### UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

MICHELE DA COSTA ZANON

## DISPOSITIVOS DE MULTI-DEMULTIPLEXAÇÃO WDM E EMENDAS PARA FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS DE PMMA VISANDO APLICAÇÕES EM REDES RESIDENCIAIS

NITERÓI 2017

#### MICHELE DA COSTA ZANON

#### DISPOSITIVOS DE MULTI-DEMULTIPLEXAÇÃO WDM E EMENDAS PARA FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS DE PMMA VISANDO APLICAÇÕES EM REDES RESIDENCIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações Móveis.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro

Co-Orientador: Prof. Dr. Vinicius N. Henrique Silva

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua constante companhia em minha vida.

A minha família, especialmente à minha mãe, minha irmã, meus tios Ana Maria e José Amaro e ao meu primo Igor Silva, por todo suporte, apoio, incentivo e por nunca me deixarem desistir.

Ao meu orientador Ricardo Marques Ribeiro, pela confiança, incentivo, paciência para atender todos meus questionamentos e pela dedicada orientação neste trabalho, bem como pela sua amizade.

Ao Vinicius Nunes H. Silva, meu co-orientador, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

A amiga Rafaella Diniz, pela ajuda na caracterização dos filtros.

Aos amigos do Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCop), principalmente ao Flávio e ao Vinícius Tremmel pelo auxílio no desenvolvimento experimental desse trabalho.

Aos técnicos da Oficina Mecânica, pela colaboração na fabricação dos splitters.

Aos demais professores e colegas do curso de mestrado em Engenharia de Telecomunicações, especialmente todos aqueles cujos nomes foram omitidos nesta lista, pelos momentos de convivência, conhecimentos transmitidos e pela contribuição direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho.

Também agradeço ao CNPq e a FAPERJ pelo financiamento proporcionado a esse trabalho.

"Nunca considere o estudo como uma obrigação, mas como uma oportunidade para penetrar no belo e maravilhoso mundo do saber."

#### **RESUMO**

Esta Dissertação tem como motivação as redes de comunicações residenciais (HAN) baseadas em fibras ópticas plásticas (POF), mais especificamente contemplando os enlaces com fibras base-PMMA, que operam com portadora óptica visível.

Devido à relativa complexidade das HAN e o grande interesse comercial, pode-se inferir deste último a conveniência e até mesmo a necessidade de que os componentes envolvidos e as técnicas de manipulação da rede residencial baseada em PO sejam todos o mais simples, robusto, seguro e barato possível para o usuário comum final, ou seja, deve ser uma tecnologia do tipo faça-você-mesmo (*do-it-yourself*).

Em primeiro lugar, este trabalho descreve uma técnica simples, de baixo custo, segura, robusta e a "prova de habilidade", para a realização de emendas permanentes em POFs-PMMA do tipo SI (step index), DSI (double step index) e GI (graded index). Obteve-se baixas perdas de inserção em valores de respectivamente,  $(0,42 \pm 0,11)$  dB,  $(0,56 \pm 0,14)$  dB e  $(0,84 \pm 0,36)$  dB, comparáveis ou melhores do que foi possível encontrar na literatura. As emendas e as respectivas medidas de perda por inserção foram realizadas *propositalmente* por uma operadora (a autora da dissertação) na ocasião inexperiente, e realizando a tarefa pela primeira vez. Esta é uma situação realística, levando-se em conta que é um usuário final comum que deve manipular e reparar a sua própria rede de POF.

Em segundo lugar, é mostrado a caracterização (transmitância espectral) de filtros ópticos de plásticos tipo celofane ou plástico gel em monocamadas e multicamadas para compor filtros do tipo passa-alta ou passa-banda. Tais filtros, devido a sua maleabilidade e baixo custo, são de extrema conveniência para construir os dispositivos multi-demultiplexação (MUX/DEMUX) WDM para enlaces em Rede Residencial (HAN) e em Rede Local (LAN) com POF utilizando fontes luminosas tipo laser (LD), conforme descrito na terceira fase do trabalho.

Finalmente, é descrito o desenvolvimento de dispositivos DEMUX de 2 e 3 canais visíveis baseado na combinação de um divisor-POF com os filtros plásticos de celofane ou plástico gel relatados na segunda fase. Os DEMUX são caracterizados quanto às perdas por inserção em cada canal e a isolação quanto ao canal cruzado.

Finalmente, é descrito o desenvolvimento de dispositivos DEMUX de 2 e 3 canais visíveis baseado na combinação de um divisor-POF com os filtros plásticos de celofane ou

plástico gel relatados na segunda fase. Os DEMUXs são caracterizados quanto às perdas por inserção em cada canal e a isolação quanto ao canal cruzado.

Palavras-chave: Filtros Ópticos; HAN; Emendas; MUX/DEMUX; POF; WDM.

#### ABSTRACT

This work has as motivation the Plastic Optical Fibers (POF)-based Home Area Networks (HAN), specifically contemplating PMMA fiber links, operating in the visible spectrum.

Due to HAN's relative complexity and its great commercial interest, one can infer from the latter the convenience and even the necessity that POF-based HAN components and its manipulation techniques are all the simplest, most robust safest and most inexpensive way for the end-user, it must be a do-it-yourself technology.

First, this work describes a simple, low-cost, safe and robust technique for SIhigh-NA, DSI-low-NA and GI PMMA-POF permanent splicing. Low insertion losses were respectively obtained at values of  $(0.42 \pm 0.11)$  dB,  $(0.56 \pm 0.14)$  dB and  $(0.84 \pm 0.36)$  dB, comparable or better than that found in the literature. The splices and their insertion loss measures were carried out purposely by an inexperienced operator (the author of the dissertation), performing the task for the first time. This is a realistic case, taking into account that a common end-user may handle and repair their own POF network.

Second, this work describes the cellophane-plastic and gel-plastic optical filter characterisation (spectral transmittance) in monolayers and multilayers to create highpass and bandpass filters. These filters, because of their malleability and low cost, are extremely convenient to build WDM multi-demultiplexers (MUX/DEMUX) devices for POF HAN and LAN links using laser-type light sources (LD), as described in the third of the study.

Finally, the development of 2-and-3-visible-channel-DEMUX devices based on the combination of a POF splitter with cellophane-plastic or gel-plastic filters reported in the second step is described. The DEMUX are characterized for insertion losses in each channel and insulation for the cross channel.

Keywords: Optical Filter; HAN; Splicing; MUX/DEMUX; POF; WDM.

1.	INTE	RODUÇ	ÇÃO	1
	1.1.	MOTI	VAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	1
	1.2.	OBJE'	TIVOS	5
	1.3.	ESTR	UTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2.	REV	ISÃO S	SOBRE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS	7
	2.1.	INTRO	ODUÇÃO	7
2.2. FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS (POFs)		AS ÓPTICAS POLIMÉRICAS (POFs)	7	
		2.2.1.	Perspectiva Histórica	7
		2.2.2.	Estrutura das Fibras Ópticas Poliméricas	8
		2.2.3.	Vantagens e Desvantagens das POFs	9
		2.2.4.	Tipos de POF:	. 12
		2.2.5.	Matéria Prima da POF	. 15
		2.2.6.	Atenuação em Fibras Poliméricas	. 20
		2.2.7.	Largura de Banda nas POFs	. 23
		2.2.8.	POFs disponíveis no mercado	. 25
	2.3.	CARA	ACTERÍSTICAS DAS FIBRAS ÓPTICAS	. 26
		2.3.1.	Modos de Propagação	. 26
		2.3.2.	Perdas e Dispersões nas Fibras Ópticas Plásticas	. 30
	2.4.	EMEN	NDAS EM FIBRAS ÓPTICAS	. 32
		2.4.1.	Causas das Perdas nas Emendas Ópticas	. 33
		2.4.2.	Processos de Emendas em Fibras Ópticas de Sílica	. 35
3.	RED	ES ÓP	TICAS DE ACESSO E DE PEQUENAS DISTÂNCIAS	. 38
	3.1.	INTRO	DDUÇÃO	. 38
	3.2.	ARQU	JITETURAS DE FIBRA ÓPTICA NAS REDES DE ACESSO	. 40
		3.2.1.	Tecnologias e Soluções de Redes	. 44
	3.3.	REDE	S DE CURTA DISTÂNCIA	. 46

# SUMÁRIO

	3.3.1. Redes Ópticas Residenciais	48
4. EMI	ENDA PERMANENTE PARA POF-PMMA	52
4.1.	INTRODUÇÃO	52
4.2.	A TÉCNICA DE EMENDA AQUI PROPOSTA	54
	4.2.1. Características do Adesivo Testado	54
	4.2.2. Guias (sleeves)	56
4.3.	EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
	4.3.1. Caracterização das Emendas	62
	4.3.2. Conclusões	67
5. MU	LTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM COMPRIMENTO DE ONDA (WDM) SOB	RE
FIBRA	S ÓPTICAS POLIMÉRICAS	69
5.1.	INTRODUÇÃO	69
5.2.	DEFINIÇÃO E MOTIVAÇÃO	69
5.3.	MULTIPLEXAÇÃO WDM	73
	5.3.1. Técnicas de Multiplexação WDM	75
5.4.	WDM SOBRE POF	80
	5.4.1. Motivação	80
	5.4.2. Sistemas MUX/DEMUX para POFs	83
6. FILT	TROS ÓPTICOS DE PLÁSTICO	89
6.1.	INTRODUÇÃO	89
6.2.	FILTROS ÓPTICOS	89
	6.2.1. Classificação dos Filtros	92
	6.2.2. Filtros de Absorção	95
6.3.	FILTROS ÓPTICOS DE CELOFANE	98
6.4.	FILMES PLÁSTICOS TIPO GEL	99
6.5.	EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	100
	6.5.1. Caracterização dos Celofanes e Filmes-Gel1	00

6.5.2. Construção dos Filtros Ópticos10	7
6.5.3. Conclusões10	9
7. ACOPLADORES ÓPTICOS11	1
7.1. INTRODUÇÃO11	1
7.2. CARACTERÍSTICAS DOS ACOPLADORES ÓPTICOS 11	1
7.2.1. Funções Típicas 11	1
7.2.2. Aplicações Típicas 11	3
7.2.3. Desempenho	4
7.3. ACOPLADORES COMERCIAIS PARA POFs	8
7.3.1. Acoplador Polido 12	0
7.3.2. Acopladores Moldados do IMM12	1
7.4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES 12	2
7.4.1. Caracterização do Acoplador 1x212	3
7.4.2. Caracterização do Acoplador 1x312	7
8. DESENVOLVIMENTO DO DEMUX WDM BASEADO EM FILTROS DE FILMES	S
PLÁSTICO GEL	1
8.1. INTRODUÇÃO	1
8.2. CONSTRUÇÃO DO MUX/DEMUX 13.	5
8.2.1. Demultiplexador de 2 Canais	6
8.2.2. Demultiplexador de 3 Canais	8
8.3. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
8.3.1. Caracterização do Demultiplexador de 2 Canais	0
8.3.2. Caracterização Demultiplexador de 3 Canais14	4
9. CONCLUSÃO	7
REFERÊNCIAS BIBIOGRÁFICAS15	0
ANEXOS	7

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplos de soluções de redes de acesso tipo FTTX (X = B, H, N e C). Fonte: a autora (2017)
Figura 1.2. Exemplo de integração entre FTTH e FiTH em uma residência. Fonte: a autora (2017)
Figura 1.3. Exemplo de integração entre FTTH e FiTH em um pequeno escritório. Fonte: a autora (2017)
Figura 2.1. Esquema estrutural de uma fibra óptica convencional [5]
Figura 2.2. Conexão realizada com conectores FC e ferramentas utilizadas para clivagem e decapagem da POF [7]
Figura 2.3. POF nua (bare fiber) acesa [7]12
Figura 2.4. POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo, revestida [7] 12
Figura 2.5. Propagação da luz para os principais tipos de núcleo [4]13
Figura 2.6. Propagação da luz em uma fibra de índice gradual (GI) [3] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.7. Propagação da luz em uma fibra de múltiplos degraus (MSI) [3] 14
Figura 2.8. Comparação entre fibras MSI-POF e GI-POF [3] 14
Figura 2.9. Estrutura molecular do PMMA [3] 15
Figura 2.10. Atenuação e janelas de transmissão para POFs SI de PMMA [9]16
Figura 2.11. Espectro de Atenuação das POFs GI de PMMA (Optimedia) [3] 17
Figura 2.12. Comparação entre a atenuação da POF de PMMA e a PC-POF [3] – (traduzida pela autora)
Figura 2.13. Comparação entre atenuação da fibra de sílica e da PF-POF [3] – (traduzida pela autora)

Figura 2.14. Diferentes espectros de atenuação de POF-GI-PF ao longo dos anos [3] -
(traduzida pela autora)
Figura 2.15. Definição da atenuação em uma fibra óptica [3]
Figura 2.16. Conversão da razão de potência PL/ P0 em valores percentuais em dB [3] -
(traduzida pela autora)
Figura 2.17. Comparação entre os diferentes meios de transmissão da luz com respeito à
atenuação [3] – (traduzida pela autora)
Figura 2.18. Medição da largura de banda de uma POF-SI PMMA com AN = 0,46 [3] 24
Figura 2.19. Medição da largura de banda de uma POF-SI PC com AN = 0,75 [3] 24
Figura 2.20. Comparação da largura de banda dentre diferentes tipos de fibras multimodo [3].
Figura 2.21. Transmissão do sinal óptico em uma fibra multimodo e em uma fibra monomodo
[10]27
Figura 2.22. Comparação entre o diâmetro do núcleo e o cone de aceitação de fibras de sílica
e poliméricas [3] – (traduzida pela autora)
Figura 2.23 Perfil de índice de refração SL e a ilustração da propagação sob a perspectiva de
raios [3] – (traduzida pela autora)
Figura 2.24. Perfil de índice de refração GI a ilustração da propagação sob a perspectiva de
raios $[3] - (traduzida pela autora)$
Figura 2.25. Efeito da dispersão no sinal de saída [3] – (traduzida pela autora) 32
Figura 2.26. Diferença no diâmetro dos núcleos entre duas fibras [10]
Figura 2.27. Excentricidade e Elipsidade dos núcleos [10]
Figura 2.28. Reflexão de Fresnel [10]
Figura 2.29. Tipos de desalinhamento [10]

Figura 2.30. Irregularidades na superfície da fibra [10]35
Figura 2.31. Emenda por fusão em uma fibra óptica de sílica [13]
Figura 2.32. Protetor de Emenda por Fusão [13]
Figura 2.33. Emenda Mecânica em Fibra Óptica de Sílica [13]37
Figura 2.34. Aspecto da emenda mecânica [13]
Figura 2.35. Aspecto da emenda por acoplamento (ou conectorização) [13]
Figura 3.1. Representação simplificada de uma rede de acesso com tecnologia FTTx [1] 40
Figura 3.2. Equipamento ONT instalado na casa de um cliente FTTH [1] 41
Figura 3.3. Exemplo de soluções FTTX (X = B, H, N e C). Fonte: a autora (2017)42
Figura 3.4. Instalação de fibra óptica de sílica (Fonte 1: [15]; Fonte 2: [16]43
Figura 3.5. Ilustração de redes: (a) Home Run Fiber; (b) Active Ethernet [14] 44
Figura 3.6. Ilustração de um tipo de rede PON [14]45
Figura 3.7. Cenário de uma rede HAN [17]47
Figura 3.8. Cabo híbrido POF-Cobre [3]
Figura 3.9. Alguns dispositivos comercializados para uso em HAN [7]51
Figura 4.1. Região acoplada entre duas POFs. a) Antes da irradiação ultrassônica, b) Depois da irradiação ultrassônica, c) Imagem microscópica das POFs emendadas por irradiação ultrassônica [33]
Figura 4.2. Exemplo de conector ST para POFs [35]53
Figura 4.3. Adesivo Loctite 3525 curável por UV [10]55
Figura 4.4. Adesivo Loctite® 454 <sup>TM</sup> (Superbonder Gel) [10]
Figura 4.5. Foto de um sleeve de alumínio com um diâmetro em torno de 6mm e
comprimento de 15mm

Figura 4.6. Reparo do núcleo do sleeve na Microfresadora M70 da Proxxon
Figura 4.7. Sleeves expostos para secagem após a pintura
Figura 4.8. Clivador para POFs Fiber Optic Cutting Block - Edmund Optics [39]
Figura 4.9. Procedimento de montagem das emendas baseadas em adesivo. Fonte: a autora (2017)
Figura 4.10. Configuração experimental montada e utilizada para a medição da perda de inserção de cada emenda feita na POF. Fonte: a autora (2017)
Figura 4.11. Foto da configuração experimental para medida de perda de inserção das emendas
Figura 4.12. Espessura ampliada da película curada de Superbonder Gel em uma emenda de dois cabos de POFs padrão, como pode ser visto no meio da imagem. Abaixo na foto é mostrado a escala mm através de uma régua. A espessura estimada da película é cerca de 0,4 mm. Fonte: a autora (2017)
Figura 4.13. Medidas de ILd e ILg feitas a partir de emendas com uma POF SI PMMA. Fonte: a autora (2017)
Figura 4.14. Medidas ILd e (ILg feitas a partir de emendas com uma POF DSI PMMA. Fonte: a autora (2017)
Figura 4.15. Medidas ILd e ILg feitas a partir de emendas com uma POF GI PMMA. Fonte: a autora (20117)
Figura 5.1. Utilização da banda passante de um meio físico genérico em uma transmissão comum e utilizando multiplexação. Fonte: a autora (2017)
Figura 5.2. Esquema de multiplexação TDM. a autora (2017)
Figura 5.3. Esquema de multiplexação FDM. a autora (2017)
Figura 5.4. Esquema de multiplexação WDM. a autora (2017)72
Figura 5.5. Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM unidirecional de três canais. a autora (2017)

Figura 5.6. Sistema WDM Bidirecional [10]74
Figura 5.7. Demultiplexação por refração no prisma [53]
Figura 5.8. Dispersão de um feixe de luz branca provocada por um prisma [51]
Figura 5.9. Filtros Ópticos de Filmes Finos [54]77
Figura 5.10. (a) Esquema de demultiplexação utilizando filtros de interferência [53] e (b) multiplexação de dois feixes luminosos, verde e vermelho, utilizando um filtro de interferência [51]
Figura 5.11. (a) Esquema de demultiplexação utilizando grade de difração [53] e (b) fotografia de uma grade de difração real difratando a luz policromática incidente [51]
Figura 5.12. (a) Esquema de demultiplexação utilizando um AWG [53], (b) esquema da difração e interferência sofridas pelo feixe luminoso no AWG [61] e (c) AWG real utilizado para WDM em fibras de sílica [51]
Figura 5.13. Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA em função do comprimento de onda [3]
Figura 5.14. Esquema do dispositivo demultiplexador baseado em redes de difração, desenvolvido na Universidade de Eindhoven [3] – (traduzida pela autora)
Figura 5.15. Sistema WDM COM 4 LEDs [3]
Figura 5.16. (a) Esquema de aplicação e o (b) protótipo do MUX/DEMUX desenvolvido no Instituto Fraunhofer [3] – (traduzida pela autora)
Figura 5.17. Primeira amostra do demonstrador DEMUX [59]85
Figura 5.18. Configuração de medição com luz branca acoplada ao DEMUX [59]
Figura 5.19. Esquema do MUX/DEMUX desenvolvido pela Sony para aplicação em enlace bidirecional [3] – (traduzida pela autora)
Figura 5.20. Esquema do módulo MUX/DEMUX desenvolvido pela Sharp para aplicação em enlaces bidirecionais [3] – (traduzida pela autora)

Figura 5.21. (a) Esquema de enlace bidirecional utilizando o MUX/DEMUX desenvolvido
[61] e (b) fotografia do dispositivo [51]
Figura 6.1. Filtros de Absorção [10]90
Figura 6.2. Filtro de Interferência [10]90
Figura 6.3. Gráficos da transmissão dos filtros de interferência e absorção. [62]91
Figura 6.4. Tipos de Filtros [10]92
Figura 6.5. Representação da curva de transmitância do filtro passa-faixa [10]93
Figura 6.6. Representação da curva de transmitância do filtro passa-baixa (short-pass) [10]. 93
Figura 6.7. Representação da curva de transmitância do filtro passa-baixa (long-pass) [10]93
Figura 6.8. Ilustração do Cut-On em um filtro tipo Passa-Alta [10]
Figura 6.9. Ilustração do Cut-Off em um filtro tipo passa-baixa [10]94
Figura 6.10. Representação da curva de transmitância do filtro rejeita-banda (notch-filter) [10]
Figura 6.11. Espectro de transmissão dos filtros de absorção [10]96
Figura 6.12. Filtro KG-3 Heat Absorbing Glass da Edmund Optics [64]97
Figura 6.13. Filtro Plástico Celofane [10]
Figura 6.14. Filmes Plástico Gel [66]
Figura 6.15. Diagrama esquemático da montagem experimental de caracterização da
transmitância dos filtros plásticos. Fonte: a autora (2017)101
Figura 6.16. Foto da montagem experimental de caracterização da transmitância dos filtros
plásticos
Figura 6.17. Fonte de luz fria utilizada nos experimentos

Figura 6.18. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane azul. Nota-se
um comportamento do tipo passa-banda
Figura 6.19. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane verde. Nota-se
um comportamento do tipo passa-banda
Figura 6.20. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane laranja. Nota-se
um comportamento do tipo passa-alta considerando o espectro visível
Figura 6.21. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane vermelho. Nota-
se um comportamento do tipo passa-alta considerando o espectro visível
Figura 6.22. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel azul 104
Figura 6.23. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel verde 104
Figura 6.24. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel vermelho 105
Figura 6.25. Respostas de transmitância espectral para filme-gel laranja claro e laranja escuro.
Fonte: a autora (2017) 106
Fonte: a autora (2017)
Fonte: a autora (2017).106Figura 6.26. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel amarelo. Fonte: a autora (2017).106Figura 6.27. Procedimento de montagem dos filtros baseados em filmes de plásticos. Fonte: a autora (2017).108
Fonte: a autora (2017).106Figura 6.26. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel amarelo. Fonte: a autora (2017).106Figura 6.27. Procedimento de montagem dos filtros baseados em filmes de plásticos. Fonte: a autora (2017).108Figura 6.28. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao verde. Fonte: a autora (2017).110
Fonte: a autora (2017).    106      Figura 6.26. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel amarelo. Fonte: a autora (2017).    106      Figura 6.27. Procedimento de montagem dos filtros baseados em filmes de plásticos. Fonte: a autora (2017).    108      Figura 6.28. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao verde. Fonte: a autora (2017).    110      Figura 6.29. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao azul.    110      Figura 6.29. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao azul.    110
Fonte: a autora (2017).106Figura 6.26. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel amarelo. Fonte: a autora (2017).106Figura 6.27. Procedimento de montagem dos filtros baseados em filmes de plásticos. Fonte: a autora (2017).108Figura 6.28. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao verde. Fonte: a autora (2017).110Figura 6.29. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao azul. Fonte: a autora (2017).110Figura 7.1. Tipos de Acopladores (Divisor e Misturador). Fonte: a autora (2017).112
Fonte: a autora (2017).106Figura 6.26. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel amarelo. Fonte: a autora (2017).106Figura 6.27. Procedimento de montagem dos filtros baseados em filmes de plásticos. Fonte: a autora (2017).108Figura 6.28. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao verde. Fonte: a autora (2017).110Figura 6.29. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao azul. Fonte: a autora (2017).110Figura 7.1. Tipos de Acopladores (Divisor e Misturador). Fonte: a autora (2017).112Figura 7.2. Aplicações dos acopladores ópticos. Fonte: a autora (2017).114

Figura 7.4. Acopladores POF-Y (1x2) (à esquerda da Nichimen, à direita da Microparts) [3	\$]. 18
Figura 7.5. Acoplador POF 16 x 16 (Nichimen, [Nich00]) [3]11	18
Figura 7.6. Acoplador 1x4 da Nichimen [3] 11	19
Figura 7.7. Estrutura do acoplador da Leonhardy [3]11	19
Figura 7.8. Acoplador POF da Hama [3] 11	19
Figura 7.9. Princípio de acoplador-POF polido da Diemount [69]	20
Figura 7.10. Acoplador-POF polido (DieMount) [3]12	20
Figura 7.11. POF polida longitudinalmente em 50% (DieMount) [69] 12	21
Figura 7.12. Fabricação de um acoplador tipo guia de onda da IMM ([Klo03]) [3]12	21
Figura 7.13. Componente (acoplador-POF) acabado com POFs de 1 mm acopladas, da IMN [[Klo03]) [3]	M 22
Figura 7.14. Diagrama esquemático do aparato experimental destinado a medição da potências de saída de um divisor (splitter). Fonte: a autora (2017)	as 23
Figura 7.15. a) Splitter 1x2 DieMount, b) Splitter DieMount conectado a POF com sleeve Fornecidos pela própria Diemount [71]12	es 24
Figura 7.16. Configuração experimental utilizada para caracterização dos Divisores-POF 1x2	2. 24
Figura 7.17. Configuração experimental para medir a diretividade dos Combinadores 2x1. 12	26
Figura 7.18. Divisor 1x3 da DieMount12	27
Figura 7.19. Foto de um ferrolho da Industrial Fiber Opticas [72]	28
Figura 7.20. Perfuração dos cilindros metálicos utilizando uma micro-fresadora	28
Figura 7.21. Configuração experimental utilizada para caracterização do Divisor 1x3 12	29

Figura 7.22. Ilustração de um acoplador 1x3 129
Figura 8.1. Esquema do MUX/DEMUX desenvolvido pela Universidade de Ciência e Tecnologia da China [73]
Figura 8.2. Demultiplexador WDM-POF utilizando Grade Concava e fibras receptoras [57].
Figura 8.3. Distribuição do sinal na extremidade de entrada da fibra receptora [57] 133
Figura 8.4. Resultados do experimento realizado pela Universidade Kebangsaan. (%) da perda da potência da luz injetada (LED Vermelho, Verde e Azul) ao passar pelos filtros: a) vermelho; b) verde; c) azul [74]
Figura 8.5. Princípio de operação do DEMUX desenvolvido pela Universidade de Ciências Aplicadas Harz: 1 – Conector FC; 2 – 1m SI-POF; 3 – Lentes Esféricas; 4 – Espelhos Dicroicos; 5 – Filtros de Interferência [75]
Figura 8.6. Espectros de transmissão dos filtros gel vermelho, verde e azul 136
Figura 8.7. À esquerda: Acoplador com filtros verde e vermelho (1° protótipo). À direita: Acoplador com filtros azul e vermelho (2° protótipo)
Figura 8.8. Foto de dois protótipos MUX/DEMUX de dois canais visíveis WDM138
Figura 8.9. Saídas do DEMUX construído a partir de um divisor 1x3 com filtros coloridos fixados em cada uma das 3 extremidades de saída
Figura 8.10. Acoplador 1x3 com os filtros coloridos fixados protegidos por um sleeve gerando um protótipo do MUX/DEMUX de 3 canais WDM
Figura 8.11. Diagrama esquemático para a caracterização óptica de um DEMUX. Fonte: a autora (2017)
Figura 8.12. Demonstração dos resultados experimentais quanto as potências ópticas injetadas e transmitidas pelo DEMUX (#1) (verde x vermelho). Fonte: a autora (2017)
Figura 8.13. Demonstração dos resultados experimental do DEMUX (#2) (azul x vermelho). Fonte: a autora (2017)

Figura	8.14.	Diagrama	experimental	esquemático	para	a	caracterização	de	um
demulti	plexado	or de 3 canais	s. Fonte: a autor	ca (2017)		•••••			144

### LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Comparação das caraterísticas entre POF, GOF e cobre [5] 10
Tabela 2.2. Características de transmissão de POFs conforme o seu perfil do índice de refração [5].   15
Tabela 2.3. Contribuições da atenuação para fibras de PMMA de perfil SI [3]
Tabela 2.4. Coeficientes de atenuação para PMMA-SI-POF em função do diâmetro do núcleo de vários fabricantes [9].   22
Tabela 2.5. Mecanismos que contribuem para a atenuação numa POF e coeficientes de atenuação limite obtidos teoricamente [9]. 23
Tabela 2.6. Produto para fibras ópticas SI e GI de PMMA [3]. 23
Tabela 2.7. Fabricantes de POFs no mercado atual [5]
Tabela 2.8. Comparação entre POFs de diversos fabricantes [5]. 26
Tabela 2.9. Número estimado de modos em fibras ópticas [3]. 28
Tabela 3.1. Tecnologias à rádio disponíveis para redes de curta distância [1].    38
Tabela 3.2. Tecnologias cabos metálicos disponíveis para redes de curta distância [3] 39
Tabela 3.3. Tecnologias de fibras ópticas disponíveis para redes de curta distância [3] 39
Tabela 4.1. A média e desvio padrão calculados a partir dos resultados de medição de ILd      ("conexão seca") e ILg ("conexão colada") para os 3 principais tipos de POFs PMMA      disponíveis no mercado
Tabela 6.1. Características dos filtros de interferência e absorção
Tabela 6.2. Características de transmissão utilizando 4 camadas de filtro celofane 103
Tabela 6.3. Características de transmissão utilizando 1 camada de filtro gel 105
Tabela 6.4. Características de transmissão utilizando 2 camadas de filtro gel 105

Tabela 6.5. Resultado da Caracterização dos Filtros. 109
Tabela 6.6. Valores IL dos Filmes-Gel
Tabela 7.1. Equipamentos/componentes utilizados nos experimentos
Tabela 7.2. Parâmetros Medidos do Divisor 1x2 (1#). 125
Tabela 7.3. Parâmetros Medidos do Divisor 1x2 (2#). 125
Tabela 7.4. Perda Excedente encontrada para cada Fonte de Luz em cada uma das duas amostras de divisor-POF. 126
Tabela 7.5. Parâmetros Medidos e Valores da Diretividade dos Combinadores 2x1 127
Tabela 7.6. Resultado das medidas realizadas no Divisor 1x3
Tabela 7.7. Resultado da perda de Inserção nas saídas do Acoplador 1x3 130
Tabela 8.1. Perdas de um sistema WDM sobre POF a base de splitters, conectores e filtros coloridos, realizado em 1997 pela Universidade de Ulm junto ao Centro de Tecnologia da Deutsche Telekom [1].      131
Tabela 8.2. Sumários dos dispositivos e equipamentos utilizados no experimento 140
Tabela 8.3. Parâmetros Medidos do DEMUX (1#) (Verde x Vermelho)141
Tabela 8.4. Parâmetros medidos do acoplador (1#) (Capítulo 7). 142
Tabela 8.5. Parâmetros Medidos do DEMUX (#2) (Azul X Vermelho)
Tabela 8.6. Parâmetros medidos do acoplador (#2) (Capítulo 7)144
Tabela 8.7. Parâmetros Medidos do DEMUX (#3) (Vermelho x Verde x Azul) 145
Tabela 8.8. Parâmetros Medidos do DEMUX (#3) (Vermelho x Verde x Azul) 145

### LISTA DE SIGLAS

AN	Abertura Numérica
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed WaveGuide
CATV	Community Antenna Television
CCD	Charge-Coupled Device
CDMA	Code Division Multiple Access
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
СҮТОР	Cyclic Transparent Optical Polymer
D2B	Domestic Digital Bus
DEMUX	Demultiplexador/Demultiplexer
DSI	Double Step Index
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EMD	Equilibrium Mode Distribution
FDM	Frequency Division Multiplexing
FiTH	Fiber-into-The-Home
FTTB	Fiber-To-The-Building
FTTC	Fiber-To-The-Curb
FTTH	Fiber-To-The-Home
FTTN	Fiber-To-The-Node
FTTP	Fiber-To-The-Premises
FTTX	Fiber-To-The-X
GOF	Glass Optical Fiber
GI	Graded-Index
GUI	Graphic User Interface
HAN	Home Area Network
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HDTV	High Definition Television
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IPTV	IP Television

**ITU-T** International Telecomunication Union – Telecommunication

	Stndardization Sector
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LD	Laser Diode
LED	Light Emitting Diode
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MOST	Media Oriented Systems Transport
MSI	Multi-Step Index
MUX	Multiplexador/Multiplexer
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
PC	Polycarbonate
PD	Photodetector
PF	Perfluorinated
PLC	Power Line Comunnication
PMMA	Poly-Methyl-Methacrylate
PNA	Phoneline Networking Alliance
POF	Plastic/Polymer Optical Fiber
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDM	Space Division Multiplexing
SI	Step Index
SOHO	Small Office/Home Office
TDM	Time Division Multiplexing
UMD	Uniform Mode Distribution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VoIP	Voice over IP
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WWDM	Wide/Wideband Wavelength Division Multiplexing

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1. MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente procura de serviços de telecomunicações por todo o mundo, com particular destaque para a Internet, requer cada vez mais largura de banda, sendo então necessário continuar a desenvolver novas tecnologias. Os serviços como VoIP (*Voice over IP*), IPTV (*IP Television*), HDTV (*High Definition Television*), telefonia fixa, Internet e monitoramento interno e externo, geram todos uma procura crescente por taxas de transmissão digital extremamente altas, e requerem a utilização destes serviços em um mesmo meio físico de transmissão [1]. Este fenômeno que alguns apelidam como "fome de banda", não parece dar sinais de arrefecimento mesmo em 2017. Isto se deve não somente ao crescente mercado de serviços fixos, como por exemplo, a proliferação de redes FTTx (*Fiber-To-The-X*) em diversos países, como também a "explosão" do mercado de serviços móveis. Estes últimos também acabam por "pressionar" as redes por fibra óptica.

As redes de acesso tradicionais baseadas nos cabos de cobre, não acompanham o crescimento mencionado no parágrafo anterior. Por estas razões, ao longo destes últimos anos têm sido feitos esforços consideráveis no sentido da remodelação das redes de acesso, substituindo as atuais infraestruturas das tecnologias de cobre por fibra óptica, com objetivo de levar maior largura de banda para os clientes [1]. De fato diversas redes tipo FTTx tem sido instaladas em diversos países como Coréia do Sul, Japão, EUA, e até mesmo no Brasil, basta observar os cabos de fibras ópticas em postes, sendo instalados ou reparados na rua, etc. As fibras ópticas de base sílica são leves, apresentam pequenas dimensões, elevada capacidade de transmissão, baixa atenuação, elevada segurança quanto à transmissão de dados e imunidade a interferências eletromagnéticas [2], constituindo em um meio consagrado para as redes de Telecomunicações fixas de forma geral, de suporte para as redes sem-fio e das redes que usam cabos metálicos (por exemplo, as redes HFC de distribuição de vídeo).

Uma das soluções de redes de acesso utilizando fibra óptica é denominada FTTx (*Fiber-To-The-X*), em que o "x" indica o local da rede de comunicação em que a fibra óptica é terminada. Assim, surgem diversas configurações cujas siglas são determinadas por este ponto de terminação, como FTTN, FTTC, FTTB e FTTH, conforme ilustrado na Figura 1.1 (N = *Node*, C = *Curb*, B = *Building*, H = *Home*). Dentre estas soluções, a que leva a fibra ao ponto

mais próximo do usuário é o FTTH, no qual a fibra se estende da Central (*Optical Line Terminal*, OLT) até um terminal de rede óptico (*Optical Network Terminal*, ONT) na residência do usuário ou em um pequeno escritório. Porém, deste ponto em diante, em geral, ainda se utiliza cabos metálicos, para distribuição dos sinais pela residência ou escritório [1].



Figura 1.1. Exemplos de soluções de redes de acesso tipo FTTX (X = B, H, N e C). Fonte: a autora (2017).

Para contemplar a oferta de serviços de telecomunicações cada vez mais intensos em necessidade de banda, o ideal seria que houvesse uma continuação do FTTH no interior da residência ou do escritório, ou seja, uma LAN (Local Area Network) ou FiTH (Fiber-into the Home) formada por fibras ópticas para distribuição do sinal, conforme ilustrado nas Figuras 1.2 e 1.3.



Figura 1.2. Exemplo de integração entre FTTH e FiTH em uma residência. Fonte: a autora (2017).



Figura 1.3. Exemplo de integração entre FTTH e FiTH em um pequeno escritório. Fonte: a autora (2017).

Deve-se notar que residências ou instalações corporativas podem receber sinais de diversos serviços de telecomunicações através de variados meios físicos: fibras ópticas de sílica, cabos metálicos ou interface aérea. Uma "inteligência" adequada pode permitir concentrar a entrada destes sinais através de um único equipamento. A partir deste último, os sinais podem ser distribuídos pela residência através de uma combinação de fibras ópticas (preferencialmente de plástico), cabos metálicos e *wireless*. O uso de uma rede interna de fibras ópticas plásticas contempla, não só uma organização interna de cabeamento, como também lidar internamente com grande tráfego de dados, assim como os sinais de banda larga que chegam ao escritório ou residência via rede FTTH. A justificativa de uso de fibras ópticas plásticas, escritórios e outros ambientes "pequenos" é feita a seguir.

Para implementação de uma LAN baseada em fibras ópticas, deve-se considerar a escolha do tipo de fibra a ser utilizada. Dentre os tipos existentes, as POFs (*Plastic/Polymer Optical Fibres*) são as mais indicadas para uso em enlaces de curtas distâncias, como redes internas em automóveis, navios e aviões, e pequenas redes em escritórios ou em residências (*Small Office/Home Office*, SOHO), uma vez que, em relação às fibras de sílicas, possuem maior resistência mecânica, são fáceis de serem manuseadas, pouco sensíveis a curvaturas, e possuem custos bem menores [3]. Além disso, são fáceis de conectar, não exigindo mão-de-obra qualificada (tecnologia *do-it-yourself* – "faça você mesmo") para manuseio, instalação ou operação.

Além do meio físico em si (como uma POF), outros elementos são requeridos para que uma LAN possa ser implementada de fato, como conversores de mídia e gateways inteligentes. No caso das LANs ópticas onde é inerente o uso de dispositivos optoeletrônicos, pode ser também necessário o uso de componentes passivos além da fibra óptica como: acopladores, atenuadores, conectores ópticos e filtros ópticos. Outros dispositivos passivos podem também ser essenciais, como multiplexadores/demultiplexadores (MUX/DEMUX) capazes de realizar multiplexação WDM (Wavelength Division Multiplexing). Tais dispositivos podem facilitar a implementação da infraestrutura necessária para a operação do sistema, além de melhorar o aproveitamento da banda. Isto é possível, porque os dispositivos WDM permitem transportar diversos sinais com pequena largura de banda sobre um meio com elevada banda passante, ocupando uma maior fração desta banda disponível. Além disso, o uso desse dispositivo (WDM) permite reduzir relativamente o comprimento total de POF utilizado na infraestrutura do sistema, facilitando sua instalação, uma vez que ele permite a implementação de enlaces bidirecionais *full-duplex*, através do uso de comprimentos de onda diferentes para upstream e downstream. Um MUX/DEMUX WDM eficiente e com custo razoável para operação com POFs, ainda não está disponível comercialmente, embora já existam diversos estudos e desenvolvimentos até a escala de protótipo. Dessa forma, os enlaces unidirecionais (utilização de uma fibra para recepção e outra para transmissão) podem ser transformados em bidirecionais *full*-duplex [3] [2].

A grande motivação deste trabalho é o crescimento das redes internas, tanto nas residências como em pequenos escritórios, que exigem uma capacidade de transmissão cada vez maior, sendo necessário introduzir novos elementos na rede e explorar meios físicos mais eficientes para atender a esta capacidade e aprimorar a qualidade da transmissão a um custo

relativamente baixo. Então, POFs de PMMA (*Poly-Methyl-Methacrylate*) são bastante interessantes para essas redes, ao menos até ~1 Gbps, podendo potencialmente ultrapassar este valor. Naturalmente, que em aplicações residenciais, todos os componentes e equipamentos envolvidos e técnicas, além de terem de ser eficientes e confiáveis, devem ser o mais simples, compacto, robusto, seguro e de mais baixo custo possível.

#### **1.2. OBJETIVOS**

Dos dispositivos necessários para uma LAN utilizando POFs para a distribuição de sinais, conforme citados na Seção 1.1, apenas um deles será aqui desenvolvido e caracterizado.

O dispositivo a ser efetivamente desenvolvido é o DEMUX WDM para POFs PMMA. Uma das formas mais simples para realizá-lo, é utilizar divisores em conjunto com filtros ópticos capazes de transmitir um determinado comprimento de onda e bloquear os demais. Será descrito o desenvolvimento de dois protótipos, um DEMUX WDM para 2 canais e outro para 3 canais, ambos aproveitando as janelas de transmissão óptica das POFs de PMMA.

Além desses protótipos, foi descrita uma técnica simples, de baixo custo, a "prova-dehabilidade-de-operador", segura e robusta para a realização de emendas permanentes em POFs-PMMA do tipo SI (step index), DSI (double step index) e GI (graded index). A principal vantagem dessa técnica é a facilidade de ser realizada, sem a necessidade de habilidades para tal, tendo como objetivo facilitar o usuário final que poderá manipular e reparar a sua própria rede de POFs.

#### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação é composta por 08 capítulos, referências bibliográficas e anexos, estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 1 Introdução: Neste capítulo, é apresentado o enquadramento desta dissertação e os objetivos a cumprir.
- Capítulo 2 Revisão sobre Fibras Ópticas Poliméricas: Inicia-se com uma revisão sobre fundamentos e estruturas das fibras ópticas, apresentando em seguida as principais

características e os tipos das POFs. Ao final do capítulo, são descritos também a atenuação e a largura de banda das POFs.

