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

DIANNE SCHERLY VARELA DE MEDEIROS

DESENVOLVIMENTO DE MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM COMPRIMENTO DE ONDA EM FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS PARA REDES ÓPTICAS RESIDENCIAIS

NITERÓI/RJ 2013

DIANNE SCHERLY VARELA DE MEDEIROS

DESENVOLVIMENTO DE MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM COMPRIMENTO DE ONDA EM FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS PARA REDES ÓPTICAS RESIDENCIAIS

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

Orientador: Prof. Dr. RICARDO MARQUES RIBEIRO Co-orientador: Prof. Dr. ANDRÉS PABLO BARBERO

Niterói/RJ 2013

À minha família, especialmente meu pai e minha mãe, que sempre me motivaram e me deram suporte para seguir em frente e vencer os desafios, e aos professores que participaram da minha formação, transmitindo seus conhecimentos e motivando meu crescimento intelectual.

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao Professor Andrés Pablo López Barbero, meu co-orientador, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho, pelos conselhos, críticas e sugestões, e por suprir a ausência (física) do meu orientador.

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

Aos amigos do Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp), especialmente Odair da Silva Xavier e Sydney Bragantine Germano, pelo suporte técnico, acadêmico e pessoal, e pelos momentos lúdicos.

Aos pesquisadores do Departamento de Óptica da Télécom Bretagne Université, em especial Vinicius Nunes Henrique Silva, Kedar Sathaye, Laurent Dupont e Daniel Stoenescu pela fabricação e cessão das amostras de filtros ópticos baseados na tecnologia de cristais líquidos, que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

Aos Professores membros desta banca, Dr^a. Maria Aparecida Martinez, Dr. Paulo Acioly Marques dos Santos e Dr^a. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri pela disponibilidade para avaliação deste trabalho.

Ao técnico de mecânica, Pedro Jorge Flores, pelo suporte técnico, fabricando peças auxiliares, que facilitaram a realização das medidas ópticas necessárias, e pela usinagem dos protótipos do dispositivo desenvolvido neste trabalho. À UFF, pelo financiamento parcial das viagens a Vila Velha e a João Pessoa para participação e apresentação no MOMAG 2010 e MOMAG 2012, respectivamente.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida a mim por 24 meses para o desenvolvimento do projeto inscrito sob o número 556073/2010-0 no CNPq, intitulado "Desenvolvimento de Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda (WDM) em Fibras Poliméricas para Redes Ópticas Residenciais".

Por fim, agradeço a Deus por me permitir alcançar meus objetivos e tornar possível a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento experimental de um dispositivo óptico, baseado em filtros ópticos comerciais, capaz de realizar os processos de multiplexação (MUX) e demultiplexação (DEMUX) por divisão de comprimento de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) sobre fibras ópticas poliméricas (Polymer Optical Fibres, POFs) de PMMA (Poly-Methyl-Methacrylate) utilizando dois canais de operação no espectro visível, para aplicação em redes residenciais (Home Area Networks, HANs) ópticas. Além disso, investiga-se a utilização de filtros ópticos baseados em cristais líquidos (*Liquid Crystals*, LCs) operando como divisores ópticos (beam-splitters) e como bloqueadores de banda (notch). A operação como beam-splitter visa averiguar a possibilidade de substituição do filtro óptico comercial utilizado no interior do dispositivo MUX/DEMUX WDM por um filtro LC, enquanto a operação como filtro notch tem como objetivo eliminar a interferência entre canais ópticos de comunicação adjacentes (crosstalk) em redes de curta distância. A pesquisa experimental envolveu a caracterização temporal e espectral de dois filtros ópticos comerciais e diversos exemplares de filtros LC. Outros experimentos foram realizados com a finalidade de comparar o desempenho dos filtros ópticos com um acoplador óptico 2x1, com relação à eficiência de multiplexação. Os resultados obtidos indicaram que um dos modelos de filtro comercial utilizado (69215 da Edmund Optics) possui características mais adequadas para ser empregado como núcleo do dispositivo proposto. O protótipo do MUX/DEMUX WDM foi construído e caracterizado nos domínios da frequência, do tempo e do comprimento e onda, utilizando enlaces unidirecionais e bidirecionais, para analisar seu desempenho quanto à multiplexação e à demultiplexação. Esta Dissertação apresenta também um breve resumo sobre as HANs ópticas e a aplicação do WDM sobre POFs nestas redes.

Palavras-chave: Cristal Líquido; Filtro Óptico; HAN; Multiplexação; POF; WDM.

ABSTRACT

This work describes the experimental development of an optical device, based on commercial optical filters, able to perform wavelength division multiplexing (WDM) and demultiplexing (DEMUX) over PMMA (Poly-Methyl-Methacrylate) polymer optical fibres (POFs) using two channels operating in the visible spectrum, for application in optical residential networks (Home Area Networks, HANs). Further, it is investigated the use of optical filters based on liquid crystals (LC) operating as optical beam-splitters and as band blocking (notch) filters. The operation as beam-splitter aims to verify the possibility of substituting the commercial optical filter used inside the WDM MUX/DEMUX device, whereas the operation as notch filter aims to eliminate the interference between adjacent communication optical channels (crosstalk) in short-haul networks. The experimental research involved the temporal and spectral characterization of two commercial optical filters and several samples of LC filters. Other experiments were conducted aiming to compare the performance of the optical filters and a 2x1 optical coupler related to the multiplexing efficiency. The obtained results indicated one model of the commercial filters used (69215 from Edmund Optics) has more adequated characteristics to be employed as the core of the proposed device. The WDM MUX/DEMUX prototype was built and characterized in frequency, time and wavelength domains, using unidirectional and bidirectional links, aiming to analyze its performance related to multiplexing and demultiplexing. This Dissertation also presents a brief overview on optical HANs and application of WDM over POFs in these networks.

Keywords: Liquid Crystal; Optical Filter; HAN; Multiplexing; POF; WDM.

SUMÁRIO

1.	INT	RODUÇ	2ÃO	1
	1.1.	Motiva	ção e Contextualização	1
	1.2.	Objetiv	/08	5
	1.3.	Estrutu	ıra da Dissertação	7
2.	REV	VISÃO S	OBRE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS	9
	2.1.	Introdu	ıção	9
	2.2.	Fundar	nentos da Óptica Física e das Comunicações Ópticas	9
		2.2.1.	Óptica: Refração, Reflexão e Índice de Refração	9
		2.2.2.	Transmitância e Refletância	11
		2.2.3.	Estrutura das Fibras Ópticas	12
		2.2.4.	Perfil de Índice de Refração	13
		2.2.5.	Modos de Propagação e Abertura Numérica	14
		2.2.6.	Atenuação	17
		2.2.7.	Espectro de Transmissão	21
		2.2.8.	Largura de Banda	22
		2.2.9.	Fenômenos Ópticos Importantes para as POFs	23
	2.3.	Princip	pais Características e Tipos de POFs	27
		2.3.1.	POFs de PMMA	31
		2.3.2.	POFs de Policarbonato	32
		2.3.3.	POFs de Polímeros Deuterados	34
		2.3.4.	POFs de Polímeros Fluoretados	35
	2.4.	Padrõe	s para POFs	36
3.	MU	LTIPLE	XAÇÃO POR DIVISÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA SOBRE	
FI	BRAS	ÓPTIC.	AS POLIMÉRICAS	39
	3.1.	Introdu	ıção	39
	3.2.	Multip	lexação: Definição e Motivação	39
	3.3.	Multip	lexação WDM	44
		3.3.1.	Técnicas de Multiplexação WDM	47
		3.3.2.	WDM Aplicado a POFs	52
		,		
4.	RED	DES OPT	TICAS DE CURTO ALCANCE	61
	4.1.	Introdu	ıção	61
				V

