

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

TAIANE ALVARENGA MENANDRO GARCIA DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA
APERFEIÇOADO PARA 1 OU 2 CANAIS WDM COM IMUNIDADE À
DISTRIBUIÇÃO MODAL**

NITERÓI/RJ

2015

TAIANE ALVARENGA MENANDRO GARCIA DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA
APERFEIÇOADO PARA 1 OU 2 CANAIS WDM COM IMUNIDADE À
DISTRIBUIÇÃO MODAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Strictu Sensu* em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. RICARDO MARQUES RIBEIRO

Niterói/RJ

2015

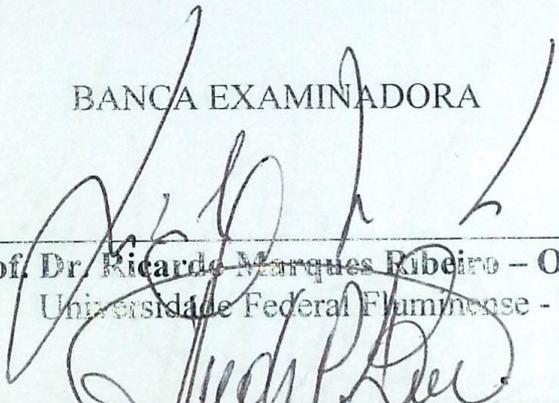
TAIANE ALVARENGA MENANDRO GARCIA DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA DE DOIS
CANAIS WDM IMUNE À DISTRIBUIÇÃO MODAL**

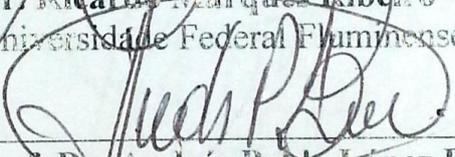
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Aprovada em 26 de novembro de 2015.

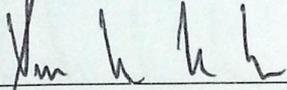
BANCA EXAMINADORA



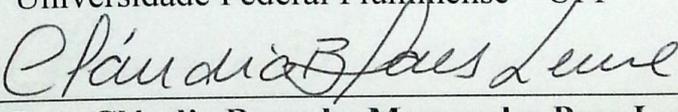
Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro – Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



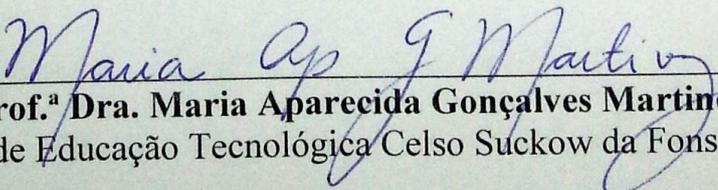
Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof.ª Dra. Cláudia Barucke Marcondes Paes Leme
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof.ª Dra. Maria Aparecida Gonçalves Martinez
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ

DEDICATÓRIA

À minha mãe, por ser a melhor pessoa que eu conheço, sendo meu exemplo e suporte para todos os momentos desde que eu e minha pequena Sophia nascemos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir alcançar meus objetivos e tornar possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Cláudia e Paulo, pelo suporte e por me proporcionarem uma educação digna e de qualidade. Por sempre me incentivarem a seguir em frente, superando todos os problemas e todas as barreiras que a vida nos impõe, e por me fornecerem amor e carinho incondicionais.

A minha filha Sophia e ao meu marido Carlos, pela compreensão, carinho, pelo incentivo de sempre e pelas infinitas ajudas com tradução/revisão.

A minha sogra, novamente a minha mãe e a Luzia, por cuidarem com tanto carinho da Sophia para que eu pudesse me dedicar ao mestrado.

Ao Professor Ricardo Marques Ribeiro, meu orientador e idealizador deste trabalho, pela disponibilização de seu tempo e pela paciência para atender todos os meus questionamentos, pelo entusiasmo, pelos conselhos e pelo conhecimento transmitido ao longo dos anos trabalhando em conjunto.

Aos professores e alunos do laboratório do *Polymer Optical Fiber Application Center* (POFAC) da escola alemã *Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm*, pela parceria realizando medições que contribuíram de maneira significativa com o presente trabalho.

Aos Professores Paulo Alcioly, pelo empréstimo de equipamento para a realização deste trabalho, e Ricardo Olivares, por estarem sempre solícitos a ajudarem.

Ao Professor Andrés Pablo López Barbero e aos amigos do Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOP), especialmente Pressley Xavier, Cláudia Barucke, Sydney Bragantine, Odair Xavier e Dianne Schery, pelo suporte técnico, acadêmico e pelos momentos lúdicos.

Aos demais professores e colegas do curso de mestrado em Engenharia de Telecomunicações, pelos conhecimentos transmitidos e pela contribuição direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores membros desta banca, pela disponibilidade para avaliação deste trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida a mim por 24 meses para o desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento experimental de três protótipos de um monitor de potência óptica (OPMo) original, simples e de baixo custo, adequado para o monitoramento de 1 ou 2 canais de comprimento de onda (WDM) para enlaces utilizando fibra óptica polimérica padrão de índice degrau - SI-PMMA. O OPMo mostrou-se altamente imune à distribuição modal, além de ser não-invasivo, pois não retira parte da luz guiada no núcleo da fibra: ele coleta e detecta a luz espalhada espontaneamente pela lateral da fibra utilizando um ou dois fotodetectores. O OPMo indica se a transmissão do enlace de POF está no estado ativo ou inativo. Se ativo, mede o nível médio de potência óptica do sinal propagante, sem que seja necessário interromper a transmissão deste enlace à fibra.

O 1º protótipo do OPMo apresentou uma sensibilidade de -50 dBm e faixa dinâmica de 45 dB. Já o 2º dispositivo desenvolvido tornou-se mais robusto, com maior sensibilidade e faixa dinâmica, mantendo-se ainda mais compacto e com a utilização de circuitos eletrônicos simples. Com um simples processamento externo de dados off-line, a faixa dinâmica pode ser expandida em 11,2 dB por meio da utilização simultânea de dois fotodetectores distintos, para a região de baixa potência e para a detecção na região onde era observada a saturação. Além disso, o aumento da impedância de carga associada ao fotodetector, proporcionou o aumento da sensibilidade óptica em até 10 dB. O terceiro e último dispositivo desenvolvido mantém toda a robustez adquirida no desenvolvimento do 2º protótipo, sendo ainda destinado a detectar e medir simultaneamente os níveis da potência óptica média de dois canais WDM (470 nm e 650 nm). Com o objetivo de demonstrar o princípio de funcionamento, foram utilizados filtros ópticos de plástico de baixo custo. O pior nível de rejeição *crosstalk* medido foi de 20,2 dB.

Palavras-Chave: *Fibra Óptica, Fibra Óptica Polimérica, Monitor de Potência Óptica, Medidor de Potência Óptica, dispositivo ativo, Espalhamento luminoso, Optoeletrônica, Distribuição de Modos Equilibrada, Misturador de Modos, Multiplexação, WDM.*

ABSTRACT

This work describes the experimental development of an original, simple and an inexpensive Optical Power Monitor (OPMo), suitable for monitoring 1- λ or 2- λ channel standard PMMA-based POF links. The OPMo is non-invasive in the sense that it does not tap any guided light from the fibre core; rather, it collects and detects the spontaneous side-scattered light by using a one or two photo-Darlington. Indeed, the OPMo indicates whether a POF transmission link has dark or live status and measures the average optical power level of the propagating signals without disconnecting the fibre link, so does not disturb the light propagating of the POF links. The OPMo is shown highly immune to the modal distribution and presented -50 dBm sensitivity and 45dB dynamics range.

Also in this work, a second prototype of OPMo, still simple, but ~96 times more compact that uses off-the-shelf photo-Darlington with TO-46 housing. Unlike what happened with the 1st prototype, for this 2nd prototype (optimized) operating at a 1- λ channel, the saturation was not observed for > -5 dBm launched optical power. Up to 10dB increase of optical sensitivity was obtained by increasing the load impedance of the photo-detector.

The optical dynamic range could be improved by 11.2 dB by using two different photo-Darlington: one for the low power region where high-sensitivity is required, and another for detecting the region where the saturation was observed. By using a simple off-line data processing, it is possible to circumvent the saturation of the OPMo to 1- λ channel. Thus, the device becomes more robust, the keeping it still compact and using simple electronic circuits

In the last part of the work, it is shown the development of an OPMo simultaneously able to detect and to measure the optical power levels of two WDM channels (470 nm and 650 nm) in either PMMA-based POF links. Low-cost plastic optical filters were used aiming to demonstrate the operation principle. The worst measured crosstalk rejection was 20.2 dB.

Key words: *Optical fiber; Polymer Optical Fiber, Optical power monitor; Optical power meter; Active Device, Light scattering, Optoelectronic, Equilibrium Mode Distribution, Mode Scrambler, Multiplexing, WDM*

SUMÁRIO

1. Introdução	11
1.1. Motivação e Contextualização	11
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Estrutura da Dissertação	13
2. Revisão Bibliográfica.....	14
2.1. Introdução	14
2.2. Fundamentos da Óptica Física e das Comunicações Ópticas.....	14
2.2.1. Espectro de Transmissão	14
2.3. Principais Características e Tipos de POFs	17
2.3.1. POFs de PMMA	20
2.3.2. POFs de Policarbonato.....	22
2.3.3. POFs de Polímeros Deuterados	24
2.3.4. POFs de Polímeros Fluoretados	25
2.4. Padrões para POFs.....	26
2.5. Atenuação.....	28
2.6. Fenômenos Ópticos Importantes para as POFs	32
2.7. Transistores, transistores Darlington e Fototransistores.....	36
2.7.1. Configurações do Transistor Bipolar.....	39
2.7.2. Transistor Darlington	40
2.7.3. Fototransistor	41
2.8. Medidores e monitores de potência óptica	42
3. Desenvolvimento do Primeiro protótipo do monitor de potência óptica (OPM-1) para um canal de comprimento de onda	44
3.1. Introdução	44
3.2. Procedimentos Experimentais	44
3.3. Fase 1: Definição da melhor configuração para coleta de luz	46
3.3.1. Análise dos resultados da Fase 1	52
3.4 Fase 2: testes utilizando LEDs <i>Diemount</i>	55
3.5. Testes utilizando LASERs (HeNe e de Nd:YVO ₄)	59
4. Análise do OPMo-1: influência da Distribuição de Modos Equilibrada (EMD)	61
4.1. Introdução	61
4.2. Uso do MS: Procedimento experimental – 1ª etapa	61

4.2.1. Resultados e discussões.....	62
4.3. Caracterização da potência espalhada pela lateral na POF SI de PMMA	63
4.3.1. Procedimento experimental – 2ª etapa	64
4.3.2. Resultados e discussões.....	65
4.4. Conclusões.....	66
5. Segundo protótipo do Monitor de Potência Óptica (OPMo-2): redução do volume, aumento da sensibilidade e extensão da faixa dinâmica.....	68
5.1. Introdução	68
5.2. Procedimentos experimentais	68
5.2.1. Um protótipo compacto utilizando dois fotodetectores distintos.....	68
5.3. Resultados e discussões	71
5.3.1. O aumento da sensibilidade	71
5.3.2. O aumento da faixa dinâmica	73
5.4. Resultados	74
5.5. Conclusão	76
6. Desenvolvimento do terceiro protótipo do monitor de potência óptica (OPMo-3) para 2 canais WDM.....	78
6.1. Introdução	78
6.2. Procedimentos experimentais	78
6.3. Resultados e discussões	80
6.3.1. Conclusão.....	83
7. Conclusão e Considerações finais	84
8. Referências Bibliográficas.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro utilizado nas comunicações ópticas [9-modificada].	15
Figura 2: Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA [9-traduzida].	16
Figura 3: POF nua (<i>bare fiber</i>) acesa.	18
Figura 4: POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo, revestida.	19
Figura 5: Evolução da atenuação nas POFs [9-traduzida].	20
Figura 6: Estrutura molecular do PMMA [9].	20
Figura 7: Comparação entre o diâmetro do núcleo e o cone de aceitação de fibras de sílica e poliméricas [9-traduzida].	22
Figura 8: Comparação entre a atenuação da POF de PMMA e PC-POF [9-traduzida].	23
Figura 9: Curvas características de atenuação de diversas PC-POFs [9-traduzida].	23
Figura 10: Curvas características de atenuação de diversas POFs deuteradas [9-traduzida].	25
Figura 11: Estrutura molecular do CYTOP® [9-traduzida].	26
Figura 12: Comparação entre atenuação da fibra de sílica e da PF-POF [9-traduzida].	26
Figura 13: (a) Macrocurvatura com tensionamento da fibra óptica, (b) macrocurvatura em 90° e (c) microcurvatura provocada por pressão [9].	30
Figura 14: Sensibilidade à curvatura para uma curva de 360° [9-traduzida].	30
Figura 15: Influência da curvatura na largura de banda e na atenuação [9-traduzida].	31
Figura 16: Tipos de dispersão presentes nas fibras ópticas [9-traduzida].	33
Figura 17: Efeito da dispersão no sinal de saída [9-traduzida].	34
Figura 18: Efeito da dispersão material [9-traduzida].	36
Figura 19: Modelo esquemático de um transistor bipolar n-p-n e outro p-n-p, formado por duas junções n-p ou p-n que partilham a região do tipo p ou n.	38
Figura 20: Configurações do transistor bipolar.	39
Figura 21: Configuração do circuito interno do <i>fotodarlington</i> e sua representação [22-modificado]	41
Figura 22: Representação do fototransistor [24, 25].	42
Figura 23: Caixa de espuma preta utilizada na montagem do OPMo-1.	45
Figura 24: Visão lateral da caixa do OPMo-1.	45
Figura 25: Modelo Esquemático do OPMo-1 com POF coletora.	47
Figura 26: Modelo Esquemático do OPMo-1 com microlente coletora exposta.	47
Figura 27: Fotografia do misturador de modos padrão japonês, modelo JIS6863, onde 3,4 m de comprimento de POF são enroladas em dois cilindros metálicos em formato de oito.	48
Figura 28: Ferramentas utilizadas para clivagem da extremidade da fibra e decapagem da POF.	49
Figura 29: Trecho de fibra exposta, sem a cobertura externa de poliestireno.	50
Figura 30: <i>Fotodarlington</i> original, modelo IF-D93 da <i>Industrial FiberOptics</i> .	45

Figura 31: Modelos esquemáticos com zoom. A diferença entre as duas configurações do OPMo-1 é destacada.....	51
Figura 32: Configuração experimental da medida do espalhamento que ocorre pela lateral da fibra utilizando uma esfera integradora.	64
Figura 33: Esfera integradora do laboratório do <i>Polymer Optical Fiber Application Center</i> (POFAC) da utilizada nesta etapa.....	64
Figura 34: Furos feitos na peça de cloreto de polivinila (PVC) contendo um orifício longitudinal, por onde passa 20cm de comprimento de POF com 2,2 mm de diâmetro. Os dois furos transversais foram feitos para inserir os PDs.	69
Figura 35: Vista lateral do OPMo-1 ($V = 847\text{cm}^3$) e do OPMo-2 ($V = 8,8\text{ cm}^3$), ressaltando o fator-de-forma 96 vezes menor para o segundo protótipo.....	69
Figura 36: Proposta do OPMo-2, que utilizaria como fotodetectores tanto o IF-D93, da <i>Industrial FiberOptics</i> , quanto o SD3410-001, da <i>Honeywell</i>	70
Figura 37: Modelo esquemático do OPMo-2. Para o PD1 foi atribuída uma impedância de carga resistiva fixa. Já para o PD2, a carga resistiva R_L conectada em série é variada por cinco vezes: partindo de 6,8 k Ω , aumentando para 110 k Ω , 220 k Ω , 680 k Ω até o valor máximo de 1,010 M Ω	70
Figura 38: Configuração experimental de calibração do OPMo-2.	71
Figura 39: OPMo-3 com dois PD idênticos, modelo SD3410-001 da <i>Honeywell</i> ., fixados nos seus dois orifícios longitudinais.....	79
Figura 40: O esboço dos dois canais WDM OPMo.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do PMMA [9-modificada].....	21
Tabela 2: Número de modos em fibras ópticas [9-modificada].....	21
Tabela 3: Influência do aumento da NA sobre alguns parâmetros da fibra óptica [9-modificada].....	22
Tabela 4: Características da PC-POF ESKA FH4001-TM da Mitsubishi.	24
Tabela 5: Harmônicos de ressonância para ligações C-X [9-traduzida].	24
Tabela 6a: Características e aplicações das fibras categoria A4 [1-traduzida].	27
Tabela 7: Atenuação de POFs de diferentes fabricantes de acordo com o diâmetro da fibra óptica [9-traduzida].....	32
Tabela 8: Polarização Emissor-Base e Base-Coletor para cada um dos modos de operação do transistor.....	39
Tabela 9: Relação da impedância de entrada/saída e ganho de tensão/corrente para cada uma das configurações do transistor bipolar.....	39
Tabela 10: Resumo dos critérios e procedimentos adotados no processamento <i>off-line</i> de dados proposto	76

LISTA DE ACRÔNIMOS

DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EMD	Equilibrium Mode Distribution
GOF	Glass Optical Fiber
GI	Graded-Index
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LD	Laser Diode
LED	Light Emitting Diode
OPM	Optical Power Meter
OPMo	Optical Power Monitor
PC	Polycarbonate
POF	Plastic Optical Fibers
PD	Photodetector
PMMA	Poly-Methyl-Methacrylate
FET	Field Effect Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
CMOS	complementary MOSFET
SI	Step-Index
SPLICCO	Spectrometer and Line Camera Control
WDM	Wavelength Division Multiplexing

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A capacidade das redes de fibra óptica de longa distância tem crescido rapidamente nos últimos anos, impulsionada principalmente pelas tecnologias *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), amplificadores ópticos e formatos de modulação digital avançados. As redes e enlaces de pequenas distâncias acabam sendo beneficiados com o uso das Fibras Ópticas Poliméricas (POFs) e de toda a tecnologia correlata. Nas últimas décadas surgiram diversas aplicações para essas redes de comunicação, como em aviões, residências, edifícios, embarcações, carros, etc [1-5]. Para os referidos enlaces e redes de curtas distâncias, ou mesmo para os de longa distância usando outros tipos de fibra óptica, torna-se frequentemente necessário monitorar o status da rede como “ativa” ou “inativa” e medir o nível de potência óptica que trafega, seja para monitoramento da rede ou para agilizar a identificação de falhas ao longo do enlace.

Para esses casos, o Monitor de Potência Óptica (OPMo) é um dispositivo ativo muito útil. Consiste em uma classe menos comum de Medidor de Potência Óptica (OPM), sendo utilizado para medir e monitorar o nível de potência óptica que trafega em um enlace à fibra. Ele pode ser inserido temporariamente ou permanentemente “em linha” num enlace a fibra óptica [6-7] e indica se um enlace está ou não ativo, além de informar o valor da potência óptica média trafegante, para um canal de comprimento de onda específico para o qual tenha sido previamente calibrado [6-7]. Não há a necessidade de interrupção dos serviços de *Datacom* ou de Telecomunicações: a interrupção se faz necessária somente no momento da instalação [7]. OPMos também são muito úteis na investigação de laboratório, ou seja, para o desenvolvimento de qualquer tipo de circuito a fibra óptica onde existam pontos que devem ser monitorados simultaneamente e confortavelmente sem a interrupção do sinal óptico. Essa monitoração permite, por exemplo, a rápida identificação de possíveis trechos onde há falhas no circuito.

A tecnologia mais utilizada para fabricar OPMos consiste em usar um acoplador (*tap*) na fibra para derivar uma amostra da potência de luz, usualmente de 1%, e então inferir sobre a potência óptica total que trafega na fibra. Esta tecnologia implica em uma perturbação e induz, conseqüentemente, uma atenuação óptica.

Como não foi encontrado nenhum OPMo não-invasivo na literatura, surgiu a ideia de um OPMo baseado no espalhamento luminoso espontâneo que ocorre pela lateral da fibra. A proposta era dar continuidade ao trabalho de conclusão de curso de minha graduação, intitulado “Estudo para o desenvolvimento de um Monitor de Potência Óptica para uso em linha em um enlace de comunicação por Fibra Óptica Plástica”, e desenvolver um OPMo aprimorado para POFs padrão de PMMA (Polimetilmetacrilato) com índice degrau, totalmente inovador, não invasivo, bidirecional, de baixo custo, preferencialmente imune à distribuição modal, que, baseado no espalhamento Rayleigh e Mie, aproveitasse para coletar a luz que emerge inevitavelmente pela lateral da fibra e mensurar a potência óptica média que trafega no referido enlace. Alguns dos aperfeiçoamentos propostos eram aumentar a faixa dinâmica e sensibilidade, se possível, torná-lo *dual-channel*, funcionando para dois canais de comprimento de onda.

1.2. OBJETIVOS

Esse trabalho está então focado no desenvolvimento de um dispositivo simples, indiferente ao sentido de propagação da luz (bidirecional) e de características originais em seu mecanismo de funcionamento. Deve ser inserido em linha (*inline*) no enlace de POF, com o objetivo de monitorar permanentemente o nível da potência óptica média propagante. Para esse protótipo (OPMo-1), assume-se inicialmente que o enlace óptico funciona com apenas um canal em comprimento de onda.

Deseja-se ainda o desenvolvimento do segundo protótipo (OPMo-2), aperfeiçoamento do protótipo inicial, que seja consideravelmente mais compacto, com faixa dinâmica e sensibilidade compatíveis ou melhores do que dispositivos disponíveis comercialmente. Com o intuito de garantir um equipamento mais robusto e confiável, propôs-se uma análise experimental da influência da distribuição equilibrada de modos (EMD) na medição do OPMo.

Por fim, foi sugerido o desafio de construir um terceiro protótipo, OPMo-3, com o mesmo princípio de funcionamento, mas que realizasse o monitoramento para dois canais WDM (*dual-channel*). A ideia é que se mantivesse a mesma proposta de um dispositivo original, confiável, robusto e de baixo custo.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação encontra-se estruturada em 7 capítulos, conforme descrito nos parágrafos a seguir.

O conhecimento teórico necessário para um melhor entendimento desta dissertação encontra-se no Capítulo 2. Nele são apresentadas as principais características, os tipos e padrões para POFs. O conceito e funcionamento de transistores, fototransistores, *fotodarlingtons*, Medidores de Potência Óptica (OPM) e Monitores de Potência Óptica (OPMo) também são apresentados neste capítulo nas seções 2.7 a 2.8. Além disso, na seção 2.8, é apresentado o único modelo de OPMo disponível para POFs.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do OPMo-1. Neste capítulo descreve-se a proposta do OPMo e os experimentos realizados utilizando-se o *fotodarlingtons* IF-D93, da empresa *Industrial Fiber Optics*, apresentando os resultados e as discussões.

O Capítulo 4 apresenta uma análise do funcionamento do OPMo-1. Foi realizada uma análise experimental para saber qual a influência da distribuição equilibrada de modos (EMD) no OPMo-1, em parceria com o *Polymer Optical Fiber Application Center* (da *Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm* - Alemanha). Os experimentos realizados nesta investigação são descritos e os resultados e as discussões apresentados.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento do OPMo-2, aproximadamente 96 vezes mais compacto do que o OPMo-1. Descreve o mecanismo de funcionamento, discutindo o considerável aprimoramento na sensibilidade deste dispositivo ao variar a impedância de carga associada ao fotodetector. A montagem experimental, medidas e o processamento de dados externo *off-line* utilizando diferentes *fotodarlingtons*, tendo como propósito o aumento da faixa dinâmica, também são apresentados.

O Capítulo 6 apresenta o terceiro e último protótipo desenvolvido: o OPMo-3. São descritos os testes com diferentes filtros plásticos e LEDs e como esse novo protótipo é capaz de funcionar com 2 canais WDM.

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e considerações finais desta Dissertação, incluindo melhorias e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

As fibras ópticas são meios físicos capazes de transportar dados a elevadas taxas de transmissão e com taxas de erro muito baixas. São classificadas segundo parâmetros específicos, originando diversos tipos de fibras ópticas, e cada uma delas possui características distintas, devendo ser empregadas adequadamente de acordo com os sistemas ao qual se destinam. Independentemente do tipo de fibra óptica utilizado, devido a suas características peculiares, o meio óptico torna a comunicação de dados mais eficiente e melhora a qualidade da transmissão.

Um dos parâmetros de classificação das fibras ópticas diz respeito ao material constituinte deste meio. Dessa forma, surge a classificação básica que define as fibras ópticas de sílica e as poliméricas. Neste trabalho será tratado apenas o segundo grupo, comumente empregado em redes de curta distância.

Antes de discutir sobre as POFs propriamente ditas, é necessário construir uma base de conhecimento essencial para compreender o funcionamento das fibras ópticas em geral. Por este motivo, este capítulo inicia-se tratando de conceitos básicos referentes à óptica, apresentando em seguida as principais características, os tipos e os padrões para POFs.

Reitera-se que este capítulo pode ser ignorado por aqueles que possuem maior conhecimento em relação a fibras ópticas.

2.2. FUNDAMENTOS DA ÓPTICA FÍSICA E DAS COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

2.2.1. Espectro de Transmissão

Nas telecomunicações em geral são utilizadas diversas faixas de frequências do espectro eletromagnético. Em comunicações ópticas são utilizadas as faixas do ultravioleta, luz visível e infravermelho, conforme ilustra a Figura 1, sendo comum referenciá-las em termos de comprimento de onda. A Figura 2 apresenta também a curva característica, qualitativa, de atenuação de uma Fibra Óptica Polimérica de Índice Degrau (SI-POF) de Polimetilmetacrilato (PMMA).

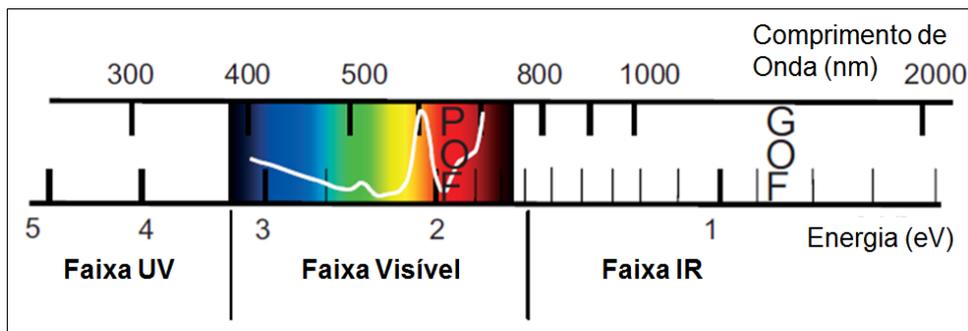


Figura 1: Espectro utilizado nas comunicações ópticas [9-modificada].

Apesar de a maioria das POFs utilizar a faixa do espectro visível, alguns tipos foram fabricados para melhorar a atenuação da fibra óptica e, com as modificações realizadas, passaram a operar na região do infravermelho, assim como as fibras de sílica.

Cada tipo de POF apresenta uma curva de atenuação característica específica. A Figura 2 ilustra a curva característica, quantitativa, das POFs de PMMA, material de fabricação mais comum. Estão indicadas, também, suas janelas de transmissão, que são faixas nas quais o sinal óptico apresenta menor atenuação. É interessante utilizar fontes ópticas cujos comprimentos de onda estejam centrados nestas janelas de transmissão, para que o efeito da atenuação seja reduzido.

A janela centrada em 570 nm seria a melhor opção para POFs de PMMA, uma vez que apresenta a menor atenuação. Entretanto, as fontes luminosas atuais que emitem neste comprimento de onda ainda não estão suficientemente desenvolvidas para aplicação em sistemas ópticos de alta capacidade para transmissão de dados: ou possuem potência muito baixa, ou são lentas ou apresentam as duas características [10].

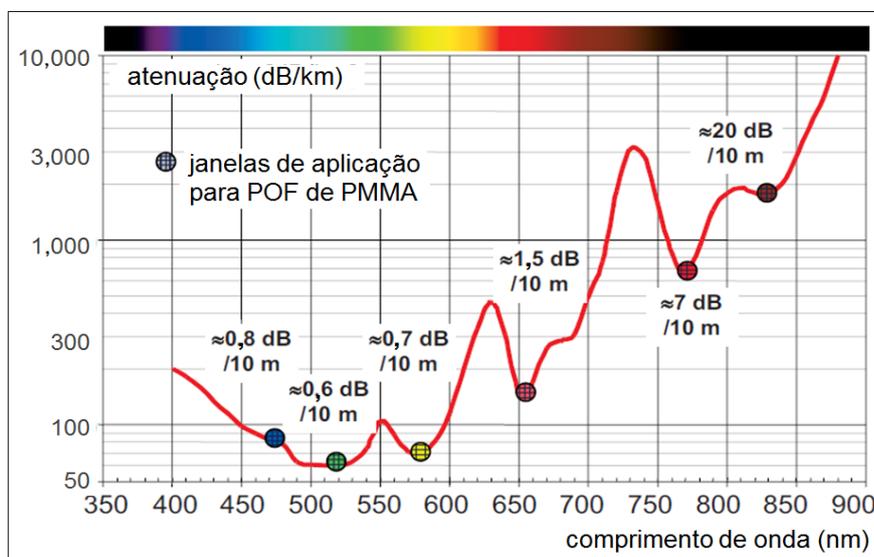


Figura 2: Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA [9-traduzida].

2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE POFS

Muitas características são comuns a todos os tipos de fibras ópticas, embora algumas obtenham melhor desempenho do que outras em relação a determinadas propriedades. Estes atributos são extremamente dependentes do tipo de material utilizado para fabricação e das características estruturais da fibra óptica.

Como características gerais, as fibras ópticas apresentam grande largura de banda: sistemas ópticos comerciais atuais chegam a poucos Tbps, com recorde experimental de 255 Tbps [43]. Além disso, são leves e possuem pequeno diâmetro (que é variável, da ordem unidades de micrômetros até alguns milímetros, dependendo da aplicação), o que facilita seu armazenamento, transporte e instalação. Sua elevada largura de banda permite expandir o sistema sem que exista necessidade de realizar um novo cabeamento, desde que a fibra óptica não esteja operando em sua capacidade máxima. Assim, torna-se possível aumentar a quantidade de informação transmitida apenas com a atualização dos equipamentos envolvidos [9]. Além disso, as fibras ópticas são imunes a interferências eletromagnéticas, uma vez que são fabricadas a partir de material dielétrico, e não interferem no sinal de outras fibras ópticas nem cabos metálicos adjacentes. São mais seguras do que os cabos metálicos em relação a acidentes envolvendo energia elétrica, uma vez que não há fluxo de elétrons no interior delas, de forma que não são capazes de provocar faíscas nem choques elétricos. Em relação à transmissão de dados, além da alta capacidade de transmissão, as fibras ópticas são meios físicos praticamente invioláveis, uma vez que não irradiam informação para o meio externo e uma interferência física no enlace com a finalidade de identificar os dados trafegados, implicaria em um não fornecimento temporário ao cliente ou em redução perceptível da potência óptica recebida [10]. Deve-se enfatizar que para comunicação de dados a potência transmitida pela fibra óptica deve ser baixa, para evitar a influência de efeitos não lineares que podem degradar o sinal. Em fibras monomodo, o recomendado é que a potência seja inferior a 570 mW, especialmente em sistemas que utilizam alta modulação, para que se evite principalmente o espalhamento Raman estimulado. [44]

As POFs, especificamente, são caracterizadas pela facilidade de conexão, que advém de sua elevada NA e grande diâmetro, permitindo utilizar tecnologias de conexão baratas e simples [10]. Sua instalação pode ser feita por qualquer pessoa não especializada, desde que sejam fornecidos os equipamentos necessários para realizar esta tarefa. O baixo custo e a simplicidade destes equipamentos, por exemplo, de clivagem ou decapagem da POF, reduz o

custo de implementação do sistema. As dimensões um pouco maiores das POFs também facilitam seu manuseio e fornecem maior resistência mecânica, além de reduzir a sensibilidade a curvaturas, quando comparadas com as fibras de sílica [10].

As POFs operam no espectro visível, trazendo maior segurança para o operador, pois a luz visível é menos danosa à visão do que a luz infravermelha quando direcionada para os olhos. Para o usuário comum, o uso da luz visível também facilita verificar se o sinal está sendo transmitido ou não, uma vez que é possível a identificação visual (fibra acesa ou apagada). A Figura 3 e a

Figura 4 ilustram uma POF SI de PMMA, que possui 1 mm de núcleo e diâmetro total igual a 2,2 mm. Na primeira a POF encontra-se descascada (sem o revestimento externo) e, na segunda, é exibida sua extremidade, sendo possível diferenciar bem o núcleo e o revestimento.

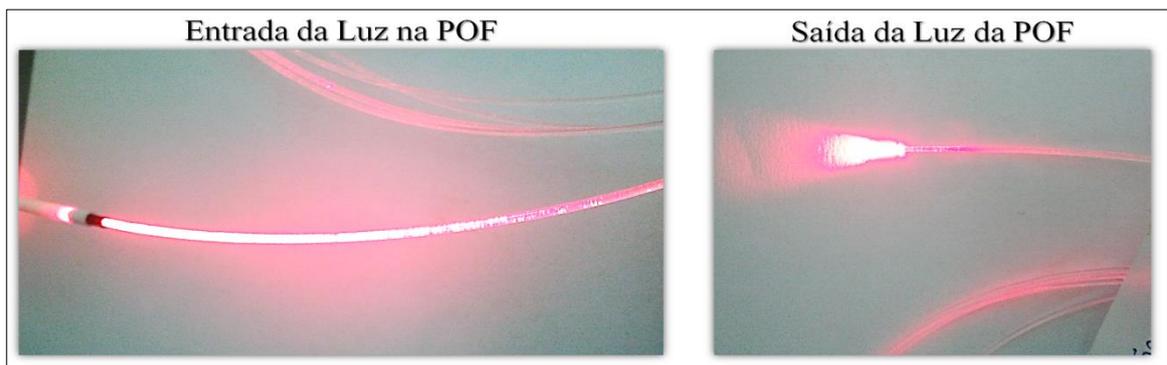


Figura 3: POF nua (*bare fiber*) acesa.

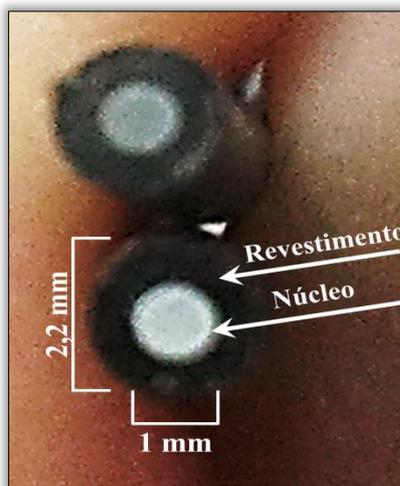


Figura 4: POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo, revestida.

As POFs, em geral, apresentam elevada atenuação quando comparadas com as fibras de sílica existentes, devendo ser utilizadas, portanto, em aplicações que exijam elevada capacidade de transmissão em pequenas distâncias e a baixo custo. Com o avanço das tecnologias de fabricação essa atenuação diminuiu e novos tipos de POFs surgiram, permitindo uma possível expansão da aplicabilidade destas fibras ópticas. Esta evolução está ilustrada na Figura 5.

As POFs de polímeros fluoretados, ou perfluoropolímeros (*PerFluorinated polymers*, PF), especificamente as de índice gradual (GI-PF-POFs) fabricadas a partir do CYTOP® (*CYclic Transparent Optical Polymer*), são as que apresentam os menores valores de atenuação, devido à substituição das ligações C-H, altamente absorptivas, por ligações C-F, que reduzem drasticamente a atenuação por absorção, mas deslocam o comprimento de operação para a região do infravermelho.

As POFs podem ser classificadas quanto:

- Ao **número de modos**: multimodo é mais comum;
- Ao **perfil de índice de refração**: os principais são GI, SI, SI com NA reduzida (*low-NA*), degrau duplo (*Double SI*, DSI), múltiplos núcleos SI (*Multi-Core SI*, MC-SI), MC-DSI, múltiplos degraus (*Multi-StepIndex*, MSI) e semi-GI, sendo os perfis GI e SI os mais simples e mais comuns;
- Ao **polímero** utilizado: os principais são PMMA, policarbonato (*PolyCarbonate*, PC), elastômero, poliolefinas, poliestireno, polímeros deuterados e polímeros fluoretados (PF).

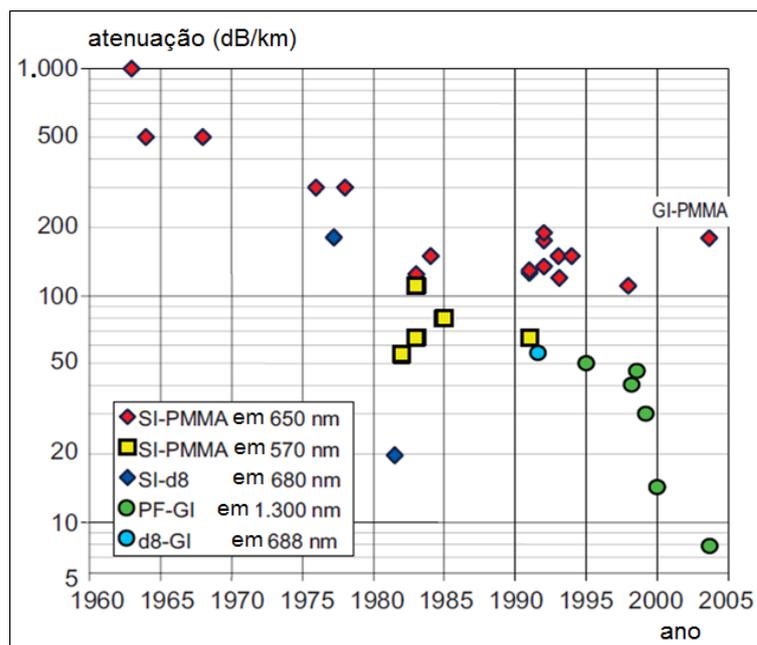


Figura 5: Evolução da atenuação nas POFs [9-traduzida].

Nesta seção serão apresentados alguns tipos de POFs com relação ao polímero utilizado.

2.3.1. POFs de PMMA

O PMMA termoplástico, Plexiglas[®], é o material mais utilizado para fabricação de POFs [9]. Sua estrutura molecular pode ser observada na Figura 6 e suas principais propriedades estão sumarizadas na Tabela.

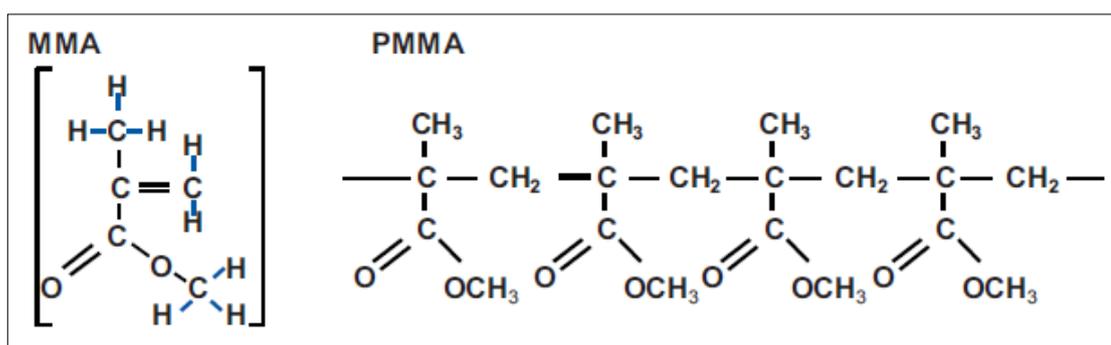


Figura 6: Estrutura molecular do PMMA [9].