- Capítulo 3 Emenda Permanente para POF-PMMA: Descreve uma técnica simples e de baixo custo para a realização de emendas permanentes em POFs-PMMA do tipo SI-*high*-AN, DSI-*low*-AN e GI. Também são apresentados os experimentos realizados no laboratório e as medidas para obter a perda por inserção ao utilizar esse tipo de emenda.
- O Capítulo 4 Redes Ópticas de Curta Distância: Introduz as redes ópticas de curto alcance, apresentando primeiramente alguns conceitos pertinentes ao FTTx. Posteriormente o foco da discussão é transferido para as LANs ópticas.
- O Capítulo 5 Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda sobre Fibras Ópticas Poliméricas: Descreve o conceito, a motivação e o objetivo das técnicas de multiplexação, com enfoque para o WDM. São apresentadas algumas técnicas de multiplexação WDM e a aplicação deste tipo de multiplexação sobre POFs. Além disso, são apresentados alguns dispositivos WDM para POFs já desenvolvidos em laboratórios.
- O Capítulo 6 Filtros Ópticos de Papel Plástico e Gel: Apresenta uma introdução sobre os filtros de absorção e as diferenças entre esses tipos de filtros e os de interferência. Apresenta também uma investigação sobre papel de celofane e os filmes-gel, propondo como solução de filtro na montagem do DEMUX WDM. Por último, são discutidos os valores obtidos a partir da caracterização desses filtros.
- Capítulo 7 Acopladores Ópticos: Descreve os principais tipos de acopladores para POFs, apresentando suas principais características e funções. Em seguida, são descritos os acopladores selecionados para a construção do DEMUX WDM mostrando as medidas obtidas através de suas caracterizações e o cálculo de suas perdas de inserção e razão de acoplamento.
- Capítulo 8 Desenvolvimento do DEMUX WDM baseado em filtros de filmes de Plástico: Apresenta a construção dos protótipos DEMUX WDM para 2 e 3 canais e suas caracterizações analisando e discutindo seu desempenho.
- Finalmente, o Capítulo 9 apresenta as conclusões desta Dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

### 2. REVISÃO SOBRE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS

#### 2.1. INTRODUÇÃO

As fibras ópticas estão entre as principais responsáveis pelas revoluções ocorridas nas telecomunicações, pois têm capacidade de transmitir grandes quantidades de informações com confiabilidade e alta taxa de transmissão. São meios físicos constituídos de fios finos e por ondas de luz.

As fibras ópticas possuem vantagens significativas sobre os cabos metálicos, o que torna a comunicação mais eficiente e com maior qualidade de transmissão.

Há diversos tipos de fibras ópticas com características distintas, devendo ser empregadas adequadamente de acordo com o sistema ao qual se destinam.

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, serão tratadas apenas as fibras ópticas poliméricas recomendadas para redes e enlaces de curta distância, com alcance típico menor que 500 m considerando as POFs de PMMA.

#### 2.2. FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS (POFs)

#### 2.2.1. Perspectiva Histórica

As primeiras Fibras Ópticas Poliméricas (POF), eram usadas em iluminação e na comunicação de baixa velocidade em distâncias curtas. Hoje a POF pode transmitir dados em alta velocidade, com fácil acoplamento e custos reduzidos quando comparada com as fibras convencionais de sílica em pequenas redes; seu preço torna-as competitivas com os cabos de cobre.

As POFs tiveram a sua origem na década de 1960, tendo sido, pela primeira vez, divulgadas pelo Pilot Chemical of Boston. Posteriormente, os principais desenvolvimentos nesta temática foram realizados ao longo dos anos 60 pela DuPont. A Mitsubishi Rayon foi a empresa que comercializou, em 1975, a primeira SI-POF denominada de EskaTM, apresentando um coeficiente de atenuação de 1000 dB/km. Subsequentemente, a Asahi Chemical, a Toray e a NTT, entraram no mercado e, em 1983, a atenuação para as POFs tinha

alcançado um mínimo de 55 dB/km (568 nm) [4][10]. Desde então as POFs de PMMA vêm sendo aprimoradas com o intuito de reduzir as perdas e aumentar sua largura de banda. Em 1995 surgiu uma grande inovação, o aparecimento das fibras ópticas constituídas por polímeros perfluorados (PF, do inglês perfluorinated), desenvolvida pela Universidade Keio apresentando perdas inferiores a 50 dB/km para o intervalo de comprimentos de onda 850-1300nm tornando-se disponível em 2005 [4].

#### 2.2.2. Estrutura das Fibras Ópticas Poliméricas.

Fibras ópticas são estruturas transparentes, flexíveis, geralmente compostas por dois materiais dielétricos. Em sua forma mais simples, as fibras ópticas são constituídas por uma região central por onde a luz é transmitida, chamada de núcleo. O núcleo das POFs usadas em comunicações possuem diâmetro típico na faixa 50-980 µm, valores estes característicos de fibras multimodo conforme será discutido mais adiante.



Figura 2.1. Esquema estrutural de uma fibra óptica convencional [5].

Ao redor do núcleo está a casca, que possui um material com índice de refração menor. A diferença entre os índices de refração da casca e do núcleo possibilita a reflexão total permitindo o confinamento da luz guiada. O valor do índice de refração do núcleo de uma POF depende do tipo de material constituinte, em que o mais comum é o poli-metilmetacrilato (PMMA). Ao redor do núcleo há uma fina camada do mesmo polímero fluorado como um material de casca.

Ao redor da casca, ainda há uma capa feita de material plástico resistente, como forma de proteger o interior contra danos mecânicos. No caso das POFs de PMMA, comumente utiliza-se o polietileno em cores variadas, embora o preto predomine.

A diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca é obtida usando-se polímeros distintos ou através de dopagens convenientes.

Diversos parâmetros podem ser alterados durante a fabricação de uma fibra óptica, como o diâmetro do núcleo, a espessura da casca, o material utilizado, o perfil de índice de

refração, os dopantes inseridos e a própria estrutura física da fibra óptica, originando inúmeros tipos de fibras ópticas e determinando as características intrínsecas a cada uma delas. Os materiais do núcleo e da casca, por exemplo, determinam as características de atenuação e a dispersão cromática; o diâmetro do núcleo determina o número de modos, o perfil de índice de refração determina a dispersão modal, este último mecanismo dispersivo é predominante nas POFs constituídas de perfil abrupto (SI) de índice de refração [3].

#### 2.2.3. Vantagens e Desvantagens das POFs.

A utilização da POF como meio de transmissão de dados, oferece algumas vantagens e desvantagens. Uma das suas grandes vantagens deve-se ao fato de poder utilizar componentes mais simples e menos dispendiosos. Isso ocorre devido a sua estrutura física, o diâmetro típico de seu núcleo é de 1,0 mm e possui grande abertura numérica, características estas que permitem o uso de fontes ópticas de baixa coerência e mais baratas (como o caso dos LEDs). O processo de acoplamento é melhor e requer pouca precisão com os conectores. Por outro lado, as POFs também possuem algumas desvantagens, nomeadamente o suporte a altas temperaturas (> 125°C), e às suas perdas durante a transmissão; quando comparadas com as GOFs (*Glass Optical Fiber*). Na Tabela 2.1 pode-se verificar com mais detalhe a comparação de algumas caraterísticas entre a POF, GOF e o cobre.

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

Tabela 2.1. Comparação das caraterísticas entre POF, GOF e cobre [5].

Outra vantagem das POFs, é que podem, em princípio, ser instaladas por qualquer pessoa não especializada, desde que sejam fornecidos os equipamentos/componentes/ferramentas necessários para realizar esta tarefa. A Figura 2.2 mostra uma conexão realizada com conectores FC e duas ferramentas simples para clivagem da extremidade da fibra e para decapar a POF.



Figura 2.2. Conexão realizada com conectores FC e ferramentas utilizadas para clivagem e decapagem da POF [7].

O baixo custo destas ferramentas simplifica e reduz o custo de implementação do sistema. As dimensões em torno de 1 mm 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 [6].

Como operam no espectro visível, as POFs de PMMA trazem maior segurança para o operador, pois a luz visível pode ser percebida pelo operador enquanto que a luz infravermelha é invisível para o olho humano. 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), conforme Figura 2.3. A Figura 2.4 ilustra as extremidades de uma POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo e diâmetro cabeado total igual a 2,2 mm, sendo possível diferenciar bem o núcleo e o revestimento.



POF Nua Acesa



Figura 2.3. POF nua (bare fiber) acesa [7].



Figura 2.4. POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo, revestida [7].

#### 2.2.4. Tipos de POF:

As fibras poliméricas com maior disponibilidade comercial atualmente são as de perfil de índice degrau (SI) (base PMMA) e de índice gradual (GI) (base fluoretada). O tipo de perfil é fortemente responsável pelo alargamento temporal sofrido pelos pulsos luminosos ao longo da fibra, ou seja, pela dispersão. É fundamental o conhecimento sobre o perfil refrativo e seu relacionamento com a dispersão do pulso luminoso na fibra.
Como nas fibras de sílica, as primeiras POFs desenvolvidas apresentavam um perfil de índice em degrau (SI-POF) em que a casca envolve um núcleo homogêneo apresentando um índice de refração uniforme. Devido à alta dispersão (modal) presente na SI-POF, foi desenvolvida a GI-POF tanto em base PMMA quanto fluoretada, cujo perfil de índice de refração do núcleo apresenta um perfil parabólico, compensando parcialmente os efeitos da dispersão modal podendo alcançar maiores taxas de transmissão.

A Figura 2.5 apresenta a forma esquemática da propagação da luz na POF para dois tipos principais de distribuição de índices. Podemos então observar, uma menor dispersão temporal nas POFs de índice gradual. Na prática, a fibra com índice gradual faz com que os raios de luz percorram caminhos diferentes, com velocidades diferentes, e cheguem à outra extremidade da fibra praticamente ao mesmo tempo. Isso acontece devido à variação de gradiente do índice de refração à medida que aumenta a distância ao eixo da fibra, enquanto a casca mantém um índice de refração constante.



Figura 2.5. Propagação da luz para os principais tipos de núcleo [4].

É fácil entender, de forma qualitativa, por que a dispersão intermodal ou de multipercurso é reduzida em fibras de índice gradual (Figura 2.6). O percurso é mais longo para raios mais oblíquos, entretanto, a velocidade do raio muda ao longo do percurso, devido às variações no índice de refração. Mais especificamente, o raio que se propaga ao longo do eixo da fibra viaja pelo percurso mais curto, mas possui a menor velocidade, pois o índice de refração é máximo ao longo desse percurso. Raios oblíquos possuem grande parte de seus percursos em um meio de menor índice de refração, no qual viajam mais rapidamente.



Figura 2.6. Propagação da luz em uma fibra de índice gradual (GI) [3] - (traduzida pelo autor).

As dificuldades tecnológicas em produzir GI-POFs que apresentassem um perfil de índice de refração do núcleo estável, levaram ao desenvolvimento de uma POF com índice em múltiplos degraus (MSI-POF). Neste tipo de fibra, o núcleo é formado por várias camadas, onde os raios luminosos não se propagam com trajetórias continuamente curvas, mas sim com trajetórias definidas pelos índices de refração dos vários degraus [3]. Esta situação está ilustrada na Figura 2.7.



Figura 2.7. Propagação da luz em uma fibra de múltiplos degraus (MSI) [3].



A Figura 2.8 mostra uma comparação entre fibras MSI-POF e GI-POF.

Figura 2.8. Comparação entre fibras MSI-POF e GI-POF [3].

Em geral, a SI-POF é utilizada para transmissão de dados ou iluminação. Em comparação com a GI-POF e a MSI-POF, a SI-POF apresenta atenuação mais baixa, porém com uma largura de banda limitada, sendo assim, amplamente utilizada em ligações curtas de baixo custo.

A Tabela 2.2 apresenta as principais características das POFs anteriormente referidas em função da sua capacidade de transmissão de dados.

Perfil Refrativo	Capacidade de Transmissão (B · L)	Características
Índice em degrau (SI-POF)	5 MHz.km	<ul> <li>Comunicações de curtas distâncias</li> <li>Elevada dispersão intermodal</li> <li>Fácil acoplamento com fonte óptica</li> </ul>
Índice multi- degrau (MSI-POF)	30 MHz.km	<ul> <li>Comunicações de curtas e médias distâncias</li> <li>Baixa dispersão intermodal</li> <li>Fabrico relativamente simples</li> </ul>
Índice gradual (GI-POF)	600 MHz.km	<ul> <li>Comunicações de curtas e médias distâncias</li> <li>Baixa dispersão intermodal</li> <li>Suporte a elevados débitos binário</li> </ul>

Tabela 2.2. Características de transmissão de POFs conforme o seu perfil do índice de refração [5].

## 2.2.5. Matéria Prima da POF

Nesta secção serão apresentadas as características dos três principais tipos de materiais usados na fabricação de POFs (os mais utilizados). São eles: o poli-metil-metacrilato (PMMA), o policarbonato (PC) e o polímero fluoretado (PF).

## A) POFs de PMMA

O material mais frequentemente utilizado na produção de POFs é o polímero termoplástico PMMA [3], informalmente conhecido por Plexiglas®. Sua estrutura molecular pode ser observada na Figura 2.9.



Figura 2.9. Estrutura molecular do PMMA [3].

Cada monômero do PMMA (MMA) possui oito ligações C-H, cujos harmônicos de ressonância, responsáveis pela absorção intrínseca, constituem a principal causa da elevada atenuação do material. 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 locais ou as de armazenamento (LANs, Storage Area Networks).

Do ponto de vista de transparência óptica, este material pode atingir 92%, um pouco menos do que a do Óxido de Silício (SiO2) da fibra de sílica que pode atingir praticamente 100%. O índice de refração típico do PMMA é 1,492 e a temperatura de transição vítrea situase entre os 95°C a 125°C. Em temperatura ambiente e atmosferas com 50% de humidade relativa, o material pode absorver até 1,5% de água, o que afeta as características de atenuação.

Como ilustrado pela Figura 2.10, o máximo de absorção (dentro da janela visível) situa-se nos 620nm, com um coeficiente de atenuação em torno de 450dB/km. Para o espectro visível, as janelas de transmissão localizam-se em comprimentos de onda de 470nm, 520nm, 570nm e 650nm, que são as 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 é em princípio a melhor opção para POFs SI de PMMA, uma vez que apresenta a menor perda. Porém, atualmente as fontes luminosas que emitem neste comprimento de onda são relativamente pouco exploradas para enlaces de comunicação de dados. As fontes ópticas na faixa amarelo-laranja têm sido pouco empregadas devido ao fato de que os compostos semicondutores como GaAsP, AlGaInP e Gap:N não produzem uma eficiente e/ou rápida modulação de luz [6][7]. Os enlaces com POFs de PMMA utilizam fontes como LDs (laser diode) e LEDs (light emitting diode) centrados geralmente em torno de 650 nm (vermelho). Entretanto, o uso de LEDs e LDs emitindo no azul/verde têm sido empregados nos últimos anos.



Figura 2.10. Atenuação e janelas de transmissão para POFs SI de PMMA [9].

As perdas típicas de  $\approx$  150 dB/km no comprimento de onda de 650nm,  $\approx$  90dB/km em 520nm e  $\approx$  70 dB/km em 570nm, limitam a utilização destas fibras a 100m, 400m e 500m, respectivamente.

O PMMA é bastante utilizado na fabricação de POFs SI padrão, com 980 µm de núcleo, porém, recentemente POFs GI, que costumavam apresentar menor núcleo, foram fabricadas a partir do PMMA pela Optimedia (desde 2004), mantendo o núcleo de 980µm, e passaram a ser comercializadas sob o nome OM-GIGA-POF [7]. O gráfico da Figura 2.11 mostra a janela de atenuação de uma POF GI de PMMA da Optimedia.



Figura 2.11. Espectro de Atenuação das POFs GI de PMMA (Optimedia) [3].

As atenuações espectrais para POF-GI PMMA são de  $\approx 225 \text{ dB} / \text{km} (590 \text{ nm}), \approx 190 \text{ dB} / \text{km} (650 \text{ nm}) e \approx 600 \text{ dB} / \text{km} (780 \text{ nm}) [8]. Portanto, a POFs-GI PMMA usa, principalmente o comprimento de onda em torno de 650nm (canal vermelho), porém, exibe maior atenuação quando comparado com a POF padrão [7]. No entanto, tais fibras apresentam uma largura de banda muito maior do que as POFs padrão.$ 

#### **POFs de Policarbonato (PC-POF)**

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 (considerando enlaces de 2-3 m) para a aplicação à qual se destinam. A Figura 2.12 compara a curva característica de atenuação da POF de PMMA com a PC-POF.

A possibilidade de operação em temperaturas mais elevadas, é obtida em troca de uma maior atenuação total da fibra óptica.

A PC-POF consegue operar a uma temperatura de 125 °C, com uma atenuação de 600 dB/km em 660nm. Sua capacidade de transmissão é de 17 MHz em 100 m, possui uma abertura numérica de 0,78 com um índice de refração elevado, de 1,58 [3].



Figura 2.12. Comparação entre a atenuação da POF de PMMA e a PC-POF [3] – (traduzida pela autora).

#### **B) POFs de Polímeros Fluoretados (PF-POF)**

Com o objetivo de se reduzir ainda mais os coeficientes de atenuação das POFs, foi criada uma fibra com um polímero de flúor (PF). Os átomos de hidrogênio (constituintes do PMMA ou do polyestireno - PS) foram substituídos por flúor, o qual tem cerca de 19 vezes mais a massa atômica do hidrogênio. Esse tipo de fibra, possui um índice de refração mais baixo de todos, sendo este cerca de 1,34. As PF-POFs apresentam uma atenuação mínima na janela de comprimento de onda a 850-1300nm (Figura 2.13). É bem conhecido que as fontes ópticas adequadas que emitem em comprimentos de onda no infravermelho próximo (0,8-1,6µm) são tecnologicamente bem desenvolvidas e estão disponíveis comercialmente para uso com fibras de sílica e, mais recentemente, também com PF POFs.

Até à data (2017), os melhores resultados que se obtiveram na produção de PF-POFs com baixa atenuação foram conseguidos através do material CYTOP® (CYclic Transparent Optical Polymer) de índice de refração gradual (GI), desenvolvido pela AGC Asahi Glass. Depois de vários melhoramentos, conseguiu-se obter valores de atenuação abaixo de 20 dB/km para 1300nm, permitindo que se fizesse transmissão de dados em enlaces de até 1000 metros.



Figura 2.13. Comparação entre atenuação da fibra de sílica e da PF-POF [3] – (traduzida pela autora).

Foi possível reduzir a atenuação das fibras passo a passo desde inicialmente acima de 50 dB/km até 30 dB/km e, finalmente, para menos de 10 dB / km em um comprimento de onda de 1300 nm. Diferentes espectros de atenuação de GI-POFs são comparados na Figura 2.14. Os anos (parâmetro) indicam a história do desenvolvimento desta tecnologia.



Figura 2.14. Diferentes espectros de atenuação de POF-GI-PF ao longo dos anos [3] - (traduzida pela autora).

Porém, as PF-POFs possuem o núcleo bem reduzido em diâmetro se comparadas com as PMMA-POFs, o que dificulta o acoplamento da luz, perdendo os principais atrativos das fibras poliméricas que são o fácil manuseio e o baixo custo.

#### 2.2.6. Atenuação em Fibras Poliméricas

Uma das características mais importantes de uma fibra óptica é a atenuação. Quando a luz passa através da fibra óptica de comprimento L, a potência óptica é atenuada (Figura 2.15).



Figura 2.15. Definição da atenuação em uma fibra óptica [3].

A potência de saída do enlace pode ser calculada segundo a Equação 2.1. A atenuação normalmente é expressa em valores logarítmicos e pode ser calculada através da Equação 2.2, em dB por unidade de comprimento [3].

$$P_L = P_0 e^{-\alpha \prime L} \tag{2.1}$$

$$a_{dB} = \frac{10}{L} \log \left( \frac{P_L}{P_0} \right) \tag{2.2}$$

*P<sub>L</sub>*: potência Óptica de saída;

P<sub>0</sub>: potência óptica de entrada;

 $\alpha'$ : coeficiente de atenuação medido em km<sup>-1</sup>;

L: comprimento da fibra Óptica;

*a*<sub>dB</sub>: atenuação em dB por unidade de comprimento

O valor da atenuação é adimensional (dado por um número em dB) obtido através do produto  $\alpha' L$ . A Figura 2.16 ilustra a relação entre o valor da atenuação e a relação percentual da potência.



Figura 2.16. Conversão da razão de potência PL/ P0 em valores percentuais em dB [3] - (traduzida pela autora).

A Figura 2.17 fornece um panorama da atenuação causada pelos diversos meios físicos de transmissão da luz, desde 1550nm com 0,2 dB/km, das fibras de sílica com o menor

valor de atenuação. Em 520nm, é mostrado o valor da atenuação de uma fibra polimérica que é, aproximadamente, 365 vezes maior em dBs. Para a PMMA-POF, após 38 metros a potência óptica é reduzida em aproximadamente 50% do valor inicial (520nm). A atenuação da POF (PMMA ou PF) faz com que ela seja conveniente apenas para distâncias curtas.



Figura 2.17. Comparação entre os diferentes meios de transmissão da luz com respeito à atenuação [3] - (traduzida pela autora).

A atenuação das fibras ópticas tem causas intrínsecas e extrínsecas, dentre as principais estão o espalhamento Rayleigh, absorção (ligações C-H principalmente) e perdas na interface núcleo-casca. A Tabela 2.3 mostra as contribuições individuais da atenuação das fibras de PMMA. Atenuações menores podem ser alcançadas com fibras deuteradas (ao invés de se ter átomos de H na molécula básica do polímero) e fibras fluoretadas.

Comprimento de Onda (nm)	520	570	650
Atenuação típica (dB/km)	73	64	130
Atenuação (dB) Causada por processo intrínseco:			
Causada por vibração de moléculas	11	17	96
Causada por espalhamento Rayleigh	26	18	10
Causada por processo extrínseco	36	29	24
Mínimo teórico	37	35	106

Tabela 2.3. Contribuições da atenuação para fibras de PMMA de perfil SI [3].

Outro mecanismo responsável pela atenuação é o diâmetro do núcleo, decrescendo à medida que o diâmetro aumenta como mostra a Tabela 2.4 para POF de vários fabricantes [3]. Este comportamento surge devido à ocorrência de maiores imperfeições estruturais e geométricas ao diminuir o diâmetro, dado que o processo de produção é mais difícil de controlar. Além disso, quanto menor o diâmetro maior será o número de reflexões na interface núcleo/casca, onde as imperfeições são mais frequentes.

	Atenuação (dB/Km)					
Diâmetro da Fibra	250µm	500µm	750µm	1000µm		
Mitsubishi	< 700	< 190	< 180	< 160		
Toray	< 300	< 180	< 180	< 150		
Asahi	n/a	< 180	< 180	< 125		
Boston Optical Fibre	< 150	< 150	< 150	< 150		
Optectron	< 150	< 150	< 150	< 150		

Tabela 2.4. Coeficientes de atenuação para PMMA-SI-POF em função do diâmetro do núcleo de vários fabricantes [9].

A atenuação ainda depende da AN (abertura numérica) da fonte de luz. Quanto maior for este parâmetro, maior será o coeficiente de atenuação devido à dificuldade no acoplamento modal. Como exemplo, o coeficiente de atenuação de uma PMMA-POF será de 70dB/km para uma fonte de luz com uma AN (abertura numérica) de 0,1 e 88dB/km para uma AN de 0,65 [9].

As POFs de polímeros fluoretados, ou perfluoropolímeros (PerFluorinated, PF, polymers), especificamente as 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 absortivas, por ligações C-F, que reduzem drasticamente a atenuação por absorção, mas deslocam o comprimento de operação para a região do infravermelho.

A Tabela 2.5 apresenta os valores de atenuação limite para diferentes tipos de POF em suas principais janelas de transmissão [9].

]	Tipos de POF (Valor Aproximado)				
Fator de Atenuação (dB/km)	PMMA (568nm)	PS (672nm)	CYTOP (1300nm)		
Atenuação Total	55	114	16		
Absorção	17	26	10		
Dispersão de Rayleigh	18	43	2		
Imperfeições Estruturais	20	45	4		
Atenuação Teórica	35	69	12		

Tabela 2.5. Mecanismos que contribuem para a atenuação numa POF e coeficientes de atenuação limite obtidos teoricamente [9].

## 2.2.7. Largura de Banda nas POFs

A largura de banda de um enlace pode ser definida de diversas formas. Essencialmente ela descreve a faixa de frequências na qual os sinais podem ser transmitidos sofrendo atenuação aceitável [3]. Diversos fatores influenciam esse parâmetro e nas fibras ópticas multimodo os principais são a dispersão modal (principalmente para fibras SI) e cromática. O produto entre a largura de banda e o comprimento da fibra óptica, produto  $B \cdot L$ , caracteriza a capacidade de transmissão desta fibra óptica [3]. A Tabela 2.6 ilustra este parâmetro para fibras ópticas SI e GI comuns.

Perfil de Índice de Refração	Produto B · L [1]
SI (POF PMMA)	40 MHz · 100m
GI (POF PMMA)	2 GHz ·100m
GI (POF PF)	500 MHz · 1000m

Tabela 2.6. Produto para fibras ópticas SI e GI de PMMA [3].

A consequência do alargamento do pulso provocado pela dispersão é a redução do tempo entre bits consecutivos, podendo acontecer sobreposição entre dois bits adjacentes, de forma que o circuito de decisão no receptor não será mais capaz de diferenciá-los. Assim, a taxa de transmissão se torna limitada, uma vez que menos bits por segundo deverão ser transmitidos para permitir a correta identificação de cada um [3].

Nas POFs, a largura de banda diminui conforme o aumento da AN (Abertura Numérica) devido ao aumento da diferença nos tempos de propagação dos modos, que leva a um aumento da dispersão. Alguns métodos podem ser utilizados para aumentar a largura de banda das POFs, sendo os mais importantes a utilização de pequenos ângulos para lançamento e detecção da luz, e a utilização de filtros passa alta para pre-compensar e pós-compensar a dispersão [3].

A Figura 2.18 mostra a medição da largura de banda para 100m de uma POF-SI de PMMA com uma abertura numérica de 0,46. O ângulo de acoplamento (NA<sub>launch</sub>) foi alterado para valores entre 0,05 e 0,65.



Figura 2.18. Medição da largura de banda de uma POF-SI PMMA com AN = 0,46 [3].

A medição para uma POF-SI de policarbonato (PC) é mostrada na Figura 2.19, a fibra possui uma abertura numérica de 0,75. Uma vez que as perdas desta fibra se situam em cerca de 300 dB / km para 650 nm, o comprimento de teste foi de apenas 20 m.



Figura 2.19. Medição da largura de banda de uma POF-SI PC com AN = 0,75 [3].

A Figura 2.20 faz uma comparação da largura de banda dentre diversos tipos de fibras multimodo, dentre elas estão as POFs e as GOFs.



Figura 2.20. Comparação da largura de banda dentre diferentes tipos de fibras multimodo [3].

# 2.2.8. POFs disponíveis no mercado

Verificou-se que dependendo do tipo de POF utilizada, as caraterísticas da fibra diferem. Essas diferenças são justificadas pelos parâmetros de propagação que cada tipo de fibra possui. Na Tabela 2.7, pode-se constatar a lista dos principais fabricantes de POFs a nível mundial.

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

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

Na Tabela 2.8, é possível verificar alguns exemplos de POFs que estão disponíveis no mercado.

Tabela 2.8. Comparação entre POFs de diversos fabricantes [5].

É importante ressaltar que a *Lucina* foi descontinuada, dando lugar a um novo modelo de PF-POF da Asahi Glass designado por *Fontex*. O fabricante anuncia larguras de banda em torno de 10 Gbps para 100 metros, embora testes em laboratório revelaram um desempenho de 40 Gbps para a mesma distância utilizando a modulação DQPSK e OOK [5]. A *Fontex* possui um revestimento duplo, permitindo assim uma redução das perdas associadas às curvaturas.

# 2.3. CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS ÓPTICAS

### 2.3.1. Modos de Propagação

De forma imprecisa, cada um dos caminhos percorridos pelos raios define um modo de propagação em fibras ópticas. Estas últimas podem ser classificadas quanto ao número de modos que trafegam pelo núcleo.

Multimodo – Apresentam núcleo de maior diâmetro (geralmente > 50 μm) o que contribui com a passagem de vários modos de propagação acentuando a dispersão modal (Subseção 2.3.4), que contribui para o aumento da degradação do sinal.

• Monomodo – Possuem dimensões menores (geralmente < 20 µm) dificultando o acoplamento do sinal e apresentando maior susceptibilidade ao desalinhamento, porém, atingem distâncias maiores e maior capacidade de transmissão. Por terem um diâmetro pequeno de núcleo, permitem que a luz se propague sob a forma de apenas um único modo de propagação (em termos de óptica geométrica, transmite apenas o raio axial).</p>



A Figura 2.21 ilustra a diferença entre as fibras multimodo e monomodo.

Figura 2.21. Transmissão do sinal óptico em uma fibra multimodo e em uma fibra monomodo [10].

As POFs em geral são multimodo, pois POFs monomodo "violam" as vantagens das POFs sobre as fibras de sílica no que se relaciona aos enlaces e redes de pequenas distâncias (< 1 km). Por esta razão, torna-se difícil adquirir uma POF monomodo no mercado. Estas têm sido desenvolvidas para experimentos em laboratórios [11], para gravação de grades de Bragg e para fabricação de moduladores eletro-ópticos [3]. Nestas duas últimas aplicações características de POFs monomodo, é de sumo interesse que os dispositivos assim obtidos possa operar em 1550 nm, centro da principal janela de transmissão das fibras de sílica. Devese notar que se trata da construção de um dispositivo passivo (grade de Bragg) e outro ativo (modulador eletro-óptico) com POFs monomodo, porém para que possam ser aplicado na tecnologia de fibras de sílica. Naturalmente que existem vantagens em assim proceder, ou seja, substituir o uso de dispositivos em sílica, por dispositivos em plástico, pelo menos para os dois dispositivos mencionados. Entretanto, para 1550 nm, estas POFs (monomodo) de base PMMA apresentam atenuação muito maior do que a das fibras de sílica monomodo e, além disto, devido às suas pequenas dimensões, perdem o principal atrativo das POFs: a facilidade de manuseio e de conectorização e o baixo custo relacionado [11].

Apenas a título de ilustração, a Tabela 2.9 mostra o número de modos estimados para alguns tipos de fibras ópticas, incluindo fibras de sílica. O número de modos propagantes na fibra é função da frequência normalizada, comumente chamada de parâmetro V, calculado segundo a Equação (2.3) que depende do raio do núcleo ( $\alpha$ ), do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e da abertura numérica (AN). O parâmetro V pode ser calculado segundo a equação 2.6 [3].

$$V \approx \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot AN$$
 (2.3)

A Figura 2.22 compara o diâmetro do núcleo e os cones de aceitação de diferentes tipos de fibras ópticas.

Tipo de Fibra	Perfil de Índice de Refração	AN	Raio do Núcleo a (µm )	<u>λ (nm )</u>		Número 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 <sup>1</sup> (Europa)	GI	0,17	25	850	31	247

Tabela 2.9. Número estimado de modos em fibras ópticas [3].



Figura 2.22. Comparação entre o diâmetro do núcleo e o cone de aceitação de fibras de sílica e poliméricas [3] – (traduzida pela autora).

As fibras multimodo, de acordo com o perfil da variação de índices de refração, são classificadas em diversos tipos, sendo os mais simples o perfil de índice degrau (Step-Index,

<sup>1</sup> Glass Optical Fiber, GOF

SI), Figura 2.23 e de índice gradual (Graded-Index, GI), Figura 2.24. No perfil SI, a casca e o núcleo apresentam índices de refração diferentes, uniformes e bem definidos, originando uma transição abrupta de um para o outro. Enquanto no perfil GI a transição entre os índices de refração é suave, de forma a não existir uniformidade do índice de refração no núcleo [3].



Figura 2.23. Perfil de índice de refração SI e a ilustração da propagação sob a perspectiva de raios [3] - (traduzida pela autora).



Figura 2.24. Perfil de índice de refração GI a ilustração da propagação sob a perspectiva de raios [3] - (traduzida pela autora).

Em fibras ópticas SI, os raios viajam por caminhos que formam segmentos de reta através de reflexões totais sucessivas. Estes raios percorrem diferentes distâncias com uma mesma velocidade, uma vez que o índice de refração é uniforme, chegando à outra extremidade em diferentes intervalos de tempo. Já em fibras ópticas GI, cada raio é guiado através de refrações sucessivas, percorrendo seus diferentes caminhos, semelhantes a senóides, com velocidades distintas. Os modos mais externos são mais rápidos do que os mais internos, de forma que todos trafegam de uma extremidade a outra em *aproximadamente* um mesmo intervalo de tempo. Devido a esse processo, é possível diminuir a dispersão modal do sinal aumentando consequentemente a largura de banda passante da fibra óptica.

É possível estimar o número de modos permitidos de se propagar em fibras ópticas SI utilizando a Equação (2.4), e para as fibras ópticas GI, especificamente as de perfil parabólico, utiliza-se a Equação (2.5) [3].

$$N \approx \frac{V^2}{2} \tag{2.4}$$

$$N \approx \frac{V^2}{4} \tag{2.5}$$

29

## 2.3.2. Perdas e Dispersões nas Fibras Ópticas Plásticas

Há uma exigência rigorosa sobre o controle das perdas de potência em um enlace óptico, justificado pelos baixos níveis de potência a serem manipulados. Uma atenuação exagerada tornaria o sinal de chegada na outra extremidade difícil de ser aproveitado para fins de comunicações. O conhecimento das origens das perdas é importante para se estabelecerem as formas de controle adequadas. Entre as causas mais importantes citam-se a atenuação e a dispersão, fatores que influenciam na distância máxima que uma fibra óptica de qualquer tipo pode transmitir informações. A atenuação é causada pela absorção do material (matriz, dopantes e impurezas), emendas e conectores (falhas e defeitos de fábrica).

A atenuação é a perda de potência do sinal luminoso ao trafegar ao longo de um meio e constitui um fator limitante para todos os sistemas de telecomunicações. O valor da atenuação em uma fibra óptica depende fundamentalmente do tipo de material do qual a fibra é constituída.

Alguns mecanismos responsáveis pela atenuação nas fibras ópticas são as absorções intrínseca e extrínseca, os espalhamentos, a irradiação devido a fenômenos extrínsecos como curvaturas [12]. A mínima atenuação possível é a soma das perdas provocadas pela absorção intrínseca e pelo espalhamento Rayleigh, pois esses não podem ser eliminados [11].

## Absorção Intrínseca

A perda devida à absorção intrínseca ocorre quando uma parcela da potência óptica guiada é dissipada sob a forma de calor, tanto no núcleo quanto na casca. As causas dessa perda são as vibrações das moléculas e a transição de elétrons entre os níveis de energia dos átomos que constituem o meio. Essa constitui a fonte mais importante de perdas intrínsecas nas POFs.

#### Absorção Extrínseca

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.

#### **Espalhamento**

A perda por espalhamento é o mecanismo onde parte da energia luminosa guiada pelos vários modos de propagação muda de direção no interior da fibra. Esta mudança de direção chamada de espalhamento ocorre geralmente de forma isotrópica em cada ponto da fibra

interagente com a luz. Portanto, boa parte desta luz espalhada, não será acoplada como um modo guiado na fibra e consequentemente isto implicará em ser mais um mecanismo de atenuação. O mecanismo mais conhecido e fundamental é o espalhamento de Rayleigh que ocorre pela interação do sinal com a granulosidade de variação tipicamente menor que o comprimento de onda da estrutura física do material constitutivo da fibra óptica. As dimensões físicas e a separação desses minúsculos defeitos são bem pequenas comparadas ao comprimento de onda da luz no meio. O resultado é uma flutuação no valor do índice de refração do material provocando irradiação isotrópica da potência do feixe luminoso. É possível minimizá-lo, mas, assim como a absorção intrínseca, não pode ser eliminado.

#### Perdas por Radiação

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.

## Dispersão Modal e Cromática

O fenômeno da dispersão 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. Fenômenos dispersivos por si só, *não* implicam na atenuação de energia do sinal. O efeito da dispersão, independente do mecanismo envolvido, provoca um alargamento temporal de um sinal modulado. Supondo que esta modulação seja em intensidade, a dispersão provoca alargamento temporal do pulso e consequentemente a potência de pico dos tais pulsos será reduzida. Na prática, para o receptor, isto funcionará de fato como se fosse uma atenuação, mas fisicamente falando não há uma redução de energia devido só a dispersão, mas apenas um "espalhamento" de energia no tempo. A dispersão pode ser classificada como:

• Dispersão modal: Para fibras do tipo multimodo (caso típico das POFs aqui de interesse), o diâmetro do núcleo é muito maior que o comprimento de onda de luz. Isso permite a geração de uma grande quantidade de ondas individuais ou modos. Esses modos diferem na sua velocidade de propagação provocando o alargamento do sinal no tempo (Figura 2.25), o que limita a taxa de transmissão através da fibra óptica e aumenta a atenuação.



Figura 2.25. Efeito da dispersão no sinal de saída [3] - (traduzida pela autora).

• Dispersão de guia de onda: Esse tipo de dispersão não é importante para POFs e é provocado por variações nas dimensões do núcleo e variações no perfil de índice de refração ao longo da fibra óptica. Nas POFs é causada pela presença do deslocamento de Goos-Hänchen, no qual os modos invadem a casca [3]. 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 só é percebida em fibras ópticas monomodo (de sílica, portanto), pois essas possuem dispersão material reduzida [3].

• Dispersão material: É tão importante tanto para fibras ópticas multimodo como para as monomodo [3]. Como o índice de refração depende do comprimento de onda e como as fontes luminosas existentes não são ideais, ou seja, possuem certa largura espectral finita ( $\Delta\lambda$ ), temos que cada comprimento de onda enxerga um valor diferente de índice de refração num determinado ponto, logo cada comprimento de onda viaja no núcleo com velocidade diferente, provocando uma diferença de tempo de percurso, causando a dispersão do impulso luminoso. No caso das POFs SI, a dispersão modal amplamente predomina. No caso das POFs GI onde a dispersão modal é significativamente reduzida, a dispersão material torna-se importante. Então, nas POFs GIs, teremos um mecanismo dispersivo combinado modal + material comumente conhecido como "dispersão de perfil".

# 2.4. EMENDAS EM FIBRAS ÓPTICAS

Outro fator responsável por uma boa parcela das perdas em uma fibra óptica são as emendas ou conexões.

A emenda óptica consiste em uma junção permanente ou temporária de dois ou mais segmentos de fibras. São necessárias para ampliar ou dar continuidade a um lance óptico permanentemente quando o comprimento do sistema é maior que o comprimento contínuo do cabo disponível, para permitir a inserção de novos componentes ópticos ao sistema, ou na ocorrência de ações corretivas devido a rompimentos.

As principais características de uma emenda são: perda de inserção e perda de retorno. A perda de inserção refere-se à perda de potência entre o transmissor e o receptor óptico, provocada pela emenda ou conexão.

Perda de retorno é definida pela quantidade de potência que reflete de volta ao transmissor, sendo considerada uma perda, uma vez que esta potência não chega ao receptor. Este tipo de perda é gerado por reflexões ocasionadas na emenda. Deve-se também ressaltar que as referidas retro-reflexões são também causadas pelos espalhamentos Rayleigh, por conexões, acoplamento em dispositivos passivos ou ativos e terminações.

# 2.4.1. Causas das Perdas nas Emendas Ópticas

As perdas nas emendas ópticas têm origem em fatores intrínsecos à fibra no ponto de emenda e em fatores extrínsecos à fibra.

## **Fatores intrínsecos:**

Qualquer diferença na geometria (diâmetro, elipticidade, concentricidade núcleo/casca, etc.) dos núcleos das fibras implica no descasamento das áreas de emissão e recepção da luz transmitida, o que resulta sempre em perdas.

Principais fatores intrínsecos:

- Diferença no Índice de Refração No ponto de emenda os núcleos da fibra podem apresentar índices de refração diferentes, causando perdas devido às reflexões de Fresnel.
- Diferença de AN Quando a AN da fibra que transmite a luz é maior do que a AN da fibra que recebe a luz, haverá perda na emenda. NA<sub>in</sub> > NA<sub>out</sub>

 Diferenças no diâmetro dos núcleos, ilustrado na Figura 2.26. A perda de energia ocorre quando o sinal óptico é acoplado da fibra com maior diâmetro para a de menor diâmetro de núcleo.



Figura 2.26. Diferença no diâmetro dos núcleos entre duas fibras [10].

• Excentricidade e elipsidade dos núcleos, conforme ilustrado na figura 2.27.



Figura 2.27. Excentricidade e Elipsidade dos núcleos [10].

#### **Fatores extrínsecos:**

Perdas causadas por retorno ou reflexão. As superfícies das extremidades das fibras, que não estejam adequadamente planas e perpendiculares ao eixo, podem implicar em importantes perdas de conexões.

Principais fatores extrínsecos:

 Perdas por Reflexão de Fresnel - Mudança no índice de refração na interface entre os dois meios produz a reflexão de parcela da luz transmitida (Figura 2.28). Entre as duas fibras emendadas há uma parcela de ar, como o índice de refração do ar é menor do que do núcleo da fibra, uma parcela da luz transmitida retorna em direção ao receptor.



Figura 2.28. Reflexão de Fresnel [10].

• Desalinhamentos, a Figura 2.29 ilustra três tipos diferentes de desalinhamento.



Figura 2.29. Tipos de desalinhamento [10].

• Irregularidades na superfície da fibra, conforme ilustrado na Figura 2.30.



Figura 2.30. Irregularidades na superfície da fibra [10].

# 2.4.2. Processos de Emendas em Fibras Ópticas de Sílica

Os processos de emendas ópticas de sílica não são simples e nem podem ser comparados com as emendas de cabos metálicos. Os procedimentos existentes exigem preparo e cuidado para a execução das emendas em fibras ópticas. Antes de executar-se uma emenda, é necessário preparar adequadamente as extremidades das fibras ópticas. Abaixo estão relacionados alguns processos empregados para emendas em fibras ópticas de sílica [13]:

# Emenda por Fusão:

Utilizando-se um equipamento específico (máquina de fusão), pode-se executar uma emenda entre duas fibras ópticas (Figura 2.31). Neste tipo de emenda, a fibra clivada é introduzida na máquina de fusão para, após o procedimento de alinhamento apropriado, ser

submetida a um arco voltaico que eleva a temperatura nas faces das fibras, o que provoca seu derretimento e a sua soldagem. O arco voltaico é obtido a partir de uma diferença de potencial de vários kVs aplicada sobre dois eletrodos de metal [13].