	4.2.	Redes de Longa Distância e FTTx	63
	4.3.	Redes de Curta Distância e FiTH	66
		4.3.1. Redes Ópticas Residenciais	68
5.	INT	RODUÇÃO AOS FILTROS ÓPTICOS DICROICOS	73
	5.1.	Introdução	73
	5.2.	Filmes Finos	73
	5.3.	Revestimentos Ópticos	74
	5.4.	Filtros Ópticos	76
6.	INT	RODUÇÃO À TECNOLOGIA DE CRISTAIS LÍQUIDOS	79
	6.1.	Introdução	79
	6.2.	Histórico	79
	6.3.	Fundamentos dos Cristais Líquidos	81
		6.3.1. Fases dos Cristais Líquidos Termotrópicos	83
	6.4.	Aplicações	
	6.5.	Processo de Fabricação de Filtros Baseados em LCs	87
7. ÓP	DES TICO	ENVOLVIMENTO DO MUX/DEMUX WDM BASEADO EM FILTROS S COMERCIAIS	90
	7.1.	Introdução	90
	7.2.	Projeto do Cubo MUX/DEMUX	90
	7.3.	Experimentos, Resultados e Discussões	92
		7.3.1. Colimação para Injeção e Captura de Luz	
			93
		7.3.2. Filtro Modelo 52530	93 100
		7.3.2. Filtro Modelo 525307.3.3. Substituição do Filtro Modelo 52530	93 100 104
		 7.3.2. Filtro Modelo 52530 7.3.3. Substituição do Filtro Modelo 52530 7.3.4. Filtro modelo 69215 	93 100 104 107
8.	FILT	 7.3.2. Filtro Modelo 52530 7.3.3. Substituição do Filtro Modelo 52530 7.3.4. Filtro modelo 69215 ^CROS DE CRISTAL LÍQUIDO OPERANDO COMO FILTROS NOTCH E 	93 100 104 107
8. DIC	FILT	 7.3.2. Filtro Modelo 52530 7.3.3. Substituição do Filtro Modelo 52530 7.3.4. Filtro modelo 69215 CROS DE CRISTAL LÍQUIDO OPERANDO COMO FILTROS NOTCH E CO 	93 100 104 107
8. DIC	FILT CROI 8.1.	 7.3.2. Filtro Modelo 52530 7.3.3. Substituição do Filtro Modelo 52530 7.3.4. Filtro modelo 69215 CROS DE CRISTAL LÍQUIDO OPERANDO COMO FILTROS NOTCH E CO Introdução 	93 100 104 107 126 126
8. DIC	FIL7 CROI 8.1. 8.2.	 7.3.2. Filtro Modelo 52530 7.3.3. Substituição do Filtro Modelo 52530 7.3.4. Filtro modelo 69215 ROS DE CRISTAL LÍQUIDO OPERANDO COMO FILTROS NOTCH E CO Introdução Experimentos, Resultados e Discussões 	93 100 104 107 126 126 127
8. DIC	FIL7 CROI 8.1. 8.2.	 7.3.2. Filtro Modelo 52530	93 100 104 107 126 126 127 127
8. DIC	FIL7 CROI 8.1. 8.2.	 7.3.2. Filtro Modelo 52530	93 100 104 107 126 126 127 127 127

9. AC	CON OPLA	IPARAÇ ADOR E	ZÃO DA EFICIÊNCIA DA MULTIPLEXAÇÃO REALIZADA POR FILTROS ÓPTICOS	138
	9.1.	Introduç	ção	138
	9.2.	Experin	nentos Comparativos	138
10.	CAR	ACTER	IZAÇÃO DO PROTÓTIPO DO MUX/DEMUX DE 2 CANAIS	144
	10.1.	Introduç	ção	144
	10.2	Constru	ção do Protótipo	144
	10.3	Experin	nentos, Resultados e Discussões	146
		10.3.1.	Caracterização Espectral: Cubos WDM.	146
		10.3.2.	Caracterização Temporal: Enlace Bidirecional Utilizando os Cubos W 149	/DM
11.	CON	ICLUSÕ	ES E SUGESTÕES	157
RE	FERÊ	NCIAS I	BIBLIOGRÁFICAS	160
AP	ÊNDI	CES		166
AN	EXO	5		178

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Exemplos de soluções FTTX (X = B, H, N e C)2
Figura 1.2: Cabo UTP [1]
Figura 1.3: Exemplo de integração entre FTTH e FiTH
Figura 1.4: Utilização do MUX/DEMUX WDM para estabelecimento de enlace bidirecional full-duplex
Figura 1.5: Exemplo de utilização do MUX/DEMUX WDM para distribuição do sinal na HAN
Figura 2.1: Variação do índice de refração com o comprimento de onda para o vidro BK7 [1]10
Figura 2.2: Fenômenos de reflexão e refração da luz10
Figura 2.3: Reflexão total11
Figura 2.4: Esquema estrutural de fibra óptica convencional
Figura 2.5: Perfis de índice de refração [2] – (traduzida pelo autor)14
Figura 2.6: Esquema ilustrativo do cone e ângulo de aceitação, e representação de alguns modos de propagação em uma fibra SI
Figura 2.7: Comparação entre o diâmetro do núcleo e o cone de aceitação de fibras de sílica e poliméricas [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.8: (a) Macrocurvatura com tensionamento da fibra óptica, (b) macrocurvatura em 90° e (c) microcurvatura provocada por pressão [9]19
Figura 2.9: Sensibilidade à curvatura para uma curva de 360° [2] – (traduzida pelo autor)19
Figura 2.10: Influência da curvatura na largura de banda e na atenuação [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.11: Espectro utilizado nas comunicações ópticas [2] – (modificada pelo autor)21
Figura 2.12: Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.13: Tipos de dispersão presentes nas fibras ópticas [2] – (traduzida pelo autor)24
Figura 2.14: Efeito da dispersão no sinal de saída [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.15: Efeito da dispersão material [2] – (traduzida pelo autor)27
Figura 2.16: Conexão realizada com conectores FC e ferramentas utilizadas para clivagem e decapagem da POF
Figura 2.17: POF nua (<i>bare fiber</i>) acesa

Figura 2.18: POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo, revestida29
Figura 2.19: Evolução da atenuação nas POFs [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.20: Estrutura molecular do PMMA [2]31
Figura 2.21: Comparação entre a atenuação da POF de PMMA e PC-POF [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.22: Curvas características de atenuação de diversas PC-POFs [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.23: Curvas características de atenuação de diversas POFs deuteradas [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 2.24: Estrutura molecular do CYTOP [®] [2] – (traduzida pelo autor)36
Figura 2.25: Comparação entre atenuação da fibra de sílica e da PF-POF [2] – (traduzida pelo autor)
Figura 3.1: Utilização da banda passante de um meio físico genérico em uma transmissão comum e utilizando multiplexação40
Figura 3.2: Esquema de multiplexação TDM40
Figura 3.3: Esquema de multiplexação FDM41
Figura 3.4: Esquema de multiplexação WDM42
Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais
Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais
 Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais. 43 Figura 3.6: Canais CWDM definidos pela ITU-T [16] – (traduzida pelo autor)46 Figura 3.7: (a) Esquema de demultiplexação utilizando prisma [19] e (b) dispersão de um feixe luminoso de luz branca provocada por um prisma [1] – (traduzida pelo autor)48
Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais
 Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais. 43 Figura 3.6: Canais CWDM definidos pela ITU-T [16] – (traduzida pelo autor)
Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais
Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais
Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais

Figura 3.13: Transmissor WDM desenvolvido na Universidade de Ciências Aplicadas de Harz [2]	6
Figura 3.14: Esquema do MUX/DEMUX desenvolvido pela Sony para aplicação em enlace bidirecional [2] – (traduzida pelo autor)5'	7
Figura 3.15: Esquema do módulo MUX/DEMUX desenvolvido pela Sharp para aplicação em enlaces bidirecionais [2] – (traduzida pelo autor)	7
Figura 3.16: (a) Esquema de enlace bidirecional utilizando o MUX/DEMUX desenvolvido [22] e (b) fotografia do dispositivo [22] – (traduzida pelo autor)	8
Figura 3.17: Grade espectral para WDM sobre POFs com espaçamento de 22,2 THz [23] – (traduzida pelo autor)	9
Figura 4.1: Requisito de largura de banda para algumas aplicações e largura de banda oferecida por alguns meios físicos [24] – (traduzida pelo autor)	1
Figura 4.2: ONUs (a) [25] e (b) [26]64	4
Figura 4.3: Instalação de fibra óptica de sílica (Fonte 1: [27]; Fonte 2: [28])65	5
Figura 4.4: Distribuição mundial dos assinantes de FTTH/B em Junho de 2011 [29] – (traduzida pelo autor)6	5
Figura 4.5: Comparação das taxas de transmissão máximas alcançadas em relação à distância para alguns meios de transmissão [6] – (traduzida pelo autor)	7
Figura 4.6: Cabo híbrido POF-Cobre [2]70	0
Figura 4.7: Princípio de operação do RoF [2] – (traduzida pelo autor)7	1
Figura 4.8: Alguns dispositivos comercializados para uso em HANs [1]72	2
Figura 5.1: Esquema da interação de feixes luminosos com um filme fino de espessura d 74	4
Figura 5.2: Esquema de revestimento óptico com múltiplas camadas7:	5
Figura 5.3: Esquema da transmitância espectral dos filtros short/long-pass e notch7	7
Figura 5.4: Filtros (a) <i>short-pass</i> , (b) <i>long-pass</i> e (c) <i>notch</i> – Edmund Optics [46]7	7
Figura 5.5: Filtros neutros diversos – Edmund Optics [46]	8
Figura 5.6: Esquema do funcionamento de um filtro dicroico	8
Figura 6.1: Esquema ilustrativo da organização estrutural dos estados sólido cristalino, líquido isotrópico, e do estado intermediário líquido cristalino (cristal líquido) [54]82	э 2
Figura 6.2: Variação do parâmetro de ordem, S, com a temperatura [48]	3
Figura 6.3: (a) Esquema da estrutura de um LC nemático uniaxial [56], (b) [57] e (c) [52] microscopia de LCs nemáticos reais	4
Figura 6.4: Esquema da estrutura de um CLC [56]84	4

Figura 6.5: Microscopias de CLCs reais, (a) as linhas na figura são defeitos colestéricos típicos [52], (b) eixo helicoidal paralelo ao plano da imagem [57] e (c) eixo helicoidal perpendicular ao plano da imagem [57]
Figura 6.6: Reflexão seletiva da luz de acordo com o passo da hélice do CLC [59]86
Figura 6.7: Esquema da estrutura dos LCs esméticos A, C e C* [56]
Figura 6.8: Microscopias de LCs esméticos reais (a) [52], (b) [57] e (c) [57]87
Figura 6.9: Esquema dos alinhamentos (a) homeotrópico, (b) planar/homogêneo e (c) inclinado [48]
Figura 6.10: (a) Esquema da composição das células para formar o filtro de CLC e (b) fotografia do filtro de CLC fabricado
Figura 7.1: Filtro óptico modelo 69215 da Edmund Optics91
Figura 7.2: Conectores FC e lentes colimadoras91
Figura 7.3: Modelagem do cubo MUX/DEMUX: (a) vistas frontal e (b) 3D, (c) modelo 3D, (d) vista superior e medidas do conjunto conector FC + lente
Figura 7.4: Esquema do processo de demultiplexação realizado utilizando o cubo MUX/DEMUX proposto92
Figura 7.5: (a) Esquema e (b) fotografia da configuração experimental utilizada para o experimento de colimação95
Figura 7.6: Espectro da fonte de quatro canais utilizando <i>pigtail</i> de POF96
Figura 7.7: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 0 mm96
Figura 7.8: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 35 mm97
Figura 7.9: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 75 mm97
Figura 7.10: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 105 mm98
Figura 7.11: Configuração experimental para medidas de acoplamento e desacoplamento de luz
Figura 7.12: Filtro óptico modelo 52530 da Edmund Optics100
Figura 7.13: Esquema da configuração experimental para medidas de (a) transmissão e (b) reflexão utilizando o filtro modelo 52530 da Edmund Optics101
Figura 7.14: Configurações experimentais para medidas de (a) transmissão e (b) reflexão, utilizando o filtro modelo 52530 da Edmund Optics102
Figura 7.15: Espectro de transmissão do filtro modelo 52530 da Edmund Optics a 45°103
Figura 7.16: Espectro de reflexão do filtro modelo 52530 da Edmund Optics a 45°103
Figura 7.17: Curva de transmissão do filtro óptico modelo 52530 da Edmund Optics 105

Figura 7.18: Curvas de transmissão dos filtros modelo (a) 66242, (b) 69215 e (c) 47812 – curva amarela – da Edmund Optics106
Figura 7.19: Filtro óptico modelo 69215 da Edmund Optics em suporte "homemade" 107
Figura 7.20: Espectro da fonte luminosa de quatro canais, medido com <i>pigtail</i> de sílica108
Figura 7.21: (a) Configuração experimental para obtenção do espectro de transmissão e detalhes da luz (b) incidente no filtro e (c) transmitida pelo filtro108
Figura 7.22: Espectro de transmissão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics a 45 °109
Figura 7.23: (a) Configuração experimental para obtenção do espectro de reflexão e detalhes da luz (b) incidente no filtro e (c) refletida pelo filtro110
Figura 7.24: Espectro de reflexão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics a 45 °110
Figura 7.25: Multiplexação dos sinais verde e vermelho provenientes de LEDs DieMount. 111
Figura 7.26: Espectros dos LEDs DieMount com pico de emissão nominal em 520 nm e 650 nm
Figura 7.27: Espectro de transmissão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa LEDs DieMount verde e vermelho112
Figura 7.28: Espectro de reflexão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa LEDs DieMount verde e vermelho113
Figura 7.29: Espectro do <i>dual</i> LED modelo LED 470/660-04 da Laser Roithner com picos de emissão nominais em 480 e 660 nm114
Figura 7.30: Espectro de transmissão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa dual LED modelo LED 470/660-04 da Laser Roithner115
Figura 7.31: Espectro de reflexão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa dual LED modelo LED 470/660-04 da Laser Roithner
Figura 7.32: Espectro do LED Branco Golden DRAGON Plus da OSRAM117
Figura 7.33: Esquema da configuração experimental para medida de transmitância em função do ângulo
Figura 7.34: Refletância das duas amostras de filtros modelo 69215
Figura 7.35: Variação do comprimento de onda de corte com o ângulo de incidência, para o filtro modelo 69215 da Edmund Optics
Figura 7.36: Enlace bidirecional: (a)configuração experimental em bancada e (b) esquema do experimento
Figura 7.37: Enlace bidirecional: esquema simplificado utilizando lentes
Figura 7.38: Espectro <i>spotlight</i> LED DieMount (650 nm e 460 nm)121
Figura 7.39: Sinal no canal vermelho (<i>spotlight</i> LED)