Parâmetro	Unidade	Valor
Índice de refração	–	1,492
Temperatura de transição vítrea T _g	°C	115
Densidade	g/cm ³	1,18
Absorção de água até saturação	%	0,5

Condutividade térmica	W/m.K	0,17
Coefficiente de expansão térmica	Mm/m.K	0,07
Resistividade	Ohm.cm	10^{15}
Tensão de ruptura	kV/mm	20-25
Temperatura de combustão espontânea	°C	~ 430

Tabela 1: Propriedades do PMMA [9-modificada].

Cada monômero do PMMA (MMA – Figura 6) possui oito ligações C-H, cujos harmônicos de ressonância, responsáveis pela absorção intrínseca, constituem a principal causa da elevada atenuação do material. A Figura 2 ilustra a curva característica de atenuação para uma POF padrão de PMMA. As POFs fabricadas a partir deste material não suportam condições ambientais extremas, como elevadas temperaturas, de forma que são comumente utilizadas em redes de curta distância que não exigem características especiais, como as redes residenciais ou as de armazenamento (*Storage Area Networks, SANs*).

O PMMA é bastante utilizado na fabricação de POFs SI padrão, com $980 \mu\text{m}$ de núcleo, porém, recentemente POFs GI, que costumavam apresentar menor núcleo, foram fabricadas a partir do PMMA pela *Optimedia*, mantendo o núcleo de $980 \mu\text{m}$, e passaram a ser comercializadas sob o nome OM-GIGA-POF.

Apenas a título de ilustração, a Tabela 2 mostra o número de modos calculados para alguns tipos de fibras ópticas, incluindo fibras de sílica, e a Tabela 3 indica a influência do aumento da NA sobre alguns parâmetros da fibra óptica. A Figura 7 compara o diâmetro do núcleo e os cones de aceitação de diferentes tipos de fibras ópticas.

Tipo de Fibra	Perfil de Índice de Refração	NA	Raio do Núcleo, a (μm)	Comprimento de Onda da Luz, λ (nm)	V	Número de Modos
POF Padrão	SI	0,50	490	650	2.368	2.804.369
POF Optimedia	GI	0,37	450	650	1.609	647.592
Lucina GI-POF	GI	0,22	60	1.200	69	1.194
GI-GOF (Europa)	GI	0.17	25	850	31	247

Tabela 2: Número de modos em fibras ópticas [9-modificada].

Parâmetro	Comportamento com o Aumento da NA
Sensibilidade a curvaturas	Diminui

Potência acoplada à fibra	Aumenta
Atenuação devido ao desalinhamento da conexão	Diminui
Atenuação devido ao espaço entre fibras conectadas	Aumenta
Largura de banda	Diminui
Número de modos propagantes	Aumenta
Dispersão modal	Aumenta

Tabela 3: Influência do aumento da NA sobre alguns parâmetros da fibra óptica [9-modificada].

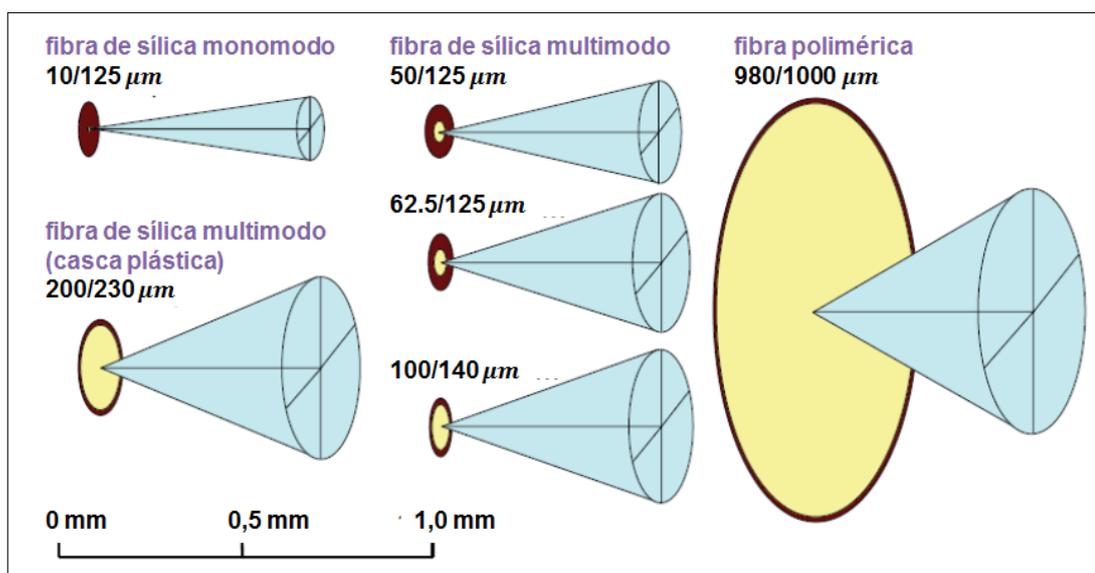


Figura 7: Comparação entre o diâmetro do núcleo e o cone de aceitação de fibras de sílica e poliméricas [9-traduzida].

2.3.2. POFs de Policarbonato

Aplicações em que existem condições mais adversas exigem o emprego de outros tipos de POFs. Por exemplo, em ambientes com elevadas temperaturas, como redes em automóveis, nas quais trechos das fibras ópticas passam próximo ao compartimento do motor, onde as temperaturas podem chegar a 125°C, ou em redes industriais nas quais as fibras ópticas são instaladas próximas a equipamentos que emitem muito calor, utilizam-se POFs de policarbonato (PC-POFs). Estas POFs apresentam uma temperatura de transição vítrea maior do que as de PMMA e são suficientemente transparentes para a aplicação à qual se destinam [9]. A Figura 8 compara a curva característica de atenuação da POF de PMMA com a PC-POF. A grande desvantagem é que elas se deterioram rapidamente quando em contato com umidade [9].

A possibilidade de operação em temperaturas mais elevadas é obtida em troca de uma maior atenuação total da fibra óptica, conforme observado nas Figura 8 e Figura 9. A Tabela 4 ilustra algumas propriedades da PC-POF ESKA FH4001-TM da Mitsubishi.

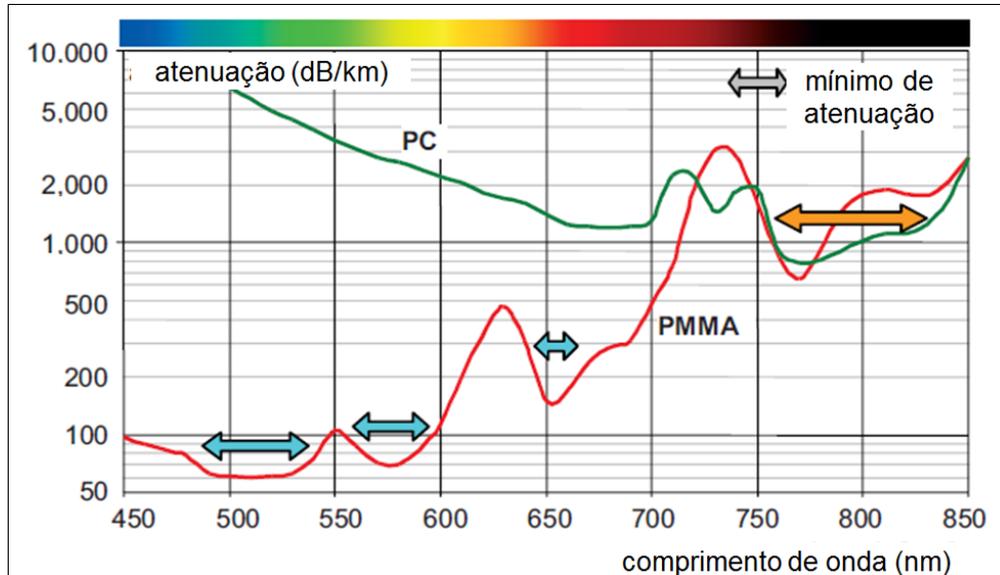


Figura 8: Comparação entre a atenuação da POF de PMMA e PC-POF [9-traduzida].

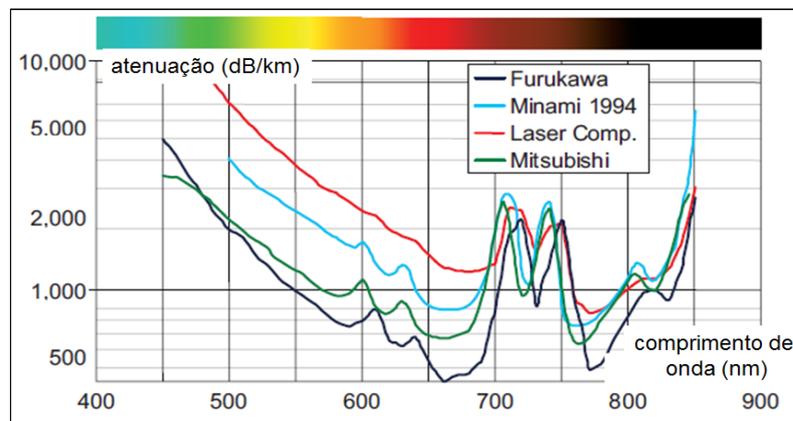


Figura 9: Curvas características de atenuação de diversas PC-POFs [9-traduzida].

Parâmetro [9]	Unidade [9]	Valor [9]
Faixa de temperatura de operação	°C	-55 a 125
Temperatura de operação com elevada umidade	°C	85
Atenuação máxima em 770 nm	dB/km	800
Raio mínimo de curvatura	Mm	25
Material da casca/núcleo	–	fluoropolímero/ policarbonato
Índice de refração casca/núcleo	–	1,392/1,582
Abertura numérica	–	0,75

Tabela 4: Características da PC-POF ESKA FH4001-TM da Mitsubishi.

2.3.3. POFs de Polímeros Deuterados

Os compostos orgânicos apresentam grande número de ligações C-H. Os átomos de hidrogênio dessas ligações podem ser substituídos por átomos mais pesados, contribuindo muito para a redução da absorção intrínseca em determinados comprimentos de onda, uma vez que ocorre um deslocamento dos harmônicos de ressonância [9], conforme ilustra Tabela 5.

Harmônico	C-H λ (nm)	C-D λ (nm)	C-F λ (nm)	C-Cl λ (nm)	C=O λ (nm)	O-H λ (nm)
ν_0	3.390	4.484	8.000	12.987	5.417	2.818
ν_1	1.729	2.276	4.016	6.533	2.727	1.438
ν_2	1.176	1.541	2.688	4.318	1.830	979
ν_3	901	1.174	2.024	3.306	1.382	750
ν_4	736	954	1.626	2.661	1.113	613
ν_5	627	808	1.361	2.231	934	523
ν_6	549	704	1.171	1.924	806	–
ν_7	–	626	1.029	1.694	710	–
ν_8	–	566	919	1.515	635	–
ν_9	–	–	830	1.372	–	–

Tabela 5: Harmônicos de ressonância para ligações C-X [9-traduzida].

Uma das substituições possíveis é trocar o hidrogênio comum pelo hidrogênio “pesado”, conhecido como deutério, formando ligações C-D. Algumas curvas de atenuação para fibras GI deuteradas estão ilustradas na Figura 10. Observa-se que a atenuação mínima obtida para este tipo de fibra óptica, aproximadamente 20 dB/km em 680 nm, é bem menor do que a atenuação mínima da POF padrão (POF SI de PMMA), aproximadamente 60 dB/km em 520 nm (Figura 2).

A grande desvantagem das POFs deuteradas é a intensa absorção de água na presença desta substância, elevando novamente a atenuação por absorção intrínseca, devido à intensa absorção dos harmônicos do íon OH^- . Além disso, o deutério utilizado para construir as novas ligações apresenta um preço proibitivo para aplicações que utilizam POFs e visam o baixo custo do sistema [13].

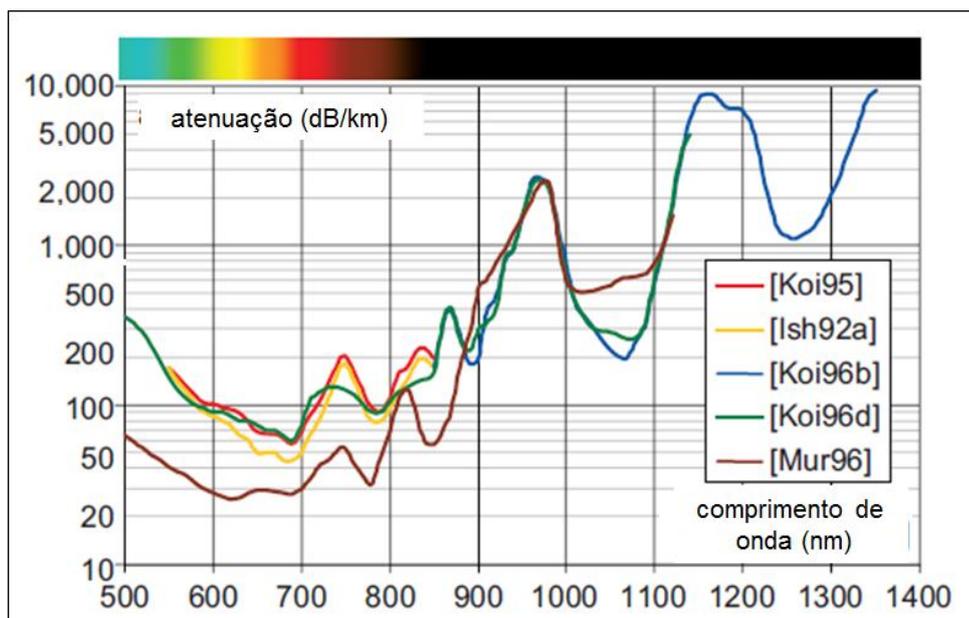


Figura 10: Curvas características de atenuação de diversas POFs deuteradas [9-traduzida].

2.3.4. POFs de Polímeros Fluoretados

Outra substituição possível para as ligações C-H são as ligações C-F, que deslocam ainda mais os harmônicos quando comparadas com as ligações C-D (Tabela 5). Essa substituição reduz a atenuação da POF de forma significativa, sendo o limite teórico menor do que 0,2 dB/km, comparável às fibras de sílica. Contudo este limite teórico é extremamente difícil de ser alcançado [9].

Até 2008 a menor atenuação produzida, 8 dB/km em 1070 nm, foi alcançada utilizando poli-perfluoro-butenil-vinil-éter, conhecido comercialmente como CYTOP[®], fabricado pela *Asahi Glass* e cuja estrutura molecular pode ser observada na Figura 11., em que todos os hidrogênios do polímero foram substituídos por flúor [9]. Com uma redução tão acentuada da atenuação, as POFs, especificamente as PF-POFs, podem finalmente ser empregadas em substituição a fibras de sílica multimodo em redes de acesso [9].

A curva de atenuação característica das POFs fabricadas com CYTOP[®] está ilustrada na Figura 12, em comparação com a atenuação da fibra de sílica.

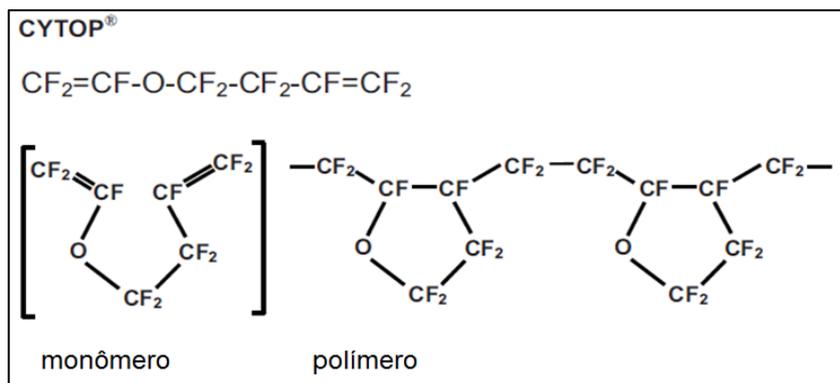


Figura 11: Estrutura molecular do CYTOP® [9-traduzida].

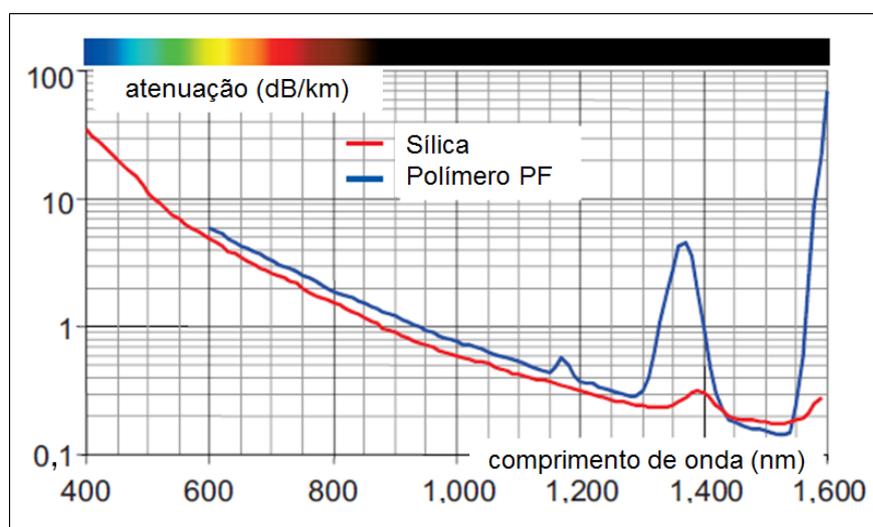


Figura 12: Comparação entre atenuação da fibra de sílica e da PF-POF [9-traduzida].

2.4. PADRÕES PARA POFs

O termo “POF padrão” se refere a um conjunto de características acordado entre fabricantes de POFs e de componentes ópticos para estabelecer interoperabilidade entre equipamentos utilizados na implementação de um sistema.

Nas comunicações de dados, as áreas de maior aplicação para POFs e padronizações utilizadas são [9]:

- Redes em edifícios: ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) Forum, IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 1394 e Ethernet;
- Redes internas, por exemplo, em residências: IEEE 1394 e Ethernet;
- Redes em automóveis: D2B (*Domestic Digital Bus*), MOST (*Media Oriented Systems Transport*), *Byteflight* e *Flexray*;

- Redes para realização de medições: JIS (*Japanese Industrial Standard*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) e VDE/VDI (*Verband der Elektrotechnik Elektronik Informations technik e. V./Verein Deutscher Ingenieure e. V.*);
- Redes para automação de máquinas: SERCOS (*Serial Realtime Communication System*), *Interbus*, *Profibus* e Ethernet.

Cada padrão definido para as diversas POFs existentes foi elaborado de acordo com a aplicação a qual se destina, de forma a obter o melhor desempenho possível. O padrão IEC 60793-2 descreve fibras ópticas em geral, sendo as POFs padronizadas na parte 2-40 (Fibras Multimodo Categoria A4) [9], e sua edição mais atual para POFs data de 2009 (Ed. 3.0).

Parâmetro	A4a	A4b	A4c	A4d
ϕ do Núcleo (μm)	Nota 1	Nota 1	Nota 1	Nota 1
ϕ da Casca (μm)	1000	750	500	1000
NA	0,50 ^t	0,50 ^t	0,50 ^t	0,30 ^t
λ de Operação(nm)	650 / Nota 2	650	650	650
Aplicações	Interfaces de áudio digital, automóveis, industrial, sensoriamento e transmissão de dados	Industrial e sensoriamento	Sensoriamento	Interfaces audiovisuais digitais e transmissão de dados
NOTA 1: Tipicamente 15 μm a 35 μm menor do que o diâmetro da casca.				
NOTA 2: Outros comprimentos de onda potenciais para fibras A4a estão descritos no Anexo J.				
^t Teórico.				
^e Efetivamente medido.				

Tabela 6a: Características e aplicações das fibras categoria A4 [1-traduzida].

Parâmetro	A4e	A4f	A4g	A4h
ϕ do Núcleo (μm)	≥ 500	200	120	62.5
ϕ da Casca (μm)	750	490	490	245
NA	0,25 ^t	0,190 ^e	0,190 ^e	0,190 ^e
λ de Operação (nm)	650	650, 850, 1300	650, 850, 1300	850, 1300
Aplicações	Interfaces audiovisuais digitais e transmissão de dados	Industrial e móvel; compatível com equipamentos de transmissão A3	Transmissão de dados	Transmissão de dados; primariamente utilizada em estruturas “ribbon”
NOTA 1: Tipicamente 15 μm a 35 μm menor do que o diâmetro da casca.				
NOTA 2: Outros comprimentos de onda potenciais para fibras A4a estão descritos no Anexo J.				
^t Teórico.				
^e Efetivamente medido.				

Tabela 6b: (Cont. Tabela 6a) Características e aplicações das fibras categoria A4[1-traduzida].

As Tabela 6-a e Tabela 6-b mostram algumas características das POFs padronizadas no IEC 60793-2-40 Ed.3.0 [1]. As classes A4a, A4b e A4c referem-se às POFs SI de PMMA, a

classe A4d descreve POFs DSI de PMMA, a classe A4e refere-se às POFs MSI e GI, e as classes A4f, A4g e A4h tratam das GI-PF-POFs [9].

2.5. ATENUAÇÃO

A atenuação é a perda gradual de energia que um sinal sofre ao trafegar por um meio e constitui um fator limitante para todos os sistemas de telecomunicações. A fibra óptica possui uma atenuação característica muito baixa e seu valor depende do tipo de material do qual a fibra é constituída. A potência óptica de saída do sistema pode ser calculada segundo a Equação (1) [9] e a atenuação, em dB por unidade de comprimento, segundo a Equação (2) [9].

$$P_L = P_0 e^{-\alpha' L} \quad (1)$$

$$a_{dB} = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_L}{P_0} \right) \quad (2)$$

P_L : potência óptica de saída

P_0 : potência óptica de entrada;

α' : coeficiente de atenuação(linear);

L : comprimento da fibra óptica;

a_{dB} : atenuação em dB por unidade de comprimento

Alguns mecanismos responsáveis pela atenuação nas fibras ópticas são as absorções intrínseca e extrínseca, os espalhamentos (Rayleigh e Mie, principalmente), a radiação e as dispersões [12]. A atenuação mínima possível é a soma das perdas provocadas pela absorção intrínseca e pelo espalhamento Rayleigh, que não podem ser eliminados [13].

A **absorção intrínseca** é um fenômeno que se relaciona com o estado mais puro do material e transforma energia luminosa em energia térmica e/ou luminescência [10]. Ocorre devido à ressonância molecular e constitui a fonte mais importante de perdas intrínsecas nas POFs (ligações C-H). A absorção intrínseca também ocorre quando a luz é absorvida para completar estados de transição eletrônica [14].

A **absorção extrínseca** se deve à presença de impurezas no material, incorporados na fibra óptica durante o processo de fabricação, e pode ser minimizada através de um controle rigoroso deste processo.

No **espalhamento** ocorre transferência de potência de um dos modos guiados para si mesmo ou para outros modos, isto é, a energia luminosa passa a se propagar em outra direção

[10]. Os tipos de espalhamento mais relevantes para esse trabalho são o espalhamento **Rayleigh** e o espalhamento **Mie**.

Variações na densidade do material e flutuações na sua composição ocorridas durante a manufatura da fibra criam heterogeneidades aleatórias que dão origem a variações do índice de refração. Este fenômeno isotrópico é chamado de Espalhamento **Rayleigh**, quando o tamanho da imperfeição é inferior a 10% do comprimento de onda da fibra. O mecanismo não causa eliminação ou conversão da energia óptica, apenas força uma parte da onda a escapar do guia de onda. A intensidade do espalhamento é proporcional a $1/\lambda^4$, de forma que, quanto menor o comprimento de onda, maior é o espalhamento **Rayleigh**. É possível minimizá-lo, mas, assim como a absorção intrínseca, não pode ser eliminado.

O Espalhamento **Mie** é verificado quando as imperfeições e irregularidades da fibra que causam o espalhamento têm dimensões comparáveis ou maiores que o comprimento de onda da luz guiada (aproximadamente 10% do comprimento de onda do feixe óptico). As irregularidades, neste caso, podem ser bolhas, minúsculos defeitos na interface do núcleo com a casca, variações no diâmetro da fibra ou sinuosidades no eixo, conhecidas como microcurvaturas. Esse tipo de espalhamento não possui dependência de λ [19].

As **perdas por radiação** ocorrem principalmente devido à presença de curvaturas ao longo da fibra óptica, uma vez que, na curva, os raios podem incidir com um ângulo menor do que o crítico, não sendo capazes de sofrer reflexão total. Estas curvaturas podem ser macrocurvaturas, quando é necessário curvar a fibra óptica ao longo do enlace para, por exemplo, contornar uma quina (Figura 13(a) e Figura 13(b)), ou podem ser microcurvaturas, provocadas, por exemplo, por presilhas utilizadas em alguns pontos para fixar a fibra em uma superfície (Figura 13c). Em geral, as aplicações que utilizam POFs são de curta distância, muitas vezes em ambientes internos, de forma que é bastante provável que seja necessário curvar a fibra diversas vezes ao longo do caminho e fixá-las no chão, em paredes ou rodapés.

A sensibilidade a curvaturas constitui um parâmetro importante para sistemas baseados em POFs porque, além de afetar a potência óptica de saída, influencia outros parâmetros como dispersão e largura de banda. Em fibras SI, a sensibilidade a curvaturas depende bastante da abertura numérica (A_N ou NA) e do diâmetro da seção transversal, de forma que, quanto maior for a NA, menor será o raio de curvatura permitido em relação ao diâmetro [9]. Assim, para um mesmo raio de curvatura, quanto maior for a NA, menor será a

sensibilidade a curvaturas. A Figura 14 ilustra a dependência dessa sensibilidade com a NA para dois tipos de fibras comerciais.

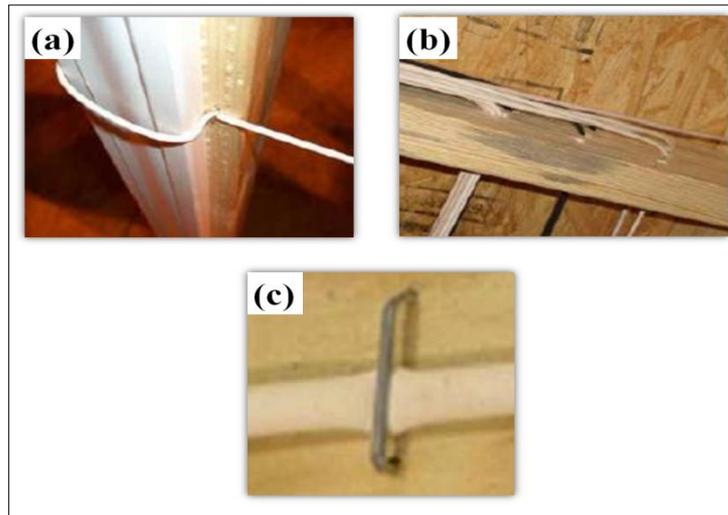


Figura 13: (a) Macrocurvatura com tensionamento da fibra óptica, (b) macrocurvatura em 90° e (c) microcurvatura provocada por pressão [9].

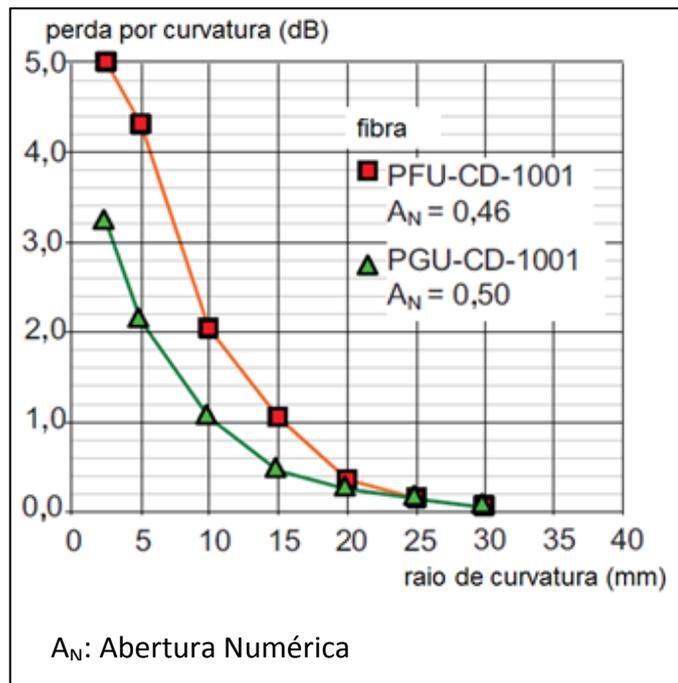


Figura 14: Sensibilidade à curvatura para uma curva de 360° [9-traduzida].

As curvaturas são capazes de aumentar a largura de banda da fibra óptica devido à filtragem modal seletiva provocada por elas, que reduz a dispersão modal. No entanto, esse aumento ocorre em troca de uma atenuação adicional. A Figura 15 ilustra a relação entre a localização da curvatura, a atenuação adicional e a alteração na largura de banda, para uma

fibra óptica de 100 m curvada em 360°, quando muitos modos e poucos modos são excitados no lançamento da luz. De forma geral, observa-se que curvaturas mais intensas acarretam em um maior aumento da largura de banda, porém também inserem uma maior atenuação adicional.

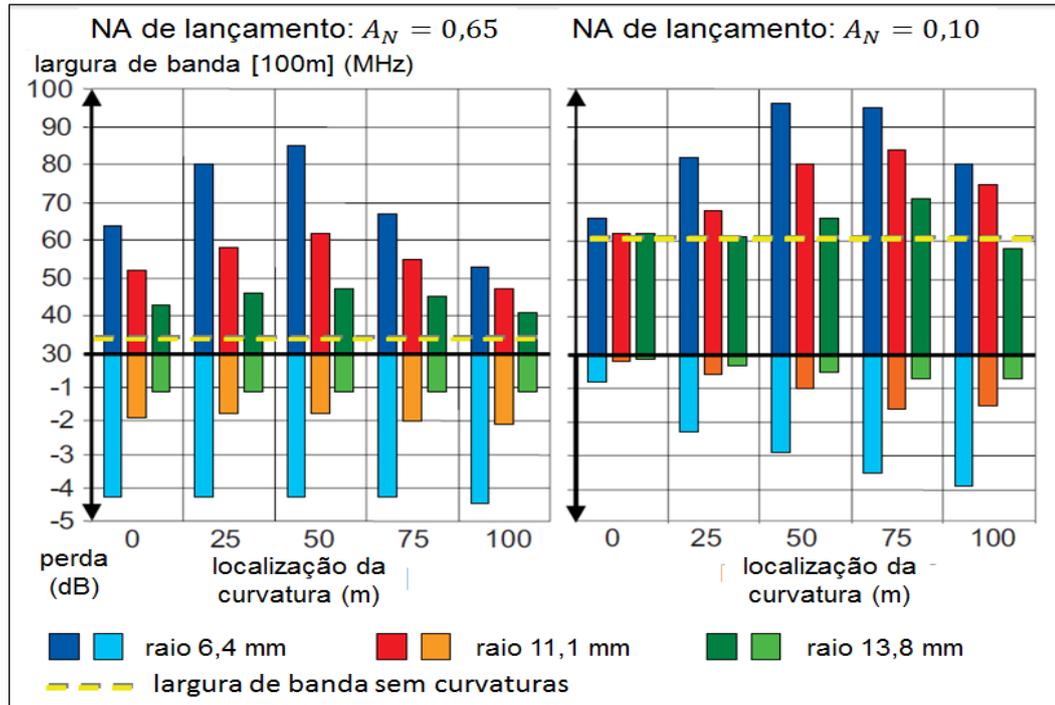


Figura 15: Influência da curvatura na largura de banda e na atenuação [9-traduzida].

O fenômeno da **dispersão** (Subseção 2.6B) provoca o alargamento do sinal no tempo, decorrente dos diferentes valores de velocidade de grupo durante a transmissão, o que limita a taxa de transmissão através da fibra óptica e aumenta a atenuação. A dispersão pode ser classificada como **modal** ou **cromática**. A primeira ocorre em fibras ópticas multimodo, devido à diferença nos tempos de chegada dos modos e é mais significativa em fibras ópticas SI [15]. A segunda ocorre devido à variação não linear do índice de refração e do parâmetro V com o comprimento de onda, de forma que cada um deles experimenta o meio de modo diferente, provocando atrasos [9].

Nas POFs existe ainda outro fenômeno que contribui para aumentar a atenuação, o **processo de deslocamento de Goos-Hänchen** [9], no qual os modos invadem a casca, que possui um coeficiente de atenuação muito elevado, penetrando a uma distância da ordem de grandeza do comprimento de onda do raio, e pode ocorrer mesmo quando há reflexão total [9].

Na prática observa-se que a atenuação da fibra óptica depende também, indiretamente, do seu diâmetro, uma vez que ao diminuir o diâmetro, ocorre um maior número de interações entre o núcleo e a casca, e é mais complexa a manutenção da qualidade do processo de fabricação. Apenas a título de ilustração, a Tabela 7 mostra diversas fibras ópticas com diferentes diâmetros e suas respectivas atenuações. As principais causas da atenuação nas POFs são o espalhamento **Rayleigh**, absorção (ligações C-H principalmente), acoplamento modal e perdas na interface núcleo-casca.

Diâmetro (μm) Fabricante	Atenuação (dB/km)			
	250	500	750	1000
Mitsubishi	< 700	< 190	< 180	< 160
Toray	< 300	< 180	< 150	< 150
AsahiChem.	-	< 180	< 180	< 125
Optectron	< 150	< 150	< 150	< 150
Nuvitech	< 350	< 250	< 250	< 250

Tabela 7: Atenuação de POFs de diferentes fabricantes de acordo com o diâmetro da fibra óptica [9-traduzida].

2.6. FENÔMENOS ÓPTICOS IMPORTANTES PARA AS POFs

A) Acoplamento Modal, Conversão de Modos e Modos de Fuga

O **acoplamento modal** é o processo pelo qual a energia é transferida de um modo para outro, o que pode ocorrer, por exemplo, quando a luz encontra um centro de espalhamento ou incide em curvaturas.

O acoplamento modal pode reduzir a dispersão na fibra óptica, aumentando sua largura de banda, devido à possibilidade de transferência da energia dos modos de ordem mais elevada para modos de ordem mais baixa, reduzindo a diferença nos tempos de chegada dos diversos modos [9]. O contrário também pode acontecer, contudo, a prática revela que em fibras ópticas nas quais o acoplamento modal é intenso, como as POFs, é estatisticamente mais comum a transferência de energia de modos lentos para modos rápidos [15].

A **conversão de modos** pode ser considerada um caso especial de acoplamento modal no qual o número de modos não pode aumentar [9]. Nas POFs a conversão de modos ocorre comumente na interface núcleo-casca e é caracterizada pela alteração do ângulo de propagação.

Os **modos de fuga** (*leaky modes*) são ondas que não conseguem alcançar as condições necessárias para serem guiadas, mas que atingem distâncias razoáveis, podendo ser detectados em até dezenas de metros de fibra óptica, provocando grande influência nas medidas realizadas, uma vez que é possível detectar estes modos no receptor se a fibra for utilizada em distâncias muito curtas [9, 16]. A maioria dos modos de fuga é eliminada após percorrer alguns centímetros de fibra óptica. De certa forma, são modos intermediários que se encontram entre os modos guiados e os modos da casca, sofrendo atenuação por radiação ao longo da fibra óptica. Estes modos de fuga podem ser expulsos da fibra óptica (*mode stripping*) utilizando-se curvaturas planejadas, que afetem muito pouco a propagação dos modos guiados [15].

B) Dispersão Modal e Cromática

O alargamento do pulso nas fibras ópticas ocorre devido ao fenômeno da dispersão. Todos os tipos/subtipos de dispersão presentes em fibras ópticas estão sumarizados na Figura 16. Esta classificação definida por [9] não será considerada em sua totalidade neste trabalho, uma vez que outros autores [15], [17], [18], classificam a dispersão dependente do perfil de índice de refração apenas no grupo de dispersão cromática. A dispersão de guia de onda e a dependente do modo de polarização não são de grande relevância para fibras multimodo como as POFs [9].

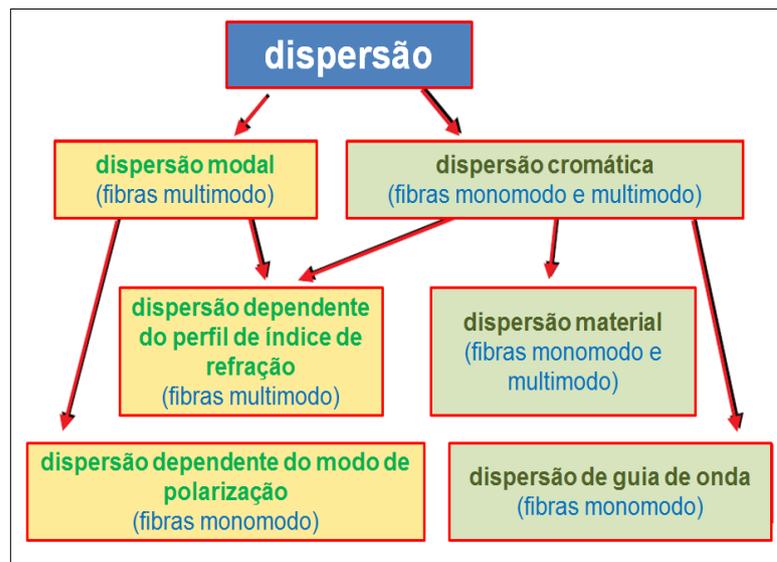


Figura 16: Tipos de dispersão presentes nas fibras ópticas [9-traduzida].

Nas fibras ópticas SI a luz propaga por diferentes modos com velocidades distintas, chegando à extremidade de saída em intervalos de tempos diferentes, o que provoca o alargamento do pulso no tempo, conforme ilustrado na Figura 17. O tempo necessário para cada modo excitado por um mesmo comprimento de onda percorrer seu caminho de propagação em fibras SI é dado pela Equação (2) [9]. A diferença de tempo entre o modo mais rápido e o mais lento (dispersão modal) nas fibras SI é definida pela Equação (3) [9]. A Equação (4) define o parâmetro Δ , que indica a diferença de índice de refração relativa entre a casca e o núcleo da fibra.

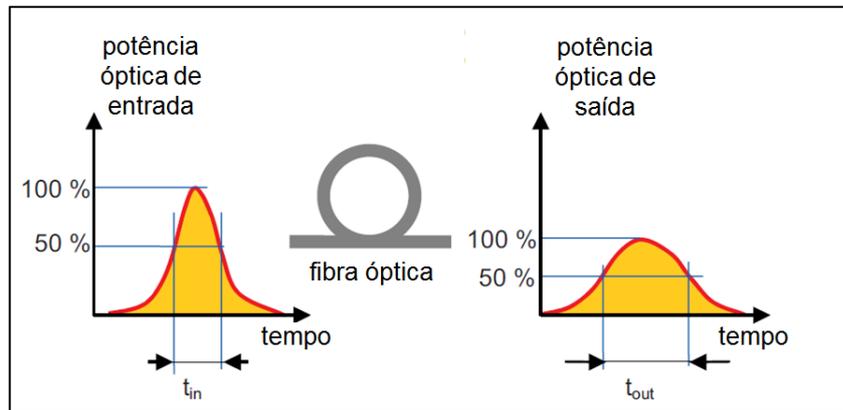


Figura 17: Efeito da dispersão no sinal de saída [9-traduzida].

$$t_n = L_n \cdot \frac{n_1}{c} \quad (2)$$

L_n : comprimento do caminho de propagação do modo 'n';

n_1 : índice de refração do núcleo;

c : velocidade da luz no vácuo.

$$\Delta t_{mod} = \frac{L_1}{2 \cdot c \cdot n_2} \cdot NA^2 \approx \frac{L_1 \cdot n_1}{c} \cdot \Delta \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (4)$$

L_1 : comprimento do caminho de propagação do modo mais rápido (comprimento da fibra óptica)

n_2 : índice de refração do casca;

Δ : diferença de índice de refração relativa.