Figura 2.31. Emenda por fusão em uma fibra óptica de sílica [13].

A resistência mecânica no ponto de emenda é menor do que a da fibra inteira. Por esse motivo, utiliza-se um protetor no local da emenda para prover uma melhor resistência mecânica (Figura 2.32).



Figura 2.32. Protetor de Emenda por Fusão [13].

## **Emenda Mecânica:**

Este tipo de emenda é baseado no alinhamento das fibras através de estruturas mecânicas. São dispositivos dotados de travas para que a fibra não se mova no interior da emenda e contém líquidos entre as fibras, chamados líquidos casadores de índice e refração, que tem a função de diminuir as perdas de Fresnel (reflexão). As fibras são encaixadas nas fendas de precisão do dispositivo, dispensando a utilização de microscópio para efetuar o alinhamento das pontas das fibras [13] (Figura 2.33).



Figura 2.33. Emenda Mecânica em Fibra Óptica de Sílica [13].

Neste tipo de emenda, as fibras também devem ser limpas e clivadas e as duas fibras são alinhadas (posicionadas frente a frente), visando não causar perdas no feixe óptico (Figura 2.34). Normalmente é aplicada em caráter provisório até que se possa proceder à emenda definitiva por fusão [13].



Figura 2.34. Aspecto da emenda mecânica [13].

# Emenda por Acoplamento ou Conectorização:

Na extremidade da fibra é colocado um conector óptico e entre esses conectores é encaixado um acoplador (adaptador) óptico para que se torne possível o alinhamento passivo entre as duas fibras [13] (Figura 2.35).



Figura 2.35. Aspecto da emenda por acoplamento (ou conectorização) [13].

# 3. REDES ÓPTICAS DE ACESSO E DE PEQUENAS DISTÂNCIAS

# 3.1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda dos antigos e dos novos serviços de Telecomunicações assim como o aprimoramento dos antigos requerendo mais banda, implica na necessidade de um refinamento das tecnologias utilizadas por eles, incluindo o meio físico. Devido a essa evolução, exige-se grande qualidade e capacidade do canal de transmissão, propriedades muito limitadas nos meios físicos tradicionais como os cabos metálicos e a transmissão sem fio. A fibra óptica é vista como a melhor alternativa, pois oferece maior capacidade e melhor qualidade para estes serviços, evitando assim o congestionamento da rede. Outras vantagens das fibras ópticas com relação aos cabos metálicos, são suas pequenas dimensões e imunidade a interferências eletromagnéticas. Essa substituição de cabos por fibra é útil tanto em grandes redes, como as WANs (*Wide Area Networks*) e as MANs (*Metropolitan Area Networks*), quanto em redes menores, como as LANs (*Local Area Networks*). As Tabelas 3.1 a 3.3 relacionam as tecnologias existentes para transmissão de dados, permitindo uma comparação das vantagens e desvantagens entre elas.

	Tecnologia	Desempenho	Vantagens	Desvantagens
stemas à Rádio	UMTS <sup>2</sup>	2 Mb/s em 70 m 300 kb/s em mais de 100 m	Grande mobilidade	Sem rede local
	Bluetooth	1 Mb/s em 10 m 50 Mb/s (802.15.3)	Rede extremamente simples	Capacidade e alcance muito limitados
	ATM sem fio	25 Mb/s em 30 m	Suporta diversos serviços	Relativamente caro
Si	LAN sem fio	54 Mb/s em 30 m (802.11g) 288,8 Mb/s em 70 m (802.11n)	Simples instalação	Muito sensível a interferências eletromagnéticas; Taxa de dados decai muito com a distância.

Tabela 3.1. Tecnologias à rádio disponíveis para redes de curta distância [1].

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Universal Mobile Telecommunications System

	Tecnologia	Desempenho	Vantagens	Desvantagens
	PNA <sup>3</sup>	Alguns Mb/s	Requer existência de linha telefônica	Sensível a interferências eletromagnéticas.
Cabos Metálicos	Cabo Coaxial	Maior que 100 Mb/s	Elevadas taxas de transmissão	Requer conversores relativamente caros; Sensível a interferências eletromagnéticas.
	Cabo de Cobre	1 Gb/s em 100 m	Amplamente difundido em LANs	Cabo de grande espessura; Taxa de transmissão muito limitada pelo padrão utilizado.
	PLC <sup>4</sup>	45 Mb/s	Fácil de instalar	Grande sensibilidade a interferências eletromagnéticas.

Tabela 3.2. Tecnologias cabos metálicos disponíveis para redes de curta distância [3].

	Tecnologia	Desempenho	Vantagens	Desvantagens
Cabos Ópticos	Sílica Monomodo	Banda praticamente ilimitada	Taxas de transmissão elevadíssimas; Baixas taxas de erro; Não sofrem interferências eletromagnéticas.	Elevado custo de instalação e manutenção; Dificuldade para instalação.
	Sílica Multimodo	2,5 Gb/s	Taxas de transmissão elevadas; Baixas taxas de erro; Não sofrem interferências eletromagnéticas.	Custo de instalação e manutenção elevados.
	POF PMMA	Centenas de Mb/s em 100 m (1 canal WDM)	Instalação extremamente fácil; Tecnologia de baixo custo; Altas taxas de transmissão; Não sofrem interferências eletromagnéticas.	Elevada atenuação que torna-se menos importante para pequenas distâncias
	POF PF	1,25 Gb/s em 1 km	Fácil instalação; Não sofrem interferências eletromagnéticas.	Tecnologia de custo médio; Atenuação mediana no infravermelho; Menor disponibilidade comercial

Tabela 3.3. Tecnologias de fibras ópticas disponíveis para redes de curta distância [3].

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Phoneline Networking Alliance, PNA <sup>4</sup> Power Line Comunnication, PLC

O maior fator de interesse em torno da rede de acesso por fibra, é o chamado serviço de *Triple-Play*, a oportunidade de oferecer de uma só vez aos clientes finais serviços de alta velocidade de dados, de voz e vídeo. O mercado para o *Triple-Play* é grande e crescente e inclui não só residências como também negócios em prédios comerciais. Vislumbra-se a fibra como a maneira de levar ao usuário não só o *Triple-Play*, mas também outros serviços novos tais como o ensino à distância, jogos interativos e telemedicina, pois todos esses serviços requerem uma elevada capacidade de transmissão. Com isso, foi dado origem a uma nova arquitetura de banda larga, denominada FTTx, em que o "x" depende do ponto de terminação.

Nesse capítulo, iremos fazer uma breve revisão sobre as redes ópticas existentes e abordar as necessidades para a criação de uma rede HAN (Home Area Network) óptica.

# 3.2. ARQUITETURAS DE FIBRA ÓPTICA NAS REDES DE ACESSO

As redes de acesso são tradicionalmente responsáveis pela interligação do equipamento do cliente aos comutadores, localizados nas centrais locais (ou *Central Office*). Na Figura 3.1, encontra-se ilustrado um exemplo de uma rede de acesso, com a utilização de tecnologia de fibra e divisores ou acopladores a fibra de rede passivos, que têm como função a divisão do sinal óptico e então o transporte de serviços *triple-play* para múltiplos clientes empresariais e residenciais.



Figura 3.1. Representação simplificada de uma rede de acesso com tecnologia FTTx [1].

A topologia FTTx é a representação genérica para designar toda a variedade de arquiteturas que utilizam fibra na rede de acesso. Seus elementos passivos ficam localizados na planta externa, onde ocorre a distribuição óptica. Estes elementos são: cabos ópticos, divisores, conectores e acopladores. Os únicos elementos ativos, necessitam de energia eléctrica, são a OLT (*Optical Line Terminal*), normalmente instalada na central (Figura 3.2) e, a ONT (*Optical Network Terminal*, segundo a ITU-T) que tem a mesma função conceitual da ONU (*Optical Network Units*, segundo o IEEE), que ficam próximos aos usuários ou dentro de suas instalações. Em geral costuma-se utilizar ONT quando apenas um usuário é servido ficando alojado nas dependências do usuário, enquanto que a ONU atende múltiplos usuários e normalmente são instaladas em postes ou armários da rua [1] [14].



Figura 3.2. Equipamento ONT instalado na casa de um cliente FTTH [1].

Abaixo estão descritas as arquiteturas mais comuns das redes FTTx conforme representado na Figura 3.3:

## Fiber to the Node (FTTN) – Fibra até o nó:

É uma arquitetura que tem por base cabos de fibra óptica que vão até o armário de rua, servindo pequenas áreas (com menos de 1500 m de raio) e com pouca densidade populacional (algumas centenas de utilizadores), por exemplo, um bairro. Os usuários conectam-se a este armário de rua através dos pares de cobre tradicionais ou de cabo coaxial [14].

#### Fiber to the Curb (FTTC) – Fibra até o Armário:

É uma arquitetura que tem por base cabos de fibra óptica que vão desde o OLT no *Central Office* até a um armário de rua, servindo uma área pequena (com cerca de 300 m de raio) com pouca densidade populacional. Os clientes encontram-se ligados a esse armário através de cabos coaxiais ou cabos de cobre. Esta arquitetura é ligeiramente diferente da FTTN. A diferença principal é o alcance da fibra. No FTTC, a fibra chega a um armário localizado em uma rua próxima do cliente. No FTTN a fibra chega até a um armário em uma rua mais ou muito mais afastada da residência do cliente. Pode-se dizer que neste caso, "Curb" significa a esquina da rua onde reside o cliente [14].



Figura 3.3. Exemplo de soluções FTTX (X = B, H, N e C). Fonte: a autora (2017).

## Fiber to the home (FTTH) – (Fibra até a Casa):

Nessa arquitetura, a fibra óptica chega diretamente ao utilizador final, quer seja uma residência ou um espaço comercial, podendo o assinante ser servido por uma fibra óptica exclusiva [14].

#### Fiber to the building (FTTB) – (Fibra até o Prédio):

A fibra óptica chega à entrada de um edifício comercial ou residencial. Neste caso a fibra não chega diretamente à residência do usuário final ou ao espaço comercial. A ligação

até o usuário final normalmente é feita através de uma rede Ethernet utilizando cabo coaxial ou cobre, podendo também utilizar uma rede sem fio [14].

No caso das arquiteturas FTTB e FTTH, os sistemas de telefone, rede de dados e os sistemas de televisão estão, geralmente, todos ligados ao mesmo dispositivo, o ONT (Optical Network Terminal), que permite utilizar apenas um fio de fibra para todos esses serviços. Dentro da residência do utilizador, alguns equipamentos como roteadores e modems separam os sinais e convertem-nos de acordo com o protocolo apropriado.

A maior vantagem das redes FTTx é a possibilidade de oferecer elevada largura de banda em grandes distâncias, uma vez que é implementado com fibras de sílica. Contudo, essa solução apresenta elevado custo de instalação inicial, principalmente devido ao investimento necessário para enterrar as fibras ópticas (Figura 3.4) e adquirir os equipamentos ópticos.



Figura 3.4. Instalação de fibra óptica de sílica (Fonte 1: [15]; Fonte 2: [16].

## 3.2.1. Tecnologias e Soluções de Redes

As soluções de rede para a arquitetura FTTH podem-se dividir em duas categorias: passivas e ativas. Elementos passivos são aqueles que não precisam de alimentação elétrica, como os *splitters*. Dentro destas categorias, existem diferentes topologias: ponto-a-ponto ou ponto-multiponto (topologia em estrela).

Na topologia ponto-a-ponto, uma fibra dedicada liga cada casa ao *Central Office*. A topologia do tipo ponto-a-multiponto, onde muitas casas partilham uma única fibra desde o nó remoto onde os sinais são comutados, multiplexados ou divididos e direcionados para a casa de cada utilizador através de uma fibra dedicada.

Como exemplos de soluções de rede ativa, temos a *Home Run Fiber* (arquitetura ponto-a-ponto) e a *Active Ethernet* (ponto-a-multiponto), Figura 3.5. Nas soluções de rede passivas temos a PON (*Passive Optical Network*) [14], Figura 3.6.

A escolha da tecnologia e solução de rede a implementar, depende de vários fatores. É necessário ter em conta os serviços que precisam ser entregues, os custos das infraestruturas, a infraestrutura já existente, a localização da rede e a capacidade de, no futuro, poder migrar para novas tecnologias.



Figura 3.5. Ilustração de redes: (a) Home Run Fiber; (b) Active Ethernet [14].



Figura 3.6. Ilustração de um tipo de rede PON [14].

*Obs.* CPE – Customer Premises Equipment, designa~se por Optical Network Unit (ONU) ou Optical Network Terminal (ONT).

Independentemente da solução escolhida, cada fibra fica por um lado terminada no Central Office num OLT (*Optical Line Terminal*) onde o sinal *downstream* (da central para o usuário) se origina. O transporte de *upstream* (do usuário para a Central) usa, geralmente, o comprimento de onda de 1310 nm para dados/telefonia multiplexados no tempo, pois lasers de diodo tipo Fabry-Perot neste comprimento de onda são mais baratos. O transporte de sinais *downstream* usa o comprimento de onda de 1550 nm para distribuição (*broadcasting*) de vídeo e 1490 nm para dados/telefonia multiplexados no tempo. As arquiteturas PON e *Home Run*, também suportam o serviço de distribuição de vídeo analógico. Este serviço é entregue através de canais RF analógicos, usando um comprimento de onda de 1550 nm onde comumente usa-se amplificadores ópticos EDFAs (Erbium-Doped Fibre Amplifier) como *booster*, localizados na Central. Todas as arquiteturas FTTH utilizam fibra monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*) [1].

Uma das principais opções para FTTH e FTTB são as redes PON (Passive Optical Network). Esta tecnologia constitui uma arquitetura ponto-multiponto, constituída de splitters para permitir que uma única fibra óptica sirva múltiplas instalações (geralmente 32-128) [1]. Estas redes passivas custam significativamente menos que as ativas, porém tem a desvantagem da limitação em 20 km de cobertura contra 100km de uma rede ativa [1]. O sinal de downstream provém do Central Office (CO), em forma de broadcast, ou seja, distribuído para todos os usuários ligados a mesma porta OLT. Para reconhecer o usuário de destino é usada uma encriptação para garantir que apenas o sinal correto seja descodificado no

destino pela ONU/ONT. Quanto ao tráfego *upstream*, as ONUs partilham o meio físico, sob orientação do OLT. As ONUs acessam ao meio físico em tempos distintos (TDMA – *Time Division Multiple Access*) ou utilizando tecnologias de multiplexagem mais recentes como o WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [1] [14].

Surgiram várias tecnologias partindo do conceito de PON. A primeira delas foi o APON (*Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network*), evoluindo mais tarde para BPON (*Broadband Passive Optical Networks*). Do melhor destas tecnologias, proveio o *standard* que no ano de 2003 foi se massificando um pouco por todo o mundo – a GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) definida pela recomendação G.984.1 do ITU-T. No Japão, foi realizado um forte investimento no sentido de modernizar as redes de telecomunicações, mas optando por uma tecnologia diferente, surgindo então a EPON (*Ethernet Passive Optical Network*), padronizada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [1].

Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, de forma a acompanhar o constante aumento de necessidades por parte dos utilizadores, sendo que algumas delas já foram padronizadas. O 10GPON e o 10G-EPON oferecem 10Gbps de *downstream* / 2,5 Gbps de *upstream* e , 10Gbps / 1 Gbps respectivamente [1].

# 3.3. REDES DE CURTA DISTÂNCIA

Os requisitos de instalação e de capacidade nas redes de curta distância, em geral, são diferentes dos exigidos em MANs e WANs. A primeira diferença se encontra no tamanho físico das redes, por exemplo: redes em automóveis apresentam, tipicamente, 10 m de comprimento; redes em navios e aviões este comprimento aumenta para cerca de 200 m. As LANs em residências e escritórios podem apresentar comprimentos que variam entre 25 e 100m. Enquanto as MANs e WANs apresentam dezenas ou até centenas de quilômetros. Adicionalmente, redes em sistemas de transporte em geral não precisam considerar uma futura expansão, além de serem projetadas para obtenção de elevada confiabilidade e longa vida útil. Já em LANs residenciais e em escritórios, é necessário considerar uma futura expansão e o uso de equipamentos que implementam diferentes tipos de protocolos [3].

A continuação da rede FTTH, ou seja, as redes internas, normalmente são LANs ou HANs constituídas por cabos metálicos. O termo HAN (*Home Area Network*) é relativamente recente e diz respeito a uma rede doméstica que conecta vários computadores e outros dispositivos analógicos e digitais. A rede neste caso abrange o espaço de uma única casa ou

apartamento, em oposição às LANs (que abrangem um escritório ou edifício). A Figura 3.7 ilustra uma rede HAN.

O termo HAN se aplica a uma pequena rede usada basicamente para compartilhar a conexão com a internet e realizar interconexões internas para diversos usos como, por exemplo, vigilância utilizando câmeras, transferência de dados entre equipamentos digitais domésticos, etc. Com o avanço da tecnologia, a idéia fundamental é que, no futuro, além dos computadores, tablets e celulares, todos os dispositivos domésticos também possam ter acesso à rede, uma vez que esses serão automatizados e poderão se comunicar entre si e com a internet. A HAN tem o foco total no usuário, na automação doméstica e na integração de veículos. Pode-se aqui especular que HANs possam naturalmente fazer parte de uma arquitetura nova que costuma-se chamar de IoT (Internet da Coisas).



Figura 3.7. Cenário de uma rede HAN [17].

Devido ao elevado custo, fibras ópticas de sílica não são indicadas para utilização em redes de curta distância. Em algumas fontes literárias, como [3] [17] [18], é descrito que o meio físico preferencial para este tipo de rede são as POFs. Estas fibras ópticas apresentam diversas vantagens já citadas ao longo deste trabalho. Comparada aos pares metálicos, as POFs são leves, possuem pequenas dimensões, não sofrem influência de campos elétricos ou magnéticos nem corrosões, além de melhores perspectivas de aprimoramento das suas características técnicas, devido à intensa pesquisa sobre o assunto [11] [17]. Estas e outras

características permitem que as POFs sejam instaladas na residência junto à fiação elétrica no interior dos conduítes, sob carpetes ou, ainda, por trás dos rodapés.

Dentre os tipos de POF existentes, as POFs GI (de maior banda que as SI) são as que apresentam maior potencial para aplicações em redes em escritórios e padrões como ATM (até 622 Mb/s), SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), *Gigabit Ethernet* (1,25 Gb/s) e *Fast Ethernet* (100 Mb/s) [1]. Contudo, as POFs SI padrão (POFs SI de PMMA) são as únicas disponíveis em larga escala e a um preço moderado [3], sendo ideais para implementação de redes de curta distância que não exijam uma taxa de dados tão elevada. Além do mais, as PMMA-POFs SI apresentam núcleos com diâmetro de 980 µm enquanto que as PF-POFs (sempre GI) apresentam núcleos com diâmetros na faixa de 50-120 µm. Naturalmente que a conectividade com POFs SI é bem mais simples que com POFs GI fluoretadas.

As redes de alta velocidade em automóveis já possuem diversas padronizações, sendo os padrões mais representativos o CAN (*Controller Area Newtork*), o D2B (*Domestic Digital Bus*), o MOST (*Media Oriented Systems Transport*), o IEEE 1394 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) e o *Byteflight* [3]. Esse tipo de rede não será explorado neste trabalho.

# 3.3.1. Redes Ópticas Residenciais

Dentre as redes de curta distância já mencionadas na Seção 3.3, este trabalho destaca as HANs, que representam uma área de estudo emergente, devido ao grande crescimento da demanda por largura de banda para fornecer serviços com maior qualidade e a taxas mais elevadas a usuários residenciais.

O FTTH estabelece enlaces de grande capacidade que chegam até a residência dos usuários, contudo, existem diversos serviços no interior de cada domicílio que requerem largura de banda elevada. Por este motivo, é interessante utilizar um meio físico de elevada capacidade também no interior das residências. Conforme mencionado neste trabalho, as POFs são indicadas para exercer esta função, uma vez que, os custos para implementação das fibras de sílica podem ser insustentáveis para um usuário residencial. As fibras de sílica são muito sensíveis a curvaturas o que geraria outro problema para sua instalação dentro da residência [17]. Além disso, em uma HAN um usuário comum, não especializado, deve ser capaz de instalar sua própria rede, o que não é possível com as fibras de sílica, uma vez que sua instalação é complexa. É importante lembrar que ainda é necessário realizar a conversão óptico-elétrica para repassar os sinais aos equipamentos, uma vez que estes geralmente não
possuem entrada óptica. Embora atualmente já existam placas com conexão óptica que podem ser acopladas à placa mãe dos computadores desktop.

Com o desenvolvimento destas redes, os estudos sobre as POFs também foram impulsionados, com a finalidade de obter uma maior capacidade de transmissão utilizando *transceivers* de baixo custo.

A implementação de uma rede residencial óptica requer a utilização de alguns elementos ativos e passivos, como conversores de mídia, acopladores, conectores, filtros, atenuadores, *gateways* residenciais, fibras ópticas, dentre outros. Alguns dispositivos não são essenciais, mas sua utilização facilitaria a instalação da infraestrutura e aprimoraria o uso da largura de banda. O par de dispositivos MUX/DEMUX WDM (Capítulo 5), por exemplo, permite a transmissão de diversos serviços sobre um único meio e a implementação de enlaces bidirecionais *full-duplex*, possibilita o fornecimento de um único serviço com maior taxa de transmissão ou uma economia de 50% no número de POFs utilizadas.

As HANs ópticas ainda estão em fase inicial de desenvolvimento em comparação com a solução de cabos metálicos. Diversos componentes vêm sendo desenvolvidos para facilitar e aprimorar a implementação destas redes. Como exemplo, a referência [19] descreve a criação de um conversor de mídia para Fast Ethernet. A DieMount também desenvolveu um *transceiver* para *Fast Ethernet* [20]. O projeto EU POF-ALL [21] desenvolveu uma tecnologia que permite a entrega de mais de 100 Mb/s às residências, a baixo custo. Além disso, existem diversos estudos realizados com a finalidade de obter maiores taxas de transmissão, melhor uso da largura de banda [22] e transmissão de sinais CATV (*Community Antenna Television*) [23], HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*) [24], Gigabit [25] e *Fast Ethernet* [26] sobre POFs.

A instalação da POF deve ser muito bem planejada para que o usuário possa acessar os serviços de qualquer ponto de sua residência. Durante esta etapa, algumas dificuldades para fornecer essa conectividade podem ser encontradas. Primeiramente, grande parte das residências não é construída levando em consideração a necessidade de um cabeamento óptico, contudo, algumas empresas utilizam os conduítes elétricos para cabear toda a residência com a POF. Isso é possível devido a resistência mecânica e a facilidade de manuseio das POFs, além disso, conforme mencionado anteriormente, as POFs não sofrem interferências eletromagnéticas. Caso exista um planejamento prévio, podem ser utilizados

cabos híbridos (óptico+metálico), conforme ilustra Figura 3.8, para cabear a residência, provendo assim pontos de conexão de fibra óptica em todas as tomadas elétricas.



Figura 3.8. Cabo híbrido POF-Cobre [3].

A grande desvantagem dos fios, sejam eles cabos metálicos ou fibras ópticas, é a sua mobilidade limitada. Além disso, existem aparelhos que não possuem entradas para conexões com fio, como *tablets* e celulares. Assim, o ideal é utilizar a POF em conjunto com uma tecnologia sem fio auxiliar, podendo assim atender esses aparelhos e fornecer mobilidade facilitando a conectividade.

Um exemplo de HAN óptica pode ser visto em [27], que contém informações sobre a primeira rede residencial privada baseada em POF instalada na Suíça (2004). Atualmente diversas empresas já trabalham com soluções e dispositivos para redes ópticas residenciais, como a Home Fibre, Huber Suhner, Reiche & De Massari (R&M), a Nyce Networks e a Casacom. A Figura 3.9 ilustra alguns dos dispositivos comercializados, como conversor de mídia Ethernet, tomada óptica e *switch* óptico. Contudo, nenhum dos fornecedores oferece dispositivos WDM para POFs que sejam eficientes e baratos, essenciais para um melhor aproveitamento da largura de banda da fibra óptica. No Brasil, a indústria relacionada às HANs, incluindo fabricação de dispositivos e comercialização de soluções e dos dispositivos fabricados, ainda é bastante fraca, senão inexistente.



Figura 3.9. Alguns dispositivos comercializados para uso em HAN [7].

# 4. EMENDA PERMANENTE PARA POF-PMMA

## 4.1. INTRODUÇÃO

Devido à uma série de fatores como as distâncias envolvidas, comprimento de fibra óptica disponível, danos físicos à fibra, necessidade do aumento do enlaces, inserção de componentes ou equipamentos, etc; é necessário, durante a instalação ou após esta, fazer emendas desses enlaces. Isso consiste em uma necessidade sempre presente. No caso das fibras de sílica, a tecnologia está bem madura tanto na parte de conectores quanto das emendas por fusão com arco elétrico. Pode-se obter emendas com perda tão baixa quanto 0.01 dB. Entretanto, a tecnologia de fibras de sílica é sofisticada, não estando ao alcance de um usuário comum. Com relação às fibras ópticas plásticas (POFs), o cenário é bastante diferente, pois as POFs são adequadas para pequenas redes e enlaces curtos [3] e em geral não se justifica uma tecnologia sofisticada e cara de emenda entre fibras. Por outro lado, as POFs exibem uma atenuação com ordens de grandeza tipicamente ~  $10^{10}$  vezes maior que as fibras de sílica [3] [28]. Portanto, torna-se imperativo obter uma emenda entre POFs com a menor perda possível.

Aparentemente, a melhor solução já publicada foi em 1991 [29] onde eram feitos adesivos a partir de dissolução do próprio PMMA, tendo-se conseguido até 0,2 dB de perda por emenda. Dois trabalhos da década de 90 relatam a fusão térmica [30] [31] entre POFs de PMMA. Aparentemente estas duas técnicas não foram continuadas.

Em 1999, surgiu a emenda de POFs por fusão ultrassônica. Essa técnica consiste em utilizar irradiações ultrassônicas em vários mega-hertz, porém, além da técnica não ser tão simples de ser aplicada, não foi tornada comercial naquela época (1999). Após 14 anos, dois novos trabalhos surgiram relatarando o mesmo tema [32] [33] de fusão ultrassônica. Entretanto, a menor perda de inserção obtida foi de 1,5 dB, mostrando então que a técnica ainda não estava amadurecida. As Figuras 4.1a e 4.1b mostram fotografias das extremidades das POFs acopladas em uma guia (*sleeve*) antes e depois de serem submetidas a irradiação ultrassônica de 1 MHz [33]. A Figura 4.1c mostra uma imagem microscópica das POFs emendadas [33]. Pode-se claramente notar que a região de emenda não é uniforme com relação ao restante do PMMA, o que está consistente com a perda de valor razoavelmente significativo em 1,5 dB conforme foi obtido.



Figura 4.1. Região acoplada entre duas POFs. a) Antes da irradiação ultrassônica, b) Depois da irradiação ultrassônica, c) Imagem microscópica das POFs emendadas por irradiação ultrassônica [33].

Então, o que se tem utilizado ao longo dos anos, são emendas por conectores (emendas não permanentes) entre POFs. Consegue-se menos de 1,5dB de perda utilizando, por exemplo, conectores ST, esse valor pode ser diminuído para 0,5 dB desde que as extremidades da fibra estejam convenientemente clivadas e polidas [34]. Uma grande desvantagem quanto ao uso de conectores se dá devido à perda causada pela diferença entre os índices de refração da fibra e do *gap* de ar existente na emenda. Além disso, a montagem do conector na fibra embora seja relativamente simples de ser feito, deve ser feito com cuidado por parte do operador. Para realizar a referida montagem, deve-se retirar parte do revestimento da fibra com o intuito de inserir a fibra pura (núcleo + casca) no orifício do ferrolho do conector. A Figura 4.2 mostra um exemplo de conector ST para POFs de 1mm [35]. Pode-se notar no extremo direito da figura, o ferrolho metálico e o orifício de 1mm de diâmetro capaz de acomodar qualquer POF PMMA com este diâmetro.



Figura 4.2. Exemplo de conector ST para POFs [35].

Nesse capítulo, são descritos experimentos sobre uma nova técnica de emenda para POFs-PMMA simples, rápida e barata. A técnica utiliza um adesivo de baixo custo amplamente disponível no mercado e não há necessidade de treinamento para tal procedimento. Um usuário final não treinado poderá simplesmente ler as instruções do procedimento e reproduzi-lo como aqui foi realizado. A autora desta dissertação que nunca havia realizado emendas em fibras ópticas, qualquer que seja o tipo, realizou o procedimento pela primeira vez e obteve excelentes resultados tanto na média quanto no desvio padrão relativamente baixo para várias POFs-PMMA. Adiante, isto será relatado com detalhes.

# 4.2. A TÉCNICA DE EMENDA AQUI PROPOSTA

O tipo de emenda estudada nesse trabalho é baseado na utilização de um adesivo gel para fixar as duas fibras clivadas casando o índice de refração entre elas e consequentemente, reduzindo as perdas por reflexão. As fibras ópticas, já com o adesivo aplicado em suas extremidades, são unidas devido ao uso de uma guia metálica (*sleeve*) para facilitar o seu alinhamento.

O uso desse tipo de emenda oferece vantagens operacionais com relação às outras técnicas de conexão ponto-a-ponto, por exemplo: a facilidade de manuseio, pois não há a necessita de nenhum equipamento sofisticado ou mesmo de conhecimento técnico particular; baixo custo de operação e pequenas dimensões.

#### 4.2.1. Características do Adesivo Testado

Alguns tipos de adesivo foram testados. O primeiro, o cianoacrilato, que é vendido no Brasil, é um adesivo de cura rápida chamado "Superbonder Original" [36]. Os cianoacrilatos pertencem a uma família de monômeros e quando em contato com superfícies úmidas polimerizam em segundos, estabelecendo o processo adesivo. Mas como a cura desse adesivo é muito rápida, não foi possível controlar o alinhamento entre as POFs e os resultados foram ruins. Ocorreu um desalinhamento longitudinal significativo entre as fibras causando altas perdas de inserção (> 3 dB), o que é inaceitável para fins práticos.

A segunda opção foi o adesivo binário Epotek-301 [37], adesivo próprio para ser utilizado em fibras ópticas e em produtos opto eletrônicos, mas os resultados também foram ruins. A cura desse adesivo termina após 24hs ocasionando o desalinhamento axial entre as POFs devido à polimerização. O adesivo Epotek-301 não é fabricado no Brasil, deve ser armazenado em congelador e tem uma data de validade relativamente curta. Além disso, quando misturado, deve ser utilizado em menos de 1 hora e a quantidade não utilizada é inevitavelmente desperdiçada. Em [38] é relatada uma técnica de emenda entre fibra de sílica e POF PMMA usando o Loctite 3525 (Figura 4.3) mas deve-se ressaltar que trata-se de um

adesivo curável por UV, não sendo conveniente para uso em redes residenciais de POFs por parte de usuários comuns.



Figura 4.3. Adesivo Loctite 3525 curável por UV [10].

Por fim, foi realizado um teste com o gel Loctite® 454<sup>™</sup>, também vendido no Brasil desde fevereiro 2013 com a marca de "Superbonder Gel" (Figura 4.4) [39].



Figura 4.4. Adesivo Loctite® 454<sup>TM</sup> (Superbonder Gel) [10].

Este adesivo é de base cianoacrilato misturado com uma fração de borracha não especificada. O Loctite® 454 <sup>TM</sup> Gel é amplamente disponível no mercado a um preço baixo (cerca de R\$ 10,00 / bisnaga de 2g). Solidifica-se em torno de 2 minutos, formando um filme espesso entre as duas fibras na emenda podendo reduzir as perdas por reflexão de Fresnel e, principalmente, por espalhamento. Devido ao tempo maior de cura comparado ao Superbonder Original, permite um ajuste manual entre as pontas das POFs dentro de um *sleeve* (pequeno cilindro metálico com um furo longitudinal com 2,2 mm de diâmetro) durante o processo da emenda. Como resultado, é obtido um ótimo alinhamento e uma pequena perda de transmissão. Além dessas vantagens, a característica que mais chamou a

atenção, é o possível fato de possuir o mesmo índice de refração do polimetil-metacrilato (PMMA), isso levou ao estudo da utilização desse tipo de adesivo nas emendas em POFs PMMA. O fabricante não divulga o índice de refração do gel Loctite® 454 <sup>TM</sup>, no entanto, a Dynatex fornece n = 1,49 para o seu Super Glue Gel Dynatex® baseado em gel cianoacrilato etilo [40]. Desta forma é razoável considerar um índice de refração n = 1,49 para o Gel Superbonder uma vez polimerizado. Um valor de n = 1,49 combina perfeitamente com o índice de refração 1,492 amplamente aceito para o núcleo da POF-PMMA SI e DSI. A técnica pode ser muito útil para ambientes não-críticos, como por exemplo, em redes residenciais utilizando-se POF [3] ou para inserir um monitor de potência óptica em um enlace de POF [41].

## 4.2.2. Guias (sleeves)

A fim de auxiliar o alinhamento das fibras que serão emendadas, fabricamos *sleeves*, ou seja, cilindros de alumínio com 15mm de comprimento, 6mm de diâmetro, furo centralizado longitudinal com 2,2 mm de diâmetro e pintado de preto. Este dispositivo simples permite o alinhamento passivo de dois segmentos clivados de POFs sem a necessidade de remover a sua cobertura de polietileno. A Figura 4.5 mostra a imagem de um *sleeve*.



Figura 4.5. Foto de um sleeve de alumínio com um diâmetro em torno de 6mm e comprimento de 15mm.

O *sleeve* é um cilindro com um furo central para a passagem da fibra óptica. Teve como base um cilindro de alumínio que foi reduzido até atingir 6 mm de diâmetro, em seguida foi feita uma abertura em seu interior de 2,2mm de diâmetro, pouco maior que o diâmetro das fibras POF PMMA, esses procedimentos foram realizados pela oficina mecânica da UFF sob a especificação e supervisão da autora. Durante a construção dos *sleeves*, alguns resíduos

metálicos ficaram grudados em seu orifício impedindo a passagem da fibra. Por esse motivo, foi necessário fazer o seu reparo utilizando uma Microfresadora M70 da Proxxon com uma broca de 2,2 mm, conforme mostrado na Figura 4.6. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp) da UFF. Para a pintura dos *sleeves*, também realizada no LaCOp, foi usada uma tinta em *spray* específica na cor preto fosco (Figura 4.7).



Figura 4.6. Reparo do núcleo do sleeve na Microfresadora M70 da Proxxon.



Figura 4.7. Sleeves expostos para secagem após a pintura.

#### 4.3. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.

O procedimento de emenda iniciou com a clivagem das extremidades de uma POF com um comprimento de ~ 10 cm denominada "POF de teste". A clivagem consiste no corte das extremidades das fibras em um ângulo de 90 graus, ou seja, cada ponta da fibra deve ter sua face paralela e o mais plana possível a nível macro e microscópico com o intuito de minimizar as perdas por espalhamento óptico do tipo Mie<sup>5</sup>. Esta necessidade do ângulo de 90 graus deve-se ao fato de ambas às faces deverem estar paralelas para que a emenda esteja nos padrões aceitáveis. É nesta etapa que se deve ter o máximo cuidado com o manuseio da fibra. Pode-se utilizar um clivador comercial, porém sempre utilizando lâminas novas, fato este de suma importância! Foi observado durante os testes, que ao utilizar uma lâmina nova diminui significativamente à perda na emenda. Foi utilizado o clivador modelo *Fiber Optic Cutting Block* - Edmund Optics (USA) (Figura 4.8) para clivar as fibras utilizadas nos testes desse trabalho. É simples, de baixo custo e de fácil manuseio, bastando apenas inserir a fibra e pressionar a lâmina para o corte, tipo uma guilhotina. Esse clivador possui seis aberturas diferentes para cortar os diâmetros das POFs mais populares, porém recomenda-se trocar a lâmina a cada 50 cortes [42].



Figura 4.8. Clivador para POFs Fiber Optic Cutting Block - Edmund Optics [39].

Após suas extremidades terem sido clivadas, a fibra de teste é acoplada no circuito mostrado na Figura 4.10.

As Figuras 4.9a-f mostram o procedimento, passo-a-passo, para construir uma emenda permanente em uma "POF-de-teste". A configuração para a realização das medidas é mostrado na Figura 4.10.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Espalhamento Mie ocorre quando as partículas presentes são do tamanho do comprimento de onda. Pode ser observado quando uma irregularidade da fibra tem dimensões comparáveis ao comprimento de onda guiado.

Primeiro passo (Figura 4.9a): uma "POF-de-teste" é introduzida dentro de um *sleeve*, mostrado na Figura 4.5, passando também através de um clivador (*Fiber Optic Cutting Block* - Edmund Optics) com lâminas novas [34]. O *sleeve* metálico ajusta-se firmemente às POFs.

Segundo passo (Figura 4.9b): a "POF-de-teste" é clivada. O PMMA é relativamente duro e quebradiço tornando difícil fazer um corte perfeito. A melhor forma para cortar uma fibra de plástico é cortá-la com o seu encapamento. A qualidade de uma emenda depende da capacidade de cortar a fibra plástica sem destruir o seu revestimento. Um revestimento destruído resultaria em maiores perdas de inserção. Foram produzidos dois segmentos de fibras a serem emendados entre si,  $POF_1$  e  $POF_2$ . Deve-se lembrar que as duas extremidades dessas POFs não foram polidas, apenas clivadas.



Figura 4.9. Procedimento de montagem das emendas baseadas em adesivo. Fonte: a autora (2017).

No terceiro passo (Figura 4.9c), a  $POF_1$  é puxada e ajustada de tal maneira que sua ponta permaneça próximo do meio do comprimento do *sleeve*. Para colar a  $POF_1$  no *sleeve*, é aplicada uma gota de Original Superbonder como mostrado na Figura 4.9c. Também é mostrada a aplicação de uma pequena gota de Gel Loctite® 454 <sup>TM</sup> na parte clivada da  $POF_2$  a ser emendada com a  $POF_1$ .

No quarto passo (Fig. 4.9d), a  $POF_2$  deve ser cuidadosamente introduzida no *sleeve* até tocar a  $POF_1$ . Com uma película de cola gel em sua ponta, a  $POF_2$  deve ser pressionada manualmente contra o  $POF_1$  durante aproximadamente 2 minutos.

Por último, após este tempo, uma gota de Superbonder Original é aplicada na POF<sub>2</sub> para que possa ser colada na parede externa do *sleeve* (Fig. 4.9e). Para obter uma adesão ainda mais forte, pode ser aplicada uma cola de alta resistência (por exemplo, Araldite), como mostrado na Figura 4.9f. Esta última etapa não foi realizada, ficando aqui apenas uma sugestão.



Figura 4.10. Configuração experimental montada e utilizada para a medição da perda de inserção de cada emenda feita na POF. Fonte: a autora (2017).

A Figura 4.10 apresenta a configuração do esquema de teste realizado para a medição da perda de inserção. Como fonte de luz, foi utilizado um LD (Laser de Diodo) emissor em 532 nm. Em fibras multimodo, a atenuação no conector ou emenda depende da distribuição dos modos, das condições de acoplamento, bem como do comprimento da fibra. Portanto, a luz atravessa um *mode-scrambler*<sup>6</sup> JIS6863 e é lançado na "POF em teste". Este último é ligado mecanicamente ao circuito, a fim de assegurar a repetitividade das medições. Finalmente, o POF-*pigtail* é conectado a um medidor de potência óptica (OPM) através de um conector FC / PC. Na Figura 4.11 observa-se a configuração experimental em bancada.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Misturador de Modos (mode mixer ou mode scrambler): é um dispositivo que induz o acoplamento precoce dos modos em uma fibra óptica através do recurso de adicionar um pedaço de fibra extra ( $\sim 1 m$ ) sujeita a algum tipo de perturbação mecânica. Tipicamente este dispositivo é inserido no início do enlace óptico (entrada da fibra) a ser medido, mas pode ser também aplicado na saída da fibra, em alguns casos.



Figura 4.11. Foto da configuração experimental para medida de perda de inserção das emendas.

 $1^{\circ}$ ) A referência do nível de potência denominada  $P_{refl}$ , é a medida da potência da luz transmitida pelo LD.

 $2^{\circ}$ ) Após determinada a  $P_{ref1}$ , a "POF-de-teste" é clivada produzindo-se dois segmentos de fibras, POF<sub>1</sub> e POF<sub>2</sub> que são inseridos no *sleeve* de forma a primeiramente conectá-los sem o uso da cola. Em seguida mede-se a potência  $P_{d1}$ , onde "d" indica "conexão seca", na saída da "POF-de-teste".

**3**°) Nesta etapa, é realizado o procedimento de emenda utilizando-se cola gel, conforme previamente explicado. O nível da luz na saída da POF contendo a emenda é medido como  $P_{g1}$ , onde "g" significa "conexão colada". Durante a cura da cola, a POF<sub>2</sub> deve ser empurrada e pressionada contra a POF<sub>1</sub> enquanto a potência óptica transmitida é monitorada. Após esse procedimento, a "POF-de-teste" emendada é descartada. Uma nova "POF-de-teste" é conectada ao OPM (como mostrado na Figura 4.11). Um novo nível de referência de potência de luz é medido como  $P_{ref2}$ . Segue-se então o mesmo procedimento para obter o  $P_{d2}$  e  $P_{g2}$ . Em nossos experimentos, as medições foram realizadas para 10 amostras de cada tipo de POF. Detalhando para a POF-PMMA SI: 10 medidas de referência + 10 medidas de conexão a seco + 10 novas medidas de referência + 10 medidas de conexão a seco + 10 novas medidas de POFs de PMMA, então totalizamos 3 x 40 = 120 medidas no total.