Figura 7.40: Sinal no canal azul (spotlight LED)123
Figura 7.41: Esquema geométrico da divergência dos feixes luminosos
Figura 7.42: Sinal no canal vermelho (LED DieMount)124
Figura 7.43: Sinal no canal verde (LED DieMount)
Figura 8.1: Espectro do LED branco genérico
Figura 8.2: Configuração experimental utilizada para caracterização dos filtros de cristal líquido129
Figura 8.3: Espectro de transmitância das 8 amostras de filtros de CLC
Figura 8.4: Comparação entre o espectro da fonte luminosa e o espectro transmitido pelo filtro CLC 01 a 0° de incidência
Figura 8.5: Configuração experimental utilizada para captar os feixes luminosos (a) transmitido e (b) refletido
Figura 8.6: Espectros de transmissão e reflexão do filtro CLC 01 a 45°
Figura 8.7: Espectros de transmitância e refletância do filtro CLC 01
Figura 8.8: Variação do comprimento de onda do <i>notch</i> para o filtro CLC 01 de acordo com o ângulo de incidência
Figura 8.9: Variação do comprimento de onda do <i>notch</i> para o filtro CLC 09 de acordo com o ângulo de incidência136
Figura 9.1: Espectros dos <i>spotlight</i> LEDs da DieMount (650 e 460 nm nominal)139
Figura 9.2: Esquema de configuração experimental para multiplexação utilizando (a) filtros ópticos e (b) acoplador óptico 2x1
Figura 9.3: Configuração experimental para realizar a multiplexação de dois sinais luminosos utilizando o acoplador modelo LIP101ES7 da Microparts
Figura 9.4: Configuração experimental para realizar a multiplexação de dois sinais luminosos utilizando o filtro CLC 01
Figura 9.5: Configuração experimental para realizar a multiplexação de dois sinais luminosos utilizando o filtro modelo 69215 da Edmund Optics
Figura 9.6: Espectro dos sinais multiplexados utilizando o acoplador da Microparts, o filtro CLC 01 e o filtro modelo 69215 da Edmund Optics142
Figura 10.1: Osciloscópio DSO-X 2012A da Agilent Technologies
Figura 10.2: Primeiro protótipo do cubo WDM de 2 canais – cubo primitivo145
Figura 10.3: Primeiro protótipo do cubo WDM de dois canais146
Figura 10.4: Configuração experimental para medidas de transmissão e reflexão do cubo MUX/DEMUX WDM147

Figura 10.5: Espectros de transmitância e refletância dos cubos WDM: (a) cubo 1, (b) cubo 2 e (c) comparação entre as refletâncias dos cubos 1 e 2148
Figura 10.6: Esquema de configuração experimental utilizada no enlace bidirecional com os cubos WDM
Figura 10.7: Montagem experimental do enlace bidirecional utilizando os cubos WDM151
Figura 10.8: Sinais azul e vermelho no domínio do tempo: enlaces com comprimento L igual a (a) 2,6 m, (b) 44,6 m, (c) 50,6 m e (d) 64,6 m
Figura 10.9: FFT do enlace bidirecional, utilizando como fonte o canal 1 – interferência do sinal azul no vermelho
Figura 10.10: FFT do enlace bidirecional, utilizando como fonte o canal 2 – interferência do sinal vermelho no azul
Figura A.1: POF- <i>coupled</i> LEDs da DieMount167
Figura A.2: Acoplamento do POF- <i>coupled</i> LED DieMount [2]167
Figura A.3: Spotlight LEDs da DieMount [61]168
Figura A.4: LED <i>Golden DRAGON Plus</i> da OSRAM (LCW W5AM): fotografia [62] e com adaptador
Figura A.5: <i>Dual</i> LED modelo LED470/660-04 Laser Roithner: (a) fotografia [63], (b) emitindo apenas no vermelho, (c) emitindo apenas no azul, (d) emitindo simultaneamente no azul e no vermelho e (d) com o adaptador
Figura A.6: Fonte luminosa de 4 canais, composta por POF-coupled LEDs da DieMount170
Figura A.7: Fontes de Tensão ICEL modelos (a) PS-1500 e (b) PS-4100170
Figura A.8: (a) Espectrômetro CCD modelo SP1-USB 2.0 da Thorlabs e (b) captura de tela do software SPLICCO
Figura A.9: Osciloscópio modelo WaveJet 352A da <i>LeCroy</i> 172
Figura A.10: (a) Fotodetector PDA10A da Thorlabs e (b) Fotodiodo S6468-02 da Hamamatsu
Figura A.11: (a) Circuito do fotodiodo S6468-02, (b) e (c) fotodetector resultante da montagem deste circuito
Figura A.12: (a) Gerador de funções modelo AFG3251 da Tektronix e (b) <i>Bias-Tee</i> modelo ZX85-12G+ da Mini-Circuits
Figura A.13: Adaptador elétrico, vistas (a) frontal, (b) traseira e (c) perspectiva174
Figura A.14: Detalhe da conexão interna do adaptador elétrico, vistas (a) superior e (b) lateral
Figura A.15: Adaptador elétrico mais simples
Figura A.16: Medidor de potência óptica modelo PM20A da Thorlabs

Figura A.17: Acoplador óptico modelo LIP101ES7 da Microparts175
Figura A.18: (a) Transladadores, (b) adaptadores e (c) suportes para filtros
Figura A.19: Lentes colimadoras modelos (a) 015-POF980 e (b) 011-POF980 da WT&T177
Figura A.20: (a) Caminhos percorridos por raios luminosos em lente ou fibra com perfil de índice gradual e (b) princípio de operação das lentes GRIN

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Número de modos em fibras ópticas [2] – (modificada pelo autor)16
Tabela 2.2: Influência do aumento da NA sobre alguns parâmetros da fibra óptica [2] – (modificada pelo autor)
Tabela 2.3: Atenuação de POFs de diferentes fabricantes de acordo com o diâmetro da fibra óptica [2] – (traduzida pelo autor)
Tabela 2.4: Produto <i>B</i> · <i>L</i> para fibras ópticas SI e GI de PMMA23
Tabela 2.5: Propriedades do PMMA [2] – (modificada pelo autor)
Tabela 2.6: Características da PC-POF ESKA FH4001-TM da Mitsubishi
Tabela 2.7: Harmônicos de ressonância para ligações C-X [2] – (traduzida pelo autor)34
Tabela 2.8a: Características e aplicações das fibras categoria A4 [13] – (traduzida pelo autor)
Tabela 4.1a: Tecnologias disponíveis para redes de curta distância [2] – (modificada pelo autor)62
Tabela 4.2: Padrões de banda larga sem fio [41]71
Tabela 7.1: Sumário dos dispositivos e equipamentos utilizados nos experimentos
Tabela 7.2: Resultados das medidas de acoplamento e desacoplamento de luz
Tabela 7.3: Parâmetros de modulação dos sinais azul e vermelho utilizados no enlace WDM bidirecional. 121
Tabela 7.4: Parâmetros de modulação dos sinais verde e vermelho utilizados no enlace WDM bidirecional. 124
Tabela 8.1: Sumário dos dispositivos e equipamentos utilizados nos experimentos
Tabela 8.2: Atenuação aproximada nos centros dos vales do espectro de transmitância das 8amostras de filtros de cristal líquido
Tabela 8.3: Profundidade do notch (em dB) das duas amostras de filtro CLC, de acordo com o ângulo de incidência. 137
Tabela 9.1: Atenuação do sinal multiplexado tomando como referência o espectro do filtromodelo 69215 da Edmund Optics.142
Tabela 10.1: Parâmetros de modulação dos sinais azul e vermelho utilizados no enlace bidirecional com os cubos WDM151
Tabela 10.2: Parâmetros de modulação dos sinais azul e vermelho utilizados no enlacebidirecional com os cubos WDM.154