O parâmetro de perfil das fibras GI pode ser otimizado para minimizar a dispersão modal. Teoricamente este valor deve ser igual a 2, originando um perfil de índice de refração parabólico [9].

A **dispersão dependente do perfil de índice de refração** é um fenômeno mais complexo que ocorre em fibras GI, constituindo uma dispersão modal não compensada. Por esta razão, acredita-se que [9] define esta dispersão como modal e cromática, para que seja possível considerar a dispersão modal residual das fibras ópticas GI. A referência [18] define que a dispersão de perfil ocorre porque o parâmetro de perfil de índice de refração é dependente do comprimento de onda, de forma que a otimização de um perfil para um comprimento de onda pode não ser ideal para outro comprimento de onda e, assim cada um experimentará um atraso diferente, levando ao alargamento do pulso. Como a dependência com o comprimento de onda define a dispersão cromática, a dispersão dependente do perfil de índice de refração é considerada um subtipo de dispersão cromática. Para um perfil de índice de refração parabólico, bastante comum, o alargamento temporal provocado por esta dispersão pode ser calculado segundo a Equação (5) [9].

$$\Delta t_{perfil} = \frac{L_1 \cdot n_1}{c} \cdot \frac{\Delta^2}{2} \quad (5)$$

A **dispersão de guia onda** nas POFs é causada pela presença do deslocamento de Goos-Hänchen, que é dependente do comprimento de onda do raio luminoso [9]. A luz percorre os caminhos da casca e do núcleo com diferentes velocidades, levando ao alargamento do pulso. Contudo, apenas uma pequena porção da luz em modos de ordem mais alta penetra na casca, de forma que a dispersão de guia de onda é mais importante para fibras ópticas monomodo [9].

A **dispersão material**, por sua vez, é importante tanto para fibras ópticas multimodo como para as monomodo [9]. Esta dispersão ocorre porque cada comprimento de onda propaga com uma velocidade diferente em um mesmo meio provocando alargamento do pulso, uma vez que as fontes luminosas são policromáticas. Esta dispersão é calculada segundo a Equação (6) [9] e a Figura 18 ilustra seu efeito sobre o sinal propagado.

$$\Delta t_{mat} = L \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} = L \cdot \Delta\lambda \cdot M(\lambda) \quad (6)$$

$\Delta\lambda$: largura espectral da fonte luminosa;

$n(\lambda)$: índice de refração como função do comprimento de onda;

$M(\lambda)$: parâmetro de dispersão material [ps/km·nm].

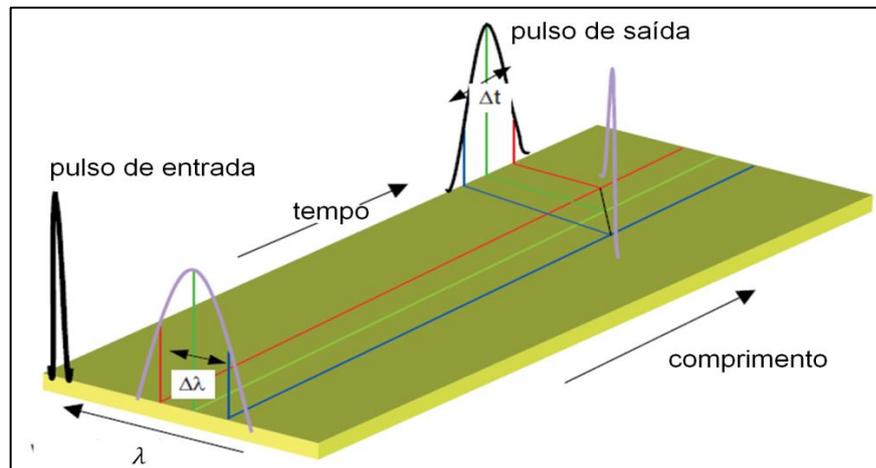


Figura 18: Efeito da dispersão material [9-traduzida].

2.7. TRANSISTORES DARLINGTON E FOTOTRANSISTORES

Os transistores são componentes eletrônicos utilizados principalmente como amplificadores e interruptores de sinais elétricos, podendo atuar como retificadores elétricos em um circuito entre outras funções variadas. O termo provém do inglês “*transfer resistor*” (resistor/resistência de transferência), como era conhecido pelos seus inventores. [20]

O primeiro projeto surgiu em dezembro de 1947 nos Laboratórios da Bell Telephone por Bardeen e Brattain [21] onde era usado um pequeno bloco de germânio e três filamentos de ouro: um filamento era o polo positivo (emissor), o outro o polo negativo (coletor), enquanto que o terceiro tinha a função de controle (base).

Tendo apenas uma carga elétrica no polo positivo, nada acontecia e o germânio atuava como um isolante, bloqueando a corrente. Porém, quando certa tensão elétrica era aplicada usando o filamento de controle, a carga elétrica passava a fluir para o polo negativo. Com isso, eles haviam criado um dispositivo que substituía a válvula, anteriormente utilizadas como dispositivos amplificadores de sinais, sem possuir partes móveis, gastando uma fração da energia e, ao mesmo tempo, muito mais rápida. Este primeiro transistor era relativamente

grande, mas não demorou muito para que este modelo inicial fosse aperfeiçoado. Durante a década de 50, o transistor foi gradualmente dominando a indústria, substituindo rapidamente as problemáticas válvulas, com modelos cada vez menores, reduzindo de preço e tornando-se mais rápidos. Alguns transistores da época podiam operar com frequência de até 100 MHz. Posteriormente houve a substituição do germânio pelo silício, que permitiu miniaturizar ainda mais os transistores e baixar seu custo de produção. Os primeiros transistores de junção comerciais foram produzidos partir de 1960 pela Crystalonics. A ideia do uso do silício para construir transistores é que, adicionando certas substâncias (impurezas) em pequenas quantidades, é possível alterar as propriedades elétricas do silício (silício dopado). As primeiras experiências usavam fósforo e boro, que transformavam o silício em condutor por cargas negativas ou condutor por cargas positivas, dependendo de qual dos dois materiais fosse usado.

Quando o transistor está desligado, não existe carga elétrica na base, por isso, não existe corrente elétrica entre o emissor e o coletor (temos então um bit 0). Quando é aplicada certa tensão na base, o circuito é fechado e é estabelecida a corrente entre o emissor e o receptor (um bit 1). Outro grande salto veio quando os fabricantes deram-se conta que era possível construir vários transistores sobre o mesmo “waffer” de silício. Havia surgido então o circuito integrado, vários transistores dentro do mesmo encapsulamento. Não demorou muito para surgirem os primeiros microchips. Os processadores contem milhões de transistores: um *Athlon Thunderbird* possui 37 milhões, um *Pentium 4* possui 42 milhões e os mais atuais *i7* possuem 731 milhões [42]. Apesar disso, tudo o que é processado baseia-se nestes dois estados: 1 e 0.

O material semiconductor mais usado na fabricação de transistores é o silício, que é preferível porque possibilita o funcionamento em temperaturas mais elevadas (175 °C, quando comparado com os ~75°C dos transistores de germânio) e também porque apresenta correntes de fuga menores, embora ainda exista outro tipo de transistor composto de um bloco de germânio, que ainda é razoavelmente usado em situações onde é necessário lidar com uma grande tensão elétrica.

O transistor bipolar é o mais importante do ponto de vista histórico e o mais utilizado, embora haja transistores muito usados na eletrônica integrada de alta densidade, como os transistores de efeito de campo (FET, “Field Effect Transistor”), os transistores FET de junção unipolar, os transistores MOSFET (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect

Transistor”) e os CMOS (“complementary MOSFET”). Ele é formado por duas junções p-n em série (junção base-emissor e junção base-coletor) de material semiconductor (silício ou germânio) e por três terminais designados por Emissor (E), Base (B) e Coletor (C), sendo possível usar a tensão entre dois dos terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal, i.e., obter uma fonte controlável. Os transistores do tipo n-p-n são os mais comuns, basicamente porque a mobilidade dos elétrons é muito superior a das lacunas, isto é, os elétrons movem-se mais facilmente ao longo da estrutura cristalina, o que traz vantagens significativas no processamento de sinais de alta frequência, além de serem mais adequados à produção em massa.

A Figura 19 mostra, de forma esquemática, um transistor bipolar n-p-n e outro p-n-p, formado por duas junções n-p ou p-n que partilham a região do tipo p ou n (muito fina e não representada à escala), respectivamente. Dependendo da polarização (direta ou inversa) de cada junção, o transistor pode operar no modo ativo/linear, estar em corte ou em saturação.

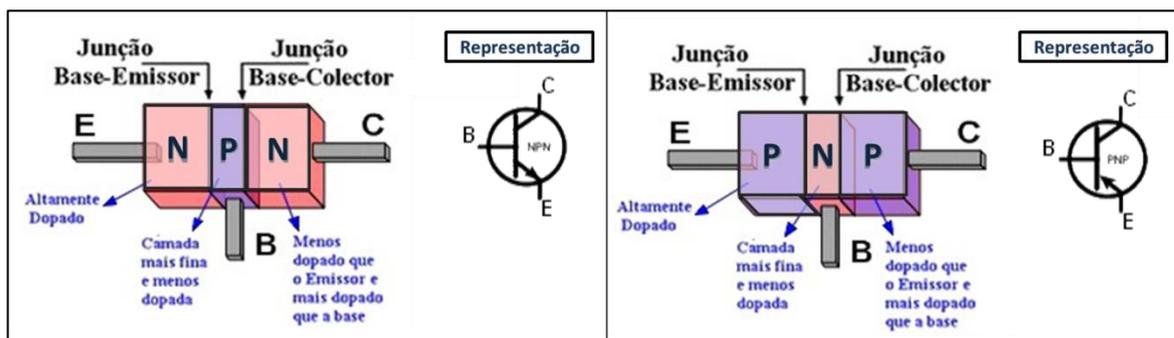


Figura 19: Modelo esquemático de um transistor bipolar n-p-n e outro p-n-p, formado por duas junções n-p ou p-n que partilham a região do tipo p ou n.

Em cada transistor bipolar existem duas junções que irão apresentar regiões de funcionamento diferentes, consoante às junções base-emissor e base-coletor se encontrarem polarizadas direta ou inversamente.

Um transistor encontra-se funcionando na região ativa se tiver a junção base-emissor (BE) diretamente polarizada ($V_{BE} > \text{Tensão limiar}$), a junção base-coletor (BC) inversamente polarizada $0 < V_{BC} < V_{CC}$ e $0 < V_{CE} < V_{CC}$. Na região ativa, o transistor comporta-se como um dispositivo linear estando a corrente na saída (I_C) relacionada com a corrente na entrada (I_B) através duma constante β_{CC} ($\beta_{CC} = I_C / I_B$), onde β_{CC} é o ganho estático de corrente do transistor. O funcionamento do transistor nas regiões de corte (circuito aberto) caracteriza-se pela ausência de corrente de coletor ($I_C = 0$) e conseqüentemente $V_{ce} = V_{CC}$. Para tal é necessário fazer $I_B \cong 0$. No funcionamento na região de saturação (circuito fechado), ambas

as junções estão polarizadas diretamente e tensão V_{CE} é praticamente nula (tipicamente da ordem de 0,2 V para transistores de Silício), atingindo a corrente do coletor o seu valor máximo, limitado apenas pela resistência de coletor RC ($I_C = V_{CC} / RC$). Para garantir a saturação é necessário que $I_C \ll \beta_{CC} * I_B$ e o valor da tensão base-emissor (V_{BE}) é tipicamente 0.7V (para os transistores de Silício).

Modo de operação	Junção Emissor-Base	Junção Base-Coletor
Região ativa	Polarização direta	Polarização inversa
Região de corte	Polarização inversa	Polarização inversa
Região de saturação	Polarização direta	Polarização direta

Tabela 8: Polarização Emissor-Base e Base-Coletor para cada um dos modos de operação do transistor.

2.7.1. Configurações do Transistor Bipolar

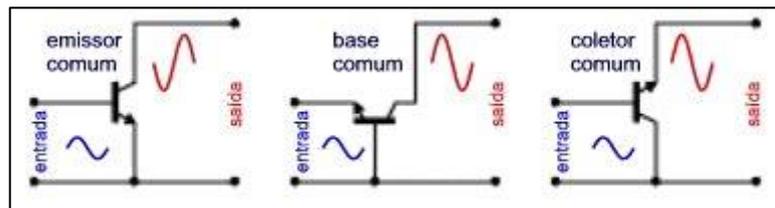


Figura 20: Configurações do transistor bipolar

Configuração	Emissor comum	Base comum	Coletor comum
Impedância entrada	média	baixa	alta
Impedância saída	média	alta	baixa
Ganho de tensão	médio	alto	baixo
Ganho de corrente	médio	baixo	alto

Tabela 9: Relação da impedância de entrada/saída e ganho de tensão/corrente para cada uma das configurações do transistor bipolar.

1. Base Comum (Ganho em tensão, sem ganho em corrente).
2. Emissor Comum (Ganho em tensão e corrente).
3. Coletor Comum (Ganho em corrente, sem ganho em tensão).

2.7.2. Transistor Darlington

O transistor Darlington nada mais é do que a ligação de transistores em um único encapsulamento, com aspecto idêntico ao de um transistor comum, e que possui a finalidade de aumentar o ganho.

O circuito básico deste transistor é formado ligando o emissor do transistor de entrada à base do segundo e, em seguida, ligando os dois coletores em conjunto, em uma configuração Darlington. Apesar de poder ser visto como um bloco de circuito ou componente único, o transistor Darlington possui várias diferenças com relação ao transistor original: ao associar dois transistores do mesmo tipo (PNP ou NPN), obtêm-se um circuito em que o ganho final será o produto dos ganhos individuais dos transistores utilizados. Além disso, ele possui, por exemplo, uma maior diferença de tensão entre a base e o emissor global, ou seja, a partir da base do transistor de entrada para o emissor do transistor de saída.

$$V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$$

Com isso, para um dispositivo de silício típico, a voltagem global base-emissor necessária para que o par Darlington funcione é duas vezes os 0,7 V originais, ou seja de 1,4 V.

É importante notar que o par Darlington não é tão rápido quanto um único transistor, pois o primeiro transistor não pode fechar ativamente a corrente de base do segundo transistor. Isto, por sua vez, faz com que o dispositivo global fique mais lento para reduzir o cessar o fluxo de corrente. Para resolver este problema, muitas vezes associa-se uma resistência ao segundo transistor, entre a base e o emissor, que também ajuda a evitar qualquer fuga de corrente do transistor de entrada para o transistor de saída. Esta corrente de fuga pode ser da ordem de nano-amperes para um transistor de pequenos sinais ou até algumas centenas de microampères para um transistor de potência.

Os transistores Darlington são muito úteis quando se deseja alta amplificação, já que o segundo transistor do par pode ser feito de modo a conduzir correntes intensas. Assim, os Darlingtons de Potência podem controlar correntes muito intensas a partir de sinais fracos. [22]

Os valores típicos para a resistência podem ser de algumas centenas de ohms para um transistor Darlington de energia ou uns poucos milhares de ohms para uma versão para pequenos sinais.

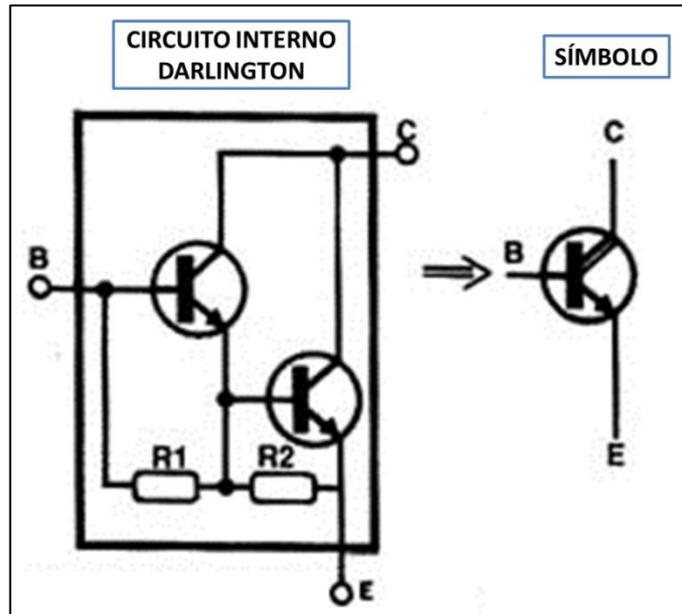


Figura 21: Configuração do circuito interno do *fotodarlington* e sua representação [22-modificado]

2.7.3. Fototransistor

O fototransistor é um dispositivo que funciona baseado no fenômeno da fotocondutividade que pode, dentro de um único componente, detectar a incidência de luz e fornecer um ganho.

O fototransistor não é mais do que um transistor bipolar, mantendo o mesmo princípio de funcionamento, mas com efeito fotoelétrico associado. Em geral, possui apenas dois terminais acessíveis, o coletor e o emissor, sendo a base incluída apenas para eventual polarização ou controle elétrico. [23]

O fototransistor possui um tempo de resposta maior e é mais sensível que o fotodiodo. É de grande utilização nos acopladores ópticos, cuja função é isolar eletricamente circuitos diferentes.

Como nas outras células fotocondutivas, a incidência de luz (fótons) provoca o surgimento de lacunas na vizinhança da junção base-coletor. Esta tensão conduzirá as lacunas para o emissor, enquanto os elétrons fluem do emissor para a base. Isso provocará um aumento da corrente de base, o que, por consequência, implicará numa variação da corrente

de coletor β vezes maior ($I_c = \beta \cdot I_b$, onde I_b , I_c são, respectivamente, a corrente da base e do coletor, e β é um valor fornecido pelo fabricante, variando para cada transistor), sendo essa variação proporcional à intensidade da luz incidente.

Como a base está normalmente desconectada, a corrente que circula por ela dependerá apenas do fluxo luminoso incidente. Assim, na ausência de luz, a corrente de base será zero e o fototransistor estará cortado, resultando na tensão do coletor igual à tensão de polarização V_{cc} . Quando há luz incidindo, a tensão no coletor irá diminuir devido ao aumento da corrente. [24]

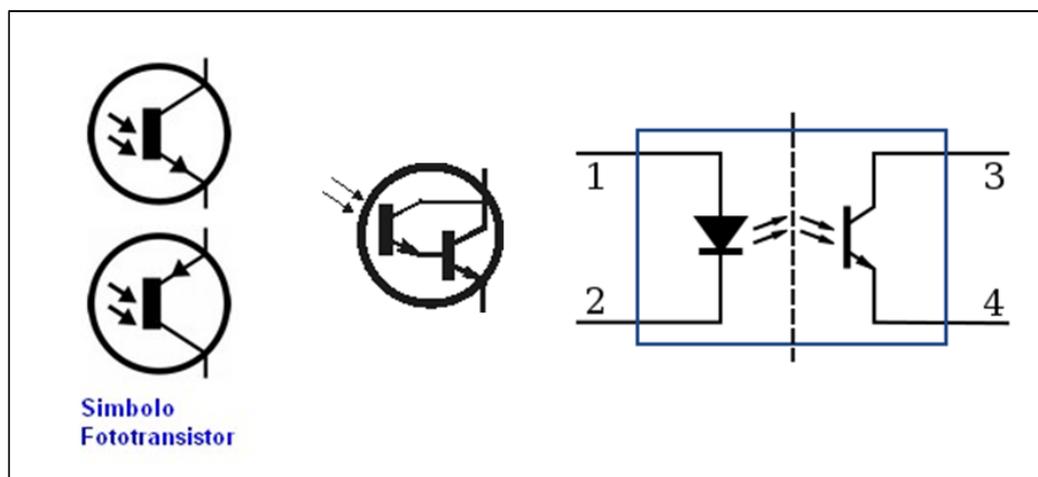


Figura 22: Representação do fototransistor [24, 25]

No fototransistor na configuração Darlington, o chamado *fotodarlington*, o primeiro transistor funciona como fotodetector, e o seu emissor está acoplado à base do segundo transistor. Isto permite obter um nível de ganho muito elevado, mas é muito mais lento do que o fototransistor comum, tendo uma frequência máxima em torno de 20 kHz.

O símbolo do *fotodarlington* é uma combinação do símbolo fototransistor padrão e o símbolo de um transistor na configuração Darlington.

2.8. MEDIDORES E MONITORES DE POTÊNCIA ÓPTICA

Medidores de potência óptica (OPMs) são dispositivos essenciais para mensurar o nível de potência óptica viajando ao longo enlaces de fibra óptica [26]. A título de comparação, para circuitos elétricos, OPMs pode ser visto como sendo o análogo a um

amperímetro óptico. OPMs estão geralmente disponíveis como um dispositivo a ser ligado na extremidade da rede à fibra, medindo assim o nível de potência que se propaga no final do enlace. No entanto, a colocação da OPM requer uma interrupção temporária do fluxo de dados. Uma classe relativamente menos comum de OPMs são dispositivos denotados como monitores de potência óptica (OPMos).

Monitores de potência óptica (OPMos) são dispositivos ativos muito úteis. Eles podem ser inseridos temporária ou permanentemente em enlaces de dados, redes ou em laboratórios de circuitos ópticos em desenvolvimento, permitindo o monitoramento simultâneo e medições de potência óptica em muitos pontos, sem a interrupção do fluxo de dados [6, 7]. Esta técnica permite a medição estável para fibras monomodo. No entanto, OPMos para fibras multimodo com base em um acopladores tipo *tap* exigem que a condição de EMD já tenha sido atingida para resultar em medições reproduzíveis [34, 35]. São muito úteis na investigação de laboratório, ou seja, para o desenvolvimento de qualquer tipo de circuitos de fibra óptica, onde existem pontos do circuito que devem ser monitorados simultaneamente e confortavelmente sem a interrupção da trajetória da luz. Essa monitoração permite, por exemplo, a identificação de possíveis trechos onde há falhas no circuito.

Geralmente os OPMo comerciais requerem que a entrada seja de um sinal no qual os modos propagantes já tenham atingido a Distribuição Modal Equilibrada, quando todos os modos propagantes se encontram dispostos de uma maneira equilibrada. Como as POFs são utilizadas em enlaces de curta distância e a estabilização modal ocorre em aproximadamente 200 m a 300 m, há a necessidade de utilização de um embaralhador de modos (*Mode scrambler*) antes da leitura no OPMo para que se tenha uma medida reproduzível e confiável na leitura da potência óptica média, já que a fração da potência óptica derivada depende da distribuição modal [5-6].

A margem de orçamento de energia (em relação à potência) para as ligações POF é geralmente estreita. Portanto, as ligações devem ser evitados e quando elas são necessárias, deve ser realizado com cautela [1]. Portanto, OPMos para ligações POF deve apresentar uma perda mínima de inserção. Além disso, em relação às características de tecnologia POF [1], é fácil concluir que um OPMo adequado deve ser também viável, simples e barato, tanto quanto possível.

3. DESENVOLVIMENTO DO PRIMEIRO PROTÓTIPO DO MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA (OPM-1) PARA UM CANAL DE COMPRIMENTO DE ONDA

3.1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo discorreremos sobre os procedimentos experimentais e a construção do primeiro protótipo do Monitor de Potência Óptica, o OPMo-1. A fim de se determinar a melhor configuração interna para este, foram testadas duas formas de coletar a luz que emerge lateralmente pela fibra, como será tratado a seguir. Posteriormente, com o protótipo ajustado e devidamente montado, um grande volume de medidas foi realizado, com a finalidade de caracterizar e calibrar o OPMo-1. Todas as experiências práticas referentes a esse capítulo foram realizadas no Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp) da Universidade Federal Fluminense.

3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O OPMo-1 (Figura 23 e Figura 24) foi construído na forma de uma caixa de espuma rígida preta, de dimensões 11,2 cm x 9,0 cm x 8,4 cm (volume $\sim 847\text{cm}^3$). Ela foi vedada contra a entrada de qualquer fonte de luz externa, obtendo uma leitura com o mínimo de interferência possível. Internamente, possui um trecho de POF de 5,4 cm, sendo que em 1,1 cm dele, a cobertura de poliestireno preto foi retirada. Próximo a este trecho exposto de POF, foi aproximado e fixado um fotodetector (Figura 25) com a configuração Darlington (PD) modelo IFD93 da *Industrial FiberOptics* (EUA). O *datasheet* referente a este PD encontra-se no Apêndice.

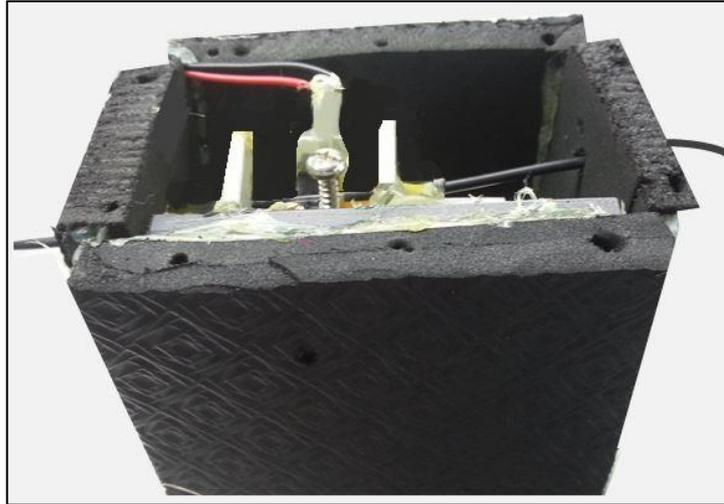


Figura 23: Caixa de espuma preta utilizada na montagem do OPMo-1



Figura 24: Visão lateral da caixa do OPMo-1.



Figura 25: *Fotodarlington* original, modelo IF-D93 da *Industrial FiberOptics*.

3.3. FASE 1: DEFINIÇÃO DA MELHOR CONFIGURAÇÃO PARA COLETA DE LUZ

O modelo esquemático da montagem para caracterização e calibração do OPMo-1 é ilustrado na Figura 26 e na Figura 27. O dispositivo OPMo-1 em si também é mostrado, e suas paredes são representadas por linhas tracejadas. Duas configurações distintas foram testadas nesta etapa: a diferença está justamente na forma de captação da luz. A primeira utiliza um pequeno trecho de POF para recolher a luz espontaneamente espalhada, pouco antes de a microlente concentra-la no *microchip* interno do PD. Já a segunda, o PD tem seu encapsulamento externo retirado e a microlente acoplada ao *microchip* do PD é exposta.

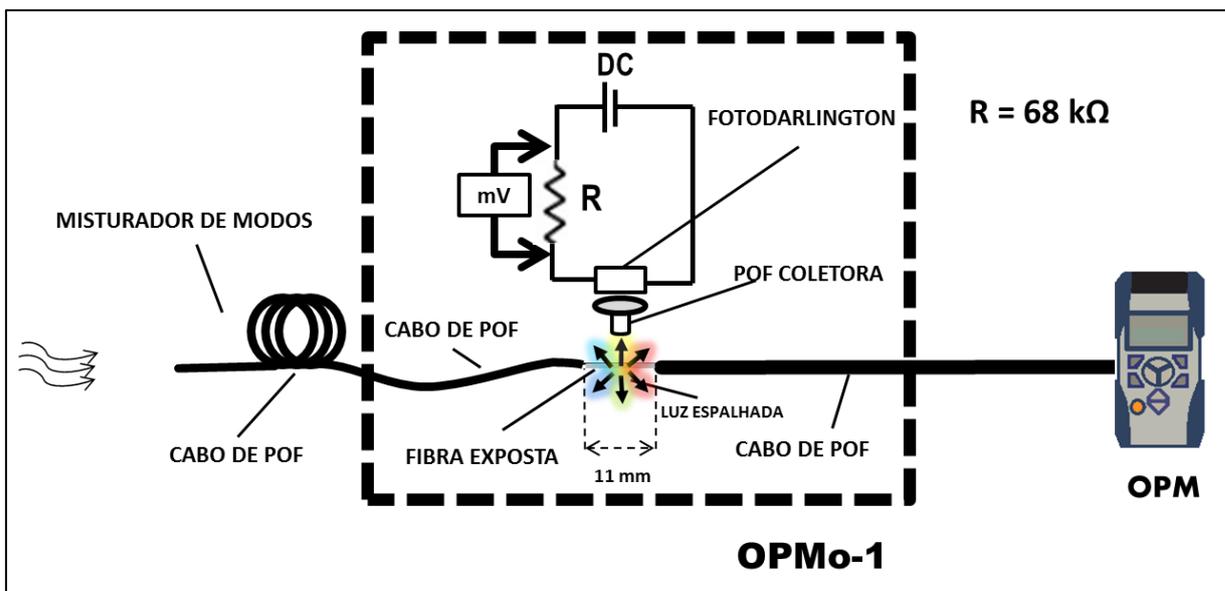


Figura 26: Modelo Esquemático do OPMo-1 com POF coletora.

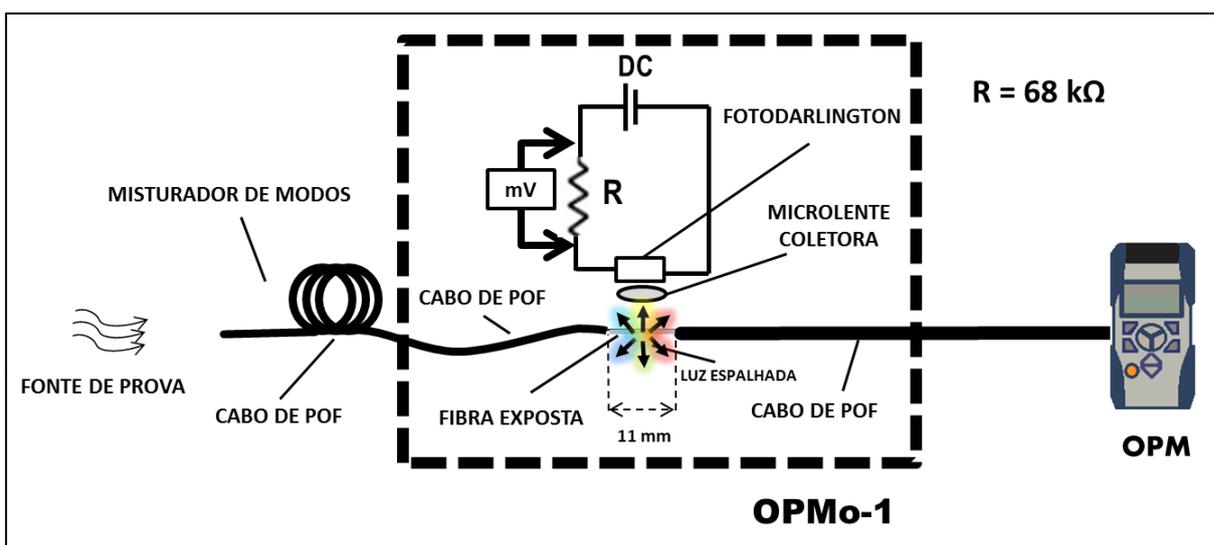


Figura 27: Modelo Esquemático do OPMo-1 com microlente coletora exposta.

O mecanismo de funcionamento é o mesmo para as duas configurações: a luz visível emitida por um LED ultra brilhante é injetada em uma POF de PMMA padrão (2,2 mm de diâmetro, 0,98 de diâmetro de núcleo e 0,5 de abertura numérica) de 20 cm de comprimento.

Para fins práticos e para garantir uma distribuição de modos equilibrada, um misturador de modos é utilizado em todas as medições de caracterização deste capítulo. O misturador de modos (MS) utilizado, de padrão japonês modelo JIS6863 (Figura 28), é inserido logo após a injeção da luz de prova. Ele é composto por um segmento de POF PMMA padrão de 3,40 m, envolvido em torno de dois cilindros metálicos idênticos,

formando, assim, 10 voltas em uma figura de oito [36]. Através deste elevado número de curvas padronizadas, ele “embaralha” os modos propagantes da fibra para, na saída, obtermos uma configuração mais uniforme dos modos. Conseqüentemente tem-se um enlace mais estável, com resultados de medidas mais reprodutíveis. Veremos mais adiante, no Capítulo 4, que o OPMo aqui desenvolvido se mostrou imune quanto a distribuição modal, fornecendo a mesma resposta independente do uso do misturador de modos.



Figura 28: Fotografia do misturador de modos padrão japonês, modelo JIS6863, onde 3,4m de comprimento de POF são enroladas em dois cilindros metálicos em formato de oito.

Após o MS, a luz emitida pela fonte de prova atravessa uma pequena caixa preta, que é o próprio dispositivo OPMo-1 inserido em linha. Em seu interior, vedado de qualquer fonte de luz externa, parte da POF tem sua cobertura preta de polietileno cuidadosamente retirada, expondo aproximadamente 11 mm de comprimento de POF. Baseado no espalhamento luminoso linear (Rayleigh e Mie) foi possível coletar a luz espalhada lateralmente a partir do segmento descoberto da fibra e, bem próximo a ele, foi posicionando o PD. Utilizou-se o multímetro, modelo MD-6700, da *Escort* para medir essa foto-corrente gerada pelo PD.

O PD é polarizado eletricamente com 5 V DC e, em série com ele, é associada uma impedância de carga de 68 k Ω . Com o multímetro, foi medida a tensão nos terminais desta impedância, com sinais elétricos de alguns milivolts. Esta tensão medida é correspondente à potência luminosa coletada pela microlente e detectada pelo PD.

Quando a corrente de excitação I_{dc} varia, o comprimento de onda central λ_C emitido pelos LEDs geralmente é deslocado [40] por alguns nanômetros. Por uma questão de

simplicidade, as medições foram todas realizadas por variação I_{dc} e o efeito de “chirp óptico” foi negligenciado aqui.

Na saída do OPMo-1, foi conectado um pedaço de POF de 20 cm de comprimento, seguido por um Medidor de Potência Óptica (OPM) calibrado de alto desempenho, finalizando o enlace. Sua função é medir externamente a potência óptica que trafega no enlace de POF. Tanto o modelo de mão convencional PM20 da *Thorlabs* (EUA) quanto o modelo 2931 da *Newport Corporation* (EUA), com sensibilidade de -60 dBm e -100 dBm, respectivamente, foram utilizados. Todas as medições foram realizadas em tempo real, isto é, sem o emprego de qualquer procedimento de cálculo da média com o intuito de aumentar a relação sinal-ruído.

Para expor o trecho de aproximadamente 11 mm de fibra nua, foi utilizado um descascador padrão da *Hintermaier GmbH*, Figura 29. Com esta ferramenta, a cobertura externa de polietileno POF preto (e não o revestimento interno) foi cuidadosamente cortada em torno da sua circunferência, de modo a evitar tocar na fibra. Em seguida, uma leve tração foi aplicada a partir de uma extremidade da fibra, expondo assim a pequena extensão de fibra nua, a partir do qual a luz é dispersa espontaneamente. Uma vez que o polietileno não está fortemente aderido ao revestimento da POF, este procedimento é de fácil execução.

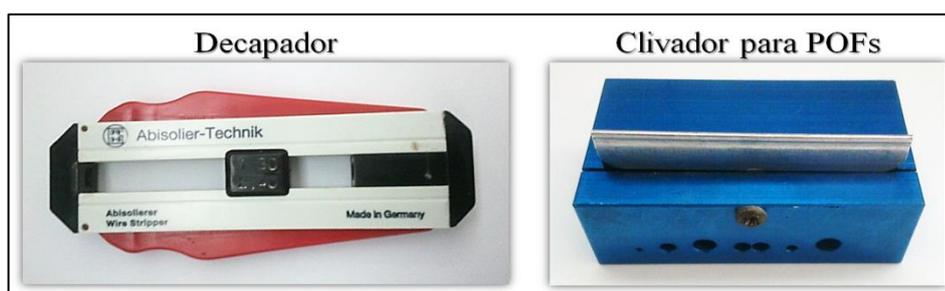


Figura 29: Ferramentas utilizadas para clivagem da extremidade da fibra e decapagem da POF.

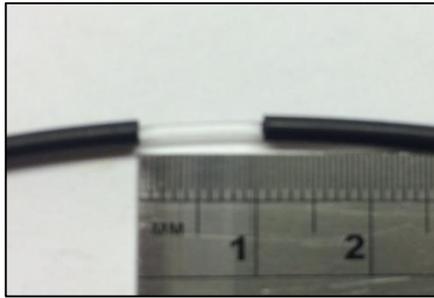


Figura 30: Trecho de fibra exposta, sem a cobertura externa de poliestireno.

Na primeira configuração, Figura 26, uma pequena quantidade de luz espalhada lateralmente pela parte exposta da fibra é coletada por um pequeno trecho de POF PMMA padrão. Esse segundo trecho de POF (0,98 mm de diâmetro) encontra-se sem o encapsulamento externo de PMMA e tem a função de coletar e orientar a luz para uma microlente. Houve a preocupação de se manter um ângulo de 90° entre a fibra interligada à microlente e a fibra que está exposta, por onde a luz está sendo espalhada. A microlente, por sua vez, focaliza a luz coletada em direção ao *microchip* do detector *fotodarlington*.

No segundo conjunto de experimentos, a luz foi coletada diretamente pela microlente (1,50 mm de diâmetro) integrada ao fotodetector, tal como mostrado na Figura 27. A peça plástica da estrutura original do PD foi removida, expondo, assim, a microlente integrada ao *microchip*. A diferença entre as duas configurações são destacadas na Figura 31.

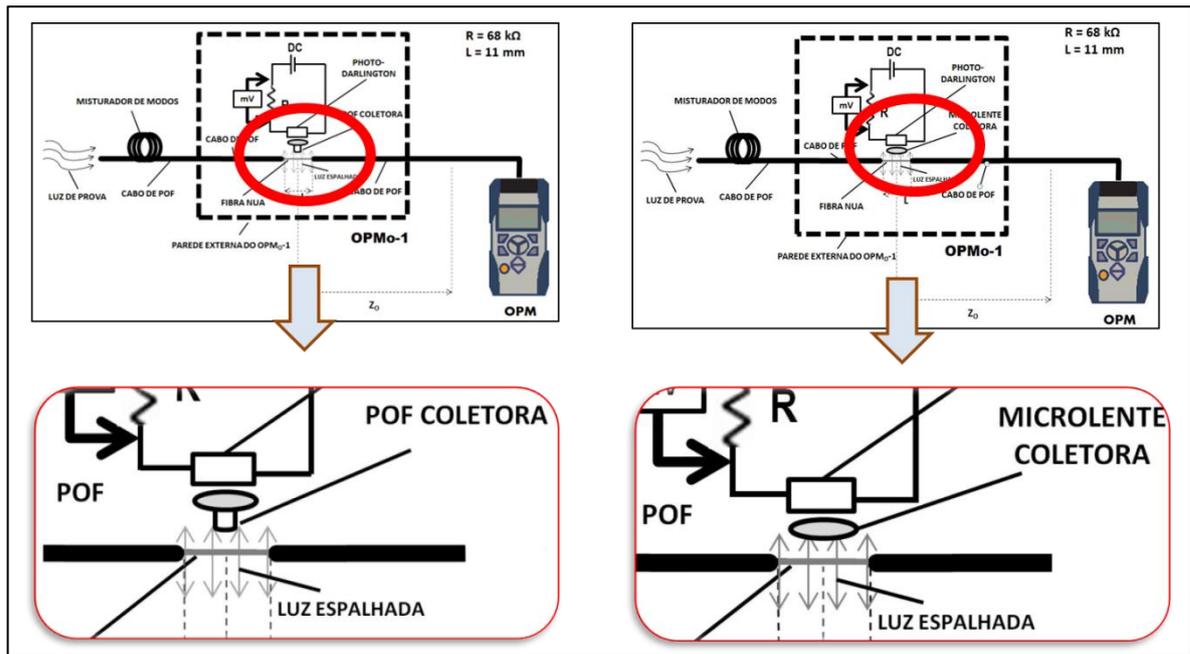


Figura 31: Modelos esquemáticos com zoom. A diferença entre as duas configurações do OPMo-1 é destacada.