#### 4.3.1. Caracterização das Emendas

As perdas de inserção média (em dB) da "conexão seca"  $\langle IL_a \rangle$  e da "conexão colada"  $\langle IL_a \rangle$  são calculadas a partir das Equações 4.1 e 4.2:

$$\langle IL_d \rangle = 10 \log \left[ \langle \frac{P_d}{P_{ref}} \rangle \right]$$
 (4.1)

$$\langle IL_g \rangle = 10 log \left[ \langle \frac{P_g}{P_{ref}} \rangle \right]$$
 (4.2)

Inicialmente, o procedimento descrito na seção anterior foi feito por uma pessoa com experiência técnica. No entanto, apenas 3 medições foram feitas para uma POF padrão, porque a lâmina estava sem corte, bastante desgastada devido à anos de uso sem substituição. Assim, a perda de inserção média  $\langle IL_d \rangle$  para a "conexão seca" foi muito alta, resultando em 5,62 dB. Apenas substituindo por uma nova lâmina afiada, a  $\langle IL_d \rangle$  foi significativamente reduzido para 1,40 dB. Isso mostra a necessidade de lâminas (frescas) afiadas para a clivagem de POFs visando a realização de conexões ou quaisquer outras necessidades. O melhor resultado para a "conexão seca" foi de  $\langle IL_d \rangle = 1,09$  dB e após a aplicação do Gel Superbonder foi reduzida para  $\langle IL_g \rangle = 0,35$  dB.

Tais procedimentos foram reproduzidos e as medições foram *propositalmente* realizadas pela autora da presente dissertação, a qual, realizou a tarefa pela primeira vez. A Tabela 4.1 mostra a média e o desvio padrão das medidas em dB de  $IL_d$  ("conexão seca") e  $IL_g$  ("conexão colada" ou "emenda permanente") para cada tipo de POF baseado em PMMA disponível no mercado.

POF base PMMA	$IL_d$ (dB)	$IL_g$ (dB)
SI padrão de alta AN (Toray PFU-CD1001-22-E1 mm)	$1,\!40 \pm 0,\!50$	$0,\!42 \pm 0,\!11$
DSI de baixa AN (Toray PMUCD1002-22-E1 mm)	$1,94\pm0.51$	0,56 ± 0.14
GI (Optimedia OMJ-Giga/FF- GISE100 1mm)	2,15 ± 0.64	0,84 ± 0.36

 Tabela 4.1. A média e desvio padrão calculados a partir dos resultados de medição de ILd ("conexão seca") e ILg ("conexão colada") para os 3 principais tipos de POFs PMMA disponíveis no mercado.

A Figura 4.12 mostra uma fotografia ampliada da região emendada entre duas POFs padrão. A espessura de ~ 0,4 mm do Gel Superbonder curado. A medida estimada de 0,4 mm foi feita com o uso do microscópio-máquina-fotográfica utilizado em conjunto com a régua de calibração.



Figura 4.12. Espessura ampliada da película curada de Superbonder Gel em uma emenda de dois cabos de POFs padrão, como pode ser visto no meio da imagem. Abaixo na foto é mostrado a escala mm através de uma régua. A espessura estimada da película é cerca de 0,4 mm. Fonte: a autora (2017).

## A) POs-SI PMMA

Na Figura 4.13, observamos as medidas feitas com uma POF SI PMMA, onde obtevese uma média de  $\langle IL_d \rangle = 1,40$  dB. Tal resultado mostra a boa qualidade, a concentricidade do núcleo das POFs e a reprodutibilidade devido ao uso de lâminas (frescas) afiadas e *sleeve* metálico (visto no item 4.2.2). Usando o adesivo Superbonder Gel, obteve-se  $\langle IL_g \rangle = 0,42$  dB. Trata-se de um resultado comparável ou ainda melhor do que os relatados na literatura [29] [43] [33] [44] [45]. Além disso, a técnica provou ser do tipo "faça-você-mesmo" ou comumente chamada de tecnologia *do-it-yourself*, adequada para um usuário final comum, não treinado.





Figura 4.13. Medidas de ILd e ILg feitas a partir de emendas com uma POF SI PMMA. Fonte: a autora (2017).

Deve-se observar que as medições do desvio padrão da "conexão seca" em 0,50 dB é relativamente alto quando comparado com o valor médio de 1,40 dB. Esta variação relativamente elevada, observado nitidamente na Figura 4.13, deve-se ao fato de que cada clivagem não permite um bom controle da superfície POF. Como resultado, o efeito de espalhamento óptico varia notavelmente. Contudo, quando o adesivo de gel é aplicado, o desvio padrão é significativamente reduzido para 0,11 dB. Além da eliminação do intervalo de ar, o adesivo possui o mesmo índice de refração entre as POFs e preenche os micro vazios existentes nas superfícies não perfeitamente planas. Isso reduz bastante o espalhamento óptico e, portanto as variações entre as medições.

A perda de inserção devida às reflexões de Fresnel para as POFs padrão SI de alta AN, assumindo duas interfaces como PMMA / ar e ar / PMMA, pode ser calculada a partir da Equação 4.3:

$$IL_{Fresnel} = -10 \log\left\{ \left[ 1 - \left( \frac{n_{PMMA} - n_{AIR}}{n_{PMMA} + n_{AIR}} \right)^2 \right]^2 \right\}$$
(4.3)

Usando  $n_{PMMA} = 1.492$  e  $n_{AIR} = 1$ , foi calculado  $IL_{Fresnel} = 0.345$  dB. Contudo, após a cura do Superbonder Gel foi gerado um filme polimérico espesso com um índice de refração quase igual a 1,49 (ver Fig. 4.12). Portanto, é provável que a perda de Fresnel tenha se tornado desprezível.

Em uma POF-PMMA padrão, a perda de inserção  $\langle IL_g \rangle$  de uma emenda devido ao desalinhamento longitudinal em UMD (*Uniform Mode Distribution*), pode ser calculada através da Equação 4.4 [3]:

$$IL_g = -10\log\left(1 - \frac{2s}{3}\frac{AN}{nD}\right) \tag{4.4}$$

Os parâmetros "s", "AN", "n" e "D" representam, respectivamente, a distância entre as pontas das POFs, a abertura numérica, o índice de refração do gel Superbonder curado e o diâmetro do núcleo. Assumindo que desalinhamento longitudinal seja o mecanismo principal responsável pela perda de inserção da "conexão colada", foi medido em laboratório que  $IL_g = -1,01 \ dB$  como valor da perda de inserção de acordo com a foto da emenda mostrada na Figura 4.1. Usando a Equação 4.4, e os parâmetros AN = 0,50,  $n = 1,49 \ e \ D = 980 \ \mu m$ , foi obtido  $s \approx 0,91 \ mm$ . Usando a mesma Equação 4.4, mas ajustando a espessura do filme para 0,4 mm, obtém-se um valor estimado de  $IL_g \sim 0,42 \ dB \ (< 1,01 \ dB)$ . Deve-se ressaltar, que este valor calculado de 0,42 dB, *acidentalmente* coincide numericamente com o obtido para a perda de inserção média na POF de PMMA *standard* com Superbonder gel aplicado. Duas possíveis explicações para as discrepâncias encontradas são propostas:

**1**°) A película de gel Superbonder curada não é homogênea. Portanto, a luz se espalha ao longo de sua espessura de ~ 0,4mm, assim contribuindo para aumentar o  $IL_g$  medido.

2°) A Equação 4.4 é válida apenas para a luz na condição UMD propagando-se ao longo da POF. No entanto, todas as medições de *IL* foram realizadas sob uma Distribuição Equilibrada de Modos (*Equilibrium Mode Distribution* - EMD), ou seja, foi usado um *mode-scrambler* logo após a fonte de luz, como pode ser visto na montagem experimental mostrada na Figura 4.10. Como resultado, outra possível contribuição para o valor superestimado de s  $\approx$  0,91mm pode ser devido à Equação 3.4 ser válida *apenas* para a condição UMD.

Os valores típicos de perda de inserção para conectores de vários fabricantes estão na faixa entre 0,6 dB e 1,6 dB [3] [45]. Por outro lado, boas conexões de fibra de vidro atingem perdas na faixa de 0,1 dB a 0,5 dB. Desta forma, acreditamos que o valor obtido  $\langle IL_g \rangle = 0,42$  dB é um excelente resultado.

## **B) POFs-DSI PMMA**

A POF DSI de baixa AN apresentou  $\langle IL_d \rangle = 1,94$  dB e  $\langle IL_g \rangle = 0,56$  dB. Na Figura 4.14 podemos observar todas as medidas realizadas.

Como esperado, ambos os valores são superiores às perdas de inserção da POF padrão SI de alta AN. Os respectivos desvios-padrão são próximos (ver Tabela 4.1).

O ligeiro aumento do  $\langle IL_g \rangle$  de 0,42 dB da POF SI de alta AN para 0,56 dB da POF DSI de baixa AN pode ser devido ao perfil de índice de refração da DSI ser um pouco mais complexo do que o índice de refração da SI. Isto provoca maiores dificuldades no alinhamento entre as POFs durante a cura adesiva. O resultado  $\langle IL_g \rangle = (0,56 \pm 0,14)$  dB também é promissor e pode ser comparado com o  $(0,61 \pm 0,18)$  dB, perda de inserção relatada em [46] para POF de baixa AN, mas realizando polimento na conexão.



**DSI-PMMA-POF** 

Figura 4.14. Medidas ILd e • ILg feitas a partir de emendas com uma POF DSI PMMA. Fonte: a autora (2017).

#### C) POFs-GI PMMA

As POFs GI PMMA são mais limitadas devido à maior atenuação do que as POFs padrão. As atenuações espectrais típicas para uma POF-GI PMMA é de ~ 225 dB / km (590 nm), ~ 190 dB / km (650 nm) e ~ 600 dB / km (780 nm) [8]. Portanto, as POFs-GI PMMA operam, principalmente, no comprimento de onda em torno de 650nm (canal vermelho), e mais uma vez com maior atenuação quando comparado com uma POF padrão. Além disso, do que se conhece do mercado, há apenas um fabricante de POF-GI PMMA [47] no mundo, limitando o uso desta tecnologia. No entanto, tais fibras são interessantes uma vez que apresentam diâmetro do núcleo de 1 mm, apresentando maior flexibilidade, operando no espectro visível e possuindo cerca de 15x mais largura de banda do que as POFs padrão. Pelo

fato das POFs-GI PMMA possuírem um núcleo maior do que as POFs-GI PF (fluoretadas), o seu manuseio é facilitado em comparação a essa última, além de ser uma alternativa intermediária e interessante para redes residenciais [48].

Como mostrado na Tabela 4.1, as emendas realizadas na POF GI PMMA apresentaram  $\langle IL_d \rangle = 2,15$  dB e  $\langle IL_g \rangle = 0,84$  dB. Ambos os valores são superiores às perdas de inserção alcançadas pela POF DSI de baixa AN. Na Figura 4.15 podemos observar todas as medidas realizadas.



**GI-PMMA-POF** 

Figura 4.15. Medidas ILd e ILg feitas a partir de emendas com uma POF GI PMMA. Fonte: a autora (20117).

Os respectivos desvios-padrão são também maiores. Uma possível explicação deve-se ao fato das POFs GI serem ainda mais sensíveis ao alinhamento durante o processo de cura do adesivo na emenda. Uma vez que essa possui um perfil de índice gradual e AN em torno de 0,20, os requisitos de precisão para a emenda são maiores. Além disso, a condição EMD

## 4.3.2. Conclusões

Foi apresentada uma solução técnica de emenda permanente, prática, simples, econômica, rápida e eficiente para POFs PMMA. A redução da perda de inserção após a aplicação do Gel Superbonder numa "conexão seca" é relatada para cada um dos principais

tipos de POFs. De fato, a presente técnica utiliza um produto de baixo custo, amplamente disponível e seguro.

O  $\langle IL_g \rangle = 0,42$  dB medido para a POF padrão é próximo ou mesmo menor do que muitos dos relatados na literatura que demandam maior trabalho técnico. O  $\langle IL_g \rangle = 0,56$  dB para a POF DSI de baixa AN foi semelhante ao  $\langle IL_g \rangle = 0,42$  dB para o POF SI de alta AN. Portanto, o resultado também é bom se comparado ao 0,61 dB já relatado, mas com o uso de polimento [33]. O  $\langle IL_g \rangle = 0,84$  dB para o GI POF ainda é razoável, mas já era esperado ter um valor pior do que  $\langle IL_g \rangle = 0,42$  dB para a POF padrão. O alinhamento lateral crítico pode explicar esse aumento  $\langle IL_g \rangle$ . De qualquer forma, o  $\langle IL_g \rangle = 0,84$  dB pode ser comparado com o *IL* típico obtido em POFs com conectores mecânicos. Infelizmente, não foi encontrada na literatura nenhuma medida semelhante no que diz respeito à emenda permanente de POF GI PMMA. Se a técnica for executada por um operador treinado que usa procedimentos de limpeza, técnicas e ferramentas sofisticadas / caras [3] ou técnicas baseadas no POF-Press Cut [49] [50], acredita-se que seja provável o alcance de  $\langle IL_g \rangle \leq 0,3$  dB sem dificuldades.

# 5. MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM COMPRIMENTO DE ONDA (WDM) SOBRE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS

# 5.1. INTRODUÇÃO

O tráfego de telecomunicações vem aumentando com grande rapidez devido ao crescimento no uso de telefones, serviços móveis diversos, serviços diversos em banda-larga fixos, redes de computadores e internet, com isso, a necessidade de aumento da capacidade das fibras e de novos cabos deverão manter o mesmo ritmo. A técnica de multiplexação em comprimento de onda surgiu na década de 80, como uma solução tecnológica promissora para a realização de sistemas de transmissão com alta capacidade, explorando a largura de banda disponível na fibra óptica de sílica, ou seja, nada mais é do que a transmissão simultânea de dois ou mais sinais de informação em diferentes comprimentos de onda utilizando o mesmo meio de transmissão.

Neste capítulo, o foco será em WDM sobre fibras ópticas de plástico. Será discutido inicialmente, os diversos tipos e processos de multiplexação e demultiplexação de forma geral, aprofundando, posteriormente, os conhecimentos correlatos ao WDM. Serão discutidas, ainda, algumas motivações para o uso de WDM sobre POFs e, em seguida, serão apresentados alguns dispositivos já desenvolvidos.

# 5.2. DEFINIÇÃO E MOTIVAÇÃO

Nos sistemas de Telecomunicações, a banda passante de um canal é muito maior do que a banda necessária para transmitir um único sinal, principalmente no caso das fibras ópticas, de forma que é possível enviar mais de um sinal por um mesmo meio físico (Figura 5.1), melhorando o aproveitamento da banda do meio e permitindo, possivelmente, um aumento da vazão do sistema. Para tanto é utilizada a técnica de multiplexação, que permite a transmissão de mais de um sinal em um mesmo meio físico.



Figura 5.1. Utilização da banda passante de um meio físico genérico em uma transmissão comum e utilizando multiplexação. Fonte: a autora (2017).

Os principais métodos de multiplexação são o TDM (Time Division Multiplexing), FDM (Frequency Division Multiplexing), WDM (Wavelength Division Multiplex), SDM (Space Division Multiplexing) e o CDM (Code Division Multiplex). Os dispositivos necessários para realizar qualquer um desses métodos são denominados multiplexadores, e devem trabalhar sempre em conjunto com os demultiplexadores, responsáveis por realizar o processo inverso. Assim, em uma extremidade do enlace os sinais são combinados e enviados por um único meio (fibra óptica no presente caso), e na extremidade receptora os sinais que chegam por esse meio são separados e repassados para seus respectivos receptores. Este conjunto é denominado como MUX/DEMUX.

## TDM: Multiplexação por Divisão de Tempo

Na multiplexação por divisão de tempo, as fontes de informação compartilham um trem de bits ocupando *slots* de tempo diferentes. Os *slots* a serem ocupados pelos diversos sinais são organizados em quadros (*frames*) que contém um ciclo de alocação de *slots* de tempo. Este ciclo é repetido indefinidamente durante a transmissão [2] [3]. Na Figura 5.2 poderemos entender melhor este conceito:



Figura 5.2. Esquema de multiplexação TDM. a autora (2017).

Na Figura 5.2, deve-se observar que no tempo, os canais: vermelho, azul, violeta e verde, são amostrados continuamente. Ao término do último canal, inicia-se novamente o envio do primeiro. Do lado oposto ao multiplexador temos o demultiplexador que faz o processo inverso.

A Multiplexação por Divisão do Tempo ou TDM (Time Division Multiplexer) é muito usada em Telecomunicações, por exemplo, para transmissão da voz. Como a voz é analógica, a mesma deve ser convertida para um formato digital de forma que em seguida possa ser multiplexada.

#### SDM: Multiplexação por Divisão no Espaço

A multiplexação por divisão de espaço apresentando grande importância para sistemas sem fio. Em meios sem fio, o canal é estabelecido por um enlace ponto-a-ponto entre o transmissor e o receptor, criando uma espécie de "vetor de tubos virtuais paralelos" pelos quais os sinais trafegam. Um exemplo de aplicação do SDM são os sistemas que empregam múltiplas antenas como o MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) utilizado no IEEE 802.11 n [51]. Do lado das fibras ópticas, o SDM consiste em enviar informações multiplexadas em cada modo permitido de se propagar pela referida fibra, ou então utilizar uma fibra óptica multi-núcleo.

#### FDM: Multiplexação por Divisão de Frequência

Em FDM, o espectro de frequências é dividido em vários canais, com cada usuário possuindo sua largura de banda própria. Dessa forma, cada canal analógico é modulado em frequências diferentes entre si, evitando a interferência. A Figura 5.3 mostra uma multiplexação de 4 canais. Nota-se que cada canal continua ocupando uma largura em frequência equivalente à sua largura de banda original, porém, deslocado em frequência no espectro. A recuperação do sinal é semelhante, com o demultiplexador deslocando o sinal para a faixa de frequência original [2] [3].



Figura 5.3. Esquema de multiplexação FDM. a autora (2017).

# WDM: Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

Nesta tecnologia, os canais são separados por faixas de comprimento de onda (cores) equivalente às faixas de frequência, de forma que cada sinal enviado pode ocupar apenas a faixa à qual foi alocado. Nesse tipo de multiplexação, são reservadas faixas de comprimento de onda para definir diferentes canais em uma única fibra óptica. Para utilizar estas faixas reservadas, são necessárias fontes de luz que apresentem uma largura espectral que esteja em acordo com a largura da faixa alocada, com a finalidade de evitar a invasão de faixas adjacentes, o que provocaria interferência (*crosstalk*) no canal afetado [2] [3].

O WDM (Figura 5.4) e o FDM são baseadas nos mesmos princípios com a diferença que o WDM se aplica aos comprimentos de onda na fibra óptica e o FDM se aplica nas frequências.



Figura 5.4. Esquema de multiplexação WDM. a autora (2017).

## 5.3. MULTIPLEXAÇÃO WDM

O conceito de WDM era perseguido desde que o primeiro sistema de comunicações por fibra óptica (de sílica) comercial se tornou disponível em 1976 no Reino Unido. Em 1982, WDM foi empregado em sua forma mais simples para transmitir dois canais em diferentes janelas de transmissão de uma fibra óptica. Considerável atenção foi direcionada durante a década de 1980 à redução do espaçamento entre canais, e, em 1991, sistemas multicanal com espaçamento entre canais menor do que 0,1 nm foram demonstrados. Contudo, foi durante a década de 1990 que se desenvolveram sistemas WDM de forma mais agressiva surgindo a segunda geração do sistema. Com o decorrer dos anos, tais sistemas empregavam centenas de comprimentos de onda com pequeno espaçamento [2].

O uso de WDM reduziu o custo total e, ao mesmo tempo, aumentou a capacidade dos sistemas, pois a técnica permite a exploração da grande largura de banda oferecida por fibras ópticas. Isso ocorre porque cada laser é modulado em uma dada taxa digital, e a capacidade agregada total que está sendo transmitida ao longo da fibra é o total da soma das taxas de bits dos lasers individuais. Um exemplo do aumento da capacidade do sistema, é a situação em que dez sinais de 2,5 Gbps podem ser transmitidos em uma fibra, produzindo uma capacidade do sistema de 25 Gbps. Este paralelismo no comprimento de onda permite que dispositivos óptico-eletrônicos típicos que não possuem larguras de banda excedendo alguns poucos gigahertz possam continuar a ser usados, porém, um conjunto (fonte e foto-detector) para cada canal WDM [52].

Outra vantagem das redes WDM, é a grande flexibilidade, pois centenas de canais podem ser inseridos em um sistema (fibra óptica) já em uso, para isso, basta aumentar o número de fontes de luz diferenciadas pelo comprimento de onda, podendo assim, elevar a capacidade total do sistema sem a necessidade de instalar novas fibras ópticas ou trocar os equipamentos intermediários já utilizados.

Na Figura 5.5, é ilustrado um esquema de sistema utilizando um MUX/DEMUX WDM para 3 canais unidirecional. Nesse sistema, cada fonte de luz emite em um comprimento de onda diferente (azul, verde e vermelho), que trafegam por fibras ópticas distintas e são combinadas pelo multiplexador para transmissão em uma única fibra óptica. Na outra extremidade do enlace, o demultiplexador é responsável por separar os comprimentos de onda do sinal policromático e distribuí-los para seus respectivos receptores, os fotodetectores (*PhotoDetector*, PD).



Figura 5.5. Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM unidirecional de três canais. a autora (2017).

O WDM permite também a utilização de enlaces bidirecionais *full-duplex*, importantes para comunicações de dados. A técnica unidirecional baseia-se na utilização de um par de fibras ópticas, onde uma é utilizada exclusivamente para a transmissão dos sinais ópticos e a outra fibra para a recepção. Já a técnica bidirecional baseia-se na utilização de uma única fibra óptica para a transmissão e recepção dos sinais ópticos. A Figura 5.6 ilustra um sistema WDM bidirecional.



Figura 5.6. Sistema WDM Bidirecional [10].

Sistemas WDM já estão muito bem estabelecidos para aplicações que utilizam fibra de sílica. A ITU-T (*International Telecomunication Union – Telecomunication Standardization Sector*) criou uma série de documentos para padronização do WDM e subdividiu-o em três tipos: DWDM (*Dense* WDM), CWDM (*Coarse* WDM) e WWDM (*Wide/Wideband* WDM). A diferença básica entre eles é a quantidade de canais definidos, que origina necessidades de padronização diferentes, obtendo características distintas para cada um dos tipos.

A primeira diferença entre o DWDM e o CWDM, reside na forma como são tratados seus parâmetros de definição de canais pelas respectivas recomendações: na recomendação G.694.1 (DWDM) da ITU-T os canais são definidos em termos de frequência, enquanto que na ITU-T G.694.2 (CWDM) os canais são definidos em termos de comprimento de onda. O intercâmbio entre faixa de comprimento de onda e faixa de frequências pode ser realizado conforme indicado na Equação (5.1).

$$\Delta f \approx \frac{c \, \Delta \lambda}{\lambda^2} \tag{5.1}$$

 $\Delta \lambda = faixa \ de \ comprimento \ de \ onda$ 

 $\Delta f = faixa \, de \, frequência$ 

c = velocidade da luz no vácuo

 $\lambda$  = comprimento de onda central da banda

## 5.3.1. Técnicas de Multiplexação WDM

Multiplexadores e demultiplexadores são os componentes essenciais de qualquer sistema WDM. Esses requerem um mecanismo de seleção de comprimento de onda e podem utilizar diversas técnicas, cada uma baseada em fenômenos ópticos diferentes, como reflexão, refração, absorção, difração e interferência. Na maioria dos casos, é possível utilizar o mesmo dispositivo como multiplexador e demultiplexador. Também podemos fazer uma combinação destas técnicas, originando dispositivos mais complexos. Nesta seção, serão apresentadas algumas técnicas de interferência para multiplexação e demultiplexação. Além dessas técnicas, também podemos utilizar filtros de absorção para bloquear ou transmitir a luz de determinado comprimento de onda, esse processo será visto no Capítulo 6.

# Dispersão por Prisma

Uma forma simples de multiplexação ou demultiplexação de luz, pode ser feita usando um prisma, porém são pouco indicados por apresentarem grandes perdas [24] e poder dispersivo relativamente baixo quando se compara, por exemplo, ao uso de redes difrativas. No processo de demultiplexação, quando um feixe de luz incide sobre a superfície do prisma os diferentes comprimentos de onda desse feixe percorrerão o seu interior de modo diferente (dispersão cromática), de forma que ao emergir através da superfície oposta estarão separados por um determinado ângulo, causando o "efeito arco-íris" [2]. Utiliza-se uma lente para focalizar nas fibras os comprimentos de onda que foram anteriormente separados. A multiplexação é realizada pelo caminho inverso. A Figura 5.7 ilustra o esquema da demultiplexação utilizando um prisma e na Figura 5.8 a fotografia de um feixe luminoso dispersado por um prisma real.



Figura 5.7. Demultiplexação por refração no prisma [53].



Figura 5.8. Dispersão de um feixe de luz branca provocada por um prisma [51].

#### Interferência por Filmes Finos (Múltiplas Camadas)

Estes filtros podem ser arranjados em cascata e cada um deles será responsável por transmitir uma componente do feixe incidente, refletindo o restante, até que todas as componentes desejadas estejam separadas. Assim, para N fontes luminosas, são necessários N - 1 filtros para separar ou combinar todas elas e as componentes refletidas e transmitidas dependerão das características ópticas de cada filtro óptico. A multiplexação é realizada no caminho inverso. Os filtros de filme funcionam então como espelhos unilaterais, que refletem a maior parte da luz, mas pode-se ver através dele, desde que estejamos olhando de um ambiente escuro para um ambiente mais iluminado [2].

Ainda que esses tipos de filtros só tenham sido desenvolvidos recentemente para WDM, essa tecnologia já existia há tempo, pois eram usados desde óculos de sol, insul-film, a equipamentos fotográficos e de cinema, aplicações de espionagem (espelho falso), etc. Filtros ópticos de filmes finos podem ser visto na Figura 5.9.



Figura 5.9. Filtros Ópticos de Filmes Finos [54].

A Figura 5.10 ilustra o esquema de demultiplexação realizada com filtros de interferência (espelhos dicróicos) e mostra também uma fotografia de um filtro deste tipo combinando um feixe luminoso vermelho com um verde, originando um feixe único, alaranjado.



Figura 5.10. (a) Esquema de demultiplexação utilizando filtros de interferência [53] e (b) multiplexação de dois feixes luminosos, verde e vermelho, utilizando um filtro de interferência [51].

# Difração e Interferência por Grade de Difração

As grades de difração são um pouco mais usadas que os sistemas anteriores para a multiplexação e demultiplexação. Essas são formadas por linhas paralelas em uma superfície, causando efeito de difração e interferência entre os raios difratados. Estas causam um efeito similar a um prisma, desviando angularmente a luz incidente de acordo com o comprimento de onda. A Figura 5.11 ilustra o esquema da demultiplexação realizada utilizando grade de difração. O caminho inverso pode ser utilizado para multiplexar os sinais. Nesta Figura 5.11, também é ilustrado o funcionamento de uma grade de difração difratando luz "branca" (policromática).



Figura 5.11. (a) Esquema de demultiplexação utilizando grade de difração [53] e (b) fotografia de uma grade de difração real difratando a luz policromática incidente [51].

Em sua forma mais simples, uma grade de difração em fibra óptica atua como um filtro de reflexão. Exemplos desse tipo de filtro são as Redes de difração de Bragg. Estas últimas, refletem um determinado comprimento de onda e transmitem o restante. Sua vantagem sobre os filtros de filme, é a possibilidade de serem implementadas na própria fibra, logo não há necessidade de alinhamento de componentes discretos que são mais sensíveis a fatores ambientais como temperatura, umidade e vibração, tornando menor sua perda de inserção [2] [55].

## Filtros Acústico-Ópticos

Esse método consiste na formação de uma grade de difração por meio de ondas acústicas. Esse tipo de filtro exibe uma grande faixa de sintonia, sendo muito adequado para desenvolvimento de demultiplexadores WDM. O mecanismo físico responsável pelo funcionamento de filtros acústico-ópticos é o *efeito fotoelástico*, pelo qual uma onda acústica que se propaga em um material acústico-óptico, cria mudanças periódicas no índice de refração (correspondendo as regiões de compressão e rarefação locais). Na verdade, as ondas acústicas criam uma grade periódica de índice de refração que pode difratar um feixe óptico. A seletividade de comprimento de onda advém dessa grade de difração induzida acusticamente [2].

## Difração e Interferência por AWG

Os processos de multiplexação e demultiplexação podem ser realizados, também, utilizando as AWGs (*Arrayed WaveGuides*), que consistem em um conjunto de guias de onda curvados com diferentes comprimentos. Os guias de onda planos curvos fazem com que a luz

caminhe distâncias diferentes, e no acoplador de saída sofrem interferência construtiva e destrutiva, sendo, então, separados em feixes diferentes que são recolhidos pelas fibras ópticas de saída. O acoplador de saída é um dispositivo óptico complexo, pois ele focaliza os diferentes comprimentos de onda, dos pontos onde sofreram interferência construtiva, até a fibra de saída. Os AWGs são caros e tem uma perda considerável em relação a outras técnicas de DEMUX, mas tem a vantagem de poder demultiplexar um grande número de canais em um só dispositivo, quando isso é desejado. A multiplexação é realizada no caminho inverso. A Figura 5.12 ilustra o esquema da demultiplexação utilizando um AWG, além de mostrar um esquema do comportamento da luz no interior do dispositivo e de apresentar um AWG real, utilizado para multiplexação em fibras de sílica.



Figura 5.12. (a) Esquema de demultiplexação utilizando um AWG [53], (b) esquema da difração e interferência sofridas pelo feixe luminoso no AWG [61] e (c) AWG real utilizado para WDM em fibras de sílica [51].

O WDM permite utilizar configurações que variam desde as mais simples, como o uso de *splitters*, às mais complexas, que utilizam uma combinação das técnicas de multiplexação apresentadas. Qualquer que seja a técnica utilizada para desenvolver o dispositivo MUX/DEMUX WDM, devem ser utilizadas N fontes luminosas, cada uma com seu comprimento de onda e largura espectral. Os sinais produzidos serão multiplexados utilizando

alguma técnica de multiplexação WDM, capaz de ser revertida (processo de demultiplexação). Estas fontes luminosas devem ser muito bem escolhidas a fim de se evitar (ou minimizar) interferência entre canais adjacentes. A taxa de transmissão máxima possível pode ser obtida a partir da Equação (5.2) [56]:

para 1 canal: 
$$R \approx 2B$$
 (5.2)

para N canais:  $R \approx 2BN$ 

B = largura de banda (analógica) da fibra ópticaN = número de fontes luminosas utilizadas (canais WDM)

# 5.4. WDM SOBRE POF

Atualmente, a aplicação da tecnologia WDM em fibra de vidro é bem estabelecida e muito utilizada, mas com relação às POFs, esse sistema ainda está relativamente pouco desenvolvido. Isso ocorre principalmente devido à indisponibilidade comercial de um dispositivo que realize os processos de multiplexação e demultiplexação com um desempenho aceitável. Uma possibilidade, seria a aplicação dos dispositivos utilizados em fibras de sílica, porém podem resultar em soluções desproporcionalmente complexas para a tecnologia de POFs e além disto dispendiosas. Isso contrariaria a ideia principal da utilização da POFs, a construção de uma rede de baixo custo.

Nesta seção, serão apresentadas algumas pesquisas realizadas por terceiros, relacionadas ao assunto, e a motivação da aplicação do WDM à sistemas baseados em POFs.

## 5.4.1. Motivação

Como mencionado anteriormente, as POFs como meio de transmissão, oferecem inúmeras vantagens em relação às GOFs e aos cabos de cobre, possuindo um grande potencial para substituí-los em diferentes aplicações. Para a comunicação sem fio, não se espera que as POFs substituam esse sistema, mas complemente, uma vez que estes apresentam uma característica que atualmente é indispensável: a mobilidade. Porém, como qualquer transmissão em frequências de rádio, os sinais de rede sem fio estão sujeitos a uma grande variedade de interferências, bem como efeitos de propagação complexos, que estão além do controle do administrador da rede. Outra desvantagem principal da comunicação sem fios é a

suscetibilidade ao acesso indesejado aos dados transmitidos por terceiros. Sendo assim, não é indicada para a transmissão segura de informações sensíveis. Então, nesse caso, para uma comunicação interna as POFs seriam mais indicadas.

Em geral, as POFs são instaladas em pares, um para upstream e outro para downstream, utilizando um único comprimento de onda em cada enlace. Existe, portanto, apenas um canal por fibra óptica, o que pode provocar, futuramente, um gargalo na transmissão de dados, uma vez que há um limite para o aumento da taxa de transmissão do sinal e os serviços fornecidos consomem cada vez mais largura de banda. Este gargalo pode ser minimizado aumentando-se o número de fibras ópticas instaladas ou utilizando-se processos que explorem a largura de banda efetiva. Em qualquer rede, a instalação de novas fibras ópticas pode ser dispendiosa e trabalhosa, e no caso de redes internas, como LANs, a presença de mais fios no interior da residência pode provocar um incômodo visual caso seja uma residência com as instalações elétricas já feitas. Caso seja uma residência nova, pode-se instalar cabos híbridos energia-POFs já disponíveis comercialmente. Pontos de energia elétrica são permeáveis em toda residência. Consequentemente, a instalação destes cabos híbridos automaticamente capilarizam os "pontos ópticos" via POFs. Deve-se ressaltar, que a solução mencionada, não deixa aparente qualquer POF. Além disto, o uso do WDM pode ser interessante para redes residenciais pois reduz a metade o número de POFs dentro dos referidos cabos híbridos que poderão ter um menor diâmetro (bitola) considerando uma mesma capacidade de transmissão óptica. Este último fato, pode não ser muito importante para instalações elétricas em residências novas. Porém, em residências onde as instalações elétricas já estão prontas, pode ser interessante dispor de um cabo híbrido com bitola reduzida caso o usuário decida retirar os cabos antigos (só de energia) para instalar cabos novos (híbridos). Caso esta reinstalação não seja desejada ou possível, então cabeamento com POFs deverá ser feito externamente aos conduítes elétricos [3]. Uma forma de elevar essa largura de banda é utilizar mais de um comprimento de onda para transmissão, sendo necessário, então, utilizar técnicas de multiplexação e demultiplexação, ou seja, aplicar o WDM ao sistema óptico.

Tradicionalmente, o WDM tem sido usado para explorar a capacidade das fibras ópticas, contornando as limitações da eletrônica. Tem-se tentado também aplicar a mesma filosofia para as POFs. Entretanto, conforme demonstrado pelo Prof. O. Ziemmman e colaboradores [57], a aplicação do WDM sobre POFs, não necessariamente permite explorar a capacidade das referidas fibras. A razão do fato, é que os dispositivos MUX/DEMUX para

POFs são extrínsecos, ou seja, a luz deve ser retirada da POF, processada externamente, e reinjetada na fibra. Naturalmente que todo este processo implica em uma perda significativamente maior do que quando se compara com os processos intrínsecos comumente utilizados nos sistemas WDM baseado nas fibras ópticas monomodo de sílica. Além do mais, deve-se notar a ampla disponibilidade de amplificadores ópticos para a tecnologia de sílica, que facilmente compensam perdas indesejáveis no processo MUX/DEMUX. Até a atualidade (julho/2017), não se conhece amplificadores ópticos para POFs disponíveis comercialmente. Em laboratório, tais amplificadores para POFs ainda exigem o emprego de grandes potências ópticas de bombeamento, tornando-os muito pouco práticos. Então, pode-se perceber que mesmo no estado-da-arte, os MUX/DEMUX para WDM sobre POFs, introduzem atenuação significativa nos sinais envolvidos, e sem possibilidade de amplificação óptica para compensar. A filosofia do WDM é a de aumentar a banda-passante da fibra por um fator N (número de canais WDM), passando a ter uma banda total NB, onde B é a taxa de bits carregada por apenas um canal WDM. Porém, consegue-se que um canal WDM carregue uma taxa B, caso a potência óptica no detector não fique menor que um certo limiar. Como as perdas no processo MUX/DEMUX em POFs são grandes, pode-se facilmente concluir que a banda conseguida pelo WDM será < NB. Indo mais além, o artigo [57] mostra ser melhor a transmissão em um único canal, dispensando o uso do WDM.

Toda a argumentação do parágrafo anterior não desqualifica o WDM sobre POFs devido às seguintes razões:

 1 – Dispositivos MUX/DEMUX continuam a ser aperfeiçoados em direção a menores perdas por canal.

2 – Amplificadores ópticos práticos para POFs podem surgir.

3 – A técnica WDM não é necessariamente utilizada apenas para explorar a bandapassante das fibras. No presente, caso, o WDM pode ser utilizado para economizar o número de POFs instaladas em uma residência ou qualquer outra aplicação de redes com POFs. O uso WDM também permite ao projetista realizar uma rede mais simplificada, mais organizada. Por exemplo, um canal de áudio pode ser transportado por uma portadora óptica no vermelho enquanto que um canal de vídeo por uma portadora óptica no azul, dispensando o uso de multiplexações mais complexas como no tempo, e assim por diante.

#### 5.4.2. Sistemas MUX/DEMUX para POFs

Em um sistema MUX/DEMUX para POFs PMMA, não é possível realizar um DWDM, pois as POFs operam somente no visível, faixa não utilizada para esse tipo de sistema que opera apenas na Banda C e Banda L. Além disso, possuem poucas janelas de transmissão (azul, verde, laranja e vermelho) com fontes luminosas que na maioria dos casos, apresentam grande largura espectral. Além de tudo, o DWDM é bastante complexo e não há sentido em aplicá-lo à tecnologia de POFs que é simplificada.

Para a escolha dos comprimentos de onda de operação de um MUX/DEMUX WDM, deve-se considerar outros critérios além do perfil de atenuação da POF envolvida (Figura 5.13). Por exemplo, a fonte luminosa deve apresentar um deslocamento mínimo de comprimento de onda com a temperatura, a menor largura espectral possível, alta potência óptica, pequeno ângulo e pequena área de emissão, longa vida útil em serviço, possibilidade de utilizar modulações eficientes, baixo custo, diversidade de fabricantes, dentre outras características [3].



Figura 5.13. Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA em função do comprimento de onda [3].

Deve-se lembrar que este trabalho tem como objetivo desenvolver um DEMUX WDM que opere com dois e três canais. É interessante que este DEMUX seja simples, o mais eficiente possível e barato, para que esteja em acordo com as características das tecnologias envolvidas nos sistemas baseados em POFs.

Apesar de ainda (julho/2017) não existirem MUX/DEMUX WDM para POFs disponíveis comercialmente, diversas pesquisas já foram e têm sido realizadas sobre o assunto. Muitas destas pesquisas resultaram no desenvolvimento de um protótipo, utilizando

diferentes técnicas de multiplexação. Uma destas pesquisas foi realizada na Universidade de Eindhoven dirigido pelo Prof. Khoe. Foi desenvolvido um demultiplexador WDM para POFs baseado em grades de difração, conforme ilustra Figura 5.14. Foi utilizada uma POF GI com 750  $\mu$ m de núcleo e AN = 0,29 como meio de transmissão. As saídas do demultiplexador foram feitas com POFs SI de 1 mm e AN = 0,46 . Como fontes luminosas, foram utilizados Lasers Diodo (Lasers Diode, LDs) centrados em 645 e 675 nm, tendo o dispositivo apresentado uma atenuação menor que 5 dB para cada comprimento de onda [3].



Figura 5.14. Esquema do dispositivo demultiplexador baseado em redes de difração, desenvolvido na Universidade de Eindhoven [3] - (traduzida pela autora).

No POF-AC (POF-*Application Center*) em Nürnberg (Alemanha) foi construído um sistema WDM com quatro canais, utilizando filtros de interferência, conforme ilustrado na Figura 5.15.



Figura 5.15. Sistema WDM COM 4 LEDs [3].

Um sistema semelhante foi construído no Instituto Fraunhofer em Nuremberg (Alemanha), utilizando filtros de interferência e grades de difração, sendo capaz de operar com três canais: azul (465 nm), verde (520 nm) e vermelho (650 nm). Destes 3 canais, o de 650 nm era gerado por uma LD, os outros 2, por LEDs. A Figura 5.16 ilustra o protótipo e um esquema de aplicação do MUX/DEMUX desenvolvido no Instituto Fraunhofer [3].


Figura 5.16. (a) Esquema de aplicação e o (b) protótipo do MUX/DEMUX desenvolvido no Instituto Fraunhofer [3] – (traduzida pela autora).

Em 2008, na Universidade de Ciências Aplicadas de Harz (Harz University of Applied Sciences, na Alemanha) foi projetado um MUX/DEMUX WDM baseado em grades de difração e seu comportamento foi estudado em um programa de simulação óptica, provando que era possível a realização do protótipo [58].

Em 2016 nessa mesma Universidade de Harz, foi desenvolvido um DEMUX WDM utilizando grade de difração tridimensional com superfície curva. No caso de um DEMUX para fibra de sílica, deve-se utilizar uma grade de difração com superfície plana, mas as POFs possuem uma grande abertura numérica, o que leva a um maior ângulo de abertura da luz emitida. Uma configuração plana resultaria em maiores perdas, portanto, um desenho tridimensional é necessário [59]. Na Figura 5.17, é mostrado a primeira amostra do DEMUX.



Figura 5.17. Primeira amostra do demonstrador DEMUX [59].

Para a medição, foi utilizado um sistema de alinhamento de boa precisão para alinhar a fibra com relação à injeção otimizada de luz no DEMUX (Fig. 5.19). Uma fibra fixada na entrada é usada para acoplar a luz branca no DEMUX como mostrado na Figura 5.20.



Figura 5.18. Configuração de medição com luz branca acoplada ao DEMUX [59].

Na figura 5.20, pode ser visto que o comprimento de onda separado é formado sob a forma de um anel no hemisfério. Este anel pode ser varrido angularmente por uma fibra óptica de coleta e analisado por um espectrômetro.

Nos casos apresentados anteriormente, os sistemas WDM montados para teste dos dispositivos desenvolvidos eram unidirecionais [3]. Existem estudos também voltados para sistemas WDM bidirecionais. Os sistemas, unidirecionais e bidirecionais, são de grande importância para aplicações em redes residenciais, seja para transmitir mais de um serviço pela mesma fibra óptica, seja para estabelecer enlaces *full-duplex*.