LISTA DE ACRÔNIMOS

ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed WaveGuide
CAN	Controller Area Network
CATV	Community Antenna Television
CCD	Charge-Coupled Device
CDM	Code Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access
CLC	Cholesteric Liquid Crystal
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
FFT	Fast Fourier Transform
FiTH	Fiber-into-The-Home
FSO	Free Space Optics
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
GRIN	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 Studardization Sector
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LC	Liquid Crystal
LD	Laser Diode
LED	Light Emitting Diode
LISW	Light-Induced Self-Written
MAN	Metropolitan Area Network
MC-SI	Multi-Core Step Index
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMOG	Massive Multiplayer Online Game
MOST	Media Oriented Systems Transport
MSI	Multi-Step Index
MUX	Multiplexador/Multiplexer
NA	Numerical Aperture
NEXT	Near-End CrossTalk
OLT	Optical Line Terminal
OMEGA	Home Gigabit Access
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
PC	Polycarbonate
PD	Photodetector
PF	Perfluorinated
PLC	Power Line Communication
PLC	Polymer Liquid Crystal
PMMA	Poly-Methyl-Methacrylate
PNA	Phoneline Networking Alliance
POF	Plastic/Polymer Optical Fiber
POF-AC	Plastic/Polymer Optical Fiber – Application Center
RSR	Relação Sinal-Ruído

SAN	Storage Area network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDM	Space Division Multiplexing
SI	Step Index
SOHO	Small Office/Home Office
SPLICCO	Spectrometer and Line Camera Control
TDM	Time Division Multiplexing
UDWDM	Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing
UMD	Uniform Mode Distribution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTP	Unshielded Twisted Pair
VoD	Video on Demand
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

O Projeto "EnerGiga-X - Desenvolvimento de Tecnologias Ópticas de Acesso em Banda-Larga FTTH/FTTA/FiTH e Supervisão para os Setores de Telecomunicações e Energia Elétrica", financiado pelo CNPq (bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora, DT) pode ser subdivido em dois subprojetos que se complementam, apesar de apresentarem finalidades diferentes: o **EnerGiga-I** (X = I, Interno) e o EnerGiga-E (X = E, Externo). O EnerGiga-E tem como objetivo o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento da grande capilaridade da rede elétrica de distribuição para oferecer serviços de Telecomunicações em banda-larga com tecnologia óptica FTTH (Fiber-To-The-Home) ao usuário, habilitando a implementação de Redes Residenciais (Home Area Networks, HANs) de alta capacidade (Fiber-into-The-Home, FiTH). O subprojeto EnerGiga-I constitui a base desta Dissertação e consiste basicamente em desenvolver tecnologias, incluindo dispositivos, que permitam a implementação destas HANs de elevada capacidade. Nestas redes, sejam elas ópticas ou não, diversos serviços são fornecidos simultaneamente, sendo possível a coexistência entre eles em um mesmo meio físico de transmissão. Exemplos de serviços são: VoIP (Voice over IP), IPTV (IP Television), HDTV (High Definition *Television*), telefonia fixa, Internet e monitoramento interno e externo.

Estes novos e os antigos serviços aprimorados requerem cada vez mais largura de banda, sendo necessário desenvolver novas tecnologias de Telecomunicações e aperfeiçoar as já existentes, incluindo protocolos, dispositivos e arquiteturas, para atender a esta demanda. As redes de acesso, por exemplo, ainda constituem um gargalo para o acesso ao núcleo da rede, capaz de transportar grande quantidade de informação a taxas de transmissão muito elevadas. Assim, as indústrias e operadoras de Telecomunicações passaram a buscar um aprimoramento destas redes, procurando encontrar novas soluções de implementação. Uma destas soluções envolve o uso de fibras ópticas como meio físico de transmissão. Elas são leves, apresentam pequenas dimensões, elevada capacidade de transmissão, baixas atenuação e taxa de erros, elevada segurança quanto à transmissão de dados e imunidade a interferências eletromagnéticas, constituindo um meio ideal para aprimorar a qualidade e a capacidade das redes de acesso. Esta solução 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, ou seja, até onde a fibra óptica é levada. 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. Deste ponto em diante, em geral utilizam-se cabos metálicos (*Unshielded Twisted Pair*, UTP – Figura 1.2), para distribuição dos sinais pela residência.



Figura 1.1: Exemplos de soluções FTTX (X = B, H, N e C).

Obs.: Optical Network Unit, ONU.

Seria ideal que houvesse uma continuação do FTTH no interior da residência do usuário, distribuindo-se o sinal internamente via fibra óptica. A proposta do **EnerGiga-I** é justamente a implantação a rede óptica no interior da residência, aproveitando a infraestrutura elétrica previamente instalada (conduítes elétricos), permitindo que sinais ópticos estejam disponíveis a partir da tomada doméstica, juntamente com os sinais elétricos, através do uso de conversores de mídia. O **EnerGiga-I** também propõe a possível integração de *transponders* dotados de antenas para compor redes sem fio internas, agregando mobilidade à HAN óptica. A Figura 1.3 ilustra um exemplo de integração possível entre FTTH e FiTH.



Figura 1.3: Exemplo de integração entre FTTH e FiTH.

Um fator de grande importância na implementação das HANs ópticas é 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 são capazes de trafegar informação a taxas de transmissão elevadas, com pouca degradação do sinal, produzindo baixas taxas de erro e a custos relativamente baixos.

As POFs operam no espectro visível e infravermelho próximo, são leves e apresentam pequenas dimensões, são flexíveis, fáceis de manusear, resistentes mecanicamente, pouco sensíveis a curvaturas, seguras para o operador, e fáceis de conectar, não exigindo mão-de-obra qualificada (tecnologia *do-it-yourself* – "faça você mesmo") para manuseio, instalação ou operação. Além disso, os custos das POFs e principalmente da tecnologia correlata são baixos para aplicações comerciais e de pesquisa & desenvolvimento (P&D).

Além do meio físico em si, outros elementos são requeridos para que a HAN possa ser implementada de fato, como conversores de mídia e *gateways* inteligentes. No caso das HANs ópticas pode ser necessário, ainda, o uso de acopladores, atenuadores, conectores ópticos e passivos filtros ópticos. Outros dispositivos e ativos não essenciais. como multiplexadores/demultiplexadores (MUX/DEMUX) capazes de realizar multiplexação WDM (Wavelength Division Multiplexing), 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 à metade 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*¹, 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. A Figura 1.4 mostra como os enlaces unidirecionais (utilização de uma fibra para recepção e outra para transmissão) podem ser transformados em bidirecionais full-duplex. A Figura 1.5 ilustra o possível posicionamento do MUX/DEMUX WDM em uma HAN óptica, substituindo o gateway inteligente da Figura 1.3. Essa substituição visa redução no custo da rede, mas implica em perda de funcionalidades.



Figura 1.4: Utilização do MUX/DEMUX WDM para estabelecimento de enlace bidirecional full-duplex.

¹ Enlace *full-duplex* é aquele no qual ambas as extremidades transmitem seus sinais ao mesmo tempo sem interferir um no outro.



Figura 1.5: Exemplo de utilização do MUX/DEMUX WDM para distribuição do sinal na HAN.

Outro dispositivo interessante para uso em redes ópticas residenciais é o filtro rejeitabanda (*notch*), responsável por eliminar interferências (*crosstalk*) entre canais adjacentes em enlaces ópticos, com o objetivo de melhorar a qualidade da transmissão. Um filtro *notch* pode ser fabricado com base em cristais líquidos (*Liquid Crystal*, LC), substância relativamente antiga que pode ser utilizada para desenvolver dispositivos relacionados a diversas áreas do conhecimento, incluindo as Telecomunicações, devido principalmente à sua sensibilidade a campos eletromagnéticos e variações de temperatura, que provocam mudanças em seus parâmetros constituintes.

Em suma, a grande motivação deste trabalho é o crescimento das HANs, que exige uma capacidade dos sistemas 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.