A responsividade normalizada do *microchip Optek 560* do PD encontra-se representada pelo Gráfico 1 e seu *datasheet* encontra-se no Apêndice A. Esse fotodetector gera um ganho de corrente proporcional à potência luminosa recebida, com responsividade efetiva máxima de 400 AW^{-1} a 850 nm [33]. Por possuir essa configuração Darlington, o fotodetector já possui internamente um circuito de amplificação eletrônica, o que poupa a necessidade de utilizar um amplificador operacional no circuito do OPMo.

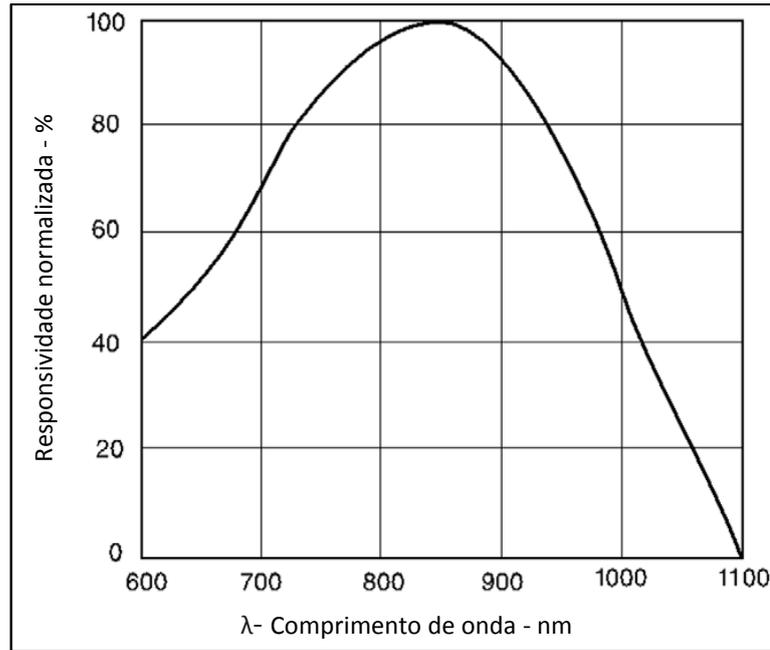


Gráfico 1: Responsividade normalizada do microchip do *fotodarlington*, modelo IF-D93 da *Fiber Optics*, onde 100% da resposta corresponde a 400 AW^{-1} . [33] Reprodução autorizada.

A tensão aplicada ao LED variou de 0 V a 5 V e a aplicada no PD foi de 5 V para ambos os testes. Cada uma das leituras foi efetuada por 3 vezes e a média dos valores obtidos foi utilizada. A partir desses dados e com o auxílio do software de análise *Origin*, plotou-se a melhor curva para cada uma das configurações para efeitos de comparação e definição do *layout* do protótipo do OPMo.

3.3.1. Análise dos resultados da Fase 1

O Gráfico 2 mostra a curva de calibração do OPMo-1, ao se utilizar a captação de luz obtida pelo *PD* com a POF-coletora (quadrados pretos) ou com o *PD* sem o encapsulamento, ou seja, com a microlente-coletora (círculos vermelhos). Foi injetada no OPMo-1 uma fonte de luz (LED), de aproximadamente 30 nm de largura espectral, centrada em 525 nm. Os eixos horizontal e vertical da figura 3 representam a potência óptica (dBm) injetada para investigar o OPMo e o nível de tensão (dBV) fornecida pelo voltímetro, respectivamente.

A partir deste mesmo gráfico, alguns parâmetros OPMo-1 são calculados. A dependência da conversão óptico-elétrica de aproximadamente 2,5 dBV / dBm é calculada a partir da regressão linear tanto para a POF-coletora quanto para a microlente-coletora. A unidade dBV é calculada utilizando como referência 1 V, ou seja, $1 \text{ dBV} = 20 \log [(Tensão$

medida em V)/(1 V)]. A origem física desta inclinação angular é a conversão optoeletrônica, idealmente 2,0 dBV / dBm [41], independente do comprimento de onda. Cada variação de 1 dB no nível de potência óptica provoca uma variação de 2 dB no nível de energia elétrica convertida. Acredita-se que a razão para este desvio já conhecido deve-se a uma não linearidade na foto-resposta na foto corrente do PD quando a potência óptica incidente varia [33]. Para fins práticos, o fato de não obtermos o valor exato do coeficiente de conversão optoeletrônica efetivo não é crítico, desde que todos os dados de medição sejam bastante reprodutíveis e inequívocos. O Gráfico 3 também mostra um piso de ruído de -100 dBV (ou 0,01 mV), comum a todas as medições. Assim, em princípio, esse deve ser o piso de ruído considerado no presente OPMo-1, já que o voltímetro não é capaz de medir tensões menores do que 0,01 mV. Entretanto, nossos resultados revelaram um piso de ruído de pelo menos 10 dB pior do que 0,01 mV (ou seja, 0,1 mV) devido ao ruído gerado pelo chip do PD, especialmente aquele causado pela corrente de escuro.

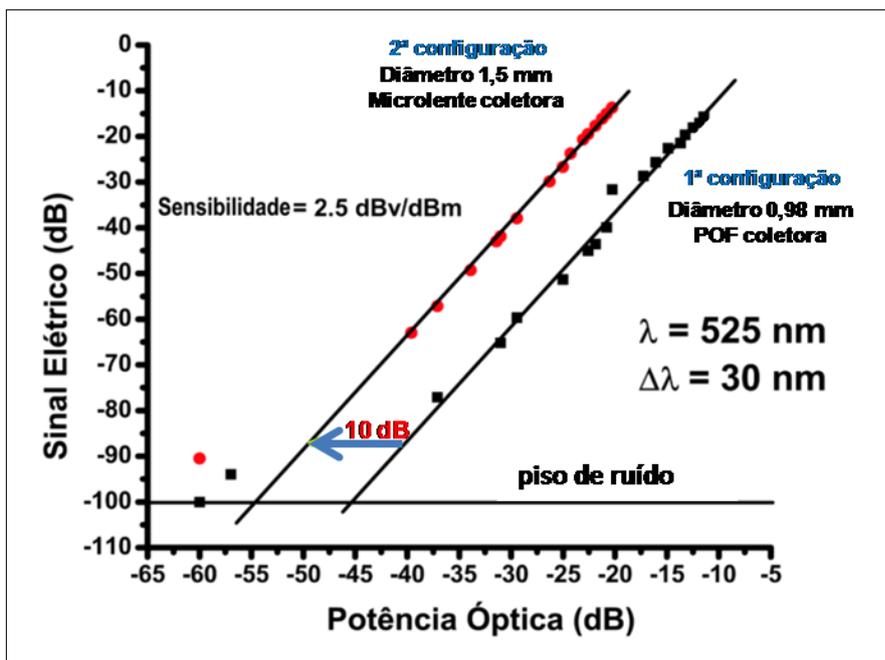


Gráfico 2: Calibração do OPMo-1, inicialmente utilizando como coletor de luz uma POF conectada ao *fotodarlington* IF-D93 da *FiberOptics* e, posteriormente, a microlente do próprio fotodetector exposta. Foi utilizado, para ambos os testes, um LED verde ultra brilhante de 525 nm e 30 nm como fonte de luz.

O principal objetivo desta seção é mostrar um aumento de 10 dB na sensibilidade do OPMo-1 à potência óptica de entrada quando a microlente-coletora é usada ao invés da POF-coletora. Já que a maior parte da luz espalhada não pode ser coletada, este aumento na

sensibilidade não está diretamente relacionado com a extensão de POF sem a cobertura de PMMA, ou seja, a região onde ocorre o espalhamento luminoso.

O procedimento de remoção da cobertura de poliestireno da POF foi feita manualmente e, por isso, não foi possível ter o controle preciso do comprimento L. Depois de algumas tentativas, uma amostra de boa qualidade com $L = 11$ mm foi obtida. A fim de melhorar a sensibilidade do OPMo, a coleta de luz precisou ser aumentada: isto é, aumentar o diâmetro, comprimento e/ou abertura numérica do coletor. Deste modo, toda a luz captada pode ser focalizada pela microlente sobre o chip semiconductor.

Como era esperado, com a primeira configuração (reta da direita) a coleta de luz foi menor do que no segundo (reta da esquerda). Isso pode ser observado através do aumento significativo na sensibilidade do OPMo: um ganho de 10 dB de um arranjo para o outro. Essa melhora substancial é justificada pelo seguinte fato: na configuração que utiliza a microlente-coletora, a superfície por onde ocorre a captação é o próprio diâmetro de 1,5 mm da microlente do PD exposta. Da outra maneira, a superfície é de 0,98 mm, que é o diâmetro do núcleo da POF-coletora, interligada ao PD. Com isso, a microlente de 1,5 mm de diâmetro é capaz de recolher a luz espalhada com uma extensão ligeiramente maior do que a POF-coletora. Entretanto, o restante da luz espalhada ao longo de ~9,5 mm da POF exposta (sem a cobertura de PMMA) é desperdiçada.

Um cálculo geométrico simples mostra que um ganho óptico de ~3,7 dB é obtido quando a POF-coletora (0,49 mm de raio) é substituído pela microlente-coletora (0,75 mm de raio). A diferença de 6,3 dB (10,0 dB do ganho total obtido subtraído dos 3,7 dB de ganho esperado com a substituição) pode ser explicada pelas perdas de acoplamento que ocorrem quando a POF-coletora ou microlente-coletora são utilizadas. Estas perdas de acoplamento são causadas, principalmente, pela relativa dificuldade que se refere ao ajuste preciso distância perpendicular entre a superfície do trecho de POF descascada e a entrada da POF-coletora. Supondo um modelo geométrico simples, onde a distância perpendicular “d” deveria ser realisticamente menor do que 1 mm. Se o alinhamento não é cuidadosamente realizado, “d” pode ser, por exemplo, 0,2 mm ou 0,8 mm, valores quase que indistinguíveis a olho nu. Para valores muito baixos de “d”, a densidade de potência óptica decai com $1/d$: assim, uma variação de $10 \log (0,8 / 0,2) = 6$ dB é perfeitamente factível e pode explicar a discrepância de 6,3 dB acima mencionado.

Apesar de ser possível medir potências ópticas tão baixas quanto -60 dBm, com o OPMo utilizando a microlente-coletora, este resultado ainda é considerado não confiável no atual estágio de desenvolvimento. Assim, o valor mínimo de potência óptica medido é comparável à -60 dBm, assim como a maior parte dos OPM de mão disponíveis comercialmente [44].

Desta maneira, concluiu-se que a melhor forma para a captação da luz que emerge lateralmente pela parte da POF descoberta é utilizando o fotodetector sem o encapsulamento, ou seja, com a microlente-coletora. Esta constatação é também promissora pelo fato de que, com relativamente pouco esforço, foi possível obter uma melhora significativa no desempenho do OPMo, sem que tenha sido preciso recorrer a pós-amplificação eletrônica. Esta, por sua vez, poderia introduzir ruído adicional e implicar em maior complexidade e fator de forma (volume) no dispositivo.

Definida a configuração interna, o protótipo do OPMo-1 definitivo com a microlente-coletora passou para a fase de testes. Com a caixa externa preta devidamente vedada, foram feitas medidas preliminares de calibração e caracterização utilizando fontes luminosas de prova distintas.

3.4. FASE 2: TESTES UTILIZANDO LEDS *DIEMOUNT*

As medidas de calibração/caracterização do OPMo-1, com a configuração que utiliza a microlente-coletora (Figura 27), foram feitas com LEDs da *Diemount* (Apêndice C), emitindo luz nas seguintes cores e comprimentos de onda centrais: azul (470nm), verde (520nm), laranja (590nm) e vermelho (650nm). Trata-se de LEDs potentes com ~30 nm de largura espectral (APENDICE).

“direção do azul”, a responsividade do *fotodarlington* (de silício) diminui, e então os efeitos aproximadamente se compensam. Adicionalmente, pode-se ter uma contribuição significativa de espalhamento Mie, praticamente independente do comprimento de onda.

O circuito do PD entra em regime de saturação quando a potência óptica injetada é de - 5 dBm (ou superior) e apresenta uma sensibilidade de aproximadamente - 50 dBm. A faixa dinâmica (DR) de operação é a diferença entre a máxima potência óptica possível de ser medida (antes que o fotodetector atinja o regime de saturação) e a potência óptica mínima medida (correspondente a uma tensão imediatamente acima da do ruído do *fotodarlington*, ou seja, ~ 0,1 mV).

$$DR = P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n}$$

$$DR = -5 \text{ dBm} - (-50 \text{ dBm})$$

O OPMo-1 exibe, portanto, uma DR de 45 dB. Ainda que se utilize um fotodetector melhor, a potência óptica mínima mensurável é limitada pelo voltímetro usado, que não é capaz de medir as tensões menores do que 0,01 mV (= -100 dBV).

A resposta elétrica do OPMo é dependente do comprimento de onda por meio da responsividade do PD, Gráfico 1, e pela conhecida dependência de $1/\lambda^4$ da potência do espalhamento Rayleigh [38, 39]. Entretanto, o espalhamento Mie, que ocorre de maneira independente do comprimento de onda de operação, também contribui para a luz espalhada pelo trecho de POF sem a cobertura externa [1, 38].

Apesar de o espalhamento Rayleigh diminuir à medida que se aumenta o comprimento de onda, a responsividade do fotodetector de silício aumenta até 400 AW^{-1} (no seu máximo) à 850 nm (informação autorizada para divulgação extraída do *datasheet* do microchip contido no PD IFD93). O eixo vertical do Gráfico 1 mostra uma responsividade normalizada (0-100%) e a partir dele extrai-se que, a 600 nm e 850 nm, a responsividade do PD é de 164 AW^{-1} e 400 AW^{-1} , respectivamente. Deste modo, quando o comprimento de onda aumenta de 600 nm para 850 nm, o aumento da responsividade é de $400/164 = 2,44$ vezes enquanto o nível de potência no espalhamento Rayleigh diminui em $(850/600)^4 = 4,03$ vezes. Por isso, uma compensação parcial na diminuição de sinal ocorre (isto é, o sinal como um todo diminui ~ 0,61 vezes). No entanto, as curvas do Gráfico 3 mostram uma tendência inversa.

O fabricante não divulga o modelo do módulo utilizado para construir o IFD93. A responsividade do PD IFD93 nos intervalos de comprimento de onda 400-600 nm também

não está disponível. No entanto, sua curva de responsividade, Gráfico 3, é comparável com o perfil da curva de responsividade do PD modelo SD3410/5410 da *Honeywell* [37], cujos valores na faixa de comprimento de onda de 400-1100 nm encontram-se disponíveis. O *datasheet* referente a esse PD encontra-se no Apêndice B. As curvas de responsividade são bastante semelhantes no intervalo de comprimento de onda de 600-1100 nm, Gráfico 4, e é provável que apresente a mesma dependência na faixa de 400-600 nm. Por exemplo, mostra-se [33] que a queda na responsividade não é suficientemente forte para comprimentos de onda < 600 nm.

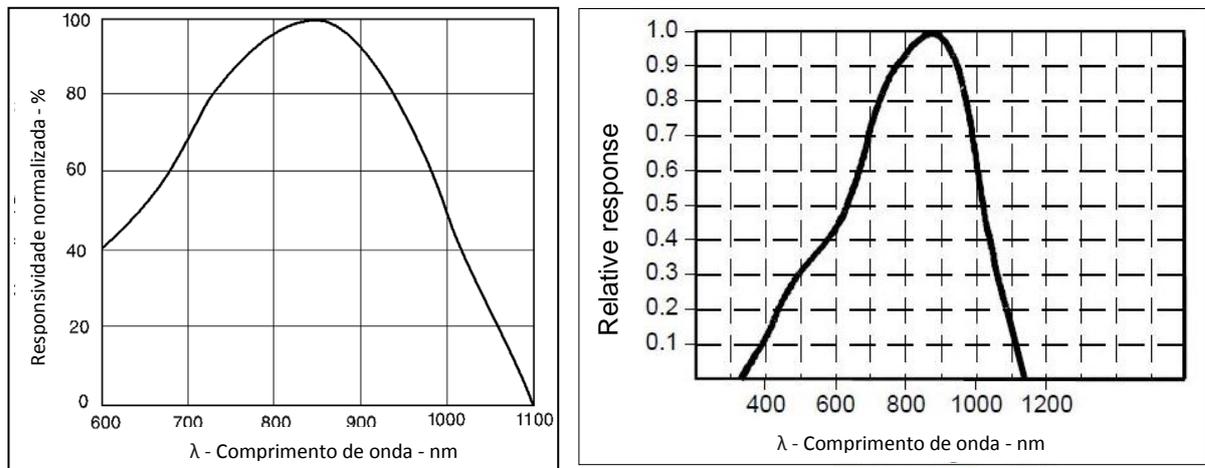


Gráfico 4: Curva de responsividade do PD modelo IFD93 da *FiberOptics* e do PD modelo SD3410/5410 da *Honeywell*, respectivamente.

Por conseguinte, a resposta opto-elétrica do OPMo não está totalmente esclarecida. É importante lembrar que podem haver erros com relação a responsividade do PD e na estimativa do espalhamento Rayleigh, devido a ± 15 nm de largura espectral em torno do comprimento de onda central de cada fonte LED de prova. Por outro lado, as características ópticas das microlentes acopladas ao microchip do PD IFD93 não estão disponíveis.

É provável que tal microlente tenha sido selecionada ou designada/otimizada para cobrir as faixas de 600-850 nm (isto é, para recolher eficientemente a luz que emerge a partir do núcleo de uma POF padrão de PMMA) e concentrá-la no chip semiconductor. No entanto, a microlente é a mesma utilizada no OPMo para comprimentos de onda inferiores a 650 nm, coletando a luz que emerge pela lateral da POF. Assumindo que o PD modelo IFD93 utiliza um módulo de PD semelhante ao SD3410/5410 da *Honeywell*, os resultados da resposta espectral do OPMo exibidos no Gráfico 3 mostram que a coleta e a propriedade da microlente de focar a luz degrada quando o comprimento de onda diminui e o aumento do espalhamento

Rayleigh não é capaz de proporcionar uma compensação. Em ambos os casos, apesar da ausência da resposta espectral exata, o OPMo pode ser calibrado para cada comprimento de onda de interesse. Portanto, o dispositivo OPMo deve previamente calibrado para cada comprimento de onda para o qual será utilizado.

3.5. TESTES UTILIZANDO LASERS (HENE E DE ND:YVO₄)

Semelhante ao que foi feito com os LEDs da *Diemount GmbH Wernigerode*, foram realizadas medidas de caracterização e calibração do OPMo utilizando fontes de luz coerentes (Lasers), exibindo comprimentos de onda distintos dentro do visível e largura de banda (*linewidth*) extremamente estreita. A utilidade destas medidas com fontes coerentes (e bastante monocromáticas) é que permitem realizar uma calibração espectral do OPMo, adequando-o para uso em enlaces a fibras que naturalmente utilizem Lasers de diodo como fonte luminosa modulada.

Foi utilizado como fonte de prova dois tipos de LASER: o primeiro à gás de HeNe centrado em 633 nm (representado por quadrados vermelhos) e o segundo DPSS (*Diode Pumped Solid State*, ou seja, Diodo de estado sólido bombeado) de Nd:YVO₄, centrado em 532nm (representado por círculos verdes), como ilustra o Gráfico 5.

A partir do Gráfico 5 pode-se extrair ~ 2,5 dBV/dBm de coeficiente angular de conversão optoeletrônica para dois comprimentos de onda (isto é, o mesmo resultado que obtivemos quando utilizamos LEDs como fonte de prova).

Para as medidas feitas com o LASER Nd: YVO₄, a resposta do OPMo mostrou uma dependência linear abrangendo uma faixa dinâmica de ~ 30 dB e uma potência de saturação de -5 dBm. Este resultado está de acordo com o que foi obtido quando utilizamos o LED verde centrado em 520 nm como fonte de prova (Gráfico 3). As medidas mostraram razoável reprodutibilidade, com exceção da discrepância observada em baixas potências. Essa discrepância em baixas potências combinada com a menor responsividade do *PD* (em comparação ao vermelho), gerou um sinal elétrico de saída bastante contaminado por ruído, não permitindo reprodutibilidade aceitável abaixo de aproximadamente -33 dBm de potência de entrada no OPMo. Comparando com a resposta para quando utilizamos o LED a 520 nm, o Gráfico 3 mostra que, injetando uma fonte de luz, a linearidade de resposta do OPMo é mantido para os níveis de potência ainda menores do que -40 dBm. No presente momento, não temos nenhuma explicação para tal discrepância.

Quando injetamos luz centrada em 633 nm, a resposta linear para o OPMo mostra uma faixa dinâmica de pelo menos 20 dB. Este valor pode ser maior, mas a sua medição ficou subestimada pela limitação de potência do LASER de HeNe possível de se injetar no dispositivo. Por conta disso, neste caso a potência injetada não foi suficiente para saturar o PD. Uma sensibilidade acima de -46 dBm foi alcançado, semelhante aos resultados obtidos quando utilizamos o LED vermelho emitindo a 650 nm (Gráfico 3).

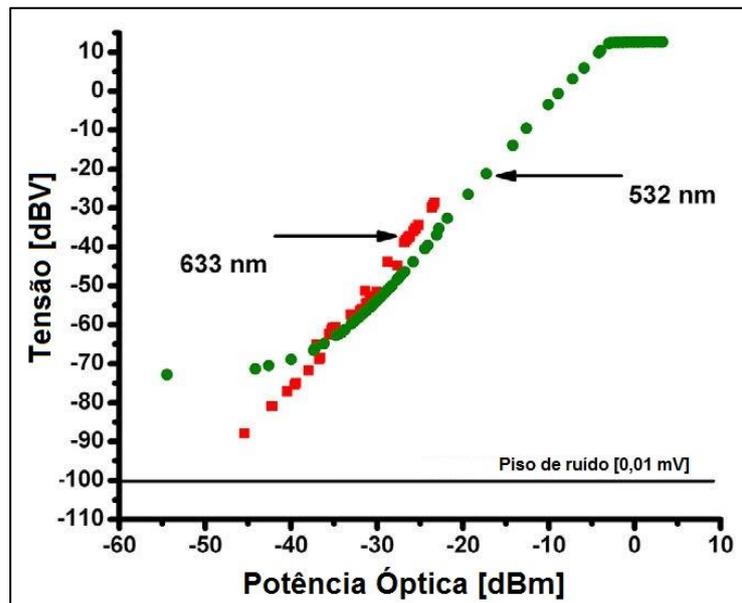


Gráfico 5: Calibração do OPMo-1 utilizando como fonte de prova dois Lasers: o primeiro, no estado gasoso, de HeNe (633 nm) e o segundo, no estado sólidos, de Nd:YVO4 (532 nm).

4. ANÁLISE DO OPMO-1: INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE MODOS EQUILIBRADA (EMD)

4.1. INTRODUÇÃO

No início de enlaces práticos de POF, a EMD pode não ter sido atingida ainda, acarretando em um possível erro na medição da potência transmitida utilizando o OPMo [1]. Embora um acoplador multimodo apresente uma razão de acoplamento que é dependente da distribuição modal, a utilização de um misturador de modos faz com que os modos propagados atinjam a EMD. Com isso, a proporção de acoplamento torna-se consideravelmente mais estável [36].

Uma fração da luz espontaneamente espalhada é originada a partir do espalhamento Rayleigh, que depende essencialmente do comprimento de onda [38, 39]. A outra fração desta luz espalhada é afetada pela distribuição de modos através do espalhamento Mie [38]. Por isso presumimos, em princípio, que uma condição de EMD não atingida estaria implicando numa redistribuição de modos transversal e que teria certa influência sobre a propagação de luz espalhada.

Nesta fase do desenvolvimento do OPMo, desejou-se verificar a real necessidade da utilização do misturador de modos. Para isso, foi necessário analisar experimentalmente qual a influencia da distribuição modal na resposta do OPMo-1, ou seja, o quanto a luz coletada pela lateral da fibra, por onde ocorre o espalhamento Rayleigh e Mie, é dependente de uma distribuição de modos equilibrada.

As experiências práticas referentes a esse capítulo foram realizadas tanto no Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp), da Universidade Federal Fluminense quanto no *Polymer Optical Fiber Application Center* (POFAC), da escola alemã *Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm*.

4.2. USO DO MS: PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – 1ª ETAPA

A configuração experimental ilustrada na Figura 27 é mantida nesta fase de testes. O MS utilizado, modelo JIS6863(Figura 28), está conectado um pouco antes do OPMo-1.

No primeiro experimento, ele foi mantido em sua configuração original: com um segmento de POF PMMA padrão de 3,40 m, envolvido em torno de dois cilindros metálicos idênticos, formando, assim, 10 voltas em uma figura de oito [36]. Através deste elevado número de curvas padronizadas, ele “embaralha” os modos propagantes da fibra para, na saída, obtermos uma configuração mais uniforme dos modos. Consequentemente tem-se um enlace mais estável, com resultados de medidas mais reprodutíveis, como já citado anteriormente.

No segundo experimento, os 3,40 m de comprimento de POF, originalmente enrolados no MS, foram cuidadosamente desenrolados e estendidos sem tensão, mantendo, a fim de evitar atingir a condição de EMD para o OPMo-1, mantido mecanicamente estável.

Apenas uma condição de excitação é de fato realizada: um LED verde ultra brilhante, com cúpula transparente plástica de 5 milímetros, utilizado como fonte de luz, emitindo com comprimento de onda centrado em 525nm e com largura de banda de 30 nm. O acoplamento óptico para a POF foi realizada usando a técnica “*butt-to-butt*”.

O Gráfico 6 mostra os resultados da medição da resposta do OPMo-1. A produção de foto-corrente (a saída elétrica em dBV) está representada no eixo Y e a potência óptica de entrada (em dBm) no eixo X. As medidas realizadas com (quadrado preto) ou sem (círculo vermelho) a utilização do embaralhador de modos (MS), ou seja, quando a EMD foi ou não atingida, encontram-se no mesmo gráfico.

4.2.1. Resultados e discussões

Três pares de medições (para quando a condição de EMD é ou não atingida) foram realizados em três dias diferentes, a fim de verificar a reprodutibilidade dos resultados. Como pode ser visto no Gráfico 6, as mesmas parcelas foram essencialmente alcançadas para os três conjuntos de medições, indicando, assim, sua reprodutibilidade.

A partir das duas medições realizadas, é evidente que o OPMo-1 exibe a mesma resposta para quando a luz que trafega no enlace já atingiu a distribuição equilibrada de modos (EMD) ou não. Estes resultados experimentais preliminares sugerem que o OPMo-1 para SI PMMA POF é altamente imune à distribuição modal. Em outras palavras, apesar da utilização do modo de misturador JIS6863, a resposta do nosso OPMo-1 é a mesma. Isto representa uma grande vantagem tecnológica quando comparamos com OPMos convencionais para a fibra multimodo com base na utilização de derivadores (*taps*), que apresentam a fração acoplada dependente da distribuição modal.

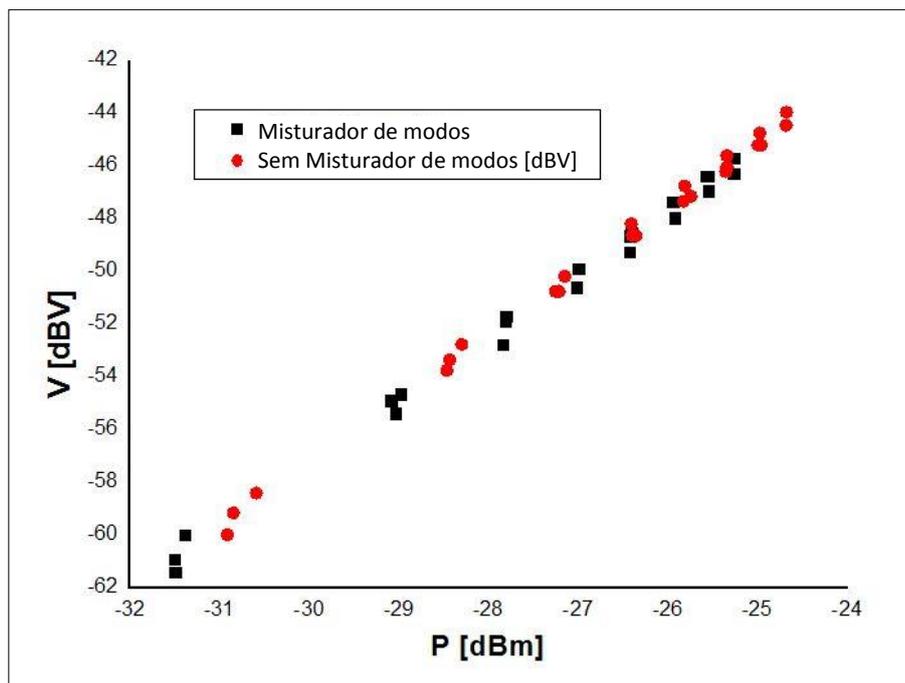


Gráfico 6: Resposta do OPMo para a configuração com e sem a utilização do misturador de modos modelo JIS6863. Todos os pontos seguem a mesma dependência linear em um gráfico log-log.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DA POTÊNCIA ESPALHADA PELA LATERAL NA POF SI DE PMMA

A fim de compreender melhor os resultados anteriores, a potência óptica espalhada lateralmente é medida como uma função da abertura numérica da fonte de luz da entrada. Essa etapa experimental foi realizada nos laboratórios do *Polymer Optical Fiber Application Center* (POFAC), da escola alemã *Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm*.

4.3.1. Procedimento experimental – 2ª etapa

O procedimento experimental dessa segunda etapa consistiu em medir a potência óptica irradiada pela lateral da fibra utilizando uma esfera integradora, que pode ser deslocada ao longo da fibra para diferentes condições de excitação [35]. A Figura 4 esboça o conjunto experimental citado. A POF utilizada foi do modelo UFP-FB1000 da Toray Industries (Japão), sem revestimento de polietileno, $NA = 0,46$ e coeficiente de atenuação 150 dB / km para 650nm .

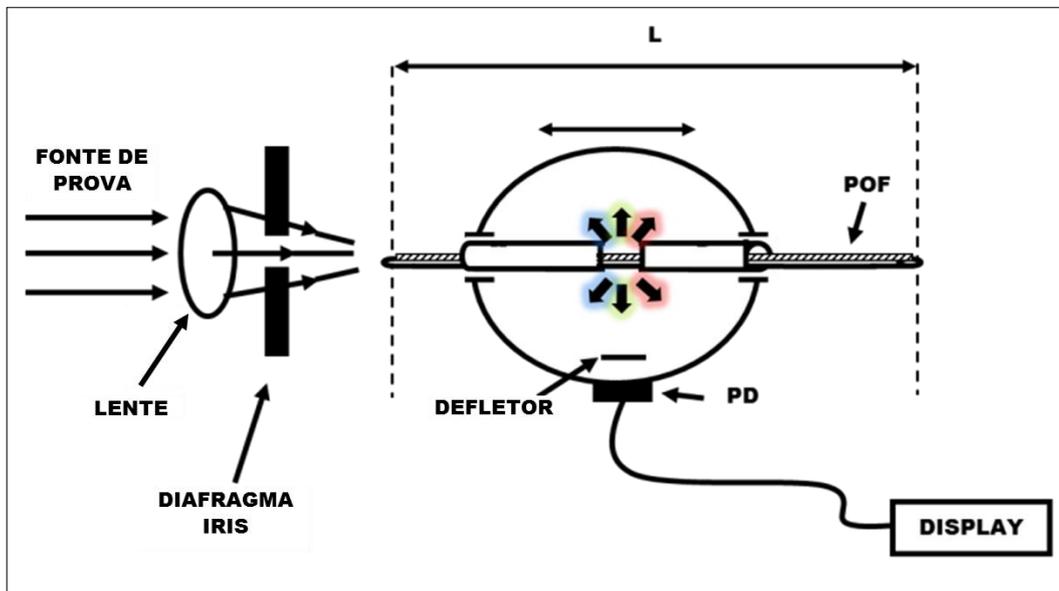


Figura 32: Configuração experimental da medição do espalhamento que ocorre pela lateral da fibra utilizando uma esfera integradora.



Figura 33: Esfera integradora do laboratório do *Polymer Optical Fiber Application Center (POFAC)* da utilizada nesta etapa.

4.3.2. Resultados e discussões

O Gráfico 7 mostra três curvas de integração da potência óptica irradiada lateralmente, correspondente a um ângulo na entrada da POF (do feixe de luz injetado) de 5°, 30° e 60°, ou seja, para diferentes aberturas numéricas (NA) de entrada. As parcelas foram todas normalizadas com a correspondente potência óptica injetada na POF.

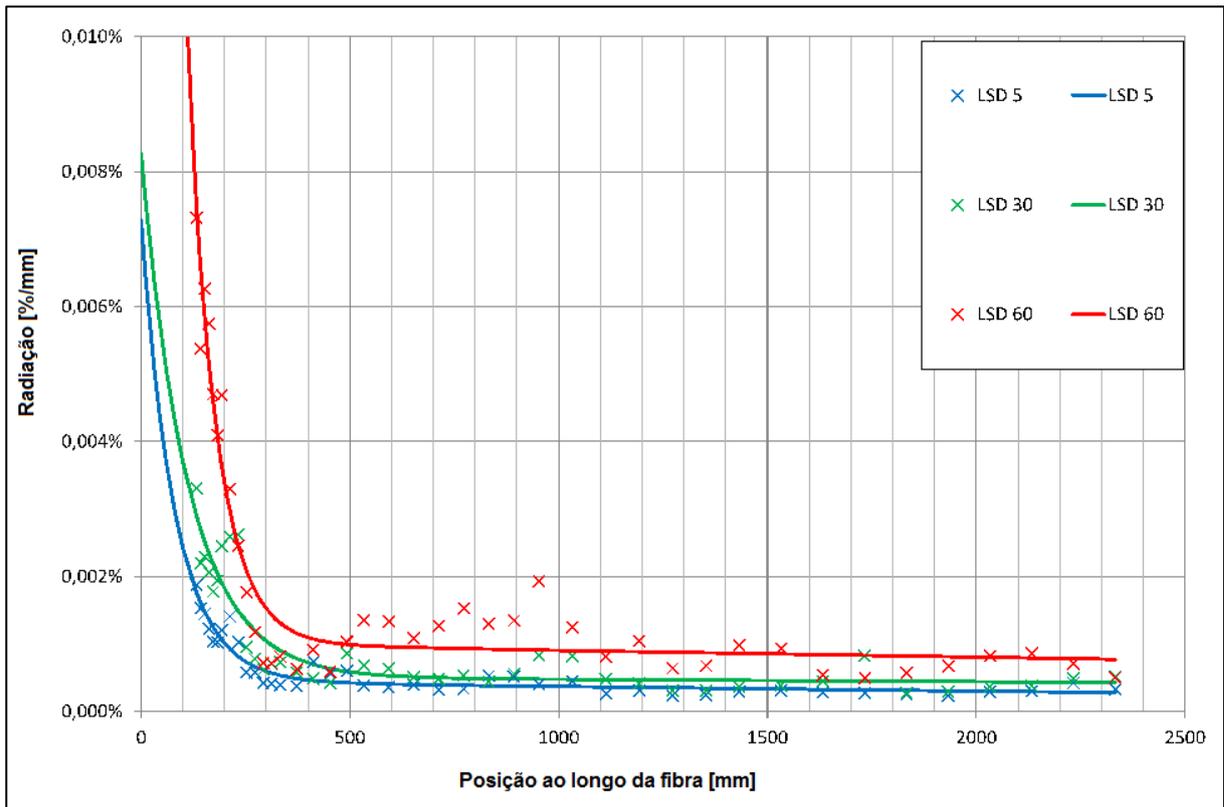


Gráfico 7: Curvas da integral da irradiação lateral devido ao espalhamento como uma função da condição de excitação (abertura numérica)

POF que emitem luz lateralmente são baseadas no espalhamento da luz de maneira espontânea ou de maneira otimizada, e têm sido investigados para fins de iluminação e decoração em muitas aplicações [32]. A radiação numa POF pode ser dividida em três diferentes tipos: a luz emitida pela lateral devido ao espalhamento, a luz guiada (incluindo a fração dispersa no interior do cone de aceitação) e a luz absorvida. A maior parte da luz espalhada é emitida através da superfície lateral, e uma fração menor é para frente ou para trás, acoplado ao ângulo de aceitação da fibra.

A curva em vermelho (60°) mostra que potência relativamente alta de radiação é espalhada lateralmente nos primeiros 200 mm de POF. Já que 60° é um ângulo grande de entrada, um grande número de modos de elevada ordem é excitado, incluindo no revestimento da fibra. Tais modos são altamente atenuados ou irradiados para fora da POF. A partir de 400 milímetros de comprimento, a potência irradiada na saída é praticamente fixada a um valor constante porque a maioria dos modos de ordem elevada foi separado por filtragem.

Para a entrada em 30°, um comportamento semelhante é observado quando comparado com o 60° no intervalo $z < 200$ mm, mas com irradiação de saída menor. Para a entrada com um ângulo de injeção menores do que 30°, a irradiação não é significativamente diferente para a faixa de $z > 500$ mm, já que modos de baixa ordem são bastante gerados para a injeção de luz com ângulos pequenos.

Nos primeiros 50 cm da POF, há muita luz acoplada no revestimento, que é rápida e intensamente atenuada durante a propagação. Como resultado, a potência óptica volta a estar concentrada no núcleo, mas o EMD ainda não foi atingido. Já foi demonstrado experimentalmente que o EMD para SI PMMA POF é geralmente alcançado após propagar-se por um comprimento na faixa de 8 a 100 m [1], dependendo da POF. No entanto, como visto anteriormente, a resposta do OPMo não é sensível à condição EMD [7] e estes resultados poderiam ser úteis para a melhor compreensão do funcionamento do OPMo operando com o EMD atingido ou não.

4.4. CONCLUSÕES

Em uma primeira fase de experimentos, o OPMo não mostrou um desempenho diferente para quando o JIS6863 era ou não utilizado em linha. Mais precisamente, o OPMo mostrou a mesma resposta para quando o misturador de modos estava em sua configuração original (enrolado) ou não (desenrolado).

Na segunda fase, a irradiação espalhada lateralmente foi medida e somada (integrada), realizando uma varredura axial com uma esfera integradora. Esta segunda etapa salientou que não é permitido que o OPMo seja inserido em linha em uma distância menor do que 50 cm de comprimento do transmissor óptico. Claro que tal "limiar" de 50 cm deve variar para diferentes POFs.

Como na primeira rodada de experimentos tivemos 3,4 m de POF desenrolada (do MS) entre o LED e o OPMo, uma insensibilidade quanto a distribuição modal era, de fato, esperada. No entanto, depois de alguns centímetros ou metros de POF, não é de se esperar que o EMD seja atingido, somente a ausência quase completa de modos no revestimento.

Em conclusão, o OPMo não proporciona um desempenho confiável quando há luz se propagando no revestimento, mas tem mostrado insensibilidade à distribuição modal no núcleo da fibra. Assim sendo, trata-se de uma vantagem tecnológica quando comparado com OPMos convencionais.

No momento, não é de nosso atual conhecimento a existência de um modelo físico já disponível para explicar a relação entre o modo de distribuição, o modo de acoplamento e a quantidade irradiada de luz pelo espalhamento lateral espontâneo na SI PMMA POF. Continuamos tentando identificar um modelo físico/matemático capaz de explicar os nossos resultados a partir da literatura conhecida, adaptado de modelos semelhantes ou até mesmo que está para ser desenvolvido.