Em 1998, a Sony introduziu um dispositivo MUX/DEMUX construído com um prisma, uma lente e um espelho óptico, conforme ilustrado pela Figura 5.19. Este módulo foi capaz de alcançar uma taxa de 125 Mb/s a uma distância de 10 m apenas.



Figura 5.19. Esquema do MUX/DEMUX desenvolvido pela Sony para aplicação em enlace bidirecional [3] - (traduzida pela autora).

Um módulo mais complexo, foi desenvolvido pela Sharp em 2002, sendo utilizado para transmissão de dados no padrão IEEE 1394 em taxas de 125, 250 e 500 Mb/s a uma distância de 10 m. O esquema do módulo está ilustrado na Figura 5.20.



Figura 5.20. Esquema do módulo MUX/DEMUX desenvolvido pela Sharp para aplicação em enlaces bidirecionais [3] – (traduzida pela autora).

A Toyota desenvolveu um dispositivo extremamente compacto, capaz de operar com LEDs vermelho e verde. A multiplexação foi realizada empregando um filtro de interferência, contudo, para alcançar o filtro, em vez de utilizar um sistema de lentes, o feixe luminoso é transportado através de um guia de onda gravado no dispositivo utilizando a técnica de LISW5 (*Light-Induced Self-Written*), utilizando luz ultra-violeta. A Figura 5.21 ilustra o esquema do sistema bidirecional e observa-se também uma fotografia do dispositivo desenvolvido. O objetivo da Toyota ao desenvolver este dispositivo, era utilizá-lo apenas nas redes internas de POFs em seus próprios automóveis, e não disponibilizá-lo para venda comercial [51].



Figura 5.21. (a) Esquema de enlace bidirecional utilizando o MUX/DEMUX desenvolvido [61] e (b) fotografia do dispositivo [51].

Em 2011, os pesquisadores M. Joncic, M. Haupt e U. H. P. Fischer da Universidade de Ciências Aplicadas de Harz (Alemanha), propuseram uma primeira definição para a grade espectral que poderia ser utilizada para padronizar o WDM sobre POFs, como a padronização já existente para o CWDM e o DWDM em fibras de sílica. Esta grade espectral deve estar contida na região do espectro visível, uma vez que esta é a região de operação das POFs de base PMMA, e deve ser definida levando em consideração a operação com LEDs, que estão disponíveis em diversos comprimentos de onda do visível e apresentam grande largura espectral. É válido salientar, que é de suma importância para operação com WDM, que os canais estabelecidos não interfiram espectralmente uns nos outros [66]. Uma das propostas utilizou a frequência do canal vermelho, 461,2THz (650 nm), como parâmetro para montar a grade espectral, apresentando um espaçamento de 22,2 THz. Dessa forma, são estabelecidos canais centrados exatamente nos vales de atenuação principais, 461,2 THz (650 nm), 527,8 THz (568nm) e 572,2 THz (524 nm).

Outra abordagem dos pesquisadores da Universidade de Ciências Aplicadas de Harz foi a utilização do comprimento de onda como parâmetro, evitando a variação no espaçamento entre os canais existente quando se utiliza uma grade espectral baseada em frequências (Figura 5.23). Foram então propostas três novas grades espectrais:

- Na primeira, o ancoramento foi realizado no comprimento de onda 650 nm, utilizando um espaçamento de 27 nm, resultando em 11 canais, sendo os três principais centrados em 514, 568 e 650 nm [60];
- A segunda grade espectral, ainda ancorada a 650 nm, apresenta espaçamento de 30 nm, resultando em 10 canais, dos quais os principais estão centrados em 500, 530, 560 e 650 nm [60];
- A terceira grade, também ancorada a 650 nm, foi proposta com espaçamento de 35 nm, resultando em 9 canais, sendo os principais centrados em 510, 580 e 650 nm [60].

Em 2013 esses mesmos pesquisadores desenvolveram mais duas propostas. A primeira foi a extensão da grade CWDM para o visível o que resultaria em 15 canais entre 400nm e 700nm. Os principais canais, por possuírem baixa atenuação, são 471 nm (canal 4), 511 nm (canal 6), 571 nm (canal 9) e 651 nm (canal 13). Devido à maior atenuação e falta de fontes para os canais 11 e 15, esses não poderão ser utilizados no presente momento (julho/2017). A segunda proposta foi uma grade independente de comprimento de onda ou frequência definida no visível estabelecida sobre os aspectos técnicos da tecnologia SI-POF. A proposta permite um espaçamento de canal entre 10nm a 50nm [61].

Até o momento (julho/2017), não foi estabelecido uma grade espectral com as melhores características possíveis, porém estas últimas pesquisas constituem primeiro passo para a padronização de sistemas que utilizarão WDM sobre POFs.

# 6. FILTROS ÓPTICOS DE PLÁSTICO

# 6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado o estudo e o desenvolvimento de um tipo de filtro óptico bastante prático, simples, maleável e de baixo custo para compor os MUX/DEMUX WDM para POFs de base PMMA.

Foram construídos filtros a partir de plásticos de base celulose (celofane) e de polipropileno (plástico gel), operando apenas no visível, assim como guias metálicos (*sleeves*). Esses filtros de natureza orgânica, em relação aos filtros vítreos (inorgânicos), apresentam maior praticidade, maior facilidade para sua construção e custos bem reduzidos. Esses serão então a base na construção de um demultiplexador (DEMUX) por divisão de comprimento de onda (WDM), sobre fibras POFs de PMMA para curtas distâncias. Como será mostrado, esses filtros atuarão como filtro óptico passa-alta ou passa-banda.

Serão mostrados os resultados da caracterização espectral (transmissão) de diferentes tipos de plásticos e de cores. Para uma melhor compreensão do seu funcionamento, será dada uma breve explicação sobre as características dos filtros.

# 6.2. FILTROS ÓPTICOS

Os filtros ópticos são estruturas que possuem características especiais de reflexão e transmissão de luz, de tal forma que podem bloquear ou transmitir a luz em uma determinada banda de frequências, com mais ou menos intensidade, ou seja, são basicamente dispositivos desenvolvidos para a seleção de uma banda larga ou estreita de cores ou comprimentos de onda de luz. São elementos importantes de uma rede de comunicação WDM, pois realizam o processo de multiplexação e demultiplexação, selecionando um determinado canal óptico.

Diferentes fenômenos físicos podem ser usados para projetos de filtros ópticos, como refração, reflexão, interferência, difração, espalhamento, amplificação, polarização e absorção. Devido a isso, foi possível desenvolver diversos tipos de filtros. Os filtros ópticos passivos podem ser divididos basicamente em dois tipos:

• Filtros de absorção, que usam as propriedades do material que compõe o filtro para absorver a luz em uma dada faixa de comprimento de onda e transmitir em outra. As faixas de comprimento de onda são determinadas pelas propriedades moleculares do

material utilizado. O fato das características do filtro serem bastante dependentes das propriedades moleculares do material, combinada com o fato de que a absorção de radiação por longos períodos pode aumentar a temperatura causando danos mecânicos ao dispositivo. A Figura 6.1 mostra alguns filtros de absorção.



Figura 6.1. Filtros de Absorção [10].

O segundo tipo de filtro, utiliza o princípio de que a luz tem propriedades ondulatórias, e consequentemente exibe o efeito de interferência. Os filtros baseados nesse princípio são conhecidos como filtros de interferência (Figura 6.2). Nesses filtros, quando os campos elétricos das ondas de luz se superpõem em fase, criam interferência construtiva, e quando se superpõe defasadas de 180° entre si, criam interferência destrutiva. Os projetistas usam essa propriedade para construir filtros com efeitos ópticos desejados (reflexão e transmissão) em uma larga banda de comprimentos de onda. Geralmente, esse tipo de filtro transmite uma fração muito maior de radiação nos seus comprimentos de onda nominais do que fazem os filtros de absorção, podemos observar essa comparação na Figura 6.3 [62].



Figura 6.2. Filtro de Interferência [10].



Figura 6.3. Gráficos da transmissão dos filtros de interferência e absorção. [62].

Na Tabela 6.1, podemos verificar algumas características dos filtros de absorção e de interferência, podendo identificar as principais vantagens e desvantagens entre eles.

Ι	Interferência	Absorção
Largura de Banda	< 10 nm	> 50 nm
Transmissão da Luz	< 70%	< 40%
Custo	Médio a Alto	Baixo

## Tabela 6.1. Características dos filtros de interferência e absorção.

Os filtros de interferência possuem boas vantagens sobre os filtros de absorção, porém algumas delas são indiferentes para um sistema WDM para POFs. Em relação à região do espectro, as POFs só atuam no visível, para esse caso, o filtro de absorção atende. Quanto à largura de banda, apesar do filtro de absorção possuir uma larga faixa, não afetará ao projeto proposto nesse trabalho, uma vez que o objetivo é a construção de um DEMUX de apenas dois e outro de três canais. As principais vantagens dos filtros de absorção são: baixo custo em relação aos filtros de interferência e a facilidade de sua fabricação. Por outro lado, sua maior desvantagem é a alta perda de transmissão devido à absorção da luz. Esses aspectos tornam o filtro de absorção uma boa solução para redes residenciais de curtas distâncias utilizando POFs, onde o principal objetivo é a redução dos custos combinada com a simplicidade e funcionalidade.

O interesse desta Dissertação, está focado em um tipo de filtro de absorção para um sistema WDM sobre fibras POFs de PMMA, portanto, apenas este tipo de filtro será explorado.

### 6.2.1. Classificação dos Filtros

Existem três classes básicas de filtros (Figura 6.4) que regulam a transmissão de comprimentos de onda específicos, conforme descrito a seguir.



Figura 6.4. Tipos de Filtros [10].

#### Passa-Banda (Band-Pass):

Filtros passa-banda permitem a passagem de uma faixa de comprimentos de onda e (idealmente) rejeita toda luz acima e abaixo dessa faixa (Figura 6.5). Estes filtros são caracterizados em relação ao desempenho óptico pelo seu comprimento de onda central (CWL – Center Wavelength) e largura de banda, também referida como a largura total na metade da transmissão máxima (FWHM). O comprimento de onda central é calculado a partir da média aritmética de comprimentos de onda a 50 por cento da transmissão do pico, enquanto que a largura de banda (FWHM – Full Width at Half of Maximum Transmission) é o intervalo de comprimentos de onda (em nanometros) medido entre as bordas da curva de passagem de banda em que a transmissão de luz é 50% ou valor máximo, conforme mostrado na Figura 6.5.



Figura 6.5. Representação da curva de transmitância do filtro passa-faixa [10].

#### Filtros Passa-Alta (Long-Pass) e Passa-Baixa (Short-Pass):

Esses filtros são catalogados de acordo com seus comprimentos de onda de corte (veja as Figuras 6.4, 6.6 e 6.7).

Os filtros passa-alta permitem a passagem de longos comprimentos de onda e bloqueiam os curtos comprimentos de onda. De forma análoga aos filtros passa-alta, filtros passa-baixa permitem a passagem de curtos comprimentos de onda e rejeitam os demais.



Figura 6.6. Representação da curva de transmitância do filtro passa-baixa (short-pass) [10].



Figura 6.7. Representação da curva de transmitância do filtro passa-baixa (long-pass) [10].

Cut-on é o termo usado para denotar o comprimento de onda quando há um aumento de 50% na taxa de transmissão em um filtro passa-alta. O comprimento de onda de corte é indicado por  $\lambda_{cut-on}$  na Figura 6.8.



Figura 6.8. Ilustração do Cut-On em um filtro tipo Passa-Alta [10].

Cut-Off é o termo usado para denotar o comprimento de onda quando há uma redução de 50% do pico de transmissão de um filtro passa-baixa. O comprimento de onda de corte é indicado pelo corte  $\lambda_{cut-off}$  na Figura 6.9.



Figura 6.9. Ilustração do Cut-Off em um filtro tipo passa-baixa [10].

## Filtros Rejeita-Banda (Notch-Filter):

Neste ponto, deve-se observar que há um quarto tipo de filtro, chamado de notch-filter ou filtro rejeita-banda. Assim como um filtro passa-alta pode ser visto como um filtro "complementar" do passa-baixa, um filtro rejeita-banda é "complementar" ao passa-banda. Isto significa, que um filtro rejeita-banda bloqueia a transmissão de uma banda espectral em torno de um certo comprimento de onda central  $\lambda_c$ , com uma certa largura FWHM de  $\Delta\lambda$  e permite a transmissão do restante do espectro.



Figura 6.10. Representação da curva de transmitância do filtro rejeita-banda (notch-filter) [10].

É interessante também lembrar que os filtros ópticos são classificados como do tipo passa "alta" ou "baixa", com referência ao comprimento de onda. Já os filtros eletrônicos, são referenciados quanto as frequências (de rádio), portanto os tipos "alta" ou "baixa" ficam invertidos quanto aos filtros ópticos. A razão disto é que  $\lambda = c/f$ .

# 6.2.2. Filtros de Absorção

Os filtros de absorção são feitos principalmente a partir de vidro dopado (com semicondutor, por exemplo), plástico colorido ou géis sintéticos, estes 2 últimos pela adição de algum tipo de pigmento. Estes filtros podem ser utilizados em aplicações que não requerem uma definição precisa de comprimentos de onda transmitidos, ou seja, curvas de transmitância com transições suaves. São utilizados para transmitir certos comprimentos de onda de luz, enquanto bloqueia outros (conforme a Figura 6.11).

Até o momento, pode-se constatar que os filtros de plástico são especificados para apenas absorção seletiva de luz visível. Portanto, de forma inversa, filtros comerciais de plástico *não são* especificados para filtrar seletivamente o infravermelho (IR) e o ultravioleta (UV). Normalmente os filtros ópticos de base polimérica não são especificados nem adequados para que atuem como filtro de absorção no IR devido ao calor gerado no processo, conforme anteriormente explicado. Quanto ao UV, surge a inadequação do uso de polímero para bolquer o UV, pois a radiação neste faixa normalmente danifica as cadeias poliméricas do filtro, mudando suas propriedades ópticas e mecânicas. Um exemplo similar, é o fato das POFs de base PMMA possuirem cobertura de polietileno, onde este último possui como uma de suas funções, a de bloquear a incidência de luz UV na fibra de PMMA propriamente dita. Já os filtros vítreos de absorção, são não apenas capazes de filtrar como também são especificados para absorver seletivamente tanto a luz visível, como o infravermelho e o ultravioleta. Os filtros vítreos quase pretos absorvem a radiação visível, são perfeitos para aplicações de detecção de raios ultravioleta ou infravermelho.

Os filtros vítreos para absorção do ultravioleta normalmente é composto por quartzo, que tem a propriedade de eliminar as altas bandas (UV) do espectro visível. Não altera as cores visíveis, mas seguem bloqueando o ultravioleta, atuando como um filtro passa-baixa [63]. Existem também os filtros de absorção do infravermelho (IR), um exemplo é o "KG-3 Heat Absorbing Glass" da Edmund Optics (Figura 6.12), este funciona como um filtro passa-baixa permitindo a passagem da luz visível e bloqueando o infravermelho. Também pode ser usado para reduzir a quantidade de calor transmitida por um sistema óptico, pois absorvem a radiação infravermelha e depois dissipam o calor no ar ao redor do vidro [64].

Quanto ao calor, apesar dos filtros vítreos suportarem maiores temperaturas do que a maioria dos filtros de plástico, já existe um tipo de filtro de gel com uma grande duração e resistência ao calor. Um exemplo são os filmes Dichrofilm da Rosco que podem ser utilizados em fontes de luz e calor de até 20.000 watts, perfeitos para substituírem os filtros vítreos [65].



Broad Band Absorption Filter Spectra

Figura 6.11. Espectro de transmissão dos filtros de absorção [10].



Figura 6.12. Filtro KG-3 Heat Absorbing Glass da Edmund Optics [64].

É de grande importância a qualidade do vidro ou polímero utilizado na fabricação dos filtros, devendo proporcionar uniformidade de densidade e cor sobre toda sua superfície. Filtros de vidro ou plástico funcionam por atenuação da luz através da absorção de comprimentos de onda específicos, de modo que o desempenho espectral depende da quantidade de dopante orgânico (corante, por exemplo) ou inorgânico (semicondutor, por exemplo) presente na matriz do material do filtro, e de sua espessura. Quanto maior a espessura, maior será o nível de bloqueio de comprimentos de onda indesejados, porém, tal fato reduz a intensidade do sinal que se deseja transmitir.

Os filtros podem ser construídos com corantes misturados na matriz do filtro, em vez de serem depositados na superfície, de modo que não são propensos à destruição por pequenos arranhões ou abrasões.

Como dependem da espessura para ditar o desempenho espectral, os filtros de vidro e polímero são menos úteis do que outros tipos de filtros projetados para aplicações especializadas.

Filtros de absorção de vidro são resistentes ao ataque químico de óleos corrosivos, vapores perigosos e outras fontes de contaminação, enquanto que os filtros à base de polímeros geralmente não possuem esta imunidade, devendo atentar-se para maiores cuidados em relação ao ambiente onde será instalado. Por outro lado, os filtros de vidro são mecanicamente rígidos, em geral apresentam maior dificuldade para construção e maior custo se quando comparados aos filtros de polímero. Devido a essas observações, foi escolhido nesta dissertação, um tipo de plástico para atuar como filtros na construção dos DEMUXs.

# 6.3. FILTROS ÓPTICOS DE CELOFANE

O celofane é um polímero natural derivado da celulose. Tem o aspecto de uma película fina, geralmente entre 0,02mm e 0,07mm de espessura, sendo muito fácil de ser cortado com uma tesoura comum (Figura 6.13). Possui uma alta homogeneidade em suas propriedades ópticas, pode ser encontrado em várias cores, é flexível e resistente a esforços de tensão. Outra de suas qualidades é ser biodegradável e por esse motivo não agride o meio ambiente.



Figura 6.13. Filtro Plástico Celofane [10].

O plástico celofane deriva da viscose/celulose regenerada (igual ao papel), e não do petróleo. É utilizado principalmente como envoltório. Foi muito usado na elaboração de fitas adesivas, porém, substituído em grande parte por outros polímeros. Algumas de suas aplicações, porém, até hoje se mantêm, como para a produção de borracha (como desmoldante), para embrulhar pães, etc.

O papel celofane colorido reflete uma determinada cor e absorve a energia associada às outras cores. O custo de uma única folha de celofane de tamanho padrão gira em torno de R\$ 2,00 (dois reais), permitindo cortar centenas de filtros. Isso o torna bastante prático, simples, e de baixo custo, além de ser maleável.

Inicialmente nesta dissertação, o plástico tipo celofane foi considerado para uso nos DEMUXs e desta forma foi caracterizado em suas curvas de transmitância. No entanto, o celofane tende a perder sua cor com o tempo, além disso, sua espessura o torna difícil de manusear e necessita, por vezes, a utilização de várias camadas para obter um espectro de transmitância aceitável. Outra desvantagem, é o fato de não resistir bem à umidade, já que tende a absorvê-la. Por isso, os filtros construídos com esse tipo de plástico devem ser cuidadosamente vedados contra a incidência de luz externa e umidade. Naturalmente que a sua resiliência temporal ainda deve ser testada na prática. O filtro "i" adequado para o canal centrado em  $\lambda_i$  irá sempre introduzir alguma atenuação. No entanto, cada filtro deve apresentar um elevado grau de rejeição para os outros comprimentos de onda envolvidos no enlace.

# 6.4. FILMES PLÁSTICOS TIPO GEL

Devido às desvantagens do papel celofane descritas no item anterior, foram então escolhidos os filmes plásticos tipo gel. Estes são utilizados na área de fotografia e estão disponíveis a baixo custo, são maleáveis e mais confiáveis em suas propriedades ópticas ao longo do tempo. Possuem espessura até 10 vezes maior do que a dos celofanes, podendo evitar grande número de camadas e consequentemente uma menor perda, porém ainda mantendo a maleabilidade.

Esses filmes têm como base o poliéster, ou seja, polietileno tereftalato (PET), pois além de terem um custo muito baixo, aceitam pigmentos à base de solventes para sua coloração. São utilizados para dar cor à luz que sai do *flash* de uma máquina fotográfica, servindo tanto para "pintar" objetos como para corrigir ou alterar a luz de um ambiente. São mecânica e termicamente mais resistentes do que o celofane, pois foram desenvolvidos para suportar as altas temperaturas dos refletores e projetores. A Figura 6.14 mostra alguns filmesgel.



Figura 6.14. Filmes Plástico Gel [66].

Existem atualmente dois métodos empregados para integrar pigmentos ao polímero, criando assim os filmes-gel [65]:

• **Poliéster com Pigmentação de Superfície** – É tingida apenas a superfície de uma base de filme plástico, esse é o jeito mais fácil de produzir um filtro gel. Para identificar o método

de fabricação do filme, deve-se aplicar solvente (removedor de esmalte) sobre a película. Caso a tinta seja retirada, trata-se de um filme com pigmentação de superfície [76].

 Pigmentação Profunda (ou no volume) – Também produzido em poliéster transparente, recebe um processo que permite que as partículas de cor penetrem em sua superfície, dificultando a perda de cor [65].

Para esse trabalho de dissertação, foi escolhido o tipo de filtro de pigmentação profunda, pois um filtro de cor tingido apenas na superfície deverá descolorar mais rapidamente. Levando em conta que os filtros gel escolhidos nesta dissertação sendo todos "no volume" (*bulk*) quanto a pigmentação e vedados quanto à incidência de luz externa nos DEMUXs, espera-se obter uma filtragem espectral robusta mantendo suas caraterísticas a longo prazo.

# 6.5. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 6.5.1. Caracterização dos Celofanes e Filmes-Gel

Um primeiro teste bastante objetivo que foi realizado, consistiu em verificar se um determinado filtro era capaz de transmitir um canal com pouca perda e, ao mesmo tempo, de rejeitar os outros comprimentos de onda. O teste também consistiu em utilizar filtros que correspondam às principais janelas de transmissão das POFs, onde se têm os mais baixos valores de atenuação: azul, verde, amarelo e o vermelho, podendo atender às necessidades das redes WDM sobre POFs de base PMMA.

A Figura 6.15 mostra esquematicamente o sistema experimental utilizado na caracterização espectral dos filmes plásticos. Uma fonte de luz "fria" (lâmpada halógena) injeta luz em um cabo tipo *bundle*<sup>7</sup> de fibras (feixe de fibras) que, por sua vez, está conectado a um suporte onde é inserido o filtro a ser caracterizado. A luz transmitida através do filme (filtro) é capturada por uma fibra óptica de sílica com 50  $\mu$ m de diâmetro de núcleo, ligada à fenda de entrada de um espectrômetro-CCD (400-800 nm) modelo SP1-USB 2.0 da Thorlabs. Esse procedimento foi feito para algumas cores relevantes de filtro plástico (vermelho, amarelo, laranja, azul e verde), e em seguida foi ajustado o número necessário de camadas.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Dezenas ou centenas de fibras ópticas flexíveis inseridas num encapsulamento cilíndrico de plástico.



Figura 6.15. Diagrama esquemático da montagem experimental de caracterização da transmitância dos filtros plásticos. Fonte: a autora (2017).

A Figura 6.16 mostra a foto do sistema experimental utilizado na medida da transmissão espectral dos filtros, correspondente à Figura 6.14.



Figura 6.16. Foto da montagem experimental de caracterização da transmitância dos filtros plásticos.

Foi utilizada uma fonte de luz "fria" da marca Komlux com ajuste eletrônico de potência, lâmpadas halógenas enriquecidas com gás xênon (Figura 6.17). Este tipo de fonte de luz foi escolhido por possuir maior potência óptica integral e maior densidade de potência óptica no espectro visível do que um LED branco que antes era utilizado. Além dessa vantagem, o equipamento permite ajustar a potência da lâmpada e o uso do *bundle* de fibras, facilitando o guiamento e uso da luz.



Figura 6.17. Fonte de luz fria utilizada nos experimentos.

Inicialmente, os filtros baseados em plástico tipo celofane foram caracterizados. No entanto, tendem a perder sua cor com o tempo. A fina espessura os tornam difíceis de manusear e é necessário, por vezes, a utilização de diversas camadas para se obter um espectro de transmitância aceitável. Os gráficos nas Figuras 6.18-6.21 mostram os resultados obtidos utilizando-se quatro camadas de celofane.





Figura 6.18. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane azul. Nota-se um comportamento do tipo passa-banda.

Figura 6.19. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane verde. Nota-se um comportamento do tipo passa-banda.



Figura 6.20. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane laranja. Nota-se um comportamento do tipo passa-alta considerando o espectro visível

Figura 6.21. Resposta de transmitância espectral para 4 camadas de celofane vermelho. Nota-se um comportamento do tipo passa-alta considerando o espectro visível.

A Tabela 6.2 apresenta os resultados da transmissão de cada filtro celofane. Podemos observar que o filme laranja atua como um filtro passa-alta permitindo a passagem de luz a partir do comprimento de onda de 480nm. Não será um filtro útil, pois consegue bloquear apenas a luz violeta.

FILTRO	Passa- Banda	Largura de Banda	Passa- Alta	TRANSMISSÃO DA LUZ			
Celofane	λ	Δλ	$\lambda_{cut}$	Vermelho	Amarelo	Verde	Azul
Azul	477 nm	80 nm	-	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%	$\lambda$ < 540nm	Toda faixa
Verde	501 nm	65 nm	-	Bloqueia 100%	Toda faixa	Toda faixa	Toda faixa
Laranja	-	-	596 nm	Toda faixa	Toda faixa	Toda faixa	Toda faixa
Vermelho	-	-	600 nm	Toda faixa	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%

Tabela 6.2. Características de transmissão utilizando 4 camadas de filtro celofane.

Devido às desvantagens dos plásticos celofanes, foram então escolhidos os filmes plásticos tipo gel (visto no Item 6.4) da Neewer® [75] (Figura 6.14). Os gráficos nas Figuras 6.22, 6.23 e 6.24 mostram os resultados obtidos.

A Figura 6.22 à esquerda, mostra o espectro de transmissão utilizando uma camada de filme gel azul e à direita utilizando duas camadas.



Figura 6.22. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel azul.

A Figura 6.23 a esquerda mostra o espectro de transmissão utilizando uma camada de filme gel verde e a direita utilizando duas camadas.



Figura 6.23. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel verde.

A Figura 6.23 à esquerda, mostra o espectro de transmissão utilizando uma camada de filme gel vermelho e a direita utilizando duas camadas.



Figura 6.24. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel vermelho.

As Tabelas 6.3 e 6.4 mostram as características da transmissão dos filmes-gel azul, verde e vermelho.

FILTRO	Passa- Banda	Largura de Banda	Passa- Alta	TRANSMISSÃO DA LUZ			
GEL 1 Camada	λ	Δλ	$\lambda_{cut}$	Vermelho	Amarelo	Verde	Azul
Azul	450nm	80 nm	-	$\lambda > 660 nm$	Bloqueia 100%	$\lambda < 530 nm$	Toda faixa
Verde	517nm	58 nm	-	Bloqueia 100%	Toda faixa	Toda faixa	$\lambda > 470 nm$
Vermelho	-	-	636 nm	Toda faixa	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%

Tabela 6.3. Características de transmissão utilizando 1 camada de filtro gel.

FILTRO	Passa- Banda	Largura de Banda	Passa- Alta	TRANSMISSÃO DA LUZ			
GEL 2 Camadas	λ	Δλ	$\lambda_{cut}$	Vermelho	Amarelo	Verde	Azul
Azul	436nm	67 nm	-	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%	Toda faixa
Verde	517nm	42nm	-	Bloqueia 100%	Toda faixa	Toda faixa	$\lambda > 480 nm$
Vermelho	-	-	652 nm	Toda faixa	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%	Bloqueia 100%

Tabela 6.4. Características de transmissão utilizando 2 camadas de filtro gel.

A Figura 6.25 mostra o espectro de transmissão para filmes-gel laranja claro e filmegel laranja escuro. Para esses filtros foi necessário utilizar três camadas para obter melhores resultados.

Podemos observar que o filme-gel laranja claro não será útil como filtro em um sistema WDM, pois permite a passagem de quase todos os comprimentos de onda. Para o filme-gel laranja escuro, podemos verificar que se comporta como um filtro passa-alta com  $\lambda_{CUT} = 592$ nm, mas para isso foi necessário utilizar 3 camadas de filmes-gel. Também foram realizados testes com filme-gel amarelo, porém não foram obtidos bons resultados, pois este realiza o bloqueio de apenas uma pequena faixa do azul, sendo um filme rejeita-banda. (Figura 6.26).



Figura 6.25. Respostas de transmitância espectral para filme-gel laranja claro e laranja escuro. Fonte: a autora (2017).



Figura 6.26. Respostas de transmitância espectral para um filme-gel amarelo. Fonte: a autora (2017).

## 6.5.2. Construção dos Filtros Ópticos

Após a caracterização dos filmes de plástico gel e a seleção das cores que obtiveram melhor resultados, foram construídos filtros utilizando os *sleeves* (Cap.4) para a medida de suas perdas. As cores selecionadas foram: vermelho, azul e verde, o principal motivo é o fato de possuírem comprimentos de onda centrais melhor ajustados às janelas de transmissão de uma POF de base PMMA, notadamente do tipo SI e DSI. Outro motivo foi o bom resultado obtido durante a caracterização dos filmes de plásticos para essas cores. Apesar do comprimento de onda 570 nm (centrado na cor amarela/laranja) apresentar, dentro de toda faixa, a menor atenuação nas fibras POF-SI-PMMA, não foi possível ainda encontrar uma combinação eficiente de filmes de plástico para esse comprimento de onda.

As Figuras 6.29a-e ilustram o procedimento passo-a-passo para construir os filtros com a respectiva descrição feita a seguir.

Passo 1 – Utilizando-se um clivador de POF, um pequeno pedaço de POF é clivado ao meio produzindo então dois segmentos de fibras a serem emendadas:  $POF_1$  e  $POF_2$ . (Figura 6.29.a)

Passo 2 – Com uma gota de Superbonder gel, um pequeno pedaço de filme de plástico, tamanho suficiente para cobrir o núcleo da POF, é fixado na extremidade clivada da POF<sub>1</sub>. (Figura 6.29.b)

Passo 3 – Passando cerca de 2 minutos após fixar o filme de plástico, a  $POF_1$  foi introduzida cuidadosamente em um *sleeve* até chegar aproximadamente ao meio de seu comprimento. (Figura 6.29.c)

Passo 4 – Por último, com uma película de Superbonder gel em sua ponta, a  $POF_2$  deve ser introduzida no *sleeve* até tocar na extremidade da  $POF_1$ . A  $POF_2$  deve ser pressionada manualmente contra a  $POF_1$  durante aproximadamente 2 minutos. (Figuras 6.27.d e 6.27.e).



Figura 6.27. Procedimento de montagem dos filtros baseados em filmes de plásticos. Fonte: a autora (2017).

Para determinar a perda de inserção  $\langle IL \rangle$  dos filmes-gel, incialmente é medida a potência da luz que está sendo injetada no filtro para utilizá-la como referência (P<sub>REF</sub>), em seguida é medida a potência de saída após atravessar o filtro, P<sub>s</sub>. Aplica-se então a Equação 6.1.

$$\langle IL \rangle = 10 \log \frac{P_{REF}}{P_S} \tag{6.1}$$

As fontes de luz usadas devem estar dentro da faixa de comprimento de onda de cada filtro.

Para o filtro vermelho utilizou-se um Laser HeNe de 633nm, para o verde um Laser de Diodo de 520nm, por fim, usou-se o Laser em 450 nm para os testes do filtro azul.

A Tabela 6.5 relaciona os valores referentes à média das medidas realizadas em cada filme-gel.

(- 1)

FILTRO	$P_{REF}(\mu w)$	<b>P</b> <sub>S</sub> (μw)	$\langle IL \rangle  \mathrm{dB}$
VERMELHO	72,8	25,5	-4,6
VERDE	133,6	22,7	-7,7
AZUL	147,1	38,2	-5,9

Tabela 6.5. Resultado da Caracterização dos Filtros.

Lembrando que há uma perda em média de 0,42 dB referente a emenda feita com Superbonder Gel, (visto no Capítulo 3), obtemos de forma aproximada (extrapolada) os seguintes resultados quanto ao *IL* médio introduzido *apenas* por cada filtro colorido referente ao comprimento de onda central que deve ser transmitido:

FILME-GEL	IL
Vermelho	- 4,1 dB
Verde	- 7,3 dB
Azul	- 5,5 dB

Tabela 6.6. Valores IL dos Filmes-Gel.

## 6.5.3. Conclusões

Os resultados mostram então que os filmes-gel verde, azul e vermelho possuem bom desempenho quando utilizados como filtros, porém, deve-se respeitar a sua largura de banda para que não haja interferência entre os canais. Devido a sua larga largura de banda, não é possível demultiplexar muitos canais, porém são de grande eficiência quando utilizados em um sistema WDM de dois a três canais gerados por fontes ópticas de espectro bastante estreito, como lasers de diodo no visível.

Baseando-se na largura espectral dos filmes, podemos afirmar que, para um sistema WDM, o mais adequado é a utilização dos pares de luz: vermelho com azul ou vermelho com verde. A luz vermelha pode ser razoavelmente suprimida utilizando o filme-gel azul ou verde, e o filme-gel vermelho bloqueia totalmente a luz verde e azul. Isso pode ser observado através dos gráficos 6.28 e 6.29.



Figura 6.28. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao verde. Fonte: a autora (2017).



Figura 6.29. Espectros de transmissão superpostos referentes ao filme-gel vermelho e ao azul. Fonte: a autora (2017).

# 7. ACOPLADORES ÓPTICOS

# 7.1. INTRODUÇÃO

Os experimentos realizados e apresentados neste capítulo têm como objetivo caracterizar os elementos passivos denominados divisor-POF (POF-*splitter*) ou acoplador-POF (POF-*coupler*) a serem utilizados para a divisão do sinal óptico, e em seguida a sua filtragem fazendo uso dos filtros plásticos apresentados no Capítulo 6, realizando então <del>e os</del> processos de multiplexação e demultiplexação.

# 7.2. CARACTERÍSTICAS DOS ACOPLADORES ÓPTICOS

Os acopladores ópticos podem ser considerados como dispositivos multiportas que permitem combinar ou separar sinais luminosos guiados por fibra óptica [34] [20] [67]. Não requerem nenhuma energia de alimentação externa, ou seja, são elementos passivos e são comumente utilizados como elementos básicos de interconexão numa variedade de sistemas de redes com fibras ópticas. Uma de suas aplicações é como separador ou combinador em um sistema WDM, pode-se, através de um acoplador, combinar sinais gerados em diferentes comprimentos de onda e transmiti-los em uma mesma fibra [67].

A divisão do sinal entre múltiplas portas de saída resulta em perdas de acoplamento, que são definidas como a razão entre a potência presente em uma determinada porta de saída e a potência de entrada. Também há perdas que resultam do processo de fabricação do acoplador (*excess loss*). Além dessas perdas, há o fator de direcionamento, ou seja, certa quantidade de energia de entrada vaza de uma porta de entrada para outra porta de entrada devido aos mecanismos de reflexão por descasamento de índices de refração e por retroespalhamento de luz. [68].

## 7.2.1. Funções Típicas

As duas funções básicas comumente atribuídas aos acopladores são:

 Separar ou dividir um sinal luminoso em dois ou mais sinais para alimentar múltiplos dispositivos; neste caso, o acoplador óptico costuma ser chamado de divisor ou separador (*splitter*), Figura 7.1a [67];  Combinar ou misturar dois ou mais sinais luminosos provenientes de dispositivos distintos para alimentar a entrada de outro dispositivo. Neste caso o acoplador óptico é conhecido por misturador (*combiner*) Figura 7.1b [67];



Figura 7.1. Tipos de Acopladores (Divisor e Misturador). Fonte: a autora (2017).

Além das funções típicas de mistura e divisão/separação de dois ou mais sinais luminosos, os acopladores ópticos costumam ainda ter as seguintes funções típicas:

- Acoplamento direcional (Figura 7.1c): Baseia-se no uso de acopladores que permitem direcionar a injeção ou o desvio de potência óptica. No exemplo da Figura 7.1c, a luz, entrando na porta 1 do acoplador não é transmitida para a porta 2, sendo direcionada exclusivamente para a porta 3. Os acopladores direcionais podem ter três (acoplador tipo T) ou quatro portas [67];
- Acoplamento distributivo: O acoplamento distributivo 1 x N é uma extensão das funções do divisor elementar 1 x 2. O divisor tipo 1xN é comumente usado nas redes PONs (*Passive Optical Networks*). Os acopladores estrelas com N portas de entrada e M portas de saída (N x M) permitem distribuir um sinal luminoso, proveniente de qualquer uma de suas portas de entrada, simultaneamente e igualmente, para todas as suas portas de saída. Essa função ilustrada na Figura 7.1f, é muito útil para a implementação de mecanismos de difusão de sinais em redes locais configuradas em barramento [67].
- Multiplexação WDM (Figura 7.1d): São úteis para misturar dois (ou mais) sinais luminosos de diferentes comprimentos de onda em uma única fibra [67].
- Demultiplexação WDM (Figura 7.1e): São acopladores ópticos do tipo divisores (splitters) que podem ser utilizados para separar dois (ou mais) sinais multiplexados em WDM numa única fibra e entregá-los aos receptores ópticos correspondentes [67].

# 7.2.2. Aplicações Típicas

As aplicações típicas de acopladores ópticos em sistemas de transmissão incluem, entre outras (Figura 7.2):

- Transmissão bidirecional (alternada) numa fibra em um único comprimento de onda;
- Multiplexação WDM unidirecional;
- Transmissão bidirecional (simultânea), numa única fibra, em dois comprimentos de onda (WDM);
- Distribuição de sinais em redes e sistemas locais, configurados em barramento;
- Redes locais configuradas em anel com mecanismo de isolação (by-pass) de falhas de nós;
- Distribuição de sinais de redes de CATV



a) Transmissão Bidirecional (único λ)



b) Multiplexação WDM Bidirecional



# c) Distribuição de Sinais em Barramento

Figura 7.2. Aplicações dos acopladores ópticos. Fonte: a autora (2017).

# 7.2.3. Desempenho

Os critérios de desempenho de um acoplador óptico incluem os seguintes fatores:

- Perdas de inserção (insertion loss);
- Perdas Excedentes (*excess loss*);
- Razão de Acoplamento (coupling ratio);
- Direvidade (*directivity*);

## Perdas de Inserção (Insertion Loss)

Uma perda de inserção é a perda entre o sinal de entrada e o sinal de saída em um ramo específico (de saída) do acoplador. Como um acoplador pode ter 1 ou mais ramos de saída, então para cada saída, teremos associada uma Perda de Inserção. No caso *particular* de um acoplador com 2 ramos de saída com Razão de Acoplamento em 50:50 (ver explicação adiante), teremos uma mesma Perda de Inserção para cada um dos ramos de saída. No caso de um acoplador com 3 ramos de saída com Razão de Acoplamento em 33:33:33, teremos analogamente uma mesma Perda de Inserção para cada um dos 3 ramos de saída. Este raciocínio pode ser estendido analogamente para um acoplador com N ramos de saída. A Equação 7.1 [67] permite calcular a Perda de Inserção para cada saída de um acoplador do tipo *splitter* 1x2 ou mesmo 1xN, onde  $P_M$  é a potência em uma das portas de saída:

$$IL_{(M)} = -10\log\frac{P_M}{P_{in}}$$
(7.1)

Para um acoplador/divisor (*splitter*) 1x2 ilustrado na Figura 7.3, utilizamos as Equações 7.2 para o cálculo (em dB) da Perda de Inserção de cada porta de saída de luz:



Figura 7.3. Ilustração de um splitter 1x2. Fonte: a autora (2017).

$$P_{IL(x)} = -10\log\frac{P_x}{P_{in}}$$
(7.2a)

$$P_{IL(y)} = -10 \log \frac{P_y}{P_{in}}$$
 (7.2b)

 $P_{IL(x)} = Perda de inserção na saída da porta x$ 

- $P_{IL(y)} = Perda de inserção na saída da porta y$
- $P_x = Pot$ ência de saída na porta x
- $P_y = Pot$ ência de saída na porta y
- $P_{in} = Pot \hat{e}ncia de entrada$  no splitter

## Perda Excedente (Excess Loss)

É um parâmetro que mede a diferença (em dB), entre a potência óptica injetada P<sub>in</sub> no *splitter*, e o somatório das potências ópticas que saem de cada uma das portas de saída do dispositivo. Deve-se notar, que a fração de potência óptica que não sai pelas portas do dispositivo, fica inevitavelmente perdida, ou seja, é irradiada para o meio exterior e em menos escala absorvida dentro do *splitter*. A Perda<del>s</del> em excesso em acopladores ópticos é calculada pela Equação 7.3 [67]:

$$P_{EL} = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^{M} P_{M}}{P_{in}}$$
(7.3)

 $P_{EL} = Perda \, de \, excesso \, no \, acoplador$  $\sum_{1}^{M} P_{M} = Soma \, das \, potências \, de \, cada \, porta \, M \, de \, saída$  $P_{in} = Potência \, óptica \, na \, porta \, de \, entrada \, do \, acoplador$ 

## Razão de Acoplamento (Coupling Ratio)

Através da Razão de Acoplamento, podemos quantificar (em percentual ou em dB), o quanto de fração de potência luminosa que sai por cada porta do *splitter*, em relação ao somatório de potências de todas as portas de saída. Um exemplo clássico é o *splitter* 1x2 onde a saída pelas 2 portas ocorre com potências iguais (não importando as Perdas de Excesso), então diz-se que trata-se de um *splitter* 50:50, ou seja, 50% da luz de saída em cada porta. Alternativamente, este *splitter* também é chamado de "divisor de 3 dB". Considerando ainda um *splitter* 1x2, porém com uma saída desigual nas 2 portas, teremos um *splitter* tipo M:N onde M + N = 100 (%). Exemplos: 55:45, 66.6:33.3, 60:40, etc. Nos caso distintos de 50:50, não é comum referenciar a Razão de acoplamento em dB, mas sim em M:N, é mais fácil de entender. O mesmo se aplica analogamente aos *splitters* com mais de 2 portas de saída. Por exemplo, um *splitter* com 4 portas de saída com mesma potência, será designado como Razão de acoplamento como 25:25:25:25 ou, como as saídas são iguais, como 6 dB. Podemos obter esses valores através da Equação 7.4 [67]:

Para a Porta M1: 
$$CR_{(M1)} = 10 \log \frac{P_{M1}}{\sum_{1}^{M} P_{M}}$$
 (7.4)

Exemplo: A razão de acoplamento, no caso dos divisores 1x2 (Figura 7.3), é demonstrada pelas Equações 7.5a-d [67]:

$$CR_{(x)} = 10 \log \frac{P_x}{P_x + P_y}$$
 (7.5a)

$$CR_{(y)} = 10 \log \frac{P_y}{P_x + P_y}$$
 (7.5b)

Normalmente a Razão de Acoplamento é expressa em %, através das equações 7.5c e 7.5d:

$$\%_{(\chi)} = \frac{CR_{(\chi)} \times 100}{CR_{(\chi)} + CR_{(\chi)}}$$
(7.5c)

$$\%_{(y)} = \frac{CR_{(y)} \times 100}{CR_{(x)} + CR_{(y)}}$$
(7.5d)

Quando a potência injetada na porta de entrada de um acoplador 1x2 é dividida igualmente entre as duas saídas, tem-se um dispositivo ideal se o Excess Loss for nulo, então teremos perdas de distribuição equivalentes a 3dB e uma razão de acoplamento de 50% para cada saída, ou seja, 50:50. Deve-se ressaltar, que a Razão de Acoplamento, da forma com que é definida, não depende da perda excedente (excess loss)!