1.2. OBJETIVOS

Esta Dissertação compreende apenas uma parte do **EnerGiga-I**, contribuindo para que este possa ser desenvolvido futuramente em sua total plenitude e posteriormente ser integrado com o **EnerGiga-E** que, por sua vez, pode ser desenvolvido paralelamente. A contribuição

para o subprojeto **EnerGiga-I** será realizada, principalmente, a partir do desenvolvimento de alguns dos dispositivos importantes para as HANs ópticas.

Dos dispositivos citados na Seção 1.1, apenas um deles será aqui completamente desenvolvido e o caminho percorrido para alcançar o protótipo final pode ser dividido em três grandes etapas: (1) estudo sobre os assuntos envolvidos, (2) desenvolvimento do dispositivo propriamente dito e (3) caracterização do dispositivo desenvolvido. Paralelamente, será realizada uma investigação sobre dispositivos secundários.

O dispositivo a ser efetivamente desenvolvido é o MUX/DEMUX WDM. Uma das formas mais simples para realizá-lo é utilizar filtros dicroicos capazes de refletir uma faixa contínua de canais e simultaneamente transmitir outra faixa contínua de canais distinta. Para esta Dissertação, deve ser possível escolher dois canais diferentes que possam ser separados, explorando as janelas de transmissão das POFs de PMMA (*Poly-Methyl-Methacrylate*).

Os objetivos, por etapa, desta Dissertação estão sumarizados a seguir.

- 1^a Etapa: Estudo
 - Realização de um estudo aprofundado sobre HANs baseadas em cabeamento interno com POFs;
 - Realização de um estudo aprofundado com relação a enlaces WDM sobre POFs de PMMA;
- 2^a Etapa: Investigação e Desenvolvimento
 - Investigação da utilização de filtros dicroicos como dispositivos MUX/DEMUX WDM;
 - Investigação da utilização de filtros de LC como filtros dicroicos, para serem empregados como núcleo do MUX/DEMUX WDM;
 - Investigação da utilização de filtros de LC operando como filtros *notch*, para eliminação do *crosstalk* entre canais adjacentes em enlaces WDM;
 - Desenvolvimento de um MUX/DEMUX WDM operando no espectro visível, baseado em componentes ópticos discretos, para conexão com POFs de PMMA com 1 mm de diâmetro;
- 3^a Etapa: Caracterização
 - Implementação de um enlace WDM com POFs de PMMA para caracterizar e testar o dispositivo desenvolvido.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação encontra-se estruturada em 11 capítulos, conforme descrito nos parágrafos a seguir.

O conhecimento teórico necessário para um melhor entendimento desta dissertação está dividido em 5 capítulos, numerados de 2 a 6. O Capítulo 2 inicia-se com uma revisão sobre fundamentos da óptica física e das comunicações ópticas (Seção 2.2), apresentando em seguida as principais características e os tipos de POFs (Seção 2.3). Ao final do capítulo são apresentados também alguns padrões para POFs (Seção 2.4).

O Capítulo 3 descreve o conceito, a motivação e o objetivo das técnicas de multiplexação (Seção 3.2), com enfoque para o WDM (Seção 3.3). São apresentadas algumas técnicas de multiplexação WDM e a aplicação deste tipo de multiplexação sobre POFs (Seção 3.3). Além disso, são apresentados alguns dispositivos WDM para POFs já desenvolvidos em laboratórios (Seção 3.3).

Para aqueles que possuem conhecimento mais aprofundado sobre fibras ópticas em geral, características específicas das POFs, e sobre os conceitos relacionados ao WDM, a leitura dos Capítulos 2 e 3 pode ser dispensada.

O Capítulo 4 introduz as redes ópticas de curto alcance, apresentando primeiramente alguns conceitos pertinentes ao FTTx (Seção 4.2). Posteriormente o foco da discussão é transferido para as HANs ópticas 4.3.

O Capítulo 5 apresenta uma introdução sobre os filtros ópticos dicroicos, discutindo brevemente conceitos relacionados aos filmes finos (Seção 5.2) e revestimentos ópticos (Seção 5.3). Por último são apresentados algumas classificações para os filtros ópticos (Seção 5.4).

O Capítulo 6 trata dos LCs, apresentando o histórico (Seção 6.2), sua classificação (Seção 6.3) e fabricação (Seção 6.5). São apresentadas também algumas aplicações nas Telecomunicações e em outras áreas do conhecimento (Seção 6.4).

O Capítulo 7 apresenta o desenvolvimento do MUX/DEMUX WDM utilizando filtros ópticos comerciais. Neste capítulo descreve-se a proposta do cubo MUX/DEMUX WDM (Seção 7.2) e os experimentos realizados utilizando-se filtros dicróicos comerciais, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, apresentando os resultados e as discussões (Seção 7.3).

O Capítulo 8 apresenta a investigação da utilização de filtros de LC como filtro *notch* e filtro dicroico, descrevendo os experimentos realizados nesta investigação, e apresentando os resultados e as discussões (Seção 8.2).

O Capítulo 9 descreve os experimentos realizados para comparar três dispositivos quanto ao desempenho como multiplexador no domínio óptico (Seção 9.2). Estes dispositivos são um filtro dicroico comercial, um filtro LC e um acoplador óptico 2x1.

O Capítulo 10 apresenta o protótipo do cubo MUX/DEMUX proposto (Seção 10.2) e sua caracterização nos domínios espectral e do tempo quando faz parte de um enlace de comunicação (Seção 10.3).

Finalmente, o Capítulo 11 apresenta as conclusões desta Dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO SOBRE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS

2.1. INTRODUÇÃO

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

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

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

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

2.2. FUNDAMENTOS DA ÓPTICA FÍSICA E DAS COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

2.2.1. Óptica: Refração, Reflexão e Índice de Refração

A relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz em um meio qualquer origina uma grandeza adimensional, intrínseca ao meio e que varia de forma nãolinear com o comprimento de onda [2] (Figura 2.1), denominada **índice de refração**, definida pela Equação (2.1) para um determinado comprimento de onda.

Dois fenômenos de grande importância no processo de propagação da luz são a **refração** e a **reflexão**, que ocorrem simultaneamente quando a luz incide sobre uma superfície que separa dois meios quaisquer e estão ilustrados na Figura 2.2. O ângulo de reflexão é

sempre igual ao ângulo de incidência, enquanto o ângulo de refração é regido pela Lei de Snell, enunciada na Equação (2.2).



Figura 2.1: Variação do índice de refração com o comprimento de onda para o vidro BK7 [1]².

$$n = \frac{c}{v_m} \tag{2.1}$$

c: velocidade da luz no vácuo;

 v_m : velocidade da luz no meio.



Figura 2.2: Fenômenos de reflexão e refração da luz.

² As fórmulas de Sellmeier e de Cauchy são relações de dispersão utilizadas na óptica.

$$n_1 sen(\theta_1) = n_2 sen(\theta_2) \tag{2.2}$$

n₁: índice de refração do meio 1;

n₂: índice de refração do meio 2;

 θ_1 : ângulo de incidência;

 θ_2 : ângulo de refração.

Quando o ângulo de refração é maior que 90° ocorre reflexão total do feixe luminoso. O ângulo de incidência acima do qual isto ocorrerá é conhecido como ângulo crítico e pode ser calculado segundo a Equação (2.3). O fenômeno da reflexão total está ilustrado na Figura 2.3.

$$sen(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1} \tag{2.3}$$

 θ_C : ângulo crítico.



Figura 2.3: Reflexão total.

2.2.2. Transmitância e Refletância

Um material óptico é capaz de transmitir, absorver e refletir um feixe luminoso que incida sobre ele. Estes três fenômenos definem três parâmetros importantes para a óptica: transmitância (transmissão), refletância (reflexão) e absorbância (absorção), que são dependentes do comprimento de onda da luz. A **absorbância** pode ser calculada segundo a Equação (2.4) [3] e representa a capacidade de um determinado material absorver radiação com um comprimento de onda específico.

$$D = \log\left(\frac{1}{T}\right) \tag{2.4}$$

T: transmitância luminosa.