5. SEGUNDO PROTÓTIPO DO MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA (OPMO-2): REDUÇÃO DO VOLUME, AUMENTO DA SENSIBILIDADE E EXTENSÃO DA FAIXA DINÂMICA

5.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do OPMo-2 manteve o mesmo princípio físico e mecanismo de funcionamento do OPMo-1: aproveita a luz que emerge espontaneamente pela lateral da fibra exposta, preservando a originalidade, a simplicidade, o baixo custo e o fato de não derivar qualquer percentual de luz guiada do núcleo de fibra (tipo *tap*, fibra-flexão ou acoplamento evanescente). Em outras palavras, o OPMo-2 também opera sem causar qualquer perturbação na propagação da luz e de maneira bidirecional.

O presente protótipo utiliza, além do PD1, um modelo comercial de *fotodarlington* diferente do utilizado anteriormente. A proposta era que o novo dispositivo, além de mais compacto, tivesse a sensibilidade aumentada quando comparado com o OPMo-1. Também deveria medir o nível de potência óptica média do sinal propagado para uma faixa dinâmica maior do que a do protótipo anterior, tudo isso sem interromper a transmissão de dados.

5.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

5.2.1. Um protótipo compacto utilizando dois fotodetectores distintos

O OPMo-2 foi construído a partir de um tubo maciço cilíndrico de cloreto de polivinila (PVC) contendo um orifício longitudinal, por onde passa um trecho total de 20 cm de POF com 2,2 mm de diâmetro (Figura 34). Novamente, cerca de 11 mm de POF teve a cobertura de poliestireno retirada e esse trecho foi posicionado no centro do tubo.

O volume do OPMo-2 obtido foi de $8,8\text{cm}^3$, ou seja, um fator-de-forma 96 vezes menor que o do 1º protótipo (cujo volume é de 847cm^3), como pode ser visualizado na Figura 35. Outros dois furos transversais foram usinados e posteriormente vedados da entrada de luz externa, por onde são inseridos o PD1 e o PD2 (Figura 37).

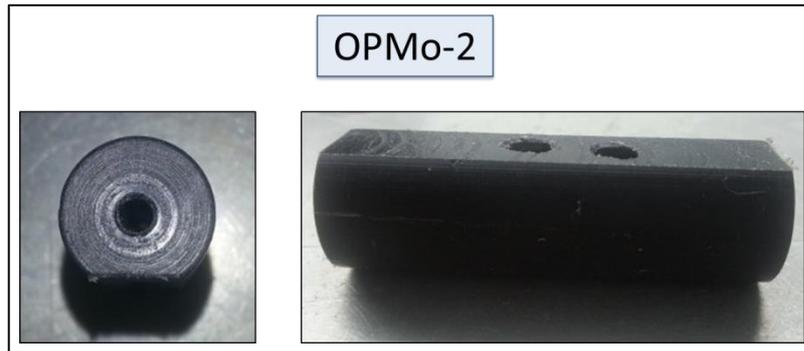


Figura 34: Furos feitos na peça de cloreto de polivinila (PVC) contendo um orifício longitudinal, por onde passa 20cm de comprimento de POF com 2,2 mm de diâmetro. Os dois furos transversais foram feitos para inserir os PDs.

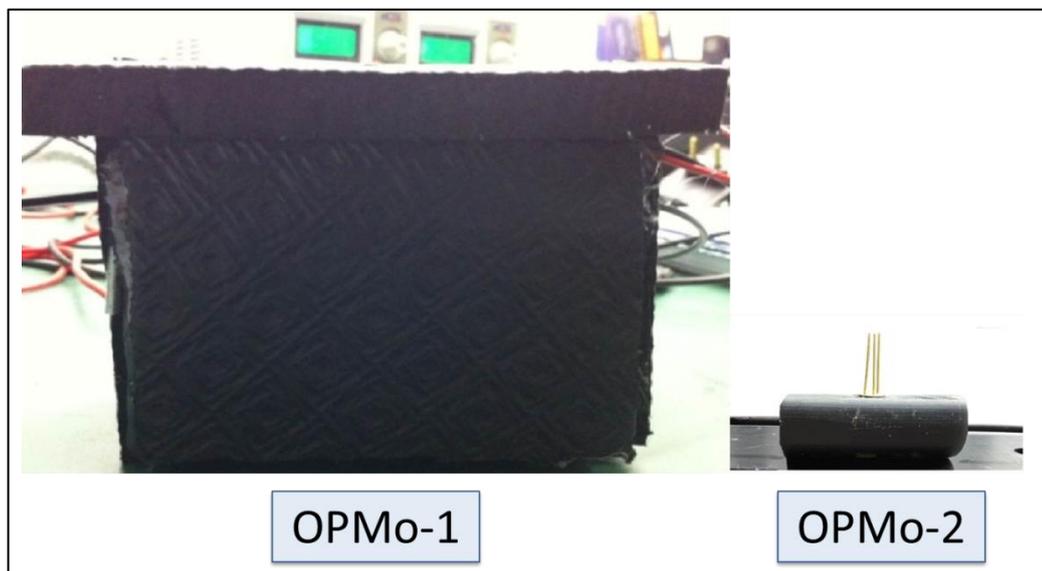


Figura 35: Vista lateral do OPMo-1 ($V = 847\text{cm}^3$) e do OPMo-2 ($V = 8,8\text{cm}^3$), ressaltando o fator-de-forma 96 vezes menor para o segundo protótipo.

O primeiro fotodetector (PD1), escolhido para ser o detector de "alta sensibilidade", foi o modelo de IFD93 da *Industrial Fiber Optics* (EUA), idêntico ao utilizado no OPMo-1. O mesmo procedimento delicado realizado anteriormente para viabilizar a exposição dos 1,5 mm da microlente integrada ao microchip do PD1 (removendo o encapsulamento externo de plástico) foi novamente executado.

Já o PD2 foi escolhido para ser de "alta saturação", ou seja, para estender a faixa dinâmica de operação para a região onde o PD1 entra em regime de saturação. Trata-se do modelo SD3410-001 da *Honeywell*, que possui um encapsulamento TO-46 (sem lente) e encontra-se disponível comercialmente. Mais uma vez, ele funciona simultaneamente como

detector de luz e amplificador, sem ter que recorrer a um circuito eletrônico adicional de amplificação.

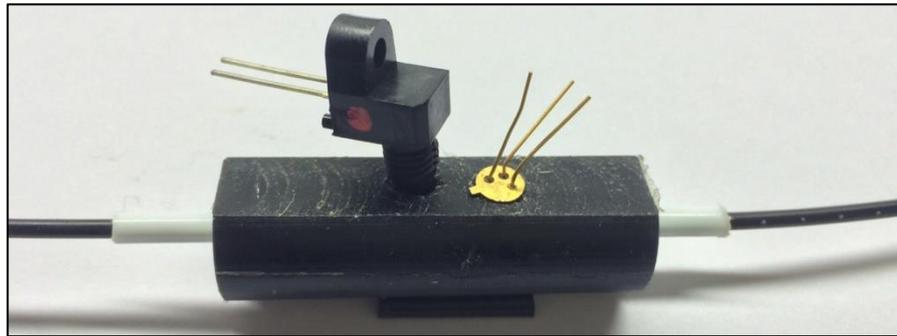


Figura 36: Proposta do OPMo-2, que utilizaria como fotodetectores tanto o IF-D93, da *Industrial FiberOptics*, quanto o SD3410-001, da *Honeywell*.

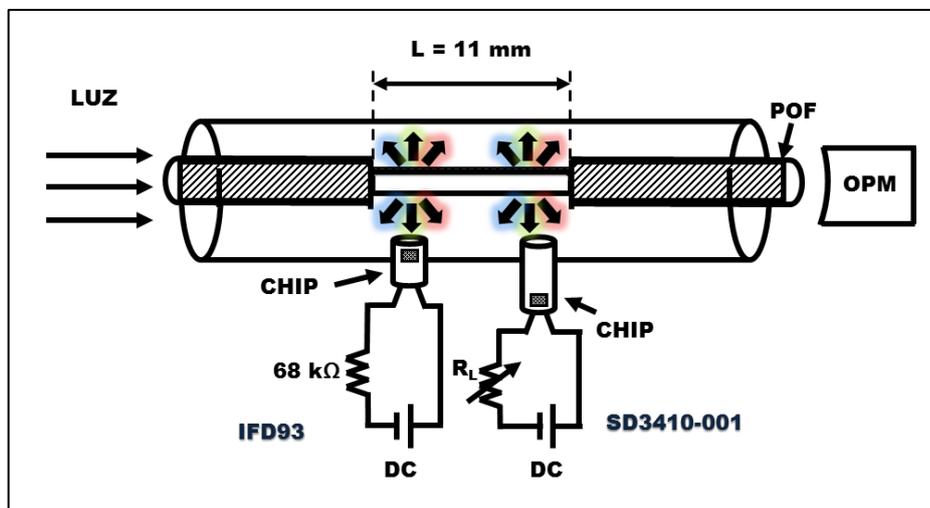


Figura 37: Modelo esquemático do OPMo-2. Para o PD1 foi atribuída uma impedância de carga resistiva fixa. Já para o PD2, a carga resistiva R_L conectada em série é variada por cinco vezes: partindo de $6,8 \text{ k}\Omega$, aumentando para $110 \text{ k}\Omega$, $220 \text{ k}\Omega$, $680 \text{ k}\Omega$ até o valor máximo de $1,010 \text{ M}\Omega$.

Uma impedância de carga resistiva R_L é conectada em série com cada um dos PDs e dois voltímetros idênticos foram utilizados separadamente para medir a tensão em cada uma das resistências. Os circuitos foram eletricamente polarizados com 5 V DC . A configuração experimental de calibração do OPMo-2 é mostrada na Figura 38.

Após a saída do OPMo-2, a luz guiada trafega por trecho de 20 cm da mesma POF de PMMA. A potência óptica de saída foi medida externamente por um medidor de potência óptica (OPM) de mão. Trata-se do OPM de alto desempenho da *Thorlabs* (EUA), modelo PM20, de -60 dBm de sensibilidade, o mesmo utilizado na calibração do OPMo-1. Todas as

medições foram realizadas em tempo real, isto é, sem o emprego de qualquer procedimento de cálculo da média do sinal com o intuito de para aumentar a relação sinal-ruído.

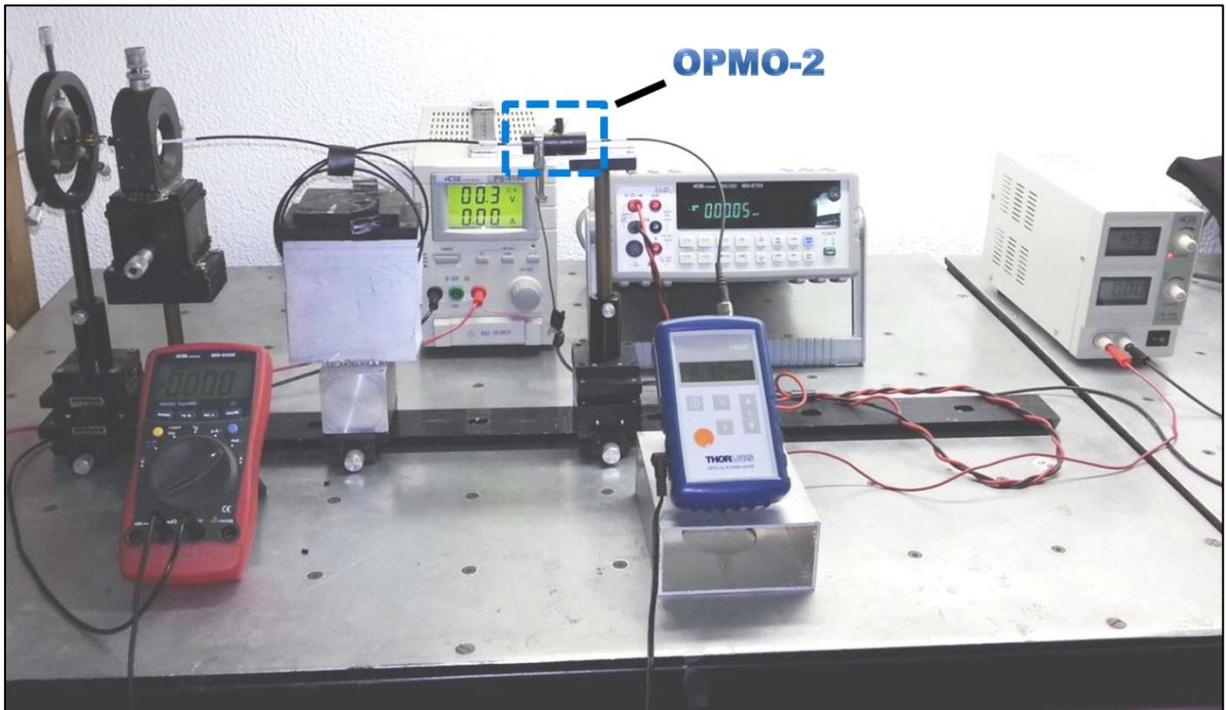


Figura 38: Configuração experimental de calibração do OPMo-2.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1. O aumento da sensibilidade

O mesmo LED utilizado na Seção 3.4 é utilizado como fonte de prova (da *DieMount*, emitindo luz no comprimento de onda central de 650nm, com ~30 nm de largura espectral). O Gráfico 8 mostra a tensão de saída (dBV) como uma função da potência óptica injetada (dBm) quando a carga R_L é variada de 6,8 k Ω até 1M Ω , quando o OPMo-2 opera utilizando apenas o PD2.

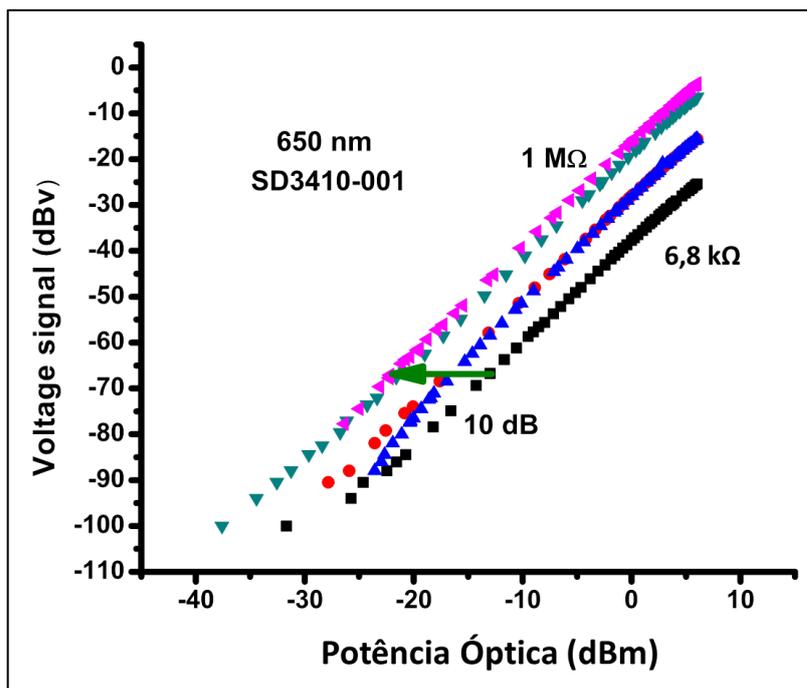


Gráfico 8: Resposta do OPMo-2 como uma função da impedância de carga resistiva quando o PD2 (SD3410-001) é usado como fotodetector. Um ganho de 10 dB na sensibilidade óptica do dispositivo é obtido.

Ao variarmos por cinco vezes o valor da impedância de carga R_L (de 6,8 kΩ, 110 kΩ, 220 kΩ, 680 kΩ até 1,010 MΩ) observamos o significativo aumento de 10 dB na sensibilidade óptica do OPMo-2, como pode ser visto no Gráfico 8. Não foi observada a saturação do fotodetector PD2, pelo menos até a potência óptica injetada de + 6 dBm.

Como foi extraído dos seus respectivos *datasheets*, o tempo de resposta típico do PD1 (IFD93) é de 5 ms, considerando um R_L de 1 kΩ. Isso resulta em uma capacitância de 5 μF. Já o tempo de resposta do PD2 (SD3410-001) do 2º protótipo é de 75 μs, considerando R_L de 100 Ω, que resulta em uma capacitância de 0,75 μF, cem vezes menor do que a do PD1.

Embora comercialmente obsoleto e de manipulação delicada e trabalhosa (para a extração do microchip *Optek 560* acoplado à microlente), a maior capacitância do PD1 indica que ele é intrinsecamente mais sensível que o PD2. Outro fator que contribui para a menor sensibilidade do PD2 é devido ao encapsulado TO-46, que forçosamente separa a uma distância de 4 mm o seu microchip interno da superfície da POF desencapada.

Considerando as relações $\tau_r = R_L C$, $Banda \propto (1/\tau_r)$ e assumindo que $Ganho\ elétrico \times banda = cte$, um cálculo simples nos mostra que o aumento da

impedância de carga de 6,8 k Ω até 1,010 M Ω gera um ganho de potência óptica de 10,8 dB ($= 10 \log(\sqrt{1 \text{ M}\Omega / 6,8 \text{ k}\Omega})$) no dispositivo, o que razoavelmente explica os 10 dB medidos.

A caracterização do OPMo não foi automatizada e não foi efetuada a média dos valores medidos. Até carga $R_L = 1 \text{ M}\Omega$, a resposta elétrica obtida era razoavelmente estável. Para $R_L > 1 \text{ M}\Omega$, uma sensibilidade e faixa dinâmica ainda mais elevadas puderam ser observadas, ao custo de uma instabilidade no sinal de saída, com uma flutuação considerável, que dificultava a leitura. Portanto, é provável que se consiga um aumento de sensibilidade ainda maior do que 10 dB apenas aumentando a carga resistiva R_L . Para isso, seria necessário realizar a média dos dados adquiridos por meio da amostragem do sinal.

O Gráfico 8 mostra que, diferente do PD1 utilizado no primeiro protótipo, o PD2 não satura para potências ópticas superiores a -5dBm. Uma vez que a sensibilidade pode ser aumentada, a faixa dinâmica é automaticamente aumentado para mais do que 45dB. No entanto, é difícil a vantagem de “alta sensibilidade” e de “alta saturação” utilizando um único fotodetector.

5.3.2. O aumento da faixa dinâmica

Com o objetivo de alcançar um aumento da faixa dinâmica, foi proposta uma técnica que utiliza 2 PD distintos. O Gráfico 9 mostra uma calibração para o OPMo-2, utilizando separadamente o IFD93 e SD3410-001 como PD1 e PD2, respectivamente. Como explicado no item 5.2.1, o PD1 opera como detector de “alta sensibilidade” e o PD2 como de “alta saturação” devido às suas características ópticas/geométricas/eletrônicas.

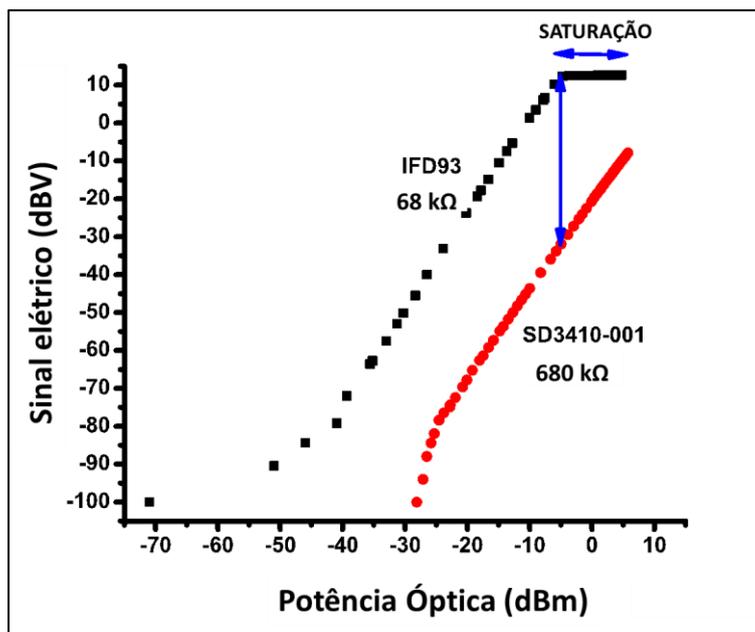


Gráfico 9: A resposta do OPMo usando separadamente cada um dos seus fotodarlington: o PD1 (IFD93) é o de "alta sensibilidade" e o PD2(SD3410-001) é o de "alta saturação".

5.4. RESULTADOS

Embora o IFD93 seja claramente mais sensível do que o SD3410-001, ele entra em regime de saturação para potência óptica injetada acima de -5 dBm. Diferente dele, na região de -5 dBm a +6dBm de potência injetada, o PD2 não satura.

A ideia é aproveitar as vantagens características de ambos os PDs simultaneamente. O primeiro método prevê a simplesmente a soma (em mV) de ambos os sinais V_1 e V_2 do PD1 e do PD2, respectivamente. No entanto, os sinais de V_1 saturadas são fixadas em valores muito mais elevados do que os sinais V_2 correspondentes, pois se trata de um gráfico logarítmico. Como resultado, a soma $V_1 + V_2$ mantém a resposta essencialmente a mesma, plana na região de saturação.

O segundo método realiza o processamento dos dados de maneira *off-line*, a fim de demonstrar o princípio. Os sinais a tensões mais baixas do que um valor limiar perto do piso ruído são definidos como nulos. Em seguida, as tensões V_2 de baixa magnitude (em mV) são multiplicadas por 50 (valor empírico). O objetivo era colocar ambos os sinais V_1 e V_2 com magnitudes mais próximas/comparáveis. Por último, o sinal V_2 resultante é somado com V_1 e, em seguida, convertido para dBV. O processamento de dados pode ser resumido como sendo

$(50 \times V_2[\text{mV}]) + V_1[\text{mV}] = V_{\text{SUM}}[\text{mV}] \rightarrow V_{\text{SUM}}[\text{dBV}]$. O resultado deste último procedimento é mostrado no Gráfico 10.

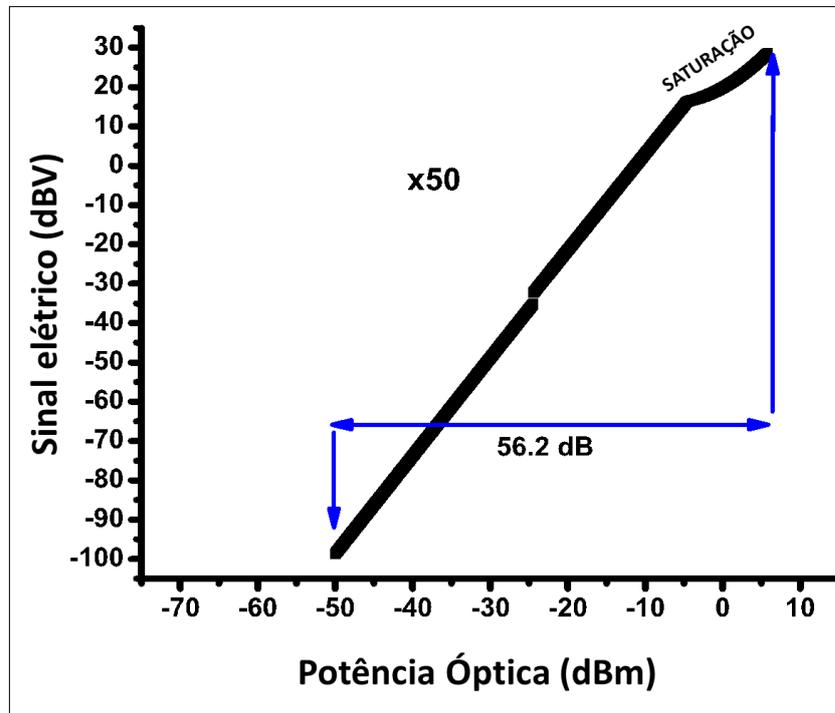


Gráfico 10: Curva do resultado da técnica de processamento de dados *off-line* aqui proposta. Com ela, um aumento de 11,2 dB é obtido, estendendo a faixa dinâmica para até 56,2 dB.

Para baixas potências ópticas ($P_{\text{OPT}} < -25$ dBm) apenas o PD1 contribui para a soma resultante. Na faixa de potências ópticas com valores intermediários (-25 dBm $< P_{\text{OPT}} < -5$ dBm), os sinais V_1 e $(50 \times V_2)$ são somados. Para potências ópticas mais elevadas ($P_{\text{OPT}} > -5$ dBm), o sinal de V_1 é fixado em torno de + 13 dBV. Contudo, os sinais V_2 apresentam uma inclinação linear para $P_{\text{OPT}} > -5$ dBm. Devido a multiplicação de V_2 por 50, a uma soma com V_1 apresentando uma inclinação positiva. Isto é porque os dois sinais apresentam agora uma ordem de grandeza semelhante. Como resultado mostrado na Fig.4, a faixa dinâmica do OPMo pode ser aumentada em 11,2 dB, atingindo, portanto, uma faixa dinâmica estendida para até 56,2 dB. O Resumo dos critérios e procedimentos adotados neste processamento *off-line* de dados proposto é mostrado na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Resumo dos critérios e procedimentos adotados no processamento *off-line* de dados proposto

Intervalo de Potência Óptica	Sinal elétrico que contribui	Sinal Resultante
$P_{OPT} < -25 \text{ dBm}$	Somente V_1	V_1
$-25 \text{ dBm} < P_{OPT} < -5 \text{ dBm}$	V_1 e V_2	$V_1 + (50 * V_2)$
$P_{OPT} > -5 \text{ dBm}$	V_1 (valor fixo) e V_2	V_1 (fixado em 13 dBV) + V_2

Deve salientar-se que a faixa dinâmica de 56,2 dB foi medida utilizando dois DPs, sendo que um deles é classificado como sendo de "alta saturação". No entanto, a potência óptica máxima injetada de + 6 dBm foi efetivamente limitada pela fonte de luz. É provável que o PD₂ sature com a incidência de potências ópticas superiores aos + 6 dBm, levando a uma subestimação da faixa dinâmica.

5.5. CONCLUSÃO

O OPMo-2 é uma versão aprimorada do OPMo-1, mas que manteve diversas características originais em seu mecanismo de funcionamento [8] e é quase 100 vezes mais compacto em volume do que o primeiro protótipo

Um aumento de impedância de carga resistiva em série com o *fotodarlington* leva um aumento de sensibilidade e, como é de se esperar, uma redução na largura de banda. No entanto, esta última não é de fato importante para OPMos, uma vez que ele mede a potência óptica média. Um aumento da impedância de carga associada ao PD de 6,8 kΩ até 1MΩ proporcionou um aumento de 10 dB de sensibilidade óptica e, obviamente, o mesmo aumento para a faixa dinâmica.

Em um segundo momento, foram utilizados dois detectores *fotodarlington* diferentes: um de "alta sensibilidade" e o outro para medições de "alta saturação". Os sinais gerados por cada um dos PD foram ponderados e somados (*off-line* e externamente) com o intuito de contornar região onde a resposta do PD₁ estava em regime de saturação. Como resultado, conseguimos alcançar uma maior faixa dinâmica de 56,2 dB, ou seja, 11,2 dB maior que a do protótipo anterior.

Como o atual OPMo ainda não está automatizado, as medidas foram realizadas manualmente e as leituras visualmente. Com até $R_L = 1M\Omega$, a leitura do voltímetro era bastante estável. Para $R_L > 1M\Omega$, verificou-se ser possível obter uma sensibilidade (e faixa dinâmica) ainda maior, porém a aquisição de dados deveria ser por amostragem e promediação. Portanto um aumento de sensibilidade ainda maior que 10 dB é possível apenas com um aumento de R_L e o processamento de dados.

Como conclusão final, a sensibilidade e a faixa dinâmica do nosso OPMo tanto pode ser aumentada usando duas técnicas simples combinadas ou não, ainda que não se seja feito o procedimento da média do sinal.

6. DESENVOLVIMENTO DO TERCEIRO PROTÓTIPO DO MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA (OPMO-3) PARA 2 CANAIS WDM

6.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do OPMo-3 tem o intuito de torná-lo ainda mais completo que a versão anterior, sendo capaz de detectar e medir simultaneamente, para 2 canais WDM (470 nm e 650 nm), os níveis de potência óptica média que trafegam em um enlace de POF PMMA.

Neste capítulo trataremos dos procedimentos necessários para o desenvolvimento do OPMo-3, bem como a montagem experimental, medidas de calibração e caracterização, analisando, por fim, os resultados obtidos.

6.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O OPMo-3 é uma versão aprimorada e mais completa do OPMo-2. O novo protótipo manteve a estrutura utilizada no OPMo-2. A configuração para medidas de caracterização e calibração é mantida (Figura 38). Também foi construído a partir de um tubo maciço de PVC, contendo um furo transversal, por onde passa um trecho total de 20cm de POF (com 2,2 mm de diâmetro) e dois orifícios longitudinais, vedado da entrada de luz externa, onde ficam inseridos dois PDs. Para estes últimos, mantivemos a escolha do modelo SD3410-001 da *Honeywell*. Mais uma vez, o fotodetector funciona simultaneamente como detector de luz e amplificador, em princípio sem a necessidade de implementar um circuito eletrônico adicional de amplificação. O volume do OPMo é o mesmo do OPMo-2, ou seja $8,8 \text{ cm}^3$, e em seu interior (no centro do tubo) encontra-se cerca de 11 mm de POF sem a cobertura de poliestireno. Uma impedância de carga resistiva de $680 \text{ k}\Omega$ é conectada em série com cada um dos PDs.

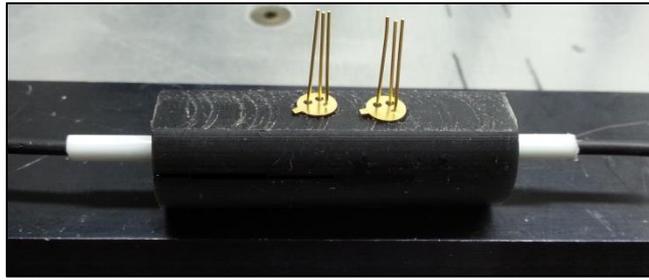


Figura 39: OPMo-3 com dois PD idênticos, modelo SD3410-001 da *Honeywell*., fixados nos seus dois orifícios longitudinais

A Figura 40 ilustra, com um modelo esquemático, o conjunto experimental para a caracterização e calibração do OPMo-3.

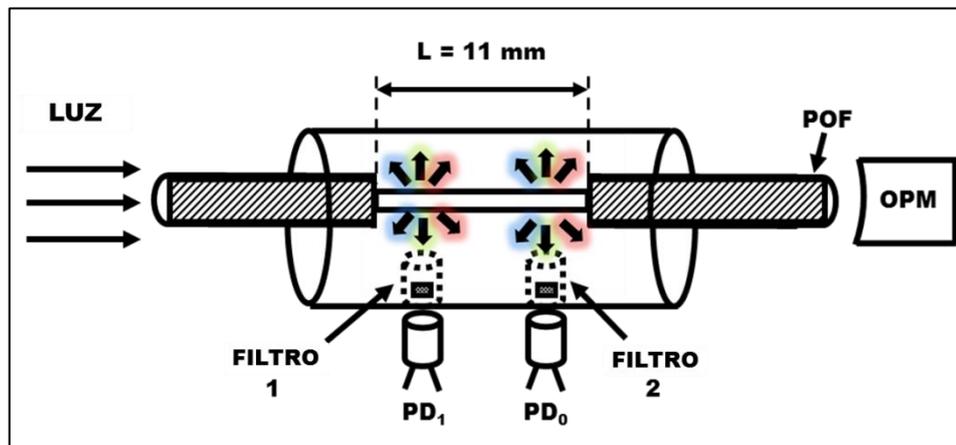


Figura 40: O esboço dos dois canais WDM OPMo.

Nestas experiências preliminares, uma ou mais camadas de folhas de celofane de cores distintas foram utilizadas como filtros ópticos seletivos. O teste básico foi verificar se o filtro "1" permite transmitir o canal $\lambda_1 = 470$ nm com pouca perda e, ao mesmo tempo, é capaz de rejeitar o segundo canal ($\lambda_2 = 650$ nm). O mesmo procedimento foi realizado com o filtro "2". Uma vez que foram selecionados os filtros de celofane e o número de camadas correspondentes para cada um, eles foram posicionados em frente à janela plana transparente de cada um dos dois fotodetectores e inseridos, então, nos dois orifícios transversais da estrutura do OPMo-3 como pode ser visto na Figura 40.

A utilização de papel celofane como um filtro óptico é uma solução muito conveniente, simples e barata. O custo de uma folha de celofane única de dimensões 85 cm por 100 cm é de cerca de R\$ 1,00, permitindo cortar diversas dezenas de filtros. No entanto, os papéis celofane são conhecidos por perder a sua cor com o tempo/uso e especialmente sob

a incidência da luz solar devido à radiação ultravioleta. O OPMo-3 foi cuidadosamente vedado da incidência de qualquer fonte de luz externa. Portanto, espera-se que os papéis de celofane utilizados como filtros ópticos tendem a manter as suas características espectrais por longo tempo. Certamente a resiliência dos papéis celofane ainda deve ser testado na prática. Qualquer filtro genérico "i", adequado para o canal " λ_i ", sempre irá introduzir alguma atenuação. O seu efeito consiste em reduzir a sensibilidade efetiva e, provavelmente, a faixa dinâmica do PD correspondente. No entanto, cada filtro deve apresentar um elevado grau de rejeição para os outros comprimentos de onda.

Após a montagem experimental, com os filtros e PD alocados em seus devidos lugares, praticamente todos os equipamentos e medidas para calibração/caracterização são repetidos para o OPMo-3. Como ocorre nos outros dois protótipos, uma pequena quantidade de luz espalhada a 90° da direção do eixo do enlace de POF é recolhida para o chip do detector, só que dessa vez isso ocorre após a filtragem óptica.

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas traçadas nos Gráfico 11 e Gráfico 13 mostram a resposta do OPMo-3 para cada um dos PD com seus respectivos filtros ópticos. Nelas, os valores experimentais para cada LED formam linhas retas quase paralelas, com coeficiente angular ligeiramente mais elevado do que o esperado valor teórico 2 [7, 41]. A dependência linear delimita a faixa dinâmica fornecida por cada canal

O Gráfico Gráfico 13 mostra a resposta OPMo-3 considerando apenas o canal 1, onde são utilizadas duas camadas de folha de filtro azul. As fontes de prova centradas em 470 nm e 650 nm (os mesmos LEDs da *DieMount* utilizados na Seção 3.4) não foram injetados simultaneamente no OPMo. Uma varredura da potência óptica injetada (dBm) foi realizada e os sinais elétricos de saída (dBV) foram medidos. Para a fonte centrada em 470 nm, foi obtida a sensibilidade e faixa dinâmica de -25 dBm e 28dB, respectivamente. Repetindo a mesma varredura, mas para a fonte centrada em 650 nm, a rejeição medido foi de 45 dB.

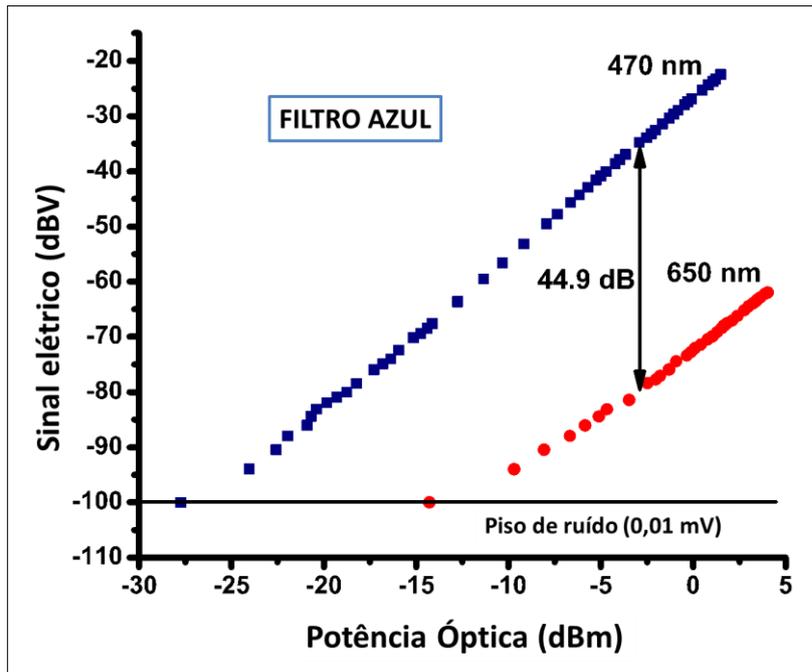


Gráfico 11: A resposta do canal de azul (470 nm) do OPMo destacando a rejeição do filtro de 44,9 dB sob o lançamento 650nm. Foram utilizadas duas camadas de folhas de filtro azul como filtro passa-banda.

Os filtros 1 e 2 foram de folha de celofane nas cores azul e laranja, respectivamente. Durante este experimento, as folhas de celofane na cor vermelha não estavam disponíveis. O filtro 1 deve transmitir o canal λ_1 com alta eficiência e rejeitar o canal 2. O funcionamento análogo deve ocorrer para o filtro 2. O número de camadas de celofane necessário foi testado tanto para a máxima transmissão quando para a máxima rejeição para cada canal.

O Gráfico 12 mostra a resposta do OPMo-3 considerando apenas o canal 1, onde são utilizadas três camadas de folha de filtro de laranja. As mesmas fontes de prova centradas em 470 nm e 650 nm foram utilizadas e não foram injetados simultaneamente no OPMo.

Uma varredura da potência óptica injetada (dBm) foi realizada e os sinais elétricos de saída (dBV) foram medidos. Para a fonte centrada em 650 nm, foi obtida a sensibilidade e faixa dinâmica de -35 dBm e 40 dB, respectivamente. Repetindo a mesma varredura, mas para a fonte centrada em 470 nm, a rejeição medida foi de 20,2 dB.

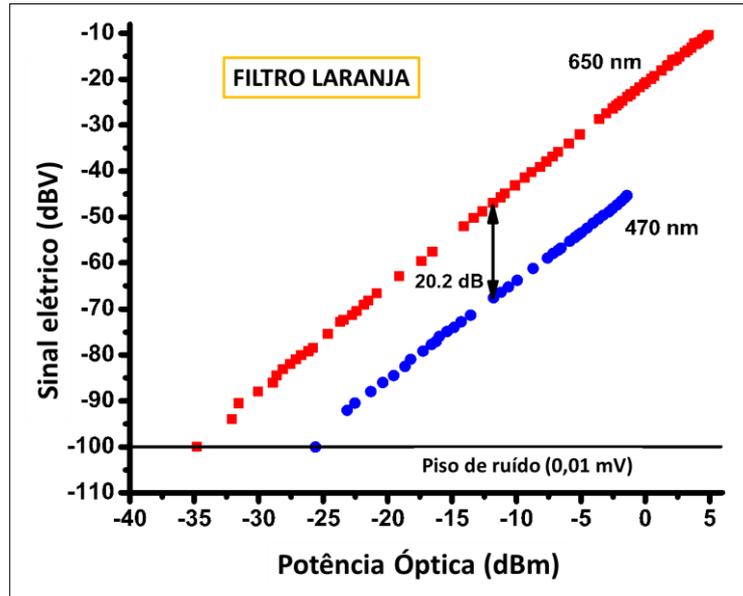


Gráfico 13: A resposta do canal de vermelho (650 nm) da OPMo destacando o filtro de rejeição 20,2dB sob o lançamento 470nm. Utilizaram-se três camadas de folhas de filtro de laranja.

