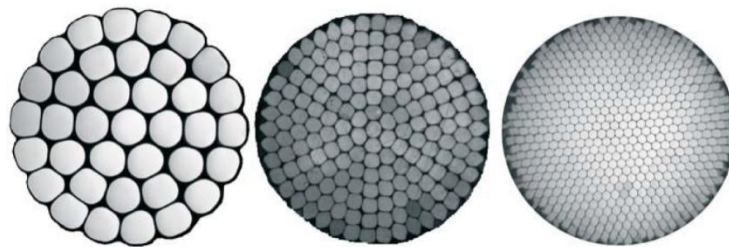


Figura 2.7 – Exemplos de MC-POFs com 37, 217 e 631 núcleos [6].

## 2.4.3 GI-POF

A fibra ótica de plástico de índice gradual (GI-POF) apresenta um gradiente na distribuição do índice de refração do núcleo. Este vai decrescendo à medida que a distância ao eixo da fibra aumenta, enquanto a bainha mantém um índice de refração constante. Os raios que se propagam no centro da POF percorrem menores distâncias, mas devido ao maior índice de refração possuem uma velocidade de propagação menor. Por outro lado, os valores inferiores do índice de refração junto à bainha levam a que se possa transmitir com débitos binários mais elevados e em distâncias maiores.

Devido à variação contínua do índice de refração, os raios luminosos não se propagam em linha reta [2], como se pode observar na Figura 2.8.

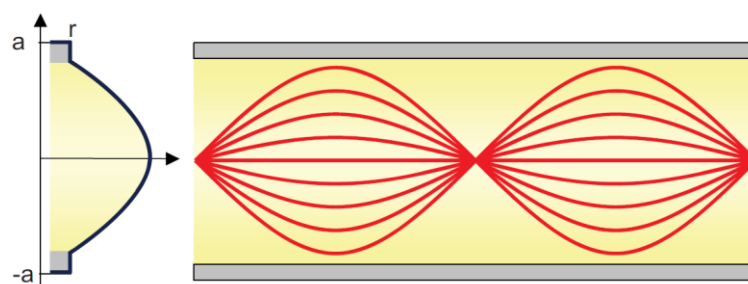


Figura 2.8 – Estrutura do perfil do índice de refração de uma GI-POF [6].

### 2.4.4 MSI-POF

As dificuldades tecnológicas em produzir GI-POFs que apresentassem um perfil do índice de refração do núcleo estável levaram ao desenvolvimento de uma POF com índice em múltiplos degraus (MSI-POF). Neste tipo de fibra, o núcleo é formado por várias camadas, onde os raios luminosos não se propagam com trajetórias continuamente curvas, mas sim com trajetórias definidas pelos índices de refração dos vários degraus [2].

Esta situação está ilustrada na Figura 2.9.

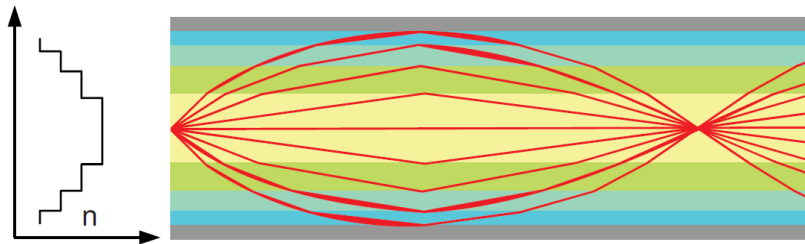


Figura 2.9 – Estrutura do perfil do índice de refração de uma MSI-POF [6].

### 2.4.5 Comparação entre os tipos de POF

Em geral a SI-POF é utilizada para transmissão de dados ou iluminação. Em comparação com a GI-POF, esta apresenta atenuação mais elevada e largura de banda limitada, sendo portanto amplamente utilizada em ligações curtas de baixo custo. Como já foi mencionado, devido à alta dispersão presente na SI-POF, foi desenvolvida a GI-POF cujo perfil do índice de refração do núcleo apresenta um perfil parabólico, compensando os efeitos de dispersão. Este fator é o que torna as fibras óticas de plástico do tipo GI a solução mais apropriada para ligações de transferência de dados mais robustas [1].

A Tabela 2.1 apresenta as principais características das POFs anteriormente referidas em função da sua capacidade de transmissão de dados.

Tabela 2.1 – Características de transmissão de POFs conforme o seu perfil do índice de refração do núcleo [1] (adap.).

Perfil Refrativo	Capacidade de transmissão ( $B.L$ )	Características
Índice em degrau (SI-POF)	5 MHz.km	- Comunicações de curtas distâncias - Elevada dispersão intermodal - Fácil acoplamento com a fonte ótica
Índice multi-degrau (MSI-POF)	30 MHz.km	- Comunicações de curtas e médias distâncias - 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 - Baixa dispersão intermodal - Suporte a elevados débitos binários

A Tabela 2.2 apresenta algumas POFs que estão disponíveis a nível comercial, assim como as suas respetivas características.

Tabela 2.2 – Exemplos de POFs disponíveis a nível comercial [6] (adap.).

Tipo de fibra	Perfil	$NA$	$a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\lambda$ [nm]	$V$	$M$
SI-POF padrão	SI	0,50	490	650	2368	2 803 712
POF <i>Optimedia</i>	GI	0,30	450	650	1305	425 736
MC37-POF (cada núcleo)	SI	0,50	65	650	314	49 298
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 observar, as duas últimas POFs são do tipo GI e portanto têm uma  $NA$  e raio do núcleo ( $a$ ) menores que as restantes. No entanto, apesar da POF *Optimedia* ser do mesmo tipo tem um raio do núcleo maior visto que foi criada alguns anos antes da POF Lucina™. De notar também que os valores de  $V$  elevados fazem com que o número de modos propagados ( $M$ ) nestas fibras seja muito grande, provocando elevada dispersão intermodal.

## 2.4.6 Materiais constituintes

Nesta secção serão apresentadas as características dos principais tipos de materiais usados no fabrico de POFs. São eles o polimetilmetacrilato (PMMA), o policarbonato (PC), o poliestireno (PS) e o polímero de flúor (PF).

### 2.4.6.1 PMMA-POF

O material mais frequentemente utilizado na produção de POF é o polímero termoplástico PMMA, o qual é vulgarmente conhecido por *Plexiglas*<sup>®</sup> [6]. Este material tem uma transparência que atinge os 92%, um pouco menos do que a do Óxido de Silício (SiO<sub>2</sub>) da fibra de sílica que pode atingir praticamente 100% [1]. O índice de refração típico do PMMA é 1,49 e a temperatura de transição vítrea situa-se entre os 95 °C a 125 °C. À temperatura ambiente e com uma humidade relativa de 50%, este material pode absorver até 1,5% de água, o que afeta as características de atenuação [6].

Como ilustrado pela Figura 2.10, o máximo de atenuação situa-se nos 620 nm, com um coeficiente de 450 dB/km. Para este espectro as janelas de transmissão localizam-se em comprimentos de onda de 520, 570 e 650 nm. Esta última é bastante estreita, por isso a sua utilização para iluminação com um diodo emissor de luz (LED) com comprimento de onda central de 650 nm pode ser problemática, se este sofrer desvios com as alterações de temperatura. As perdas típicas de 180 dB/km para os 650 nm e 90 dB/km para 520 nm e 570 nm limitam a utilização destas fibras a 100 metros [2].

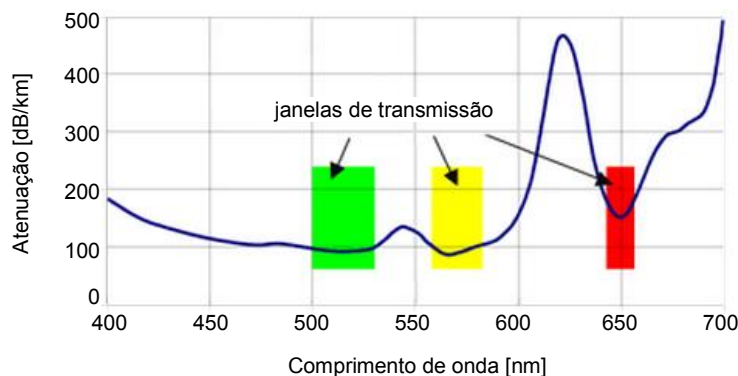


Figura 2.10 – Curva de atenuação típica para uma PMMA-POF [13] (adap.).

### 2.4.6.2 PC-POF

As primeiras fibras de plástico baseado em policarbonato (PC) foram introduzidas em 1986 pela *Fujitsu*. A atenuação desta fibra era de cerca de 800 dB/km a 660 nm e 450 dB/km a 770 nm. A temperatura máxima de operação conseguida foi de 130 °C. Em 1992, a *Asahi* introduziu outra PC-POF, a *Luminous H.*. Esta fibra consegue operar a uma temperatura de 125 °C, com uma atenuação de 600 dB/km a 660 nm. A abertura numérica é de 0,78 e a capacidade de transmissão é de 17 MHz.100 m.

A Mitsubishi comercializa uma PC-POF, a ESKA™ FH4001-TM, com resistência a temperaturas até 125 °C. A sua atenuação máxima é de 800 dB/km a 770 nm, a abertura numérica é 0,75 e o diâmetro do núcleo é de 910 µm. Na Figura 2.11 está ilustrada a comparação entre a curva de atenuação desta PC-POF e de uma PMMA-POF.

A abertura numérica relativamente grande das PC-POFs pode ser explicada pelo facto de o índice de refração do PC ser elevado, o qual é de cerca de 1,58. A maior desvantagem das PC-POFs está relacionada com a sua fraca estabilidade quando é operada em ambientes com humidade [6].

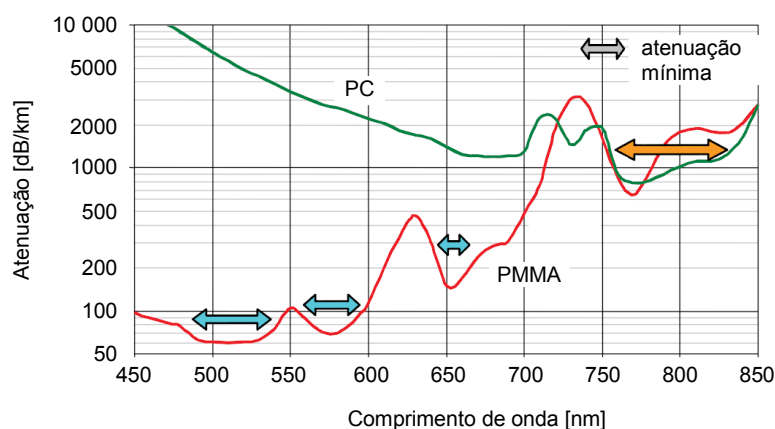


Figura 2.11 – Comparação das curvas de atenuação de POFs de PC e de PMMA [6] (adap.).

### 2.4.6.3 PS-POF

Outro material utilizado na produção de fibras óticas de plástico é o poliestireno (PS). Teoricamente, a atenuação do PS é mais baixa que a do PMMA. As primeiras fibras deste material tinham uma atenuação de mais de 1000 dB/km. Mais tarde, foi possível reduzir-se a atenuação para 140 dB/km a 670 nm. Estas fibras podem ser utilizadas com temperaturas até 70 °C e têm uma abertura numérica de 0,56 que é um pouco maior que a de uma PMMA-POF comum.

O índice de refração do PS é 1,59 sendo possível usar PMMA para a bainha ( $n = 1,49$ ), assim como PC ( $n = 1,58$ ). A temperatura de transição vítrea do PS é de aproximadamente 100 °C, sendo cerca de 5 °C mais baixa que a do PMMA comum. Por esta razão, concluiu-se que não existe necessidade de se substituir as POFs de PMMA por PS uma vez que esta diferença não é significativa [6].

Na Figura 2.12 pode-se ver uma comparação entre curvas de atenuação típicas das primeiras PS-POFs (azul) e de mais recentes (vermelho), onde se verifica que os coeficientes de atenuação máximos foram bastante reduzidos.

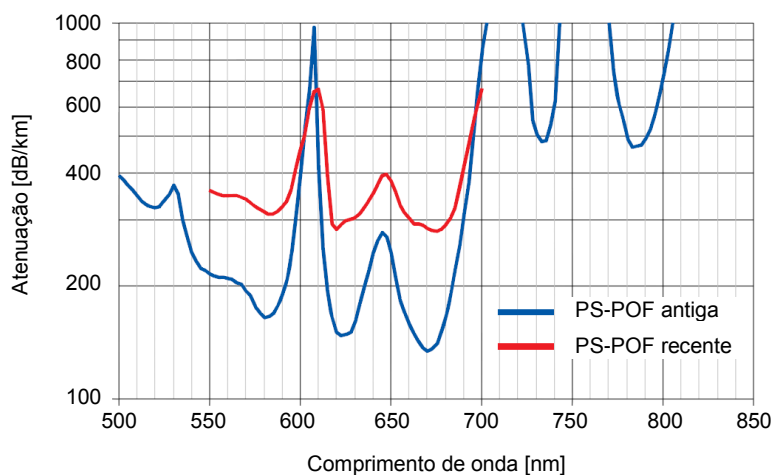


Figura 2.12 – Curvas de atenuação de PS-POFs [6] (adap.).

#### 2.4.6.4 PF-POF

Com o objetivo de se reduzir ainda mais os coeficientes de atenuação das POFs, foi criada uma fibra com um polímero de flúor (PF). Os átomos de hidrogénio (constituintes do PMMA ou do PS) foram substituídos por flúor, o qual tem cerca de 19 vezes a massa atómica do hidrogénio, implicando que as bandas de absorção sejam deslocadas para o infravermelho. Este material é bastante usado no fabrico da bainha, uma vez que o PF consiste no plástico transparente com o índice de refração mais baixo de todos, sendo este cerca de 1,34.

Até à data, os melhores resultados que se obtiveram na produção de PF-POFs com baixa atenuação foram conseguidos através do material CYTOP<sup>®</sup>, desenvolvido pela *AGC Asahi Glass*. Depois de vários melhoramentos, conseguiu-se obter valores de atenuação abaixo de 20 dB/km, permitindo que se fizesse transmissão de dados em ligações de até 1000 metros. Com estes progressos é possível que estas POFs possam vir a substituir definitivamente os cabos de cobre e as fibras de sílica multimodo, no que diz

respeito à sua aplicação nas redes de acesso [6].

Os melhores resultados obtidos até hoje estão presentes na Figura 2.13, onde se pode visualizar as curvas de atenuação de duas PF-POFs de CYTOP<sup>®</sup>, criadas pela *Chromis Fiberoptics* (azul) e pela *AGC Asahi Glass* (vermelho).

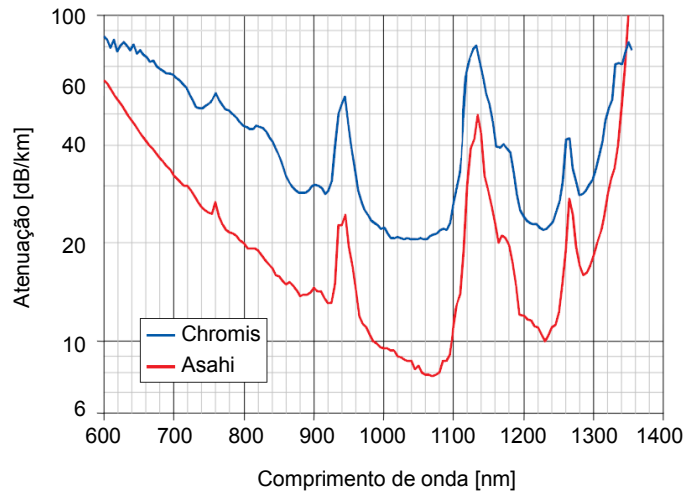


Figura 2.13 – Curvas de atenuação de PF-POFs [6] (adap.).

Em síntese, a Figura 2.14 mostra a evolução histórica do coeficiente de atenuação de POFs em função dos seus materiais constituintes.

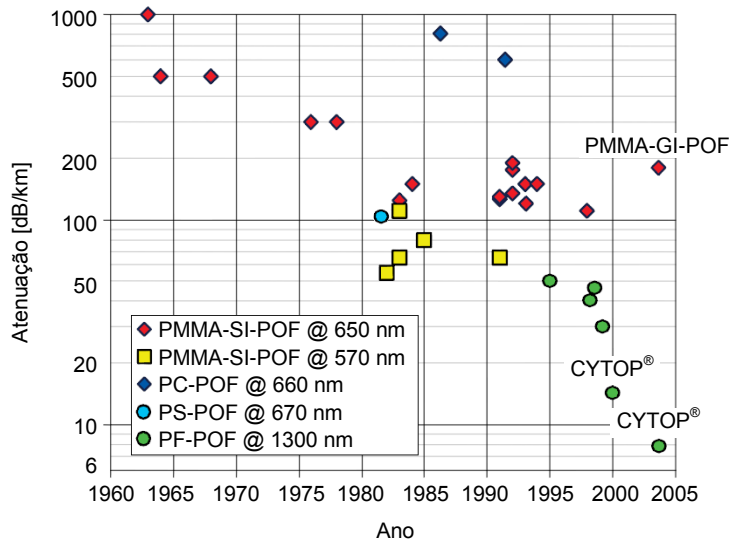


Figura 2.14 – Evolução histórica de materiais utilizados para produção de POF [6] (adap.).

Como se pode observar, as fibras mais utilizadas são a PMMA-POF e a PF-POF.

## 2.5 Técnicas de produção

Para a produção de POF são necessárias duas etapas. A primeira é a produção da pré-forma (de PMMA, PC, PS ou PF), que consiste numa vareta cilíndrica com comprimento típico de 1 metro e alguns centímetros de diâmetro. Esta estrutura irá determinar o perfil do índice de refração do núcleo e da bainha. A segunda consiste em esticar a pré-forma podendo chegar a produzir vários quilómetros de POF. Ao longo dos anos, as técnicas de produção têm vindo a avançar no sentido de fabricar POF com alta qualidade e a baixo custo [6].

A Figura 2.15 ilustra um exemplo simplificado do processo de fabrico de uma POF.

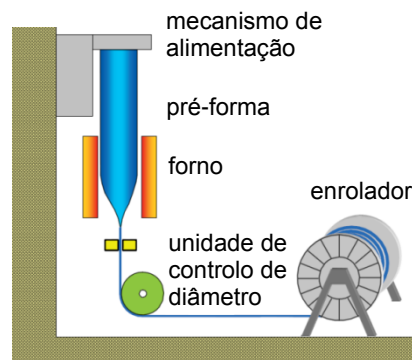


Figura 2.15 – Fabrico de uma POF [6] (adap.).

## 2.6 Atenuação

A atenuação ou perda de transmissão pode ser definida como a diminuição da intensidade de energia de um sinal ao propagar-se através de um meio de transmissão. O cálculo da atenuação numa fibra ótica em função da distância é dado pela Equação 2.10.

$$P_{out} = P_{in}e^{-\alpha l} \quad (2.10)$$

O valor  $P_{in}$  é a potência do sinal injetado na fibra,  $P_{out}$  é a potência à saída da mesma,  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação e  $l$  é o comprimento da fibra. A expressão do coeficiente de atenuação em dB é dada pela Equação 2.11.

$$\alpha_{dB} = \frac{10}{l} \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.11)$$

Nas fibras óticas a atenuação varia de acordo com o comprimento de onda utilizado. Essa atenuação é a soma de várias perdas ligadas ao material que é empregue no fabrico

das fibras e à estrutura do guia de onda [14]. Nas aplicações em comunicações óticas o objetivo principal é obter alcances cada vez maiores, o que implica atenuações o mais baixas possível. A tecnologia das POFs tem vindo a desenvolver-se no sentido de reduzir continuamente as perdas de transmissão até ao chamado limite fundamental (ou limite de atenuação teórico), determinado pela absorção intrínseca do material da fibra [1].

A Tabela 2.3 mostra os limites teóricos e experimentais para os vários fatores de perdas de POFs de PMMA, PS e CYTOP® para 568, 672 e 1300 nm, respetivamente.

Tabela 2.3 – Fatores e limites de atenuação para três tipos de POF [1].

Fator de perda [dB/km]	PMMA (568 nm)	PS (672 nm)	CYTOP® (1300 nm)
Absorção material <sup>(a)</sup>	17	26	10
Espalhamento de Rayleigh <sup>(b)</sup>	18	43	2
Imperfeições estruturais <sup>(c)</sup>	20	45	4
Atenuação teórica <sup>(a + b)</sup>	35	69	12
Atenuação total <sup>(a + b + c)</sup>	55	114	16

Os mecanismos responsáveis pela atenuação da luz numa fibra ótica podem ser classificados de intrínsecos e extrínsecos. O diagrama da Figura 2.16 resume os principais mecanismos responsáveis pela atenuação numa POF.

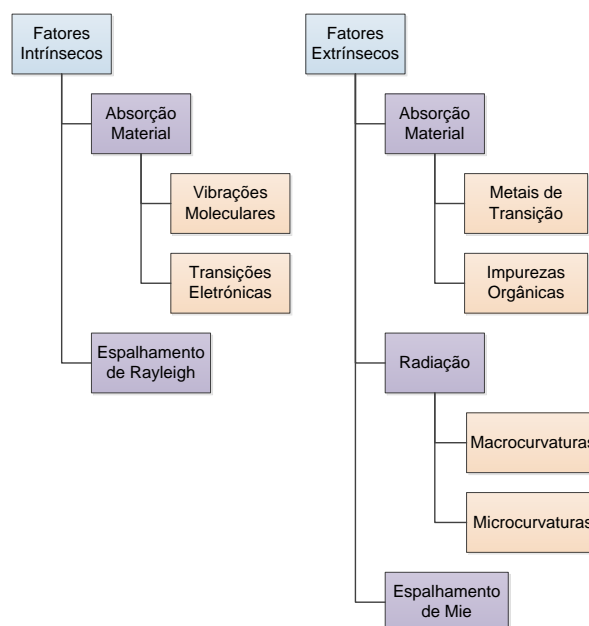


Figura 2.16 – Classificação dos principais fatores responsáveis pela atenuação numa POF.

## **2.6.1 Fatores intrínsecos**

Este tipo de atenuação corresponde às perdas causadas pelas características do material no seu estado puro (sem impurezas, sem variações de densidade, homogeneidade do material, etc.). A atenuação intrínseca estabelece o limite mínimo fundamental de atenuação para qualquer tipo de material usado, supondo um processo de fabrico perfeito.

Como se pôde ver pelo diagrama da Figura 2.16, as perdas intrínsecas estão classificadas em absorção dos materiais constituintes, subdividida em absorção por vibrações moleculares e por transições eletrónicas, e espalhamento de Rayleigh [1].

### **2.6.1.1 Absorção material – Vibrações moleculares**

Relativamente às POFs, o efeito das vibrações moleculares torna-se considerável na região do vermelho e do infravermelho do espectro. Estes efeitos sentem-se mais propriamente com PMMA-POFs. A diminuição da atenuação causada por vibrações moleculares pode ser conseguida através da substituição dos átomos de hidrogénio por átomos mais pesados (como o flúor) [2], como acontece com a PF-POF.

### **2.6.1.2 Absorção material – Transições eletrónicas**

Os polímeros, como todos os materiais, absorvem radiação devido às transições eletrónicas. Este fenómeno resulta das transições entre níveis de energia das ligações moleculares do material. A absorção de um fóton leva a uma transição de eletrões em direção a níveis de energia mais elevados [1].

### **2.6.1.3 Espalhamento de Rayleigh**

O espalhamento de Rayleigh é causado por flutuações aleatórias na densidade, orientação e composição do material da fibra, e ocorrem em distâncias muito pequenas quando comparadas com o comprimento de onda da luz transmitida. Este espalhamento é considerado um limite mínimo fundamental da atenuação nas fibras óticas e, embora seja possível reduzir as flutuações na composição do material com técnicas de fabrico mais sofisticadas, não pode ser evitado [1].

## 2.6.2 Fatores extrínsecos

O grupo das perdas extrínsecas é composto pelas variações que não apareceriam numa fibra ideal (pura). Estes fatores estão relacionados com as perdas causadas pela contaminação por impurezas que o material da fibra sofre durante o seu processo de fabrico ou pela própria instalação da fibra.

Pelo diagrama da Figura 2.16 pôde-se observar que os fatores extrínsecos estão subdivididos em absorção causada por impurezas metálicas (iões de metais de transição tais como níquel, cobalto, cromo, manganésio e ferro) ou orgânicas (grupo hidroxilo OH<sup>-</sup>) e a absorção causada por partículas de poeira, microrroturas, bolhas e outras imperfeições na fibra (espalhamento de Mie), originadas durante o processo de produção. Adicionalmente há também as perdas de radiação, originadas pelas perturbações (microscópicas e macroscópicas) na geometria da fibra, embora algumas vezes estas possam não ser significativas [1].

### 2.6.2.1 Absorção material – Metais de transição

Durante o processo de fabrico de uma POF podem ser absorvidas algumas impurezas. A presença das mesmas é inevitável e, portanto, levam à ocorrência de absorção de radiação. Alguns iões metálicos de transição provocam uma maior atenuação que outros (como o cobalto), onde a maioria tem bandas de absorção na região do visível e do infravermelho [2].

### 2.6.2.2 Absorção material – Impurezas orgânicas

Os iões hidroxilos (grupo OH<sup>-</sup>), que resultam da absorção de água durante e após o processo de fabrico, originam um aumento na absorção de radiação, especialmente na região do infravermelho. Os polímeros PF não absorvem moléculas de água facilmente, o que implica que as POFs constituídas por estes materiais, por exemplo o CYTOP<sup>®</sup>, registem atenuações mínimas [2].

### 2.6.2.3 Radiação – Macrocurvaturas

As perdas por macrocurvaturas acontecem quando o comprimento dos raios de luz é grande quando comparado ao diâmetro da fibra. Estas curvaturas são normalmente originadas quando a fibra é enrolada no enrolador e/ou durante a instalação da fibra.

Quando a macrocurvatura na fibra é pequena (raio de curvatura grande) as perdas são praticamente desprezíveis. No entanto, à medida que o raio de curvatura diminui as perdas por radiação aumentam, sendo maiores para GI-POF do que para SI-POF com o mesmo diâmetro [1].

A Figura 2.17 ilustra o processo que leva à ocorrência de perdas de radiação por macrocurvatura.

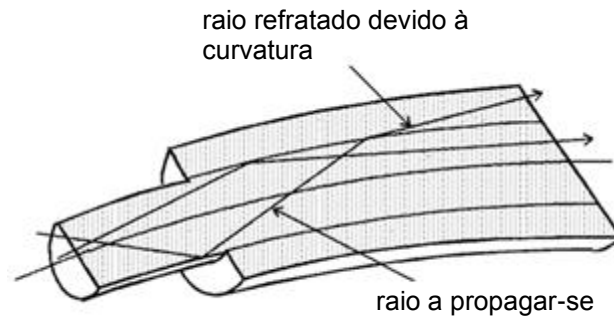


Figura 2.17 – Perdas de radiação por macrocurvatura [2].

#### 2.6.2.4 Radiação – Microcurvaturas

As perdas por microcurvaturas são microscópicas (irregularidades nas interfaces), aleatórias e de menor escala. Podem ser causadas por defeitos no fabrico da fibra ou por pressões laterais não uniformes originadas durante a instalação dos cabos. A minimização dos efeitos das microcurvaturas nas perdas de transmissão exige fibras óticas com uma  $NA$  grande, além de cuidados especiais no revestimento e instalação das fibras [1].

A Figura 2.18 ilustra o processo que leva à ocorrência de perdas de radiação por microcurvaturas.

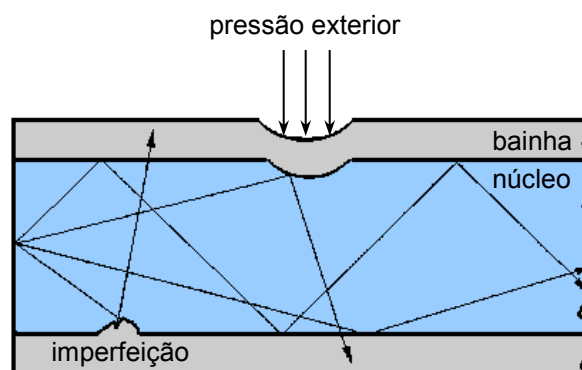


Figura 2.18 – Perdas de radiação por microcurvaturas [15] (adap.).

### 2.6.2.5 Espalhamento de Mie

O espalhamento de Mie consiste em imperfeições geométricas e estruturais como variações no diâmetro da fibra, no perfil refrativo do núcleo, irregularidades na interface núcleo-bainha, presença de bolhas, fraturas, poeira e até mesmo lacunas moleculares. Este tipo de absorção é normalmente desprezível quando comparado com as absorções intrínsecas ou das impurezas [1].

## 2.7 Dispersão

Um impulso de luz que se propague através de uma fibra ótica sofre um efeito de alargamento temporal, conhecido como dispersão temporal ou simplesmente dispersão. Este fenómeno é o resultado dos diferentes atrasos de propagação dos modos que transportam o raio de luz. Em qualquer sistema de comunicação ótica, a dispersão é um parâmetro importante porque limita e determina a máxima capacidade de informação transmitida pela fibra ótica. No caso da transmissão digital, o alargamento de um impulso pode sobrepor-se a impulsos adjacentes num efeito conhecido por interferência intersimbólica (ISI).

No âmbito das POFs são identificados dois tipos de dispersão: intramodal e intermodal, em que a primeira subdivide-se ainda em dispersão material e dispersão de guia de onda. Geralmente, a capacidade de transmissão das SI-POFs é afetada principalmente pela dispersão intermodal, enquanto a capacidade de transmissão das GI-POFs é afetada pela dispersão intermodal e material. De lembrar que as GI-POFs surgiram para minimizar os efeitos da dispersão intermodal que ocorrem nas SI-POFs. Já no caso das fibras monomodo de sílica importa principalmente a dispersão material e de guia de onda [1]. A Figura 2.19 mostra o efeito da dispersão num impulso ótico.

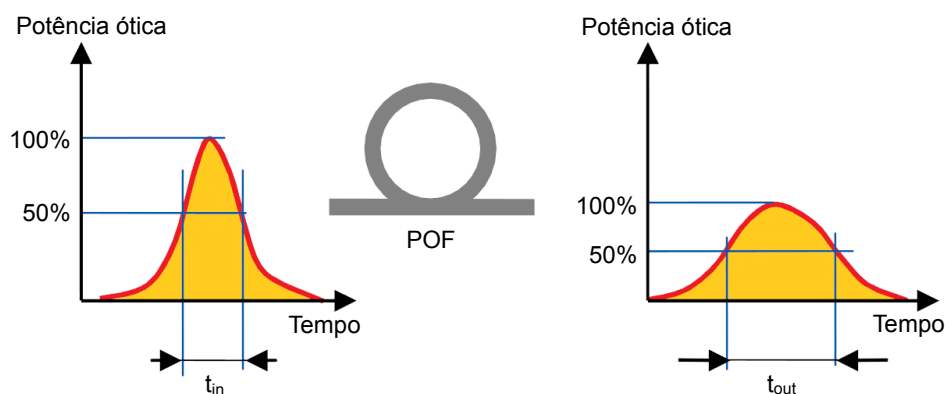


Figura 2.19 – Alargamento de um impulso devido à dispersão [6] (adapt.).

## 2.7.1 Dispersão intramodal (ou cromática)

Esta dispersão está correlacionada com cada modo de propagação em si e é dependente do comprimento de onda, vindo daí a sua outra designação de dispersão cromática. A dispersão cromática é resultante da dependência da velocidade de grupo de propagação de um modo individual, com relação ao comprimento de onda, não podendo ser eliminada. Esta dispersão é subdividida em dispersão material e dispersão de guia de onda [1].

### 2.7.1.1 Dispersão material

Este tipo de dispersão ocorre porque o índice de refração do material é função do comprimento de onda. Neste caso, as várias componentes espectrais de um dado modo viajam em diferentes velocidades de propagação e o impulso alarga. A diversidade de componentes espectrais nos modos transmitidos é imposta pela fonte ótica utilizada [1].

### 2.7.1.2 Dispersão de guia de onda

A dispersão de guia de onda resulta principalmente da dependência do parâmetro  $V$  em relação ao comprimento de onda da luz transmitida. A dispersão de guia de onda é particularmente importante em fibras monomodo de sílica nas quais a dispersão material não é significativa ou em comprimentos de onda para os quais a dispersão material é pequena (aproximadamente 1300 nm). Nas POFs, a dispersão de guia de onda é geralmente muito pequena comparada à dispersão material, podendo ser desprezada [1].

A Figura 2.20 apresenta a contribuição de cada componente para a dispersão intramodal.

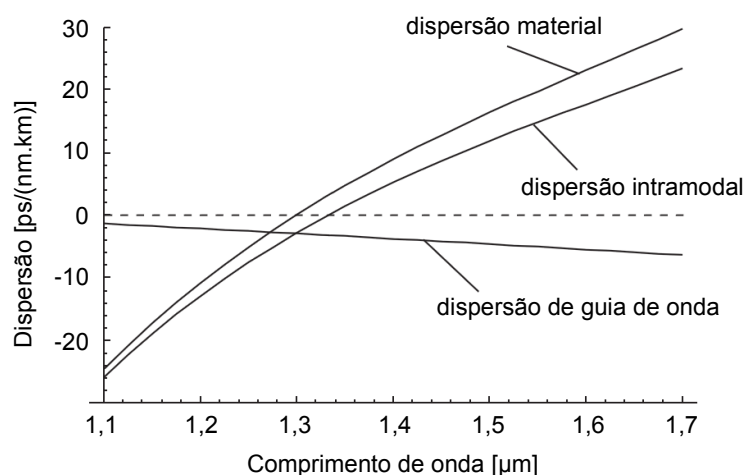


Figura 2.20 – Dispersão material, de guia de onda e intramodal de uma SM-GOF [16] (adaptado).