# Diretividade

A Diretividade de um acoplador óptico indica o retorno (espalhamentos + reflexões) de potência óptica nas portas adjacentes à porta de entrada do acoplador. Por exemplo, no caso do acoplador direcional ilustrado na Figura 7.1c, a diretividade é dada pela Equação 7.6 [67]:

$$D = 10 \log \frac{P_2}{P_{in}} \tag{7.6}$$

# P<sub>in</sub> = Potência na porta de entrada P<sub>2</sub> = Potência de retorno que sai pela porta 2

O retroespalhamento (backscattering) representa uma parte da potência óptica de retorno que sai pela outra porta de entrada de um acoplador óptico 2x1. Do mesmo modo que acontece nas junções ponto-a-ponto com conectores e emendas, a potência óptica refletida é a

outra componente da potência óptica de retorno. Esta última, pode causar problemas em sistemas especialmente os que são baseados em fontes laser.

# 7.3. ACOPLADORES COMERCIAIS PARA POFs

A necessidade de acopladores de POFs é relativamente pequena, uma vez que ainda não existem aplicações de larga escala. Os acopladores de POFs para transmissão bidirecional em uma fibra podem encontrar aplicações abrangentes no futuro [3].

Uma vez que os acopladores de POFs são relativamente simples de produzir, alguns fabricantes entraram no mercado ao longo dos anos.

A Figura 7.4 mostra dois exemplos de um acoplador Y (*Splitter 1 x 2*) comercialmente disponível no final da década de 1990. Outro acoplador em uma configuração 16 x 16 é ilustrado na Figura 7.5 [3].



Figura 7.4. Acopladores POF-Y (1x2) (à esquerda da Nichimen, à direita da Microparts) [3].



Figura 7.5. Acoplador POF 16 x 16 (Nichimen, [Nich00]) [3].

Outro acoplador do tipo splitter 1 x 4 é mostrado na Figura 7.6. Esta forma de acoplador é fabricada com diferentes fibras para desejos específicos do cliente, incluindo DSI-POF.



Figura 7.6. Acoplador 1x4 da Nichimen [3].

A Leonhardy Company desenvolveu um acoplador utilizando uma guia de onda especial (Fig. 7.7).



Figura 7.7. Estrutura do acoplador da Leonhardy [3].

Um acoplador muito simples para uso em redes de áudio é vendido pela Hama em lojas de produtos eletrônicos (Fig. 7.8). Quatro fibras com um diâmetro de 500 µm estão dispostas no componente e distribuídas nas duas saídas. As conexões correspondem a um conector F05 [3].



Figura 7.8. Acoplador POF da Hama [3].

## 7.3.1. Acoplador Polido

A DieMount GmbH (Alemanha) utiliza o princípio de polimento lateral das POFs para fabricação de seus acopladores do tipo Y. Esta técnica consiste em dividir a parte frontal da fibra em duas partes, essas deverão ser polidas de forma a não existir áreas salientes, formando cada uma secção transversal em formato de meia-lua, em seguidas são combinadas e coladas entre si (Figura 7.9).



Figura 7.9. Princípio de acoplador-POF polido da Diemount [69].

A foto de um acoplador 1x2 da DieMount pode ser vista na Figura 7.10. A parte frontal de uma POF de 1 mm cortada longitudinalmente ao meio é mostrada na Figura 7.11 [3].



Figura 7.10. Acoplador-POF polido (DieMount) [3].


Figura 7.11. POF polida longitudinalmente em 50% (DieMount) [69].

A empresa Diemount, localizada em Wernigerode, vem aperfeiçoando, fabricando e vendendo estes acopladores-POF com base neste princípio há alguns anos [Kra04b] e [Kra05a] [3].

### 7.3.2. Acopladores Moldados do IMM

O Instituto de Micro tecnologia de Mainz (IMM), na Alemanha, introduziu a produção de componentes passivos para POFs e PCSs (fibras ópticas com núcleo de sílica e casa polimérica) com base em guias de ondas [Klo03] e [Fre03]. Os moldes necessários são produzidos pela tecnologia LIGA. A Figura 7.12 mostra a produção subsequente de um acoplador, onde a estrutura de guia de onda é preenchida com um polímero [3].



Figura 7.12. Fabricação de um acoplador tipo guia de onda da IMM ([Klo03]) [3].

O componente acabado com uma POF acoplada de 1 mm é mostrado na Figura 7.13.



Figura 7.13. Componente (acoplador-POF) acabado com POFs de 1 mm acopladas, da IMM ([Klo03]) [3].

A principal desvantagem deste procedimento, é o alto custo das ferramentas, só é compensado financeiramente se uma grande quantidade de peças for produzida e vendida [3].

### 7.4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar o desempenho de um acoplador para uso posterior na construção de um MUX/DEMUX, devem ser medidas a razão de acoplamento, as perdas de inserção e as perdas excedentes que a luz sofre ao atravessá-lo. Foram caracterizados 3 tipos de acopladores/splitters: um acoplador 1x3 e dois acopladores 1x2, que mostraram ter um bom desempenho podendo então ser utilizados no desenvolvimento dos DEMUXs.

Em primeiro lugar, foi realizada a medida da potência de luz injetada na porta de entrada do acoplador. Em seguida, utilizando um medidor OPM (Optical Power Meter), foram feitas as medidas das potências em cada porta de saída. Repetiu-se esse processo 10 vezes para cada fonte de luz laser disponível, onde suas médias foram extraídas para os cálculos dos parâmetros de desempenho. A Tabela 7.1 exibe um sumário dos equipamentos e componentes utilizados para realizar os experimentos descritos neste capítulo.

Equipamento ou componente	Fabricante	Modelo
Fonte de Tensão	ICEL	PS 4100
Acoplador 1x3	DieMount	1x3 POF-Splitter
Acoplador 1x2	DieMount	1x2 POF-Splitter
Laser de HeNe (Hélio- Neonio)	Opto-Eletrônica de São Carlos	633nm
Laser Verde Nd-YAG	Laser Roithner	532nm
Laser Verde Diodo	Laser Roithner	520nm
Laser Azul	Laser Roithner	450nm
Medidor de Potência	Thorlabs	PM20A
Mode-Scrambler	Home-made	JIS6863

Tabela 7.1. Equipamentos/componentes utilizados nos experimentos.

A Figura 7.14 mostra o esquema utilizado para realização das medidas do acoplador 1x2. Para forçar o equilíbrio modal, ou seja, estabelecer a condição de EMD (*Equilibrium Mode Distribution*) na POF antes da luz percorrer o dispositivo, utilizou-se entre o laser e o acoplador, um Mode-Scramber no padrão japonês JIS6863 construído no próprio laboratório. Os valores das potências foram extraídos através de um medidor de potência óptica (OPM) com foto-detector de Si e sensibilidade de – 60 dBm (Thorlabs, USA).



Figura 7.14. Diagrama esquemático do aparato experimental destinado a medição das potências de saída de um divisor (splitter). Fonte: a autora (2017).

### 7.4.1. Caracterização do Acoplador 1x2

Inicialmente, foram selecionados dois acopladores 1x2 da DieMount (1# e 2#) para serem caracterizados. Pode-se visualizar a foto desse divisor na Figura 7.15a.



Figura 7.15. a) Splitter 1x2 DieMount, b) Splitter DieMount conectado a POF com sleeves fornecidos pela própria Diemount [71].

Este tipo de splitter (divisor) da DieMount, possui integrado em sua porta de entrada um *sleeve* na forma de um ferrolho de metal com um diâmetro de 2,2mm para que possa ser acoplado à uma POF externa ao dispositivo. Nas extremidades dos dois ramos de saída formados por fibras nuas, há revestimento com polietileno branco, sendo este último terminado com o mesmo tipo de ferrolho também destinado a funcionar como guia para realizar conexão com POFs cabeadas com 2,2mm de diâmetro. (Figura 7.15b).

O nível de potência da luz injetada pelo laser na porta de entrada é medida como  $P_{in}$ . Em seguida, são medidas as potências  $P_1$  e  $P_2$  de saída em cada braço dos divisores, conforme ilustrado na fotografia da configuração experimental na Figura 7.16.



Figura 7.16. Configuração experimental utilizada para caracterização dos Divisores-POF 1x2.

Na Tabela 7.2 e 7.3, estão relacionados os valores experimentais baseados na média das medidas realizadas em cada saída do Divisor (1#) e do Divisor (2#). Em cada divisor, foram realizadas 10 medições para cada fonte de luz: LD de 520 nm, LD de 450nm e Laser HeNe de 633 nm. A perda de inserção média (IL) (em dB) foi calculada em cada caso utilizando a Equação 7.1.

DIVISOR 1X2 (1#)						
λ (nm)	P <sub>in</sub> (µw)	$P_1(\mu w)$	<b>P</b> <sub>2</sub> (μw)	IL <sub>1</sub> (dB)	$IL_2(dB)$	
450 (azul)	90,7	40,0	35,1	-3,5	-4,1	
520 (verde)	203,9	86,9	74,9	-3,7	-4,3	
633 (vermelho)	44,5	16,6	14,7	-4,2	-4,8	

Tabela 7.2. Parâmetros Medidos do Divisor 1x2 (1#).

DIVISOR 1X2 (2#)						
λ (nm)	P <sub>in</sub> (µw)	$P_1(\mu w)$	$P_2(\mu w)$	$IL_1 (dB)$	IL <sub>2</sub> (dB)	
450 (azul)	83,9	35,1	36,0	-3,8	-3,7	
520 (verde)	214,8	94,3	89,0	-3,6	-3,8	
633 (vermelho)	43,9	15,9	16,6	-4,4	-4,2	

Tabela 7.3. Parâmetros Medidos do Divisor 1x2 (2#).

Para avaliar a Razão de Acoplamento, foi utilizada a Equação 7.5. Devido aos resultados encontrados, o Divisor (1#) apresentou uma Razão de Acoplamento de 45:55, ou seja, 45% do total da luz que sai do dispositivo é transmitida pela saída 1 e 55% pela saída 2, independente do que for injetado. Já o Divisor (2#) mostrou um melhor resultado, com CR = 50:50, ou seja, a luz é distribuída igualmente para ambas saídas, podendo ser considerado um distribuidor ideal dependendo da aplicação. A de Razão de Acoplamento foi a mesma para todas as fontes de luz utilizadas.

Por último, na Tabela 7.4 verificam-se os valores das Perdas Excedentes (*EL*) encontrados utilizando a Equação 7.3:

λ (nm)	EL <sub>(1)</sub> (dB) Divisor (1#)	EL <sub>(2)</sub> (dB) Divisor (2#)
<b>450 (azul)</b>	-0,8	-0,7
520 (verde)	-1,0	-0,7
633 (vermelho)	-1,5	-1,3

Tabela 7.4. Perda Excedente encontrada para cada Fonte de Luz em cada uma das duas amostras de divisor-POF.

Os experimentos mostraram um excelente resultado, uma vez que, as perdas excedentes não passaram de -1,5dB, ou seja, a luz injetada na porta de entrada tem uma perda entre -0,7dB a -1,5dB ao passar pelo divisor. Os resultados obtidos nos testes não diferenciam muito das informações fornecidas pelo fabricante, onde apresentam um EL (perda excedente) entre -0,9dB e -1,4dB, com uma razão de acoplamento de 50 : 50 [70]. O desempenho desse acoplador também mostrou ser melhor que os acopladores da Industrial Fiber Optic que possui um EL (perda excedente) de -1,6dB [71].

Também foi avaliada a diretividade dos divisores, o que quantifica o retorno de potência óptica na porta adjacente. Para isso, foi injetada luz em uma das portas de entrada e medida a potência refletida na outra entrada do (agora) combinador 2x1 (Figura 7.17).



Figura 7.17. Configuração experimental para medir a diretividade dos Combinadores 2x1.

A Tabela 7.5 estão relacionadas as médias calculadas sobre as 10 medidas realizadas para cada fonte de luz. Utilizando a Equação 7.6 encontramos os valores da Diretividade,

também informados na tabela 7.5. Onde Pin é o valor da potência injetada na entrada 1 e P2 é a potência refletida na entrada adjacente.

) (nm)	COMBINADOR 2X1 (1#)			COMBINADOR 2X1 (2#)		
	P <sub>in</sub> (µw)	$\mathbf{P}_2(\mathbf{\mu}\mathbf{w})$	D (dB)	P <sub>in</sub> (µw)	$\mathbf{P}_2(\mu \mathbf{w})$	D (dB)
450 (azul)	58,6	0,279	-23,2	58,2	0,322	-22,5
520 (verde)	142,7	0,642	-23,5	140,5	0,792	-22,5
633 (vermelho)	44,3	0,221	-23,0	41,4	0,268	-21,9

Tabela 7.5. Parâmetros Medidos e Valores da Diretividade dos Combinadores 2x1.

### 7.4.2. Caracterização do Acoplador 1x3

Nessa segunda etapa, foi caracterizado um acoplador 1x3 da DieMount (3#). Na Figura 7.18 podemos ver a foto desse divisor.



Figura 7.18. Divisor 1x3 da DieMount.

O processo de fabricação deste acoplador 1x3 não foi revelado pelo fabricante, porém, presume-se que sejam fabricados da mesma forma dos seus acopladores 1x2.

Em sua porta de entrada, diferente dos divisores 1x2, não há uma estrutura para acoplar a POF ao divisor e sim um pequeno pedaço de POF. Já que este não veio acompanhado de ferrolhos metálicos, foi necessário construir *sleeves* para o acoplamento da fibra. Para isso, foi feita uma adaptação a partir de um ferrolho da Industrial Fiber Opticas (Figura 7.19). Este ferrolho, continha internamente uma guia de 1mm de espessura apropriado

para contar apenas a POF de 1mm em si, mas não o cabo de 2,2mm. Foi então retirado este guia interno chegando a um *sleeve* para POFs cabeadas de 2,2 mm, bem similar ao ferrolho da Diemount.



Figura 7.19. Foto de um ferrolho da Industrial Fiber Opticas [72].

A Figura 7.20 mostra a foto do ferrolho sendo perfurada ao meio para formar um *sleeve*. Esse procedimento foi feito no Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp) da Universidade Federal Fluminense, utilizando uma Microfresadora M70 da Proxxon com uma broca de 2,2mm. Lembrando que, dois tipos de *sleeves* foram fabricados no LaCOp: o primeiro deles, descrito no Capítulo 3, foi usinado na oficina mecânica da UFF e depois pintado de preto. O segundo deles é referente ao que está sendo utilizado neste capítulo.



Figura 7.20. Perfuração dos cilindros metálicos utilizando uma micro-fresadora.

O nível de potência da luz injetada pelo laser na porta de entrada é medida como  $P_{in}$ . Em seguida são medidas as potências  $P_1$ ,  $P_2 \in P_3$  de saída em cada braço do divisor, conforme ilustrado na fotografia da configuração experimental na Figura 7.21.



Figura 7.21. Configuração experimental utilizada para caracterização do Divisor 1x3.

Abaixo, na Figura 7.22 é ilustrado o acoplador 1x3 utilizado nos experimentos.



Figura 7.22. Ilustração de um acoplador 1x3.

Na Tabela 7.6, estão relacionados os valores experimentais baseados na média das medidas realizadas em cada saída do Divisor 1x3. Foram feitas 10 medidas para cada laser: LD em 532 nm, LD em 450nm e Laser de HeNe em 633 nm.

λ (nm)	P <sub>in</sub> (µw)	$\mathbf{P}_1(\mathbf{\mu}\mathbf{w})$	$\mathbf{P}_{2}(\mathbf{\mu w})$	<b>P</b> <sub>3</sub> (µw)
450 (azul)	71,5	10,3	10,5	10,5
520 (verde)	53,3	7,2	7,5	7,6
633 (vermelho)	99,1	14,7	15,1	15,1

Tabela 7.6. Resultado das medidas realizadas no Divisor 1x3.

Para avaliar a Razão de Acoplamento foram utilizadas as Equações 7.4. Foi encontrado para todas as fontes de entrada utilizadas, o valor de 4,7dB em cada saída, ou seja, uma razão de acoplamento de 33,33% : 33,33% : 33,33%.

Para o cálculo da Perda de Inserção nas saídas do divisor, foi aplicada a Equação 7.1 nos resultados obtidos na Tabela 7.2. A Tabela 7.7 mostra os resultados para cada fonte de luz utilizada.

λ (nm)	Saída 1 IL <sub>(1)</sub> (dB)	Saída 2 IL <sub>(2)</sub> (dB)	Saída 3 IL <sub>(3)</sub> (dB)
<b>450 (azul)</b>	-8,3	-8,1	-8,2
520 (verde)	-8,4	-8,3	-8,3
633 (vermelho)	-8,7	-8,5	-8,5

Tabela 7.7. Resultado da perda de Inserção nas saídas do Acoplador 1x3.

Por último, utilizando a Equação 7.3, foram encontras as seguintes Perdas Excedentes:

*LD de 450nm: EL* = -3.4dB *LD de 532nm: EL* = -3,6dB *Laser HeNe de 633nm: EL* = -3,8dB

Com base nos resultados, pode-se concluir que o acoplador está distribuindo igualmente a potência para todas as saídas, podendo afirmar ser um distribuidor ideal. Isso porque sua perda de distribuição possui o mesmo valor em todas as saídas, na faixa de -4,7 dB, o que significa que cada saída está emitindo 33% (1/3 + 1/3 + 1/3) da luz que foi injetada na porta de entrada, ou seja, a razão de acoplamento desse divisor é de 33:33:33.

Cada uma das saídas possui uma perda total de potência em torno de - 8,4 dB. Onde - -4,7dB equivale as perda de distribuição e - 3,5 dB são perdas excedentes e o restante , - 0,1 dB, são referentes a outras perdas como retroespalhamento, estabilidade ambiental, dentre outras.

# 8. DESENVOLVIMENTO DO DEMUX WDM BASEADO EM FILTROS DE FILMES PLÁSTICO GEL

### 8.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados e caracterizados três protótipos DEMUXs WDM de 2 e 3 canais no visível, para uso em enlaces com fibras ópticas plásticas de PMMA (polimetil-metacrilato). Os DEMUXs foram construídos com a combinação de divisores (*splitters*) com filmes em plástico gel que atuam como filtro óptico passa-alta ou passa-banda. Suas características espectrais de transmissão permitem algum ajuste a partir da cor do plástico, combinações e de sua espessura, conforme apresentado no Capítulo 6.

Algumas soluções WDM sobre POF foram desenvolvidas, porém até o momento nenhuma está disponível comercialmente.

Em 1997, foi montado um sistema WDM bidirecional envolvendo uma colaboração entre a Universidade de Ulm com o Centro de Tecnologia da Deutsche Telekom, ambas as instituições localizadas na Alemanha. O referido sistema, utilizava um LED vermelho (650 nm) e outro verde (520 nm) como fontes luminosas, cujos sinais foram transmitidos sobre uma SI-POF. Para multiplexar e demultiplexar os sinais, foram utilizados divisores (*splitters*) 1x2 com filtros ópticos coloridos inseridos através de conectores. Foi possível alcançar uma taxa de 10 Mb/s a uma distância de 63 m. A Tabela 8.1 informa os valores das perdas ocorridas neste sistema [3].

λ	Perda no	Perda em	Perda no	Perda no	Perda nos
	Splitter 1	50m de POF	Splitter 2	filtro WDM	Conectores
650nm	5dB	9dB	5dB	2dB	6dB
520nm	5dB	7dB	5dB	4dB	6dB

Tabela 8.1. Perdas de um sistema WDM sobre POF a base de splitters, conectores e filtros coloridos, realizado em 1997 pela Universidade de Ulm junto ao Centro de Tecnologia da Deutsche Telekom [1].

Observe que as perdas foram altas, utilizando o LED de 650nm como fonte de luz o MUX/DEMUX teve uma perda de 18dB e para o LED verde ocorreu uma perda de 20dB. Aparentemente está técnica não foi continuada. A solução apresentada nesse trabalho obteve perdas menores, uma vez que não se utilizou conectores para a fixação dos filtros, além disso, foi utilizado Superbonder Gel podendo ajudar a reduzir as perdas na emenda.

Outra técnica de MUX/DEMUX envolvendo *splitters* foi desenvolvida em 2005 pelo departamento de Física da Universidade de Ciência e Tecnologia da China, o sistema empregava um *splitter* 1x2 de POF-SI-PMMA e primas. Foram utilizados um LED de 650nm e um de 523nm como fontes de luz, esses foram multiplexados através de *splitters*, os quais suas características não foram reveladas. Para a demultiplexação do sinal foram utilizados primas em forma de triângulo com 60mm de comprimento. A Figura 8.1 ilustra o esquema MUX/DEMUX desenvolvido. Como resultado, o sinal de 650nm teve uma perda de inserção de 17,65dB após passar pelo demultiplexador e uma perda de inserção de 20,55dB para o sinal de 523nm [73]. Assim como o sistema apresentado anteriormente, esse tipo de demultiplexador possui uma perda relativamente alta. Outra desvantagem é em relação ao tamanho do dispositivo DEMUX, como foram utilizados três prismas, obteve-se um volume grande para o tipo de aplicação.



Figura 8.1. Esquema do MUX/DEMUX desenvolvido pela Universidade de Ciência e Tecnologia da China [73].

É possível que os melhores resultados para DEMUX POF possam ser alcançados através de grades côncavas. Em 2010 a Universidade de Ciências Aplicadas (Alemanha) em conjunto com a Universidade Lviv (Departamento de Fotônica do Instituto de Telecomunicações, Radio Eletrônica e Técnicas Eletrônicas) desenvolveram e simularam um projeto WDM para POF-SI-PMMA utilizando grades côncavas. Após passar por esta grade, o sinal é separado por comprimento de onda e os canais são distribuídos para diferentes fibras receptoras, podemos visualizar esse esquema na Figura 8.2 [57].



Figura 8.2. Demultiplexador WDM-POF utilizando Grade Concava e fibras receptoras [57].

Devido ao tamanho limitado das grades, os feixes de luz possuem um diâmetro maior que 1mm causando uma perda adicional. A Figura 8.3 mostra a distribuição do sinal de saída na entrada das fibras receptoras. Utilizando laser de diodo como transmissor, pode-se chegar, para o melhor caso, a uma perda de -2,66dB. Já para os LEDs como fonte de luz, há uma perda em torno de -7dB [57]. Utilizando-se filtros-gel as perdas são maiores do que em um sistema de grade, além disso, há uma limitação de número de canais, porém são menos complexos, mais baratos e fáceis de serem implementados.



Figura 8.3. Distribuição do sinal na extremidade de entrada da fibra receptora [57].

Em 2012 um grupo da faculdade de Engenharia da Universidade Kebangsaan, Malásia, desenvolveu um demultiplexador utilizando um *splitter* 1x3 de POF-SI-PMMA em conjunto com filmes-finos que atuaram como filtros. Os filmes utilizados foram da Roscolux, formados por dois tipos de plástico, 65% de policarbonato e 35% de poliéster. Foram selecionados filmes vermelho, azul e verde, recortados em pequenos pedaços e colados em cada saída do *splitter*, utilizando uma mistura de Epoxy. Como fonte de luz utilizou-se LEDs vermelho, azul e verde. Os gráficos da Figura 8.4a-c mostram a perda de potência da fonte de luz ao passar pelos filmes-fino. Nota-se que os filtros não apresentam uma boa eficiência, uma vez que, não há um bom bloqueio para as cores não desejadas. Ao injetar a luz do LED vermelho na entrada do *splitter*, após passar pela saída onde continha o filtro vermelho, ocorreu uma pequena perda do sinal de 4,7%, conforme esperado. Porém, utilizando o LED verde e azul como fontes de luz, após passar pelo filtro vermelho, ocorreu uma perda do sinal de 64,21% e 47%, ou seja, o filtro vermelho não foi capaz de bloquear o suficiente a luz verde e azul. Os filtros azul e verde também não obtiveram bons resultados, conforme podemos analisar as Figuras 8.4. Ocorreu uma perda da potência da luz ao passar pelo filtro verde de: 35,54% usando o LED vermelho, 2,78% para o LED verde e 24,52% para o LED azul. Por fim, as perdas da potência da luz ao passar pelo filtro azul: 73,50% usando o LED vermelho, 75% para o LED verde e 35,50% para o LED azul [74]. Os filmes-gel utilizados nesse trabalho foram capazes de bloquear quase 100%, em alguns casos houve o bloqueio total do sinal indesejado, apresentando uma melhor eficiência.



Figura 8.4. Resultados do experimento realizado pela Universidade Kebangsaan. (%) da perda da potência da luz injetada (LED Vermelho, Verde e Azul) ao passar pelos filtros: a) vermelho; b) verde; c) azul [74].

Um sistema WDM-POF utilizando 4 canais foi desenvolvido em 2014 pela Universidade de Ciências Aplicadas Harz empregando *splitter* para multiplexar os sinais de diferentes comprimentos de onda e como fonte de luz, utilizou-se os LEDs: 405nm (violeta), 450nm (azul), 514nm (verde), 639nm (vermelho). Para demultiplexação, foram empregados espelhos dicroicos combinados com filtros de interferência e lentes para o acoplamento da luz em uma fibra receptora. Foram obtidas as seguintes perdas de inserção para cada canal: - 5,66dB para o canal 1 (violeta), -4,55dB para o canal 2(azul), -3,47dB para o canal 3 (vermelho) e -3,19dB para o canal 4 (verde) [75]. Apesar de conseguir obter 4 canais com baixas perdas, esse tipo de configuração de DEMUX possui uma maior complexidade para construção e maior custo se comparados com os filtros baseados em filmes-gel. Além disso, assim como os DEMUX construídos a base de prismas, há a desvantagem em relação ao seu tamanho, pois é relativamente grande se comparado com os DEMUXs baseados em *splitters* e filtros. Na Figura 8.5 é apresentada a configuração do filtro elaborado [75].



Figura 8.5. Princípio de operação do DEMUX desenvolvido pela Universidade de Ciências Aplicadas Harz: 1 – Conector FC; 2 – 1m SI-POF; 3 – Lentes Esféricas; 4 – Espelhos Dicroicos; 5 – Filtros de Interferência [75].

### 8.2. CONSTRUÇÃO DO MUX/DEMUX

Neste trabalho, a sugestão é implementar um MUX/DEMUX WDM adaptado para POFs de base PMMA, utilizando apenas dois e três canais. Os experimentos realizados com os filmes plásticos gel comprovaram a sua eficiência ao utilizá-los como filtros no dispositivo MUX/DEMUX.

Para selecionar os comprimentos de ondas das fontes de luz a serem utilizadas na caracterização do MUX/DEMUX, deve-se considerar a posição e a largura espectral dos filtros para que não haja interferência entre os canais. O gráfico da Figura 8.6 mostra os espectros de transmitância superpostos dos filmes-gel nas cores: vermelho, verde e azul. Esse gráfico foi elaborado com os resultados obtidos na caracterização dos filtros (Capítulo 6).



Figura 8.6. Espectros de transmissão dos filtros gel vermelho, verde e azul.

Analisando o gráfico da Figura 8.6, podemos observar três canais com picos centrados em:  $\lambda_{AZUL}$ = 450nm,  $\lambda_{VERDE}$  = 517nm,  $\lambda_{VERMELHO}$  = 665nm, fontes de luz próximas a esses comprimentos de onda tendem a ter um melhor resultado no processo de MUX/DEMUX em WDM nos referidos  $\lambda$ 's. Também podemos observar que há uma interseção entre as curvas de transmitâncias correspondentes aos filtros azul e verde, interseção esta localizada entre 462nm e 529nm. Com isso, concluímos que não é viável utilizarmos fontes de luz que atuem dentro dessa faixa de interseção em um MUX/DEMUX que esteja trabalhando com os canais azul e verde.

#### 8.2.1. Demultiplexador de 2 Canais

Para o desenvolvimento dos demultiplexadores, foram selecionados os filtros vermelho, verde e azul, pois correspondem a três das principais janelas de transmissão das POFs de PMMA: 650 nm e 520 nm e 450 nm, respectivamente. No capítulo 6, foi analisado que as melhores combinações de filmes gel a serem utilizadas em um MUX/DEMUX e o enlace WDM correspondente são: vermelho & verde, vermelho & azul. Isso porque o filme vermelho transmite para > 600nm e bloqueia totalmente a luz azul e verde. O filtro verde exibe um pico de transmissão em torno de 517nm e largura espectral de 58 nm, portanto

transmite bem o verde e bloqueia a luz > 600nm. Já o filtro azul, exibe um pico em torno de 450 nm e largura espectral de 83 nm, podendo transmitir a luz azul e bloqueando totalmente a luz vermelha.

Construir um MUX/DEMUX de dois canais utilizando filtros azul e verde só atingirá um bom desempenho caso o comprimento de onda das fontes de luz não estejam dentro da faixa de interferência (mencionada no item 8.2).

A seguir, foram construídos dois demultiplexadores utilizando acopladores 1x2 de POF (divisor/splitter) onde cada uma das 2 extremidades de saída continha 1 camada de filme colado, vermelho em uma e verde na outra. Após a construção desse primeiro protótipo, foi desenvolvido um segundo protótipo, porém os filmes utilizados foram o vermelho e o azul. Os acopladores utilizados foram os da DieMount (1# e 2#), onde sua caracterização e análise de desempenho foram demonstradas no Capítulo 7.

Como o acoplador é formado por POF-PMMA, suas extremidades de saída possuem um diâmetro de 2,2mm com um núcleo de 1mm. Baseando-se nessa medida, os filtros gel foram confeccionados com uma largura e uma altura menor que 2mm e maior que 1mm. Cada porta de saída irá filtrar e transmitir somente o comprimento de onda de interesse. Utilizou-se Superbonder Gel, o mesmo adesivo utilizado para emendar as POFs mostrado no Capítulo 4, para fixar os filmes no acoplador. A Figura 8.7 mostra fotos das saídas do acoplador já com os filtros fixados.



Figura 8.7. À esquerda: Acoplador com filtros verde e vermelho (1° protótipo). À direita: Acoplador com filtros azul e vermelho (2° protótipo).

Para a proteção dos filtros, as extremidades do acoplador, já com os filmes colados, devem ser fixadas, com a ajuda dos ferrolhos de metal, a uma POF em torno de 5 cm de

comprimento. Por fim, foi inserida uma gota de Superbonder Original nas saídas dos ferrolhos para um maior reforço mecânico. Podemos observar o resultado na foto da Figura 8.8. Dessa forma, não haverá risco de danificar os filtros ao instalar o acoplador num enlace ou rede de POFs. Os ferrolhos de metal foram fornecidos pela DieMount junto aos acopladores. Estes consistem em uma versão de menor diâmetro externo dos *sleevers* construídos na UFF (pintados de preto) e apresentados no Capítulo 3 no contexto de emenda de POFs como o adesivo Superbonder gel.



Figura 8.8. Foto de dois protótipos MUX/DEMUX de dois canais visíveis WDM.

#### 8.2.2. Demultiplexador de 3 Canais

Também foi desenvolvido um DEMUX com 3 canais utilizando filmes plásticos gel. Um divisor 1x3 da DieMount foi utilizado na sua construção. A caracterização e análise desse acoplador foram demonstradas no Capítulo 7.

Foram selecionados os filmes vermelho, verde e azul para serem utilizados como filtros. Os filmes foram fixados no acoplador utilizando Superbonder Gel, da mesma forma que foram feitos os demultiplexadores 1x2 do item 8.2.1. A Figura 8.9 mostra uma foto da saída de luz do acoplador 1x3 onde cada uma das suas referidas saídas, recebeu uma camada de filme gel (verde, azul ou vermelho).



Figura 8.9. Saídas do DEMUX construído a partir de um divisor 1x3 com filtros coloridos fixados em cada uma das 3 extremidades de saída.

Para proteção dos filtros, as extremidades do acoplador, já com os filmes colados, foram fixadas a uma POF em torno de 6 cm de comprimento. O alinhamento foi feito através dos *sleeves* fabricados no LACOP (Item 7.4.2 do Capítulo 7). Podemos visualizar o resultado na Figura 8.10.



Figura 8.10. Acoplador 1x3 com os filtros coloridos fixados protegidos por um sleeve gerando um protótipo do MUX/DEMUX de 3 canais WDM.

### 8.3.EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Após a finalização da montagem dos protótipos, esses foram caracterizados e testados. A caracterização consistiu em verificar a perda de luz ao passar pelo demultiplexador podendo desta forma analisar sua eficácia. Para caracterização dos protótipos foram utilizados os equipamentos descritos na Tabela 8.1:

EQUIPAMENTO	FABRICANTE	MODELO
Fonte de Tensão	ICEL	PS 4100
Laser HeNe (Hélio-Neonio)	Optoeletrônica de São Carlos	633nm
Laser de Nd-YAG Verde	Laser Roithner	532nm
Laser de Diodo Verde	Laser Roithner	RFD520-12-5, 520nm 12mW cw 5VDC
Laser de Diodo AzulLaser Roithner		CW450-05, 450nm < 5mW cw APC 12x49mm
Medidor de Potência Óptica	Thorlabs	PM20A

Tabela 8.2. Sumários dos dispositivos e equipamentos utilizados no experimento.

As fontes luminosas foram escolhidas com base no que estava disponível e, principalmente, de acordo com as janelas espectrais de interesse para transmissão em POFs de PMMA (ver Capítulo 2). Os gráficos da Figura 8.6, são os gráficos de transmitância de cada um dos 3 filtros coloridos selecionados para compor o MUX/DEMUX. Pode-se notar que cada um deles é útil para deixar passar um certo comprimento de onda, enquanto rejeita os dois outros canais. Deve-se aqui observar, que o uso de um laser de HeNe de 633nm, foi mera conveniência já que o laser de diodo em 650 nm (mais adequado para transmissão em POFs de PMMA), apresentou problemas. O uso de 450 nm, também foi mera conveniência, já que um laser de diodo operando em 473 nm (mais adequado para transmissão em POFs de PMMA), atualmente (julho/2017) custa cerca de US\$ 6.000,00!

Para analisarmos a eficácia nas portas de saída, é necessário injetar luz na entrada do DEMUX e medir o sinal em cada saída. As portas de saída que contêm o filtro com faixa diferenciada do comprimento de onda do laser, não deverá transmitir luz. O sinal só deverá ser transmitido por uma saída, qual seja a saída referente ao filtro onde o comprimento de onda de luz injetada esteja dentro de sua faixa passante.

#### 8.3.1. Caracterização do Demultiplexador de 2 Canais

O nível de potência da luz injetada pelo laser (referência) é medida como P<sub>ref</sub>. Em seguida são medidas as potências P<sub>S1</sub> e P<sub>S2</sub> de saída em cada braço do DEMUX (divisor com a 140

inserção dos filtros). Com isto, pode-se verificar se e quanto um determinado filme-gel é capaz de transmitir um canal e, ao mesmo tempo, se e de quanto rejeita o outro comprimento de onda.

A Figura 8.11 mostra o esquema utilizado para realização das medidas do DEMUX de 2 canais. Para forçar o sinal óptico a atingir a condição de EMD, conforme explicado no Capítulo 7, utilizou-se um Mode-Scrambler do tipo JIS6863 entre o laser e o DEMUX. Os valores das potências foram extraídos através de um medidor de potência óptica (OPM).



Figura 8.11. Diagrama esquemático para a caracterização óptica de um DEMUX. Fonte: a autora (2017).

### 1° Protótipo: Demultiplexador de 2 canais: verde e vermelho

Na Tabela 8.2, estão relacionados os valores experimentais baseados na média de uma série de dez medidas realizadas em cada saída do primeiro protótipo DEMUX. Este utiliza o acoplador (1#) com os filtros verde e vermelho fixados em suas saídas. O experimento foi feito utilizando laser de diodo de 520 nm e em seguida o laser HeNe de 633 nm. A perda de inserção média (IL) (em dB) foi calculada em cada caso.

λ (nm)	P <sub>ref</sub> (µw)	P <sub>S1</sub> (μw) Filtro Verde	P <sub>S2</sub> (μw) Filtro Vermelho	IL <sub>S1</sub> (dB)	IL <sub>S2</sub> (dB)
520 (verde)	69,5	7,3	0	-9,8	- ∞
633 (vermelho)	28,9	0,0011	3,5	-44,2	-9,2

Tabela 8.3. Parâmetros Medidos do DEMUX (1#) (Verde x Vermelho).

Para verificar a eficiência dos filtros do DEMUX (verde x vermelho), inicialmente utilizou-se um laser de 520nm obtendo uma perda de inserção de -9,8 dB na saída 1 que contém o filtro verde e um bloqueio de 100% da luz (verde) na saída 2. Na segunda etapa, utilizou-se o laser 633nm, passando pelo filtro vermelho onde obteve-se  $\langle IL \rangle = 9,2$  dB e um

bloqueio de quase 100% da luz vermelha pelo filtro verde na saída 1. Para melhor entendimento, os resultados foram organizados da forma mostrada na Figura 8.12.



Figura 8.12. Demonstração dos resultados experimentais quanto as potências ópticas injetadas e transmitidas pelo DEMUX (#1) (verde x vermelho). Fonte: a autora (2017).

No Capítulo 7, foi descrito para o acoplador (1#) as seguintes perdas em cada

saída:

λ (nm)	$IL_{S1}(dB)$	$IL_{S2}(dB)$
520 (verde)	-3,7	-4,3
633 (vermelho)	-4,3	-4,8

Tabela 8.4. Parâmetros medidos do acoplador (1#) (Capítulo 7).

Sabendo que a perda total do DEMUX é a soma da perda do acoplador com a perda do filtro, podemos afirmar que:

- O filtro verde por si só, introduz uma perda de -6,1 dB (-9,8dB + 3,7dB) em 520nm.
- O filtro vermelho por si só, introduz uma perda de -4,4 dB (-9,2dB + 4,8dB) em 633 nm.

### a) 2° Protótipo (#2): Demultiplexador de 2 canais, azul e vermelho:

Na Tabela 8.4, estão relacionados os valores experimentais baseados na média de uma série de dez medidas realizadas em cada saída do segundo protótipo (#2) DEMUX utilizando o acoplador (#2) com filtros azul e vermelho em suas saídas. O experimento foi feito 142 utilizando um laser de diodo em 450 nm e em seguida um laser HeNe de 633 nm. A perda de inserção média (IL) (em dB) foi calculada em cada caso.

λ (nm)	$P_{ref}\left(\mu w ight)$	P <sub>S1</sub> (μw) _Filtro Vermelho	P <sub>S2</sub> (μw) Filtro Azul	IL <sub>S1</sub> (dB)	$\begin{matrix} IL_{S2} \\ (dB) \end{matrix}$
450 (azul)	35,3	0	4,2	- ∞	-9,2
633 (vermelho)	29,6	4,0	0,00056	-8,7	- 47,2

Tabela 8.5. Parâmetros Medidos do DEMUX (#2) (Azul X Vermelho).

Na primeira etapa, utilizou-se um laser de 450 nm obtendo-se uma perda de inserção de -9,2 dB na saída 2 que contém o filtro azul e um bloqueio de 100% da luz (azul) na saída 1. Na segunda etapa, utilizou-se o laser em 633nm, para o filtro vermelho obtendo  $\langle IL \rangle = -8,7$  dB e um bloqueio de quase 100% pelo filtro azul da luz vermelha na saída 2. Para melhor entendimento, os resultados foram organizados na forma mostrada na Figura 8.13.

### PRIMEIRA ETAPA



Figura 8.13. Demonstração dos resultados experimental do DEMUX (#2) (azul x vermelho). Fonte: a autora (2017).

Para o acoplador (#2), foram obtidos os seguintes parâmetros de caracterização, de acordo com o no Capítulo 7:

λ (nm)	$IL_{S1}(dB)$	$IL_{S2}(dB)$
450 (verde)	-3,8	-3,7
633 (vermelho)	-4,4	-4,2

Tabela 8.6. Parâmetros medidos do acop	olador (#2) (Capítulo 7).
--	---------------------------

Sabendo que a perda total em cada saída do DEMUX é a soma da perda do acoplador com a perda do filtro, podemos afirmar que:

- O filtro azul por si só, introduz uma perda de -5,5 dB (-9,2dB + 3,7dB) para 450 nm.
- O filtro vermelho por si só, introduz uma perda de -4,3 dB (-8,7dB + 4,4dB) para 633 nm.

### 8.3.2. Caracterização Demultiplexador de 3 Canais

Podemos observar o esquema experimental utilizado para a caracterização do DEMUX de 3 canais na Figura 8.14.



Figura 8.14. Diagrama experimental esquemático para a caracterização de um demultiplexador de 3 canais. Fonte: a autora (2017).