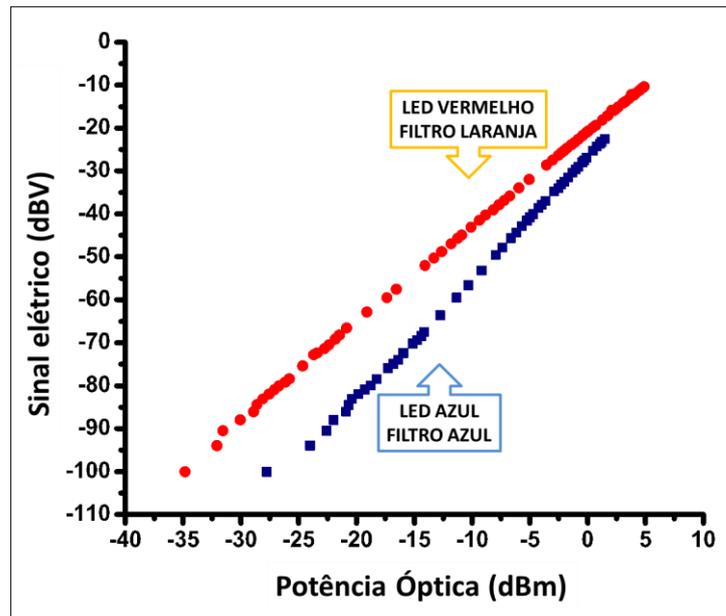


Gráfico 14: A resposta do canal 1 (470nm) e canal 2 (650nm) do OPMo utilizando filtros ópticos nas cores azul e laranja, respectivamente

A inclinação das retas para o canal 1 e 2 foi de 2,8 e 2,2. Essa diferença entre esses dois valores foi inesperada. De qualquer maneira, apesar dos diferentes valores de coeficiente angular e da diferença deles quando ambos são comparados com o valor teórico de 2,0 [7, 41],

isso em nada afeta a operação OPMo-3, desde que uma calibração cuidadosa seja feita previamente.

6.3.1. Conclusão

O principal objetivo deste último protótipo, o OPMo-3 foi mostrar a prova de princípio de um Monitor de Potência Óptica adequado para operar com dois canais WDM em um enlace baseado em POF de PMMA. A pior rejeição medida foi de 20,2 dB. Acredita-se que a razão para essa rejeição razoável seja devido a utilização de um "filtro laranja" ao invés de um "filtro vermelho". Isto só não ocorreu porque o celofane vermelho não estava disponível no momento das experiências.

7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto desenvolvido ao longo desta dissertação foi bastante intenso e proporcionou resultados de grande relevância. Trata-se do desenvolvimento de um dispositivo de características originais em seu mecanismo de funcionamento, adequado para enlaces utilizando fibra óptica polimérica padrão SI-PMMA. As POFs de PMMA foram utilizadas neste trabalho, não só por causa de sua utilidade intrínseca para redes ópticas de curta distância (menores que 500 m) [1], mas também devido à conveniência proporcionada pelo uso de luz visível e do maior diâmetro das POFs em relação as GOFs.

Três protótipos de um Monitor de Potência Óptica foram experimentalmente desenvolvidos. Diversas características são comuns a todos eles: são simples, de baixo custo e não-invasivos, no sentido de que não retiram qualquer parte da luz guiada no núcleo da fibra, pois coletam e detectam a luz espalhada espontaneamente pela lateral descascada da POF utilizando um (OPMo-1) ou dois (OPMo-2 e OPMo-3) *fotodarlington*s. Os protótipos de OPMo (1, 2 ou 3) de laboratório foram feitos para serem inseridos em linha e indicar se um enlace de transmissão usando POF está no estado ativo ou inativo. Se ativo, mediria o nível médio de potência óptica do sinal propagante sem que seja necessário desconectar e, portanto, não interromper a transmissão deste enlace à fibra.

O OPMo-1 mostrou-se altamente imune à distribuição modal e apresentou uma sensibilidade de -50dBm com faixa dinâmica de 45dB.

O OPMo-2, aproximadamente 96 vezes mais compacto que o anterior, utilizou inicialmente um e posteriormente dois *fotodarlington*s comerciais com encapsulamento TO-46. Diferente do que ocorria com o 1º protótipo, para este 2º protótipo (otimizado) operando com um canal de comprimento de onda, não se observou a saturação para a potência óptica injetada acima de -5 dBm. Com o aumento da impedância de carga associada ao fotodetector, de 6,8 k Ω até 1 M Ω , um aumento de até 10 dB na sensibilidade óptica (e na faixa dinâmica) foi obtido, quando apenas um PD foi utilizado.

Foi possível também aumentar a faixa dinâmica em 11,2 dB com a utilização de dois diferentes *fotodarlington*s: um para a região de baixa potência, onde é exigida alta sensibilidade, e outro para a detecção na região onde era observada a saturação. Desta forma, ao utilizar um simples processamento externo de dados *off-line*, foi possível contornar o

problema saturação do OPMo, para um canal de comprimento de onda. Com isso, o dispositivo tornou-se mais robusto, com sensibilidade de -50 dBm e faixa dinâmica de 56,2 dB, mantendo-o compacto e com a utilização de circuitos eletrônicos simples.

Na última parte do trabalho, foi mostrado o desenvolvimento de um OPMo destinado a detectar e medir simultaneamente os níveis da potência óptica média de dois canais WDM (470nm e 650nm). Com o objetivo de demonstrar o princípio de funcionamento, foram utilizados filtros ópticos de plástico de baixo custo.

Para a fonte centrada em 650 nm, foi obtida a sensibilidade e faixa dinâmica de -35 dBm e 40 dB, respectivamente. Repetindo a mesma varredura, mas para a fonte centrada em 470 nm, a rejeição medida foi de 20,2 dB. Já para a fonte centrada em 470 nm, foi obtida a sensibilidade e faixa dinâmica de -25 dBm e 28 dB, respectivamente. Repetindo a mesma varredura, mas para a fonte centrada em 650 nm, a rejeição medida foi de 45 dB.

O presente dispositivo OPMo permite uma maior otimização, a fim de melhorar a sensibilidade e a faixa dinâmica com o aumento de ganho de amplificação, amplificação logarítmica [31], amplificação com controle automático de ganho, maior coleta da luz espalhada ao longo do comprimento ~ 11 mm (ou mais) de fibra descascada, média de sinal ao longo do tempo e processamento.

No futuro próximo, o dispositivo pode ser desenvolvido ao estágio de protótipo de campo. Deve ser mais robusto e mecanicamente estável para estar apto a utilizar um microprocessador ou micro controlador para controle e processamento de dados e um visor de cristal líquido (matriz de LCD) e/ou com interface de comunicação para visualização de medição local ou remotamente. A alimentação pode ser fornecida por fontes de corrente alternada, baterias ou ambos.

O OPMo também pode ser desenvolvido utilizando o mesmo princípio, mas adaptado para POFs per-fluoretadas na faixa de 850-1300 nm [1] ou fibras de sílica que funcionam nas bandas de telecomunicações correspondente ao infravermelho, em torno de 850, 1310 e, principalmente, 1550 nm [28, 9].

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, “POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems”, 2nd edition, Springer, 2008.
- [2] “The MOST System – “Automotive Application of POF”, Andreas Grzempa, March, 2008.
- [3] S. Abrate et al, “Step-index PMMA fibers and their applications”, InTech, June 2013, Chapter 7, p.177-202, 2013.
- [4] J. Zubia and J. Arrue, “Plastic optical fibers: an introduction to their technological processes and applications”, *Optical Fiber Technology*, 7, p.101–40, 2001.
- [5] S. Kato, O Fujishima, T. Kozawa and T. Kachi, “Transmission characteristics of a 250 Mb/s POF datalink employing GaN green LED”, ICPOF 2004, Nürnberg, Germany, p. 232-236, 2004.
- [6] R. M. Ribeiro, T. A. M. G. Freitas, A. P. L. Barbero, P. S. T. C. Cyrillo, W. S. Zanco and O. S. Xavier, “A Novel Optical Power Monitor (OPM) for Plastic Optical Fibre (POF) Links”, 20th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 2011), Bilbao, Spain, September 14-16, 2011.
- [7] Ricardo M. Ribeiro, Taiane A.M.G. Freitas, Andrés P.L. Barbero and Vinicius N.H. Silva, “Non-Disturbing Optical Power Monitor for Links in the Visible Spectrum Using Polymer Optical Fibres”, *Measurement Science and Technology*, 2015.
- [8] Kashyap R 2013 The Fiber fuse—from a curious effect to a critical issue: a 25th year retrospective *Opt. Express* 21 6422–41.
- [9] Agrawal G P 2013 *Nonlinear Fiber Optics* 5th ed (Kidlington: Academic)
- [10] R. M. Ribeiro, Notas de Aula – Optoeletrônica e Fotônica: Fibras Ópticas Poliméricas – Capítulo 1, Niterói, Rio de Janeiro, 2011
- [11] Google, “Google Images”. Disponível em: <<https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi>> Acessado em Janeiro 2015.
- [12] R. J. G. Pereira, “Fibras ópticas e WDM,” [Online]. Disponível em: http://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/index.html [Acesso em Janeiro 2015].
- [13] J. Zubia e J. Arrue, “Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications,” *Optical Fiber Technology*, p.101-140, Abril 2001.
- [14] I. A. S. d. Oliveira, Estudo e Caracterização de Fibras Ópticas Plásticas para Aplicações em Telecomunicações, Curitiba, 2004, p. 142.

- [15] M. Raghavendra e P. V. Prasad, “A Novel Approach for Optimized Dispersion in Optical Fiber Communication”, IJRRAS, p.177-182, Agosto 2010.
- [16] H. J. R. Dutton, Understanding Optical Communications, IBM Corporation, 1998.
- [17] LEONI Fiber Optics, General Catalogue - Fiber Optics: Light Switching, Light Transportation, Light Distribution.
- [18] T. G. Brown, Handbook of Optics - Devices, Measurements, and Properties. Capítulo 10, 2ª ed., vol. 2, McGraw-Hill , Inc., 1995.
- [19] *Apostila USP Capítulo 5*, Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicall/apostila_cap_05.pdf>. Acessado em 11 de março de 2015.
- [20] Morimoto, Carlos E. Guia do Hardware. Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/termos/transistor>>. Acessado em 22 de outubro de 2015.
- [21] João Mello, “A verdadeira História do Transistor”. Disponível em: <<http://www.bn.com.br/radios-antigos/semicond.htm>>. Acessado em 22 de outubro de 2015.
- [22] *Darlington*. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/93-cursos/curso-de-eletronica/2701-cbe004?showall=&start=3>>. Acessado em 22 de outubro de 2015.
- [23] *Photodarlington*. Disponível em: <<http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/phototransistor/photodarlington.php>>. Acessado em 22 de outubro de 2015.
- [24] MELLO, Hilton A. e INTRATOR, Edmond. Dispositivos Semicondutores, Livros Técnicos e Científicos, 4a edição.
- [25] *Transistor*. Disponível em: <<http://www.eletronica-pt.com/componentes-eletronicos/transistor-tipos#darlington>>. Acessado em 22 de outubro de 2015.
- [26] Derickson D. (ed) 1998 Fiber Optic Test and Measurement (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall) p. 55–86.
- [27] *Velickov Engineering*. Disponível em: <www.velickov.eu/pof_en.html#pof_fpm>. Acessado em 10 de maio de 2015.
- [28] James S M, Ferguson D A and Drouet D 1989 Clip-on optical fibre power measurements *IEE Colloquium on Fibre Optic LANs and Techniques for the Local Loop (London, 17 March 1989)* p.14/1–8.
- [29] Sezerman O M *et al* 2006 Microstructuring optical wave guide devices with femtosecond optical pulses *US Patent 7,095,931 B2*, 2006.

- [30] Polarisation Controller, Fiber Switch, Specialty Fibers, Fiberoptics Technology. Disponível em: <www.fiberlogix.com>. Acessado em 10 de outubro de 2015.
- [31] Krishnan S, Bindra K S and Oak S M 2008 A sensitive and high dynamic range CW laser power meter *Rev. Sci Instrum.* **79** 125101
- [32] J. Fischer, H. Poisel, A. Bachmann, F. Süß, A. Wagner and K.F. Klein, “A standard proposal for characterizing side-emitting fibers”, 20th ICPO2011, paper POS_051, Bilbao, Spain, 2011.
- [33] Fiber Optic Test & Photonic Lab Equipment Manufacturer, Terahertz Technologies Inc. Disponível em: <www.terahertztechnologies.com>. Acessado em 24 de junho de 2015.
- [34] H. Poisel, G. de Preux, A. Bachmann, O. Ziemann and K.-F. Klein, “Characterisation of side-emitting fibers”, 18th ICPOF2009, paper PS_40, Sydney, Australia, 2009.
- [35] S. Feistner, H. Lichotka and H. Poisel, “Thermal stability of POF couplers”, 10th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF2001), Amsterdam, The Netherlands, September 27-30, p. 251-256,2001.
- [36] R. M. Ribeiro and M. M. Werneck, “Improvements of resolution and precision of a wavelength-encoded electrical current sensor using an ultra-bright light-emitting diode transducer”, *Transaction of the Institute of Measurement and Control*, 30, p. 153-171, 2008.
- [37] Honeywell, Optical Sensors, Product Range Guide, Sensing and Control, p. 6–7. Disponível em: <www.honeywell.com/sensing>. Acessado em 24 de junho de 2015.
- [38] Bunge C A, Kruglov R and Poisel H 2006 Rayleigh and Mie scattering in polymer optical fibers *J. Light. Technol.* 24 3137–46.
- [39] Miles R B, Lempert W R and Forkey J N 2001 Laser Rayleigh scattering *Meas. Sci. Technol.* 12 R33–51.
- [40] Ribeiro R M, Martins L and Werneck M M 2005 Wavelength demodulation of ultrabright green light-emitting diodes for electrical current sensing *IEEE Sensors J.* **5** 38–47.
- [41] Marcuse D 1981 *Principles of Optical Fiber Measurements* (Kidlington: Academic) p. 218–24.
- [42] HowStuffWorks Brasil, “Como funciona o processador Intel Core i7”, Disponível em: <<http://tecnologia.hsw.uol.com.br/core-i7.htm>>. Acessado em 10 de novembro de 2015.

[43] Mundo Bit, “Nova fibra ótica chega a 255 Tbps de velocidade”, Disponível em: <http://blogs.ne10.uol.com.br/mundobit/2014/10/28/nova-fibra-otica-chega-255-tbps-de-velocidade>. Acessado em 11/01/2016.

[44] Agrawal G P 2013 *Nonlinear Fiber Optics* 5th ed (Kidlington: Academic) p.63-65.

APÊNDICES

APÊNDICE A -Fotodarlington IF-d93, da <i>Industrial Fiber Optics</i>	92
APÊNDICE B -Fotodarlington sd3410-001, da <i>Honeywell</i>	94
APÊNDICE C -LEDs Diemount	97

Plastic Fiber Optic Photodarlington

IF-D93



DESCRIPTION

The IF-D93 is the active photodarlington device in Industrial Fiber Optics' family of low-cost, medium-frequency, short-distance fiber optic LEDs and detectors. Each LED and detector consists of a PC housing, an internal active element such as an LED or photodetector subcomponent, and a cinch nut to hold the fiber in place. The PC housing retains the active element and the cinch nut while optimizing coupling between the active element and the jacketed 1000 μm plastic fiber.

Working with this family of fiber optics is simple: No special tools or training required. Only a sharp knife or razor blade is needed to terminate the plastic fiber. When the fiber is inserted in the LED or detector housing, tighten the cinch nut. Thereafter, the fiber can be removed simply by loosening the nut.

APPLICATIONS

- ▶ Household Appliances
- ▶ Motor Controller Triggering
- ▶ PC-to-Peripheral Links
- ▶ Medical Instruments
- ▶ Automotive Electronics
- ▶ Audio Systems
- ▶ Electronic Games
- ▶ Robotics Communications

FEATURES

- ◆ No Optical Design Required
- ◆ Mates with Standard 1000 μm Core Jacketed Plastic Fiber Cable
- ◆ Internal Micro-Lens for Efficient Coupling
- ◆ Inexpensive Plastic Connector Housing
- ◆ Connector-less Fiber Termination and Connection
- ◆ Interference-Free Transmission from Light-Tight Housing
- ◆ Large Current Gain

MAXIMUM RATINGS

($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Operating and Storage Temperature Range (T_{OP}, T_{STC})-40° to 85° C
Junction Temperature (T_J)85° C
Soldering Temperature (2 mm from case bottom) (T_S) $t \leq 5$ s240° C
Collector Emitter Voltage (V_{CEO})15 V
Emitter Collector Voltage (V_{ECO})5 V
Collector Current (I_C)50 mA
Collector Peak Current (I_{CM}) $t = 1$ ms100 mA
Power Dissipation (P_{TOT}) $T_A = 25^\circ\text{C}$100 mW
De-rate Above 25° C1.33 mW/°C

CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Wavelength for Maximum Photosensitivity	λ_{PEAK}	850	nm
Spectral Bandwidth ($S = 10\%$ of S_{MAX})	$\Delta\lambda$	400-1100	nm
Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($R_L = 1k, V_{CE} = 5$ V, $\lambda = 880$ nm) See Figure 2.	t_r, t_f	5, 2.5	ms
Responsivity min. @ 880 nm @ 632 nm	R	400 200	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$ $\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Collector Dark Current ($V_{CE} = 15$ volts)	I_{CEO}	< 100	nA
Breakdown Voltage ($I_C = 1$ mA)	BV_{CEO}	≥ 15	V
Breakdown Voltage ($I_C = 100$ μA)	BV_{ECO}	≥ 5	V
Saturation Voltage ($I_C = 0.4$ μA , $H = 10$ μW)	$V_{CE sat}$	1.10	V

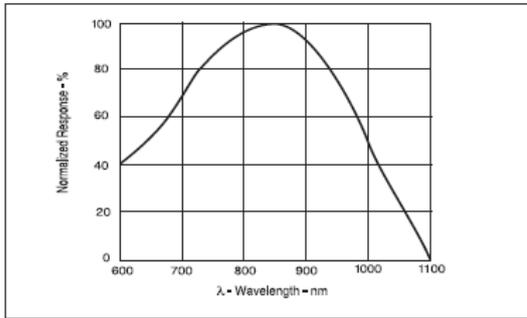


FIGURE 1. Typical detector response versus wavelength.

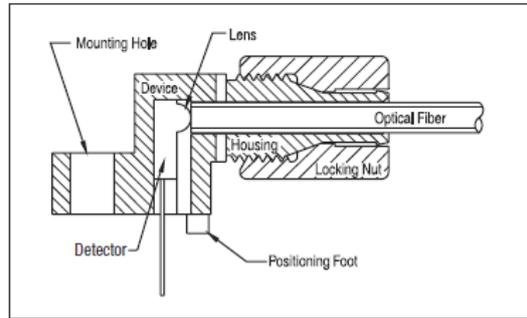


FIGURE 3. Cross-section of fiber optic device.

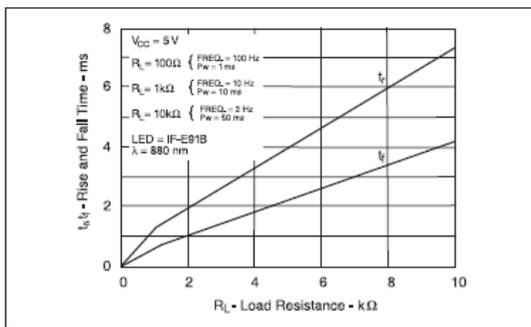


FIGURE 2. Rise and fall times versus load resistance.

FIBER TERMINATION INSTRUCTIONS

1. Cut off the ends of the optical fiber with a single-edge razor blade or sharp knife. Try to obtain a precise 90-degree angle (square).
2. Insert the fiber through the locking nut and into the connector until the core tip seats against the internal micro-lens.
3. Screw the connector locking nut down to a snug fit, locking the fiber in place.

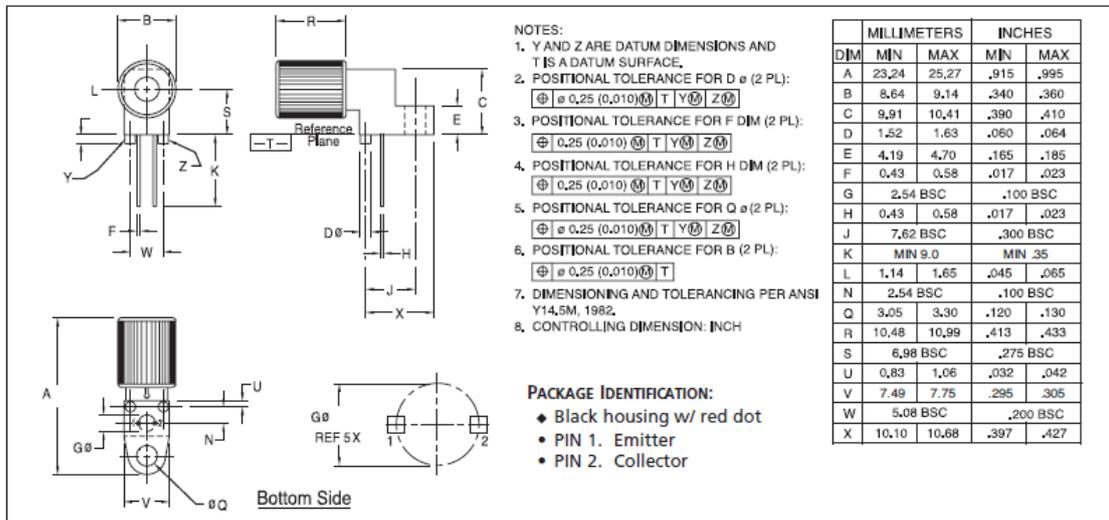


FIGURE 4. Case outline. Specifications are believed to be accurate but are subject to change. Industrial Fiber Optics assumes no responsibility for the consequences of using the information provided beyond replacement warranty for products not meeting stated specifications. Industrial Fiber Optics products are not authorized for use in life support applications without written approval from the President of Industrial Fiber Optics Corporation.

- CAUTION:**
- To avoid degraded device life due to package stress, do not bend or form leads outside the orientation shown on drawing.
 - Ensure that solder flux does not migrate into the device and block the optical path, degrading the performance.
 - If washing the device, liquid may become trapped in the part cavity. Ensure that all potentially corrosive materials are flushed out of the device.

SD3410/5410

Silicon Photodarlington

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25°C unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
Light Current SD3410-001 SD3410-002 SD3410-003 SD3410-004	I_L	0.6 2.0 4.0 8.0			mA	$V_{CE}=5\text{ V}$ $H=2\text{ mW/cm}^2$ (1)
Light Current SD5410-001 SD5410-002 SD5410-003	I_L	2.0 4.0 8.0			mA	$V_{CE}=5\text{ V}$ $H=0.2\text{ mW/cm}^2$ (1)
Collector Dark Current	I_{CEO}			250	nA	$V_{CE}=10\text{ V}$, $H=0$
Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{(BR)CEO}$	15			V	$I_C=100\text{ }\mu\text{A}$
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$V_{(BR)ECO}$	5.0			V	$I_E=100\text{ }\mu\text{A}$
Collector-Emitter Saturation Voltage SD3410 SD5410	$V_{CE(SAT)}$			1.1	V	$I_C=1\text{ mA}$ $H=2\text{ mW/cm}^2$ $H=0.2\text{ mW/cm}^2$
Angular Response (2) SD3410 SD5410	\emptyset		90 12		degr.	$I_F=\text{Constant}$
Rise And Fall Time	t_r, t_f		75		μs	$V_{CC}=5\text{ V}$, $I_L=1\text{ mA}$ $R_L=100\text{ }\Omega$

Notes

1. The radiation source is a tungsten lamp operating at a color temperature of 2870°K.
2. Angular response is defined as the total included angle between the half sensitivity points.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

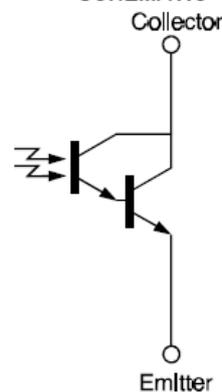
(25°C Free-Air Temperature unless otherwise noted)

Collector-Emitter Voltage	15 V
Emitter-Collector Voltage	5 V
Power Dissipation	150 mW (1)
Operating Temperature Range	-55°C to 125°C
Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Soldering Temperature (10 sec)	260°C

Notes

1. Derate linearly from 25°C free-air temperature at the rate of 1.43 mW/°C.

SCHEMATIC



Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible.

Honeywell

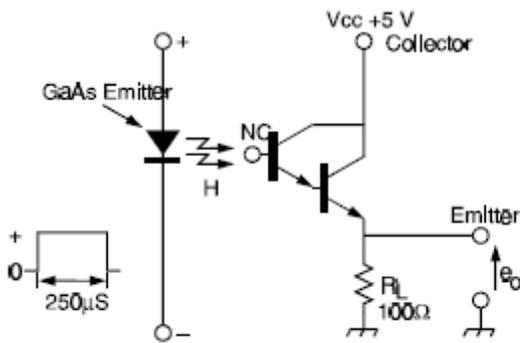
161

SD3410/5410

Silicon Photodarlington

SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

cir_005.cdr



SWITCHING WAVEFORM

cir_004.cdr

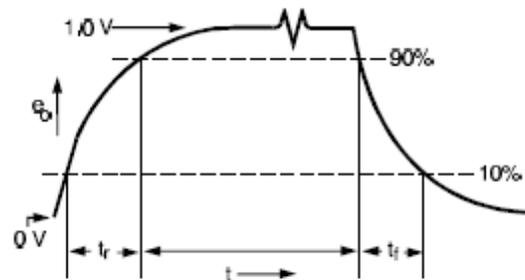


Fig. 1 Responsivity vs Angular Displacement (SD3410)

grx_058.dwt

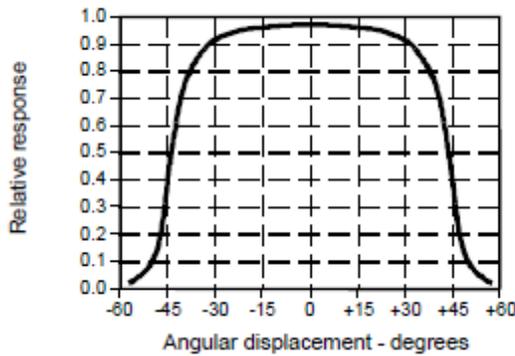


Fig. 2 Responsivity vs Angular Displacement (SD5410)

grx_042.dwt

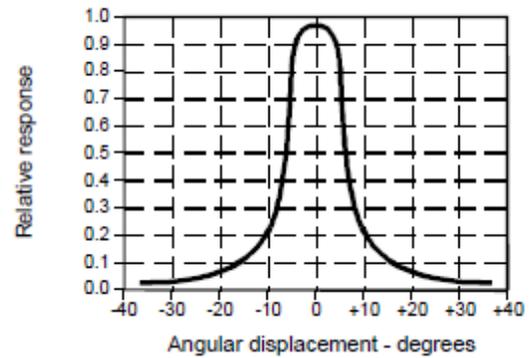


Fig. 3 Non-Saturated Switching Time vs Load Resistance

grx_049.dwt

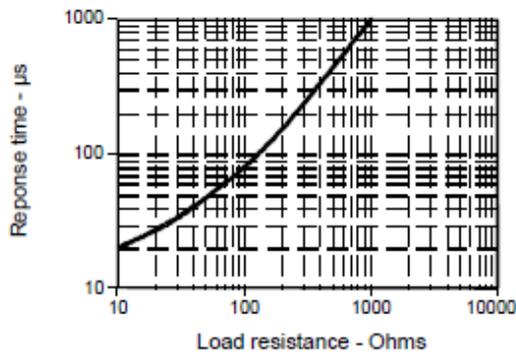
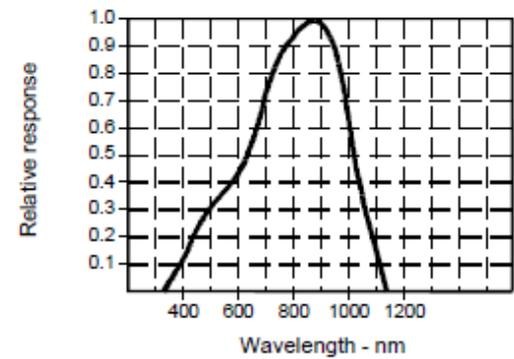


Fig. 4 Spectral Responsivity

grx_036.dwt



All Performance Curves Show Typical Values

APÊNDICE C - LEDs DIEMOUNT

LED to 1mm POF coupled modules

Description:

The LED module bases on a microstructured parabolic reflector setup responsible for the high POF coupled optical power. The LED die is placed in the parabola's focus point. The reflector couples the light with high efficiency to a standard POF with 1mm core diameter and a numerical aperture of 0.5. Typically the POF cable jacket diameter is 2.2mm, other POF cable types (e.g. 1.25mm cable diameter) or bare fiber POF are available on request.

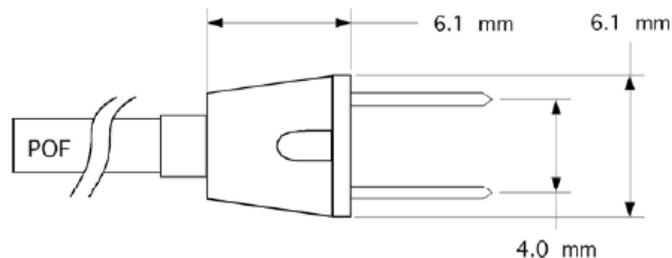
The polished POF endface emits the light in a light cone with a divergence of $\pm 29^\circ$ to the optical axis. The typical fiber length is 15cm, but customer specific length modifications are possible.

Electrically the POF module is connected by a 4 mm pitch two pin connector.

Customer specific LED dice can be mounted into the package if the die edge length doesn't exceed $340\mu\text{m}$.



Mechanical dimensions:



Applications:

POF coupled LED modules are useful in a wide variety of applications:

- Object illumination at places with difficult access due to tiny space or other limitations
- Generation of high optical power area density for laboratory applications
- Light barrier setups

Technical specifications for some selected LED to POF coupled modules:

	blue	green	amber	orange-red	red	hyper-red
peak wavelength [nm]	460	520	590	615	640	650
typical optical output power @ 20mA [mW]	4.0	2.3	1.4	2.5	2.3	4.0

DieMount GmbH



Gliesserweg 3, D- 38855 Wernigerode

www.diemount.com, phone: + 49 (0) 3913 6259760, fax: + 49 (0) 3913 6259759, e-mail: info@diemount.com

ANEXOS

ANEXO I -Non-disturbing optical power monitor for links in the visible spectrum using a polymer optical fibre (MST – 2015).....	100
ANEXO II - An Optical Power Monitor for two WDM channels links using PMMA Plastic Optical Fibres (ICPOF – 2015).....	107
ANEXO III - A influência da variação da impedância de carga no desempenho do Monitor de Potência Óptica para Fibra Óptica Polimérica padrão de PMMA (SBRT - 2015).....	111
ANEXO IV - The enhancement of the performance of a simple Optical Power Monitor for PMMA Plastic Optical Fibre Links (ICPOF – 2015).....	112
ANEXO V - The influence of equilibrium mode distribution on an Optical Power Monitor for SI PMMA Polymer Optical Fibre based on the side-scattered light (Workshop of ICPOF – 2015).....	114

ANEXO I- NON-DISTURBING OPTICAL POWER MONITOR FOR LINKS IN THE VISIBLE SPECTRUM USING A POLYMER OPTICAL FIBRE (MST – 2015)

IOP Publishing

Measurement Science and Technology

Meas. Sci. Technol. 26 (2015) 085201 (7pp)

doi:10.1088/0957-0233/26/8/085201

Non-disturbing optical power monitor for links in the visible spectrum using a polymer optical fibre

Ricardo M Ribeiro, Taiane A M G Freitas, Andrés P L Barbero and Vinicius N H Silva

Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOP), Universidade Federal Fluminense 24.210-240, Niterói, RJ, Brazil

E-mail: rmr@pq.cnpq.br

Received 4 December 2014, revised 27 March 2015

Accepted for publication 7 April 2015

Published 25 June 2015



Abstract

We describe a simple and inexpensive inline optical power monitor (OPMo) for polymer optical fibre (POF) links that are transmitting visible light carriers. The OPMo is non-invasive in the sense that it does not tap any guided light from the fibre core; rather, it collects and detects the spontaneous side-scattered light. Indeed, the OPMo indicates whether a POF transmission link has dark or live status and measures the average optical power level of the propagating signals without disconnecting the fibre link. This paper demonstrates the proof-of-principle of the device for one wavelength at a time, selected from a set of previously calibrated wavelength channels which have been found in the 45 dB dynamic range, with 50 dBm sensitivity or insensitivity by the use or non-use of a mode scrambler. Our findings are very promising milestones for further OPMo development towards the marketplace.

Keywords: optical fibre, optical power monitor, optical power meter, active device, optoelectronics, light scattering

1. Introduction

Optical power meters (OPMs) are essential devices for measuring the optical power level travelling along fibre-optic links [1]. As a crude comparison to electrical circuits, OPMs may be viewed as being analogous to an optical ammeter. OPMs are usually available as a device to be connected at the end of the fibre link, thus measuring the power level that is propagating and leaving the fibre. However, the placement of the OPM requires a temporary interruption of data streaming. A relatively less common class of OPMs are devices denoted as optical power monitors (OPMos). An OPMo can be temporarily or permanently inserted inline within a fibre-optic link. Therefore, OPMos are useful devices to continuously monitoring the status (dark or live) as well to measure and display the optical power level being transmitted along the fibre-optic links but without interrupting the light transmission.

The capacity of long-haul fibre-optic communication networks has increased rapidly in the past decades, mainly leveraged by dense wavelength division multiplexing (DWDM) and optical amplifier technologies. Therefore, the average optical power level propagating in optical fibres has risen accordingly. However, when average or peak optical power rises, the system reliability may suffer with drawbacks including optical nonlinearities [2], damage to the fibre, (e.g. fibre fuse) [3] and damage to the fibre coating and optical components (e.g. end-faces of connectors) as well as danger to human eyes [3, 4]. Mainly for short-haul or long-haul terrestrial links, an OPMo may be a useful and feasible way to measure and display the optical power along the network at many discrete places without the interruption of datacom or telecom services. OPMos are also very useful in laboratory research, such as in the development of either type of fibre-optic circuit. Many points of the fibre circuit may be simultaneously and conveniently monitored without the interruption

of the light path. Another possible application of OPMos is internal monitoring of variable optical attenuators [5].

While silica fibres are used in most optical communication systems, the use of POFs has been expanding for short links and networks, such as within houses, offices, buildings, cars, airplanes etc [6]. Therefore, once the POF links or networks are deployed, they may be monitored for their status and optical power level propagating at several desired points. Generally, the power budget for POF links is much more critical than for silica fibre. Therefore, inserting OPMos in POF links should cause minimal disturbance (insertion loss), in order to be simple, reliable, inexpensive, and naturally not to require link interruption except during deployment. Whatever the type of fibre or specific application, analogue fibre links require a larger signal-to-noise ratio than digital links. Therefore, an OPMo for POFs based on the principle presented here is even more suitable and useful for this reason. A problem regarding OPMo for multimode fibres (such as POFs) originates from the fact that when a coupler or a tap is used, the derived optical power fraction depends on the modal distribution [6, 7]. Therefore, an error in measurement may arise when an OPMo using taps is employed for multimode fibres.

Typically, commercially available OPMo devices can tap a 1–10% optical power fraction by means of a 99:01–90:10 coupling-ratio fibre tap splitter from the fibre cable. An example of an OPMo that is suitable for POFs is the 1-channel model FPM v1.2 without communication interface from Velickov Engineering (Germany), which is available at a cost of €990 [8]. Some commercially available devices for silica fibre can tap an amount of guided light power from the core by bending the fibre [9] because the tapped power level must be strong enough to also be demodulated. In all cases, the fibre is disturbed because a fraction of the guided light is intentionally tapped from the core. Some other commercially available OPMos are based on silica fibres irradiated with femtosecond optical pulses to enhance the light scattering [10] or by evanescent coupling [11].

In this paper, we believe that we are describing for the first time the proof-of-principle and the development of a simple and inexpensive OPMo, to be inserted inline in POF links, that operates in the visible spectrum without intrinsic light propagation disturbance, except the required connections in its deployment. Such connections may be performed using conventional optomechanical connectors [6], chemical splices using suitable adhesives between the POFs [12] or ultrasonic splices [13, 14]. The OPMo does not tap any guided light from the fibre core because it is based on the collection of spontaneous side-scattered light instead of using tap-coupling, fibre-bending or evanescent coupling. A similar concept was already reported for communications between trains [15]. Although the proposed mechanism for the OPMo is very simple, we could not find similar work in the literature, besides our own paper presented at an international conference [16]. The reason may be the fact that the side-scattering effect is much weaker in silica fibres where infrared optical carriers are used because the Rayleigh scattering [17] is not strong enough. Furthermore, simple experiments have shown insensitivity of the OPMo under the equilibrium mode distribution (due the use of a mode scrambler) or otherwise.

2. Background and operational principle

The main loss mechanism in an optical fibre of either type is intrinsic absorption and material scattering loss is the second mechanism. The latter comprises unavoidable Rayleigh [6, 17, 18] and Mie scattering [6, 18]. Even if the fibre is smoothly bent into a circle, some power is radiated from the fibre core. However, this radiated power loss is negligibly small unless the radius of curvature of the fibre becomes quite small. From a macroscopic viewpoint, fibre imperfections cause an angular distribution of scattered light around a direction at 90° to its core axis, even for a straight fibre.

As described in the classical book by Marcuse [19], relatively simple methods that have already been designed to determine the scattering loss could also be used to measure the total loss of an optical fibre. All that is needed is the means for ensuring that the scattered light leaves the cladding and reaches a photodetector. A non-destructive method requires the stripping of the secondary coating in order to conduct out the scanning of the scattered light power along the longitudinal axis of the fibre, as was reported in the early 1970s [19, 20]. The cutback method, which is widely recognized as a destructive technique and has been used as a standard method to measure the attenuation of fibres, is also discussed by Marcuse [19]. However, a book recently published [21] that deals with optical fibre characterization techniques no longer considers the longitudinal scan technique; rather, it addresses only the cutback method.

The operational principle of the OPMo that is reported here was inspired by a technique that resembles the method of axial scanning by using an integrating cube already described in 1981 [19] (and even from the early works of the 1970s). The aim here is to measure the scattered light power (i.e. stationary photodetection) and not to perform the longitudinal scanning.

3. Experimental procedure

Figure 1 shows a schematic drawing of the experimental setup for characterization and calibration of the OPMo. The OPMo device itself is also shown, surrounded by a dashed line (enclosure walls). In the first version, a POF collector (not shown here) is used and, in the second version, a microlens collector is now used as shown by figure 1. The only distinction between the first and second versions is that the former uses a very small thread of POF that collects the light just before the microlens that focuses it onto the photo-Darlington chip.