## 2.7.2 Dispersão intermodal

Esta dispersão ocorre em função dos diferentes percursos efetuados pelos modos de propagação ao longo da fibra, razão pela qual também é chamada de dispersão intermodal ou apenas modal.

A dispersão intermodal é conhecida por afetar significativamente a transmissão em fibras multimodo e resulta do facto de cada modo de propagação, para um mesmo comprimento de onda, ter uma velocidade de grupo diferente.

Nas SI-POFs o modo de propagação de ordem mais baixa percorre o caminho mais curto (eixo) dentro do núcleo da fibra chegando, ao final da fibra, antes do modo de ordem mais alta. Nas GI-POFs, o perfil gradual do núcleo realiza uma equalização dos tempos percorridos, fazendo com que os modos de propagação cheguem à extremidade da fibra ótica em instantes muito próximos, causando uma dispersão mínima no impulso ótico [1].

Na Figura 2.21 pode-se ver a diferença dos impulsos recebidos na saída de SI-POF, GI-POF e SM-GOF.

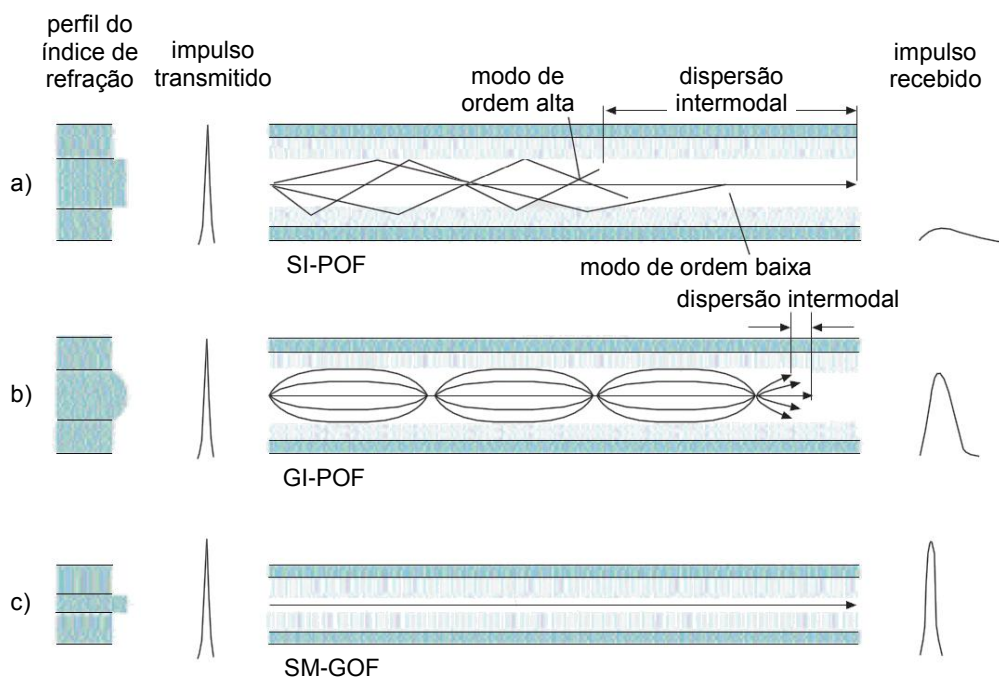


Figura 2.21 – Efeito da dispersão intermodal em: a) SI-POF, b) GI-POF (parabólica) e c) SM-GOF [3] (adap.).

## 2.8 Resistência térmica

A temperatura limite para funcionamento de uma POF varia entre os 80 °C e os 100 °C. Acima destes valores, as POFs começam a perder a sua rigidez e transparência. A temperatura limite poderá ser entre 125 °C a 135 °C se for utilizado um revestimento de polietileno modificado.

Por outro lado, a resistência das POFs a altas temperaturas depende fortemente da humidade relativa. Por exemplo, para uma POF mantida durante 1000 horas a 85 °C com uma humidade relativa de 85%, o coeficiente de atenuação apresentará um aumento de 0,02 dB/km. Se a humidade relativa for de 90% a atenuação aumenta mais de 0,03 dB/km. As PF-POFs não absorvem água apresentando um comportamento estável com a humidade relativa do meio envolvente [2].

## 2.9 Resistência química

A maioria dos trabalhos publicados sobre a resistência química das POFs relaciona-se com o estudo do desempenho destas quando colocadas em contacto com líquidos utilizados na indústria automóvel.

As PC-POFs sem revestimento resistem apenas cinco minutos quando imersas em petróleo com 85-octanas, mas resistem longos períodos em óleo e líquidos de bateria. O revestimento em polietileno tem a função de proteger a fibra quando mergulhada em água, hidróxido de sódio, ácido sulfúrico (a 34,6%) ou óleo de motor. As PF-POFs, nomeadamente, as constituídas por CYTOP<sup>®</sup>, não apresentam variações na potência transmitida ao longo da fibra quando mergulhada durante uma semana em ácido fluorídrico (a 50%), hidróxido de sódio (a 44%) ou ácido sulfúrico (a 98%) [2].

## 2.10 Áreas de aplicação

Os investidores dos mercados globais, verificaram que o total de despesas anuais efetuadas na tecnologia das POFs teve um aumento em mais de 15% desde 2006 até 2010. Ao contrário das fibras de sílica, maioritariamente usadas nas telecomunicações, as POFs têm utilidade em várias indústrias. As duas principais áreas de aplicação das POFs são as do controlo industrial e dos automóveis, tal como se pôde observar anteriormente pelo gráfico da Figura 1.2.

A principal motivação para investimento em POFs no mercado industrial deve-se à necessidade de criar meios físicos de transferência de dados que resistam a IEMs causadas pelos dispositivos de alta voltagem, tais como os soldadores, máquinas de raios-X e unidades de injeção de iões. Atualmente, a principal fonte de investimento no negócio das POFs encontra-se nas utilizações inovadoras dos seus produtos por parte das empresas de automóveis [3].

### 2.10.1 Automóveis

O setor automóvel representa a área com maior investimento a nível mundial, no que diz respeito às fibras óticas de plástico. Um dos principais investidores da aplicação desta tecnologia à indústria automóvel foi a empresa alemã *Daimler-Benz*. Em 2000, esta empresa automóvel percebeu que o aumento do uso de aparelhos digitais em automóveis aumentava o peso do veículo, a suscetibilidade a IEM e a complexidade das cablagens usadas.

Foi então que a *Daimler-Benz* percebeu que o caminho para reduzir os custos, passava por todas as empresas automóveis respeitarem uma norma baseada na tecnologia de POF que satisfizesse as necessidades futuras dos automóveis. Mais tarde, esta empresa convenceu outros seis fabricantes europeus de automóveis, entre eles a BMW e a *Volkswagen*, para aderirem às regras impostas pela norma denominada por *Media Oriented System Transport* (MOST) e fazerem as suas aquisições, respeitando-a [3].

#### 2.10.1.1 Normas para automóveis

Antes de se começarem a aprofundar os desenvolvimentos das normas dedicadas exclusivamente ao setor automóvel, em 1996 surgiu a norma *Controller Area Network* (CAN), a qual é principalmente usada em redes de área local (LAN). Pelo facto de se basear em aplicações *real-time* é necessário um controlo rígido de erros e garantia de receção de mensagens. A comunicação é feita através de uma topologia em barramento que possibilita a comunicação dos dispositivos entre si [17].

Em 1999, surgiu a norma *Domestic Digital Bus* (D2B). Trata-se de uma tecnologia de comunicações baseada em anéis de fibra ótica, com débitos binários de 12 Mbps, especificada pela *Optical Chip Consortium*, para uso em aplicações automóveis. A partir de 2007, a D2B começou a ser usada pela *Mercedes-Benz* nos seus veículos [18].

Mais tarde, em 2002, foi criada a norma MOST. Para coordenar o desenvolvimento e a promoção desta norma foi criada a *MOST Cooperation*, que hoje em dia consiste em 16 fabricantes de automóveis, entre eles a empresa americana *General Motors*, e mais de 60 fornecedores de POF. Com o decorrer das evoluções tecnológicas na área dos automóveis, no final de 2005 já existiam 36 modelos a serem comercializados, desde os de baixo-custo aos topos de gama, perfazendo um total de 9,5 milhões de dólares em vendas de componentes baseados em POF [3].

A norma MOST original tinha sido projetada para ligações de 25 Mbps, tendo mais tarde aumentado para 50 Mbps, e tinha como objetivo principal o funcionamento dos aspetos telemáticos do automóvel [3]. Foi ainda criada uma norma adicional denominada de *FlexRay* (desenvolvida pela BMW). Esta segunda norma tinha débitos de 10 Mbps, e servia para dar suporte a aspetos relacionados com o funcionamento do motor ou com a própria segurança do automóvel [19]. Uma das suas finalidades consistia em substituir as ligações mecânicas entre o pedal dos travões e os travões das rodas por uma POF. Isto é, quando um condutor pressionasse o pedal do travão, a força aplicada seria convertida para um sinal de luz e transmitida a um conversor, que iria interpretar o sinal e aplicar a quantidade correta de pressão para travar as rodas do veículo [3].

Na Figura 2.22 está ilustrada a composição da arquitetura *FlexRay* num automóvel, a qual é composta pelas normas descritas anteriormente, onde cada uma é aplicada para o desempenho de uma função específica.

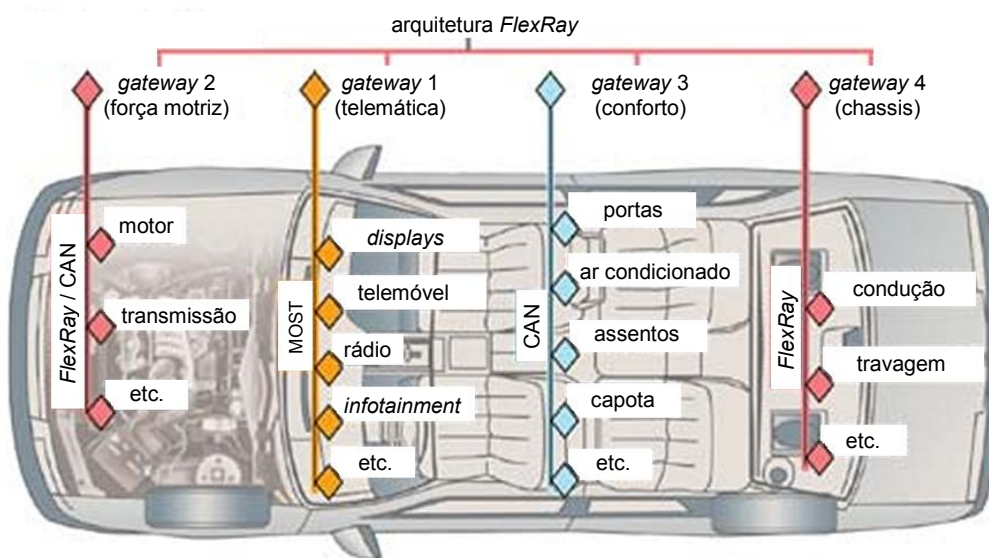


Figura 2.22 – Exemplo de áreas de aplicação das normas num automóvel [19] (adap.).

Com as evoluções tecnológicas e o desenvolvimento da norma MOST, em 2005 foi definida a norma MOST2 para débitos binários de cerca de 150 Mbps. Entretanto em 2006, nos EUA e no Japão, as grandes empresas automotoras começaram a projetar um novo sistema mais avançado, cujo objetivo consiste em permitir transmissões a 400 Mbps. Este sistema tinha a finalidade de seguir a norma IDB-1394 (IEEE1394 para automóveis), que se esperava ser compatível com a MOST [3]. Em 2007 começou a ser definida a IDB-1394 com suporte para transmissão de 1 Gbps.

Na Figura 2.23 pode-se ver a evolução das normas para automóveis ao longo dos anos, relativamente às suas velocidades de transmissão.

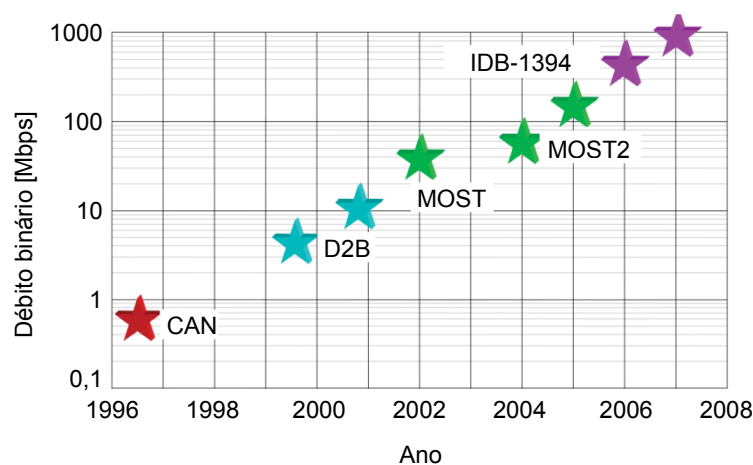


Figura 2.23 – Evolução das normas para o setor automóvel ao longo dos anos [6] (adap.).

## 2.10.2 Estacionamento assistido por câmaras

A *Nexans Autoelectric*, em cooperação com a *Daimler-Chrysler*, desenvolveu um novo tipo de sistema de estacionamento assistido por câmaras. Várias câmaras são montadas no *cockpit* e no atrelado de um veículo pesado de mercadorias que, em conjunto, conseguem abranger toda a área em redor sem eventuais “ângulos mortos”. As imagens captadas são equalizadas para que o condutor obtenha uma imagem completa do local, e possa estacionar de forma mais rápida e com toda a segurança, em espaços de estacionamento estreitos ou zonas de carga e descarga muito congestionadas.

Os cabos convencionais têm comprimentos limitados (até cerca de 30 metros) devido à largura de banda necessária. A transmissão de sinais via *wireless* é difícil de se fazer devido às grandes quantidades de dados e ao perigo de “colisões” com dados de outros veículos. É neste aspeto que as POFs consistem numa boa solução, já que permitem a transmissão de dados com o mínimo de erros e sem IEMs [6].

Na Figura 2.24 está ilustrado um exemplo de um veículo pesado de mercadorias com estacionamento assistido por câmaras, onde as ligações entre os dispositivos são feitas através de POF.

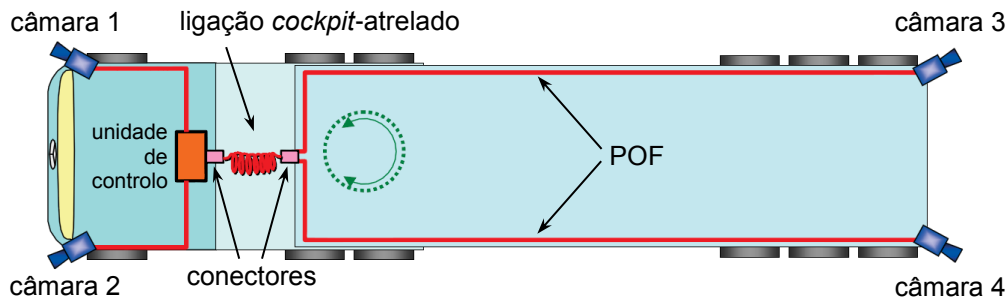


Figura 2.24 – Veículo pesado de mercadorias com sistema de estacionamento assistido por câmaras [6] (adap.).

### 2.10.3 Sensores de colisão

Uma das áreas em que as POFs são muito utilizadas é nos sensores, englobando o seu uso no setor automóvel. Um dos sistemas utilizados nesta área possui uma POF situada dentro do para-choques de um veículo. Esta funciona como um sensor ótico que deteta depleções originadas por um embate, que faz com que o sinal transmitido seja alterado. Desta forma, o computador de bordo do automóvel regista uma colisão com um peão, fazendo abrir o capô em alguns centímetros de modo a suavizar o impacto direto com o mesmo [6]. A Figura 2.25 ilustra o funcionamento deste sistema.

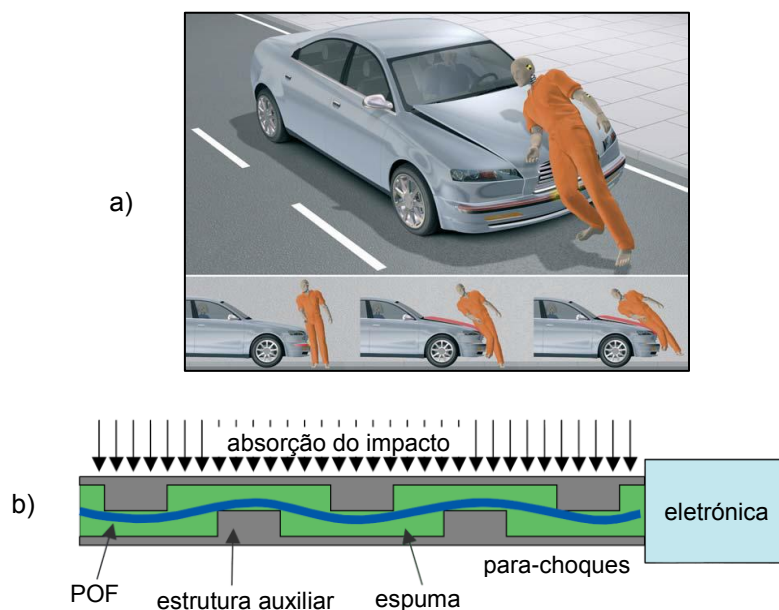


Figura 2.25 – Sensor para colisão de peões num automóvel (a) e sua estrutura (b) [6] (adap.).

## 2.10.4 Interligação de componentes

Estudos recentes feitos pela *Intel* indicam que as velocidades de processamento continuam a aumentar a cada 2 anos, o que quer dizer que é quase certo que um computador construído em 2015 exigirá algum tipo de transferência de dados ótica para interligar os seus *chips*. Este facto exigirá uma mudança das tecnologias do domínio elétrico para o ótico. O grande problema que os fabricantes de PCs enfrentam é que, com o aumento das larguras de banda, a atenuação das linhas de transmissão das placas de circuito impresso, feitas de material dielétrico convencional, começa a ser mais elevada. Por exemplo, os cálculos sugerem que numa interligação de cobre de 10 GHz, com 50 cm de comprimento, as perdas de inserção possam ser da ordem dos 50 dB, enquanto que numa POF com o mesmo comprimento as perdas são de cerca de 0,075 dB.

Tendo em conta estes factos, a *Intel* e outras empresas estão a explorar a possibilidade do fabrico de POFs para transferência de dados nas *motherboards* dos computadores [3]. Na Figura 2.26 pode-se ver dois *chips* de uma *motherboard* de um PC, interligados através de várias POFs em paralelo.

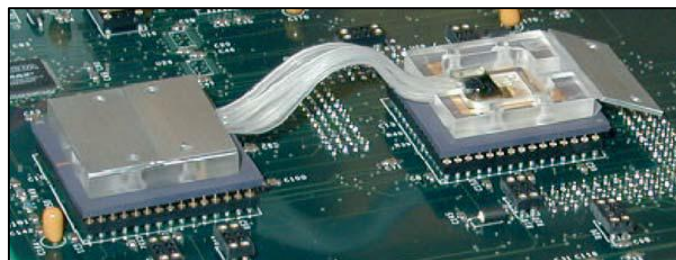


Figura 2.26 – Interligação de dois *chips* de uma *motherboard* através de POFs em paralelo [6].

## 2.10.5 Habitações

Oferecendo taxas de transferência de dados de mais de 1 Gbps e com a garantia de qualidade de serviço (QoS), a tecnologia das POFs pode ser considerada como uma solução a longo prazo para a distribuição de serviços multimédia em habitações. As suas características são especialmente vantajosas para as novas implementações de IPTV e VoIP em serviços multimédia *Triple Play*. A qualidade de experiência (QoE) e a garantia das taxas de transferência estipuladas são os fatores mais importantes para uma implementação bem sucedida [20].

Na Figura 2.27 pode-se observar uma habitação com a tecnologia POF incorporada.

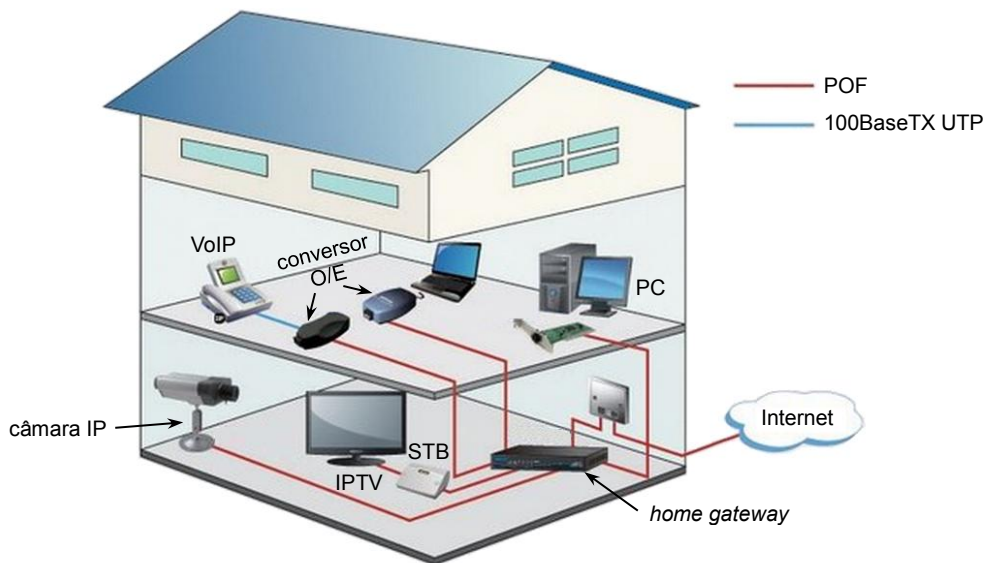


Figura 2.27 – Habitação com tecnologia POF [21] (adap.).

### 2.10.6 LANs domésticas e empresariais

As redes locais (LANs) estão a tornar-se cada vez mais comuns nas pequenas e médias empresas, divisões de grandes empresas e em habitações domésticas. Para as pequenas empresas e habitações, as LANs com velocidades de 100 Mbps são bastante comuns, sendo que com 1 Gbps começam também a ser consideradas. Com a disponibilidade no mercado de novas fibras óticas de plástico, de conectores de dimensão reduzida e *transceivers* de baixo custo, espera-se que os fornecedores de equipamentos de LANs Ethernet irão estar em breve a disponibilizar várias opções baseadas na tecnologia das POFs [3].

Na Figura 2.28 pode-se ver exemplos de equipamentos com interfaces para a ligação de POFs em LANs Ethernet.



Figura 2.28 – Exemplos de equipamentos de LAN Ethernet com interfaces para POF [6] (adap.).

## 2.10.7 Controlo industrial

As interligações de rede das fábricas têm a função de permitir a comunicação entre vários aparelhos eletrónicos como máquinas de produção, sensores de movimento, controladores lógicos programáveis (PLCs), computadores destinados a controlo, etc.. Como estes equipamentos podem estar espalhados por toda a fábrica, as suas interligações podem sofrer de efeitos de IEM e a passagem dos cabos pelas condutas pode apresentar dificuldades. Como resposta a estes problemas, várias empresas têm previstas redes Fast Ethernet que operam sobre POF [20]. Na Figura 2.29 pode-se ver o exemplo de uma fábrica que tem os seus equipamentos interligados por POF.

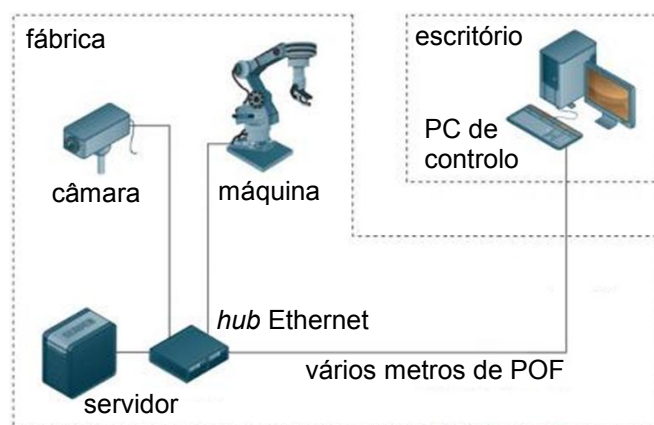


Figura 2.29 – Equipamentos de uma fábrica interligados por POF [22] (adap.).

## 2.10.8 Iluminação artificial

As fibras óticas de plástico são bastante usadas em muitas áreas da tecnologia de iluminação artificial. Podem funcionar como guias de luz puros entre a fonte ótica e o objeto a ser iluminado. Também podem ser utilizadas como iluminação decorativa de várias cores, já que as POFs trabalham no domínio da radiação visível [6]. Na Figura 2.30 pode-se ver exemplos de iluminação artificial com POF.



Figura 2.30 – Utilização de POFs para iluminação artificial [6].

### 2.10.9 Transportes terrestres, aéreos e marítimos

Em meados da década de 90, a DARPA investiu fortemente na tecnologia das POFs, a fim de desenvolver ligações de alta velocidade para aplicações militares. Infelizmente, naquela altura a tecnologia ainda não estava pronta para ser comercializada. Grandes empresas como a *Honeywell*, a *Delphi Electronics*, a *Boeing* e a *Lucent Technologies* estiveram envolvidas no projeto.

Atualmente, a tecnologia já evoluiu e está pronta para as aplicações militares e aeronáuticas. Por exemplo, no *Boeing 737*, foi planeado que as POFs seriam utilizadas no seu sistema audiovisual, como forma de se reduzir o peso do avião e de eliminar a IEM. A indústria das POFs está a aumentar significativamente, tendo como desafios o desenvolvimento de fibras que suportem temperaturas mais elevadas ( $> 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e mesmo fibras antifogo para aplicações aeroespaciais e militares [3]. Na Figura 2.31 estão ilustrados exemplos de transportes onde já são ou podem vir a ser aplicadas as fibras óticas de plástico.



Figura 2.31 – Exemplos de transportes que usam ou podem vir a incorporar POFs [23] [24] [25] [26] [27].

### 2.10.10 Medicina

Ao contrário da frágil fibra de sílica, a POF fornece proteção e flexibilidade para necessidades exigentes de movimentação e posicionamento em aplicações médicas. São úteis na área da bioquímica em técnicas espectroscópicas e têm resistência à pressão, sendo compatíveis com várias tipos de técnicas óticas. Permitem a detecção de raios gama, raios-X e de radiação ultravioleta a infravermelha. As POFs para iluminação na área da medicina têm um raio de curvatura de 5 mm para iluminação endoscópica, e terminais

flexíveis para a obtenção de boas imagens, podendo também ser usadas no posicionamento de cateteres. Ainda podem ser usadas na oftalmologia graças ao seu baixo consumo de energia e devido a operarem com radiação visível [28].

A Figura 2.32 mostra uma pessoa com um aparelho para medir a tensão arterial, que tem uma fibra de plástico apropriada para fins medicinais, denominada de MedPOF<sup>®</sup>.



Figura 2.32 – Aparelho para medir a tensão arterial, com POF incorporada [28].

## 2.11 Norma IEC 60793-2-40

Atualmente existe um grande número de fibras óticas de plástico disponível a nível comercial. Ao desenvolverem novas POFs, os fabricantes têm de respeitar as características impostas nas normas criadas para as mesmas. A norma que define as especificações para os vários tipos de POF é a IEC 60793-2-40.

O conhecimento desta norma é importante no âmbito desta dissertação para que se possa fazer uma correta parametrização das POFs que serão utilizadas posteriormente nas simulações. Visto que por vezes nem todos os parâmetros necessários vêm nos *datasheets* dos componentes, esta tabela poderá ser consultada para se saber os valores dos parâmetros em falta.

Na Tabela 2.4 pode-se consultar as principais especificações desta norma.

Tabela 2.4 – Principais especificações da norma IEC 60793-2-40 [29] [30].

Parâmetro / Classe	A4a	A4b	A4c	A4d
Perfil do índice	SI	SI	SI	SI
Ø núcleo [µm]	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ø bainha [µm]	1000 ± 60	750 ± 45	500 ± 30	1000 ± 60
Ø revestimento [mm]	2,2 ± 0,1	2,2 ± 0,1	1,5 ± 0,1	2,2 ± 0,1
Comprimento de onda de trabalho [nm]	650	650	650	650
Perdas [dB/km]	≤ 400	≤ 400	≤ 400	≤ 400
B.L [MHz.100m]	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 100
Abertura Numérica (NA)	0,50 ± 0,15	0,50 ± 0,15	0,50 ± 0,15	0,30 ± 0,05
Aplicações	Áudio digital, automóveis, indústria, automação, videovigilância, sensores e transmissão de dados	Indústria e sensores	Sensores	Audiovisuais e transmissão de dados
Parâmetro / Classe	A4e	A4f	A4g	A4h
Perfil do índice	MSI/MC/GI	GI	GI	GI
Ø núcleo [µm]	≥ 500	200 ± 10	120 ± 10	62,5 ± 5
Ø bainha [µm]	750 ± 20	490 ± 10	490 ± 10	245 ± 5
Ø revestimento [mm]	2,2 ± 0,1	n. d.	n. d.	n. d.
Comprimento(s) de onda de trabalho [nm]	650	650, 850, 1300	650, 850, 1300	850, 1300
Perdas @ 650 nm [dB/km]	≤ 180	≤ 100	≤ 100	–
Perdas @ 850 nm [dB/km]	–	≤ 40	≤ 33	≤ 33
Perdas @ 1300 nm [dB/km]	–	≤ 40	≤ 33	≤ 33
B.L @ 650 nm [MHz.100m]	≥ 200	≥ 800	≥ 800	–
B.L @ 850 nm [MHz.100m]	–	1500 – 4000	1880 – 5000	1880 – 5000
B.L @ 1300 nm [MHz.100m]	–	1500 – 4000	1880 – 5000	1880 – 5000
Abertura Numérica (NA)	0,25 ± 0,07	0,19 ± 0,015	0,19 ± 0,015	0,19 ± 0,015
Aplicações	Audiovisuais e transmissão de dados	Indústria e móveis, compatível com equipamento de transmissão da classe A3	Transmissão de dados	Transmissão de dados, principalmente usada em estruturas emparelhadas

## Capítulo 3

---

# Sistema de Comunicação Ótica com POF

### 3.1 Componentes de um sistema com POF

Neste capítulo irá fazer-se uma abordagem teórica aos principais elementos que constituem um sistema de comunicação ótica, mais propriamente aos utilizados no âmbito das POFs. Primeiro serão explicados os componentes e de seguida os métodos de avaliação de desempenho do sistema.

Um sistema de comunicação ótica consiste essencialmente em três componentes. A fonte ótica que converte o sinal elétrico, que contém a informação, em ótico e injeta-o no canal de transmissão, neste caso a fibra ótica de plástico. O canal de transmissão, que pode conter componentes ativos ou passivos para além da fibra, encaminha o sinal até ao recetor. Aqui, o sinal é reconvertido para elétrico para que posteriormente se possa fazer o processamento do mesmo. Normalmente, o objetivo é fazer com que o sinal elétrico recebido seja o mais semelhante possível ao original [6]. Para se fazer a avaliação da qualidade do sinal recebido, são utilizadas figuras de mérito apropriadas para o efeito.

Na Figura 3.1 pode-se visualizar um exemplo de um sistema de comunicação ótica com POF, utilizado pela *Nexans*. Este esquema foi retirado do livro *POF Handbook, Cap. 6.3 Overview of POF Systems* (referenciado por [6]), no qual foram reunidos vários testes com POFs realizados em várias partes do mundo, entre 1988 e 2008. A maioria dessas experiências tem objetivos idênticos, que passam por analisar qual o ritmo binário máximo de transmissão conseguido numa determinada POF. De um modo geral, a arquitetura dos sistemas utilizados nessas experiências é idêntica.

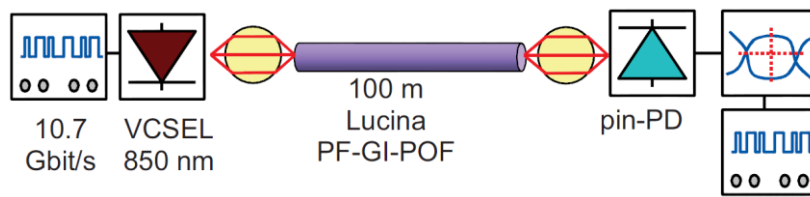


Figura 3.1 – Exemplo de um sistema de comunicação ótica com POF [6].

Como se pode ver, o sistema tem três componentes principais: a fonte ótica, que neste caso é um VCSEL (@ 850 nm); a fibra ótica de plástico, que aqui se trata de uma PF-GI-POF com 100 metros de comprimento; e um fotodetector PIN, que é o mais comum neste tipo de sistema. Para acoplar a POF com a fonte ótica e o fotodetector foram usadas duas lentes com forma esférica. Foi transmitida uma sequência binária pseudoaleatória (PRBS) com um débito binário de 10,7 Gbps. Após a receção, no analisador de sinais foi visualizado o diagrama de olho com um BER  $< 10^{-12}$  [6].

As simulações realizadas nesta dissertação foram baseadas em sistemas semelhantes ao apresentado na Figura 3.1. As medidas efetuadas também se basearam em processos idênticos, já que o principal objetivo na utilização de fibras óticas é garantir uma transmissão de dados com o mínimo de erros possível.