A **transmitância** luminosa é definida segundo a Equação (2.5), consistindo na razão entre a potência radiante transmitida através do material e a potência radiante incidente [4], e representa quão transparente aquele material é para determinado comprimento de onda. Analogamente, a **refletância** luminosa pode ser definida segundo a Equação (2.6), consistindo na razão entre a potência radiante refletida pela superfície do material e a potência radiante incidente, e representa quão refletor aquele material é para determinado comprimento de onda.

$$T = \frac{P_t}{P_i} \tag{2.5}$$

 P_t : potência radiante transmitida; P_i : potência radiante incidente.

$$R = \frac{P_r}{P_i} \tag{2.6}$$

 P_r : potência radiante refletida.

2.2.3. Estrutura das Fibras Ópticas

As fibras ópticas são estruturas cilíndricas longas e finas, constituídas de material dielétrico e que se comportam como um guia de ondas, transportando o sinal (feixe luminoso) de uma extremidade à outra [5] através de reflexões ou refrações sucessivas ao longo da fibra. Em sua forma mais simples as fibras ópticas são constituídas por um núcleo e uma casca, geralmente revestidos por um material mais resistente, conforme apresentado na Figura 2.4.



Figura 2.4: Esquema estrutural de fibra óptica convencional.

A composição química do núcleo determina se a fibra óptica é de sílica ou polimérica. A casca é fabricada a partir de um material que apresente um índice de refração menor do que o do núcleo, permitindo o confinamento da luz guiada. O revestimento externo tem a finalidade de permitir maior sustentação mecânica e proteção, sendo comum utilizar o polietileno, o polivinilclorido e o polietileno clorinado [6].

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 [2]. Os materiais do núcleo e da casca, por exemplo, determinam as características de atenuação e a dispersão cromática (Subseção 2.2.9 B)), o diâmetro do núcleo determina o número de modos, o perfil de índice de refração determina a dispersão modal (Subseção 2.2.9 B)) [2] e é possível determinar, também, a forma de guiamento da luz no interior da fibra óptica, podendo este não ocorrer nem por reflexão total nem por refrações sucessivas, mas sim com base na teoria das bandas fotônicas (fibras ópticas microestruturadas), que está fora do escopo deste trabalho.

2.2.4. Perfil de Índice de Refração

O perfil de índice de refração das fibras ópticas é determinado pela variação entre os valores dos índices de refração do núcleo e da casca. Diversos tipos de perfis já foram desenvolvidos por pesquisadores, sendo os mais simples o perfil de índice degrau (*Step-Index*, SI) e o de índice gradual (*Graded-Index* GI), que podem ser observados na Figura 2.5, e a partir dos quais derivam os perfis mais complexos. 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. Todos os perfis de índice de refração são modelados matematicamente, contudo, esta área não será explorada neste trabalho.

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 um mesmo intervalo de tempo. As formas de propagação em fibras SI e GI estão ilustradas na Figura 2.5.



Figura 2.5: Perfis de índice de refração [2] – (traduzida pelo autor).

2.2.5. Modos de Propagação e Abertura Numérica

Cada um dos caminhos percorridos pelos raios define um modo de propagação. As fibras ópticas podem ser classificadas, então, quanto ao número de modos que trafegam pelo núcleo, sendo monomodo quando apenas um modo é transportado e multimodo quando diversos modos são guiados. No primeiro caso, as fibras apresentam um núcleo de diâmetro muito pequeno, dificultando o acoplamento do sinal e apresentando maior susceptibilidade ao desalinhamento. Já as fibras multimodo apresentam núcleo de maior diâmetro, acentuando a dispersão modal (Subseção 2.2.9 B)), que contribui para o aumento da degradação do sinal.

As POFs em geral são multimodo, apesar de já terem sido desenvolvidas POFs monomodo para experimentos em laboratórios [6]. Estas POFs (monomodo) apresentam atenuação muito maior do que a das fibras de sílica monomodo e perdem o principal atrativo das POFs: a facilidade de manuseio e baixo custo de conectorização [6].
O número de modos propagantes na fibra é função da frequência normalizada, comumente chamada de parâmetro V, calculado segundo a Equação (2.7) [2] e que determina a fronteira entre a operação monomodo e multimodo.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot NA \tag{2.7}$$

a: raio do núcleo;

 λ : comprimento de onda da luz;

NA: abertura numérica (Numerical Aperture, NA).

A NA é um número adimensional que caracteriza o intervalo de ângulos sobre os quais o sistema pode receber/emitir luz (cone de aceitação), sendo utilizada também no cálculo da banda passante. A NA é calculada segundo a Equação (2.8) [2]. O cone de aceitação da fibra óptica é igual ao dobro do ângulo de aceitação, calculado de acordo com a Equação (2.9) [2]. A Figura 2.6 apresenta um esquema que ilustra o cone de aceitação de uma fibra óptica e alguns modos de propagação.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$
(2.8)

 n_1 : índice de refração do núcleo; n_2 : índice de refração da casca.

$$sen(\theta_a) = \frac{NA}{n_0} \tag{2.9}$$

 θ_a :ângulo de aceitação;

n₀: índice de refração do meio externo.



Figura 2.6: Esquema ilustrativo do cone e ângulo de aceitação, e representação de alguns modos de propagação em uma fibra SI.

É possível determinar o número de modos em fibras ópticas SI utilizando a Equação (2.10) [2], e para as fibras ópticas GI, especificamente as de perfil parabólico, utiliza-se a Equação (2.11) [2].

$$N \approx \frac{V^2}{2} \tag{2.10}$$

$$N \approx \frac{V^2}{4} \tag{2.11}$$

Apenas a título de ilustração, a Tabela 2.1 mostra o número de modos calculados para alguns tipos de fibras ópticas, incluindo fibras de sílica, e a Tabela 2.2 indica a influência do aumento da NA sobre alguns parâmetros da fibra óptica. A Figura 2.7 compara o diâmetro do núcleo e os cones de aceitação de diferentes tipos de fibras ópticas.

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

Obs.: Glass Optical Fiber, GOF.

Tabela 2.1: Número de modos em fibras ópticas [2] – (modificada pelo autor).

Parâmetro	Comportamento com o Aumento da NA
Sensibilidade a curvaturas	Diminui ↓
Potência acoplada à fibra	Aumenta 1
Atenuação devido ao desalinhamento da conexão	Diminui ↓
Atenuação devido ao espaço entre fibras conectadas	Aumenta 1
Largura de banda	Diminui ↓
Número de modos propagantes	Aumenta 1
Dispersão modal	Aumenta ↑

Tabela 2.2: Influência do aumento da NA sobre alguns parâmetros da fibra óptica [2] -

(modificada pelo autor).



Figura 2.7: Comparação entre o diâmetro do núcleo e o cone de aceitação de fibras de sílica e poliméricas [2] – (traduzida pelo autor).

2.2.6. Atenuação

A atenuação é a perda gradual de energia que um sinal sofre ao trafegar por um meio e constitui um fator limitante para todos os sistemas de telecomunicações. A fibra óptica possui uma atenuação característica muito baixa e seu valor depende do tipo de material do qual a fibra é constituída. A potência óptica de saída do sistema pode ser calculada segundo a Equação (2.12) [2] e a atenuação, em dB por unidade de comprimento, segundo a Equação (2.13) [2].

$$P_L = P_0 e^{-\alpha' L} \tag{2.12}$$

$$a_{dB} = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_L}{P_0}\right) \tag{2.13}$$

P_L: potência óptica de saída;

P₀: potência óptica de entrada;

- α' : coeficiente de atenuação(linear);
- L: comprimento da fibra óptica;
- *a*_{dB}: atenuação em dB por unidade de comprimento.