The visible light emitted from an LED or laser source is launched in a polymethyl methacrylate (PMMA) 2.2 mm-diameter POF cable. The POF is the standard model presenting a 0.98 mm core diameter and a 0.5 numerical aperture [6]. In order to ensure the equilibrium mode distribution (EMD) condition, the light traverses a JIS 6863 model POF mode scrambler [6, 7]. Although a multimode coupler presents a coupler ratio that is dependent on the modal distribution, the use of a mode scrambler leads to the EMD condition and such coupling ratio turns out to be much more stable [7]. In principle, here it is assumed that a non-EMD condition is implied in a transversal redistribution of propagating modes that have some

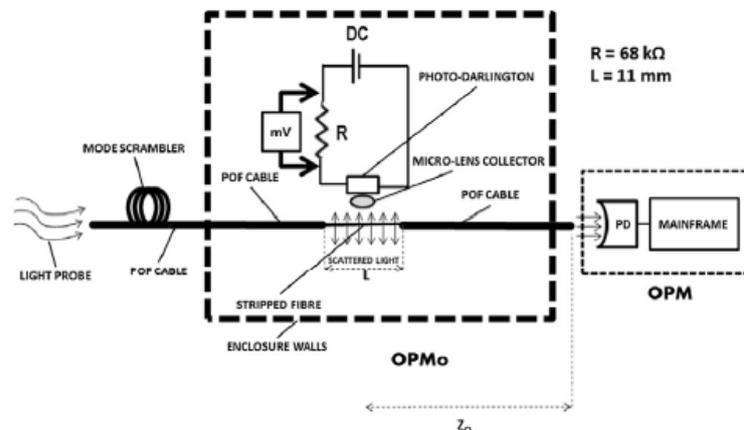


Figure 1. A schematic drawing of the experimental setup and the OPMo device itself, using a *microlens collector*, surrounded by a dashed line (enclosure walls).

influence on the scattered light. A fraction of such scattered light is originated from the Rayleigh mechanism that essentially depends on the wavelength [17, 18]. The other fraction of scattered light is affected by the mode distribution through Mie scattering [18]. For practical purposes, a mode scrambler is used in the characterization measurements. In the present experimental setup, the JIS6863 Japanese standard mode scrambler for POFs was used. The latter is made by wrapping a 3.40 m segment of standard PMMA POF, thus forming 10 turns in a figure-of-eight around two identical metallic cylinders [6, 7]. In practical POF links, some error in the (transmitted) power measurement using the OPMo may occur in the beginning of the link because the EMD has not yet been reached [6]. OPMs for single-mode optical fibres may use fibre couplers; the light tap is stable because only one mode is involved. However, as is shown in section 4.5, the same OPMo response is achieved even when the JIS6863 mode scrambler is uncoiled, thus ceasing its scrambling action.

The input POF traverses a small sealed box (enclosure walls), that is, the inline OPMo device itself. By using a standard stripper, the black polyethylene POF jacket (and not the cladding!) was carefully cut around its circumference in such a way as to avoid touching the fibre. Then a gentle traction was applied from one end of the fibre, thus exposing an ~ 11 mm length of bare fibre from which the light is spontaneously scattered. This procedure is not difficult to perform since the polyethylene is not strongly adhered to the POF cladding.

In the first set of experiments (see section 4.1), a small amount of side-scattered light at 90° to the POF axis is collected by a small strand of PMMA POF (0.98 mm diameter and 0.5 numerical aperture) guiding the light towards a microlens which focuses the light onto the photo-Darlington chip detector.

In the remaining set of experiments (see sections 4.2–4.5), the light was directly collected by the microlens (1.50 mm diameter) and integrated to the photodetector, as shown in figure 1. The photo-Darlington chip was removed from its original plastic case in order to expose its integrated microlens. Again, the microlens focuses the light onto the photo-Darlington chip detector.

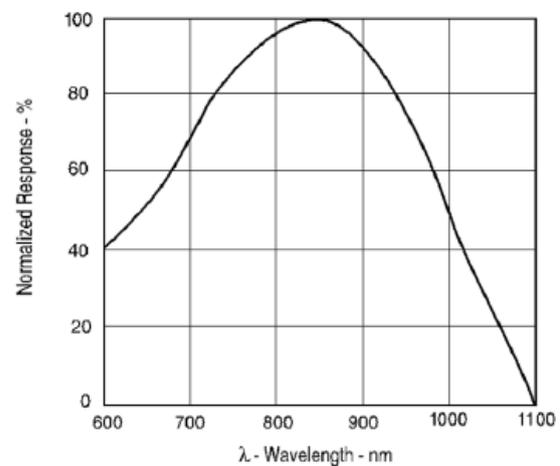


Figure 2. Normalized responsivity of the IFD93 model photo-Darlington chip from which 100% response corresponds to 400 A W^{-1} responsivity. Reproduced with permission.

The photo-Darlington chip ideally generates a current gain proportional to the luminous power without the need for an additional amplification stage. Indeed no further amplifier stage was used in the circuit of the present OPMo. The photo-Darlington chip used is the IFD93 model from Industrial Fiber Optics (USA). It presents a responsivity of 400 A W^{-1} at 850 nm, as can be seen in figure 2.

A voltmeter was used to probe the limiting-current $68 \text{ k}\Omega$ resistor of the photo-Darlington circuit that was electrically polarized with 5V dc, typically measuring electric signals of a few millivolts. The output light from the OPMo follows through the same PMMA POF. The optical power was externally measured by means of a high-performance calibrated OPM that uses a silicon photodetector head. Either the conventional hand-held PM20 model from Thorlabs (USA) or the 2931 model from Newport Corporation (USA) presenting a sensitivity of -60 dBm and -100 dBm , respectively, were

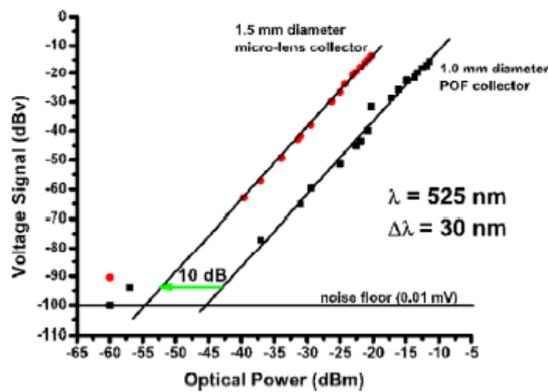


Figure 3. The calibration plots of the OPMo device using a POF collector and a microlens collector that were both probed with a green LED source (525 nm and 30 nm).

used. All measurements were carried out in real time: that is, without employing any averaging procedure to increase the signal-to-noise ratio.

When the I_{dc} drive current varies, the λ_C central wavelength emitted by the LEDs is generally shifted [22] by a few nanometres. For the sake of simplicity, the measurements were all performed by varying I_{dc} and the previously mentioned ‘optical chirp’ effect was neglected here.

4. Results and discussions

4.1. Measurements using two different light collectors: increase of sensitivity

This section describes a first set of experiments in which a small amount of side-scattered light at 90° to the (stripped) POF axis is collected by two different apertures (see section 3), both guiding the light towards the photo-Darlington detector chip.

Figure 3 shows the measured calibration plots of the OPMo when using a POF collector and a microlens collector. The OPMo was probed by using a quasi-monochromatic light source (LED) of ~ 30 nm spectral width emitting light centred at 525 nm wavelength. The horizontal and vertical axes of figure 3 represent the optical power (dBm) that was launched to probe the OPMo and the voltage signal level (dBV) provided by the voltmeter, respectively.

From the plot in figure 3, some OPMo parameters are calculated. A dependence of ~ 2.5 dBV/dBm is calculated from the linear regression for both POF-collector and microlens-collector configurations. The physical origin of this angular slope is the optoelectronic conversion, which is expected to be 2.0 dBV/dBm [19] and is independent of wavelength. Each 1 dB level variation of optical power causes a level variation of 2 dB in the converted electrical power. The reason for this deviation is believed to be some nonlinearity in the photo-Darlington photocurrent response when the incident optical power varies [23]. For practical purposes, the exact value of the effective optoelectronic conversion coefficient is not critical since all measurement data is quite reproducible and

unambiguous. Figure 3 also shows the noise floor of -100 dBV (or 0.01 mV) common to all measurements. This means that the voltmeter is unable to measure voltages smaller than 0.01 mV. Thus, it is in principle the noise floor of the present OPMo that must be considered. However, our results have revealed a noise floor at least 10 dB worse than 0.01 mV (i.e. 0.1 mV) due to the noise generated by the photo-Darlington chip, especially that caused by the dark current.

The main aim of this section is to show a 10 dB sensitivity increase from the input optical power when the microlens collector is used instead of the POF collector. This 10 dB enhancement of sensitivity is partially related to the increase in light collection, rather the stripped POF length L . The stripping procedure of the POF was manually handled and accurate control of L was not feasible. After a few trials a good quality sample with $L = 11$ mm was obtained. In order to improve the sensitivity of the OPMo, the light collection should be enhanced; that is, the diameter, length and/or numerical aperture of the microlens collector must be increased because in this way all the captured light can be focused onto the semiconductor chip. The stripped POF length L is not directly related to the sensitivity increase of the OPMo, because most of the scattered light cannot be collected. In the present work, the 1.5 mm-diameter microlens is able to collect light scattered by a stripped POF with length that is slightly larger than 1.5 mm. The remainder of the scattered light is wasted.

A simple geometrical calculation shows that a ~ 3.7 dB optical gain is achieved when the POF collector (0.49 mm radius) is replaced by the microlens collector (0.75 mm radius). The 10.0 dB $- 3.7$ dB = 6.3 dB difference may be explained by the coupling losses that occur when the POF collector (or microlens collector) is used. Such coupling losses are mainly caused by the relative difficulty that pertains to the precise perpendicular distance fit between the surface of the stripped POF and the entrance of the POF collector. Let us assume a simple geometrical model where the perpendicular distance d is realistically supposed to be < 1 mm. If the alignment is not carefully performed, d may be, for example, 0.2 mm or 0.8 mm, values that are indistinguishable to the naked eye. For very low values of d , the optical density power decays with $1/d$ dependence; thus a variation of $10 \log(0.8/0.2) = 6$ dB is quite feasible and may explain the aforementioned discrepancy of 6.3 dB.

Although it was possible to measure optical powers as low as -60 dBm with the OPMo using the microlens collector, such result is assumed to be unreliable at present stage of development. Thus, the latter value is comparable to the -60 dBm minimum power, as can be measured by most commercially available hand-held optical power meters [24].

4.2. Measurements using different wavelengths of wide linewidth (LEDs): dynamic range

This section describes a second set of experiments in which a small amount of side-scattered light at 90° to the (stripped) POF axis is directly collected by the photodetector-integrated microlens (1.50 mm-diameter aperture; i.e. solely the microlens collector) that focuses the light onto the photo-Darlington chip detector (see figure 1).

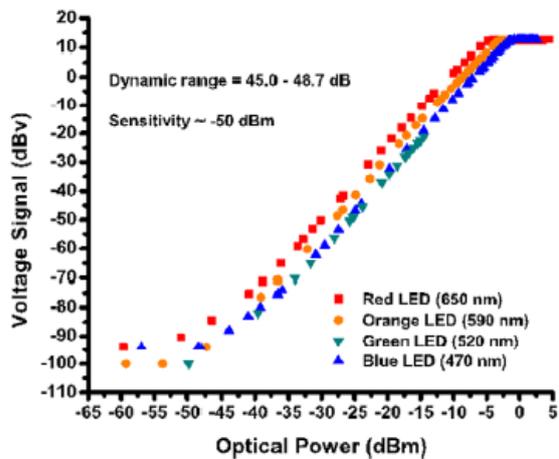


Figure 4. Calibration plots of the OPMo measuring the optical power of ~ 30 nm spectral width from LED sources emitting at 470, 520, 590 and 650 nm wavelengths.

Figure 4 shows the measured calibration plots of the OPMo sensing the POF-coupled light from powerful LED sources with ~ 30 nm spectral width emitting at 470, 520, 590 and 650 nm wavelengths.

Regardless of the launched optical power level (in dBm), when the centre wavelength is red shifted the electrical response in dBv is approximately increased by the same amount, but as expected, the measured angular slope of ~ 2.5 dBv/dBm is unchanged for all these LEDs that are each of different colours. Figure 4 shows that the photo-Darlington circuit saturates when the launched power reaches ~ -5 dBm or more and exhibits a sensitivity of ~ -50 dBm leading to the -5 dBm $- (-50$ dBm) = 45 dB dynamic range. The dynamic range means the difference between the maximum optical power that is allowed to be measured before the photodetector reaches the saturation regime and the minimum measured optical power corresponding to a voltage just above that of the photo-Darlington noise (~ 0.1 mV). Even using a better photodetector, the minimum measurable optical power is limited by the voltmeter used, which is unable to measure voltages smaller than 0.01 mV ($= -100$ dBv).

The electrical response of the OPMo is wavelength dependent through the photo-Darlington responsivity, as shown by figure 2, and the well-known $1/\lambda^4$ dependence of Rayleigh-scattered power [17, 18]. However, the wavelength-independent Mie scattering also contributes to the total side-scattered light from the bare POF [6, 18].

Although the Rayleigh scattering decreases as the wavelength increases, the silicon photodetector responsivity increases up to 400 A/W (maximum) at 850 nm, as shown by figure 2, which was extracted from the datasheet of the IFD93 photo-Darlington chip. The vertical axis of figure 2 displays a normalized responsivity (0–100%). Figure 2 shows that, at 600 nm and 850 nm, the responsivities are 164 A/W and 400 A/W $^{-1}$, respectively. In this way, when the wavelength increases from 600 nm to 850 nm, the responsivity increases by $400/164 = 2.44$ times while the Rayleigh scattering power

level decreases by $(850/600)^4 = 4.03$ times. Therefore, a partial compensation of signal decrease occurs (i.e. the signal as a whole decreases by ~ 0.61 times). However, the plots of figure 4 show an inverse trend.

The manufacturer does not disclose the model of photo-Darlington module that was used to build the IFD93. The IFD93 responsivity in the 400 – 600 nm wavelength ranges is also not available. However, the plot of figure 2 can be compared with the responsivity profile of the SD3410/5410 photo-Darlington model from Honeywell [23], which is available in the 400 – 1100 nm wavelength range. Both plots are quite similar in the 600 – 1100 nm wavelength range and are likely to feature the same responsivity dependence in the 400 – 600 nm range. For example, it is shown [23] that the responsivity drop is not enough sharp for <600 nm wavelengths.

Therefore, the optoelectrical response of the OPMo is not fully explained. It is important to remember that there are some errors in the photodetector responsivity and in the Rayleigh scattering estimation, due to the ± 15 nm spectral width around the central wavelength of each probe LED. On the other hand, the optical characteristics of the microlens used in the IFD93 photo-Darlington chip are not available. It is likely that such a microlens was selected or designed/optimized to cover the 600 – 850 nm spectral ranges (i.e. to efficiently collect the light emerging from a standard PMMA POF) and focus it onto the semiconductor chip. However, the microlens is the same that was used in the OPMo for wavelengths of less than 650 nm, but to collect the light that is leaving the side of the POF. Assuming the IFD93 photo-Darlington model uses a photo-Darlington module similar to the Honeywell SD3410/5410, the results of the OPMo spectral response displayed in figure 4 shows that the collection and focusing properties of the microlens degrade as the wavelength is decreased, and the increase of the Rayleigh scattering is not able to provide compensation. In any case, despite the exact spectral response, the OPMo can be calibrated for each wavelength of interest. Therefore, the inline OPMo device should be previously calibrated for each wavelength for which it will be used.

4.3. Measurements using different wavelengths of narrow linewidth (lasers)

The characterization/calibration measurements of the OPMo are carried out by using coherent light sources (i.e. lasers emitting visible spectrum with a very narrow linewidth). Figure 5 shows two plots that use lasers as probe light sources. The plot coloured in red shows the OPMo response when an HeNe gas laser (633 nm wavelength) is used, whereas the green plot corresponds to the use of the second harmonic (532 nm wavelength) of a Nd:YVO4 solid-state laser.

From figure 5 one can extract ~ 2.5 dBv/dBm slope of optoelectronic conversion coefficient for both wavelengths (i.e. the same result as those obtained using LEDs as light source).

The OPMo response under the green laser light at 532 nm shows a linear dependence covering a ~ 30 dB dynamic range and a saturation power of -5 dBm is measured that is in agreement with the OPMo when probed with the green LED at

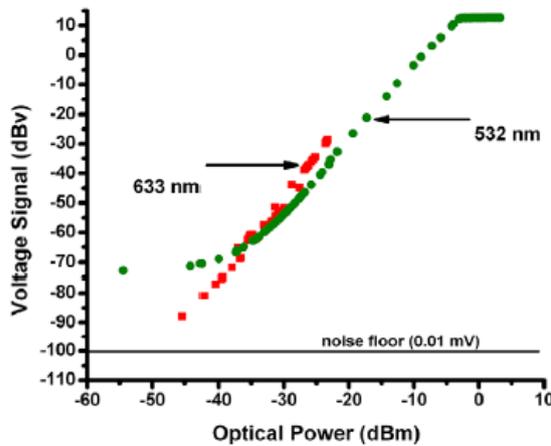


Figure 5. Calibration plot of the OPMo when probed with an HeNe gas laser (633 nm) and an Nd:YVO4 solid-state laser (532 nm).

520 nm (see figure 4). However, by launching at 532 nm wavelength, the OPMo response becomes nonlinear for powers less than -30 dBm, thus trending to saturation due to an increasingly smaller signal-to-noise ratio. In contrast, figure 4 shows that by launching LED light at 520 nm, the linearity response of the OPMo is kept for power levels even smaller than -40 dBm. At the present time, we have none explanation for such discrepancy.

The linear response for the OPMo for the 633 nm-wavelength light shows a dynamic range of at least 20 dB because the available power of the HeNe laser was not enough to saturate the photo-Darlington. A sensitivity of over -46 dBm was achieved, similar to the results obtained when probing the OPMo with a red LED emitting at 650 nm (see figure 4).

4.4. A remark on the calibration measurements

The stripped-spreader POF has length $L = 11$ mm and is located at $z = z_0$ from the end of the fibre where, typically, $z_0 \gg L$ (see figure 1). If z_0 is too long, a correction factor is needed to adjust the power reading taken at the fibre end to the higher power value expected at the point where the stripped-spreader fibre is located. In order to reduce the calibration error, the fibre loss must be negligible with respect to the distance, z_0 , where the optical power meter for calibration must be placed. For 650 nm wavelength in PMMA-based POFs, an error of 0.03 dB ($\sim 0.6\%$) in the optical power measurement is estimated for a fibre length of $z_0 = 20$ cm. Therefore, in order to calibrate an OPMo, a short length (i.e. z_0) of fibre is needed to convey the light from the device to the conventional (calibrated) OPM. Of course, such a procedure introduces an error that can be minimized by cutting the fibre for each set of measurements. The more accurate value is inferred by extrapolation of a fibre of zero length ($z_0 \rightarrow 0$). The z_0 length may be significantly reduced in a practical OPMo. In practice, after the calibration procedure, a connector should be placed or a splice should be accomplished in place of the OPM.

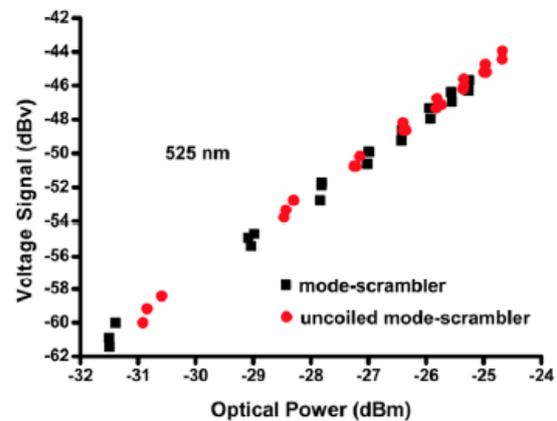


Figure 6. Response of the OPMo with and without the JIS6863 mode scrambler. All data points follow the same straight-line dependence in a log-log plot.

4.5. The influence of the equilibrium mode distribution on the OPMo

The OPMo using the microlens collector, as shown in figure 1, is now probed again using a quasi-monochromatic light source (LED) of ~ 30 nm spectral width that emits while centred at a 525 nm wavelength (i.e. the same light source used in section 4.1). Only one excitation condition was indeed carried out: butt-to-butt optical coupling from a 5 mm ultrabright LED (with its lens) to the PMMA-standard POF.

In the first experiment, the homemade JIS6863 mode scrambler [7] uses a 3.40 m length of standard POF wrapped in 10 turns around two cylinders in a figure-of-eight pattern, in order to achieve the EMD in the OPMo.

In the second experiment, the 3.40 m POF length of the JIS6863 mode scrambler was carefully fully uncoiled and extended without strain in order to avoid not achieving the EMD condition in the mechanically stable OPMo.

Figure 6 shows the measurement results for the OPMo response (i.e. the electrical output in dBv) against the optical power input (in dBm), that was achieved with a wrapped (black square) and uncoiled/extended (red circle) mode scrambler, such as under the EMD and without the EMD condition, respectively. More precisely, three pairs of measurements (with and without EMD condition) were carried out in three different days in order to check the reproducibility of the OPMo response.

The same plots were essentially achieved for the three measurement sets, as shown in figure 6, thus indicating their reproducibility. Furthermore, it is also clear from the two plots that the OPMo displays the same response whether or not the light that propagates is in EMD condition.

These experimental results suggest that our OPMo for SI-PMMA POFs is highly immune to the mode distribution thus being at a technological advantage when compared with conventional OPMos. This is in contrast with the OPMos for multimode fibre based on the use of a tap-coupler in which the coupled fraction is dependent on the mode distribution [7, 25].

5. Conclusions

For the first time, to the best of our knowledge, the proof-of-principle was established for a simple, non-disturbing and potentially inexpensive optical power monitor for PMMA-based plastic optical fibres conveying visible light that is based on the spontaneous side-scattering of light. Immunity to the establishment or otherwise of the equilibrium mode distribution was also revealed. A laboratory prototype was developed to be inserted inline within a fibre-optic link, thus providing power-level monitoring. The POF status of dark or live and the optical power level being transmitted may be displayed. The PMMA-based POFs were used in this paper, not only because of its intrinsic usefulness for short-haul (<500m) fibre networks [6], but also due to the convenience provided by the use of visible light and large-diameter fibres.

In the present first trial, the OPMo device presented a sensitivity that exceeded -50 dBm and a dynamic range of more than 45 dB. This -50 dBm sensitivity is comparable to the most commercial hand-held OPM [24], whereas the dynamic range of 45 dB should be further improved to reach at least 75 dB. However, the present OPMo device allows further optimization in order to improve the sensitivity and dynamic range as the increase of amplification gain, logarithm amplification [26], amplification with automatic gain control, collection of scattered light along the ~ 11 mm length (or more) of bare fibre, signal averaging over time and processing.

In the near future, the device can be developed up to a field prototype stage. It should be more robust and mechanically stable in order to use a microprocessor/microcontroller for control and data processing and a liquid crystal display (LCD matrix) and/or communication interface for local and/or remote measurement visualization. The power may be provided by ac lines, batteries or both.

The OPMo can also be further developed by using the same principle but for per-fluorinated POFs in the 850–1300 nm band [6] and silica fibres operating in the infra-red telecommunications bands around 850, 1310 and, mainly, 1550 nm [1, 2].

Acknowledgments

The authors would like to thank the collaboration of all the undergraduate and graduate students at the laboratory where this work was conducted, as well as Fotonicom/CNPq, CNPq/MCT and Faperj for their financial support of this research.

References

- [1] Derickson D (ed) 1998 *Fiber Optic Test and Measurement* (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall) pp 55–86
- [2] Agrawal G P 2013 *Nonlinear Fiber Optics* 5th edn (Kidlington: Academic)
- [3] Kashyap R 2013 The fiber fuse—from a curious effect to a critical issue: a 25th year retrospective *Opt. Express* **21** 6422–41
- [4] Seo K, Nishimura N, Shiino M, Yuguchi R and Sasaki H 2003 Evaluation of high-power endurance in optical fiber links *Furukawa Rev.* **24** 17–22
- [5] Ribeiro R M, Machado M S, Barbero A P L, Ribeiro B A, Xavier O S and Zanco W S 2011 Variable optical attenuator for plastic optical fibre (POF-VOA) with all-optical control *20th Int. Conf. on Plastic Optical Fibers (Bilbao, 14–16 September 2011)*
- [6] Ziemann O, Krauser J, Zamzow P E and Daum W 2008 *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems* 2nd edn (Berlin: Springer)
- [7] Ribeiro R M and Werneck M M 2008 Improvements of resolution and precision of a wavelength-encoded electrical current sensor using an ultra-bright light-emitting diode transducer *Trans. Inst. Meas. Control* **30** 153–71
- [8] Velickov Engineering www.velickov.eu/pof_en.html#pof_fpm
- [9] James S M, Ferguson D A and Drouet D 1989 Clip-on optical fibre power measurements *IEE Colloquium on Fibre Optic LANs and Techniques for the Local Loop (London, 17 March 1989)* pp 14/1–8
- [10] Sezerman O M et al 2006 Microstructuring optical wave guide devices with femtosecond optical pulses *US Patent* 7,095,931 B2, August 22, 2006
- [11] www.fiberlogix.com
- [12] Carson S D and Salazar R A 1991 Splicing plastic optical fibers *Proc. SPIE* **1592** 134–8
- [13] Takagi M 1999 POF splicing using ultrasonic fusion *Proc. of the POF World Conf. (San Jose, CA, 28–30 June 1999)*
- [14] Ohara S, Hayashi N, Mizuno Y and Nakamura K 2013 Ultrasonic splicing of plastic optical fibers *22nd Int. Conf. on Plastic Optical Fibers (Búzios, Brasil, 11–13 September 2013)*
- [15] Shimura A et al 2004 Train communication system using graded-index leaky plastic optical fiber *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (Tunisia, 8–10 December 2004)* vol 1, pp 78–83
- [16] Ribeiro R M, Freitas T A M G, Barbero A P L, Cyrillo P S T C, Zanco W S and Xavier O S 2011 A novel optical power monitor (OPM) for plastic optical fibre (POF) Links *20th Int. Conf. on Plastic Optical Fibers (Bilbao, 14–16 September 2011)*
- [17] Miles R B, Lempert W R and Forkey J N 2001 Laser Rayleigh scattering *Meas. Sci. Technol.* **12** R33–51
- [18] Bunge C A, Kruglov R and Poisel H 2006 Rayleigh and Mie scattering in polymer optical fibers *J. Light. Technol.* **24** 3137–46
- [19] Marcuse D 1981 *Principles of Optical Fiber Measurements* (Kidlington: Academic) pp 218–24
- [20] Tynes A R 1970 Integrating cube scattering detector *Appl. Opt.* **9** 2706–10
- [21] Hui R and O'Sullivan M 2009 *Fiber Optic Measurement Techniques* (Burlington, MA: Elsevier)
- [22] Ribeiro R M, Martins L and Werneck M M 2005 Wavelength demodulation of ultrabright green light-emitting diodes for electrical current sensing *IEEE Sensors J.* **5** 38–47
- [23] www.honeywell.com/sensing, Honeywell, Optical Sensors, Product Range Guide, Sensing and Control, pp 6–7, February 2012
- [24] www.terahertztechnologies.com
- [25] Feistner S, Lichotka H and Poisel H 2001 Thermal stability of POF couplers *10th Int. Conf. on Plastic Optical Fibers (Amsterdam, 27–30 September 2001)* pp 251–6
- [26] Krishnan S, Bindra K S and Oak S M 2008 A sensitive and high dynamic range CW laser power meter *Rev. Sci. Instrum.* **79** 125101

ANEXO II- AN OPTICAL POWER MONITOR FOR TWO WDM CHANNELS LINKS USING PMMA PLASTIC OPTICAL FIBRES (ICPOF – 2015)

AN OPTICAL POWER MONITOR FOR TWO WDM CHANNELS LINKS USING PMMA PLASTIC OPTICAL FIBRES

T.A.M.G. Freitas*, R.D. Oliveira, V.H. Silva, V.N.H. Silva, A.P.L. Barbero, C.B.M.P. Leme and R.M. Ribeiro
Laboratório de Comunicações Ópticas, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ-Brasil, 24.210-240

*Corresponding author: freitastaiane@yahoo.com.br

Abstract: We have early reported a simple and an inexpensive Optical Power Monitor (OPMo) suitable for monitoring 1- λ channel PMMA-based POF links. Our OPMo does not disturb the light propagating through the core. The spontaneous side-scattered light is photo-detected using a single photo-Darlington. In this paper, we show for the first time, in the best of our knowledge, an OPMo simultaneously able to detect and to measure the optical power levels of two WDM channels (470nm and 650nm) in PMMA-based POF links. Low-cost plastic optical filters were used aiming to demonstrate the operation principle. The worst measured crosstalk rejection was 20.2 dB.

Key words: Optical fibre; Optical power monitor; Optical power meter; Active device; Light scattering.

1. INTRODUCTION

OPMos are very useful active devices that can be temporarily or permanently deployed in data-links, networks or in laboratory optical circuits under development, allowing simultaneous monitoring and optical power measurements in many points without interruption of the data-stream [1,2]. Taking into account the characteristics of the POF technology [3], OPMos for such fibre links should present a minimum insertion loss. Furthermore, a suitable OPMo for POFs should be also reliable, simple, compact and inexpensive [1,2].

Most of commercial OPMos operate by using a $\approx 1\%$ tap-coupler to derive an optical power sample to be measured. This technique allows stable measurement for single-mode fibres because only a single mode is involved. However, tap-couplers and then OPMos for multimode fibres require equilibrium mode distribution (EMD) condition to result in reproducible measurements [4,5].

We have been developing an OPMo for 1- λ channel PMMA SI-POF links operating in the visible spectrum [1,2]. The OPMo is non-invasive. It can collect and detect the spontaneous Rayleigh and Mie side-scattered light [6]. It does *not* tap any guided light from the fibre core using tap-coupling, fibre-bending or evanescent coupling. The OPMo operates without causing any intrinsic disturbance on the light propagation. The OPMo is bidirectional and indicates whether a POF transmission link is in the *dark* or in the *live* status. In the latter, it measures the average optical power level of the propagating signals without disconnecting the fibre link. It was achieved 45-dB dynamic range and -50 -dBm sensitivity without any data processing [2]. It is a very promising milestone for a further OPMo development toward to the marketplace. Furthermore, the OPMo has shown insensitivity to the use or not of a mode-scrambler [2].

In this paper, we show for the first time, in the best of our knowledge, an OPMo able to *simultaneously* detect and measure the optical power levels of two WDM channels in PMMA-based POF links [2,7]. Now, two TO-46 metal case photo-Darlingtons from Honeywell were used in the OPMo. An inexpensive plastic optical filter suitable to selectively transmit each of the 470 and 650 nm WDM channels has covered the flat transparent window of each of the two photo-detectors.

2. EXPERIMENTAL

Fig. 1 depicts a schematic drawing of the experimental set-up for characterisation and calibration of the two WDM channels OPMo.

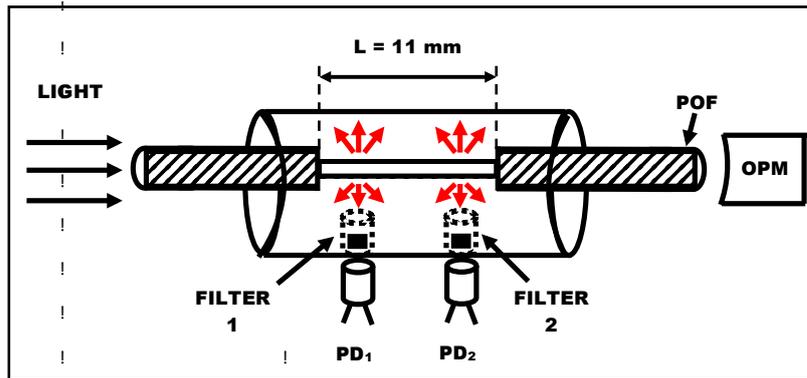


Fig.1. The sketch of the two WDM channels OPMo.

The visible light emitted from an LED is launched in a Poly-Methyl-Methacrylate (PMMA) 2.2mm diameter POF cable. The POF is the *standard* model presenting 0.98mm of core diameter and 0.5 of numerical aperture [3]. A fraction of such scattered light is originated from the Rayleigh scattering mechanism that essentially depends on the wavelength [6,8]. The remaining fraction is originated from the Mie scattering mechanism that is essentially independent on the wavelength [6].

The input POF traverses the in-line OPMo device itself. By using a standard stripper, the black polyethylene POF jacket (and not the cladding!) was *carefully* cut around their circumference in such way as to avoid not to touching the fibre. Then a gently traction was applied from one end of the fibre, thus exposing an ~11 mm length of bare fibre from which the light is spontaneously side-scattered. This procedure is not difficult to perform since the polyethylene is not really glued to the POF cladding. Now, two TO-46 metal case photo-Darlington from Honeywell (SD3410-001) were used in the OPMo. An inexpensive plastic optical filter suitable to selectively transmit each of the 470nm and 650nm WDM channels covered the flat transparent window of each of the two photo-detectors.

In these preliminary experiments, one or more layers of colour cellophane sheets were used as selective optical filters for each one of the WDM channel intended to be measured by the OPMo. The basic test was to verify weather the filter “1” can transmits the channel $\lambda_1 = 470\text{nm}$ with little loss and simultaneously is able to efficiently rejects the other channel ($\lambda_2 = 650\text{nm}$). A similar procedure was carried out with the filter “2”. The number of needed cellophane sheet layers was also adjusted. Once the cellophane filters and their number of layers were selected, they were inserted into the two fixtures of the OPMo as can be seen in Fig.1. Hereafter the TO-46 casing photo-Darlington were inserted into the two fixtures. The use of cellophane paper as an optical filter is a very simple, suitable and inexpensive solution. The cost of a single cellophane sheet of standard size is around US\$ 1.00 allowing cutting many tenths of filters. However, cellophane papers are known to lose their colour under the incidence of Sun light, especially due to ultra-violet radiation. OPMos must be carefully sealed to the incidence of external light. Therefore, it is hoped the cellophane papers used as optical filters are likely to maintain their spectral characteristics for long time. Of course the resilience of cellophane papers must still be further tested in practice. The filter “i” suitable for the channel λ_i will always introduce some attenuation. The effect of the latter is to reduce the effective sensitivity and probably the dynamic range of the corresponding photo-Darlington. Nevertheless, each filter must exhibit a high degree of rejection to the others wavelengths.

A small amount of side-scattered light at 90° direction of the POF axis is collected by the photo-detector aperture thus propagating toward the chip detector after optical filtering. The photo-Darlington ideally generates a current gain proportional to the luminous power without the need of an additional amplification stage. Indeed no further amplifier stage was used in the circuit of the present OPMo.

A voltmeter was used to probe the $680\text{k}\Omega$ limiting-current load resistor series-connected with the photo-Darlington. The circuit was electrically polarised with 5V DC. The output electrical signals typically range from sub-mV to few mV. The output light from the OPMo follows through the same PMMA POF. The optical power was externally measured by means of a hand-held -60-dBm sensitivity PM20 model optical power meter (OPM) from Thorlabs (USA). All measurements were carried out in real time, that is, without employing any averaging procedure to increase the signal-to-noise ratio.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The plots in Figs.2-4 shown the OPMo response for each of photo-Darlingtons with their respective optical filters. Figs. 2 and 3 show almost parallel straight lines with slopes somewhat higher than the ideally expected value of 2.0 [2,9]. The linear dependence delimits the dynamic range provided by each channel.

Fig. 2 shows the OPMo response regarding only the channel 1, using two layers sheets of the blue filter. Both light probes centred at 470 and 650 nm wavelength channels were non-simultaneously launched in the OPMo. A sweep of optical power launched (dBm) was carried out and the output voltage signals (dBv) were measured. A sensitivity and dynamic range of -25dBm and 28dB, respectively, were measured for 470nm. Repeating the sweep but lunched the 650nm wavelength, it was measured 45dB rejection.

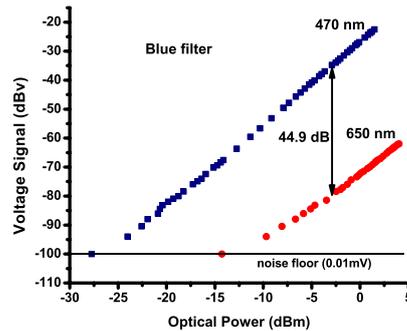


Fig. 2. The response of the blue channel (470nm) of the OPMo highlighting the filter rejection of 44.9dB under the 650nm launching. Two layers sheets of blue filter were used.

The filters 1 and 2 were blue and orange colour cellophane sheets, respectively. In the present experiments, red colour cellophane sheets were not available. The filter 1 should transmit the channel λ_1 with high efficiency and to reject the channel 2. Analogous procedure was carried out with the filter 2. The needed number of sheet layers was also tested to maximum transmission/rejection for each channel.

Fig. 3 shows the OPMo response regarding only the channel 2 using three layers sheets of the orange filter. Both light probe wavelength channels centred at 470nm and 650nm were non-simultaneously launched in the OPMo.

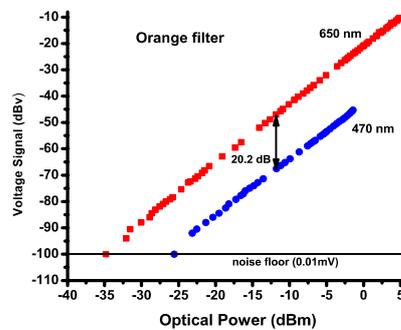


Fig. 3. The response of the red channel (650nm) of the OPMo highlighting the filter rejection of 20.2dB under the 470nm launching. Three layers sheets of orange filter were used.

A sweep of optical power launched (dBm) was carried out and the output voltage signals (dBv) were measured. A sensitivity and dynamic range of -35dBm and 40dB, respectively, were measured for 650nm. Repeating the sweep but lunched the 470nm wavelength, it was measured 20.2dB rejection.

Fig. 4 shows the OPMo response for the 470nm and 650nm channels by using the appropriate corresponding optical filters.

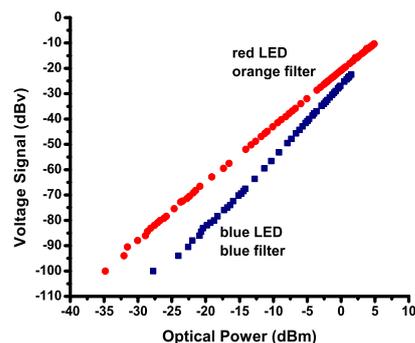


Fig. 4. The response of the blue (470nm) and red (650nm) channels of the OPMo using blue and orange colour optical filters, respectively.

It was measured 2.2 and 2.8 slopes for the red and blue channels, respectively. Such discrepancy is unexpected. Anyway, despite of different slopes and the difference when both are compared with the theoretical value of 2.0 [2,9], such facts do not affect the OPMo operation since a careful calibration could be previously done.

4. CONCLUSIONS

The main goal of the present paper was to show the proof-of-principle of an OPMo suitable for two WDM channels over PMMA-based POF links. In the worst case a not very good rejection of 20.2 dB was measured. The reason is the use of an “orange filter” instead on a “red filter”, because the latter was not available at the time of the experiments. The idea can be extended to more than two WDM channels links even in the IR domain.

A compact OPMo must be carefully designed in order to accommodate the photo-Darlington with their respective optical filters. We believe that POFs conducting six WDM channels [10] is not a serious problem to achieve a compact OPMo.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Dr. Randy Dahl of Industrial Fiber Optics (USA) and the POFACT team for the fruitful discussions. The authors are also grateful to the financial support provided by the Brazilian R&D agencies Faperj, CNPq/MCTI and Capes/MEC.

REFERENCES

- [1] R.M. Ribeiro, T.A.M.G. Freitas, A.P.L. Barbero, P.S.T.C. Cyrillo, W.S. Zanco and O.S. Xavier, “A Novel Optical Power Monitor (OPM) for Plastic Optical Fibre (POF) Links”, 20th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 2011), Bilbao, Spain, September 14-16, 2011.
- [2] R.M. Ribeiro, T.A.M.G. Freitas, A.P.L. Barbero and V.N.H. Silva, “Non-Disturbing Optical Power Monitor for Links in the Visible Spectrum Using Polymer Optical Fibre”, Measurement and Science and Technology, 26, 085201 (7 pp), 2015.
- [3] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, “POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems”, 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2008.
- [4] S. Feistner, H. Lichotka and H. Poisel, “Thermal stability of POF couplers”, 10th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 2001), Amsterdam, The Netherlands, September 27-30, pp. 251-256, 2001.
- [5] R.M. Ribeiro and M.M. Werneck, “Improvements of resolution and precision of a wavelength-encoded electrical current sensor using an ultra-bright light-emitting diode transducer”, Transaction of the Institute of Measurement and Control, 30, pp. 153-171, 2008.
- [6] C.A. Bunge, R. Kruglov and H. Poisel, “Rayleigh and Mie scattering in polymer optical fibers”, Journal of Lightwave Technology, 24, 8, pp. 3137-3146, 2006.
- [7] Velickov Engineering, http://www.velickov.eu/pof_en.html#pof_fpm.
- [8] R.B. Miles, W.R. Lempert and J.N. Forkey, “Laser Rayleigh scattering”, Measurement Science and Technology, 12, pp. R33-R51, 2001.
- [9] D. Marcuse, “Principles of Optical Fiber Measurements”, Academic Press, pp. 218-224, 1981.
- [10] R. Kroglov *et al*, “Implementation of WDM technology for data transmission over 50-m SI-POF beyond 20 Gb/s”, 23rd International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF2014), Yokohama, Japan, October, 2014.