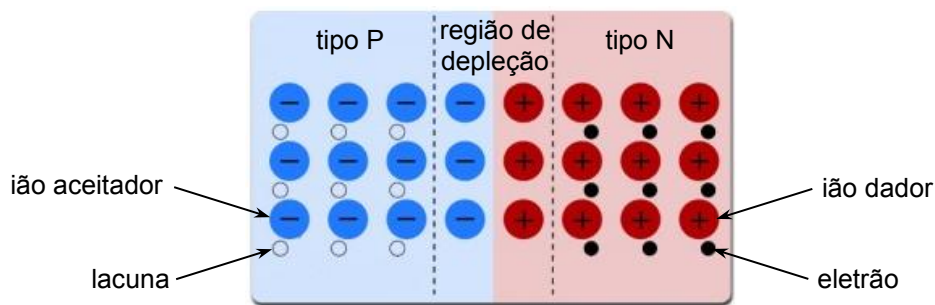
## 3.2 Fontes óticas

Os tipos de fonte ótica mais utilizados em sistemas com POF são: o *Light-Emitting Diode* (LED) e o *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER). Dentro destas duas categorias, existem dispositivos com propriedades distintas. Nesta secção irá fazer-se uma introdução teórica a estes tipos de fonte ótica.

### 3.2.1 LEDs

O díodo emissor de luz (LED) é o dispositivo de semicondutor mais antigo e simples de se usar para transmissão de sinais óticos. Para funcionar, essencialmente necessita de duas camadas de um semicondutor, as quais formam uma junção *pn* [6].

Para se perceber em que consiste uma junção *pn*, veja-se a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Junção  $pn$  [31] (adap.).

Uma junção  $pn$  consiste num bloco construtivo básico que fundamenta a operação dos dispositivos semicondutores. Esta é formada quando um cristal semiconductor é dopado com impurezas aceitadoras de um lado e dadoras do outro. As lacunas da região  $p$  difundem-se para a região  $n$  e os elétrons do lado  $n$  difundem-se para o lado  $p$ , onde se combinam com os portadores existentes em maioria na região de interface. A região de interface do lado  $n$  carrega-se, assim, positivamente e a do lado  $p$  negativamente. Junto à interface, resulta a formação de uma região de carga espacial. Esta zona é denominada por região de depleção, devido a não ter praticamente nenhuns portadores maioritários [32].

Uma junção  $pn$  pode ser polarizada diretamente ou inversamente. Caso esteja polarizada diretamente, pode ser utilizada como fonte ótica. A polarização inversa é usada na fotodeteção [33].

Na Figura 3.3 pode-se ver a aplicação de uma junção  $pn$  na estrutura básica de um LED, onde foi adicionada uma camada para o substrato.

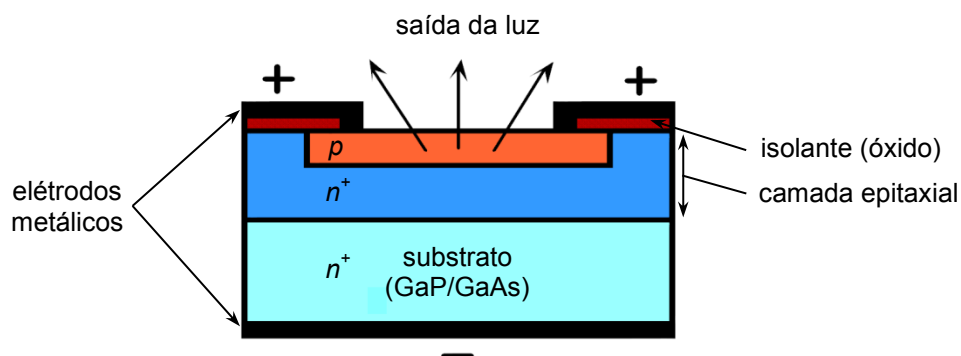


Figura 3.3 – Estrutura de um LED [34] (adap.).

Como se pode ver, a emissão de luz é feita em várias direções. Para além disto, é feita de forma espontânea, isto é, os eletrões transitam espontaneamente (sem radiação externa) entre as bandas de energia, gerando os fotões. Quanto às características das camadas epitaxiais, a  $n^+$  é muito dopada permitindo promover a recombinação no lado  $p$ . Os fotões gerados no lado  $n^+$  são reabsorvidos ou refletidos na interface com o substrato (depende das espessuras). A camada  $p$  é muito fina para evitar a reabsorção dos fotões emitidos. Como se pode ver pela figura, os materiais mais comuns usados para o substrato são GaP ou GaAs [35].

Comparando com os lasers, as principais vantagens dos LEDs residem no baixo custo, no tempo de vida elevado, para além de sofrerem menos com altas temperaturas e terem um consumo de energia reduzido. As suas desvantagens prendem-se com a baixa potência de emissão ( $10 \mu\text{W} - 1 \text{ mW}$ ), a menor diretividade do feixe luminoso (dificultando o acoplamento em fibra monomodo), a baixa eficiência, o tempo de resposta de emissão é curto e a largura espectral é elevada ( $10 - 100 \text{ nm}$ ). A largura espectral é a faixa de comprimentos de onda ocupada pelo sinal em torno de um determinado comprimento de onda. Quanto mais pequena esta for menos dispersivo será o sinal.

Pelas razões anteriores, o LED é mais utilizado como fonte ótica em sistemas de curta distância, normalmente com fibras multimodo (GOF ou POF) e com ritmos de transmissão baixos ( $100 - 200 \text{ Mbps}$ ) [36] [37]. Visto que pode ser operado em vários comprimentos de onda na zona da luz visível, uma das principais aplicações dos LEDs com POFs é feita no campo da iluminação artificial [6].

### 3.2.1.1 Tipos de LED

Para além da estrutura típica de um LED, apresentada na Figura 3.3, em que a emissão da luz é feita a partir da sua superfície (SLED), este dispositivo também pode ser concebido para ter emissão lateral (ELED), o que é particularmente útil no acoplamento à fibra ótica [35].

Nos últimos anos, foi desenvolvido um tipo de LED que possui uma cavidade ressonante (RC-LED), o qual foi utilizado em várias experiências realizadas com POF. A emissão de luz é feita verticalmente, tal como no SLED. Os RC-LEDs que operam na zona do “vermelho” estão de momento a ser utilizados na indústria automóvel e em dispositivos de redes domésticas. A *Firecomms* desenvolveu RC-LEDs “verdes” com técnicas alternativas para os espelhos refletivos [6].

### 3.2.2 Lasers

Os lasers utilizados em sistemas óticos como fontes óticas são quase exclusivamente díodos laser de semicondutores. Ao contrário dos LEDs, os lasers são fontes de emissão estimulada, isto é, a passagem de um fóton faz um elétron passar da banda de condução para a banda de valência emitindo um fóton coerente (mesma direção, frequência, fase e polarização) com o fóton incidente (amplificação) [35].

A emissão estimulada obriga a que a radiação emitida seja temporalmente e espacialmente coerente, o que se traduz por uma reduzida largura espectral. Isto permite uma grande eficiência de acoplamento com a fibra, podendo ainda produzir uma potência ótica elevada, comparativamente aos LEDs [36].

Para se perceber melhor a diferença entre emissão espontânea e estimulada, veja-se a Figura 3.4.

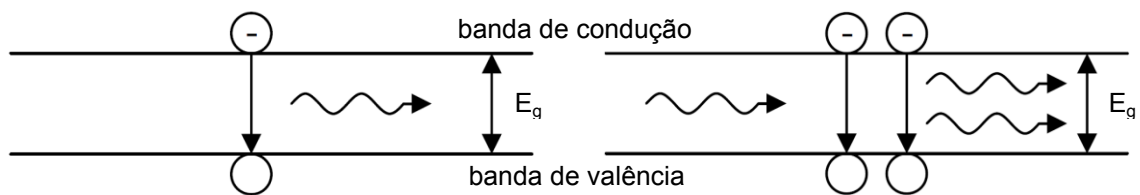


Figura 3.4 – Emissão espontânea (esq.) vs. emissão estimulada (dir.) [33] (adap.).

Para que possa existir emissão estimulada permanente é necessário garantir a inversão de população, o que nos díodos laser se obtém com junções *pn* degeneradas, em que a concentração de elétrons na banda de condução e de lacunas na banda de valência é muito elevada.

A emissão estimulada ocorre através de uma corrente de injeção suficientemente elevada. Para reduzir a corrente de injeção necessária para originar inversão de população utiliza-se uma heterojunção (materiais diferentes), em vez de uma homojunção (mesmo material). Esta estrutura permite um maior confinamento da radiação de luz (modificando os índices de refração) e dos portadores de carga dentro da zona ativa (modificando as bandas de energia) [33].

Na Figura 3.5 é apresentada a estrutura geral de um laser de heterojunção com 5 camadas.

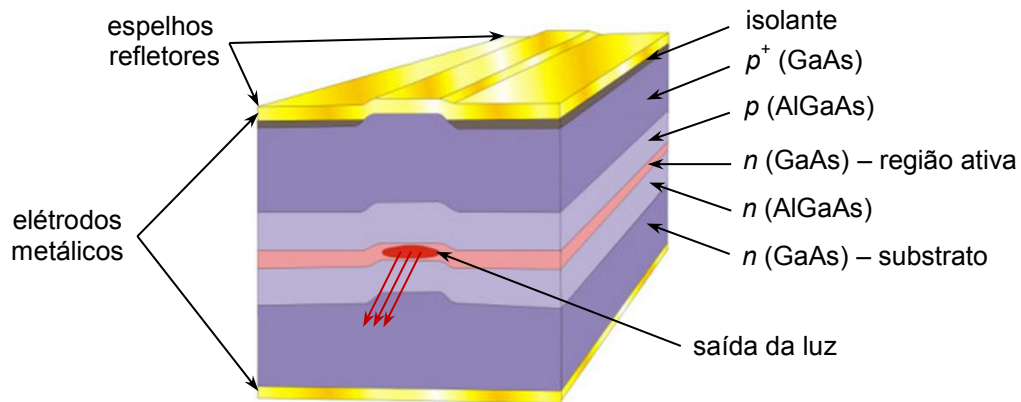


Figura 3.5 – Estrutura de um laser [38] (adap.).

No meio, o laser possui uma camada denominada por região ativa, que é onde a luz é de facto gerada. As camadas  $p$  e  $n$  (de AlGaAs) adjacentes à região ativa servem para se fazer o confinamento ótico e eletrónico, o que evita a reabsorção já que têm hiato superior e funcionam como guia de onda devido ao menor índice de refração. Tal como nos LEDs, o laser possui um substrato de GaAs na parte inferior, assim como um isolante na parte superior, e ainda dois elétrodos metálicos. A luz é emitida lateralmente através de uma cavidade ressonante (cavidade de Fabry-Pérot), a qual se encontra delimitada por dois espelhos refletores. O espelho de trás é totalmente refletor enquanto o da frente é semi-refletor, para que possa haver emissão de luz [35].

Comparando com os LEDs, os lasers têm as vantagens de permitirem potências de emissão mais elevadas (1 – 10 mW), maior diretividade do feixe luminoso (melhor acoplamento em fibras monomodo) e a largura espectral é reduzida ( $10^{-5}$  – 5 nm). Isto permite que sejam utilizados em sistemas com ritmos de transmissão e distâncias de ligação elevados. Relativamente às desvantagens, pode-se referir os maiores custos e complexidade, assim como a elevada dependência da temperatura.

Uma das características resultantes do funcionamento de um laser é o *chirp*. Este é originado por flutuações da frequência do sinal emitido. Quanto mais intenso for o *chirp* maior será a largura espectral da fonte ótica. Este efeito limita a largura de banda uma vez que o espectro ótico do sinal alarga, o que aumenta a dispersão intramodal [37]. Em comunicações de longa distância e em sistemas de multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM) este efeito pode ser problemático, mas como os sistemas com POF têm distâncias curtas, este torna-se desprezável.

Uma forma de se reduzir o *chirp* é utilizando modulação externa em detrimento da modulação direta. No primeiro caso é utilizado um modulador externo que tem a função de transformar o sinal de luz consoante os dados a ser transmitidos, enquanto no segundo é a própria fonte que faz a conversão eletro-ótica. Nos sistemas com POF normalmente é utilizada modulação direta, uma vez que esta é mais barata e o comprimento da ligação é curto. A modulação externa é mais utilizada em sistemas com ligações de longa distância. Dois dos moduladores externos mais comuns são o *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) e o *Electro-Absorption Modulator* (EAM) [16].

Para se perceber as diferenças para a modulação direta, na Figura 3.6 pode-se ver um esquema simplificado de um sistema de comunicação ótica, com modulação externa.

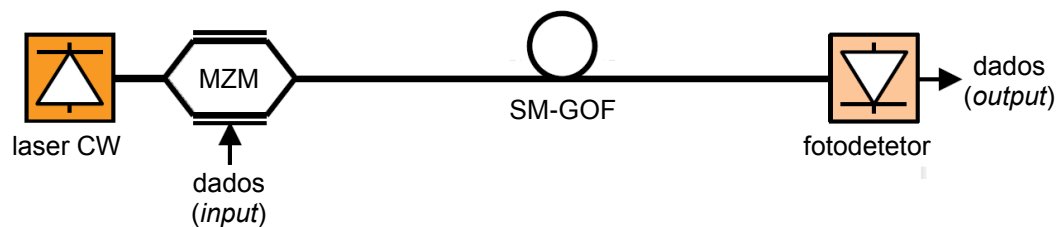


Figura 3.6 – Exemplo de um sistema de comunicação ótica com modulação externa [6] (adap.).

A fonte ótica é um laser monomodo de onda contínua (CW), sendo estes apropriados para transmissão ótica com modulação externa [36]. De seguida tem-se um modulador externo MZM, onde uma entrada é para a luz emitida pelo laser e a outra é para os dados que se pretende transmitir. A interligar o sistema tem-se uma fibra ótica de sílica monomodo (SM-GOF), uma vez que esta é apropriada para longas distâncias. Por fim, tem-se um fotodetetor que faz a conversão ótico-elétrica para que os dados recebidos possam ser processados.

### 3.2.2.1 Laser Fabry-Perót

O díodo laser de Fabry-Pérot (FP-LD) é o mais simples dos díodos laser, tendo uma estrutura idêntica à apresentada na Figura 3.5. Os FP-LDs são lasers multimodo e portanto são utilizados preferencialmente em sistemas de curta distância, tal como no caso das POFs. Estes lasers têm normalmente um espectro mais largo que os lasers monomodo [16]. Para se perceber a diferença da largura espectral entre os lasers monomodo (SM-LD), multimodo (MM-LD) e os LEDs, veja-se a Figura 3.7.

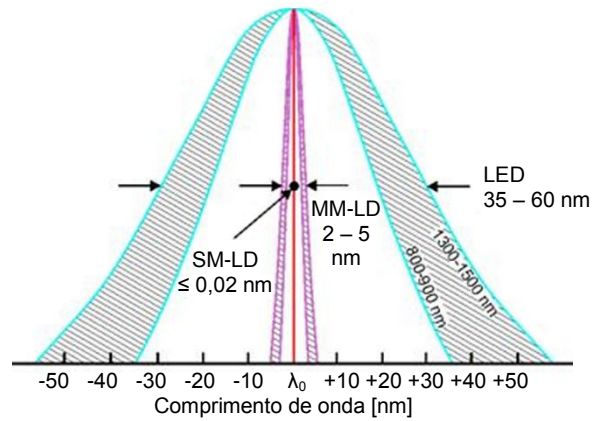


Figura 3.7 – Comparação da largura espectral entre SM-LD, MM-LD e LED [39] (adap.).

Como pode ser visto, os LEDs são as fontes óticas com a maior largura espectral, sendo neste caso 35 – 60 nm. Os FP-LDs são lasers multimodo e têm uma largura espectral muito mais pequena que os LEDs, normalmente entre 2 – 5 nm. Os lasers com a menor largura espectral são os SM-LDs, neste caso  $\leq 0,02$  nm, sendo estes os mais apropriados quando as taxas de transmissão de dados são elevadas e para transmissão a longa distância.

### 3.2.2.2 Laser DFB

O díodo laser de realimentação distribuída (DFB-LD) é semelhante ao FP-LD, com a diferença de possuir uma grelha de Bragg localizada junto à região ativa que serve para filtrar os modos indesejados, exceto o central, permitindo assim uma emissão em regime monomodo [16]. Na Figura 3.7 pode-se ver a estrutura típica de um DFB-LD.

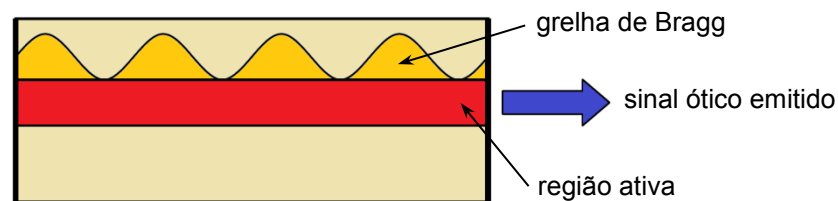


Figura 3.8 – Estrutura de um DFB-LD [33] (adap.).

Este laser possui uma largura espectral de  $10^{-5} - 10^{-3}$  nm, bem mais pequena que a do FP-LD, fazendo com que os sinais injetados na fibra sofram menor dispersão, permitindo a sua utilização em sistemas com débitos binários elevados e com grande comprimento de ligação [33]. Apesar do DFB-LD ser monomodo, foram realizadas várias experiências com POFs com o objetivo de se obter um bom desempenho do sistema [6].

### 3.2.2.3 VCSEL

O laser de emissão superficial com cavidade vertical (VCSEL) surgiu no início da década de 90, onde veio rivalizar com os já existentes FP-LD e DFB-LD no que diz respeito à escolha da fonte ótica mais apropriada para um sistema [37]. Ao contrário dos anteriores, que emitem lateralmente, os VCSELS são lasers que emitem verticalmente, tal como se pode ver pela Figura 3.9.

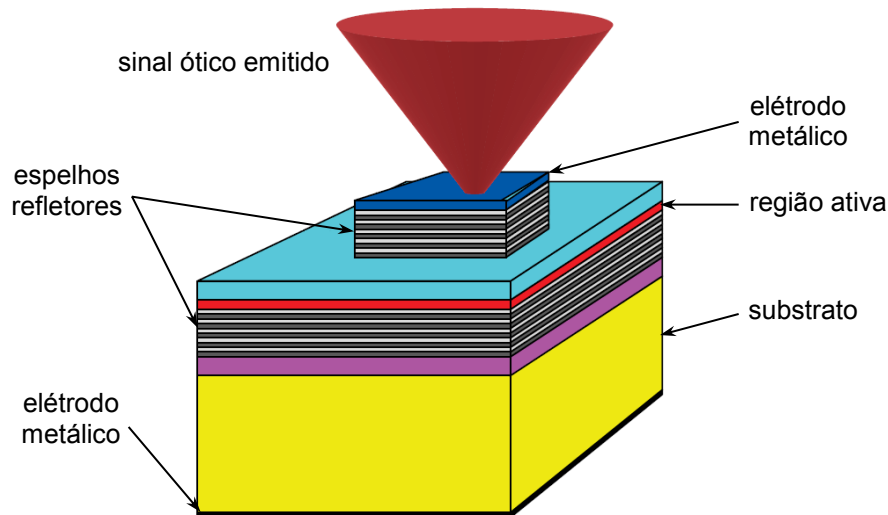


Figura 3.9 – Estrutura de um VCSEL [6] (adap.).

Os VCSELS podem funcionar como MM-LDs ou até mesmo como SM-LDs, caso a sua cavidade seja estreita o suficiente para que apenas um modo se propague dentro da largura de banda do laser. Um dos problemas dos VCSELS é a elevada resistência à passagem da corrente injetada, levando a um elevado aquecimento e à necessidade de uma refrigeração térmica eficiente. Isto acontece porque os materiais semicondutores utilizados para fazer os espelhos refletores têm uma baixa condutividade térmica [36]. O espelho refletor superior tem uma transparência de cerca de 99%, enquanto que a do inferior é de 99,9% [40], permitindo desta forma a emissão de luz.

As vantagens da utilização de VCSELS prendem-se com o facto de emitirem luz com um ângulo de emissão pequeno que é quase circularmente simétrico sendo ideal para o acoplamento com as fibras, a corrente de *threshold* (limite) é bastante reduzida permitindo um baixo consumo de energia e a sua largura espectral é pequena quando comparada à de um LED ou mesmo a um FP-LD [6]. Os VCSELS são principalmente utilizados em sistemas de baixo custo e de curta distância com fibras multimodo [36], tal como no caso dos sistemas com POF.

### 3.3 Fotodetetores

Os tipos de fotodetetores mais utilizados em sistemas com POF são: o fotodíodo PIN (PIN-PD) e o fotodíodo de avalanche (APD). Nesta secção irá fazer-se uma introdução teórica a estes tipos de fotodetetores.

Tal como já foi mencionado, nos sistemas de comunicação ótica os fotodetetores são os componentes que recebem a luz transmitida pela fibra e a reconvertem em sinal elétrico. A estrutura básica do fotodetetor é uma junção  $pn$  com polarização inversa. A aplicação de tensão positiva no lado  $n$  em relação ao lado  $p$ , atrai os eletrões do lado  $n$  e lacunas do lado  $p$  (portadores maioritários) para longe da junção, alargando a região de depleção [41].

As características desejáveis de um fotodetetor são a elevada sensibilidade para os comprimentos de onda de interesse, o ruído adicional introduzido deve ser mínimo, uma largura de banda e tempos de resposta adequados aos débitos usados, pouca sensibilidade a variações de temperatura, compatibilidade com as dimensões físicas da fibra, custo reduzido e tempo de vida médio-longo [42].

No caso da transmissão digital, a deteção de um impulso ótico sofrerá os seguintes fatores [41]:

- Corrente no escuro: é gerada no interior do dispositivo mesmo na ausência de luz incidente, pela excitação de eletrões que passam da banda de valência para a de condução, com energia fornecida por agitação térmica;
- Ruído de *shot*: deve-se ao movimento das cargas geradas, provocando flutuações estatísticas no valor instantâneo da corrente;
- Ruído térmico: está presente na carga resistiva que recebe a fotocorrente.

Dois propriedades de um fotodetetor são a eficiência ( $\eta$ ) e a responsividade ( $\mathfrak{R}$ ). A eficiência é a razão entre o número de pares eletrão-lacuna gerados e o número de fótons incidentes, e a responsividade é a razão entre a fotocorrente produzida ( $I_{ph}$ ) e a potência ótica incidente ( $P_{in}$ ). As expressões destas duas características podem-se verificar nas Equações 3.1 e 3.2, respetivamente [34] [42].

$$\eta = \frac{N^{\circ} \text{ de pares eletrão - lacuna gerados}}{N^{\circ} \text{ de fótons incidentes}} \quad (3.1)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{I_{ph}}{P_{in}} = \frac{e\eta\lambda}{hc} = \frac{\eta\lambda_{[\mu m]}}{1,24} \quad (3.2)$$

### 3.3.1 Fotodíodo PIN

O fotodíodo do tipo PIN (PIN-PD) é constituído por uma junção  $pn$ , na qual foi introduzido um semiconductor intrínseco ( $i$ ) entre as regiões  $p$  e  $n$ , criando uma zona de depleção maior. Na Figura 3.10 pode-se ver a estrutura típica de um PIN-PD.

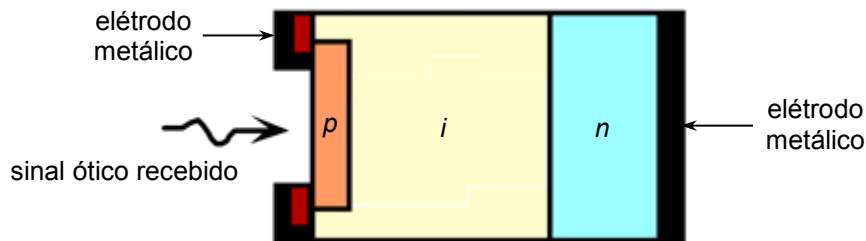


Figura 3.10 – Estrutura de um PIN-PD [34] (adap.).

A região intrínseca é muito maior do que as do tipo  $p$  e  $n$ , fazendo com que grande parte da luz seja absorvida nesta zona, aumentando assim a eficiência e a responsividade [42]. Algumas das principais vantagens do PIN-PD em relação ao APD são: tem mecanismos eletrónicos mais simples, não necessita de controlo de temperatura, funciona com uma voltagem de apenas 5 – 15 V e o seu preço é bastante reduzido. De notar também que todos os sistemas com POF disponíveis a nível comercial funcionam apenas com fotodetetores do tipo PIN [6].

### 3.3.2 Fotodíodo de avalanche

O fotodíodo de avalanche (APD) tem uma estrutura que difere de um PIN-PD devido à existência de um nível adicional do tipo  $p$ , entre a região intrínseca e a região  $n$ . Esta diferença pode-se observar na Figura 3.11.

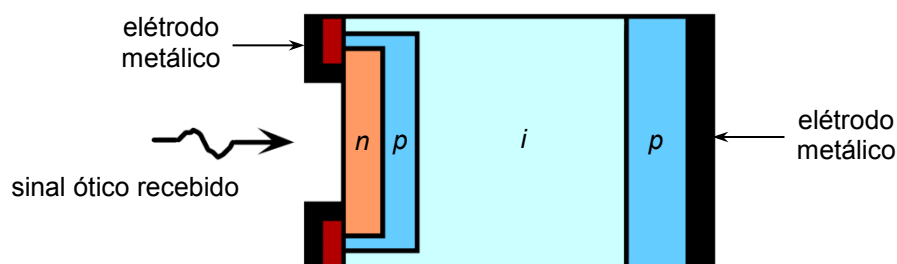


Figura 3.11 – Estrutura de um APD [34] (adap.).

Num APD a absorção de um fóton incidente produz um par elétron-lacuna, tal como como no PIN-PD. No entanto, o grande campo elétrico que existe na região de depleção faz com que a propagação dos portadores seja rapidamente acelerada. Isto faz com que os elétrons na banda de valência sejam excitados, gerando um par elétron-lacuna adicional. O processo de criação de mais pares elétron-lacuna é conhecido como multiplicação por avalanche [43]. Para que exista multiplicação por avalanche, o APD necessita de uma tensão de polarização inversa que pode chegar a 100 V [6], ou seja muito superior à do PIN-PD. Os pares elétron-lacuna são gerados na região intrínseca, no entanto, a multiplicação por avalanche ocorre na região tipo  $p$  adicionada [43]. O ganho da multiplicação por avalanche ( $M_{APD}$ ) é dado pela razão entre a fotocorrente multiplicada ( $I_{ph(M)}$ ) e a fotocorrente primária ( $I_{ph}$ ) [34], tal como se pode ver pela Equação 3.3.

$$M_{APD} = \frac{I_{ph(M)}}{I_{ph}} \quad (3.3)$$

As principais vantagens do APD em relação ao PIN-PD consistem no facto de este ter um ganho adicional devido à multiplicação por avalanche, tornando-o um fotodetector com maior eficiência e responsividade. As desvantagens prendem-se com a necessidade de uma maior tensão inversa, dependência da temperatura e o preço é mais elevado. Relativamente à sua utilização com POFs, os APDs foram utilizados apenas em algumas experiências [6].

### 3.4 Figuras de mérito

Para se fazer a avaliação do desempenho de sistemas de comunicação ótica com POF, num analisador de sinais podem ser visualizados diferentes tipos de figuras de mérito. Quando o objetivo de um teste é determinar qual é o ritmo binário máximo que é suportado por uma POF, uma codificação digital bastante utilizada é a *Non Return to Zero* (NRZ). Para avaliar a qualidade do sinal recebido para este caso, recorre-se à análise do *Bit Error Rate* (BER) ou do diagrama de olho [6]. Outro tipo de sinais que pode ser transmitido por POF são os sinais de *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) [6]. São usados por exemplo em sistemas *Digital Video Broadcast – cable* (DVB-c), Televisão Digital Terrestre (TDT), Wi-Fi, entre outros. Para se fazer a avaliação deste tipo de sinais recorre-se à análise do diagrama de constelação QAM ou do parâmetro *Error Vector Magnitude* (EVM).

### 3.4.1 BER

Se a sequência de bits a transmitir consistir simplesmente na presença ou ausência de luz na fibra, então a codificação digital mais simples a utilizar é a NRZ [44]. A Figura 3.12 ilustra o formato desta codificação.

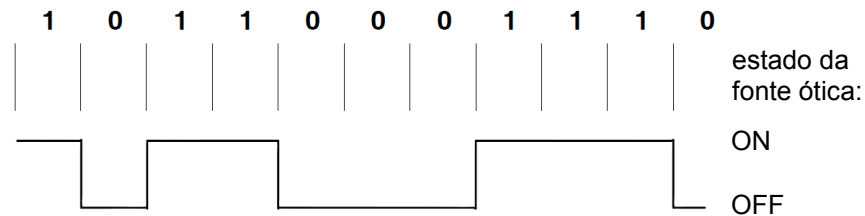


Figura 3.12 – Codificação NRZ [44] (adap.).

Como se pode ver, um bit “1” é representado com a presença de luz emitida pela fonte ótica e um bit “0” pela ausência da mesma [44]. Quando esta sequência de bits chega ao recetor, é possível que não seja exatamente igual à transmitida.

Num sistema de comunicação digital, uma das figuras de mérito que determina o seu bom desempenho é o BER. Esta medida é dada pela razão entre o número de bits errados obtidos na receção e o número de bits transmitidos originalmente, tal como se pode ver pela Equação 3.4.

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

O BER é normalmente expresso como um número do tipo  $10^{-6}$  ou 1E-06, o que neste caso significa que se detetou um bit errado em um milhão de bits transmitidos. Deve-se ter em conta que os erros são acontecimentos normais em sistemas de comunicação, existindo sempre a possibilidade de se obter bits errados. O objetivo é fazer com que essa probabilidade seja o menor possível. O BER é influenciado por fatores como o ritmo binário da ligação, a potência de emissão, a distância e a quantidade de ruído. [44].

Um  $BER = 10^{-6}$  não é considerado grave para funções simples como por exemplo a leitura de ficheiros num computador. Mas, para transmissão de dados este valor é ligeiramente elevado. Um  $BER < 10^{-15}$  seria o desejado para uma transmissão de dados ideal. No entanto, um  $BER = 10^{-9}$  consiste num valor bastante aceitável que é normalmente o limite máximo para uma transmissão de dados fiável [6].

### 3.4.2 Diagrama de olho

Outra figura de mérito que pode ser utilizada para avaliar a recepção de sequências binárias NRZ é o diagrama de olho. Esta técnica de medida é feita no domínio do tempo e consiste numa ferramenta importante para avaliar o desempenho de um sistema ótico digital, pois permite a visualização da distorção do sinal transmitido. Idealmente, o impulso ótico deveria aproximar-se de uma função em degrau, mas impulsos óticos rápidos normalmente apresentam-se com uma forma mais arredondada [45].

O diagrama de olho consiste em várias (de centenas a milhões) instâncias do sinal recebido sobrepostas [44], permitindo comparar os seus períodos de bit. O aspeto de um diagrama de olho pode ser visualizado na Figura 3.13.

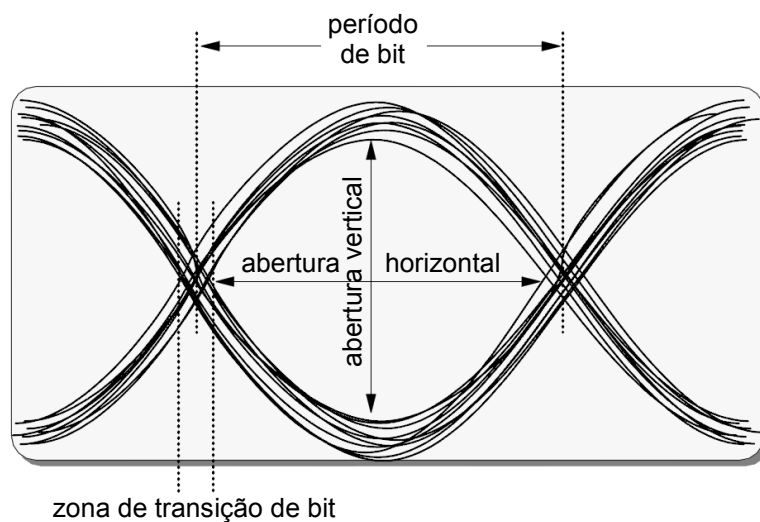


Figura 3.13 – Diagrama de olho [44] (adap.).

Na análise do diagrama de olho, os seguintes aspetos devem ser considerados [44]:

- 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* (variação de atraso) 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.

### 3.4.3 Diagrama de constelação QAM

Como já foi explicado, num sinal NRZ são atribuídos valores de tensão para os bits “0” e “1”. Esta forma de modular, apesar de simples, não explora todas as potencialidades de uma modulação. A utilização de portadoras em quadratura cria dois canais ortogonais conseguindo duplicar a quantidade de informação transmitida na mesma largura de banda. Estes canais designam-se por *In-phase* (I) e *Quadrature* (Q) e obtêm-se multiplexando a informação que se pretende transmitir [46]. A Figura 3.14 mostra um exemplo de uma constelação 16-QAM.

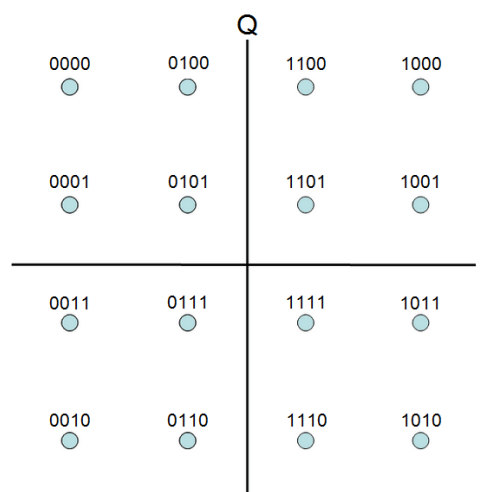


Figura 3.14 – Diagrama de uma constelação 16-QAM [47].