O laser é injetado em uma potência  $P_{ref}$  na porta de entrada do DEMUX. Em suas extremidades de saída, são medidas as potências  $P_{S1}$ ,  $P_{S2}$  e  $P_{S3}$  para análise do seu desempenho. As portas de saída receberam os respectivos filtros: verde, vermelho e azul, conforme explicado anteriormente para o DEMUX de 2 canais.

Para esse experimento, devemos atentar para a pequena interseção espectral que existe entre as curvas de transmitância dos filtros verde e azul na faixa de comprimento de onda entre 460 nm a 525nm. Apesar das POFs apresentarem uma menor atenuação em 520nm, não foi possível utilizar o laser com esse comprimento de onda, uma vez que esse se encontra dentro da faixa de interseção mencionada. Podemos observar a ineficiência do filtro azul na Tabela 8.6 onde foram relacionados os valores baseados na média de dez medidas utilizando o LD de 520nm. Nota-se que o filtro azul não foi capaz de filtrar o suficiente a luz do LD de 520nm para poder usar no DEMUX de 3 canais.

λ (nm)	P <sub>ref</sub>	P <sub>S1</sub> (μw)	P <sub>S2</sub> (μw)	P <sub>S3</sub> (μw)	IL <sub>S1</sub>	IL <sub>S2</sub>	IL <sub>S3</sub>
	(µw)	Filtro Verde	Filtro Verm.	Filtro Azul	(dB)	(dB)	(dB)
520 (verde)	144,6	5,4	0	0,53	-14,2	- ∞	-24,4

Tabela 8.7. Parâmetros Medidos do DEMUX (#3) (Vermelho x Verde x Azul).

Devido a isso, para a caracterização do DEMUX de 3 canais, foi utilizado o Laser de Nd-YAG da *Laser Roithner* de 532nm. Quanto às fontes de luz azul e luz vermelha, foram as mesmas utilizadas na caracterização do DEMUX de dois canais.

Na Tabela 8.7, estão relacionados os valores experimentais baseados na média de uma série de dez medidas realizadas em cada saída do DEMUX de 3 canais:

λ (nm)	P <sub>ref</sub> (µw)	P <sub>S1</sub> (μw) Filtro Verde	P <sub>S2</sub> (μw) Filtro Verm	P <sub>S3</sub> (μw) Filtro Azul	IL <sub>S1</sub> (dB)	IL <sub>82</sub> (dB)	IL <sub>S3</sub> (dB)
532 (verde)	37,2	1,12	0	0,03	-15,2	- ∞	-30,9
633 (vermelho)	60,9	0	3,4	0	- ∞	-12,5	- ∞
450 (azul)	131,8	0	0	4,5	- ∞	- ∞	-14,7

Tabela 8.8. Parâmetros Medidos do DEMUX (#3) (Vermelho x Verde x Azul).

Utilizando 532 nm, obteve-se  $\langle IL \rangle = -15,2$  dB na saída 1 (S<sub>1</sub>) que contém o filtro verde, e um bloqueio de 100% da luz ao passar pelo filtro vermelho na saída 2 (S<sub>2</sub>). Quanto ao filtro azul, saída 3 (S<sub>3</sub>), a passagem de luz foi tão pequena que seria razoável considerar o seu bloqueio.

Para 633 nm, obteve-se  $\langle IL \rangle = -12,5$  dB na saída 2 (S<sub>2</sub>) que contém o filtro vermelho e um bloqueio total da luz vermelha nas outras saídas, S<sub>1</sub> e S<sub>3</sub>.

Por fim, utilizou-se 450 nm obtendo um resultado  $\langle IL \rangle = -14,7$  dB na saída 3 (S<sub>3</sub>) que possui o filtro azul e o bloqueio de 100% da luz nas demais saídas.

Lembrando que o acoplador utilizado nesse experimento possui uma perda de inserção em cada saída de -8,4 dB, conforme visto no Capítulo 7, podemos afirmar que as perdas de inserção dos filtros são: verde = -6.8 dB, vermelho = -4.2 dB, azul = -6.2 dB. A diferença de perdas entre os filtros ocorre devido ao nível de absorção que cada cor apresenta.

Com esses resultados pode ser comprovada a eficácia desse tipo de demultiplexador uma vez que foi possível transmitir o canal desejado e ao mesmo tempo rejeitar os comprimentos de onda indesejados.

### 9. CONCLUSÃO

Esta dissertação, primeiramente, investigou um tipo de emenda apropriada para ser utilizada em redes residenciais. Atualmente utilizam-se conectores entre as POFs, porém, estes possuem grandes perdas, além disso, sua montagem deve ser feita com cuidado necessitando algum trabalho por parte do operador. Foi então, apresentada uma solução técnica de emenda permanente para POF-PMMA: simples, rápida, segura e barata, ideal para ser usada em HANs, uma vez que, não há necessidade de uma pessoa ser treinada para usar a referida técnica. Foi provado que o próprio usuário pode executá-la, sendo por isto chamada de tecnologia do-it-yourself. Como novidade, a técnica fez uso eficiente de um epóxi facilmente encontrado no mercado a baixo custo, que até então não havia sido reportado o seu emprego para emendas de POFs de PMMA. Além do mais, com o uso da técnica, foi mostrado uma perda de inserção (IL) em 0,42 dB para SI-POFs, melhor do que muitas das emendas com conectores (envolvendo polimento) ou o uso de técnicas mais sofisticadas de emendas. Obteve-se IL = 0.56 dB para DSI-POFs e apenas um único trabalho foi encontrado que reportava 0,61dB [23], porém utilizando o procedimento de polimento das extremidades das POFs envolvidas. Por fim, obteve-se IL = 0.84 dB para GI-POF, valor este considerado aceitável quando comparado o IL de emendas em outros tipos de POFs. Infelizmente, não foi encontrado na literatura qualquer registro de emenda e o seu IL para as GI-POF, fato este que confere mais uma contribuição original deste trabalho.

A seguir, foi descrito a seleção e a caracterização de filtros ópticos gel e de POFdivisores adequados para o desenvolvimento posterior dos DEMUXs. Deve-se notar que os POF-divisores escolhidos, são compactos e apresentam uma perda de excesso em torno de 1 dB, considerado um valor baixo para fibras plásticas. Foi feito um estudo e análise de diversos filtros empregados em sistemas WDM. Sendo então, escolhido, os filtros a base de plástico gel. Estes são práticos, possuem baixo custo e são fáceis de serem implementados. Inicialmente, os filtros de celofane foram caracterizados. No entanto, durante os testes, não apresentaram bons resultados, isso ocorreu devido a sua estreita espessura que o torna difícil de manusear, além de requerer o uso de várias camadas para obter um espectro de transmitância aceitável. Devido a esses fatores, o papel celofane foi substituído pelo filme plástico tipo gel, o qual apresenta maior espessura podendo evitar grande número de camadas, mas ainda mantendo a maleabilidade. Além disso, provaram ser, mecanicamente e termicamente, mais resistentes do que o celofane, pois foram desenvolvidos para suportar as altas temperaturas dos refletores e projetores. Os testes apresentaram bons resultados para os filmes-gel nas cores: vermelho, verde e azul, compatíveis com as janelas de transmissão das POFs de base PMMA. Foi concluído que esse tipo de filtro funciona de forma adequada em um sistema WDM sobre POFs de poucos canais, porém, para obter um melhor desempenho é aconselhável utilizar os pares: vermelho com azul ou vermelho com verde. A luz vermelha pode ser razoavelmente suprimida utilizando o filme-gel azul ou verde, e o filme-gel vermelho bloqueia totalmente a luz verde e azul. Também foi provado que é possível um WDM de 3 canais utilizando os filtros vermelho, verde e azul, porém, as fontes de luz devem respeitar a faixa de interseção que existe entre os filtros verde e azul.

Finalmente, foi descrito todo o desenvolvimento dos DEMUXs de 2 e 3 canais visíveis. Deve-se notar, que os DEMUXs aqui apresentados utilizam na sua construção o que antes já havia sido apresentado: emenda com epóxi, filtros gel coloridos e mini POFdivisores. Os DEMUXs de dois canais apresentaram em média  $IL \sim 9$  dB por canal e uma isolação do canal cruzado em pelo menos ~ 30 dB. Os DEMUXs de três canais apresentaram em média  $IL \sim 14$  dB por canal e isolação dos canais cruzados tão boa quanto no caso do DEMUX de 2 canais.

Os DEMUXs apresentaram um bom desempenho podendo atuar em redes de curta distância. A grande vantagem dessa técnica é a economia, praticidade e facilidade para sua construção, além de possuir dimensões bem reduzidas diante as demais técnicas de MUX/DEMUX para POFs. Nota-se que utilizando 2 canais, o DEMUX apresenta uma melhor eficácia. Apesar das perdas serem razoavelmente altas, seu desempenho apresentou um melhor resultado que outras técnicas semelhantes (utilizando filtros de absorção e *splitters*), apresentadas até o momento, na literatura, onde se obteve perdas em torno de 18dB a 20dB e um mal desempenho dos filtros de absorção utilizados.

Desta forma, pode-se inferir que a técnica de emenda e os DEMUXs aqui apresentados e direcionados aos enlaces WDM sobre POFs de base PMMA, podem ser de baixo custo, simples e de fácil implementação para atender as necessidades das HANs.

Outros aprimoramentos devem ser realizados até que seja alcançada uma versão final do dispositivo apresentando menores perdas e possibilitando sua comercialização. Como por exemplo, desenvolver algum método de fixação dos filtros de forma a reduzir as perdas no DEMUX.

Além dos experimentos aqui realizados, é necessário realizar testes empregando o DEMUX em um enlace POF-PMMA direcional e bidirecional para analisar seu desempenho ao passar pela fibra e medir a distância máxima permitida por este dispositivo. Outro experimento necessário, é a medição da taxa de transmissão máxima alcançada e da taxa de erros obtida quando o dispositivo se encontra em operação em condições semelhantes a da aplicação real.

## **REFERÊNCIAS BIBIOGRÁFICAS**

- BENZINHO, J. M. Avaliação Econômica de Redes FTTH em Diferentes Cenários. Universiade de Aveiro. Aveiro. 2011.
- 2. AGRAWAL, G. P. Fiber Optic Communication Systems. New Jersey: [s.n.], 2010.
- 3. ZIEMMAN, O. et al. **POF Handbook:** Optical Short Range Transmission Systems. Springer: [s.n.], v. 2<sup>a</sup> Ed, 2008.
- 4. CARVALHO, M. C. **Redes de Bragg em Fibras Ópticas Poliméricas**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2010.
- GOOGLE. Google Imagens. Disponivel em: <https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi>. Acesso em: Abril 2017.
- RODRIGUES, M. O. Fibras Ópticas de Plástico em Redes de Acesso. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. [S.1.]. 2013.
- MEDEIROS, D. S. V. Desenvolvimento de Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda em Fibras Ópticas Poliméricas para Redes Residenciais. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2013.
- RIBEIRO, R. M. Optoeletrônica e fotônica: Fibras ópticas poliméricas. Niterói: Notas de Aula, 2011.
- RUAS, P. H. D. Filtros Ópticos de Fibras Plásticas Fluorescentes para Enlaces WDM sobre Fibras Ópticas Poliméricas (POFs) de PMMA. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2011.
- 10. OPTIMEDIA, I. PMMA-baead GI-POF (OM-Giga). [S.l.]: [s.n.], 2006.
- 11. KOIKE, K.; KOIKE, Y. Design of Low-Loss Graded-Index Plastic Optical Fiber Based on Partially Fluorinated Methacrylate Polymer. [S.l.]: [s.n.], v. 27, 2009. p. 41-46. ISBN 1.
- 12. BIRLO, L. M. B. Metrologia óptica com fibra polimérica. Universidade de Aveiro. Aveiro. 2011.
- 13. ZUBIA, J.; ARRUE, J. Plastic optical fibers: An introduction to their technological

processes and applications. Optical Fiber Technology, Abril 2001. 101-140.

- 14. PEREIRA, R. J. G. Fibras ópticas e WDM. Disponivel em: <a href="http://www.gta.ufrj.br/grad/08\_1/wdm1/index.html">http://www.gta.ufrj.br/grad/08\_1/wdm1/index.html</a>. Acesso em: Janeiro 2017.
- PINHEIRO, J. M. S. Guia Completo de Cabeamento de Redes. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, v. 3° Ed., 2003.
- COELHO, S. C. R. Fibra Óptica na Rede de Acesso. Universidade de Aveiro. [S.l.]. 2009.
- 17. CTI/HKBN. **Hong Kong broadband network limited**. FTTH Conference & Expo. Nashville, Tennesee: [s.n.]. 2008. Slides de Apresentação.
- MCGUIRE, G. Enhanced cost solutions for buried fiber. FTTH Conference & Expo. Nashville, Tennesee: [s.n.]. 2008. Slides de Apresentação.
- 19. FISCHER, U. H. P.; HAUP, M.; JONCIC, M. Optical Transmission Systems Using Polymeric Fibers. **Optoelectronics Devices and Applications**, Germany, 2011.
- VISANI, D. Towards converged broadband wired and wireless in-home optical networks.
   15th International Conference on Optical Network Design and Modeling, Fevereiro 2011. 1-6.
- CÁRDENAS, D. 10 Mb/s Ethernet transmission over 425m of large core step index POF: a media converter prototype. 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2006. 46-50.
- 22. KRAGL, H. Fast Ethernet Simplex Transceivers for POF Inhouse LAN. FGT 5.4.1 Meeting. Zürich: [s.n.]. Março, 2005.
- GAUDINO, R. The use of large core POF for distance above 100 meters: technical challenges and potential applications as investigated in the EU POF-ALL project. 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2006. 342-347.
- ZIEMMAN, O. Multi channel broadband data transmission over thick optical fibers. 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2006. 359-366.
- 25. JUNGER, S.; TSCHEKALINSKIJ, W.; WEBER, N. Cable TV transmission over POF.

### 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2004. 35-39.

- JUNGER. Transmission of HDMI signals for HDTV applications using WDM and GI-POF. 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2006. 436-442.
- 27. GROSSKOPF, G. Gigabit Ethernet transmission experiments at 60 GHz. **13th** International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2004. 27-34.
- KRAGL, H.; MÖNNICH, T.; MÜLLER, G. Fast Ethernet full duplex operation over simplex 1 mm standard POF cables. 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2004. 125-132.
- 29. RICHNER, T. 1st POF house in Switzerland. 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, Setembro 2004. 40-45.
- 30. ABRATE, S.; GAUDINO, R.; PERRONE, G. Chapter 7. In: Step-index PMMA fibers and their applications. [S.l.]: InTech, 2013. p. 177-202.
- CARSON, S. D.; SALAZAR, R. A. In: Splicing plastic optical fibers, SPIE Proceedings. [S.l.]: [s.n.], v. 1592, 1991. p. 134-138.
- APOLLINARI, G.; SCEPANOVIC, D.; WHITE, S. Plastic optical fiber splicing by thermal fusion. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. [S.l.]: [s.n.], 1992. p. 520-528.
- RONDEAX, F. Use of Plastic Optical Fibers in Physics Development of a Splicing Machine for POF. 4th International Conference on Plastic Optical Fibers, Boston, EUA, 17-19 Outubro 1995. 42-47.
- OHARA, S. et al. Ultrasonic Splicing of Plastic Optical Fibers, Proceedings. 22nd International Conference on Plastic Optical Fibers, 11-13 Setembro 2013. 352-355.
- OHARA, S. et al. Ultrasonic Splicing of Polymer optical Fibres. Electronics Letters, v. 50, p. 1384-1386, 2014. ISSN 19.
- LOSADA, M. A. et al. Influence of Termination on Connector Loss for Plastic Optical Fibres. 16th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks, Graz, Austria, 06-10 Julho 2014.

- 37. OPTICS, I. F. Connector, ST Connector POF 1 mm. Disponivel em: <a href="http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=134&cat=pof">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=134&cat=pof</a>>. Acesso em: Maio 2017.
- 38. LOCTITE® 401TM. Technical Data Sheet. [S.l.]. Junho, 2007.
- 39. INDUSTRIAL FIBER OPTICS. EPO TEK 301 4-grams. EUA. Part Number 40 0005.
- 40. JOHNSON, I. P. Grating Devices in Polymer Optical Fibre. Aston University. UK. Agosto, 2011.
- 41. LOCTITE® 454TM. Technical Data Sheet. [S.l.]. Fevereiro, 2012.
- 42. DYNATEX® SUPER GLUE GEL. Dynatex Technical Data Sheet. [S.l.]. (011649433). Part Number 49433.
- 43. RICARDO, R. M. et al. Nondisturbing optical power monitor for links in the visible spectrum using a polymer optical fiber. **Measurement Science and Technology**, v. 26, p. 085201, 2015.
- 44. INDUSTRIAL FIBER OPTICS. POF Cutter Block. Disponivel em: <a href="http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=105">http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=105</a>>. Acesso em: Fevereiro 2017.
- TAKAGI, M. POF Splicing Using Ultrasonic Fusion, Proceedings of the POF World'99. Marketing POF, 28-30 Junho 1999. 78-81.
- STÅBER, T.; POISEL, H.; ZIEMMAN, O. POF Connector Preparation by Polishing.
   13th International Conference on Plastic Optical Fibres, Nuremberg, Germany, 27-30 Setembro 2004. 552-558.
- OLIVEIRA, R.; BIRLO, L.; NOGUEIRA, R. Smooth end face termination of microstructured, graded-index, and step-index polymer. Applied Optics, v. 54, p. 5629-5633, 2015. ISSN 18.
- RAMAN, R.; CIRILLO, J. Termination studies on low NA plastic optical fibres. 5th International Conference on Plastic Optical Fibres, Paris, France, 22-24 Outubro 1996. 70-77.
- 49. OPTIMEDIA INC. Optimedia Inc. Disponivel em: <a href="http://www.optimedia.co.kr/">http://www.optimedia.co.kr/</a>>.
- 50. FORNI, F. et al. Multiband 4G and Gigabit/s Baseband Transmission over Large-Core GI

and SI POFs for In-Home Networks. **25th International Conference on Plastic Optical Fibres**, Birmingham, UK, 13-15 Setembro 2016. OP15.

- MOLL, D.; POISEL, H. Polymer Optical Fiber Termination A Never Ending Story. 9th International Conference on Plastic Optical Fibres, Cambridge, USA, 5-8 Setembro 2000. Post-Deadline Paper.
- INC, R. T. Rennsteig Tools Inc. Disponivel em: <a href="http://www.rennsteig.us/">http://www.rennsteig.us/</a>. Acesso em: Fevereiro 2017.
- 53. MEDEIROS, D. S. V. Desenvolvimento de Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda em Fibras Ópticas Poliméricas para Redes Ópticas Residenciais. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2013.
- LAGE, L. B.; OLIVEIRA, M. C. Estudo de uma Rede de Acesso via Fibra Óptica. Universidade de Brasília. Brasília/DF. 2006.
- 55. MINOLI, D. Telecommunications technology handbook. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Artech House, 2003.
- 56. EDMUND OPTICS INC. Edmund Optics. Disponivel em: <http://www.edmundoptics.com/>. Acesso em: Janeiro 2013.
- 57. KASHYAP, R. Fiber Bragg Gratings. 2ª. ed. Boston: Academic Press, 2009.
- FOROUZAN, B. A. Comunicação de dados e redes de computadores. 4ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008. Tradução.
- 59. ZIEMMAN, O.; BARTKIV, L. POF-WDM, the Truth. **20th International Conference on Plastic Optical Fibers**, Bilbau, 14-16 Setembro 2011.
- HAUPT, M.; FISCHER, U. H. P. Design and development of a MUX/DEMUX element for WDM communication over SI-POF. Electronics System-Integration Technology Conference, Setembro 2008. 1257 - 1262.
- HAUPT, M.; FISCHER, U. H. P.; JONCIC, M. Integrated Optical Demultiplexer for WDM Communication Systems. Universidade de Ciências Aplicadas Harz. [S.l.]. 2016.
- 62. JONCIC, M.; HAUPT, M.; FISCHER, U. H. P. Spectral grids for VIS WDM applications over SI-POF. **20th International Conference on Plastic Optical Fibers**, Bilbau,

Setembro 2011. 14-16.

- JONCIC, M.; HAUPT, M.; FISCHER, U. H. P. Investigation on spectral grids for VIS WDM applications over SI-POF. ITG-Fachbericht: Photonische Netze, Leipzing, Maio 2013.
- SILVA, J. C. J. Espectrometria no UV-Vis.– Parte II. Universidade Federal de Juíz de Fora. [S.l.]. Junho/2013. Slides de apresentação.
- 65. CINE FOTO CENTER NOVACON DO BRASIL INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Novacon. Disponivel em: <a href="http://www.novacon.com.br/base5.htm">http://www.novacon.com.br/base5.htm</a>. Acesso em: Maio 2017.
- 66. EDMUND OPTICS INC. 50 x 50mm KG-3 Heat Absorbing Glass. Disponivel em: <a href="https://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/bandpass-filters/50-x-50mm-kg-3-heat-absorbing-glass/">https://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/bandpass-filters/50-x-50mm-kg-3-heat-absorbing-glass/</a>. Acesso em: Maio 2017.
- ROSCO DO BRASIL PRODUTOS PARA ARTES CIÊNCIAS LTDA. Guia Supergel. São Paulo.
- 68. NEEWER®. Neewer® Universal Photography. Disponivel em: <http://www.neewer.com/imaging-products/filters/other-filter-kit/10082968.html>. Acesso em: Maio 2017.
- GIOZZA, W. F.; CONFORTI, E.; WALDMAN, E. Acopladores. In: Fibras Opticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas. [S.l.]: McGraw-Hill, 1991. p. 361-369.
- BARROS, M. R. X. et al. Avaliação de Topologia para Redes GPON com Distribuição Assimétrica. CPqD Cadernos de Tecnologia, v. 3, 2007. ISSN 2. Artigo 5.
- 71. KRAGL, H. Grinded polymer fiber couplers. [S.l.]. 2004.
- 72. DIEMOUNT. Datasheet Standard 1x2 POF splitter for 1 mm polymer fiber1x2. [S.l.].
- 73. INDUSTRIAL FIBER OPTICS. POF Coupler 1 x 2. Disponivel em: <a href="http://i-fiberoptics.com/couplers-detail.php?id=4">http://i-fiberoptics.com/couplers-detail.php?id=4</a>. Acesso em: Maio 2017.
- 74. INDUSTRIAL FIBER OPTICS. Splice, POF mechanical crimp. Disponivel em: <a href="http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&subcat=>">http://i-fiberoptics.com/connector-detail.php?id=840&cat=&s

- 75. ZHANG, Y. et al. Technical study of visible light wavelength division multiplexing using polymer optical fiber. Universidade de Ciência e Tecnologia da China. Hefei. Outubro/2005.
- 76. RAHMAN, M. S. A. et al. Low-Loss Hand-Made Demultiplexer using Transparent Color Filter in WDM-POF Network for Short-Haul Communication System. Jornal of Computer Science, Malasia, v. 4, n. 8, p. 494-498, 2012.
- 77. JONCIC, M.; HAUPT, M.; FISCHER, U. H. P. Investigation on coarse WDM components and systems for four-channel Multi-Gb/s short-range transmission over 1-mm diameter step-index polymer optical fiber. Universidade de Ciências Aplicadas Harz. Berlin. 2014.
- 78. OLIVEIRA, I. A. S. Estudo e Caracterização de Fibras Ópticas Plásticas para Aplicação em Telecomunicações. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.
# ANEXOS

ANEXO I – DEMULTIPLEXADORES PARA WDM SOBRE FIBRAS ÓPTICAS
PLÁSTICAS COM BASE EM FILTROS GEL (SBRT2017)158
ANEXO II – PRATICAL PERMANENT SPLICING OF PMMA-BASEAD PLASTIC
OPTICAL FIBRES: MEASUREMENTS OF INSERT LOSS (MST)160
ANEXO III – A SIMPLE TECHNIQUE FOR PERMANENT SPLICING OF PMMA
PLASTIC OPTICAL FIBRES (ICPOF 2017) 172
ANEXO IV – DATASHEET DOS SPLITTERS 1X2 DA DIEMOUNT
ANEXO V - CATÁLOGO FILTROS-GEL DA ROSCO (SUPERGEL) 174

# **ANEXO I** – DEMULTIPLEXADORES PARA WDM SOBRE FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS COM BASE EM FILTROS GEL (SBRT2017).

#### XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBrT2017, 3-6 DE SETEMBRO DE 2017, SÃO PEDRO, SP

# Demultiplexadores para WDM sobre fibras ópticas plásticas com base em filtros gel

Rafaella D. Oliveira, Michele C. Zanon, Leonardo Campos, Ricardo M. Ribeiro e Vinícius N. H. Silva

Resumo — Este trabalho de Iniciação Científica, descreve a construção de demultiplexadores (DEMUXs) WDM (multiplexação por divisão em comprimento de onda) para uso em enlaces com fibras ópticas plásticas de PMMA (pol-imetil-metacrilato) usando lasers de diodo operando no visível. Os DEMUXs foram construídos com a combinação de divisores com filtros ópticos em plásticos gel. Estes últimos atuam como filtro óptico passa-alta ou passa-banda, são bastante práticos, simples, maleáveis e de baixo custo. Suas características espectrais de transmissão permitem algum ajuste a partir da cor do plástico, combinações e de sua espessura.

#### Palavras-chave-Redes de comunicação de dados, fibras ópticas plásticas, filme plástico gel, WDM, filtros ópticos.

Abstract — This work of Scientific Initiation describes the development of demultiplexers (DEMUXs) for wavelengthdivision multiplexing (WDM) over PMMA (poly-methylmetarcylate) plastic optical fibre links using visible laser diodes. The DEMUXs were built from the combination of POF-splitters with gel plastic filters. The latter operates as high-pass or bandpass optical filters, are practical, simple, malleable and costeffective. The filters can be spectrally tuned by mixing and stacking plastic layers with different colors and thickness.

Keywords-Data communication networks, Plastic optical fibres, Plastic films, WDM, Optical filters.

#### INTRODUÇÃO

Nos enlaces de telecomunicações em médias e longas distâncias, as fibras ópticas de sílica têm sido tradicionalmente utilizadas [1]. Entretanto, para distâncias curtas (< 1 km), as fibras ópticas poliméricas (POFs) constituem-se numa solução tecnológica interessante, pois são fáceis e seguras de manipular e conectar. Além disto, a tecnología como um todo é de custo relativamente baixo, incluindo os dispositivos optoeletrônicos necessários [2]. Sistemas WDM sobre POFs de PMMA tem sido desenvolvidos e operam com poucos canais visíveis [2] utilizando LEDs ou LDs como fontes ópticas [3,4].

Plásticos coloridos tipo gel são utilizados na área de fotografia. Estão disponíveis a baixo custo e são maleáveis. Foram então selecionados para sua possível utilização como filtro WDM no visível.

Este artigo, descreve a transmissão espectral dos filmes plásticos gel e a sua utilização na construção de demultiplexadores para enlaces WDM de 2 canais sobre POFs de PMMA.

Rafaella D. Oliveira, Michele C. Zanon, Leonardo Campos, Ricardo M. Ribeiro e Vinicius N. H. Silva, Laboratório de Comunicações Ópticas do Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterõi-RJ, Brasil, E-mail: rafaelladinizaciud.aff.br

#### II. EXPERIMENTAL

Inicialmente, os plásticos tipo celofane foram caracterizados e usados como filtros. No entanto, não msão adequados pois tendem a perder sua cor com o tempo, sua espessura (0,02 mm) o torna dificil de manusear e pode ser requerido o uso de várias camadas para obter um espectro de transmitância aceitável. Foram então escolhidos os filmes plásticos tipo gel (base polietileno) [5] pois são de baixo custo, mais robustos, possuem espessura até 10 vezes maior do que dos celofanes, podendo evitar o uso de grande número de camadas, mas ainda mantendo a maleabilidade.

A Figura 1 mostra esquematicamente o sistema experimental utilizado na medida da transmissão espectral. Uma fonte de luz "fria" injeta luz em um feixe de fibra óptica, que, por sua vez, está conectado à um suporte onde é inserido o filme plástico. A luz transmitida através do filme (filtro) é capturada por uma fibra óptica de silica com 50 µm de diâmetro de núcleo ligada à fenda de entrada de um espectrômetro-CCD (400-800 nm) controlado por computador.



Figura 1. Diagrama esquemitico da montagem experimental de caracterização da transmitância dos filtros plásticos.

A Figura 2 mostra a foto do sistema experimental utilizado na medida da transmissão espectral dos filtros.



Figura 2. Foto da montagem experimental de caracterização da transmitância dos filtros plásticos.

Neste trabalho, foram selecionados os filtros vermelho e verde pois correspondem às duas das principais janelas de transmissão das POFs de PMMA: 650 nm e 520 nm. Foi construído um demultiplexador (DEMUX) consistindo num divisor (*splitter*) 1x2 de POF, onde em cada uma das 2 extremidades de saída havia 2 camadas de filme plástico colados. Numa das saídas plástico vermelho, e na outra, verde (Figura 3).

À potência óptica injetada do laser (referência) é medida (P<sub>ref</sub>). São então medidas as potências de saída em cada braço do divisor sem e com a inserção dos filtros. Com isto, pode-se verificar os parâmteros do divisor e depois do DEMUX, ou seja, a eficiência de transmitância em cada canal e o nível de rejeição do canal eruzado.



Fig 3. Diagrama esquemático do DEMUX

#### III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico da Fig. 4 mostra a transmitância espectral dos filmes gel vermelho (passa-alta) e verde (passa-banda). O filtro verde exibe um pico em torno de 517 nm e largura espectral de 58 nm, portanto transmite 520 nm e bloqueia 650 nm. O filtro vermelho transmite sinais com comprimento de onda > 600 nm e bloqueia 520 nm.



Fig 4. Espectro de transmissão do filtro gel vermelho e do verde.

Nas Tabelas 1 e 2, estão relacionados os valores experimentais promediados dos parâmetros clássicos de operação do divisor e do DEMUX, respectivamente.

TABELA I. PARÂMETROS MEDIDOS DO DIVISOR	R (VER FIG.3 SEM OS FILTROS).
---	-------------------------------

λ (nm)	EL (dB)	IL <sub>1</sub> (dB)	IL <sub>2</sub> (dB)	CR
633	- 1,53	- 4,28	- 4,81	53/47
520	- 1,00	- 3,70	- 4,35	~54/46

TABELA II. PARÂMETROS MEDIDOS DO DEMUX (VER FIG.3).

k (nm) IL <sub>1</sub> (dB) filtro verde		IL <sub>2</sub> (dB) filtro vermelho
633	- 44,2	- 9,17
520	- 9,80	- 00

Nas Tabelas: EL = Perda total, IL = Perda no braço e CR = Razão de acoplamento.

Pode-se notar da Tab.1, que o CR é praticamente independente do comprimento de onda, conforme o esperado, e de valor próximo a 50/50 de acordo com o fabricante. Obteve-se EL igual ou melhor que 1,50 dB, o que pode ser considerado um excelente valor para um divisor de POF.

Pode-se notar da Tab.2 que a IL fica menor que 10 dB para cada braço com o respectivo filtro, enquanto que a rejeição (IL<sub>1</sub>) ao 633 nm usando o filtro verde é de 44,2 dB, o que resulta em uma razão sinal-ruido de -9,80 - (-44,2) = 34,4 dB. Esta última pode ser considerada satisfatória, ainda mais levando-se em conta o caráter preliminar deste desenvolvimento. O sinal em 520 nm é totalmente bloqueado pelo filtro vermelho, pois o medidor de potência óptica possui sensibilidade limitada em - 60 dBm (1 nW).

A Fig. 5, ilustra um exemplo de uso do DEMUX aqui apresentado em um enlace bidirecional WDM com dois canais contra-direcionais, no qual as fontes ópticas são lasers de diodo.



Figura 5. Esquema de um enlace bidirecional usando POF com 2 canais WDM.

O filtro vermelho bloqueia com eficiência a luz verde refletida pelo divisor e retro-espalhada (espalhamento Rayleigh) pela POF. De forma similar, o filtro verde atua na outra extremidade do enlace. A este fenômeno dá-se o nome de NEXT (Near-End-Cross-Talk) [2].

#### IV. CONCLUSÓES

Os plásticos gel coloridos disponíveis comercialmente para uso em fotografia, podem servir como filtros ópticos do tipo passa-banda e passa-alta no espectro visível. São de baixo custo, maleáveis e exibem características ópticas interessantes para construir DEMUXs WDM na faixa visível com foco nas fibras ópticas de plástico de PMMA, em particular para enlaces com lasers de diodo.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à Faperj pelo apoio financeiro recebido nesta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- G. P. Agrawall, "Fiber-Optic Communication System", 3<sup>st</sup> edition, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [2] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, "POF Handbeok: Optical Short Range Transmission Systems", 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [3] L. V. Bartkiv, H. Poisel and O. Ziemann, "A 3-channel POF-WDM system for transmission of VGA-signals", 12th ICPOF, September 15-17, Seattle, USA, pp. 264-270, 2003.
- [4] M. Kagami, "Visible Optical Fiber Communication", R&D Review of Toyota CRDL, vol. 40, 2, pp. 1-6, 2005.
- https://www.amazon.com/Photography-Studio-Lighting/b/ref~dp\_bc\_4?he=UTF8&node=3347871

# **ANEXO II** – PRATICAL PERMANENT SPLICING OF PMMA-BASEAD PLASTIC OPTICAL FIBRES: MEASUREMENTS OF INSERT LOSS (MST).

Page 1 of 12

AUTHOR SUBMITTED MANUSCRIPT - MST-105465

# Practical Permanent Splicing of PMMA-based Plastic Optical Fibres: Measurements of Insertion Loss

Michele C. Zanon, Vinicius N. H. Silva, Andrés P. L. Barbero and Ricardo M. Ribeiro

> Laboratório de Comunicações Ópticas Departamento de Engenharia de Telecomunicações Universidade Federal Fluminense Niterói, RJ – Brasil 24.210-240

**Abstract:** This paper describes a simple, fast, robust and cost-effective permanent splicing technique for step-index (SI), double-step-index (DSI) and graded-index (GI) PMMA-based plastic optical fibres (POFs). The technique uses a widely available low-cost transparent adhesive that is non-specifically designed for POFs. It is curable in ~2 minutes at room temperature without the use of ultra-violet light. The technique does not requires cleaning or polishing of the POF tips neither the polyethylene jacket has to be removed. An untrained person who performed the task for the first time purposefully carried out all splices.

The technique was validated by measuring the insertion loss of all splices at 520 nm wavelength by using an LED source. For each splice the reference level power was measured and all measurements were performed at the equilibrium mode distribution regime. Relatively low insertion losses of  $(0.42 \pm 0.11)$  dB,  $(0.56 \pm 0.14)$  dB and  $(0.84 \pm 0.36)$  were found for the high-NA-SI, low-NA-DSI and GI PMMA POFs, respectively. The "do-it-yourself" style splicing technique here presented is primarily useful for non-critical environments applications such as POF-home networks.

*Keywords*: Plastic Optical Fibres, Fibre Splicing, PMMA, Insertion Loss, Connectors, Home Networks.

### 1. Introduction

The quality of the optical continuity provided by connections or splices in links using either optical fibre type has been a pervasive technological issue. The technology is very well mature for silica fibres where insertion loss smaller as 0.01 dB is currently achieved by using the arc-fusion splicing technique. It is well known that the silica-fibre technology is expensive and sophisticated, generally not accessible for the end-user. On the other hand, it is quite different for plastic optical fibres (POFs). Even though is an easy-to-handle technology and cheaper than silica fibres, the connections and splices techniques available do not show the same quality. Besides, POFs are suitable for short links and small networks [1,2] and an expensive/sophisticated technology is not reasonable with POF splicing. PMMA-based POFs exhibit attenuation orders of magnitude ( $\sim 10^{10}$  times) larger than silica fibres [1,2], thus it becomes imperative the accomplishment of as lower loss splicing as possible.

Experiments using many optical adhesives prepared from dissolved PMMA fibres with several different solvents were reported [3]. The best splicing was achieved with 0.2 dB insertion loss. Three papers published in the first half of 90's report on the thermal fusion splicing between PMMA POFs [4-6]. We could not find any others publications reporting on both PMMA-based adhesive and thermal fusion techniques.

In 1999, it was published for the first time, a POF splicing technique by using ultrasonic fusion [7]. After 14 years, two papers reported [8,9] again the ultrasonic splicing technique with 1.5 dB insertion loss [9].

As a result, splices by means of (non-permanent) mechanical connectors have been used along the years [1]. After careful cleaving and polishing of POF tips [1,10], 0.5 dB insertion loss can be reached by using ST connectors [11]. Others polishing techniques have been reported using halogen lamp [12], liquid nitrogen [13] and hot blade cleaving followed by mechanical polishing [14].

This paper describes a simple, fast, robust and cost-effective permanent splicing technique for the 3 main types of PMMA-based POFs: high-NA-SI, low-NA-DSI and GI, purposefully carried out by an untrained person who performed the task for the first time. The insertion losses were measured by a simple and reliable technique for "dry-connection" and (permanent) "glued-splicing". The technique uses a non-specifically designed adhesive that is widely commercially available and rapidly curable without the need of heat or UV-light. We believe that the splicing technique reported here might be useful at least for non-critical environments such as POF-home network [1], to insert an in-line optical power monitor in a POF link [15] or for POF-based circuits under development in research laboratories.

1 2 3

### 2. Experimental

#### 2.1. The tested adhesive and their characteristics

We have tried several types of adhesive. The first one, the cyanoacrylate, which is sold in Brazil, is a fast-cure adhesive called "Original Superbonder" [16]. But since the cure of such adhesive is very fast we could not control the alignment between the POFs and the results were catastrophic. Indeed, the expansion due the polymerization causes a significant longitudinal misalignment between the fibres. The insertion losses of few dB's were very high, which is unacceptable for practical purposes. The misalignment with very fast curable epoxy is also reported on [17].

The second choice was the Epotek-301 adhesive [18], but also with poor results. The cure of such adhesive finishes after 24h and after we have observed axial misalignment between the POFs due to the polymerization. The misalignment with very fast curable epoxy is also reported on [18]. Furthermore, the Epotek-301 adhesive is not manufactured in Brazil, it should be stored in a freezer and it has a relatively short expiration date. Furthermore, it is a binary adhesive and when mixed it must be used in 1h maximum. The not used amount is unavoidably wasted. In [19] is reported a technique of splicing between silica fibre with PMMA POF by using the Loctite 3525 but it is an UV-curable adhesive.

At last, we tested the Loctite<sup>®</sup> 454<sup>™</sup> Gel, also sold in Brazil since February 2013 with the brand name of "Superbonder Gel" [20]. Such adhesive is made from cyanoacrylate mixed with a not specified fraction of rubber and the operational temperature is between -40 °C and + 120 °C range. The Loctite<sup>®</sup> 454<sup>™</sup> Gel is widely available in the market at a low price (around US\$ 2/blister of 2g). The cure is almost fully completed in ~2 minutes. This allows an easy manual fit between the POF tips inside the sleeves while the curing process. As a result, a very good alignment and small transmitting loss are achievable. The manufacturer does not disclose the refractive index of the Loctite<sup>®</sup> 454<sup>™</sup> Gel. However, the Dynatex provides n = 1.49 for their Dynatex<sup>®</sup> Super Glue Gel based on Ethyl Cyanoacrylate Gel [21]. We believe that is reasonable to assume n = 1.49 for the Superbonder Gel once is polymerized. An n = 1.49 perfectly matches with the widely accepted 1.492 refractive index for the SI and DSI PMMA-POF core.

### 2.2. The sleeves

In order to help the alignment of the fibres that will be spliced, we have made cylindrical sleeves of 15mm length and 6mm diameter from aluminium and painted in black. Each the sleeve was concentrically drilled by a 2.2 mm diameter drill. This simple device allows the passive alignment of two POF pieces without the need to remove their polyetilene jacket. Figure 1 shows the picture of two of these sleeves, one with and the other without the insertion of 2.2mm POF cable. The aim is to show the small form factor.



Figure 1 – The picture of two of the aluminium sleeves one with and the other without the insertion of 2.2mm POF cable.

### 2.3. The splicing and measurement of insertion loss

Figures 2a-f shows the step-by-step procedure to build a permanent splice in a "POF under test". Also, it shows together the insertion loss measurement set-up as shown at Fig. 3.

At first (Fig. 2a), the "POF under test" is introduced into the alignment sleeve, shown at Fig. 1, passing through the cleaver (Fiber Optic Cutting Block - Edmund Optics) with fresh blades [11]. The metallic sleeve fit tightly the 2.2mm jacketed POFs.

At second (Fig. 2b), the "POF under test" is cleaved. Notice, that the PMMA is a relatively hard and brittle that makes it difficult to make a perfect cut. The best method to cut a plastic fibre is cutting with its jacket. The quality of a splice is dependent upon the ability of cutting the plastic fibres without destroying the cladding. A destroyed cladding would result in higher insertion losses. It is relatively easy to cut a jacketed plastic fibre because the jacket supports the bare fibre (core + cladding). Two segments of fibre to be spliced were produced, POF1 and POF2. It should be remembered that the two POF ends to be spliced are *not* polished neither by lapping films, hot plate or other.



Figure 2 - The mounting procedure of the adhesive-based splices: (a) the "POF under test" is introduced into the both sleeve and cleaver (b) the "POF under test" is cleaved (c) the POF<sub>1</sub> is glued in the sleeve by using Original Superbonder and a small drop of Superbonder Gel is applied onto the tip of the POF<sub>2</sub> (d) both POF<sub>1</sub> and POF<sub>2</sub> segments are joined one against other in such a way that a thick film of cured Superbonder Gel is formed approximately in the middle of the sleeve cavity length (e) the POF<sub>2</sub> is glued in the sleeve by using Original Superbonder and (f) a high-strength adhesive may be applied on both sides of the sleeve.