ANEXO III - A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CARGA NO DESEMPENHO DO MONITOR DE POTÊNCIA ÓPTICA PARA FIBRA ÓPTICA POLIMÉRICA PADRÃO DE PMMA (SBRT - 2015)

XXXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBRT2015, 1-4 DE SETEMBRO DE 2015, JUIZ DE FORA, MG

A influência da variação da impedância de carga no desempenho do Monitor de Potência Óptica para Fibra Óptica Polimérica padrão de PMMA

Rafaella D. de Oliveira, Viviane Honorato, Taiane A. M. G. de Freitas, Ricardo M. Ribeiro, Andrés P. L. Barbero e Vinicius N. H. Silva

Resumo—É aqui descrito a influência da variação da impedância de carga no desempenho e na sensibilidade de um Monitor de Potência Óptica (MPOo). A carga encontra-se em série com o Photo-Darlington presente no dispositivo, adequado para uso em enlaces utilizando fibra óptica polimérica padrão de PMMA (Poli-metil-metacrilato) com índice de grau e é baseado no espalhamento luminoso que ocorre espontaneamente pela lateral da fibra no espectro visível. O MPOo não é invasivo no sentido de que coleta e detecta o espalhamento luminoso Rayleigh e Mie, isto é, não retira parte da luz guiada do núcleo da fibra para determinar a potência média propagante. Diferente dos Medidores de Potência Óptica comerciais, o MPOo é altamente imune à distribuição modal com faixa dinâmica alcançada de 45 dB e sensibilidade de - 50 dBm, que pode ser facilmente aumentada em 10 dB efetuando apenas a otimização do valor da impedância de carga do circuito presente no Monitor de Potência Óptica.

Palavras-Chave—Fibra Óptica Polimérica, Monitor de Potência Óptica, dispositivo ativo, espalhamento, optoeletrônica

Abstract—We describe the influence of charge impedance variation in the performance and sensibility of an optical power monitor (OPMo). The charge is in serie with the Photo-Darlington presente in device, that is suitable for PMMA polymer optical fibre links and is based on the spontaneous side-scattered of visible light. The OPMo is non-invasive in the sense that it collects and detects the spontaneous Rayleigh and Mie, i.e. it does not tap any guided light from the fiber core to determine the medium power being transmitted. Different from the commercially used Optical Power Monitors, the OPMo is highly immune to the modal distribution of light and its dynamic range of 45 dB and -50 dBm sensibility that can easily be increased by 10 dB just performing an optimization of the value of the impedance in the internal circuit of the Optical Power Monitor.

Keywords—polymer optical fibre, optical power monitor, active device, lightscattering, optoelectronic.

I. INTRODUÇÃO

A capacidade das redes de fibra óptica de longa distância tem crescido rapidamente nas últimas décadas, impulsionada principalmente pelas tecnologias DWDM, amplificadores ópticos e formatos de modulação digital avançados. A média

de potência óptica propagada em fibras ópticas tem acompanhado esse crescimento e as redes e enlaces de pequenas distâncias são beneficiados com o uso das fibras ópticas plásticas (FOPs) e de toda a tecnologia correlata.

Principalmente para esses os enlaces de curta distância, um MPOo são dispositivos essenciais destinados a medir e exibir o nível de potência óptica ao longo da rede à fibra óptica em muitos lugares discretos [3], sem a interrupção dos serviços Datacom ou de Telecomunicações. Um Monitor de Potência Óptica (MPOo) é de uma classe relativamente menos comum

de Medidores de Potência Óptica (MPO). Esses últimos consistem em dispositivos muito utilizados para medir o nível de potência óptica que trafega em um enlace à fibra, normalmente disponíveis para serem conectados ao final de um enlace de fibra, medindo assim o nível de potência que se propaga na saída. Isso requer a interrupção temporal do fluxo de dados para a conexão com o MPO.

Já o MPOo consiste em um medidor de potência óptica que pode ser inserido “em linha” temporariamente ou permanentemente num enlace à fibra óptica, sem a necessidade de que o fluxo de dados seja interrompido para que realize a medida do nível de potência média que trafega em um canal de comprimento de onda específico para o qual tenha sido previamente calibrado [5]. São muito úteis na investigação de laboratório, ou seja, para o desenvolvimento de qualquer tipo de circuitos de fibra óptica, onde existem pontos do circuito que devem ser monitorados simultaneamente e confortavelmente sem a interrupção da trajetória da luz. Essa monitoração permite, por exemplo, a identificação de possíveis trechos onde há falhas no circuito.

A tecnologia mais utilizada para fabricar tais dispositivos (MPOos) consiste em usar um acoplador a fibra para derivar uma amostra da potência de luz, usualmente de 1%, e então inferir sobre a potência óptica que trafega na fibra. Esta tecnologia implica uma perturbação e consequentemente induz a uma atenuação óptica. O único MPOo comercial para FOPs de PMMA (Poli-Metil-Metacrilato) encontrado foi o modelo para 1 canal de comprimento de onda FPM v1.2 (sem interface de comunicações) da empresa alemã *Velickov Engineering* a um custo de € 990 [4].

Geralmente os MPOos comerciais requerem que a entrada seja de um sinal no qual os modos propagantes já tenham atingido a Distribuição Modal Equilibrada. Como as FOPs são utilizadas em enlaces de curta distância e a estabilização modal ocorre em aproximadamente 200 m a 300 m, há a necessidade de utilização de um embaralhador de modos (*Mode Scrambler*) antes da leitura no MPOo para que se tenha uma medida reproduzível e confiável na leitura da potência óptica média, já que a fração da potência óptica derivada depende da distribuição modal [5-6]. Foi previamente demonstrado que,

para o dispositivo aqui apresentado, não há necessidade do uso do embaralhador de modos, no caso o modelo JIS6863 da *Japanese Industrial Standard*, tendo em vista que o MPOo é altamente imune a distribuição modal [1].

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

O protótipo 1 do MPOo consiste em uma caixa preta vedada da entrada de qualquer fonte luminosa externa contendo um trecho de fibra de aproximadamente 20 cm, sendo que em 1,1 cm a cobertura de poliestireno é retirada. 111

Rafaella D. de Oliveira, Viviane Honorato, Taiane A. Menandro G. de Freitas, Ricardo M. Ribeiro, Andrés P. L. Barbero e Vinicius N. H. Silva, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, Brasil, E-mails: taiane@telecom.uff.br, mrr@pq.cnpq.br.

ANEXO IV - THE ENHANCEMENT OF THE PERFORMANCE OF A SIMPLE OPTICAL POWER MONITOR FOR PMMA PLASTIC OPTICAL FIBRE LINKS (ICPOF- 2015)

THE ENHANCEMENT OF THE PERFORMANCE OF A SIMPLE OPTICAL POWER MONITOR FOR PMMA PLASTIC OPTICAL FIBRE LINKS

T.A.M.G. Freitas^{*}, R.D. Oliveira, V.H. Silva, V.N.H. Silva, A.P.L. Barbero, C.B.M.P. Leme and R.M. Ribeiro
Laboratório de Comunicações Ópticas, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ-Brasil, 24.210-240

^{*}Corresponding author: freitastaiane@yahoo.com.br

Abstract: We have early reported a simple and an inexpensive Optical Power Monitor (OPMo) suitable for monitoring 1- λ channel standard PMMA-based POF links. Our OPMo does not disturb the light propagating through the core. The spontaneous side-scattered light is photo-detected using a single photo-Darlington. The OPMo is non-invasive, highly immune to the modal distribution and presented -50dBm sensitivity and 45dB dynamics range. In this paper, we describe an OPMo still simple, but ~96 times more compact that uses off-the-shelf photo-Darlingtons with TO-46 housing. An optimised prototype could be achieved where saturation was not observed for > -5dBm launched optical power. Up to 10dB increase of optical sensitivity was obtained by increasing the load impedance of the photo-detector. In a second step, two different photo-Darlingtons were used: one for high-sensitivity and the other for non-saturated detection. By using a simple off-line data processing, the optical dynamic range could be improved by 11.2dB thus circumventing the saturation of the OPMo keeping it still compact and using simple electronic circuits.

Key words: Optical fibre; Optical power monitor; Optical power meter; Active Device, Light scattering.

1. INTRODUCTION

Short POF links and networks typically with <500m range present many advantages when compared with other transmission technologies [1]. Several applications have been appeared in the last years as communication networks in airplanes, ships, residences, buildings, cars and many others [1].

Optical power monitors (OPMos) are active devices able to detect and to measure the optical power along an optical fibre without interruption of the link, except in their deployment. Generally, an OPMo taps around 1% fraction of light sample from the optical signal guided by the core [2]. It was early reported by our group a simple and an inexpensive OPMo suitable for monitoring 1- λ channel PMMA-POF based links [3]. Our OPMo does not disturb the light propagating through the core. The spontaneous light scattering is laterally photo-detected using a single photo-Darlington thus leading to -50dBm sensitivity and 45dB dynamic range without any data processing. Furthermore, the OPMo has shown insensitivity to the use or not of a mode-scrambler [3].

In this paper, we describe an improved OPMo keeping its original operation principle, simplicity and low cost, but being almost 100 times more compact than the first prototype [3]. The present new prototype uses another off-the-shelf photo-Darlington together with the formerly used. In a first step, the resistive load impedance was merely increased thus leading to a net increasing of the optical sensitivity. In a second step, two different photo-Darlingtons detectors were used: “high-sensitivity” and the other for “high-saturation” measurements. The generated signals by each of the photo-detectors, were off-line processed in a simple way and provides an increase of the OPMo dynamic range.

2. EXPERIMENTAL: A COMPACT PROTOTYPE USING TWO PHOTO-DETECTORS

The first OPMo prototype was built from black stiff foam sheets leading to 11.2 x 9.0 x 8.4cm (volume $\approx 847\text{cm}^3$) size box that was carefully sealed against external light [3]. Along the 11.2cm dimension, the box held a stretched POF strand with 1.1cm length of stripped coating in their centre. Close to such stripped POF, a plastic case IFD93 Photo-Darlington (PD) with an integrated micro-lens from Industrial Fiber Optics (USA) was placed to collect and to detect the scattered light. The procedure to remove the plastic housing thus exposing the

micro-lens + chip of the IFD93 was relatively laborious and delicate. The PD was series-connected with $68\text{k}\Omega$ resistive load impedance. The output voltage signal was measured from the terminals of such load resistance [3].

Fig. 1 sketches our second OPMo prototype being presented in this paper. It is based on the *same* physical principle of the first prototype thus not causing intrinsic disturbance on the light propagating along the POF [3]. It maintains the original simplicity, low cost and bi-directional operation.

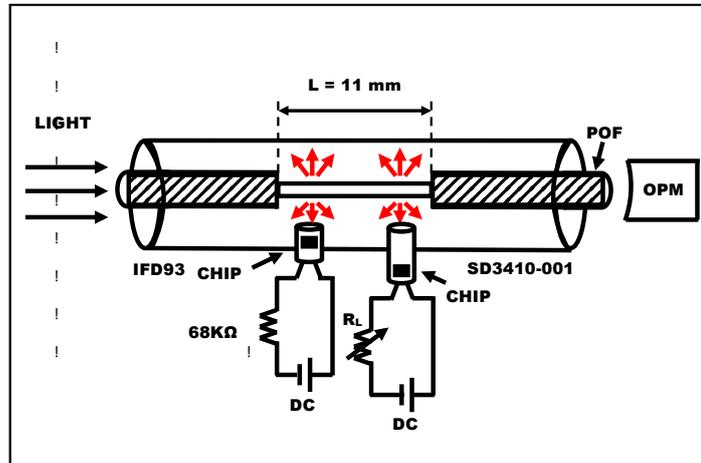


Fig. 1. The schematic drawing of the second OPMo prototype that uses two different photo-Darlington detectors.

However, the present OPMo prototype is even more compact. It was carved from a solid Polyvinyl Chloride (PVC) cylindrical block. The form-factor of the new OPMo was significantly reduced by ≈ 96 times down to $\approx 8.8\text{cm}^3$ volume when compared with the first prototype. As is shown in Fig. 1, a longitudinal hole was drilled along the cylinder whereby the $\approx 20\text{cm}$ length of 2.2mm diameter POF strand is made to traverse it. The polyethylene coating of the POF strand was 1.1cm length stripped in their centre. Two transversal holes were also drilled as fixture for the PDs. The first photo-detector (PD_1) was the IFD93 model from Industrial Fiber Optics (USA) without their plastic housing thus exposing their 1.5mm aperture micro-lens. It was series-connected with $68\text{k}\Omega$ resistive load [3]. The IFD93's micro-lens is placed almost in physical contact with the stripped surface of the POF. The PD_1 is thus the "high-sensitive" photo-detector. The second photo-detector (PD_2) was the SD3410-001 model from Honeywell (USA), packaged in the TO-46 casing (without lens). It was series-connected with R_L resistive load. The PD_2 is thus the "high-saturation" photo-detector. It should be pointed out that the PDs simultaneously work as a light detector and pre-amplifier, in principle discarding the need of further electronic amplification circuit.

A voltmeter was used to probe the load resistors. The circuits were electrically polarised with 5V DC. The output electrical signals were typically ranging from sub-mV to few mV. The output light from the OPMo follows through the same PMMA POF. The optical power was externally measured by means of a hand-held -60dBm sensitivity PM20 model optical power meter (OPM) from Thorlabs (USA). All measurements were carried out in real time, that is, without employing any averaging procedure to increase the signal-to-noise ratio.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. THE INCREASING OF THE SENSITIVITY

Fig. 2 shows some plots from the OPMo response by using only the SD3410-001 PD_2 . The plots show the output voltage (dBV) as a function of launched optical power (dBm) when the R_L load is varied from $6.8\text{k}\Omega$ to $1\text{M}\Omega$.

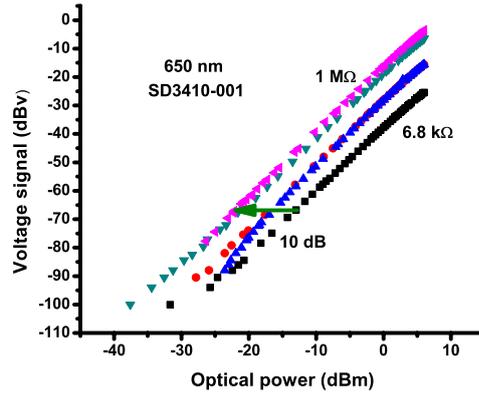


Fig. 2. The response of the OPMo as a function of the resistive load impedance when only the SD3410-001 PD2 is used as photo-detector.

It was measured an increasing of 10dB optical sensitivity when the resistive load is varied from 6.8kΩ to 1MΩ. None photo-detector saturation is observed, at least up to +6dBm launched optical power.

As was extracted from the corresponding data-sheets, the typical time-responses of the IFD93 and SD3410-001 are $\tau_r = 5\text{ms}$ for $R_L = 1\text{k}\Omega$ and $\tau_r = 75\mu\text{s}$ for $R_L = 100\Omega$ loads, respectively. As a result, capacitances of $C = 5\mu\text{F}$ and $0.75\mu\text{F}$, respectively, were calculated. The higher capacitance of the IFD93 makes it more sensitive than the SD3410-001. The smaller sensitivity of the SD3410-001 is also due to the TO-46 case that separates the chip from the stripped-surface of the POF by $\approx 4\text{mm}$ length. By taking into account that $\tau_r = R_L C$, bandwidth $\propto (1/\tau_r)$ and assuming that electrical gain \times bandwidth = constant, a simple calculation leads an optical power gain of $10\log\left(\sqrt{\frac{1\text{MW}}{6.8\text{kW}}}\right) = 10.8\text{dB}$ that reasonably explains the measured 10dB as shown in Fig. 2.

The characterization of the OPMo was not automatized and the measured data was not averaged. Up to $R_L = 1\text{M}\Omega$ load, the voltage signal displayed by the voltmeter was reasonably stable. Nevertheless, for $R_L > 1\text{M}\Omega$ an even higher sensitivity and dynamic range could be observed at a cost of output signal instability. In the latter, it was verified that an acquired data sampling and averaging procedures were needed. Therefore, it is likely to achieve an increasing of sensitivity even higher than 10dB by solely increasing the resistive load R_L but performing a properly data averaging.

Fig. 2 also shows that the SD3410-001 PD₂ does not saturates for optical powers higher than -5dBm, as could be observed in the first prototype [3]. Once the sensitivity can be increased, the dynamic range is automatically increased of $>45\text{dB}$. However, it is difficult to accommodate both high-sensitivity and high-saturation by using a single photo-detector.

3.2. THE INCREASING OF THE DYNAMIC RANGE

With the aim to achieve an increasing of the dynamic range, it is proposed a technique using 2 PDs. Fig. 3 shows the calibration plots for an OPMo (Fig.1) by using separately the IFD93 and SD3410-001 photo-Darlington as the PD₁ and PD₂, respectively. As explained in section 2, the PD₁ and PD₂ due to their optical/geometrical/electronics characteristics, operate as “high-sensitivity” and “high-saturation” photo-detectors, respectively.

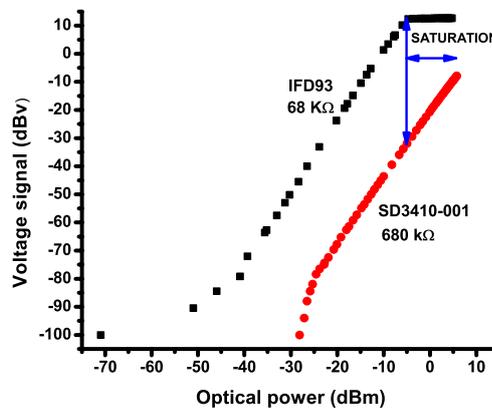


Fig. 3. The response of the OPMo by using separately each of their photo-Darlingtons. The IFD93 is the PD1 of “high-sensitivity” and the SD3410-001 is the PD2 of “high-saturation”.

Although the IFD93 is clearly more sensitive than the SD3410-001, their response saturates for launched optical power higher than -5dBm. However, in the saturation region from -5 to +6dBm, the SD3410-001 response does not saturate. The idea is to simultaneously take the advantages of both PDs characteristics. The first envisaged approach is to merely summing (in mV) of both V_1 and V_2 signals from PD₁ and PD₂, respectively. However the saturated V_1 signals are clamped in values much higher than the corresponding V_2 signals. As a result, the summing $V_1 + V_2$ essentially maintains the flat response in the saturation region.

In the present work, the data processing was carried out offline in order to demonstrate the principle. At first, the signals at voltages lower than a threshold value close to the noise floor are set as a null. At second, the low-magnitude signals V_2 (in mV) are multiplied by 50. The aim was to put both V_1 and V_2 values at closest magnitudes. At third, the resulting signal is summed with V_1 and then converted to dBv. The data processing can be summarized as to be $50 \times V_2(\text{mV}) + V_1(\text{mV}) = V_{\text{SUM}}(\text{mV}) \rightarrow V_{\text{SUM}}(\text{dBv})$. The plot of the result of the latter procedure is shown in Fig. 4.

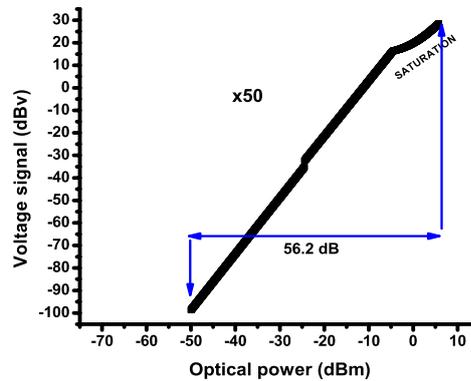


Fig. 4. The plot of the calculations from the off-line data processing technique as proposed here. An increased dynamic range of 56.2 dB is achieved.

For lower optical signals ($P_{\text{opt}} < -25\text{dBm}$) only the PD₁ contributes to the resulting summing. In the intermediate optical power range ($-25\text{dBm} < P_{\text{opt}} < -5\text{dBm}$) the V_1 and $50 \times V_2$ signals are summed. For higher optical powers ($P_{\text{opt}} > -5\text{dBm}$) the V_1 signals becomes clamped at around +13dBv. However, the V_2 signals present a linear slope for $P_{\text{opt}} > -5\text{dBm}$. The multiplication of V_2 by 50 leads to a summing with V_1 now presenting a positive slope. This is because both signals are now with similar magnitude order. As a result shown in Fig.4, the dynamic range of the OPMo may be increased by 11.2dB now reaching up to 56.2dB.

It should be pointed out that the 56.2dB dynamic range was measured by using two PDs. One of the PDs was for “high-saturation”. However, the maximum launched power of +6dBm was indeed limited by the available light source probe. It is likely that the PD₂ saturates with the incidence of optical powers higher than +6dBm leading an underestimating of the dynamic range.

4. CONCLUSIONS

Perhaps somewhat obvious, an increase of resistive load of the photo-Darlington leads an increase of sensitivity and as is well known, a decrease of bandwidth. However, the latter doesn’t matter of fact for OPMos since it measures the average optical power. An increase from 6.8kΩ to 1MΩ leads to a 10dB increase of optical sensitivity and off course the same amount for the dynamic range.

Hereafter, two signals each one generated by different photo-Darlingtons: “high-sensitivity” and “high-saturation”, were weighted summed in order to circumvent the saturated response of the OPMo. As a result, an increased dynamic range reaching 56.2dB was achieved.

As a final conclusion, the sensitivity and dynamic range of our OPMo can be both enhanced using two simple techniques combined or not, even without data average procedure.

REFERENCES

- [1] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow and W. Daum, *POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems*, 2nd ed. (Berlin: Springer), 2008.
- [2] Velickov Engineering, www.velickov.eu/pof_en.html#pof_fpm.
- [3] R.M. Ribeiro, T.A.M.G. Freitas, A.P.L. Barbero and V.N.H. Silva, “Non-Disturbing Optical Power Monitor for Links in the Visible Spectrum Using Polymer Optical Fibre”, *Measurement Science and Technology*, 26, 085201 (7pp), 2015.

ANEXO V - THE INFLUENCE OF EQUILIBRIUM MODE DISTRIBUTION ON AN OPTICAL POWER MONITOR FOR SI PMMA POLYMER OPTICAL FIBRE BASED ON THE SIDE-SCATTERED LIGHT (WORKSHOP OF ICPOF 2015)

THE INFLUENCE OF EQUILIBRIUM MODE DISTRIBUTION ON AN OPTICAL POWER MONITOR FOR SI PMMA POLYMER OPTICAL FIBRE BASED ON THE SIDE-SCATTERED LIGHT

¹Taiane A.M.G. Freitas, ¹Ricardo M. Ribeiro, ¹Vinicius N.H. Silva, ¹Cláudia B.M.P. Leme, ²Paulo A.M. dos Santos, ³Roman Kruglov, ³Olaf Ziemann, ³Hans Poisel and ³Jakob Fischer

¹Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOP)
Departamento de Engenharia de Telecomunicações
Universidade Federal Fluminense
24.210-240, Niterói, RJ - Brasil
taiane@telecom.uff.br and rmr@pq.cnpq.br

²Laboratório de Óptica Não-Linear e Aplicada, Instituto de Física
Universidade Federal Fluminense
24.210-240, Niterói, RJ - Brasil

³Polymer Optical Fiber Application Center (POFAC)
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Wassertorstrasse 10, 90489, Nuremberg, Germany

Abstract: We show for the first time, in the best of our knowledge, the influence of the equilibrium mode distribution (EMD) on the performance of an optical power monitor (OPMo) based on the spontaneous side-scattered (visible) light, intended for SI PMMA polymer optical fibre links. At first, it was shown by using a mode-scrambler that such OPMo is highly immune to the modal distribution of light. At second, measurements using a scanning integrating sphere set-up have shown that around 50cm length of POF after the light source is enough to significantly attenuating the clad modes. As a result, the modes guided by the core even before to reach the EMD condition, does not appreciable affect the side-scattered light thus rendering the OPMo stable.

Keywords: polymer optical fibre; optical power monitor; modal distribution; light scattering; mode-scrambler.

1. Introduction

Optical power monitors (OPMos) are very useful active devices. It can be temporarily or permanently deployed in data-links, networks or in laboratory optical circuits under development allowing simultaneous monitoring and optical power measurements in many points without the interruption of the data stream [1,2]. Most of commercial OPMos operate by using a $\approx 1\%$ tap-coupler to derive an optical power sample to be measured [3]. This technique allows stable measurement for single-mode fibres. However, tap-couplers and then OPMos for multimode fibres based on a tap-coupler require EMD condition to result in reproducible measurements [4,5].

The margin of power budget for POF links is generally narrow. Therefore, connections should be avoided and when they are needed it should be carefully performed [6]. Therefore, OPMs for POF links should present a minimum insertion loss. Furthermore, regarding the characteristics of POF technology [6], it is easy to conclude that a suitable OPMo should be also reliable, simple and as much inexpensive as possible.

We have been developing OPMs for PMMA SI-POF links operating in the visible spectrum [1,2,7,8]. The OPMo is non-invasive because it collects and detects the spontaneous Rayleigh and Mie side-scattered light [9]. It does *not* tap any guided light from the fibre core using tap-coupling, fibre-bending or evanescent coupling. In other words, the OPMo operates without causing any disturbance in the light propagation. The OPMo works bi-directionally and indicates whether a POF transmission link is in the *dark* or in the *live* status measuring the average optical power level of the propagating signals without disconnecting the fibre link. It was achieved 45-dB dynamic range and -50 -dBm sensitivity [2], a very promising milestones for a further OPMo development toward to the marketplace.

The present paper describes our experimental findings regarding the OPMo [2] in which the amount of collected spontaneous Rayleigh and Mie [9] side-scattered light seems to be *independent* of the mode distribution. In the best of our knowledge, such results are not published yet. Furthermore, it deserves a theoretical modelling.

2. The OPMo with mode-scrambler

2.1 - Experimental

Figure 1 is a schematic drawing of the OPMo and the experimental set-up [2] used to their characterisation. A homemade JIS6863 model mode-scrambler shown in Fig.2 is connected just before the OPMo. The mode-scrambler is built from over 3.4m of POF length that was wrapped in figure-of-eight around two metallic cylinders. A 5mm ultra-bright green LED with transparent plastic dome emitting centred on 525nm wavelength is used as the light probe. The optical coupling into the POF was carried out by using the butt-to-butt technique. A 1.5mm diameter microlens placed <1 mm apart from the POF surface is able to collect the light radiated from ≈ 1.5 mm of stripped POF length (11 mm total) and it is focused onto the photo-Darlington chip.

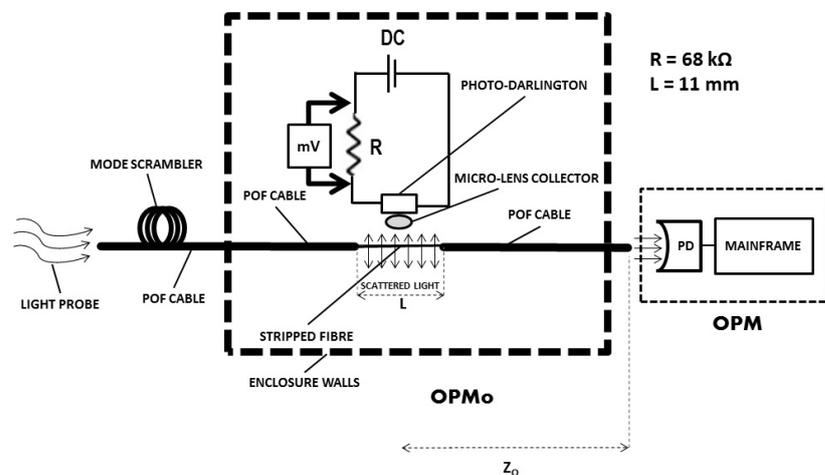


Figure 1 – The schematic drawing of the OPMo is surrounded by a dashed line (enclosure walls) and the experimental set-up used for their characterisation. The OPMo uses microlens as light collector. OPM means optical power meter.



Figure 2 – Photography of the JIS6863 mode-scrambler where 3.4m POF length is wrapped in figure-of-eight around two metallic cylinders.

2.2 - Results and discussions

Figure 3 shows the measurement results of the OPMo response, i.e. the electrical output (in dBv) against the optical power input (in dBm), that were carried out with (black square) and without (red circle) the use of the mode-scrambler (MS). More precisely, three pairs of measurements (with and without MS) were carried out in three different days in order to check the reproducibility of the results.

In order to perform the “without MS” measurements, the fully 3.4m of POF length originally wrapped in the MS was carefully uncoiled and extended thus keeping the OPMo mechanically stable. As can be seen in Fig. 3, essentially the *same* plots were achieved for the three measurement sets thus showing their reproducibility. It is also clear from the plots of Fig. 3 that the OPMo displays the *same* response when the light probe is under equilibrium mode distribution (EMD) or not.

These preliminary experimental results suggest that our OPMo for SI PMMA POFs seems to be highly immune to the mode distribution. In other words, despite the use of the JIS6863 mode-scrambler, the response of our OPMo is the *same*. This is in contrast with the conventional OPMos for multimode fibre based on the use of tap-coupler where the coupled fraction is dependent on the mode distribution.

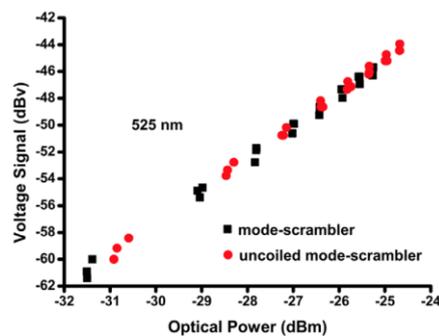


Figure 3 – Response of the OPMo without and with the use of JIS6863 MS. All data points follow the same straight-line dependence in a log-log plot.

3. Characterisation of side-scattered radiation of SI PMMA POF

In order to better understand the previous results, the optical power of the side-emitting radiation is measured as a function of the launched numerical aperture. The latter may be regarded as a physical simulation of an input mode distribution.

3.1 - Experimental

The side-emitting radiation was measured using an integrating sphere that can be displaced along the fibre for the different excitation conditions [10]. Figure 4 sketches the experimental set-up to measure the lateral irradiance from the POF as a function of the numerical aperture of the launched light beam. The used POF was the PFU-

FB1000 model without polyethylene coating from Toray Industries (Japan) which features $NA = 0.46$ and attenuation coefficient ≤ 150 dB/km @ 650nm.

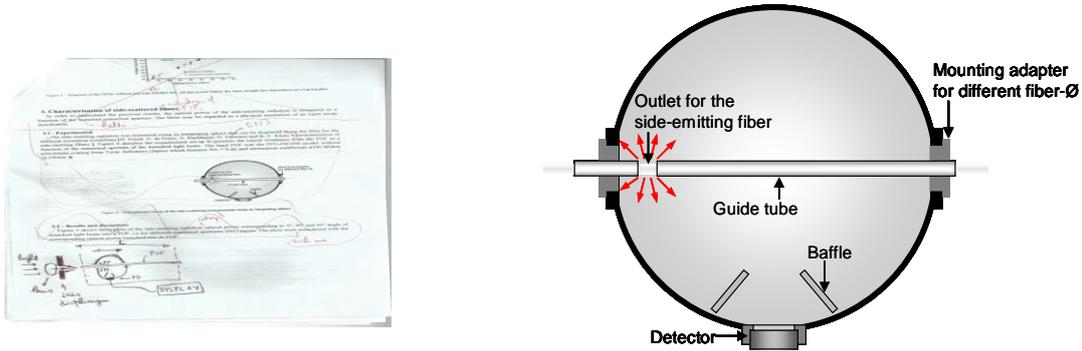


Figure 4 – Experimental set-up of the side-scattering measurements using an integrating sphere.

3.2 – Results and discussions

Figure 5 shows three plots of the side-emitting radiation integral optical power corresponding to 5° , 30° and 60° angle of launched light beam into the POF, i.e. for different numerical apertures (NA) inputs. The plots were each one normalised with the corresponding optical power launched into de POF.

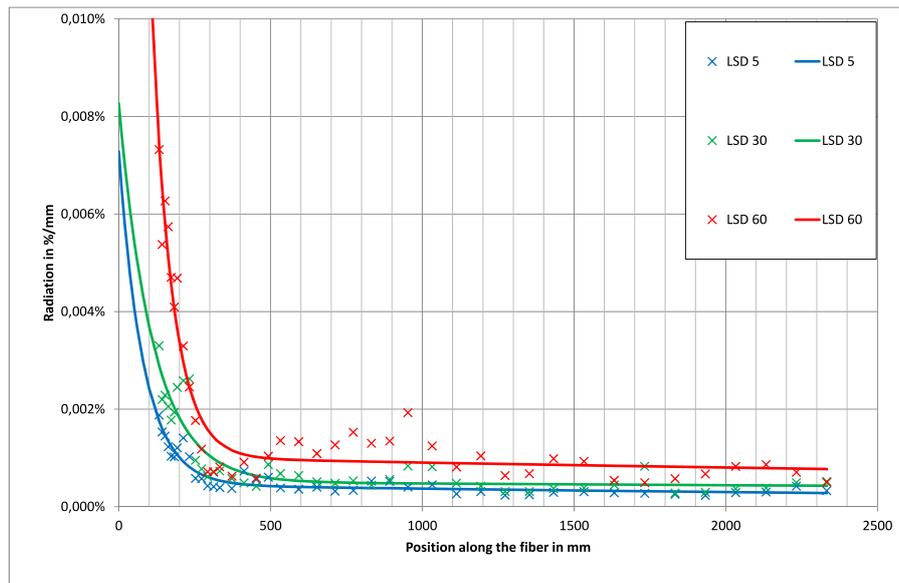


Figure 5 – Plots of side-scattered integral radiation as a function of excitation (numerical aperture) conditions.

Side-emitting POFs are based on the spontaneous or enhanced light scattering and have been investigated for lighting and decoration purposes in many applications [11]. The radiation launched in a POF can be separated in three different components: The side-emitted light due scattering, the guided light (including the fraction scattered inside the acceptance cone) and the absorbed light. The major portion of the scattered light is emitted through the side surface and a minor fraction is forward and backward coupled in the acceptance angle of the fibre.

The plot in red (60°) shows that a relatively high radiation power fraction is side-scattered in the first ≈ 200 mm POF length. Because the 60° input angle is wide, a large number of high order modes is excited including the cladding modes. Such modes are highly attenuated or radiated out of the POF. From ≈ 400 mm length the irradiated output power is practically clamped to a constant value because most of the high order modes was filtered out. For input at 30° a similar behaviour is observed when compared with the 60° in the $z \leq$

200mm range, but with smaller output irradiances. For input $<30^\circ$ launching angles, it can be seen that the irradiance is not significantly different for $z \geq 500\text{mm}$ range because by launching small angles low order modes are rather generated.

In the first 50cm of POF length, there is much light coupled in the cladding that it is very rapidly attenuated by propagation. As a result, the light power turn to be concentrated in the core, but the EMD is not reached yet. It was already experimentally demonstrated that the EMD for SI PMMA POFs is usually reached after a length in the 8-100m range of propagation [12] depending on the POF. Nevertheless, the OPMo response is not sensible to the EMD condition [2]. These results could be useful for the better understanding of the OPMo operation under EMD and non-EMD conditions.

4. Conclusions

In a first step of experiments, our OPMo does not shown different performance when the JIS6863 was or not used inline. More precisely, our OPMo has shown the same response when the mode-scrambler was mounted or uncoiled.

In a second step, the integral side-scattered irradiance was measured using the axial scanning of integrating sphere technique. The latter have been applied for POFs with enhanced (or not) side-scattering but intended to illumination or decoration purposes. This second step pointed out that it is not allowed that the OPMo stay deployed at $< 50\text{cm}$ lengths from the optical transmitter. Of course such “threshold” of 50cm may varies for different POFs.

Because in the first round of experiments it was had 3.4m of uncoiled POF between the LED and the OPMo, insensitivity to modal distribution was indeed expected. However, after few centimetres or meters of POF length, it is not to expect that the EMD is to be reached, but only almost complete absence of cladding modes.

In conclusion, our OPMo does not provide reliable performance when there is light propagating in the cladding, but it has shown insensitivity to the mode distribution in the fibre core, thus being a technological plus when compared with conventional OPMos.

In the moment, it is unknown to the authors weather a physical model is already available to explain the connection between the mode distribution, mode-coupling and the amount of spontaneous side-scattered irradiated light from the PMMA SI-POFs. A physical/mathematical model able to explain our findings remains to be identified from the known literature, adapted from similar models or even to be developed.

REFERENCES

- [1] R. M. Ribeiro, T. A. M. G. Freitas, A. P. L. Barbero, P. S. T. C. Cyrillo, W. S. Zanco and O. S. Xavier, “A Novel Optical Power Monitor (OPM) for Plastic Optical Fibre (POF) Links”, 20th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 2011), Bilbao, Spain, September 14-16, 2011.
- [2] Ricardo M. Ribeiro, Taiane A. M. G. Freitas, Andrés P. L. Barbero and Vinicius N. H. Silva, “Non-Disturbing Optical Power Monitor for Links in the Visible Spectrum Using Polymer Optical Fibre”, Measurement Science and Technology, 26, 085201 (7pp), 2015.
- [3] Velickov Engineering www.velickov.eu/pof_en.html#pof_fpm
- [4] S. Feistner, H. Lichotka and H. Poisel, “Thermal stability of POF couplers”, 10th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 2001), Amsterdam, The Netherlands, September 27-30, pp. 251-256, 2001.
- [5] R. M. Ribeiro and M. M. Werneck, “Improvements of resolution and precision of a wavelength-encoded electrical current sensor using an ultra-bright light-emitting diode transducer”, Transaction of the Institute of Measurement and Control, 30, pp. 153-171, 2008.
- [6] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, “POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems”, 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2008.
- [7] T.A.M.G. Freitas, R.D. Oliveira, V.H. Silva, V.N.H. Silva, A.P.L. Barbero, C.B.M.P. Leme and R.M. Ribeiro, “The enhancement of the performance of a simple optical power monitor for PMMA plastic optical fibre links”, to be presented in the ICPOF2015.
- [8] T.A.M.G. Freitas, R.D. Oliveira, V.H. Silva, V.N.H. Silva, A.P.L. Barbero, C.B.M.P. Leme and R.M. Ribeiro, “An optical power monitor for 2-channels WDM links using PMMA plastic optical fibres”, to be presented in the ICPOF2015.
- [9] C.A. Bunge, R. Kruglov and H. Poisel, “Rayleigh and Mie scattering in polymer optical fibers”, Journal of Lightwave Technology, 24, 8, pp. 3137-3146, 2006.
- [10] H. Poisel, G. de Preux, A. Bachmann, O. Ziemann and K.-F. Klein, “Characterisation of side-emitting fibers”, 18th ICPOF2009, paper PS_40, Sydney, Australia, 2009.
- [11] J. Fischer, H. Poisel, A. Bachmann, F. Stüb, A. Wagner and K.F. Klein, “A standard proposal for characterizing side-emitting fibers”, 20th ICPO2011, paper POS_051, Bilbao, Spain, 2011.
- [12] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, “POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems”, 2nd edition, pp. 52, 53, 113 and 116, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2008.