Como se pode ver, são agrupados 4 bits para formar 1 símbolo QAM, ou seja, o sistema consegue transmitir o quádruplo da informação, comparativamente ao NRZ, na mesma largura de banda. Quando se aumenta o número de símbolos na constelação, estes ficam mais próximos entre si. A maior proximidade provoca problemas na recuperação dos símbolos na fase de receção, pois aí a constelação estará distorcida. Ou seja, existe um compromisso entre a quantidade de informação a transmitir numa determinada largura de banda e a robustez dessa transmissão [46].

### 3.4.4 EVM

No processo de modulação pode ocorrer distorção e os símbolos ficarem desalinhados da sua posição ideal. Este desalinhamento por si pode não ser crítico, mas na receção é necessário considerar o ruído que vai desalinhar ainda mais os símbolos. O

desalinhamento total na receção pode ser tal que o símbolo se afaste muito da posição ideal, podendo ser entendido como o símbolo adjacente e provocar um erro [46]. Na Figura 3.15 está ilustrada uma constelação 16-QAM com distorção.

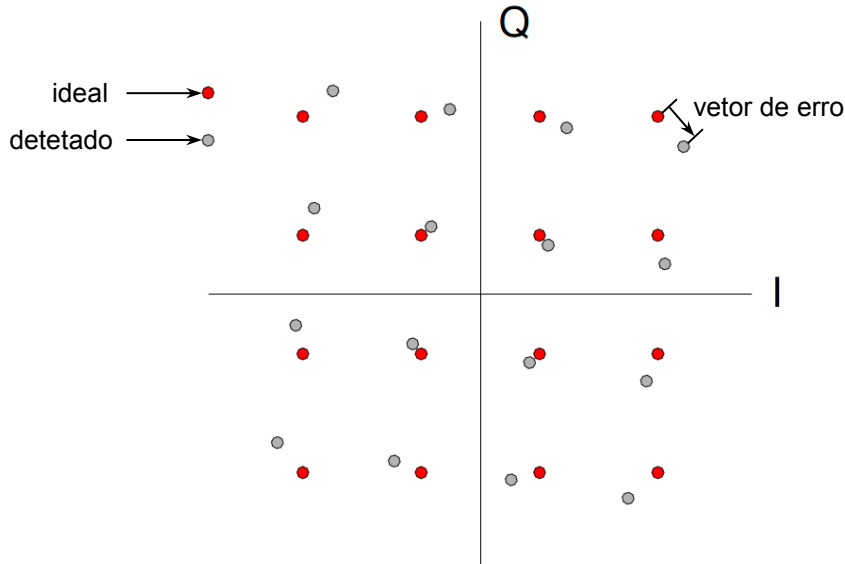


Figura 3.15 – Constelação 16-QAM com distorção [46] (adap.).

Como se pode ver, a vermelho está representado o símbolo que deveria ser detetado em condições ideais e a cinzento encontra-se o símbolo que foi detetado fora da suposta posição. Para representar o desalinhamento da constelação, com distorção relativamente à ideal, é utilizado o parâmetro EVM. Este é medido em percentagem e relaciona a potência média do erro ( $\overline{P_{erro}}$ ) e a potência média do sinal ideal ( $\overline{P_{ideal}}$ ) através da Equação 3.5.

$$EVM = \frac{\sqrt{\overline{P_{erro}}}}{\sqrt{\overline{P_{ideal}}}} \quad (3.5)$$

O valor de EVM depende essencialmente do tipo de modulação adotado. Nas constelações com mais símbolos, estes ficam mais próximos entre si, o que exige um valor de EVM mais baixo para não provocar erros na receção [46]. Como exemplo, a recomendação IEEE802.11a (*wireless*) aponta um valor máximo de 11,2% para 16-QAM e 5,6% para 64-QAM [48].

# Capítulo 4

---

## Análise do Desempenho de Sistemas com POF

### 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas as soluções encontradas para o dimensionamento de sistemas de comunicação ótica, tendo como meio de transmissão uma POF. Inicialmente será feita uma introdução aos principais aspetos a ter em conta no modo de funcionamento do *software* utilizado para as simulações desta dissertação. Seguidamente será apresentado um diagrama de blocos do sistema de comunicação ótica a ser utilizado, para que se compreenda melhor a funcionalidade de cada componente.

Também serão feitas comparações entre possíveis opções a considerar para cada bloco, respeitando as características fornecidas nos *datasheets* dos fabricantes ou a bibliografia utilizada nesta dissertação, para que as simulações desenvolvidas sejam o mais fidedignas possível. Os sistemas serão avaliados recorrendo a figuras de mérito como o BER, o diagrama de olho, o EVM, e a qualidade das constelações recebidas através de sinais QAM.

Finalmente, após ter sido analisado o desempenho do sistema e seleccionados os melhores componentes para o mesmo, irá fazer-se a sua aplicação num cenário real. Trata-se de um sistema de transmissão de vídeo digital, numa arquitetura com fibra até à “última milha” (*last mile*), simulando assim o esquema utilizado por empresas da área.

## 4.2 Introdução ao VPI

O *software* VPIphotonics™, da VPIsystems®, é uma ferramenta muito completa que permite desenvolver uma vasta gama de circuitos, nomeadamente os de transmissão ótica. As simulações realizadas neste trabalho foram feitas através da aplicação VPItransmissionMaker™ 8.5, sendo nesta dissertação referenciada por VPI.

Os resultados das simulações foram conseguidos recorrendo à aplicação VPIphotonicsAnalyzer™ 8.5, a qual é executada após a parametrização da simulação, quando é utilizado no circuito algum módulo para análise de dados.

Para que se compreenda melhor o ambiente de simulação do VPI, irá de seguida ser descrita a estrutura básica do programa, assim como os parâmetros mais importantes a ter em conta no desenvolvimento de uma simulação. Para informações mais detalhadas sobre o *software*, dever-se-á consultar os manuais do produto.

### 4.2.1 Interface gráfica do simulador

Quando se inicia o VPI, o aspeto do ambiente gráfico é semelhante a outros programas de simulação baseados em manipulação de módulos.

A Figura 4.1 mostra a interface gráfica do simulador VPI, onde foram adicionados alguns números para identificar as diferentes partes da janela principal da aplicação.

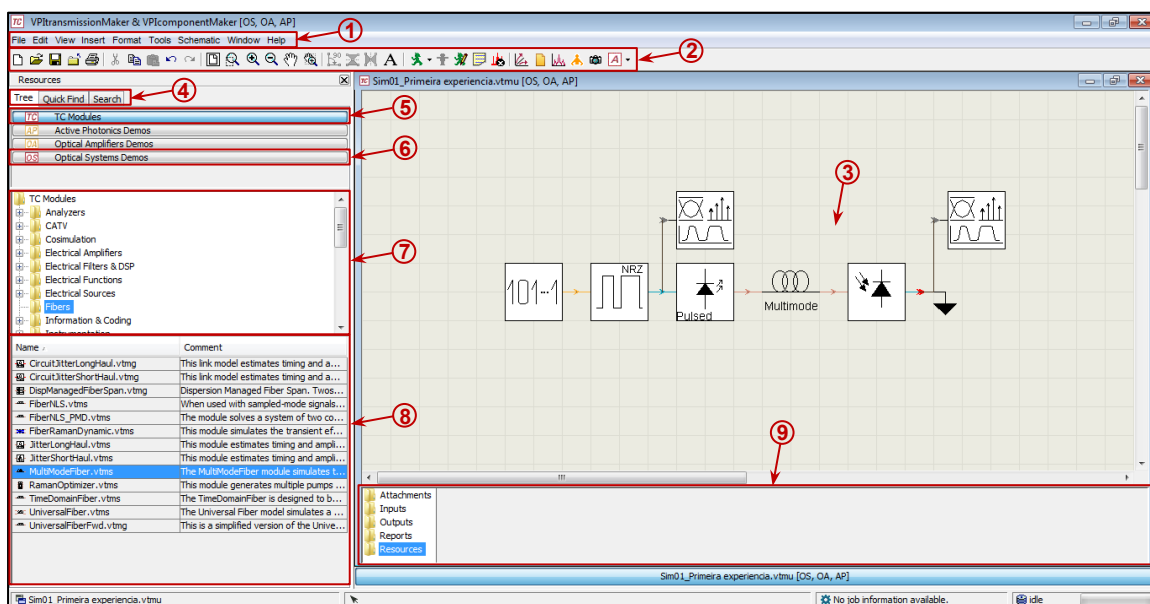


Figura 4.1 – Interface gráfica do simulador (VPItransmissionMaker™ 8.5).

A barra de menus identificada por (1) tem a função de permitir executar qualquer ação disponibilizada pelo VPI, tal como: desenvolver e editar cenários de simulações, preferências das configurações, visualização de parâmetros, etc.. Em (2), as opções da barra de menus que costumam ser mais utilizadas encontram-se disponíveis na forma de atalhos, com funções como: desenvolver novos cenários, salvar os esquemas, ampliar/reduzir a visualização do esquema, executar ou parar a simulação, etc..

Quando um novo ficheiro de simulação é criado (através do menu *File > New* de (1) ou usando o atalho correspondente de (2)), surge uma nova folha de simulação, denominada por esquema (*schematic*). Em (3) pode-se observar o esquema da primeira simulação realizada, a qual é apresentada posteriormente na Figura 4.7. Para se adicionarem módulos existentes, os separadores *Quick Find* (encontrar depressa) ou *Search* (procurar) de (4) podem ser utilizados para fazer as pesquisas. Se o nome do módulo pretendido não for conhecido, o separador *Tree* (árvore) deverá ser selecionado e ao clicar-se no botão *TC Modules* identificado por (5), surgirão todos os módulos disponíveis, organizados em categorias. Como se pode ver, o módulo *MultiMode-Fiber.vtms* (que será utilizado para representar uma POF) encontra-se dentro da categoria *Fibers* no painel (7) e está selecionado a azul no painel de módulos (8).

Outra opção interessante surge ao clicar no botão *Optical Systems Demos* em (6), o qual faz surgir todas as demonstrações de simulações pré-definidas no VPI. Estes cenários de demonstração são principalmente úteis para principiantes, já que servem de termo de comparação e auxiliam na construção de modelos de simulação personalizados. Finalmente, o explorador de ficheiros associados às simulações, identificado por (9), consiste num painel com pastas que contêm ficheiros associados às simulações e um painel que apresenta o conteúdo das pastas selecionadas [49].

## 4.2.2 Interface gráfica do analisador de sinais

O analisador de sinais do VPI surge quando se tem um sistema pronto a funcionar e sem erros, para que os dados obtidos possam ser corretamente visualizados. Após executar-se a simulação, a interface gráfica que aparece está exemplificada na Figura 4.2.

Os gráficos e dados obtidos correspondem à simulação do primeiro circuito desenvolvido, o qual como já foi mencionado está apresentado na Figura 4.7. De notar que a apresentação dos gráficos e dados foi personalizada para uma melhor visualização dos mesmos.

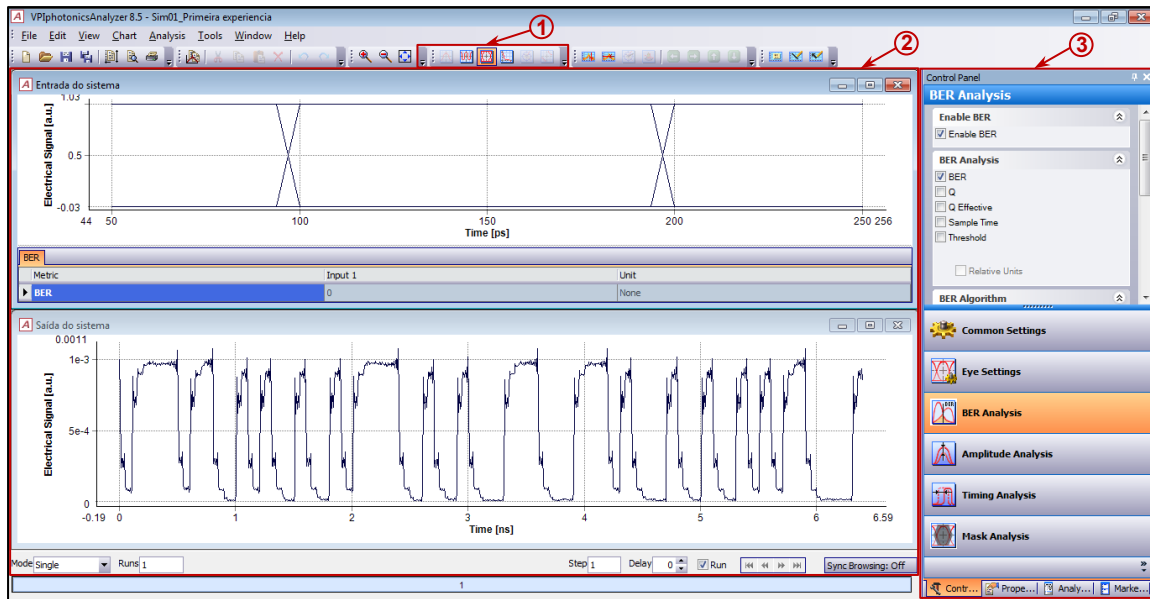


Figura 4.2 – Interface gráfica do analisador de sinais (VPIphotonicsAnalyzer™ 8.5).

Identificado por (1) estão os cinco modos de visualização disponíveis, em que os três primeiros são os de maior interesse: o analisador do espectro óptico (OSA), o osciloscópio (*Scope*) e o analisador do diagrama de olho (*Eye*). Ao selecionar-se um desses modos de visualização, surge no painel (2) o respetivo gráfico. Neste caso, os dois sinais analisados correspondem a um sinal elétrico, em que o de cima é o diagrama de olho do sinal original à entrada do sistema e o de baixo é o sinal recebido à saída do sistema.

O painel (3) possui vários tipos de análise de dados. No caso mostrado pode-se ver que foi escolhida a análise do BER para o sinal à entrada do sistema (painel (2) em cima).

### 4.2.3 Hierarquia dos módulos

O VPI é composto por uma hierarquia de módulos organizada. Isto permite uma gestão mais fácil dos módulos existentes numa simulação, já que podem ser manipulados independentemente ou como um grupo sempre que for necessário.

A Figura 4.3 mostra os três níveis da hierarquia, na qual os módulos podem ser classificados como: universo, galáxia ou estrela. Tal como pode ser deduzido dos seus nomes, uma estrela representa o nível mais baixo da interface de simulação, a galáxia pertence ao segundo nível e o universo corresponde ao terceiro e mais alto nível da hierarquia.

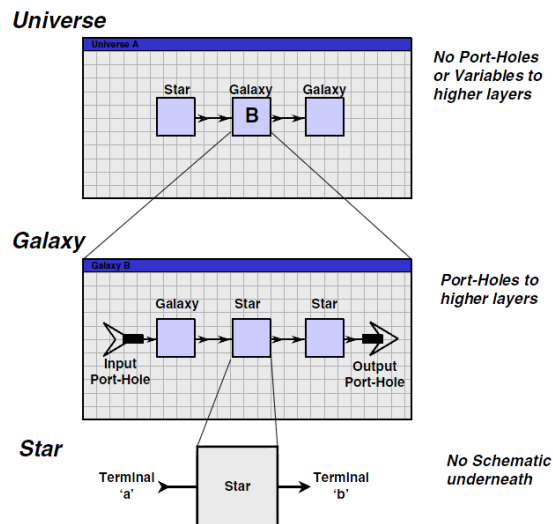


Figura 4.3 – Hierarquia do VPI [50].

Respeitando esta hierarquia, os módulos podem conter três tipos de extensões: “.vtms”, “.vtmg” ou “.vtmu”, correspondendo a uma estrela, galáxia ou universo, respetivamente.

Uma estrela representa um único módulo com uma determinada função, o qual não pode ser subdividido noutros módulos mais simples. Isto é, consiste num componente base absoluto de um sistema. Uma galáxia pode ser descrita como sendo um módulo de segundo nível formado por um conjunto de estrelas interligadas (ou até mesmo outras galáxias). Para poder ser implementada num universo, uma galáxia tem de conter pelo menos um porto de *input* e outro de *output*, tal como se pode observar na Figura 4.3. O universo é o único módulo que pode ser executado pelo utilizador. Este representa todo o cenário de simulação e consiste numa combinação de estrelas e/ou galáxias interligadas.

Do ponto de vista de um universo, uma galáxia atua como um módulo único e as estrelas nela contida não podem ser vistas a partir do esquema principal. Contudo, o esquema da galáxia pode ser visualizado ao clicar-se nela com o botão direito do rato, a partir do esquema do universo e selecionando a opção *Look Inside* (olhar para o interior) [49].

#### 4.2.4 Principais parâmetros das simulações

Quando se executa uma simulação, qualquer que seja a estrela, galáxia ou universo, irá operar de acordo com certos parâmetros. O valor destes parâmetros pode ser alterado a partir da correspondente janela de edição de parâmetros. Os dois principais tipos de

parâmetros são os que correspondem a cada módulo (individuais) e os parâmetros globais que influenciam todo o universo.

#### 4.2.4.1 Parâmetros individuais

Os parâmetros individuais são os que correspondem apenas às configurações de cada módulo, afetando apenas o próprio. A Figura 4.4 é um exemplo de uma janela de edição de parâmetros, que neste caso corresponde ao módulo *MultiModeFiber.vtms*. Os parâmetros presentes são os que vêm definidos por defeito.

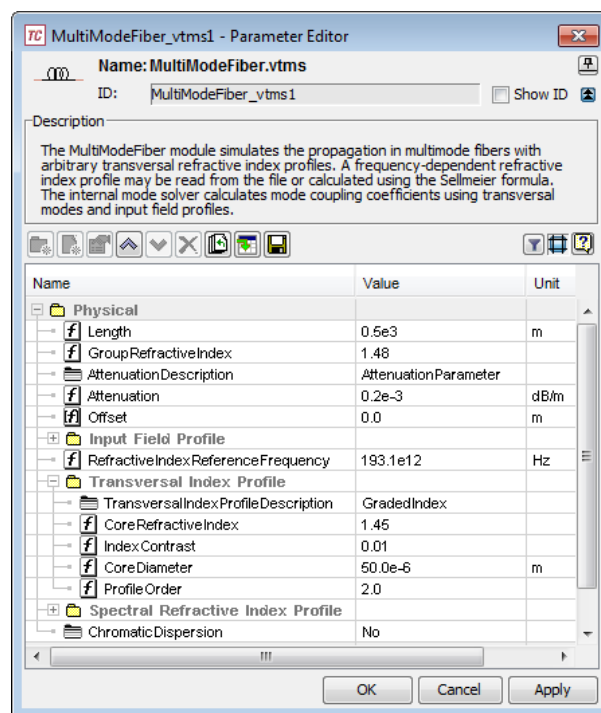


Figura 4.4 – Janela de edição de parâmetros do módulo *MultiModeFiber.vtms*.

Através desta janela o utilizador pode alterar os valores dos parâmetros que pretender, consoante a simulação que pretenda fazer. No caso desta dissertação, os parâmetros de maior interesse a manipular para este módulo serão: o comprimento da fibra (*Length*), a atenuação (*Attenuation*), a frequência de referência (*RefractiveIndexReferenceFrequency*), o perfil do índice de refração (*TransversalIndexProfileDescription*), o índice de refração do núcleo (*CoreRefractiveIndex*), o contraste (*IndexContrast*) e o diâmetro do núcleo (*CoreDiameter*).

No caso de o módulo ser uma estrela, o utilizador pode aceder à janela de edição de parâmetros clicando com o botão direito do rato e escolhendo a opção *Edit Parameters*,

ou simplesmente fazendo duplo clique no módulo. Se o módulo for uma galáxia, tem que se ter em atenção que os módulos nela contidos ficarão com os valores dos parâmetros da galáxia (nível superior). Esta situação irá ser observada na secção 4.4.1, para o caso da galáxia utilizada para uma fonte ótica com LED.

#### 4.2.4.2 Parâmetros globais

Para além dos parâmetros individuais dos módulos, o VPI tem ainda parâmetros globais que são extremamente importantes para uma correta e eficiente operação do simulador. Para se ter acesso à visualização dos mesmos, basta fazer duplo clique com o rato em cima da área do esquema em questão.

Na Figura 4.5 pode-se ver a janela de edição de parâmetros globais do VPI, com os respetivos valores por defeito.

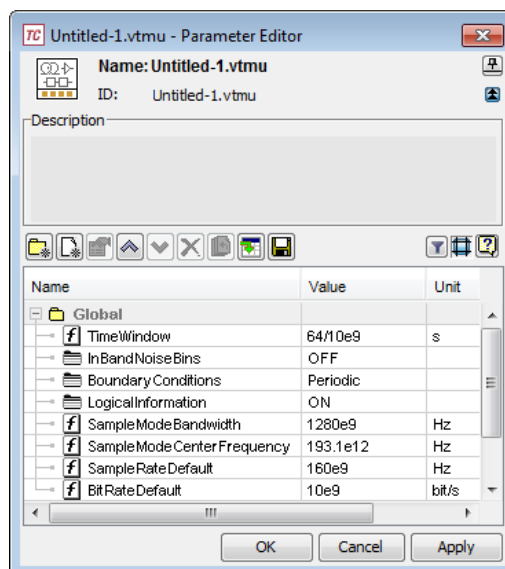


Figura 4.5 – Janela de edição de parâmetros globais.

Os parâmetros mais importantes a ter em conta são [50] (adap.):

- *TimeWindow*: define o período de tempo em que cada bloco de dados é representado. É muito importante conseguir definir corretamente este parâmetro, já que irá influenciar bastante a resolução final dos espectros apresentados, assim como o valor do BER e do EVM. Normalmente, é definido com o valor  $(2^n)/BitRateDefault$ ,

sendo  $n$  um número inteiro (tipicamente, os valores de  $n$  podem variar entre 4 e 10, podendo no entanto ficar fora deste intervalo).

- *BoundaryConditions*: permite fazer a seleção entre condições de fronteira do tipo periódico (*Periodic*), aperiódico (*Aperiodic*) ou misto (*Mixed*). O tipo periódico é o mais comum porque desta forma os filtros e os espectros são representados de forma exata. O tipo aperiódico é mais usado quando se pretende usar galáxias. O tipo misto é utilizado quando é necessário utilizar-se as condições de fronteira periódica e aperiódica numa mesma simulação.
- *SampleModeBandwidth*: define a largura de banda de amostragem de todos os sinais da simulação. É usado, por exemplo, em simulações que tenham galáxias.
- *SampleModeCenterFrequency*: define a frequência central de operação da simulação.
- *SampleRateDefault*: é utilizado em todos os módulos que tenham um parâmetro para a frequência de amostragem. Se o módulo enviar para o seu *output* dados em formato de amostras em vez de blocos (blocos é o formato mais comum), será usado o parâmetro *SampleModeBandwidth* em vez deste. Normalmente é definido com o valor  $(2^m) * \text{BitRateDefault}$ , onde  $m$  é um número inteiro (tipicamente entre 2 e 6, inclusive).
- *BitRateDefault*: é usado por defeito em todos os módulos que tenham um parâmetro para o débito binário.

De notar que nesta dissertação, os parâmetros *BoundaryConditions* e *SampleModeBandwidth* serão usados apenas nas simulações respeitantes à utilização de um LED como fonte ótica. Isto porque este módulo é uma galáxia, e dentro desta é feita a conversão de dados de formato de blocos para amostras e vice-versa. Para todas as outras simulações, ter-se-ão em conta todos os outros parâmetros globais exceto estes dois.

#### 4.2.4.3 Restrições nos parâmetros globais

Quando se trabalha com sinais periódicos uma série de restrições têm de ser consideradas. Primeiro, o número de amostras por janela temporal tem de ser uma potência de dois. Esta condição impõe uma limitação quando se definem os parâmetros globais da *TimeWindow* e do *SampleRateDefault*. Como tal, a Equação 4.1 tem de ser respeitada.

$$N^{\circ}amostras = TimeWindow \times SampleRateDefault = 2^n \quad (4.1)$$

Adicionalmente, a frequência de trabalho máxima permitida tem de respeitar o teorema de Nyquist, o qual neste caso é dado pela Equação 4.2.

$$f_{max} < \frac{SampleRateDefault}{2} \quad (4.2)$$

Se alguma destas condições não for respeitada, ao ser executada a simulação surge uma mensagem de erro com a respetiva razão [49].

### 4.3 Arquitetura do sistema

Depois de se perceber quais os principais aspetos a ter em conta para se trabalhar com a ferramenta de simulação, pode-se passar à parte das simulações propriamente ditas.

Na Figura 4.6 é apresentado o diagrama de blocos de um sistema de comunicação ótica básico com POF, implementado no VPI.

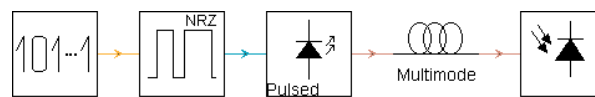
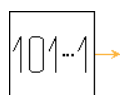



Figura 4.6 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicação ótica com POF.


Cada um dos módulos é uma estrela, ou seja, os componentes são os mais simples que se podem ter na hierarquia do VPI.


As suas funções são as seguintes:




**PRBS:** gera uma sequência binária pseudoaleatória (PRBS). Isto é, serve para gerar os bits “0” e “1” de forma aleatória, representando a informação que se quer transmitir até ao destino.

 **Codificador NRZ:** converte o sinal digital para um sinal elétrico, segundo uma codificação NRZ.

 **Fonte ótica:** faz a conversão eletro-ótica e transmite o sinal gerado (modulação direta). O bit elétrico “0” será convertido para um sinal ótico com um nível de intensidade baixo e o bit elétrico “1” será convertido para um nível de intensidade alto [51].

 **Fibra ótica:** meio de transmissão do sinal ótico que faz a ligação entre o emissor e o recetor. O bloco *MultiModeFiber.vtms* será utilizado para representar POFs e MM-GOFs, enquanto que para a fibra de sílica monomodo (SM-GOF) será o bloco *UniversalFiberFwd.vtmg*.

 **Fotodetector:** faz a conversão ótico-elétrica do sinal recebido para que este possa ser visualizado no analisador de sinais.

### 4.3.1 Primeira simulação

Como experiência inicial, executou-se uma simulação com todos os parâmetros com os valores por defeito para o sistema apresentado na Figura 4.7, com o objetivo de observar o desempenho de um sistema de comunicação ótica básico. Foi utilizado um díodo laser (*LaserPulsed.vtms*), uma fibra ótica multimodo (*MultiModeFiber.vtms*) e um fotodíodo PIN (*Photodiode.vtms*). Foram adicionados dois módulos analisadores de sinais (*SignalAnalyzer.vtms*), um à entrada do sistema após a geração do sinal e antes da transmissão, e outro na saída do sistema, a fim de permitir fazer-se a comparação entre o sinal transmitido e o recebido.

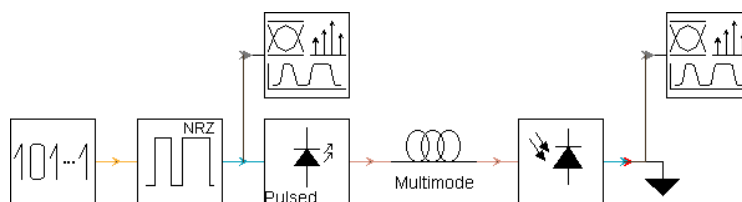


Figura 4.7 – Sistema utilizado na primeira simulação.

No analisador de sinais foram observados os dados presentes nos gráficos da Figura 4.8.

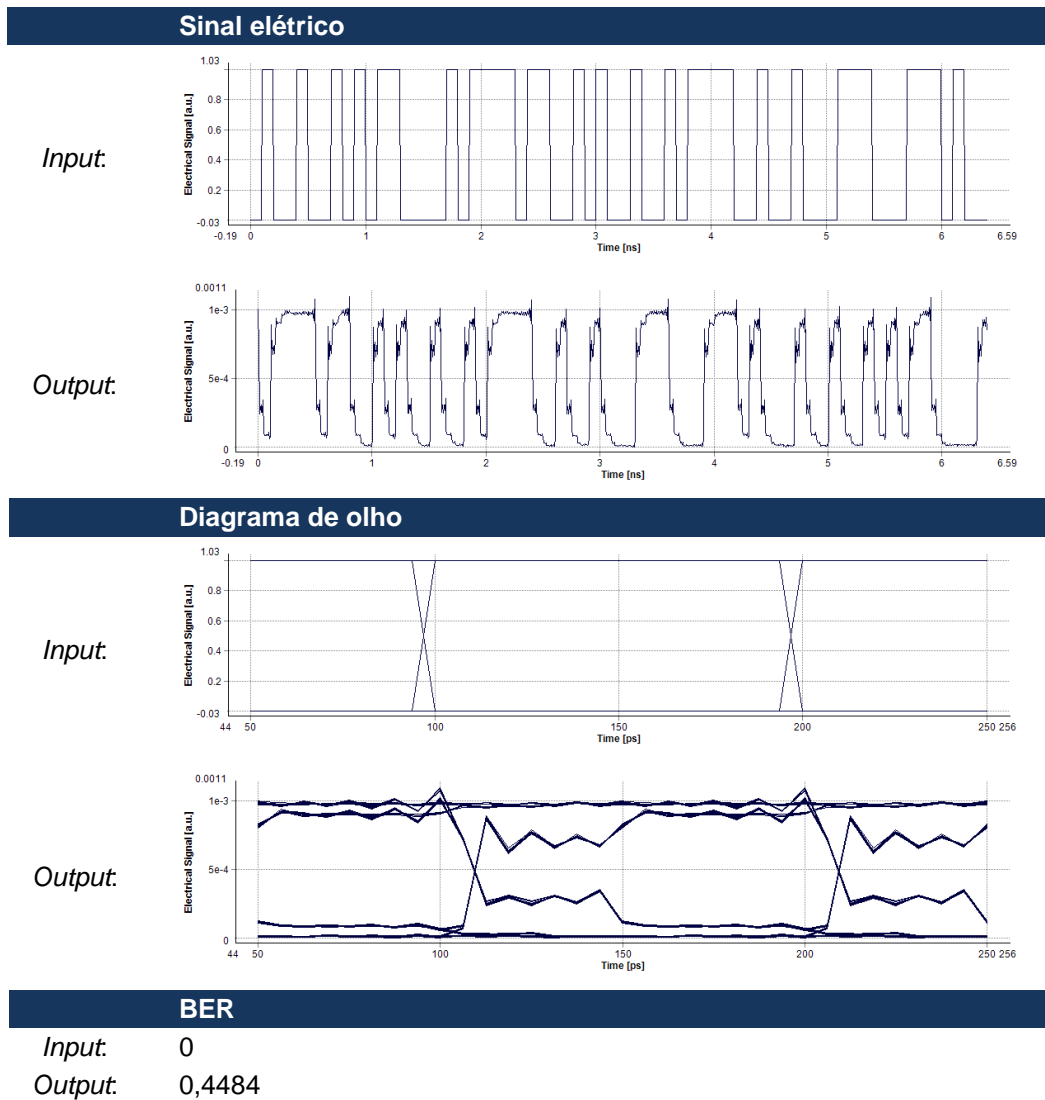


Figura 4.8 – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação.

Como se pode observar, relativamente aos dados de *input* visualizados, verifica-se que a onda do sinal segue uma codificação NRZ, o diagrama de olho está bem definido e o valor do BER é 0, indicando que o sinal a ser transmitido se encontra em boas condições. Quanto ao sinal elétrico recebido, verifica-se que a sua forma sofreu alguma distorção, o diagrama de olho não está em boas condições e o BER é de cerca de 0,45, ou seja, é bastante elevado.

As razões para o mau desempenho do sistema devem-se ao facto de se terem usado todos os valores dos parâmetros por defeito e de se ter a necessidade de talvez acrescentar mais alguns módulos que auxiliem na correta transmissão de dados. Sendo assim, há a necessidade de se tentar melhorar o desempenho do sistema.

### 4.3.2 Melhoramentos no sistema

Como foi visto pelos resultados obtidos na simulação anterior, para que o sistema apresente bom desempenho têm de ser feitos melhoramentos no mesmo. Para tal, uma solução possível é adicionar-lhe alguns módulos que existem no VPI com essa mesma finalidade.

Fica ao critério de cada utilizador melhorar o desempenho do seu sistema da forma que entender mas, para o caso da utilização de fibras multimodo (POF e MM-GOF), optou-se por otimizar o sistema da forma apresentada na Figura 4.9. No caso de um sistema que use uma fibra monomodo, o sinal obtido tem qualidade acrescida, podendo não ser necessário a adição destes módulos. A escolha destes componentes prendeu-se pela série de tentativas realizadas para uma melhoria ao desempenho do sistema, e também pela consulta de bibliografia que indica que estes são por vezes utilizados em cenários reais com POF [6] [48].

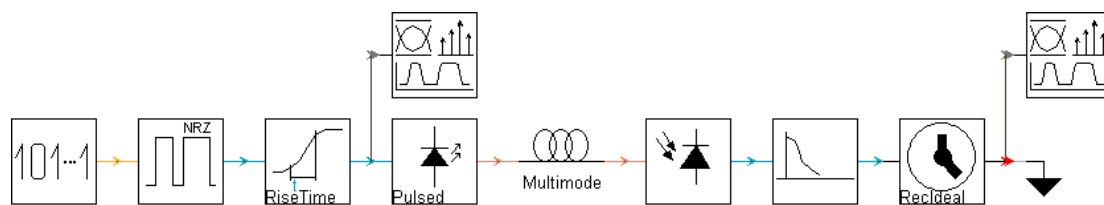



Figura 4.9 – Sistema utilizado na primeira simulação melhorado.

Pela Figura 4.9 pode-se observar que os módulos funcionais que foram adicionados ao sistema inicial são o terceiro, sétimo e oitavo. As suas funções são as seguintes:

 **RiseTimeAdjust.vtms**: é um filtro gaussiano que transforma, por exemplo, 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. Na Figura 4.10 pode-se ver a funcionalidade deste módulo.