In the third step (Fig. 2c), the POF<sub>1</sub> is pulled and fitted in such a way that their tip remains close to the middle of the sleeve length. In order to glue the POF<sub>1</sub>, a drop of Original Superbonder is applied as shown in the Figure 2c. Is also shown in Figure 2c, that a small drop of Loctite<sup>®</sup> 454<sup>\*\*</sup> Gel is applied on the cleaved tip of the POF<sub>2</sub> to be spliced with the POF<sub>1</sub>. By gluing the PE jacket in the internal wall of the sleeve the cladding does not damage and the insertion loss does not increase. No crimping is required, as a result none additional loss is introduced.

In the fourth step (Fig. 2d), the POF<sub>2</sub> should be carefully introduced into the sleeve until it touches the POF<sub>1</sub>. During  $\sim$ 2 minutes the POF<sub>2</sub> should be manually pushed and pressed against the POF<sub>1</sub> with a thick glue gel film between them.

In the fifty step (Fig. 2e), after  $\sim$ 2 minutes a drop of Original Superbonder is applied in the POF<sub>2</sub> to glue it to the internal wall of the cavity. In order to obtain an even stronger adhesion, further high-strength glue may be applied in the way as shown in Fig. 2f.

Figure 3 shows the experimental set-up designed to measure the insertion loss of each mounted POF-splice. The light source was a Diemount POF-coupled LED emitting at 520 nm. In multimode fibres, the connector or splice attenuation depends on the mode distribution and thus on the coupling conditions as well the fibre length [1]. Therefore, the light traverses a standard JIS6863 mode-scrambler and is launched in the "POF under test". The latter is mechanically connected to the circuit in order to ensure the repeatability of the measurements. At last, the POF-pigtail is connected to an optical power meter (OPM) through a FC/PC connector.



Figure 3 - The experimental set-up to measure the insertion loss of each mounted POF-splice.

The reference power level #1 is measured as  $P_{ref1}$ . The "POF under test" is cleaved and both tips are placed into de sleeve without the glue. The power level #1 of transmitted light is measured as  $P_{d1}$ , where "d" stands for "dry-connection". The splicing procedure as described in section 2.3 is performed and the power level #1 of transmitted light is measured as  $P_{g1}$ , where "g" stands for "glued-splicing". During the adhesive cure the POF<sub>2</sub> should be pushed and pressed against the POF<sub>1</sub> while the transmitted optical power is monitored. Hereafter, the POF segment containing the mounted splice is cut-off and discarded. The remaining "POF under test" is re-connected to the OPM (as is shown in Figure 3). A *new* reference power level #2 of light is measured as  $P_{ref2}$ . The remaining procedure to obtain the  $P_{d2}$  and  $P_{g2}$  is *exactly* the same. In our experiment, we used a kind of cutback technique, thus the measurements were carried out until the "POF under test" became extremely short. This way, the number of permanent-splice samples was 10 for each POF type in the present paper leading to a total of 120 measurements.

### 3. Results and discussions

### 3.1 - The results

The average insertion loss (in dB) of the "dry-connection"  $\langle IL_d \rangle$  and the "glued-splicing"  $\langle IL_g \rangle$  is calculated from (1) and (2) where  $\langle \rangle$  stands for the average calculation:

$$\langle IL_d \rangle = 10 \log \left[ \langle \frac{P_d}{P_{ref}} \rangle \right]$$
 (1)

$$\langle IL_g \rangle = 10 \log \left[ \langle \frac{P_g}{P_{ref}} \rangle \right]$$
 (2)

At first, the procedure described in section 2.3 was performed by a *trained* person. However, only 3 measurements were done for a standard POF because the blade was blunt. Thus, the average insertion loss (IL<sub>d</sub>) for the "dry-connection" was very high at 5.62 dB. By merely changing the blade by sharpened one the IL<sub>d</sub> was significantly reduced down to 1.40 dB. This is quite consistent of those reported in [14]. Besides it shows the need of using sharpened blades for POF cleavage & connections. The best result for the "dry-connection" was IL<sub>d</sub> = 1.09 dB and after applying the Superbonder Gel it was reduced down to IL<sub>g</sub> = 0.35 dB. Such achievements were easily reproducible.

Furthermore, the measurement steps were purposefully performed by an *untrained* person who performed the task for the first time. Table 1 shows the average and standard deviation calculations of the measurements in dB of IL<sub>d</sub> ("dry-connection") and IL<sub>g</sub> ("glued-splicing" or permanent-splicing) for each type of PMMA-based POF available in the market.

Table 1 – The average and standard deviation calculations of the measurement results of the  $IL_d$  ("dry-connections") and  $IL_g$  ("glued-splices") for the 3 of the main types of PMMA-based POFs available in the market.

PMMA-based POF	IL <sub>d</sub> (dB)	ILg(dB)
Standard high-NA-SI (Toray PFU-CD1001-22-E1 mm)	$1.40 \pm 0.50$	$0.42 \pm 0.11$
Low-NA-DSI (Toray PMU- CD1002-22-E1 mm)	$1.94 \pm 0.51$	$0.56 \pm 0.14$
GI (Optimedia OMJ-Giga/FF-GI- SE100 1mm)	2.15 ± 0.64	0.84 ± 0.36

Figure 4 shows a magnified photography of the spliced region between two standard POFs. The ~0.4mm thickness of the cured Superbonder Gel thick film corresponding to  $IL_g = 1.01 \text{ dB}$  were both measured.



Figure 4 – The magnified photography of the cured thick film of Superbonder Gel splicing two segments of standard POFs, as can be seen in the middle of the picture. In the bottom is shown the mm scale. The estimated thickness of the film is around 0.4 mm.

#### 3.2 - Discussions: standard-SI PMMA POFs

The measured  $\langle IL_d \rangle = 1.40$  dB was the same when performed by a trained or untrained person. Such result shows the good quality, i.e. the concentricity of the core of POFs, and the reproducibility by the use of both sharpened blades and metallic sleeve drilled with a 2.2 mm diameter drill. By using the Superbonder Gel adhesive, an  $\langle IL_R \rangle = 0.42$  dB was achieved that is comparable or even better to the best results reported in the literature [3,7-9,10-14]. Moreover, the technique proved to be "do-it-yourself" by a regular untrained end user.

It should be observed that the standard deviation of the "dry-connection" measurements at 0.50 is relatively high when compared with the 1.40 dB average value. This relatively high fluctuation is due the fact that each cleavage does not allow a good control of the POF surface. As a result, the scattering effect varies remarkably. However, when the gel adhesive is applied, the standard deviation is significantly reduced down to 0.11 dB. Besides the elimination of the air gap, the adhesive matches the refractive index between the POFs and fill the micro-voids on the surfaces not perfectly flat. This quite reduces the fluctuations between the measurements.

The insertion loss due the Fresnel reflections for standard high-NA-SI POFs by assuming 2 interfaces as PMMA/air and air/PMMA can be calculated from.

$$IL_{Fresnel} = -10 \log \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{n_{PMMA} - n_{AIR}}{n_{PMMA} + n_{AIR}} \right)^2 \right]^2 \right\}$$
(3)

By using  $n_{PMMA} = 1.492$  and  $n_{AIR} = 1$  it was calculated  $IL_{Fresnel} = 0.345$  dB. However, after curing of the Superbonder Gel it is produced a thick polymeric film with an almost matching refractive index of 1.49 (see Fig.4). Therefore, it is likely that the Fresnel loss becomes negligible.

 From [22] the insertion loss  $(IL_g)$  of a splice due to the longitudinal misalignment for standard PMMA-POF in Uniform Mode Distribution (UMD) condition can be calculated through.

$$IL_g = -10\log\left(1 - \frac{2s}{3}\frac{NA}{nD}\right) \tag{4}$$

The "s", "NA", "n" and "D" stands for the distance between the POF tips, the numerical aperture, the refractive index of the cured Superbonder Gel and diameter of the core, respectively. By assuming that the main mechanism responsible for the insertion loss of "glued-splicing" is the longitudinal misalignment, we have set ILg = -1.01 dB, NA = 0.50, n =1.49 and D = 980  $\mu$ m and obtained using (4) s ~ 0.91mm. Using the same equation (4), but setting the film thickness to 0.4mm, one obtains an underestimated value of ILg ~0.42 dB (< 1.01 dB). Two possible explanations for the discrepancies are proposed:

1°) The cured Superbonder Gel film is not homogeneous. Therefore, the light scatters along  $\sim$ 0.4mm, thus contributing to increase the measured IL<sub>g</sub>.

2°) The equation (4) is valid only for light in the UMD condition propagating along the POF. However, all the IL measurements were accomplished in the Equilibrium Mode Distribution (EMD) by using a mode-scrambler just after the light source as can be seen in the experimental set-up shown at Fig.3. As a result, another possible contribution to the overestimated value of  $s \approx 0.91$ mm is due to the validity of equation (4) for only the UMD condition.

The typical insertion loss values for polished connectors specified by several manufactures are in the range between 0.6 dB and 1.6 dB [1,14]. On the other side, good glass fibre connections attain losses in the range of 0.1 dB to 0.5 dB. In this way, we believe our  $\langle IL_g \rangle = 0.42$  dB is an outstanding result.

#### 3.3 - Discussions: DSI PMMA POFs

The low-NA-DSI POF presented  $\langle IL_d \rangle = 1.94$  dB and  $\langle IL_g \rangle = 0.56$  dB. As is expected, both values are higher than the achieved insertion losses for the standard high-NA-SI POF. The respective standard deviations are comparable (see Table 1).

The slightly increase of the  $\langle IL_g \rangle$  from 0.42 dB of the high-NA-SI POF to 0.56 dB of low-NA-DSI POF, may be due the index profile of the later that is a little bit more complex than the standard one. This causes more difficulties in the alignments between the POFs during the adhesive cure. The  $IL_g = (0.56 \pm 0.14)$  dB result is also promised and can be compared with the (0.61  $\pm$  0.18) dB insertion loss reported in [23] for low-NA POF but performing connection by using polishing.

#### 3.4 - Discussions: GI PMMA POFs

The GI-PMMA-POFs are more limited due the higher attenuation than the standard POF one. Spectral attenuations of ~ 225 dB/km (590 nm), ~190 dB/km (650 nm) and ~ 600 dB/km (780 nm) were reported for P3FMA GI-POF [24]. Therefore, the GI-PMMA-POFs mainly use is around 650nm (red channel) but once again with higher attenuation when compared with the standard POF. Furthermore, in the best of our knowledgement, there is only one manufacturer of GI-PMMA-POF [25] in the world that limits the use of this technology. However, such fibres are interesting since it presents 1mm core diameter, flexibility, operates in the visible spectra and it has around 15x more bandwidth than the standard POFs. The size of PMMA-GI-POFs makes it easy to handle in comparison with the PF-GI-POFs and is an interesting intermediary alternative for home-networks [26].

As is shown at Table 1, the GI POF presented  $\langle IL_d \rangle = 2.15$  dB and  $\langle IL_g \rangle = 0.84$  dB. Both values are higher than the achieved insertion losses for the low-NA-DSI POF. The respective standard deviations are also greater. A possible explanation may be due the fact that GI POFs is more sensitive to lateral alignment during the cure process of the splicing adhesive. Since the GI-PMMA has a graded-index profile from r = 0 to it radii (~490 µm) and NA around 0.20, the precision requirements for the splicing is higher. Furthermore the EMD condition is guaranteed for SI-POFs by using the JIS6863 mode-scrambler but not necessarily for GI-POFs. These may influence the higher average and standard deviations achieved for GI-POFs.

#### 4. Summary and conclusions

We have presented a practical, simple, cost-effective, fast and efficient permanent splicing technique for PMMA-based POFs that is "proof-of-operator'sskill". The reduction of the insertion loss after application of the Superbonder Gel in the "dry connections" is reported for each of the main types of PMMA-based POFs. Indeed the present technique makes use of low cost consumables, widely available and secure.

The  $\langle IL_g \rangle = 0.42$  dB measured for the standard POF is comparable or even smaller than many of those reported in the literature with more laborious techniques. The  $\langle IL_g \rangle = 0.56$  dB for the low-NA-SI POF was similar to the  $\langle IL_g \rangle = 0.42$  dB for the high-NA-SDI POF. Therefore, the result is also assumed to be good and comparable to the 0.61 dB already reported but by using careful polishing [23].

The  $\langle IL_g \rangle = 0.84$  dB for the GI POF is still reasonable, but as is expected worse than  $\langle IL_g \rangle = 0.42$  dB for the standard POF. The critical lateral alignment may explain such  $\langle IL_g \rangle$  increase. Anyway, the  $\langle IL_g \rangle = 0.84$  dB can be compared with the typical IL obtained with mechanical connectors with carefully polished POFs. Unfortunately, none similar measurement was found in the literature regarding the permanent splicing of GI PMMA POFs.

Regarding a trained operator using cleaning procedures, more sophisticated/expensive techniques and tools, microtome cut [1] or POF-Press-Cut techniques [27,28], we believe it is likely to reach  $\langle IL_g \rangle < 0.3$  dB without difficulties.

5 6 7

8

13 14 15

16

17

18

19

20 21

22

23

24

25

26 27

28

29

30

31

32 33

34 35

36

37

38 39

40

41

42

43 44

45

46

47

48

49

50 51

52

53

54

55 56

57

58

59

60

### Acknowledgements

The authors would like to thank the financial support provided by the Brazilian R&D agencies Faperj and CNPq/MCTI.

### References

[1] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, "POF Handbook: Optical Short Range Transmission System", 2nd edition, Springer-Verlag, 2008. [2] S. Abrate, R. Gaudino and G. Perrone, "Step-index PMMA fibers and their applications", InTech, Chapter 7, pp. 177-202, June 2013. [3] Susan D. Carson and Roberto A. Salazar, "Splicing plastic optical fibers", SPIE Proceedings, vol. 1592, pp. 134-138 (1991). [4] Giorgio Apollinari, Dragoslav Scepanovic and Sebastian White, "Plastic optical fiber splicing by thermal fusion", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 311, pp. 520-528 (1992). [5] K. Hara et al, "Heat splicing of plastic fibers using a PEEK tube", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 348, pp. 139-146 (1994). [6] F. Rondeax, "Use of Plastic Optical Fibers in Physics Development of a Splicing Machine for POF", Proceedings of the 4th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 1995), pp. 42-47, Boston, USA, October 17-19 (1995). [7] Masakazu Takagi, "POF Splicing Using Ultrasonic Fusion", Proceedings of the POF World'99: Marketing POF, pp. 78-81, San Jose, USA, June 28-30 (1999). [8] S. Ohara, N. Hayashi, Y. Mizuno and K. Nakamura, "Ultrasonic Splicing of Plastic Optical Fibers", Proceedings of the 22nd International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF 2013), pp. 352-355, Armação dos Búzios, Brasil, September 11-13 (2013). [9] Y. Mizuno, S. Ohara, N. Hayashi and K. Nakamura, "Ultrasonic splicing of polymer optical fibres", Electronics Letters, vol. 50, No 19, pp. 1384-1386 (2014). [10] Tobias Stäber, Hans Poisel and Olaf Ziemann, "POF Connector Preparation by Polishing", Proceedings of the 13th International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF 2004), pp. 552-558, Nuremberg, Germany, September 27-30 (2004). [11] M. A. Losada, F.A. Domínguez-Chapman, J. Mateo, A. López and J. Zubia, "Influence of Termination on Connector Loss for Plastic Optical Fibres", Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2014), paper Mo.C7.4, Graz, Austria, July 06-10 (2014). [12] Alexander Ankele and Wolfgang Langhoff, "Process for the Fiber End Facet Termination of Polymer Optical Fibers Using Halogen Light", Proceedings of the Eurocable Conference (EC 2000), pp. 286-291, Stuttgart, Germany, June 5-7 (2000).[13] Marcelo Vaca Pereira Ghirghi, Vladimir P. Minkovich and Armando Garcia Villegas, "Polymer Optical Fiber Termination With Use of Liquid Nitrogen", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, No. 5, pp. 516-519 (2014). [14] Ricardo Oliveira, Lúcia Bilro and Rogério Nogueira, "Smooth end face termination of microstructured, graded-index, and step-index polymer", Applied Optics, vol. 54, No. 18, pp. 5629-5633 (2015).

3 4 5 [15] 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 a polymer optical fibre", Measurement Science and Technology, vol. 26, No 8, pp. 085201 (2015). [16] Technical Data Sheet, Loctite® 401<sup>™</sup>, June, 2007. [17] M.S. Chychlowski, S. Ertman and T. R. Wolinski, "Chemical and photo-chemical bonding of polymer and silica fibres", Photonics Letters of Poland, vol. 6, No 3, pp. 111-113 (2014). [18] EPO TEK 301 4-grams, Part Number 40 0005, Industrial Fiber Optics, USA. [19] Ian Paul Johnson, "Grating Devices in Polymer Optical Fibre", PhD Thesis, Aston University, UK, August 2011. [20] Technical Data Sheet, Loctite® 454™, February, 2012. [21] Dynatex Technical Data Sheet, Dynatex® Super Glue Gel, Part Number 49433,011649433. [22] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, "POF Handbook: Optical Short Range Transmission System", pp. 259-268, 2nd edition, Springer-Verlag, 2008. [23] R. Raman and J. Cirillo, "Termination studies on low NA plastic optical fibres", Proceedings of the 5th International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF 1996), pp. 70-77, Paris, France, October 22-24 (1996). [24] K. Koike and Y. Koike, "Design of Low-Loss Graded-Index Plastic Optical Fiber Based on Partially Fluorinated Methacrylate Polymer", vol. 27, No 1, pp. 41-46 (2009). [25] Optimedia Inc. (www.optimedia.co.kr). [26] F. Forni, Y. Shi, H. P. A. van der Boom, E. Tangdiongga and A. M. J. Koonen, "Multiband 4G and Gigabit/s Baseband Transmission over Large-Core GI and SI POFs for In-Home Networks", Proceedings of the 25th International Conference on Plastic Optical Fibres (POF 2016), paper OP15, Birmingham, UK, September 13-15 (2016). [27] D. Moll and H. Poisel, "Polymer Optical Fiber Termination - A Never Ending Story?", Proceedings of the 9th International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF 2000), Post-Deadline Paper, Cambridge, USA, September 5-8 (2000). [28] Rennsteig Tools Inc. (www.rennsteig.us). 

# **ANEXO III** – A SIMPLE TECHNIQUE FOR PERMANENT SPLICING OF PMMA PLASTIC OPTICAL FIBRES (ICPOF 2017)



### A Simple Technique for Permanent Splicing of PMMA Plastic Optical Fibres

Michele C. Zanon<sup>\*</sup>, Vinicius N.H. Silva, Andrés P.L. Barbero and Ricardo M. Ribeiro Laboratório de Comunicações Ópticas, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ-Brasil, 24.210-240 \*Corresponding author: michelezanon@gmail.com

The quality of the optical continuity provided by connections or splices in links using either optical fibre type has been a pervasive technological issue. The technology is very well mature for silica fibres where insertion loss as smaller as 0.01 dB is currently achieved by using the arc-fusion splicing technique. It is well known that the silica-fibre technology is expensive and sophisticated, generally not accessible for the end-user. On the other hand, it is quite different for plastic optical fibres (POFs). Even though is an easy-to-handle technology and cheaper than silica fibres, the connections and splices techniques available do not show the same quality. Besides, POFs are suitable for short links and small networks [1] and an expensive/sophisticated technology generally does not match with POF splicing. PMMA-based POFs exhibit attenuation order of magnitude larger than silica fibres [1,2], thus it becomes imperative the accomplishment of as lower loss splicing (when is needed) as possible. This paper describes a simple, fast, robust and inexpensive permanent splicing technique for step-index (SI), double-step-index (DSI) and graded-index (GI) PMMA-based POFs. The technique uses a widely commercially available low-cost transparent adhesive non-specifically designed for POFs. It is curable in ~2 minutes at room temperature without the use of ultra-violet light. The technique does not need cleaning or polishing of the POF tips neither the polyethylene jacket has to be removed. All the splices were purposely performed by a non-trained personnel doing the task for the first time. It was used a simple and reliable insertion loss measurement technique based on variable reference level at 520 nm wavelength (LED). Insertion losses of (0.42 ± 0.11) dB, (0.56 ± 0.14) dB and (0.84 ± 0.36) were found for the high-NA-SI, low-NA-DSI and GI POFs, respectively. The presented "do-it-yourself" style splicing technique may be useful for non-critical environments as in POF-home networks.

 O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, "POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems", 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, 2008.

[2] S. Abrate, R. Gaudino and G. Perrone, "Step-index PMMA fibers and their applications", InTech, Chapter 7, pp. 177-202, June 2013.

Key word(s)	Plastic	Optical	Fibres,	Splicing,	Insertior	Loss,	Connection,	Home
	Networ	k.						
Preferred presentation method	D	Ora	ıl		D Poste	r		

### ANEXO IV – DATASHEET DOS SPLITTERS 1X2 DA DIEMOUNT



### Description:

Assembled from two branches of partially polished standard POF (1mm POF, NA = 0.5) this standard optical 1x2 POF splitter component splits up the light of the input POF to two equal portions (50:50 symmetry) in the output branches.

The standard splitter comes with a metallic input ferrule for 2.2mm diameter POF cable (see figure below first line right). Two bare fiber output branches are connected via a 2.2mm cable jacket to the output cable ferrules (see figure below, second line).



Inside the splitter device there is no metallic crosstalk protection, like typically used in low cross talk splitters. As a result the cross talk attenuation is low (see technical data below). The splitter is well suitable for all applications that need POF signal splitting to 2 branches, e.g. for monitoring applications.

Due to the low cross talk attenuation this splitter is not suitable for full duplex data transmission over one fiber core.

### Technical Data standard 1x2 symmetry splitter:

type	splitting ratio (%)	excess loss (dB)			cross talk (dB)
	typical	min. typ. max.			typical
standard splitter	50 : 50 (± 10%)	0.9	1.4	2.5	15



# Conheça Supergel

SUPERGEL é de todas as gelatinas de cor existentes, a que mais resiste ao calor, pois foi desenvolvida para suportar as altas temperaturas dos refletores e projetores de última geração, sendo fabricada com as mais rígidas normas de segurança em vigor atualmente no mundo, para teatro, estúdios, televisão, cinema e eventos. São realmente autoextinguíveis, por isso merecem as classificações M1 na França e Espanha, B1 nas normas Din 4102-01 da Alemanha e superam as novas e mais exigentes normas Inglesas.

O objetivo deste guia é ajudar profissionais e usuários, a explorar sua criatividade através do uso das cores e suas aplicações para assim, proporcionar efeitos surpreendentes e harmônicos em seus espetáculos com o uso dos filtros Rosco Supergel.



O Rolos: 61 centímetros x 7,50 metros

Em todos os distribuidores Rosco do mundo, os produtos Supergel estão disponíveis. Peça hoje mesmo aos nossos distribuidores ou em um de nossos escritórios, mostruário e literatura técnica.

# Filtros de Cor Resistentes

# Fabricação de filtros de cor resistente a altas temperaturas

Um filtro de cor combina elementos de refração de luz e pigmentos orgânicos, que podem estar misturados a uma base transparente ou aplicados sobre a superfície.

A Rosco começou a produzir gelatinas (filtros de cor) em 1910, porém desde 1950 os filtros começaram a ser produzidos em plástico. Dentre esses, o policarbonato é o material mais resistente entre os polímeros existentes, por isso é utilizado na linha Supergel, sendo este seu maior diferencial.

Existem atualmente três métodos empregados para integrar pigmentos ao polímero, criando assim os filtros de cor descritos como: *Pigmentação de Superfície; Pigmentação Profunda; Corpo Colorido.* 

# Poliéster com Pigmentação de Superfície

O jeito mais fácil de se produzir uma gelatina é simplesmente tingir a superfície de uma base de

filme plástico. Filme de poliéster (PET) é muito utilizado como base para coloração, porque seu custo é muito baixo e aceita pigmentos a base de solventes, sendo tingidos com pigmentos em um ou dois lados da sua superfície.

Como o processo não utiliza calor para tingir o material, o pigmento usado não precisa ser resistente ao calor.

*Teste:* Para identificar o método de fabricação do filtro, passe solvente (removedor de esmalte) sobre a película. Caso a tinta seja retirada, trata-se de um filme com pigmentação de superfície.

# Poliéster com Pigmentação Profunda

Também produzido em poliéster transparente, neste processo o filme recebe banho de solvente

\*

aquecido e acrescido de pigmentos de cor. O solvente incha o filme, expandindo a estrutura do polímero e permitindo que as moléculas penetrem na superfície. O filme é então lavado e o polímero volta a sua forma original, prendendo as moléculas de pigmento abaixo da superfície. Ou seja, é necessária maior temperatura para que as partículas de cor consigam chegar à superfície, dificultando a perda de cor.

# Policarbonato com o Corpo Colorido (Supergel)

Neste filtro, o corante é inerente à base de policarbonato, alterando o processo de coloração, da qual irá iniciar com uma resina em pó e pigmento de cor, submetidos a intensa pressão e temperatura de até 315°C, formando a massa de resina derretida e pigmento de cor com textura parecida ao do mel.

Essa mistura é extrudada, através dos orifícios da película e origina o corpo colorido, que é o filme de 61 cm de largura.

A excelente qualidade desse filtro é resultado de sua incrível capacidade de resistir a altas temperaturas, combinada a exclusiva técnica de selar a cor entre as camadas. Para a cor desbotar por sublimação, as moléculas precisam migrar para fora da camada interior de massa colorida e também pelas camadas transparentes que selam o filme.

O pigmento de qualquer filtro de cor pode, eventualmente, migrar da área que sofre maior calor, estando diretamente ligado ao método de tingimento do filtro. Desta maneira, um filtro de cor tingido apenas na superfície, desbotará mais rapidamente do que um filtro selado.



# Iluminação de Palco

Em uma produção, a iluminação do palco é mais do que apenas iluminar os atores e o cenário - *é uma arte* - porque qualquer decisão que o light-designer fizer, deve contribuir para a emoção e sensação do público que assiste ao espetáculo.

Decisões sobre as cores que vão ser utilizadas, provavelmente, são umas das mais importantes no teatro, shows e eventos, pois todas as referências visuais do público estão, mais ligadas às cores do que a qualquer outra variável, contribuindo para que se obtenha a reação esperada para cada palavra, som e ação realizada no palco. Além disso, a iluminação de um espetáculo tem inúmeras funções nas produções modernas, já que se pode iluminar ator e cenário ou apenas conciliá-los e até agregar informações como: Tempo, local e espaço.

Hoje em dia, a iluminação do palco é totalmente controlada. É possível selecionar e mudar uma extensa gama de variáveis para tornar a tarefa cada vez mais bem sucedida. Entre essas variáveis estão o contraste, textura, intensidade, cores e movimento, que criam a atmosfera ideal para sensações e emoções.

### -Cor do Palco

O homem, normalmente, percebe as sensações através das cores do ambiente, ou seja, é a variável mais significante quando tratamos de emoções.

O principal objetivo deste guia é mostrar opções de aplicação dentro do processo criativo de um light-designer, já que a Rosco possui grande variedade de filtros de qualidade disponíveis e que podem ser aplicados de diferentes formas, para garantir o resultado esperado.

Quando se seleciona uma cor dentro de uma vasta variedade de cores disponíveis, deve-se fazer o máximo para conseguir o melhor resultado, aliando a iluminação, a cena e a emoção atribuída a ela. Por isso, o -Por que?

# Iluminação colorida é o resultado de três critérios:

A cor predominante a ser utilizada no espetáculo (cor que iluminará o tema)

A variação das cores (filtro a ser utilizado) e variação da luz (refletores)

### A cena a ser iluminada

Todas as cores percorrem um longo caminho até serem percebidas pelo cérebro e isso, pode influenciar no jeito em que o público as enxerga. Por isso a escolha da cor predominante que iluminará o espetáculo é, habitualmente, estudada e selecionada pelo diretor. Já a variação de cores e a cena a ser iluminada é responsabilidade do light-designer, com o objetivo de promover a correta reação do espectador, adequando a luz à cena em questão.

Para o controle de intensidade, textura e cor a ser colocada em cena é, importante saber escolher os equipamentos. Fontes de luz com lâmpada de tungstênio-halogênio de alta intensidade (650w até 2000w) costumam apresentar cores mais frias e com maior qualidade que as de baixa intensidade (200w a 500w), realçando e possibilitando melhor resultado no uso dos filtros de cor.

Um filtro de cor colocado na frente de uma fonte de luz é a melhor maneira de alterar a cor da luz. Normalmente, na iluminação de palcos modernos, a luz é colorida com um filtro de cor autoextinguível, em caso de incêndio. A linha Rosco Supergel oferece mais de 140 cores, bem como filtros difusores e outros materiais que podem ser utilizados para modificar ou adaptar a qualidade da luz gerada pelos refletores.

# -Como?

O correto e melhor para a produção de um espetáculo, é escolher as cores no desenvolvimento do projeto. Quando estiver lendo a peça, anote na margem a cor idealizada para a cena, se atentando ao tema, fala do ator, música e ação do momento, por exemplo, um pôr do sol. Adotar esse procedimento pode ser muito útil e facilitar o trabalho da produção.

Mesmo que as cores previamente selecionadas não sejam utilizadas, elas ajudam o light-designer a fazer um índice da peça com palavras chaves, como angústia ou assassinato, da qual expressam as emoções sentidas ao ler uma peça.

# Colorindo as Luzes do Palco

As cores das luzes que iluminam o palco podem ser organizadas em várias famílias. Com tanta variedade de cores disponíveis, categorizá-las é necessário para auxiliar o designer a fazer as escolhas certas o mais rápido possível durante uma produção.

Os filtros funcionam de forma subtrativa, isso significa que eles retiram as cores da luz que estão associadas à cor do filtro. Por exemplo, um filtro vermelho remove o azul e o verde do espectro e deixa passar somente o vermelho. As luzes azul e verde são absorvidas pelo filtro em forma de calor e parte dessa luz também pode ser refletida.

### —Famílias

As categorias são muito utilizadas para analisar as diferentes opções de cores, porém a arte desenvolvida pelo light-designer deve sempre se basear em percepções e sensações pessoais e não simplesmente se ater a regras que limitam o profissional, que bloqueiam a ousadia e criação no ato de inovar.

### Luz Branca

É um estágio inicial - *teste* - sem filtros coloridos. A cor dessa luz pode variar de acordo com o tipo e a intensidade (watts) da lâmpada que ilumina o palco e também, depende das configurações do dimmer, que quanto mais baixo, mais a cor se aproxima do âmbar.

# Saturadas

São cores saturadas os azuis, vermelhos e verdes. Quanto maior a proximidade com as cores primárias, mais saturada é a cor.

Como as cores são, teoricamente, puras, muita luz é filtrada e por isso é necessária mais luz para conseguir uma iluminação satisfatória. Por serem muito fortes, as cores saturadas devem ser tratadas com cuidado para iluminar o palco, pois modificam drasticamente a cor dos atores e cenário, podendo causar efeitos indesejáveis e fadiga aos olhos do público.

### Pastéis

Possuem baixa concentração de elementos capazes de filtrar e por isso, proporcionam cores muito próximas a luz branca. Permitem alta transmissão de luz e por isso são muito eficientes para a iluminação de palcos.

Outra aplicação que obtém ótimo resultado é, para iluminar o rosto dos atores ou destacar cores no figurino e cenário.

# Filtros Corretivos

A popularidade desses filtros está aumentando, especialmente na dramaturgia realista. Essa família inclui desde filtros de correção de cores (azul e âmbar) desenvolvidos para o cinema e para a televisão, até os chocolates e cinzas.

### —Intensidade

A cor no teatro, como já vimos é o resultado da fonte, filtro e tema. Quanto mais forte for a cor usada, mais a platéia percebe a cor e iluminação, principalmente, porque objetos de cor neutra colocados no palco, após serem iluminados com cores fortes, adquirem tonalidades vivas e brilhantes.

O verde, em especial, requer atenção, não somente por não ser uma cor complementar a cor da pele humana, mas também porque os olhos são mais sensíveis a essa cor do espectro.

# —Posicionando a Cor

No processo da visão, o cérebro se baseia em diversas referências de imagem, então pode-se usar essas convenções e conhecimentos de luz armazenadas, para criar a geografia, tempo e emoção da peça. Por exemplo, quando se tem uma paisagem com atmosfera de tons azuis, significa que está longe do observador, porque a luz azul se foca à frente do olho, então os objetos parecem estar mais distantes. Por isso, se utiliza a luz azul na parte detrás do palco, aumentando a perspectiva da cena.

Outro caso é, um contraluz com cor fria direcionado a um ator em frente a um ciclorama iluminado com tons vermelhos e âmbares, consegue inserilo dentro da paisagem, aumentando o efeito de dimensão e perspectiva.

As cores parecem ter "pesos" diferentes em um ciclorama ou em um plano vertical de um cenário. Por exemplo, os verdes e azuis ficam mais "pesados" do que os vermelhos e âmbares. Quanto mais saturada for a cor, mais "peso" ela terá em relação às cores pastéis.

# A Gama de Cores de Iluminação

As cores para iluminação, não podem estar restringidas ao mostruário Rosco Supergel ou a este guia. Misturando os filtros, tanto adicionando quanto subtraindo, pode-se alcançar combinações de cores ilimitadas.

# Mistura Aditiva

Duas ou mais luzes com diferentes gelatinas são misturadas, alterando as configurações do dimmer. Um exemplo é, três refletores com filtros vermelho, azul e verde, quando os feixes de luz se misturam tem-se luz branca.

### Mistura Subtrativa

Duas ou mais folhas de gelatina, são colocadas em um refletor e as cores são subtraídas do branco para proporcionar cores misturadas. Por exemplo, luzes âmbar e lavanda resultam na cor de aço aquecido.

### Mistura Múltipla

Duas ou mais gelatinas são colocadas no mesmo refletor, de modo que cada uma ocupe apenas parte da lente. Desse modo, com apenas uma luz você pode fazer uma mistura aditiva e também pode projetar uma imagem com duas cores ao usar gobos.

# Supergel -

# Rosas

A escala de cores no tom rosa é muita usada no palco, pois favorece os tons quentes da pele e suaviza a luz do dia. Já os tons pastéis são bons para iluminar as principais áreas do palco, especialmente quando se utiliza luz cruzada ou luz de frente.

Os tons saturados de rosa, quando adicionados a um ciclorama iluminado com azul, resultam em um belíssimo efeito de pôr-do-sol. Também podem ser usados em musicais e comédias, sem que haja necessidade de iluminar naturalmente o rosto dos atores.

Exemplos: Tons Saturados: #43 - Deep Pink e #339 Broadway Pink.

Tons Pastéis: #30 - Light Salmon Pink e #38 -Light Rose.

# Âmbares

Usados para iluminar a área principal do palco e também para efeitos de luz do sol e de ambientes internos. Os âmbares saturados, ainda são usados para a composição da luz geral, mas deve-se tomar cuidado para não contrastá-los com cores frias como os azuis. Os tons pastéis são ideais para tons de pele e por causa da alta capacidade de transmissão de luz, também pode ser usado em refletores de baixa intensidade.

Exemplos: Tons Saturados: #20 - Medium Amber e #21-Golden Amber.

Tons Pastéis: #23 - Orange e #317 - Apricot.

### Vermelhos

São usados com frequência em produções teatrais, mas raramente se obtém sucesso na utilização dessas cores. Todos os vermelhos são saturados e criam efeitos extremos quando projetados no palco.

Podem ser usados para efeito de fogo ou em musicais, porém para a iluminação de peças teatrais, a cor deve ser atenuada com outra luz mais suave, assim o público poderá visualizar a cena de maneira mais equilibrada.

Vale lembrar que, vermelho-escuros não funcionam bem com tons de pele e alguns materiais e tecidos utilizados na confecção de figurino.

Exemplos: Tons Saturados: #19 - Fire e #27- Medium Red.

### Verdes

Usado cuidadosamente, pode fazer uma geral antes de sobrepor luzes pastéis, âmbares e brancas. Não são favoráveis aos tons de pele, mas se utilizados com cautela (talvez com âmbar no mesmo refletor), são ideais para luz externa e cenas de mar. Também não são apropriados para iluminar cicloramas.

Exemplos: Tons Saturados: #89 - Moss Green e #94- Kelly Green. Tons Pastéis: #86 -Pea Green e #96 - Lime.

# Lavandas

São muito utilizadas, porque ficam entre as cores quentes e frias, sendo complementar tanto para âmbares e rosas quanto para os azuis e verdeclaros

Os tons pastéis são quase brancos e muito utilizados para destacar os atores no palco. Luz lateral com tons lavanda podem ser excelentes para modelar uma luz frontal feita com luz branca.

Exemplos: Tons Saturados: #48 - Rose Purple e #57- Lavender

Tons Pastéis: #55 - Lilac e #52 - Light Lavender.

### Azuis

Possibilitam grande variedade de efeitos de cor, desde a luz do dia em uma manhã de inverno até a luz da lua.

Os azuis saturados são ótimos para luz de fundo e cicloramas, enquanto os pastéis dão à luz um aspecto high-tech. Luz de fundo e lateral em níveis baixos podem esculpir a forma do corpo e rosto humano. Já a luz geral de

frente com luz branca ou lavanda revela realismo à cena.

Azul absorve muita luz, por isso refletores com alta intensidade devem ser usados com uma lâmpada Par ou Fresnel de 1 Kw.

Exemplos: Tons Saturados: #70 - Nile Blue e #82- Surprise Blue. Tons Pastéis: #63 - Pale Blue e #65 - Daylight Blue.

# Controlando a Cor -

O processo de selecionar a cor, deve ser feito durante o desenvolvimento do esquema de iluminação da produção.

Toda decisão referente à iluminação deve ser tomada levando em consideração a cor do espetáculo. Se o show deve ser hiper-realista, então não se deve utilizar cores saturadas e se o equipamento de luz for de baixa intensidade, deve-se evitar o uso de âmbares, pois o resultado pode ser desagradável.

# -Dicas Rosco para Melhores Resultados de Cor

Leia a peça e anote as cores que estão associadas as sensações transmitidas durante sua leitura;

Pesquise, observe no seu dia-a-dia, teste suas idéias no mundo a sua volta. Procure materiais que representem suas idéias em relação às cores e iluminação. Descubra quais objetos serão usados na peça;

Selecione as cores usando o mostruário. Escolha uma família de cores e lembre-se que o mostruário está organizado por grupo de cores ou ordem numérica. Com o Guia Supergel, ainda é possível encontrar dicas e sugestões de uso para as cores;

Teste suas idéias, projetando a luz através das gelatinas do mostruário em cima da pele. Segure o mostruário Rosco Supergel entre uma luminária e sua pele, ou através da luz do dia. Porém, não coloque a gelatina em frente aos olhos, pois terá uma falsa idéia da cor que será projetada no palco;



Converse com sua equipe, após refinar as idéias e escolher as cores que serão inclusas em sua gama de cores com o diretor e figurinistas, para explicar qual será o resultado de cor sobre a pele e as roupas;

Selecione os refletores que iluminarão as cores que serão utilizadas. Se estiver desenhando um plano, anote o número da cor dentro do ícone dos refletores, pois ajudará a desenvolver seu guia de cores que dirá quanto de cada cor irá precisar e em quais tamanhos as gelatinas deverão ser cortadas;

No teatro, corte as folhas ou rolos de filtro no tamanho correto para uso nos refletores. Pode-se medir o porta-gelatina para cortá-las na medida certa ou então, colocar gelatina sobre o refletor e contornar com uma caneta apropriada - Gel Marker - e depois cortar. Porém, não corte os filtros no chão do palco ou em qualquer superfície áspera que possa arranhar o filtro. Mantenha o mostruário sempre a mão, para checar a cor atual em relação a cor selecionada e marque com a caneta Gel Marker o número da cor e o refletor utilizado no pedaço de gelatina, isso ajudará a identificar os filtros e refletores.



Experimente as cores no teatro e veja o que acontece quando os focos de luz se misturam. Se os efeitos resultantes não forem o esperado, não se preocupe, volte a procurar no mostruário e aproveite para escolher uma nova alternativa e explorar novas possibilidades.

# -Dicas Rosco

Não retire o número impresso na folha de gelatina. Desse modo, você saberá exatamente a cor caso você a guarde;

Mantenha as gelatinas devidamente armazenadas em ordem numérica, assim fica fácil e prático encontrar o filtro que precisa;

Rosco Supergel oferece uma gama completa de cores para você se interar e adicionar a sua paleta. Não irá demorar, para você compreender o melhor funcionamento com refletores, efeito e estilo, sendo que se a primeira escolha não surtir o efeito esperado, ainda existem mais de 100 cores a serem exploradas na Linha Rosco Supergel.

# Como Usar este Guia =

A iluminação cênica é uma arte, não uma ciência. Por isso as recomendações deste guia não são normas rígidas, mas sim sugestões só para indicar de maneira geral sobre toda a linha de gelatina de cor e difusores Rosco Supergel.

O Guia Supergel foi estruturado de acordo com as possíveis aplicações, sendo que as cores mais utilizadas possuem indicações e sugestões de uso e efeito em diferentes aplicações. Deve-se atentar, que muitas considerações e comentários expostos são opiniões subjetivas dos técnicos da Rosco e dos iluminadores que participaram deste projeto. Portanto, pode haver diferenças de opinião.

O segredo para se ter êxito na técnica de iluminar com cores é a experiência. Se uma combinação de cores não lhe parece boa, você pode experimentar outra, já que mudar a gelatina é simples, seguro e econômico. Desta maneira, você pode garantir toda sua liberdade artística, tendo a mão a linha completa de gelatinas Rosco Supergel.

# Conheça outros produtos Rosco.

# PERMACOLOR



Linha de filtros dicróicos com alta durabilidade e maior transmissão de luz, do que nos filtros tradicionais.

# DICHROFILM

O Dichrofilm combina a flexibilidade, leveza e as características conhecidas da gelatina plástica tradicional, com a grande duração e resistência ao calor dos filtros dicróicos. Desta maneira, pode ser utilizado em



fontes de luz e calor de até 20.000 watts. É perfeito para instalações permanentes, da qual requer um filtro flexível e onde instalar um vidro poderia colocar em risco a saúde e segurança.

O Dichrofilm é fabricado em folhas de 63,5cm x 63,5 cm e pode ser cortado facilmente. Está disponível em 10 cores padrão e cores personalizadas sob encomenda.