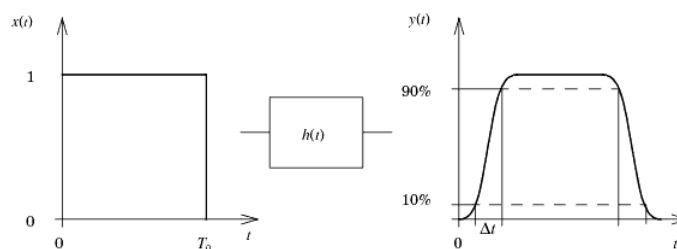



Figura 4.10 – Função do módulo *RiseTimeAdjust.vtms* [52].

 *FilterEl.vtms*: é um filtro elétrico universal, ou seja, tem várias funções de filtragem. Neste caso, vai ser utilizado como filtro passa-baixo (LPF), deixando passar apenas os sinais abaixo da frequência de corte. Veja-se a ilustração da Figura 4.11.

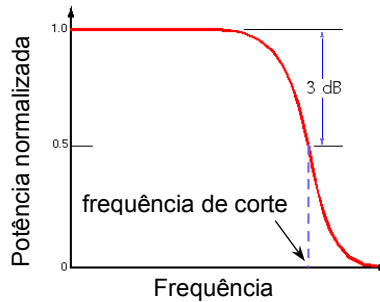



Figura 4.11 – Função do módulo *FilterEl.vtms* (modo LPF) [53] (adap.).

 *ClockRecoveryIdeal.vtms*: serve para recuperar o *timing* do sinal original. Este módulo resincroniza o sinal elétrico vindo do fotodetector (passando pelo LPF) com o sinal original transmitido, a partir do canal de informação lógica especificado que vem em anexo ao sinal físico (parâmetro *ChannelLabel*, que neste caso pode ser deixado por defeito).

Depois de feitas estas alterações e com todos os parâmetros por defeito, a simulação foi novamente executada. Na Figura 4.12 estão apresentados os resultados antes e após a adição dos novos componentes no sistema.

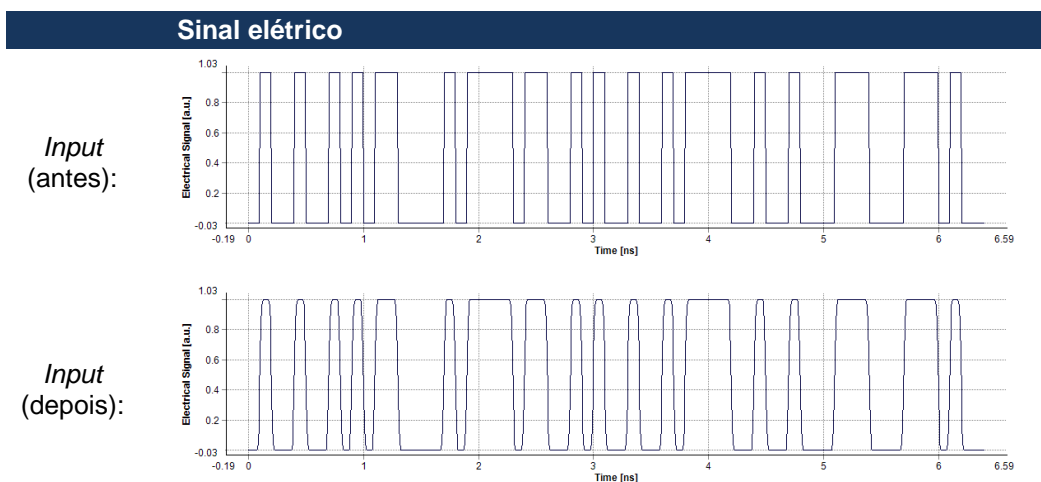


Figura 4.12 – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação melhorada (sinal elétrico de *input*).

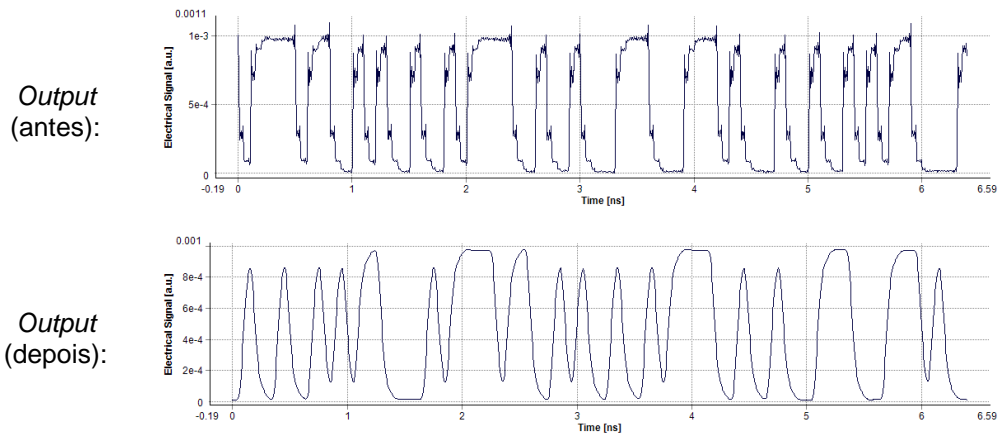


Figura 4.12 (cont.) – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação melhorada (sinal elétrico de *output*).

Como se pode observar, o sinal elétrico de *input* deixou de ser uma onda quadrada e passou a ter contornos mais suaves. Isto tem impacto principalmente no sinal que é recebido no *output*, que como se pode ver deixou de ter tanta distorção. Em relação ao diagrama de olho e ao BER os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.13.

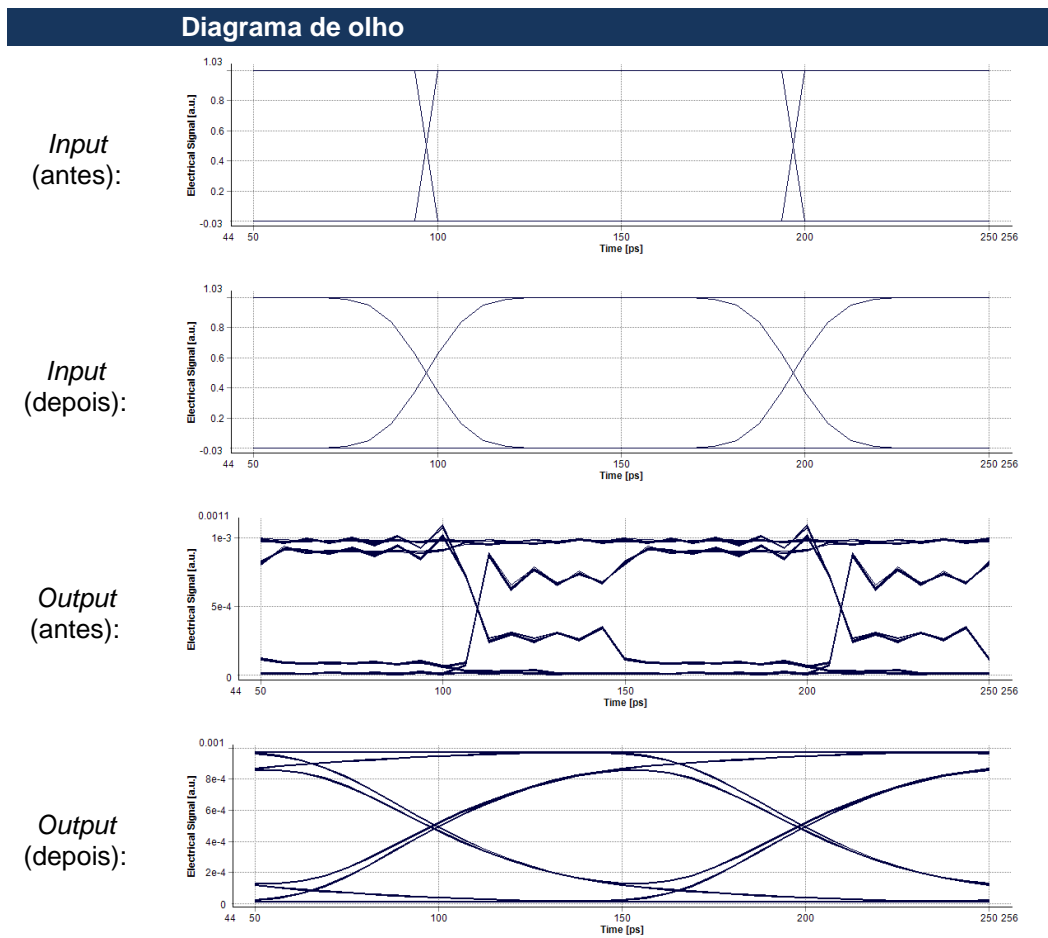


Figura 4.13 – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação melhorada (diagrama de olho).

BER	
<i>Input</i> (antes):	0
<i>Input</i> (depois):	0
<i>Output</i> (antes):	0,4484
<i>Output</i> (depois):	1,3003e-19

Figura 4.13 (cont.) – Resultados do sistema utilizado na primeira simulação melhorada (BER).

Como se pode ver, o diagrama de olho do sinal de *input* ficou com uma forma mais arredondada (melhor) e o de *output* também teve melhorias bem visíveis. A melhoria da qualidade do sinal recebido é comprovada pelos valores de BER, que passou de 0,45 para 1,3E-19.

Portanto, mesmo sem se ter feito qualquer modificação dos parâmetros da simulação, com a simples adição destes três módulos (que num sistema real podem ser implementados através de *software*) conseguiu-se obter na receção uma boa qualidade de sinal. Sendo assim, este será o sistema base que será utilizado para as simulações seguintes deste trabalho.

## 4.4 Parametrização do sistema

Depois de se ter definido a arquitetura base do sistema, poderá passar-se à escolha e parametrização dos componentes que irão ser utilizados. Os componentes a parametrizar são a fonte ótica, o fotodetector e a fibra ótica. Entre estes foram escolhidos vários tipos, para que se possa fazer a posterior comparação entre o desempenho dos mesmos. No final são apresentados os parâmetros globais configurados.

### 4.4.1 Parâmetros da fonte ótica

Para começar, irá descrever-se a metodologia utilizada para a escolha e parametrização das fontes óticas. Serão analisados três tipos: LED, diodo laser (LD), que poderá ser FP-LD ou DFB-LD, e VCSEL. A comparação entre estes tipos de transmissores é importante para se fazer um bom dimensionamento dos sistemas, tendo em conta as suas vantagens e desvantagens ao serem considerados em diferentes áreas de aplicação. Para além disto, na bibliografia consultada é bastante comum fazer-se a comparação entre sistemas de comunicação ótica com POF, testando diferentes tipos de fontes óticas [3] [6] [48].

Nas Figuras 4.14 – 4.16 são apresentados os sistemas utilizados com os diferentes tipos de fonte ótica.

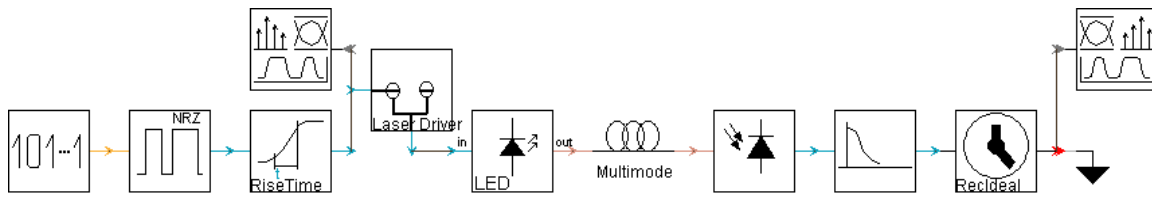


Figura 4.14 – Arquitetura do sistema com LED.

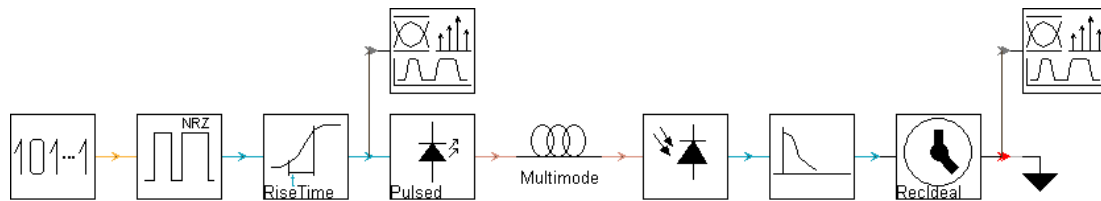


Figura 4.15 – Arquitetura do sistema com LD.

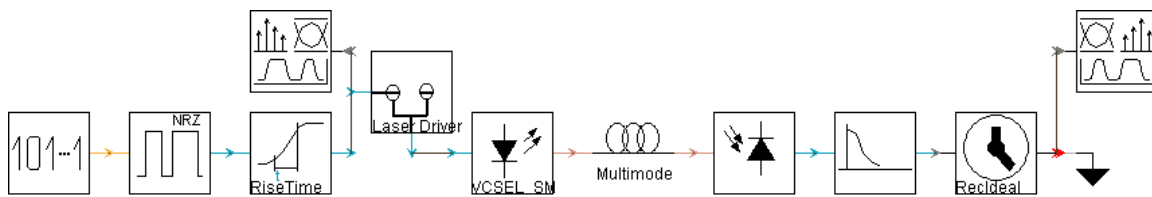


Figura 4.16 – Arquitetura do sistema com VCSEL.

Como se pode observar, foram usados módulos apropriados para cada uma das fontes. Para o LED foi o *LED\_WDM.vtmg*, para o LD foi o *LaserPulsed.vtms* e para o VCSEL foi o *VCSEL\_SM.vtms*. De notar ainda que no caso do LED e do VCSEL teve de se adicionar à entrada dos mesmos o módulo *LaserDriver.vtms*. Este bloco serve para guiar os sinais elétricos gerados para módulos de fontes óticas do tipo *Transmission Like Matrix* (TLM), os quais necessitam de uma corrente ou voltagem alternativas, como é o caso do LED e do VCSEL [52]. Sem a implementação do *LaserDriver.vtms* não surge qualquer sinal no analisador do espectro ótico (OSA). Na prática, estas fontes óticas poderão funcionar independentemente da aplicação de uma fonte de corrente ou tensão externa.

O bloco *LED\_WDM.vtmg* consiste numa galáxia de componentes para ser usada num sistema de comunicação ótica. No seu interior tem diversos elementos necessários para a construção de todo o bloco do LED. Na Figura 4.17 pode-se observar o interior da galáxia *LED\_WDM.vtmg*.

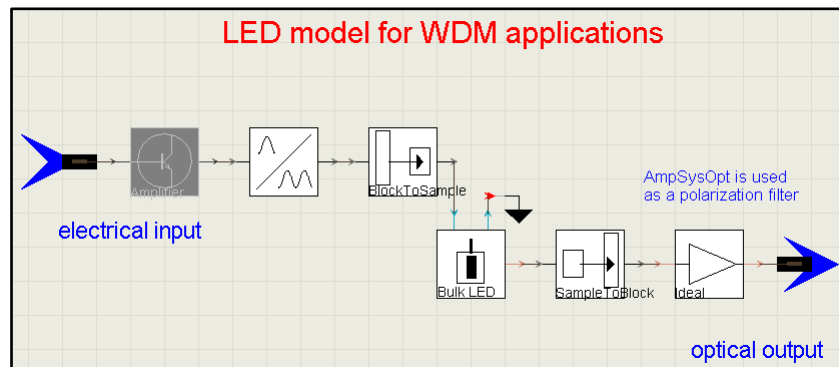


Figura 4.17 – Interior do módulo *LED\_WDM.vtmg*.

Este é o único sistema deste trabalho onde é necessário converter a informação, que normalmente é composta em blocos, para amostras já que o módulo do LED apenas consegue interpretar dados neste formato. Sendo assim, o bloco *BlockToSample.vtms* serve para converter os bits de informação de blocos para amostras. Assim, a informação já pode ser enviada para o bloco *LED\_Bulk.vtms*. Este bloco é apropriado para realizar todas as operações do LED respeitantes à conversão eletro-ótica, entre outras. Depois, tem-se o bloco *SampleToBlock.vtms* para reformatar a informação para blocos para poder ser finalmente enviada pela fibra. Os restantes blocos não são importantes, sendo que apenas servem para se fazer otimizações ao sinal.

Para que se consiga desenvolver no simulador uma fonte ótica da forma mais real possível, foi feita uma pesquisa de candidatas a representarem o seu tipo de fonte. Verificou-se que nos documentos analisados não é comum referir-se o modelo do componente utilizado, sendo apenas apresentadas algumas características do mesmo. Para além disso, entre as fontes óticas com referência do modelo e fabricante que foram encontradas, a maioria não funciona nos comprimentos de onda exatos em que as fibras óticas escolhidas trabalham (definidos nos *datasheets* das mesmas). Por estas razões optou-se por se introduzir nos parâmetros das fontes os valores mais comuns para estas.

Sendo assim foi elaborada a Tabela 4.1, a qual apresenta as características mais comuns para os tipos de fontes óticas mais utilizadas no âmbito das comunicações através de POF.

Tabela 4.1 – Características comuns das fontes óticas utilizadas no âmbito de comunicação por POF [6] [54] (adap.).

	LED	LD	VCSEL
Operação a 520 nm	Sim	Não	Não
Operação a 570 nm	Sim	Não	Não
Operação a 650 nm	Sim	Sim	Sim <sup>1)</sup>
Operação a 850 nm	Não	Sim	Sim
Operação a 1300 nm	Não	Sim	Sim
Operação a 1550 nm	Não	Sim	Sim
Potência ótica	1 mW	7 mW	1 mW
Corrente de <i>threshold</i> ( $I_{th}$ )	n. a.	40 mA	8 mA
Área de emissão [ $\mu\text{m}^2$ ]	200 × 200	3 × 0,3	10 × 10
Largura espectral	30 nm	2 nm	3 nm
Velocidade	Baixa (Mbps)	Alta (Gbps)	Alta (Gbps)
Preço	Muito barato	Médio	Baixo
Comprimento da POF ligada	Curto	Médio	Médio / Longo
Acoplamento	Fácil	Difícil	Fácil
Resistência a alta temperatura	Até 85 °C	n. d.	Até 60 °C
Tempo de vida	Alto	Médio	Baixo

<sup>1)</sup> Não aconselhável: instável para temperatura > 50 °C.

Apesar de comercialmente existirem LEDs que trabalham na região dos infravermelhos, como se pode ver pela tabela, para aplicação em sistemas com POF não é comum serem utilizados sendo preferido um LD (FP-LD ou DFB-LD) ou VCSEL para esses comprimentos de onda. Pela mesma razão se indica que um LD não costuma ser usado em comprimentos de onda abaixo dos 650 nm, apesar de na realidade poderem ser operados dessa forma [6].

Depois de se ter feito a recolha de informação sobre os três tipos de fonte ótica a serem usadas, procedeu-se à configuração das mesmas no VPI. De notar que nem todos os parâmetros da Tabela 4.1 foram possíveis de se introduzir nos módulos das fontes, uma vez que os módulos não disponibilizam campos para todos os parâmetros apresentados.

Na Tabela 4.2 está a parametrização efetuada para as fontes óticas no VPI.

Tabela 4.2 – Parametrização dos módulos das fontes óticas no VPI.

LED	Comprimento de onda suportado [nm]	(650)
	<i>EmissionSpectralModel</i>	<i>Flat</i>
Laser Driver (LED)	<i>DriveAmplitude</i> [V]	1
	<i>Bias</i> [A]	30e-3
LD	Comprimentos de onda suportados [nm] (campo <i>EmissionFrequency</i> [Hz])	650, 850, 1300 ou 1550
	<i>PeakPower</i> [W]	7e-3
	<i>Linewidth</i> [Hz]	Multimodo: 330e9 Monomodo: 10e6
VCSEL	Comprimentos de onda suportados [nm] (campo <i>EmissionFrequency</i> [Hz])	1300 ou 1550
	<i>ReferencePower</i> [W]	1e-3
	<i>ThresholdCurrent</i> [A]	8e-3
Laser Driver (VCSEL)	<i>DriveAmplitude</i> [V]	0,5
	<i>Bias</i> [A]	2,93e-3

No caso do LED, o comprimento de onda utilizado está entre parêntesis uma vez que se definiu o campo *EmissionSpectralModel* para *Flat*. Esta opção faz com que toda a potência de emissão do LED se encontre dentro dos limites da largura de banda modulada [52]. Desta forma, não é necessário introduzir-se o comprimento de onda e a largura espectral do LED. Para esta fonte só se irá operar em 650 nm uma vez que, apesar do LED suportar comprimentos de onda desde a radiação ultravioleta até à luz visível, das fibras óticas utilizadas apenas vem informação da atenuação para 650 nm.

No caso do LD foi possível introduzir-se a largura espectral, através do campo *Linewidth*. Foram definidos valores comuns de largura espectral (em Hertz) [55] para funcionamento da fonte em monomodo e multimodo, simulando um DFB-LD e um FP-LD, respetivamente.

Pela Tabela 4.1 pode-se observar que o VCSEL, no âmbito das POFs, é operável nos comprimentos de onda de 850, 1300 e 1550 nm, sendo principalmente utilizado no primeiro [6]. No entanto, neste aspeto o VPI apresenta algumas limitações na simulação desta fonte ótica com POFs. Isto é, não foi possível simular com comprimentos de onda abaixo de 1000 nm (1  $\mu$ m). Por esta razão, apenas os comprimentos de onda de 1300 nm e 1550 nm podem ser testados.

Ainda a ter em atenção que para o caso dos sistemas com LED e VCSEL, no parâmetro *ChannelLabel* que existe nos blocos *Coder\_NRZ.vtms* e *ClockRecovery-Ideal.vtms* definiu-se o valor “Ch1”, já que na execução das simulações destes sistemas surgia um aviso com a mensagem “*Invalid logical channel label specified for clock recovery*”.

Veja-se na Figura 4.18 um exemplo de parametrização de uma fonte ótica, tratando-se do LD (monomodo) neste caso. De notar que na secção 4.4.4 irá explicar-se porque se introduziu no campo *EmissionFrequency* o valor “*SampleModeCenterFrequency*”.

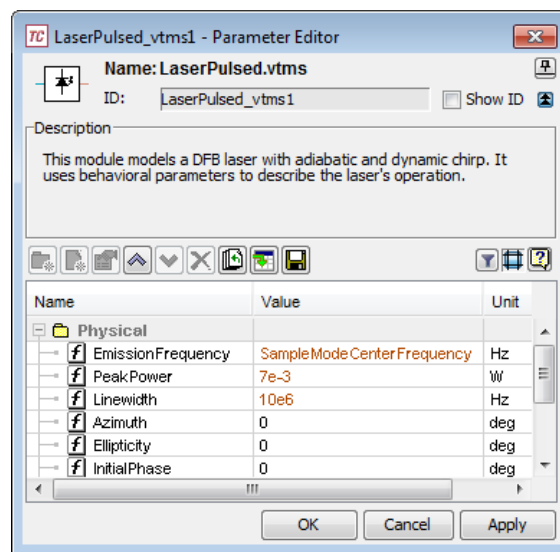


Figura 4.18 – Parametrização de uma fonte ótica no VPI, neste caso o LD (monomodo).

## 4.4.2 Parâmetros do fotodetector

Para a escolha do fotodetector, foi também feita uma pesquisa sobre qual seria o mais indicado para ser utilizado nas simulações. O módulo utilizado para o fotodetector no VPI foi o *Photodiode.vtms*. Este módulo representa um fotodíodo, o qual pode ser do tipo PIN ou APD. Para as simulações foram utilizados dois fotodetectores, ambos do tipo PIN. Apesar dos fotodetectores do tipo APD terem geralmente melhor desempenho, não foi escolhido um deste tipo já que todos os sistemas com POF a nível comercial funcionam com fotodíodos do tipo PIN [6], tal como foi referido anteriormente no Capítulo 3.

Na Tabela 4.3 estão mostradas as características dos dois fotodetectores que serão utilizados nas simulações.

Tabela 4.3 – Parametrização dos módulos dos fotodetetores no VPI [6] [56].

Identificação	Comprimento de onda [nm]	Responsividade ( $\mathcal{R}$ ) [A/W]	Corrente no escuro [nA]	Ruído térmico [ $A/\sqrt{Hz}$ ]	Ruído de <i>shot</i>
PIN 1	650	0,47	1	10e-12	Sim
	850	0,63	1	10e-12	Sim
PIN 2	1300	0,9	0,5	10e-12	Sim
	1550	1,0	0,5	10e-12	Sim

Na Figura 4.19 está um exemplo da parametrização de um fotodetector no VPI, neste caso o PIN 1, para um comprimento de onda de trabalho de 650 nm.

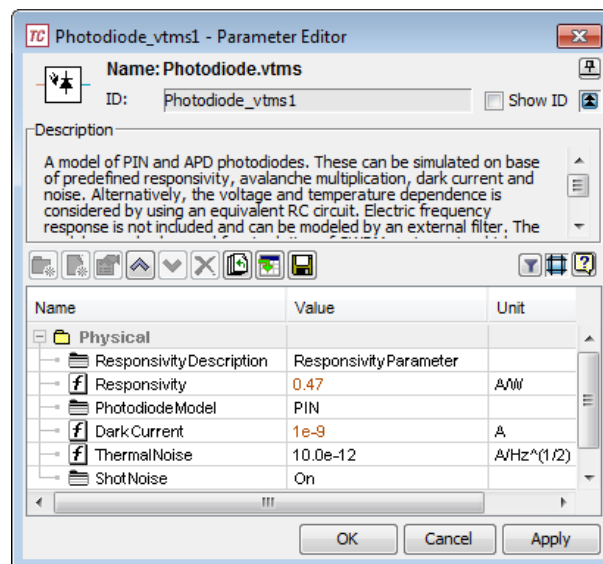


Figura 4.19 – Parametrização de um fotodetector no VPI, neste caso o PIN 1 (@ 650 nm).

### 4.4.3 Parâmetros da fibra ótica

No VPI não existe um módulo específico para a POF. Sendo assim, a solução encontrada para a representar no simulador foi através do módulo *MultiModeFiber.vtms*, visto que todas as POFs são do tipo multimodo variando apenas no seu tipo de perfil (SI-POF, GI-POF, etc.). Para que se consiga representar uma POF no simulador da forma mais real possível, configurou-se os seus parâmetros respeitando os valores descritos nas normas e *datasheets*. Fez-se uma pesquisa com a finalidade de se saber quais as POFs disponíveis a nível comercial mais utilizadas, e se seriam boas candidatas para “representarem” o seu tipo de perfil.

Assim, foram selecionadas para as simulações as POFs: ESKA™ Mega MH4001 da *Mitsubishi Rayon*, OM-Giga da *Optimedia* e Lucina™ da *Asahi Glass*. A primeira é uma SI-POF e as outras duas são do tipo GI-POF. Neste trabalho serão referenciadas como EskaMega, OM-Giga e Lucina, respetivamente.

Na Tabela 4.4 estão apresentadas as principais características destas três POFs [51].

Tabela 4.4 – Principais características das POFs utilizadas [51].

	ESKA™ Mega	OM-Giga	Lucina™
<b>Fabricante</b>	Mitsubishi Rayon	Optimedia	Asahi Glass
<b>Material do núcleo</b>	PMMA	PMMA	CYTOP®
<b>Perfil</b>	Índice em degrau	Índice gradual	Índice gradual
<b>Ø núcleo [µm]</b>	980	900	120
<b>Ø bainha [µm]</b>	1000	1000	500
<b>Comprimento(s) de onda de trabalho [nm]</b>	650	650	650, 850, 1300
<b>Perdas @ 650 nm [dB/km]</b>	160	200	40
<b>Perdas @ 850 nm [dB/km]</b>	–	–	20
<b>Perdas @ 1300 nm [dB/km]</b>	–	–	20
<b>Largura de Banda</b>	200 MHz em 50 m	> 3 GHz em 50 m	> 1,25 GHz em 200 m (@ 850 nm)
<b>Abertura Numérica (NA)</b>	0,3	0,3	0,195
<b>Contraste (<math>\Delta</math>)</b>	0,0203	0,0203	0,0106
<b>Temp. suportada [°C]</b>	-55 a 70	-30 a 60	-10 a 60
<b>Classe IEC</b>	A4d	A4e	A4g
<b>Aplicações</b>	Audiovisuais e transmissão de dados	Audiovisuais e transmissão de dados	Transmissão de dados

Comparando estes valores com os da norma IEC 60793-2-40, apresentada na secção 2.11, comprovou-se que as características destas fibras estão de acordo com a mesma. Pôde-se assim concluir quanto à classe a que pertencem, ficando a saber quais as suas principais áreas de aplicação.

O valor do contraste das fibras não vem explícito nos seus *datasheets*. No entanto, é necessário saber-se o mesmo, visto que é um dos parâmetros para o módulo da fibra do

VPI. Para tal, recorreu-se à Equação 4.3 que relaciona a abertura numérica com o contraste.

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \Leftrightarrow \Delta = \frac{1}{2} \times \left( \frac{NA}{n_1} \right)^2 \quad (4.3)$$

Enquanto o valor da abertura numérica ( $NA$ ) vem explícito na Tabela 4.4, para se saber o valor de  $n_1$  (índice de refração do núcleo da fibra) consultou-se as secções 2.4.6.1 e 2.4.6.4 que mencionam que o índice de refração do PMMA é 1,49 e do CYTOP<sup>®</sup> (polímero de flúor) é 1,34.

Depois de se saber todos estes valores, pôde-se parametrizar o módulo da fibra. Na Figura 4.20 apresenta-se o exemplo para o caso da POF Lucina.

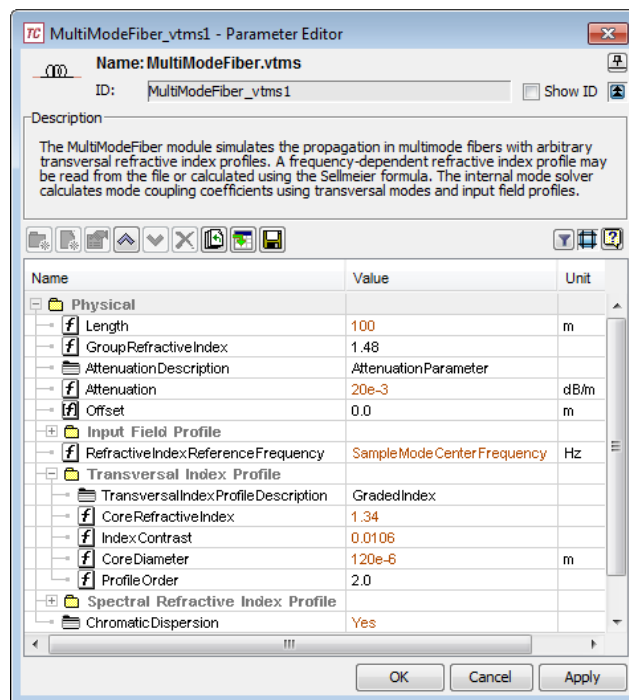


Figura 4.20 – Parametrização de uma POF no VPI, neste caso a POF Lucina.

Foi definido um comprimento inicial de 100 metros de fibra. O valor da atenuação é de 20e-3 dB/m para um comprimento de onda de 1300 nm, respeitando assim os valores da Tabela 4.4. Os campos *CoreRefractiveIndex*, *IndexContrast* e *CoreDiameter* foram também definidos com os valores apropriados para esta POF. No parâmetro *ChromaticDispersion* foi selecionado “Yes” visto que na realidade uma fibra ótica tem sempre dispersão cromática, tal como foi explicado anteriormente na secção 2.7.1.

Para se perceber a diferença entre o desempenho das fibras óticas de plástico e o das fibras óticas de sílica, utilizou-se na mesma o módulo *MultiModeFiber.vtms* para o caso da fibra de sílica multimodo (MM-GOF) e o módulo *UniversalFiberFwd.vtmg* foi usado para representar uma fibra de sílica monomodo (SM-GOF). Na Tabela 4.5 estão apresentadas as características das três fibras de sílica selecionadas.

Tabela 4.5 – Principais características das GOFs utilizadas [57] [58] [59] [60].

	SI-GOF (DrakaElite™)	GI-GOF (F-MFD)	SM-GOF (F-SMF-28)
<b>Modo espacial</b>	Multimodo	Multimodo	Monomodo
<b>Perfil</b>	Índice em degrau	Índice gradual	Índice degrau
<b>Material do núcleo</b>	Sílica	Sílica	Sílica
<b>Ø núcleo [µm]</b>	50 ± 3	62,5 ± 2,5	9,3 ± 0,5
<b>Ø bainha [µm]</b>	125 ± 2,5	125 ± 1	125 ± 1
<b>Comprimento(s) de onda de trabalho [nm]</b>	850	850, 1300	1310, 1550
<b>Perdas @ 850 nm [dB/km]</b>	10	2,9	–
<b>Perdas @ 1300/1310 nm [dB/km]</b>	–	0,6	0,35
<b>Perdas @ 1550 nm [dB/km]</b>	–	–	0,25
<b>B.L @ 850 nm</b>	> 50 MHz.km	200 MHz.km	–
<b>B.L @ 1300/1310 nm</b>	–	500 MHz.km	Vários THz
<b>B.L @ 1550 nm</b>	–	–	Vários THz
<b>Abertura Numéria (NA)</b>	0,12 ± 0,02	0,275	0,13
<b>Contraste (Δ)</b>	0,0034	0,018	0,004
<b>Temp. suportada [°C]</b>	-40 a 85	-65 a 135	n. d.
<b>Aplicações mais comuns</b>	LANs e interligações pouco rápidas	Gigabit Ethernet LANs	Telecomunicações, CATV, MANs/WANs de alta velocidade

Sabendo estes dados pôde-se proceder à parametrização dos módulos das fibras no VPI com os valores apresentados na Tabela 4.6. De notar que os valores selecionados para os comprimentos de onda de operação de cada fibra foram escolhidos tendo em conta a menor atenuação.

Tabela 4.6 – Parametrização dos módulos das fibras óticas no VPI.

Módulo	POF			GOF		
	EskaMega	OM-Giga	Lucina	SI-GOF	GI-GOF	SM-GOF
	MultiMode Fiber.vtms	MultiMode Fiber.vtms	MultiMode Fiber.vtms	MultiMode Fiber.vtms	MultiMode Fiber.vtms	Universal FiberFwd .vtmg
<i>TransversalIndex ProfileDescription</i>	Step Index	Graded Index	Graded Index	Step Index	Graded Index	Step Index
<i>Wavelength [nm]</i>	650	650	650, 850 ou 1300	850	1300	1550
<i>Attenuation [dB/m]</i>	160e-3	200e-3	40e-3 ou 20e-3	10e-3	0,6e-3	0,25e-3
<i>CoreRefractive Index</i>	1,49	1,49	1,34	1,45	1,45	1,45
<i>IndexContrast</i>	0,0203	0,0203	0,0106	0,0034	0,018	0,004
<i>CoreDiameter [m]</i>	980e-6	900e-6	120e-6	50e-6	62,5e-6	9,3e-6

#### 4.4.4 Parâmetros globais

Depois da parametrização dos módulos dos componentes, fez-se a configuração dos parâmetros globais das simulações. Na Figura 4.21 está um exemplo para o sistema com LED.

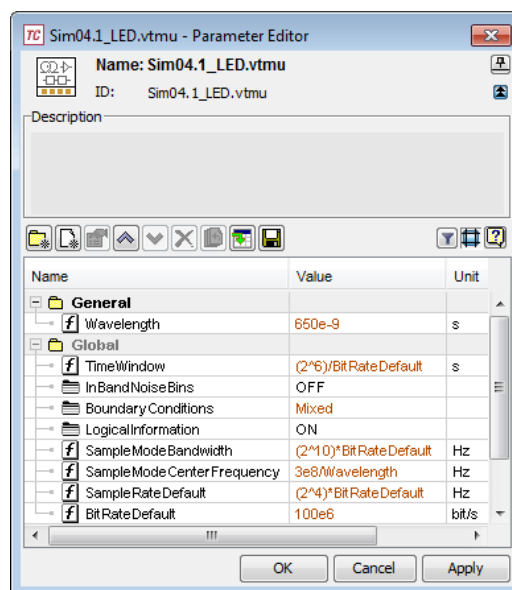


Figura 4.21 – Exemplo de parâmetros globais, neste caso para o sistema com LED.

De notar que foi criada a categoria *General* com o parâmetro *Wavelength*, permitindo assim alterar apenas este parâmetro sempre que se quiser mudar o valor do comprimento de onda de trabalho. Como é óbvio, em cada módulo teve de se alterar o campo da frequência de trabalho para *SampleModeCenterFrequency* que, como se pode ver, neste caso foi definido com o valor “ $3e8/Wavelength$ ” ( $f_c = c / \lambda$ ). Neste exemplo, o campo *Wavelength* foi definido a 650 nm e o *BitRateDefault* foi definido a 100 Mbps. Estes valores são utilizados nas simulações com LED, mas posteriormente podem variar. Como já foi mencionado anteriormente, o sistema com LED é o único em que há conversão de dados de amostras para blocos e vice-versa, dentro da galáxia da fonte ótica. Por esta razão, para este sistema definiu-se o campo *SampleModeBandwidth* com o valor apresentado. O campo *BoundaryConditions* foi definido como *Mixed*, uma vez que para este caso existe o tipo periódico e aperiódico (diferenças explicadas na secção 4.2.4.2). Para os sistemas com LD e VCSEL o valor do campo *SampleModeBandwidth* é substituído pelo valor do *SampleRateDefault*, que será o apresentado neste exemplo. O campo *BoundaryConditions* será deixado como *Periodic* para os outros dois sistemas (LD e VCSEL).

De lembrar que a arquitetura base dos sistemas que serão utilizados nas simulações é a da Figura 4.9, onde apenas os módulos referentes à fonte ótica, fibra ótica e fotodetector irão variar, e para os parâmetros globais irão variar-se os comprimentos de onda de trabalho e o débito binário.

## 4.5 Avaliação do desempenho do sistema

Depois de se terem parametrizado todos os componentes do sistema de comunicação ótica no VPI, pode-se finalmente passar à análise do desempenho do mesmo. Como tal, nesta secção serão apresentados testes como a avaliação do desempenho das fontes e fibras óticas, comparando os valores obtidos entre estas. Assim, foram elaborados gráficos cujos valores foram obtidos através de simulações sucessivas variando os parâmetros pretendidos. Depois de cada gráfico serão feitos comentários sobre a análise dos mesmos, assim como conclusões quanto aos valores obtidos.

Os testes irão incidir principalmente na análise da variação da taxa de erros (BER) obtidos à saída do sistema, variando o débito binário à entrada do mesmo, para diferentes comprimentos de fibra. Quanto ao intervalo dos valores para o débito binário, escolheu-se um mínimo de 10 Mbps, visto que as POFs mais antigas apenas suportavam alguns

megabits por segundo [6]. O débito binário máximo definiu-se a 40 Gbps porque, pela bibliografia consultada, este é o limite máximo para transmissão de dados conseguido através de uma POF [6] [61]. Os comprimentos de fibra definidos foram 100, 500 e 1000 metros. Estes comprimentos foram escolhidos porque se está a trabalhar com POFs e MM-GOFs, as quais foram projetadas para serem operadas em curtas distâncias.

Muito importante é não esquecer que terá de se alterar a atenuação da fibra ótica, assim como os parâmetros do fotodetector, configurando os respetivos valores para os diferentes comprimentos de onda. Por exemplo, para a POF Lucina tem-se uma atenuação de  $40 \times 10^{-3}$  dB/m para 650 nm, e  $20 \times 10^{-3}$  dB/m para 850 e 1300 nm (Tabela 4.4). Os valores para o fotodetector são os apresentados anteriormente na Tabela 4.3.

De notar que os resultados obtidos poderão nem sempre ser completamente compatíveis com a prática uma vez que, como já foi explicado, se está a trabalhar com um simulador que não está devidamente preparado para operar com POFs. No entanto, os valores obtidos servirão para se poder fazer uma análise ao desempenho dos componentes a utilizar num sistema, cumprindo desta forma os objetivos principais destas simulações.

## 4.5.1 Avaliação das fontes óticas

Para se poder fazer a comparação entre o desempenho dos diferentes tipos de fonte ótica, escolheu-se uma única fibra ótica de modo a evitar discrepâncias de resultados. A selecionada foi a POF Lucina uma vez que se trata de uma fibra ótica de plástico que consegue ser operada nos comprimentos de onda de 650, 850 e 1300 nm. Sendo assim, será possível testar-se o desempenho das três fontes óticas com esta fibra apenas.

De notar que para o LD e o VCSEL, apesar de ambos suportarem 1550 nm (Tabela 4.2), visto que esta fibra não trabalha nesta janela então não será utilizado este comprimento de onda. O mesmo acontece para o fotodetector PIN 2 que seria o utilizado para este comprimento de onda (Tabela 4.3).

### 4.5.1.1 Desempenho do LD variando o comprimento de onda

Como primeiro teste para as fontes óticas, irá fazer-se uma avaliação do desempenho do LD variando o comprimento de onda, para diferentes distâncias de ligação ( $l$ ). Esta simulação tem como objetivo verificar qual será o comprimento de onda mais indicado a utilizar posteriormente, na comparação com as outras fontes óticas. De notar que este tipo

de teste será feito apenas com o LD, uma vez que é a única fonte que poderá ser operada em mais do que um comprimento de onda, pelas razões apresentadas na secção 4.5.1.

Antes de mais, note-se que todos os gráficos têm um limite para o nível de BER. Tal como foi mencionado anteriormente, na secção 3.4.1, um  $BER = 10^{-9}$  consiste num valor aceitável que é normalmente o limite máximo para uma transmissão de dados fiável. O gráfico da Figura 4.22 mostra os valores de BER para os comprimentos de onda de 650, 850 e 1300 nm, utilizando para transmissão uma POF de 100 metros.

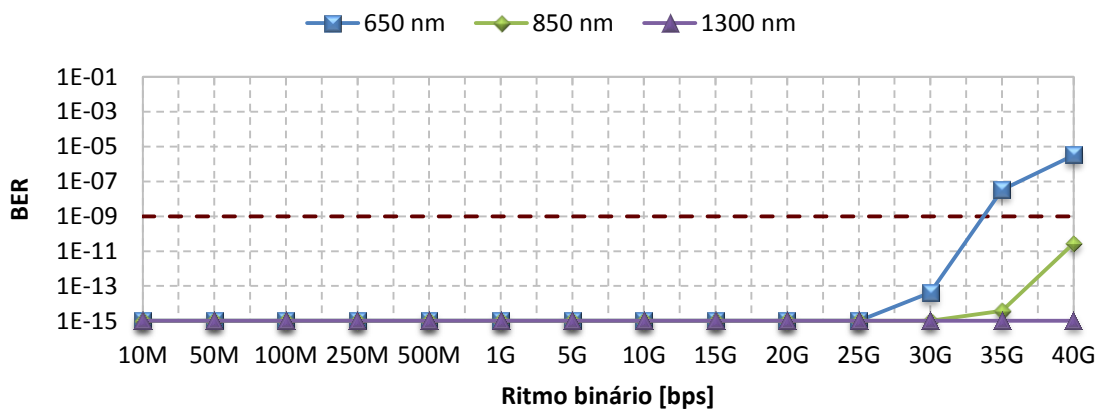


Figura 4.22 – Desempenho do LD para vários comprimentos de onda, com  $l = 100$  metros.

Pelo gráfico da Figura 4.22 pode-se observar que o LD funciona abaixo do limite de BER aceitável ( $10^{-9}$ ) para os comprimentos de onda de 850 e 1300 nm, para qualquer débito binário. Para o comprimento de onda de 650 nm o limite é ultrapassado a partir de 35 Gbps, sensivelmente. Estes valores são coerentes uma vez que a fonte ótica que está a ser usada é um LD e o comprimento da POF é curto.

O gráfico da Figura 4.23 mostra os valores de BER para os mesmos comprimentos de onda, utilizando para transmissão uma POF de 500 metros de comprimento.

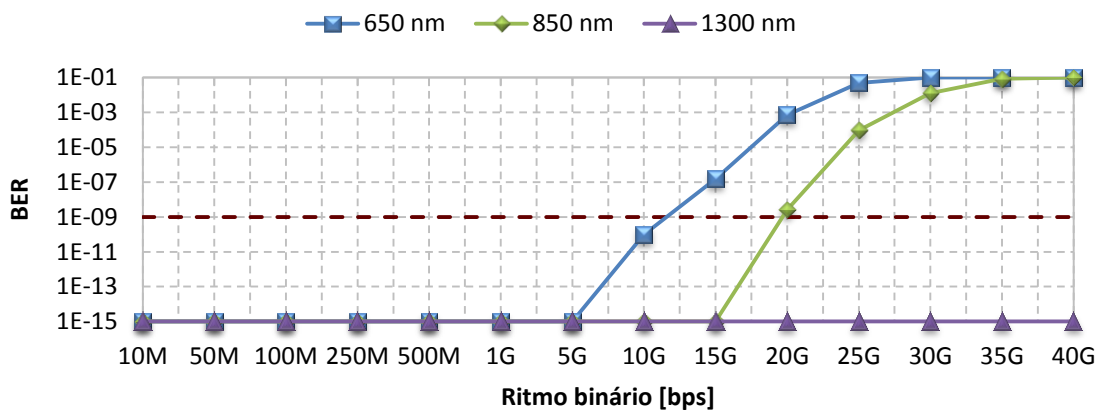


Figura 4.23 – Desempenho do LD para vários comprimentos de onda, com  $l = 500$  metros.

Como se pode observar, aumentando o comprimento da POF de 100 para 500 metros, o BER para 850 nm já é notável fazendo com que a partir de 20 Gbps a transmissão sofra demasiados erros. Mais uma vez, a 650 nm tem-se o pior desempenho. Com 1300 nm a qualidade da ligação continua ótima.

No gráfico da Figura 4.24 a situação é idêntica às anteriores, mas desta vez para um comprimento de ligação de 1000 metros.

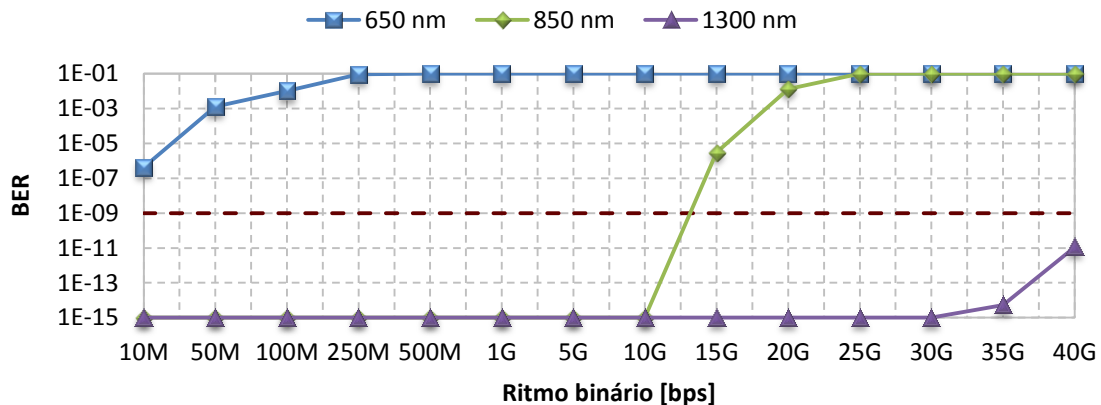


Figura 4.24 – Desempenho do LD para vários comprimentos de onda, com  $l = 1000$  metros.

Pelo gráfico obtido, observa-se que para um aumento do comprimento da POF significativo, o BER para 650 nm já não é viável. Para 850 nm a ligação é possível para um ritmo binário sensivelmente até 12,5 Gbps. Neste gráfico não é possível saber qual o valor exato, mas este não é importante visto que o objetivo destas simulações é permitir tomar a decisão sobre o comprimento de onda adequado a utilizar com este laser. Também se pode observar que para 1 km a transmissão é possível com 1300 nm, visto que mesmo a 40 Gbps o valor limite de BER não é ultrapassado.

### Conclusões:

Com estes testes, verifica-se que o comprimento de onda de 1300 nm será o mais indicado a ser usado para a fonte ótica LD.

Uma curiosidade observada foi a discrepância de valores entre a transmissão a 850 nm e a 1300 nm, já que para estes comprimentos de onda a atenuação da fibra é igual (20e-3 dB/m). Uma razão para tal deve-se à dispersão variar bastante. Analisando as Equações 2.7 e 2.9, apresentadas anteriormente na secção 2.3.4, conclui-se que quanto menor for o comprimento de onda maior será o valor do parâmetro  $V$ . Por sua vez, o número de modos propagados ( $M$ ) aumentará, fazendo com que a dispersão intermodal também aumente, ou seja, maior será o BER verificado na receção.

### 4.5.1.2 Comparação do desempenho entre fontes óticas

Agora que se definiu qual o comprimento de onda a utilizar em todas as fontes óticas, pode-se fazer a comparação do desempenho entre as mesmas. Para tal, recorde-se que os sistemas de comunicação a serem utilizados para os testes de cada fonte são os que foram apresentados nas Figuras 4.14 – 4.16. Também se deve ter em conta que os comprimentos de onda de operação para as fontes óticas serão 650 nm para o LED, e 1300 nm para o LD e o VCSEL, pelas razões já apresentadas. A fibra utilizada para estes testes continua a ser a POF Lucina.

No gráfico da Figura 4.25 pode-se ver que foi analisado o nível de BER para os três tipos de fonte ótica, para um comprimento da POF de 100 metros.

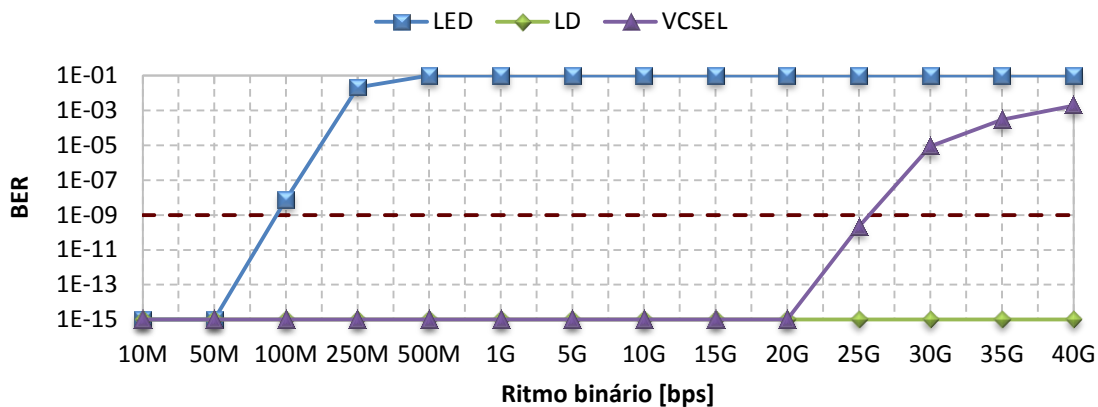


Figura 4.25 – Comparação do desempenho entre fontes óticas, com  $l = 100$  metros.

Como se pode visualizar, a fonte ótica que apresenta pior desempenho é o LED. Apesar de se estar a utilizar uma POF de comprimento curto, a partir de 100 Mbps a sua aplicação com POF já não é aconselhável para a transmissão de dados. Quanto ao VCSEL, verifica-se que este pode ser utilizado como fonte ótica até um ritmo binário máximo de cerca de 25 Gbps. Com o LD pode-se transmitir a qualquer débito binário dentro deste intervalo.

No gráfico da Figura 4.26 pode-se observar a mesma situação que a anterior, para um comprimento de fibra de 500 metros.

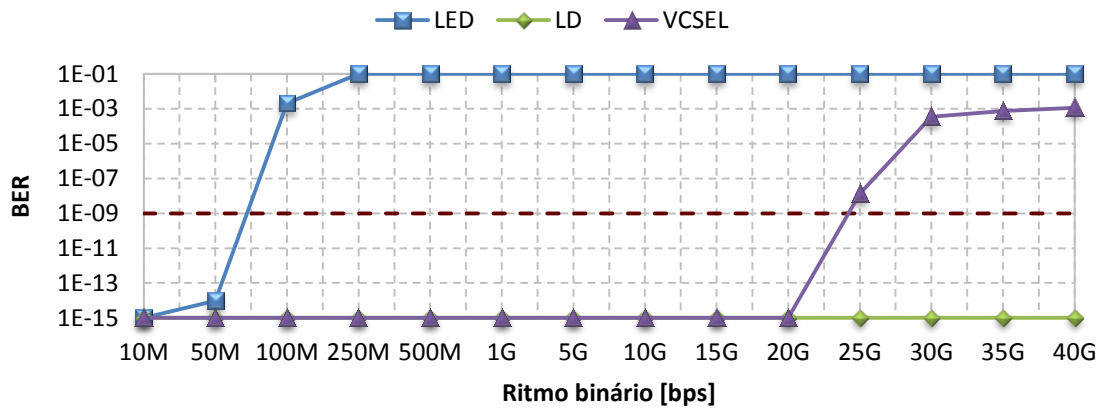


Figura 4.26 – Comparação do desempenho entre fontes óticas, com  $l = 500$  metros.

Observa-se que, aumentando o comprimento da POF para 500 metros, para o LED a transmissão a 100 Mbps já não é possível. Para o VCSEL acontece o mesmo, mas para o ritmo binário de 25 Gbps. Com o LD observa-se que para este comprimento de ligação o nível de BER continua em perfeitas condições.

O gráfico da Figura 4.27 mostra os resultados do BER quando se aumentou o comprimento da fibra para 1 km.

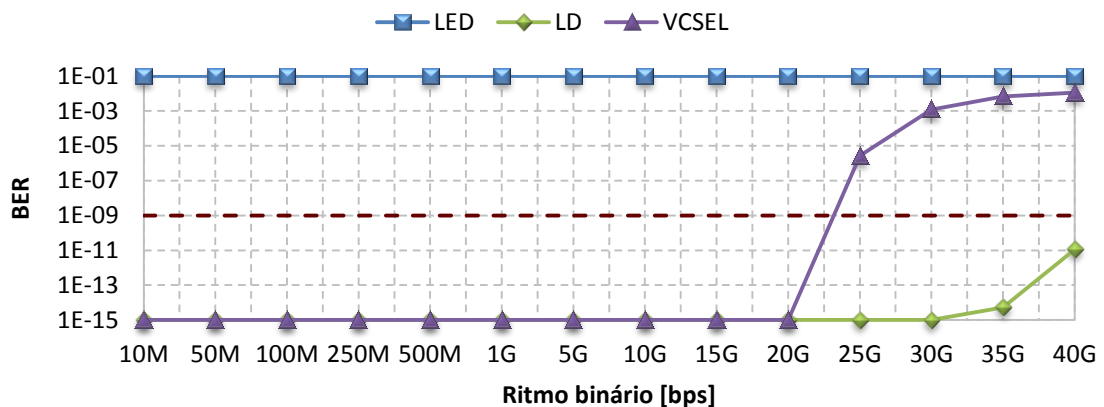


Figura 4.27 – Comparação do desempenho entre fontes óticas, com  $l = 1000$  metros.

Como se pode analisar, para este comprimento o LED já não pode ser utilizado. O VCSEL poderá ser utilizado até cerca de 22,5 Gbps. Quanto ao LD, verifica-se novamente que poderá ser utilizado em todos os ritmos binários analisados.

### Conclusões:

Após a análise destes resultados, pode-se concluir que o LED poderá ser utilizado apenas para ritmos binários baixos (100 Mbps para 100 metros) e para distâncias de até 500 metros no máximo (com apenas 50 Mbps). Tal como foi mencionado na parte teórica desta dissertação, a justificação para tal deve-se ao facto de os LEDs serem mais indicados para aplicação com fibras de pouco comprimento e de suportarem transmissões de dados da ordem dos megabits por segundo, tal como acontece numa Ethernet LAN ou num automóvel que implemente a norma MOST, por exemplo.

Caso se pretenda uma ligação de maior velocidade e com implementação de custo reduzido, é aconselhado a utilização de um VCSEL para fonte ótica, uma vez que tal como foi observado, suportam ritmos binários existentes por exemplo numa GigabitEthernet LAN. No entanto, terá de se ter em atenção que o funcionamento deste tipo de fonte ótica poderá tornar-se instável com o aumento da temperatura.

Para um sistema de comunicação ótica fiável é aconselhada a utilização de uma fonte ótica LD que, tal como se pôde verificar, suporta altos ritmos binários em fibras de comprimento maior. No entanto, este tipo de fonte ótica poderá ser relativamente caro, ficando à escolha do utilizador se esta será mesmo necessária.

## **4.5.2 Avaliação das fibras óticas**

Depois de se ter analisado o desempenho das fontes óticas, nesta secção vai-se fazer a comparação do desempenho entre os vários tipos de fibras óticas. A fonte ótica que será utilizada nos sistemas será o LD já que, tal como foi visto anteriormente é a única fonte das disponíveis que suporta todos os comprimentos de onda em que se irá operar. Desta forma, evitam-se possíveis discrepâncias entre valores que poderiam ocorrer caso se utilizassem fontes óticas diferentes.

Antes de mais, deve-se referir que infelizmente a POF EskaMega não pôde ser simulada com sucesso. No fórum da Internet do VPI é mencionado que até à data não foi desenvolvido um módulo correspondente a uma POF. Uma sugestão para ultrapassar esta dificuldade consiste em usar um módulo aproximado que é o *MultiModeFiber.vtms* [62] e fazer a respetiva parametrização, como já foi explicado anteriormente. Por esta razão, pode não ser possível simular algumas POFs, como é o caso da EskaMega. O propósito da simulação desta POF consistiria em poder-se comparar o desempenho entre POFs do tipo índice em degrau (SI-POF) com as de índice gradual (GI-POF).

A explicação para isto não ser possível deve-se ao facto desta fibra ter um perfil do índice de refração do núcleo em degrau, assim como um diâmetro muito grande (980  $\mu\text{m}$ ). Por estas razões são gerados muitos modos dentro da fibra, e o simulador não foi projetado para efetuar cálculos de propagação de sinais em fibras óticas com tão elevado número de modos. Para se ter uma ideia do número de modos que se propagam nesta POF, considerem-se os cálculos efetuados nas Equações 4.4 e 4.5.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \times a \times NA = \frac{2\pi}{650.10^{-9}} \times \frac{980.10^{-6}}{2} \times 0,3 \approx 1421 \quad (4.4)$$

$$M = \frac{V^2}{2} = \frac{1421^2}{2} \approx 1.10^6 \quad (4.5)$$

Como se pode verificar, na POF EskaMega são propagados cerca de 1 milhão de modos. Fazendo os respetivos cálculos para a fibra multimodo SI-GOF, que também é do tipo índice em degrau mas com um diâmetro do núcleo de 50  $\mu\text{m}$  (Tabela 4.5), ou seja, muito mais pequeno, o número de modos propagados é 246. Para esta quantidade de modos o simulador já consegue efetuar os cálculos.

Na Figura 4.28 pode-se observar a variação dos valores de BER com o aumento do débito binário transmitido nas diferentes fibras, para um comprimento de 100 metros.

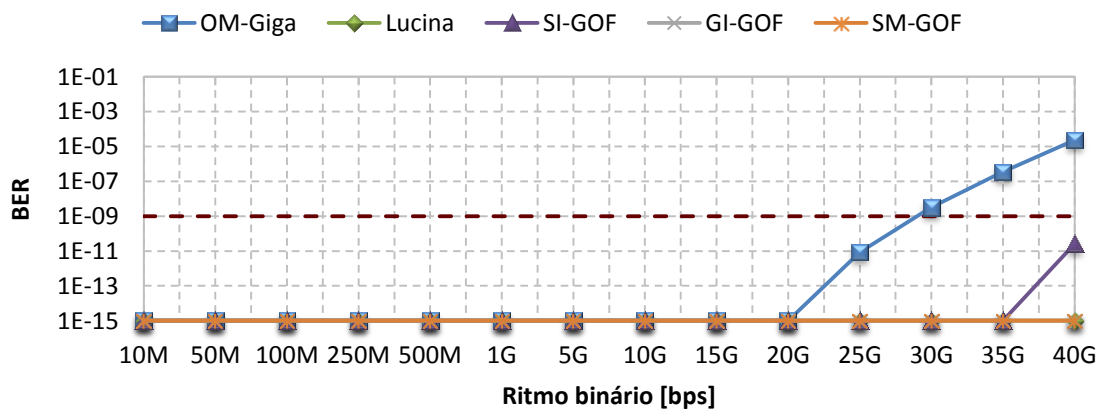


Figura 4.28 – Comparação do BER entre fibras óticas com um comprimento de 100 metros.

Como se pode observar, para este comprimento de ligação praticamente todas as fibras apresentam ótimo desempenho, exceto a POF OM-Giga, que neste caso para 30 Gbps a transmissão já não é aconselhável. A SI-GOF apenas a 40 Gbps é que aumenta o BER, no entanto continua abaixo do limite.

No gráfico da Figura 4.29 podem-se ver as alterações do nível de BER quando se aumentou o comprimento das fibras para 500 metros.

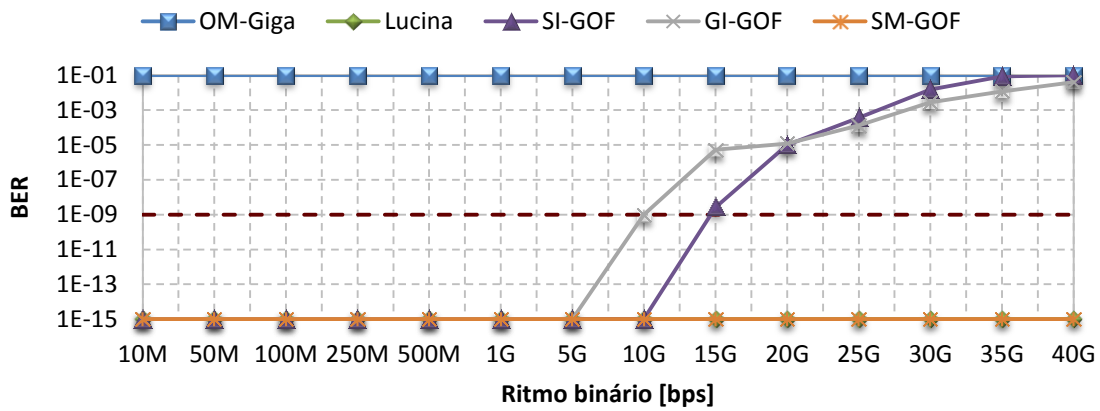


Figura 4.29 – Comparação do BER entre fibras ópticas com um comprimento de 500 metros.

Como se pode observar, aumentando o comprimento para 500 metros, no caso da POF OM-Giga a transmissão de dados já não é possível. Pode-se verificar que as fibras de sílica multimodo SI-GOF e GI-GOF têm desempenhos semelhantes, onde a primeira permite a transmissão até 15 Gbps sensivelmente e a segunda até 10 Gbps. No entanto, ambas têm curvas do gráfico bastante idênticas a partir de BER = 1E-05. Quanto à POF Lucina e à fibra de sílica monomodo SM-GOF, pode-se ver que continuam a apresentar excelentes condições de transmissão de dados.

No gráfico da Figura 4.30 pode-se visualizar o que acontece quando se aumenta o comprimento das fibras para 1000 metros.

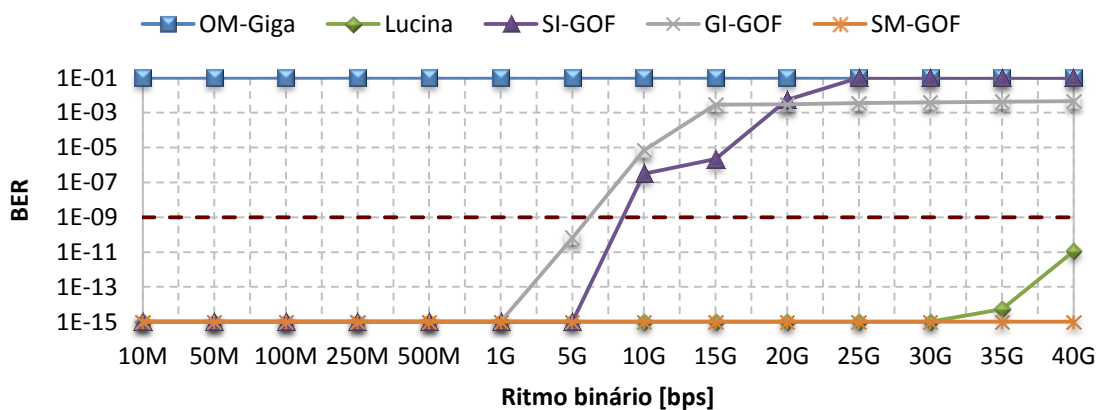


Figura 4.30 – Comparação do BER entre fibras ópticas com um comprimento de 1000 metros.

Tal como se pode analisar, aumentando o comprimento das fibras para este valor, a POF OM-Giga continua a ter o seu nível de BER no máximo, como seria de esperar. Quanto às fibras SI-GOF e GI-GOF observa-se que estas podem ser utilizadas com ritmos binários até cerca de 7,5 e 5 Gbps, sensivelmente. Com um comprimento de 1 km verifica-se que finalmente a POF Lucina começa a sofrer alguns erros na receção a 40 Gbps, não passando no entanto do limite aceitável estabelecido. A fibra monomodo SM-GOF continua a manter o seu nível de BER excelente, como seria de esperar.

### Conclusões:

Após a realização destes testes, pode-se retirar várias conclusões. A POF OM-Giga é a que apresenta pior desempenho entre as fibras testadas, visto que se trata de uma fibra do tipo PMMA-GI-POF. Poderá ser apropriada para ligações de no máximo 100 metros e para transferência de dados de alguns gigabits por segundo. Esta POF poderá consistir numa boa alternativa aos cabos Ethernet Cat5e ou Cat6, ou também aos IEEE1394 (*FireWire*), para além de ser a fibra com menor custo das apresentadas [63].

Quanto às fibras de sílica multimodo SI-GOF e GI-GOF, estas são mais indicadas para por exemplo interligarem *campus* universitários, redes locais (LANs) ou pequenas áreas metropolitanas (MANs) que não excedam 1 km. Uma curiosidade observada consistiu no facto de a SI-GOF ter apresentado um desempenho ligeiramente melhor que a GI-GOF. Inicialmente esperar-se-ia o contrário, uma vez que normalmente as fibras de índice gradual costumam apresentar melhor desempenho que as de índice em degrau. Uma explicação possível deve-se ao facto da fibra SI-GOF escolhida ter um diâmetro do núcleo mais pequeno (50  $\mu\text{m}$ ) que o da GI-GOF (62,5  $\mu\text{m}$ ), resultando em sensivelmente 246 modos propagados para a primeira e 441 para a segunda. Por esta razão, o sinal propagado na SI-GOF sofre menor dispersão intermodal que na GI-GOF.

No caso de se tratar de uma ligação de longa distância, obviamente deverá ser utilizada a fibra de sílica monomodo SM-GOF visto que suporta altos débitos binários, sem erros, a distâncias de vários quilómetros (até cerca de 40 km). Exemplos possíveis são os sistemas de televisão por cabo (CATV) e redes à escala global (WANs) de alta velocidade [60].

Quanto à POF Lucina, verifica-se que o seu desempenho é bastante bom para uma fibra ótica de plástico, uma vez que só com um comprimento de 1 km é que começou a apresentar alguns erros, para ritmos binários mais elevados. Portanto, esta fibra é a mais

indicada para ser instalada, por exemplo, no interior de edifícios ou apartamentos, já que ao contrário das fibras multimodo de sílica, é bastante mais flexível, mais barata e de fácil instalação [6] [60]. Uma curiosidade verificada foi o facto de, apesar de ser uma POF, apresentar melhor desempenho do que as MM-GOFs. A razão para tal deve-se ao seu índice de refração do núcleo ( $n_1$ ) ser bastante baixo (1,34), levando a que o parâmetro  $V$  seja reduzido, assim como o número de modos propagados ( $M$ ) e, por conseguinte, a dispersão intermodal seja menor.

Após se terem feito estas comparações, concluiu-se que a POF Lucina será a fibra ótica mais indicada a utilizar nos testes seguintes.

### 4.5.3 Avaliação de sistemas com POF para transmissão de sinais QAM

Na secção anterior foram feitos testes ao desempenho de um sistema de comunicação ótica com POF, relativamente à sua capacidade de transmissão de dados em altos débitos binários, utilizando uma codificação NRZ. Nesta secção irá testar-se a capacidade do mesmo para a transmissão de sinais QAM. Estes testes serão importantes já que uma das finalidades das POFs passa exatamente pela possível transmissão deste tipo de sinais.

Sendo assim, começará por se apresentar um sistema simples para transmissão de sinais QAM por POF, e depois irá apresentar-se outro sistema que tem como finalidade a transmissão desde a central de um operador até à casa do cliente (DVB-c FTTH).

#### 4.5.3.1 Desempenho de um sistema QAM simples

Como primeiro teste irá fazer-se a demonstração do desempenho de um sistema simples para transmissão de sinais QAM através de POF. Este teste inicial tem como objetivo verificar se a transmissão destes sinais é ou não viável de se fazer através de uma POF.

Na Figura 4.31 pode-se visualizar a arquitetura deste sistema.

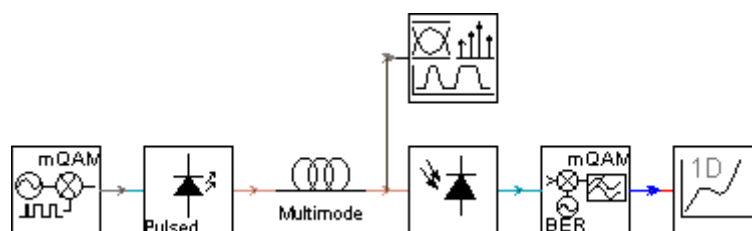


Figura 4.31 – Arquitetura convencional de um sistema de transmissão de sinais QAM por POF.

Como se pode ver, o sistema é composto por dois módulos para sinais QAM. O primeiro (*Tx\_El-mQAM.vtmg*) trata-se do gerador do sinal, que na prática consiste por exemplo num computador com *software* preparado para o efeito ou um equipamento específico situado na central do operador. O outro módulo (*Rx\_El-mQAM\_BER.vtmg*) consiste no recetor de sinais, que na prática poderá ser uma *Set-Top Box* (STB) situada na casa do cliente, a qual irá interpretar os respetivos símbolos. O último módulo (*NumericalAnalyzerID.vtms*) serve simplesmente para apresentar o valor de EVM. Os restantes módulos já foram utilizados anteriormente, mantendo as mesmas funções.

De notar que a fonte ótica é um LD visto que, como se concluiu anteriormente, é a que apresenta melhor desempenho. Pela mesma razão, o meio de transmissão que se utilizou foi a POF Lucina a operar em 1300 nm. Na Figura 4.32 pode-se verificar as constelações observadas para um sinal 64-QAM, variando o seu comprimento em 1, 2 e 3 metros.

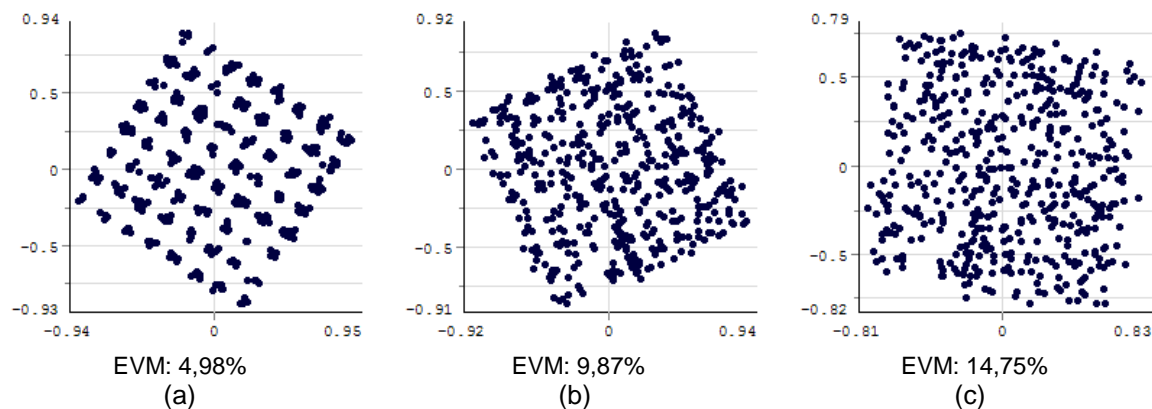


Figura 4.32 – Sinal 64-QAM transmitido por uma POF de 1 (a), 2 (b) e 3 (c) metros, sem correção de atraso.

Como se pode ver, as constelações observadas não indicam boa qualidade do sinal no recetor. Verifica-se que apesar de se ter usado uma POF com comprimentos muito curtos, os símbolos sofreram atrasos e desfasamento. Com apenas 1 metro de ligação, o sinal recebido teve um EVM de cerca de 5%, o qual piorou com o aumento do comprimento da fibra para 2 e 3 metros. Este problema deve-se ao facto de se estar a transmitir um sinal com um elevado número de símbolos (64), gerando assim maior ISI. No entanto, a principal razão deve-se à utilização de uma POF, que como já foi referido anteriormente sofrem bastante com os efeitos de dispersão intermodal, devido ao elevado número de modos propagados. Quando se utilizam fibras monomodo estes problemas não têm tanto impacto no sinal recebido uma vez que não existe dispersão intermodal.

Uma solução encontrada para se ultrapassar este problema consistiu em introduzir um bloco que faça a respetiva correção de fase do sinal, na receção. Na Figura 4.33 pode-se observar como se realiza na prática um dos métodos para correção dos erros de fase de um sistema de comunicação ótica.

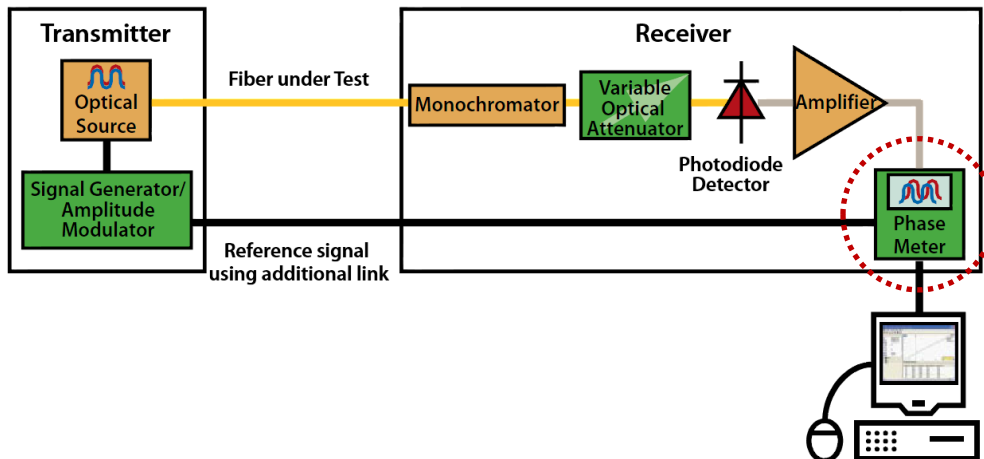


Figura 4.33 – Arquitetura típica do método de correção de fase de um sinal QAM [64].

Como se pode ver, depois do fotodetetador (e do amplificador) é colocado um dispositivo denominado de medidor de fase (*Phase Meter*) que permite fazer a correção do desvio de fase dos símbolos, cujo método de funcionamento será explicado de seguida. Desta forma, na Figura 4.34 apresenta-se a arquitetura do sistema considerado, o qual consiste na simulação do sistema apresentado na Figura 4.33.

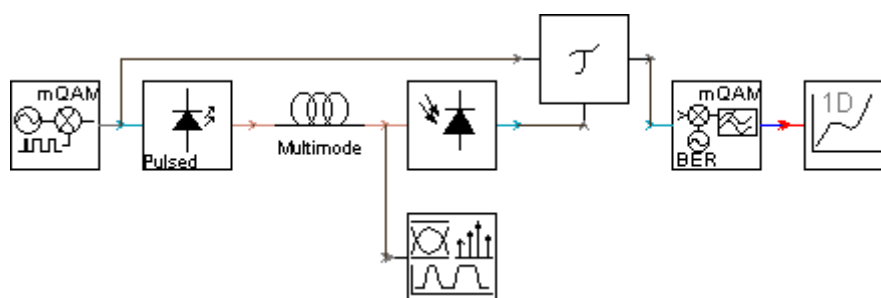


Figura 4.34 – Arquitetura de um sistema de transmissão de sinais QAM por POF, com correção de fase.

Como se pode observar, foi introduzido um novo módulo entre o fotodetetador e o recetor QAM. Este módulo chama-se *DelaySignalInit.vtms* e a sua introdução no sistema é bastante simples já que não é necessária configuração de parâmetros. Para funcionar corretamente basta que o seu “braço” esquerdo seja ligado ao módulo que transmite o

sinal original, enquanto que o “braço” inferior liga à saída do fotodetector e o “braço” direito liga ao recetor QAM. Desta forma, o módulo consegue fazer os cálculos automaticamente para a correção de atraso e desfasamento dos símbolos, comparando o sinal original com o recebido, e fazendo a respetiva correção. Esta função é extremamente útil já que posteriormente serão utilizados três tipos de modulação QAM, onde caso fosse necessário definir os parâmetros de atraso e desfasamento dos símbolos manualmente seria muito mais inconveniente. Na prática, esta função é realizada por algoritmos presentes por exemplo numa STB.

Desta forma, na Figura 4.35 pode-se visualizar a constelação obtida na receção com a introdução do módulo *DelaySignalInit.vtms*, utilizando um comprimento de 100 metros para a POF.

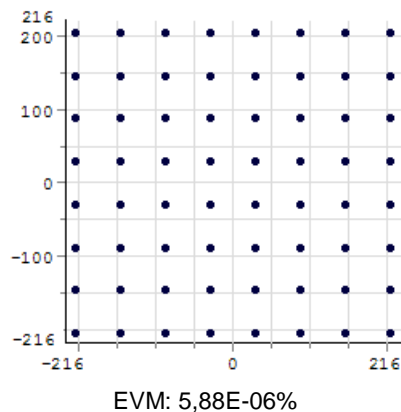


Figura 4.35 – Sinal 64-QAM transmitido por uma POF de 100 metros, com correção de atraso.

Como se pode observar, apesar de se ter aumentado significativamente o comprimento da POF, a constelação recebida está em perfeitas condições correspondendo a um nível de EVM de cerca de  $6E-06\%$ . Assim, conclui-se que a utilização deste bloco no sistema é absolutamente indispensável.

#### 4.5.3.2 Desempenho de um sistema DVB-c com POF na “última milha”

Depois de se ter feito todos os testes anteriores e de se analisar os respetivos resultados, irá agora apresentar-se um sistema com POF para aplicação num cenário real. O objetivo dos testes desta secção consiste em replicar no simulador a arquitetura de uma operadora que leva os serviços até à casa do cliente por meio de fibra ótica (FTTH).

A primeira arquitetura que muitos operadores adotaram para a distribuição deste tipo de serviços foi a *Hybrid Fiber Coax* (HFC). Para se perceber melhor como funciona este tipo de sistema, veja-se o exemplo simplificado da Figura 4.36.

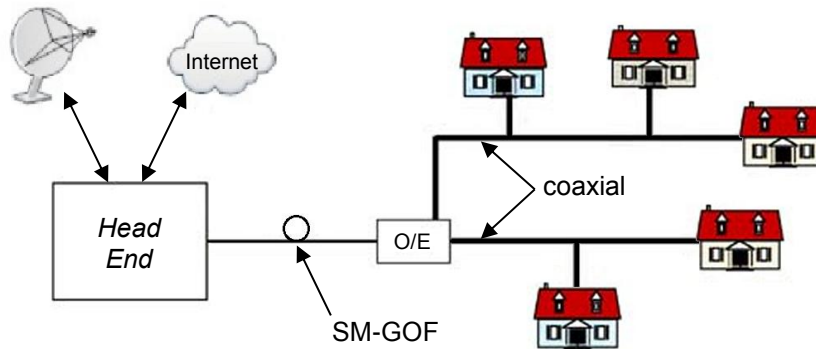


Figura 4.36 – Arquitetura de uma rede HFC [65] (adap.).

Como se pode perceber, no que diz respeito aos meios de transmissão utilizados numa rede HFC, tem-se fibra óptica para interligar a cabeça da rede (*Head End*) e o nó remoto, o qual faz a conversão dos sinais óticos para elétricos. Entre o nó remoto e a casa do cliente é utilizado cabo coaxial. Visto que nos dias de hoje a tendência é que os ritmos binários fornecidos a cada cliente estejam continuamente a aumentar, esta solução ficará rapidamente obsoleta. Por esta razão, muitas operadoras começaram a implementar uma arquitetura FTTH em detrimento da HFC.

É com base nesta arquitetura que se irá implementar no simulador um sistema de comunicação ótica FTTH, através da aplicação de uma SM-GOF e de uma POF. O objetivo será verificar até que ponto esta arquitetura é viável para a transmissão de sinais QAM. Na Figura 4.37 pode-se visualizar uma arquitetura FTTH com POF na “última milha”.

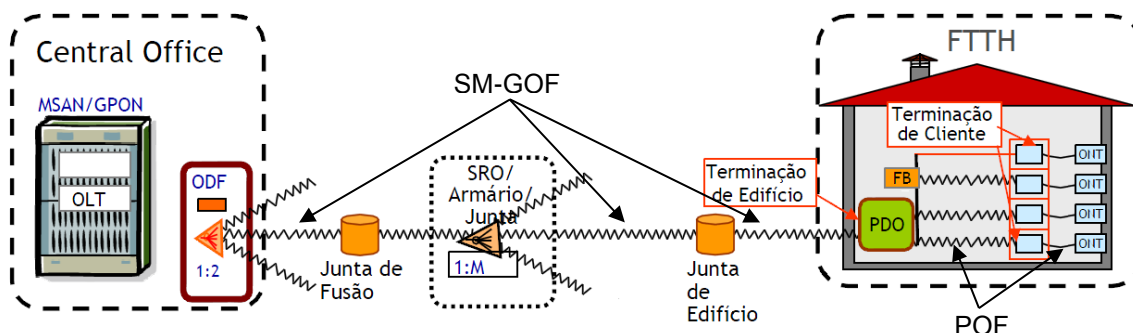


Figura 4.37 – Arquitetura de uma rede FTTH [66] (adap.).

Analisando o sistema da Figura 4.37, pode-se verificar que a principal diferença para a arquitetura HFC consiste na substituição completa da secção de cabo coaxial por fibra ótica. Neste caso, sai uma fibra ótica da caixa técnica “Junta de Edifício” em vez de um cabo coaxial. Por sua vez, esta fibra (que poderá ser SM-GOF ou MM-GOF [44]) irá ligar a um ponto de distribuição ótico (PDO), neste caso já dentro do prédio, de onde sairão POFs para os andares. Estas POFs irão ligar às caixas técnicas dos andares (FBs), de onde o técnico irá fazer uma ligação para levar uma POF até dentro da casa do cliente. Finalmente, esta POF irá ligar à “Terminação de Cliente” (pequena caixa fixa numa parede da casa), de onde sairá outra POF que por sua vez ligará ao terminal da rede ótica (ONT). Este último consiste no equipamento responsável por converter o sinal ótico para elétrico para que seja distribuído pelos equipamentos da habitação.

Na Figura 4.38 pode-se visualizar um ONT da *Alcatel* instalado na casa de um cliente, com todas as suas ligações de entrada e de saída [67].

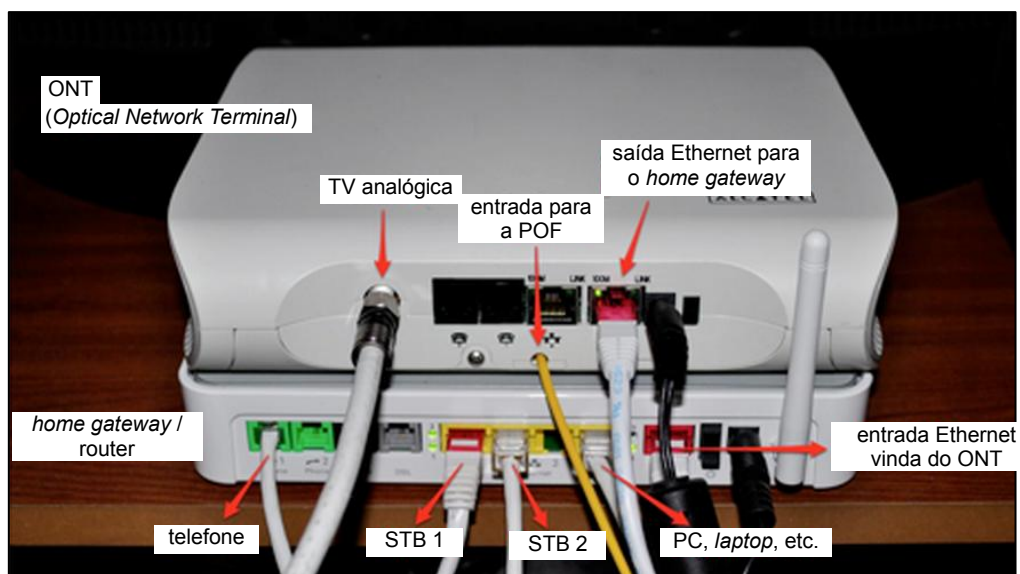


Figura 4.38 – ONT da *Alcatel* instalado na casa de um cliente [67] (adap.).

Como se pode observar, a POF é o meio de transmissão que traz os dados até à casa do cliente (a partir do PDO). O sinal ótico termina no ONT, que o converte para elétrico de modo a que seja distribuído pelos respetivos equipamentos.

Na Figura 4.39 pode-se visualizar a arquitetura do sistema dentro da casa do cliente, tendo em atenção os tipos de cabos que interligam os vários equipamentos.

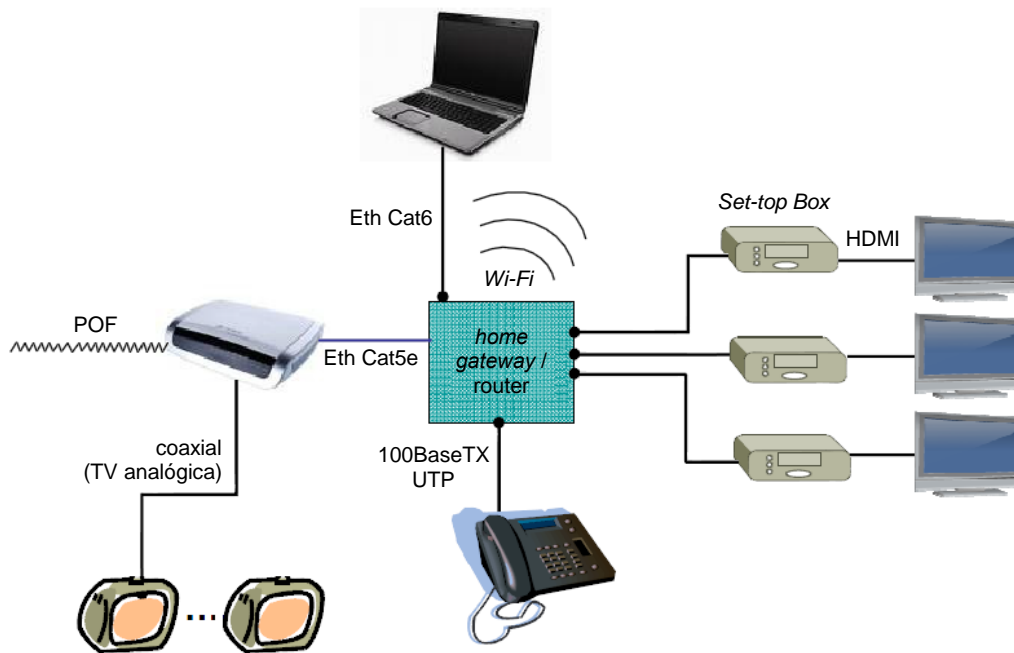


Figura 4.39 – Arquitetura do sistema dentro da casa do cliente [66] (adapt.).

Como se pode ver, o sinal óptico chega ao ONT através da POF. A partir daqui o sinal será convertido para elétrico para distribuição pela casa. De notar que esta estrutura é a que existe hoje em dia nas casas dos clientes onde, por exemplo, se interliga o ONT e o *home gateway/router* por cabo Ethernet Cat5e, as STBs e os LCDs por HDMI, e o sinal RF para os canais analógicos de televisão por cabo coaxial. No futuro, o objetivo será fazer com que todos estes cabos sejam substituídos por POF, com a finalidade de se eliminar de vez a IEM.

Depois de se perceber como funciona a estrutura física, tem de se referir como funciona a parte lógica. Como já foi mencionado, o objetivo será implementar um sistema DVB-c para transmissão dos canais de televisão digitais para o cliente. Neste sistema, podem ser utilizados vários níveis de modulação. Poderá ser utilizada, por exemplo, para transmissão dos canais de televisão – sentido *downlink* (DL), da central para o cliente – as modulações 64-QAM para canais em qualidade *standard* (SDTV) e 256-QAM para os canais em alta definição (HDTV). Também deverá existir um canal utilizado para transmissão de dados do cliente (STB) para a central – sentido *uplink* (UL) – o qual utilizará uma modulação 16-QAM. Este canal é utilizado por exemplo para a função de *Video-on-Demand* (VoD).

Para além das modulações, é importante saber-se também quais as frequências e *Symbol Rate* (SR) em que os canais de televisão são transmitidos. Através da STB do

cliente é possível saber-se estas informações para os canais em DL. Por exemplo, para um canal de qualidade *standard* será utilizada uma modulação 64-QAM, uma frequência da portadora de 714 MHz e um *SR* de 6,875 MSps. Para um canal em alta definição será utilizada uma modulação 256-QAM, uma frequência da portadora de 354 MHz e um *SR* também de 6,875 MSps [68]. Quanto ao canal de UL, será utilizada uma modulação 16-QAM, uma frequência da portadora de 55,8 MHz e um *SR* de 5,12 MSps [69].

De notar que para uma transmissão de sinais QAM por POF, as frequências usadas no DVB-c (em DL) são muito elevadas. Na verdade, para transmissão por POF devem ser utilizadas frequências entre 20 e 80 MHz [48]. Para além disto, no VPI tem de se introduzir o débito binário de transmissão e não o débito de símbolo (*SR*). Para se saber qual o débito binário ( $R_b$ ) para cada canal recorreu-se à Equação 4.6.

$$R_b = SR \times \log_2(N^{\circ} \text{símbolos}) \quad (4.6)$$

Sendo assim, para o canal 64-QAM tem-se um débito binário de 41,25 Mbps, para o canal 256-QAM tem-se 55 Mbps e para o 16-QAM tem-se 20,48 Mbps. Ainda se deve ter em conta que os sistemas DVB-c não têm valores de EVM estipulados (só de BER). Por esta razão, consideraram-se os valores da norma IEEE802.11a, a qual apresenta *Symbol Rates* semelhantes. Portanto, assumiu-se para 16-QAM um EVM < 11,2% como limite, para 64-QAM um EVM < 5,6% e, visto que não são especificados os valores, para 256-QAM foi considerado um EVM < 2,5% [48]. Finalmente pôde-se configurar os parâmetros globais das simulações, tal como se pode ver pela Figura 4.40.

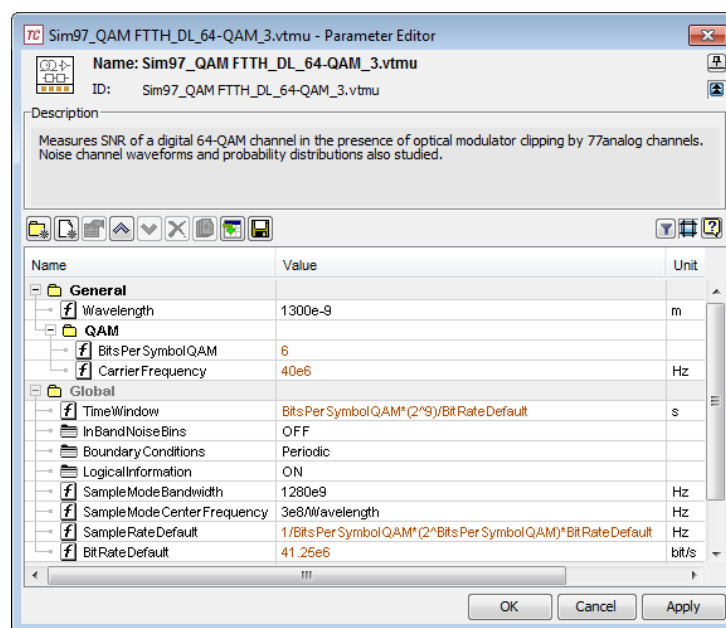


Figura 4.40 – Parâmetros globais para simulação com QAM, neste caso para 64-QAM.

Como se pode ver, foi adicionado o parâmetro *BitsPerSymbolQAM* para a definição de qual o nível de modulação QAM a usar, e o *CarrierFrequency* para definir qual a frequência da portadora em que os sinais QAM serão transmitidos. Quanto ao *TimeWindow* e ao *SampleRateDefault* pode-se verificar que foi definida uma expressão específica, a qual é apropriada para a simulação com sinais QAM.

Na Tabela 4.7 pode-se visualizar as configurações efetuadas para os três níveis de modulação QAM.

Tabela 4.7 – Parâmetros globais para as simulações com QAM.

Parâmetro	16-QAM	64-QAM	256-QAM
<i>BitsPerSymbolQAM</i>	4	6	8
<i>CarrierFrequency</i> [Hz]	20e6	40e6	40e6
<i>TimeWindow</i> [s]	$\text{BitsPerSymbolQAM}^* (2^9)/\text{BitRateDefault}$	$\text{BitsPerSymbolQAM}^* (2^9)/\text{BitRateDefault}$	$\text{BitsPerSymbolQAM}^* (2^{11})/\text{BitRateDefault}$
<i>SampleRateDefault</i> [Hz]	$1/\text{BitsPerSymbolQAM}^* (2^{\text{BitsPerSymbolQAM}}) * \text{BitRateDefault}$	$1/\text{BitsPerSymbolQAM}^* (2^{\text{BitsPerSymbolQAM}}) * \text{BitRateDefault}$	$1/\text{BitsPerSymbolQAM}^* (2^{\text{BitsPerSymbolQAM}}) * \text{BitRateDefault}$
<i>BitRateDefault</i> [bit/s]	20,48e6	41,25e6	55e6

Depois de se perceber como funciona o sistema DVB-c FTTH e de saber todos os valores necessários, pode-se passar à replicação do mesmo em simulação. Na Figura 4.41 pode-se visualizar o sistema utilizado para sinais QAM numa arquitetura FTTH, com GOF e POF como meios de transmissão. Neste caso trata-se do sistema para 64-QAM, ou seja, para a transmissão de um canal de televisão em qualidade SDTV (em DL). Para transmissão de 256-QAM, será utilizada a mesma arquitetura, alterando-se apenas para os valores correspondentes.

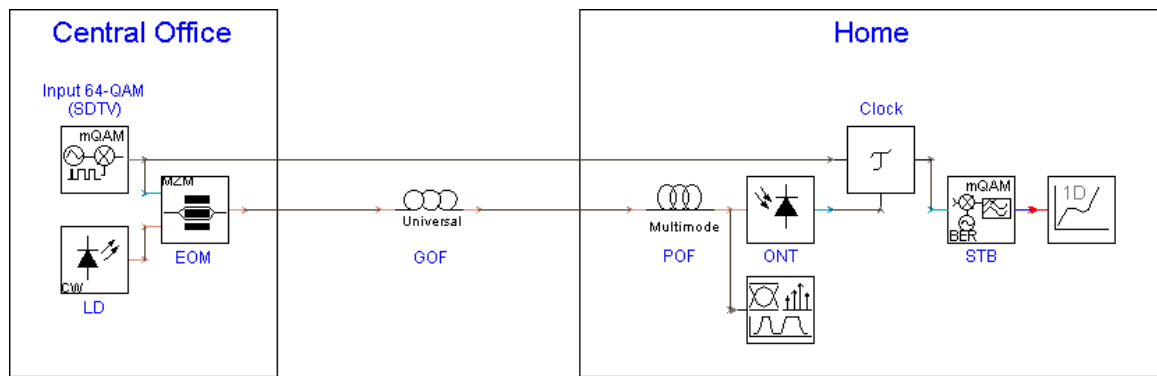


Figura 4.41 – Arquitetura do sistema FTTH com transmissão de sinais 64-QAM e 256-QAM, no sentido DL.

Como se pode ver, na central do operador (*Central Office*) é gerado o sinal QAM a transmitir e, através de um modulador externo MZM, é transmitida a informação através do sinal ótico do LD. De relembrar que normalmente são utilizados moduladores externos quando se pretende fazer a transmissão de sinais por vários quilómetros, tal como foi explicado anteriormente na secção 3.2.2. O sinal é então transmitido através de uma GOF monomodo com 20 km de comprimento, chegando até ao PDO (omitido) da habitação. Por sua vez, o sinal ótico chega até à POF, que o levará até ao ONT (fotodetector). De seguida, é feita a correção dos tempos de atraso e de fase do sinal através do bloco *Clock*, e por fim a STB interpreta o sinal para que o canal de televisão possa ser visualizado num televisor.

A ter em atenção que numa situação real a GOF (monomodo) não está diretamente ligada à POF (multimodo). Caso tal acontecesse, o sinal poderia sofrer uma atenuação de 20 dB [60]. Na realidade será o PDO que fará a adaptação de um sinal para o outro. Também se pode observar que não foram incluídos os sub-repartidores óticos (SROs). Tudo isto foi feito para que o sistema simulado possa ficar o mais simples possível, ficando apenas com os componentes essenciais.

Para a transmissão de sinais em sentido UL, a arquitetura do sistema utilizada é idêntica à do sentido DL fazendo-se apenas as devidas alterações. Na Figura 4.42 pode-se visualizar a arquitetura para transmissão de sinais 16-QAM em UL.

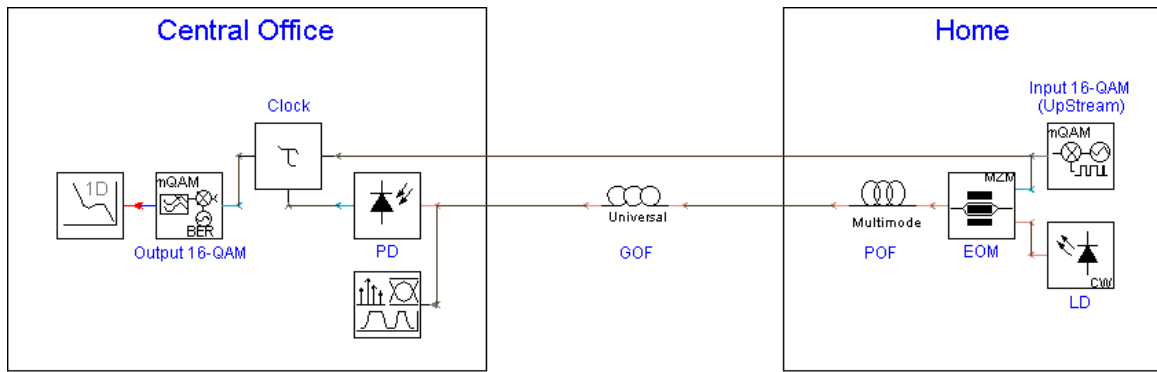


Figura 4.42 – Arquitetura do sistema FTTH com transmissão de sinais 16-QAM, no sentido UL.

Como se pode ver, os módulos utilizados foram os mesmos que para a transmissão em DL, adaptando apenas as ligações para o sentido contrário.

Os resultados das três modulações podem ser visualizados nas Figuras 4.43 – 4.45. Poder-se-á confirmar que na recepção foram recebidos com sucesso todos os sinais QAM, tornando viável a aplicação dos componentes simulados em sistemas DVB-c FTTH.

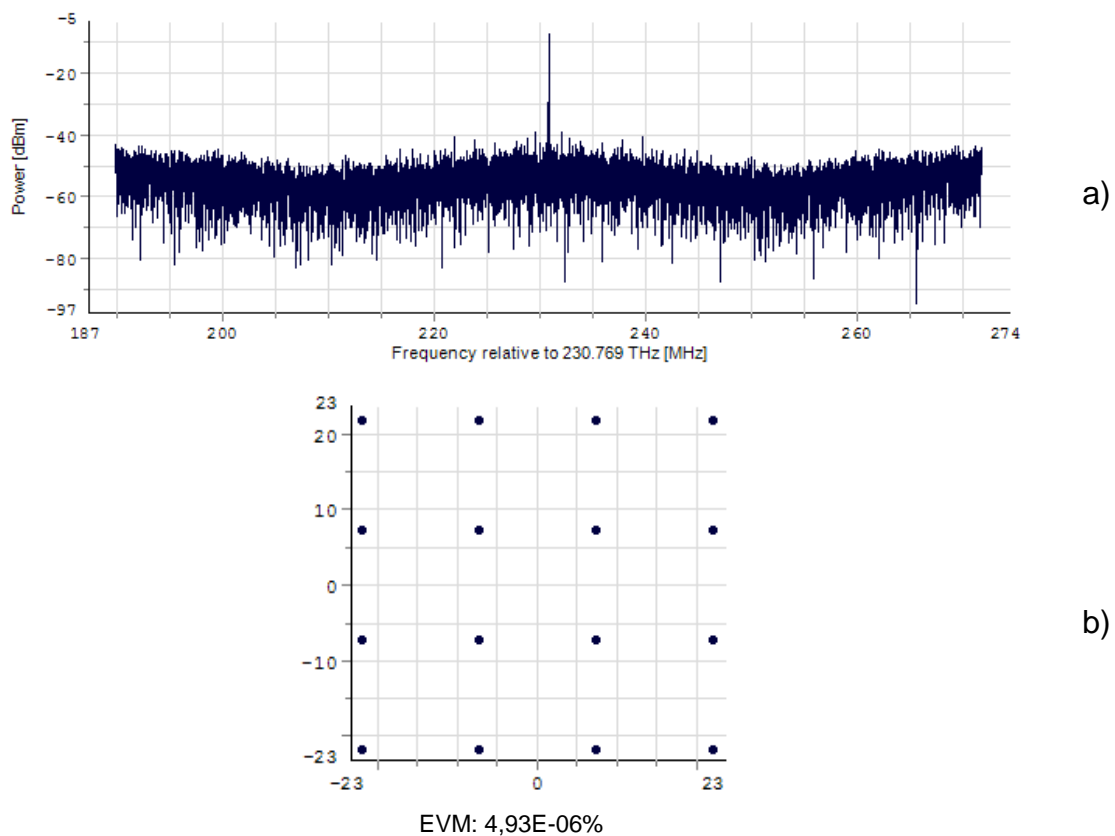


Figura 4.43 – Espectro óptico (a) e EVM da constelação (b) obtidos para a transmissão 16-QAM em UL.

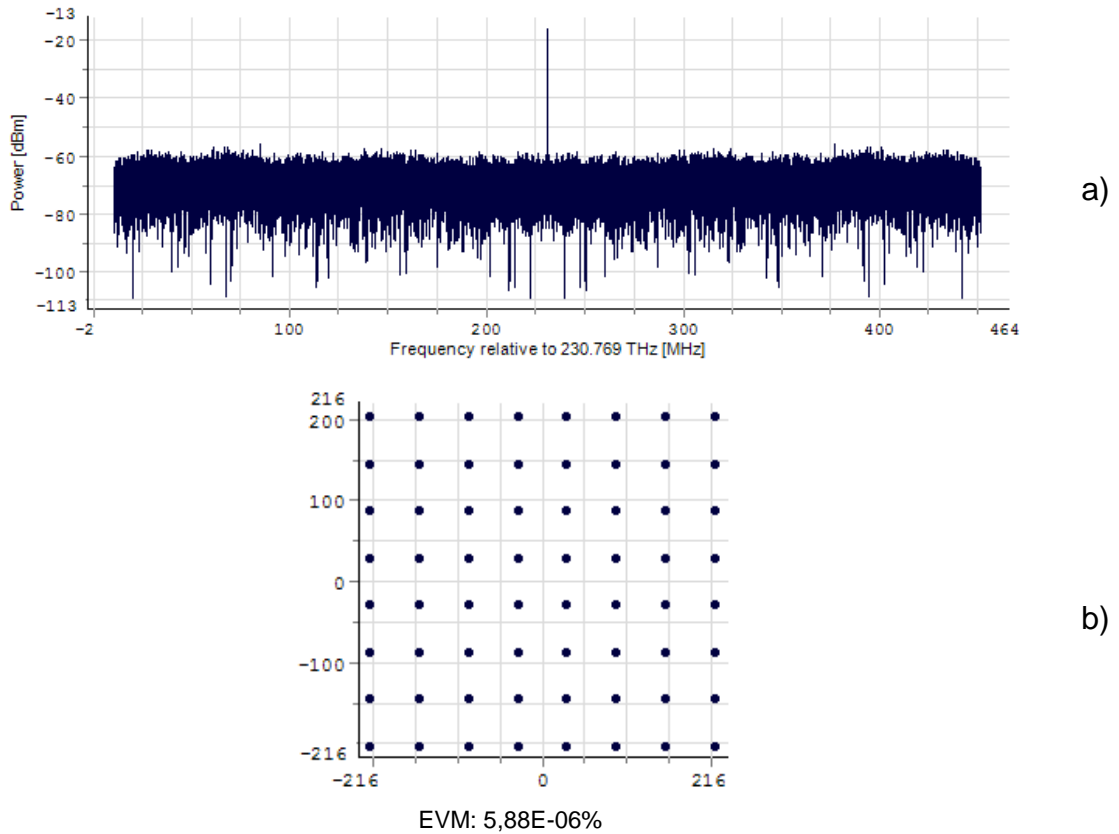


Figura 4.44 – Espectro ótico (a) e EVM da constelação (b) obtidos para a transmissão 64-QAM em DL.

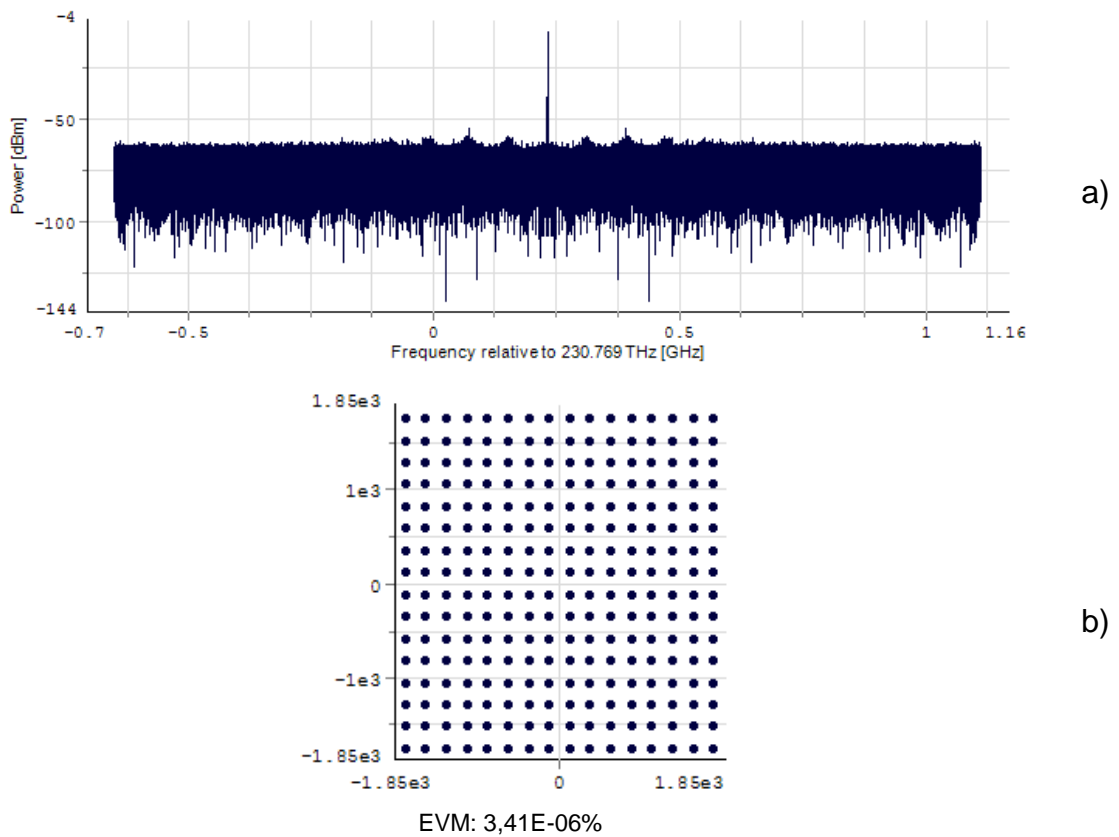


Figura 4.45 – Espectro ótico (a) e EVM da constelação (b) obtidos para a transmissão 256-QAM em DL.



# Capítulo 5

---

## Considerações Finais

### 5.1 Conclusões

As fibras óticas de plástico consistem numa boa alternativa futura para as ligações a curtas distâncias, podendo substituir por exemplo os cabos coaxiais convencionais, os de par entrelaçado ou mesmo as fibras óticas de sílica multimodo. Algumas das suas vantagens prendem-se no facto de serem leves, flexíveis, terem custos reduzidos, uma abertura numérica e diâmetro do núcleo grandes (acoplamento mais simples), trabalharem com radiação visível, imunidade a interferências eletromagnéticas e fácil instalação. Por estas razões, algumas das principais áreas de aplicação são o setor automóvel, o controlo industrial, os sensores, a medicina, a iluminação artificial e LANs domésticas ou empresariais.

A capacidade de desempenho da POF varia consoante o tipo de material constituinte, que pode ser polimetilmetacrilato (PMMA), policarbonato (PC), poliestireno (PS) ou polímero de flúor (PF), sendo o mais comum o primeiro e o último. O PMMA consiste num polímero menos transparente que o PF, onde os índices de refração são de 1,49 e 1,34 respetivamente. Para além disso, o perfil do índice de refração do núcleo também tem grande influência nos resultados, podendo ser de índice em degrau (SI) ou de índice gradual (GI). Por serem feitas de materiais poliméricos fazem com que a atenuação e dispersão do sinal sejam muito maiores do que nas fibras de sílica. Outra grande limitação é a fraca resistência a temperaturas elevadas ( $> 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Um sistema de comunicação ótica com POF é composto por três componentes essenciais que são a fonte ótica, a POF e o fotodetector. A fonte ótica injeta a luz (que contém os dados) no canal de transmissão, que neste caso é a POF. Por sua vez, esta encaminha o sinal até ao fotodetector, que o reconverte para elétrico para que se possa fazer o seu posterior processamento.

As fontes óticas podem ser do tipo LED ou laser. Os LEDs têm como principais características serem baratos, terem um tempo de vida elevado, sofrerem pouco com a temperatura, terem baixo consumo de energia e elevada largura espectral (10 – 100 nm). Quanto aos lasers, são caracterizados por permitirem potências de emissão elevadas, maior diretividade do feixe luminoso e reduzida largura espectral ( $10^{-5}$  – 5 nm). Dentro desta categoria, destaca-se o DFB-LD, o FP-LD e o VCSEL. Enquanto o primeiro consiste num laser monomodo (largura espectral reduzida), os outros dois são lasers multimodo. Os fotodetectores podem ser do tipo PIN ou APD. Todos os sistemas com POF a nível comercial utilizam fotodetectores do tipo PIN, uma vez que são mais fáceis de usar e o seu custo é bastante mais reduzido.

Para a análise do desempenho destes sistemas são utilizadas figuras de mérito como o BER, o diagrama de olho, o diagrama de constelação QAM e o EVM. As duas primeiras permitem avaliar a quantidade de erros na receção de um sinal NRZ, enquanto as duas últimas o fazem para sinais QAM.

Nas simulações realizadas teve-se como objetivo testar na prática os conceitos adquiridos na parte teórica. Inicialmente, foi feita uma breve introdução ao *software* de simulação VPIphotonics™. Percebeu-se que existem vários módulos, onde é necessário fazer-se a correta parametrização de cada componente do sistema e de toda a simulação em geral. Os parâmetros (globais) que mais influenciam os resultados de uma simulação são o *TimeWindow* e o *SampleRateDefault*, devendo estes ser cuidadosamente definidos.

De seguida, foi feita a parametrização dos módulos designados para a fonte ótica (LED, LD ou VCSEL), fibra ótica e fotodetector (PIN), definindo-se os parâmetros com valores tipicamente utilizados em sistemas com POF. Para o caso da fibra ótica, foram seleccionadas três POFs e três GOFs disponíveis a nível comercial. As POFs escolhidas são designadas por EskaMega, OM-Giga e Lucina. A primeira é uma PMMA-SI-POF, a segunda uma PMMA-GI-POF e a terceira é uma PF-GI-POF (denominada por CYTOP®). As GOFs são do tipo multimodo (SI-GOF e GI-GOF) e monomodo (SM-GOF).

Depois de feita a parametrização, passou-se à análise de resultados. O primeiro teste efetuado teve como objetivo verificar a diferença de valores obtidos na transmissão de um

sinal NRZ, ao variar-se o comprimento de onda de uma fonte ótica LD em 650, 850 e 1300 nm e o comprimento da fibra ótica em 100, 500 e 1000 metros. Curiosamente observou-se uma discrepância de valores entre a transmissão a 850 nm e 1300 nm onde, para estes comprimentos de onda, a atenuação da fibra utilizada é igual ( $20e^{-3}$  dB/m). Concluiu-se que quanto menor for o comprimento de onda, maior será o valor do parâmetro  $V$ . Por sua vez, o número de modos propagados ( $M$ ) aumentará, fazendo com que a dispersão intermodal também aumente, ou seja, maior será o BER verificado na recepção. Sendo assim, assumiu-se que para o LD seria utilizado um comprimento de onda de 1300 nm.

O teste seguinte consistiu em fazer a comparação do desempenho dos três tipos de fonte ótica. Após a análise dos resultados, pôde-se concluir que o LED poderá ser utilizado apenas para transmissão pouco rápida (100 Mbps para 100 metros) e para distâncias de até 500 metros no máximo (com apenas 50 Mbps). Por esta razão, os LEDs são mais indicados para Ethernet LANs, automóveis que implementem a norma MOST ou para iluminação artificial. Caso se pretenda uma ligação de maior velocidade e com implementação de custo reduzido, é aconselhada a utilização de um VCSEL uma vez que suporta ritmos binários usados por exemplo numa GigabitEthernet LAN. No entanto, terá de se ter em atenção que o funcionamento deste tipo de fonte ótica pode ser instável com o aumento da temperatura. Para um sistema de comunicação ótica com POF fiável é aconselhada a utilização de um LD, o qual suporta altos ritmos binários (40 Gbps) em fibras de comprimento maior (até 1 km). No entanto, este tipo de fonte poderá ser relativamente caro, ficando à escolha do utilizador se esta será mesmo necessária.

Seguidamente foi feito um teste à capacidade de transmissão das fibras óticas escolhidas. Infelizmente, a POF EskaMega não pôde ser simulada com sucesso. A explicação para tal deve-se ao facto desta fibra ter um perfil do índice de refração do núcleo em degrau (SI-POF), assim como um diâmetro do núcleo muito grande (980  $\mu$ m). Por estas razões são gerados muitos modos dentro da fibra (cerca de 1 milhão), e o simulador não foi projetado para efetuar cálculos para um número de modos tão elevado. No entanto, para o resto das fibras a simulação foi possível. Verificou-se que a POF OM-Giga é a que apresenta pior desempenho, visto que é do tipo PMMA-GI-POF. Poderá ser apropriada para ligações de no máximo 100 metros e para transferência de dados de alguns gigabits por segundo. Esta POF poderá consistir numa boa alternativa aos cabos Ethernet Cat5e ou Cat6, ou também aos IEEE1394 (*FireWire*), para além de ser a fibra com menor custo das apresentadas. Quanto às fibras de sílica multimodo SI-GOF e

GI-GOF, são mais indicadas para por exemplo interligarem *campus* universitários, LANs ou MANs que não excedam 1 km. No caso de se tratar de uma ligação de longa distância, obviamente deverá ser utilizada a SM-GOF visto que suporta altos débitos binários, sem erros, a distâncias de vários quilómetros (até cerca de 40 km). Quanto à POF Lucina, verifica-se que o seu desempenho é bastante bom para uma fibra ótica de plástico, uma vez que só com um comprimento de 1 km é que começou a apresentar alguns erros, para ritmos binários mais elevados (40 Gbps). Portanto, esta fibra é a mais indicada para ser instalada, por exemplo, no interior de edifícios ou apartamentos, já que ao contrário das fibras multimodo de sílica, é bastante mais flexível, barata e de fácil instalação. Uma curiosidade verificada foi o facto de, apesar de ser uma POF, apresentar melhor desempenho do que as MM-GOFs. A razão para tal deve-se ao seu índice de refração do núcleo ( $n_1$ ) ser bastante baixo (1,34), levando a que o parâmetro  $V$  seja reduzido, assim como o número de modos propagados e, por conseguinte, a dispersão intermodal seja menor. Com isto, concluiu-se que a POF Lucina seria indicada a utilizar nos testes posteriores.

As simulações seguintes correspondem à transmissão de sinais QAM através de uma POF. Começou-se por testar um sistema simples, com o qual se verificou que a constelação QAM chegava distorcida, com uma POF de apenas 3 metros. Mais uma vez, a razão para tal deve-se a este tipo de fibras sofrer bastante com os efeitos de dispersão intermodal. Sendo assim, foi necessário adicionar-se um módulo para se fazer a correção de atraso e de fase dos símbolos. Resolvido este problema, pôde-se passar ao último cenário de teste, o qual consistiu em simular um sistema DVB-c FTTH com POF na “última milha”. Nesta arquitetura, é utilizada SM-GOF para interligar a central do operador e o prédio do cliente. A POF é instalada por dentro das condutas do prédio, levando o sinal ótico do PDO até ao ONT, que por sua vez o converte para o domínio elétrico de modo a ser distribuído pelos equipamentos da casa do cliente. Através de uma correta parametrização, foi possível obter-se valores de EVM mínimos para a transmissão de canais de televisão digitais em 16-QAM (*UpStream*), 64-QAM (SDTV) e 256-QAM (HDTV).

## 5.2 Trabalho futuro

Tendo presente que as fibras óticas de plástico constituem um tema inovador e bastante atual, sugere-se que sejam tomados mais alguns desenvolvimentos nesta área das comunicações óticas.

Em primeiro lugar, sugere-se fazer medidas no simulador quanto ao alargamento dos impulsos óticos transmitidos numa POF, e verificar o que acontece quando são utilizados os diferentes tipos de fontes e fibras óticas. Investigando a norma MOST mais aprofundadamente, poder-se-ia tentar desenvolver um sistema para a implementação de POF na mesma. Para além disto, através de bons conhecimentos de programação, poder-se-ia tentar desenvolver no VPI um módulo mais apropriado para a representação de uma POF.

Por fim, sugerem-se testes laboratoriais que permitam ter-se uma melhor noção do desempenho de uma POF num cenário real. Por exemplo, utilizar equipamentos que permitam testar a atenuação e a dispersão do sinal transmitido através de uma POF. Também se poderia testar a transmissão de dados com um LED ou um laser a fim de comparar os resultados obtidos com os verificados no simulador. Para além disto, seria também interessante testar-se a utilização de uma POF para iluminação artificial ou como um sensor de movimento. Outra experiência importante seria verificar a capacidade de uma POF transmitir dados, ao ser enrolada ou mesmo dando-lhe um nó, já que é uma propriedade que outros tipos de fibra não têm.



# Referências

- [1] I. A. Oliveira, “Estudo e Caracterização de Fibras Ópticas Plásticas para Aplicação em Telecomunicações,” (Tese de Mestrado), Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, 2004.
- [2] L. M. Bilro, “Metrologia Óptica com Fibra Polimérica,” (Tese de Doutorado), Departamento de Física da Universidade de Aveiro, 2011.
- [3] P. Polishuk, “Plastic Optical Fibers Branch Out,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 1-3; 7-9, 2006.
- [4] “POF 2012 - The 21st International Conference on Plastic Optical Fibers,” [Online]. Available: <http://pof2012.com/>. [Acedido em 31 outubro 2012].
- [5] L. Thorne, “Consumer-Friendly Plastic Optical Fiber Home Network Distribution,” *Firecomms - IPTV Magazine!*, 2009. [Online]. Available: [http://www.iptvmagazine.com/2009\\_01/IPTVMagazine\\_2009\\_01\\_Optical\\_Home\\_Networking.html](http://www.iptvmagazine.com/2009_01/IPTVMagazine_2009_01_Optical_Home_Networking.html). [Acedido em 27 março 2012].
- [6] 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.
- [7] L. Bart, C. Koen, G. Mathias, O. Jan Van, V. Sofie e C. Didier, “Selecting the Most Suitable Next-Generation In-Building Network: From Copper-Based to Optical Solutions,” *IBBT TERRAIN project*, p. 4, 2011.
- [8] e-thesis, “PT inicia testes de fibra óptica plástica em Portugal,” 11 dezembro 2009. [Online]. Available: [http://www.e-thesis.inf.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=6301&Itemid=139](http://www.e-thesis.inf.br/index.php?option=com_content&task=view&id=6301&Itemid=139). [Acedido em 31 outubro 2012].
- [9] “Plastic Optical Fiber Interconnect Cable,” [Online]. Available: [http://honglin.co.kr/html/pro03\\_3.htm](http://honglin.co.kr/html/pro03_3.htm). [Acedido em 14 novembro 2011].
- [10] A. Beneti, “Ondas Eletromagnéticas,” 2010. [Online]. Available: <http://anacarolinahvialonga.blogspot.com/2008/05/espectro-electromagntico.html>. [Acedido em 28 outubro 2012].
- [11] W. F. Giozza, E. Conforti e H. Waldman, *Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas*, São Paulo: Makron Books, 1991.
- [12] M. M. Hadow, “Radio Access Point Design for Radio Over Fiber Technology,” (Master Thesis), Faculty of Electrical Engineering of Universiti Teknologi Malaysia, 2008.
- [13] POF-AC University of Applied Sciences Nürnberg, “The step index PMMA POF,” 2005. [Online]. Available: [http://www.pofac.de/pofac/en/what\\_are\\_pof/step\\_index.php](http://www.pofac.de/pofac/en/what_are_pof/step_index.php). [Acedido em 29 outubro 2012].
- [14] “Paper Fibras Ópticas,” [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 27 março 2012].
- [15] Jinesh, “Fiber Bend Loss,” *Electronics & Communication Engineering for U.*, [Online]. Available: <http://ece4u.in/fiber-bend-loss/>. [Acedido em 27 março 2012].
- [16] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan e G. H. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 3rd Edition, USA: Morgan Kaufmann, 2010.
- [17] CAN in Automation (CiA), “<http://www.can-cia.de/index.php?id=161#c137>,” 2011. [Online]. [Acedido em 27 março 2012].

- [18] “Domestic Digital Bus (D2B),” Mercedes-Benz, 4 setembro 2003. [Online]. Available: [http://www.mercedestechstore.com/pdfs/416\\_Telematics/416%20HO%20D2B%20\(CooksonI\)%2003-09-04.pdf](http://www.mercedestechstore.com/pdfs/416_Telematics/416%20HO%20D2B%20(CooksonI)%2003-09-04.pdf). [Acedido em 27 março 2012].
- [19] Larry Gould, “A Manager’s Guide to FlexRay,” Automotive Design & Production, [Online]. Available: <http://66.192.79.249/articles/090205.html>. [Acedido em 27 março 2012].
- [20] KDPOF, “Applications of KDPOF Technology,” Knowledge Development for POF S.L., 2011. [Online]. Available: <http://www.kdpof.com/Applications.html>. [Acedido em 28 março 2012].
- [21] Quick Fibre, “Frequently Asked Questions regarding Plastic Optical Fiber,” Quick Fibre, [Online]. Available: <http://www.quickfibre.com/-faqs.html>. [Acedido em 28 março 2012].
- [22] Mickaël Marie, “Upgrade Existing Industrial Networks with Fiber Optics,” Avago Technologies, setembro 2010. [Online]. Available: <http://www.rtcmagazine.com/articles/view/101776>. [Acedido em 28 março 2012].
- [23] A. Icarus, “TAP Air Portugal Boeing 737-33A,” flickr, 28 junho 2011. [Online]. Available: <http://www.flickr.com/photos/46423105@N03/5883639911/>. [Acedido em 18 novembro 2012].
- [24] “Kamov Ka-50 Hokum,” Military-Today, [Online]. Available: [http://www.military-today.com/helicopters/kamov\\_ka50\\_hokum.htm](http://www.military-today.com/helicopters/kamov_ka50_hokum.htm). [Acedido em 18 novembro 2012].
- [25] “T-64BM Bulat,” Military-Today, [Online]. Available: [http://www.military-today.com/tanks/t64bm\\_bulat.htm](http://www.military-today.com/tanks/t64bm_bulat.htm). [Acedido em 18 novembro 2012].
- [26] “Burning naval ship Vindhyagiri listing,” 9newz, [Online]. Available: <http://www.9newz.com/burning-naval-ship-vindhyagiri-listing>. [Acedido em 18 novembro 2012].
- [27] “Ilustração da sonda espacial Dawn a deixar a Terra,” Centro de Astrofísica da Universidade do Porto, [Online]. Available: <http://www.astro.up.pt/divulgacao/imagem.php?WID=462&CID=2&ID=156&NIID=309&Lang=pt>. [Acedido em 18 novembro 2012].
- [28] Chromis Fiberoptics, Inc., “New MedPOF® From Chromis Fiberoptics,” 2009. [Online]. Available: <http://www.chromisfiber.com/medical.htm>. [Acedido em 28 março 2012].
- [29] Internacional Electrotechnical Commission, *Optical fibres – Part 2-40: Product specifications – Sectional specification for category A4 multimode fibres*, 3.0 ed., IEC 60793-2-40, 2009, p. 6.
- [30] O. Ziemann, H. Poisel e J. Vinogradov, “Potential of High Speed, Short Distance Optical Data Communication on Large Diameter Optical Fibers,” *Polymer Optical Fiber Application Center*, p. 409, 2006.
- [31] Solus Renewable, “Photovoltaic Cells,” [Online]. Available: <http://www.solusrenewableenergy.co.uk/photovoltaic-cells-two.html>. [Acedido em 27 outubro 2012].
- [32] ISEL - DEEC Electrónica, “Apontamentos de apoio a: Electrónica I - Física dos Semicondutores,” 2000.
- [33] Sistemas de Telecomunicações Guiados - ISCTE, “Fontes Ópticas - Tipos e principais características,” [Online]. Available: <http://radio.lx.it.pt/STG/STG0405acetatos10.pdf>. [Acedido em 27 outubro 2012].
- [34] P. L. Antunes, *Diapositivos da Unidade Curricular de Optoelectrónica*, ISEL - MEET.
- [35] S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2001.
- [36] M. Almeida, “Geração e propagação de sinais rádio sobre fibra (RoF),” (Tese de Mestrado), ADEETC - ISEL, 2011.
- [37] R. Jerónimo, “Estudo comparativo entre sistemas RoF com modulação directa e com modulação externa,” (Tese de Mestrado), ADEETC - ISEL, 2011.
- [38] “Semiconductor Laser Diodes,” [Online]. Available: <http://britneyspears.ac/physics/fplasers/fplasers.htm>. [Acedido em 27 outubro 2012].

- [39] Invocom, “Semiconductor laser diodes,” [Online]. Available: [http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody\\_en/p1-1\\_6\\_5.htm](http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_6_5.htm). [Acedido em 27 outubro 2012].
- [40] G. Giacomelli, “Introduction: semiconductor lasers,” [Online]. Available: <http://www.fi.isc.cnr.it/users/giovanni.giacomelli/Semic/Samples/samples.html>. [Acedido em 27 outubro 2012].
- [41] Sistemas de Comunicação I, “Sistema Básico de Comunicação Óptico,” [Online]. Available: <http://professores.unisant.br/isfarias/Materia/Sistemas%20de%20Comunicacao%20I/fibra%20optica.pdf>. [Acedido em 27 outubro 2012].
- [42] F. Ramos, *Diapositivos da Unidade Curricular de Sistemas de Comunicação Óptica*, MEET - ISEL.
- [43] Sistemas e Redes de Telecomunicações, “Receptores Ópticos,” [Online]. Available: [http://www.est.ualg.pt/adee/disciplinas/mestrado/srt/material/SRT\\_Cap4.pdf](http://www.est.ualg.pt/adee/disciplinas/mestrado/srt/material/SRT_Cap4.pdf). [Acedido em 27 outubro 2012].
- [44] H. J. R. Dutton, *Understanding Optical Communications*, 1st Edition ed., IBM Corporation, International Technical Support Organization, 1998.
- [45] M. d. L. Rocha, “Diagrama do olho - Projeto e Avaliação Sistêmicos,” Instituto Federal de Santa Catarina, [Online]. Available: <http://200.135.37.90/~saul/sistemas%20opticos/diagrama%20do%20olho.pdf>. [Acedido em 27 outubro 2012].
- [46] F. Fortes, “Apontamentos de Sistemas Electrónicos de Telecomunicações,” ADEECT - ISEL, 2010.
- [47] Splash, “Constellation diagram for Gray-coded 16-QAM,” 10 agosto 2005. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:16QAM\\_Gray\\_Coded.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:16QAM_Gray_Coded.png). [Acedido em 27 outubro 2012].
- [48] M.S. Alfiad, X. Li, J. Yang, A.M.J. Koonen, H.P.A. van den Boom, “Transmission of QAM Signals Over 100m Step-Index PMMA Polymer Optical Fiber with 0.98mm Core Diameter,” *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, p. 153, 2006.
- [49] E. H. Miguel, “Fiber-based Orthogonal Frequency Division Multiplexing Transmission Systems,” (Master Thesis), Escola Politècnica Superior de Castelldefels, Catalunya, 2010.
- [50] *VPItransmissionMaker™/VPIcomponentMaker™ User's Manual*.
- [51] “ALPHA - Architectures for flexible Photonic Home and Access Networks,” *Universidade Politècnica de València (UPVLC)*, 15 maio 2009.
- [52] *VPItransmissionMaker™/VPIcomponentMaker™ Photonic Modules' Manual*.
- [53] “Low-pass filter,” ATIS Telecom Glossary 2012, [Online]. Available: <http://www.atis.org/glossary/definition.aspx?id=3848>. [Acedido em 29 setembro 2012].
- [54] O. Ziemann, S. Loquai, J. Vinogradov e R. Kruglov, “The 1 Gigabit over 1 mm POF Story - from Vision to Standard,” em *ECOC*, Torino, 2010.
- [55] A. Costa, *Características de Transmissão: Atenuação e Dispersão*, FEUP.
- [56] “High-Performance Linear PIN 1300nm, 1550nm Data Sheet,” Zarlink Semiconductor Inc., dezembro 2003. [Online]. Available: <http://www.zarlink.com/zarlink/zl60010-datasheet-oct2003.pdf>. [Acedido em 29 setembro 2012].
- [57] “DrakaElite™ Radiation Hardened Step-Index Multimode Fiber,” Draka Communications, dezembro 2009. [Online]. Available: <http://communications.draka.com/sites/eu/Datasheets/DrakaElite%20RadHard%20Step-Index%20Multimode%20Optical%20Fiber.pdf>. [Acedido em 29 setembro 2012].
- [58] “Graded Multimode Fiber, Model: F-MFD,” Newport Corporation, [Online]. Available: [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=F-MFD](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=F-MFD). [Acedido em 29 setembro 2012].
- [59] “Singlemode Fiber, Model: F-SMF-28,” Newport Corporation, [Online]. Available: [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=F-SMF-28](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=F-SMF-28). [Acedido em 29 setembro 2012].

- [60] “Optical Fiber,” LANshak.com, [Online]. Available: <http://www.lanshack.com/fiber-optic-tutorial-fiber.aspx>. [Acedido em 29 setembro 2012].
- [61] A. Polley, R. J. Gandhi e S. E. Ralph, “40Gbps links using plastic optical fiber,” *School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology*, p. 1, 2006.
- [62] “VPIphotonics Forum,” VPIphotonics, [Online]. Available: <http://forums.vpi Photonics.com/forum.php>. [Acedido em 30 setembro 2012].
- [63] I. Optimedia, “PMMA-based GI-POF (OM-Giga)”. Seongnam-Si, Korea maio 2006.
- [64] B. Collings, F. Heismann e G. Lietaert, “Advanced Fiber Optic Testing, High-Speed Fiber Link and Network Characterization,” em *Reference Guide to Fiber Optic Testing - Vol. 2*, JDS Uniphase Corp., 2010, p. 37.
- [65] “DSL Advances,” Flylib, 2012. [Online]. Available: <http://flylib.com/books/en/3.206.1.95/1/>. [Acedido em 5 novembro 2012].
- [66] P. Telecom, “Manual MEO FIBRA”. junho 2009.
- [67] “Meo ONT Modem,” Sapo, janeiro 2010. [Online]. Available: [http://iphil.com.sapo.pt/imagensBlog/Meo\\_ONT\\_Modem\\_Jan2010.jpg](http://iphil.com.sapo.pt/imagensBlog/Meo_ONT_Modem_Jan2010.jpg). [Acedido em 5 novembro 2012].
- [68] “DVB-c ZON Lisbon,” DragTeam, 11 março 2012. [Online]. Available: <http://www.dragteam.info/forum/duvidas-ajuda/156398-dvb-c-zon-lisbon-satellite-xml-sample-sr4-tri-input-tuner.html>. [Acedido em 5 novembro 2012].
- [69] “Netcabo - Valores de Modems,” bandalarga.org, 18 março 2009. [Online]. Available: <http://www.bandalarga.org/viewtopic.php?f=58&t=3122&start=140>. [Acedido em 5 novembro 2012].
- [70] M. Soares, “Laser - Princípios básicos de funcionamento,” MSPC, novembro 2007. [Online]. Available: <http://www.mspc.eng.br/eletrn/laser110.shtml>. [Acedido em 27 outubro 2012].
- [71] L. A. Neto, “Transmissão de Sinais OFDM através de Fibras Ópticas Poliméricas (POFs) utilizando LEDs de Iluminação,” (Tese de Mestrado), Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, 2009.