Alguns mecanismos responsáveis pela atenuação nas fibras ópticas são as absorções intrínseca e extrínseca, os espalhamentos (Rayleigh, Mie, principalmente), a radiação e as dispersões [7]. A atenuação mínima possível é a soma das perdas provocadas pela absorção intrínseca e pelo espalhamento Rayleigh, que não podem ser eliminados [6].

A **absorção intrínseca** é um fenômeno que se relaciona com o estado mais puro do material e transforma energia luminosa em energia térmica e/ou luminescência [8]. Ocorre devido à ressonância molecular e constitui a fonte mais importante de perdas intrínsecas nas POFs (ligações C-H). A absorção intrínseca também ocorre quando a luz é absorvida para completar estados de transição eletrônica [4].

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

No **espalhamento** ocorre transferência de potência de um dos modos guiados para si mesmo ou para outros modos, isto é, a energia luminosa passa a se propagar em outra direção [8]. O principal tipo de espalhamento é o espalhamento **Rayleigh**, provocado por flutuações aleatórias na densidade do material da fibra óptica [7]. É inversamente proporcional a λ^4 , de forma que, quanto menor o comprimento de onda, maior é o espalhamento Rayleigh. É possível minimizá-lo, mas, assim como a absorção intrínseca, não pode ser eliminado.

Outro tipo de espalhamento, o **espalhamento Mie**, ocorre devido a imperfeições geométricas e estruturais aleatórias da fibra óptica que tenham dimensões comparáveis às dimensões do comprimento de onda do sinal propagante [4].

As **perdas por radiação** ocorrem principalmente devido à presença de curvaturas ao longo da fibra óptica, uma vez que, na curva, os raios podem incidir com um ângulo menor do que o crítico, não sendo capazes de sofrer reflexão total. Estas curvaturas podem ser macrocurvaturas, quando é necessário curvar a fibra óptica ao longo do enlace para, por exemplo, contornar uma quina (Figura 2.8a e Figura 2.8b), ou podem ser microcurvaturas, provocadas, por exemplo, por presilhas utilizadas em alguns pontos para fixar a fibra em uma superfície (Figura 2.8c). Em geral, as aplicações que utilizam POFs são de curta distância, muitas vezes em ambientes internos, de forma que é bastante provável que seja necessário curvar a fibra diversas vezes ao longo do caminho e fixá-las no chão, em paredes ou rodapés.

A sensibilidade a curvaturas constitui um parâmetro importante para sistemas baseados em POFs porque, além de afetar a potência óptica de saída, influencia outros parâmetros como dispersão e largura de banda. Em fibras SI, a sensibilidade a curvaturas depende bastante da NA e do diâmetro da seção transversal, de forma que, quanto maior for a NA, menor será o raio de curvatura permitido em relação ao diâmetro [2]. Assim, para um mesmo raio de curvatura, quanto maior for a NA, menor será a sensibilidade a curvaturas. A Figura 2.9 ilustra a dependência dessa sensibilidade com a NA para dois tipos de fibras comerciais.



Figura 2.8: (a) Macrocurvatura com tensionamento da fibra óptica, (b) macrocurvatura em 90° e (c) microcurvatura provocada por pressão [9].



Figura 2.9: Sensibilidade à curvatura para uma curva de 360° [2] – (traduzida pelo autor).

As curvaturas são capazes de aumentar a largura de banda da fibra óptica devido à filtragem modal seletiva provocada por elas, que reduz a dispersão modal. No entanto, esse aumento ocorre em troca de uma atenuação adicional. A Figura 2.10 ilustra a relação entre a

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



Figura 2.10: Influência da curvatura na largura de banda e na atenuação [2] – (traduzida pelo autor).

O fenômeno da **dispersão** (Subseção 2.2.9 B)) provoca o alargamento do sinal no tempo, decorrente dos diferentes valores de velocidade de grupo durante a transmissão, o que limita a taxa de transmissão através da fibra óptica e aumenta a atenuação. A dispersão pode ser classificada como **modal** ou **cromática**. A primeira ocorre em fibras ópticas multimodo, devido à diferença nos tempos de chegada dos modos e é mais significativa em fibras ópticas SI [7]. A segunda ocorre devido à variação não linear do índice de refração e do parâmetro V com o comprimento de onda, de forma que cada um deles experimenta o meio de modo diferente, provocando atrasos [2].

Nas POFs existe ainda outro fenômeno que contribui para aumentar a atenuação, o **processo de deslocamento de Goos-Hänchen** [2], no qual os modos invadem a casca, que possui um coeficiente de atenuação muito elevado, penetrando a uma distância da ordem de grandeza do comprimento de onda do raio, e pode ocorrer mesmo quando há reflexão total [2].

Na prática observa-se que a atenuação da fibra óptica depende também, indiretamente, do seu diâmetro, uma vez que ao diminuir o diâmetro, ocorre um maior número de interações entre o núcleo e a casca, e é mais complexa a manutenção da qualidade do processo de fabricação. Apenas a título de ilustração, a Tabela 2.3 mostra diversas fibras ópticas com diferentes diâmetros e suas respectivas atenuações. As principais causas da atenuação nas POFs são o espalhamento Rayleigh, absorção (ligações C-H principalmente), acoplamento modal e perdas na interface núcleo-casca.

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

Tabela 2.3: Atenuação de POFs de diferentes fabricantes de acordo com o diâmetro da fibra óptica [2] – (traduzida pelo autor).

2.2.7. Espectro de Transmissão

Nas telecomunicações em geral são utilizadas diversas faixas de frequências do espectro eletromagnético. Em comunicações ópticas são utilizadas as faixas do ultravioleta, luz visível e infravermelho, conforme ilustra a Figura 2.11, sendo comum referenciá-las em termos de comprimento de onda. Esta figura apresenta também a curva característica, qualitativa, de atenuação de uma SI-POF de PMMA.



Figura 2.11: Espectro utilizado nas comunicações ópticas [2] – (modificada pelo autor).

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

Cada tipo de POF apresenta uma curva de atenuação característica específica. A Figura 2.12 ilustra a curva característica, quantitativa, das POFs de PMMA, material de fabricação mais comum. Estão indicadas, também, suas janelas de transmissão, que são faixas nas quais o sinal óptico apresenta menor atenuação. É interessante utilizar fontes ópticas cujos comprimentos de onda estejam centrados nestas janelas de transmissão, para que o efeito da atenuação seja reduzido. A janela centrada em 570 nm seria a melhor opção para POFs de PMMA, uma vez que apresenta a menor atenuação, porém, atualmente as fontes luminosas que emitem neste comprimento de onda ainda não estão suficientemente desenvolvidas para aplicação em sistemas ópticos de alta capacidade para transmissão de dados [8].



Figura 2.12: Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA [2] – (traduzida pelo autor).

2.2.8. Largura de Banda

A largura de banda de um sistema pode ser definida de diversas formas. Essencialmente ela descreve a faixa de frequências na qual os sinais podem ser transmitidos sofrendo atenuação aceitável [2]. Diversos fatores influenciam nesse parâmetro e nas fibras ópticas multimodo os principais são a dispersão modal e cromática (Subseção 2.2.9 B)). 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 [2]. A Tabela 2.4 ilustra este parâmetro para fibras ópticas SI e GI comuns.

	Perfil de Índice de Refração	Produto <i>B</i> · <i>L</i> [2]
	SI (PMMA POF)	40 MHz · 100 m
	GI (PMMA POF)	2 GHz · 100 m
-		

Tabela 2.4: Produto B · L para fibras ópticas SI e GI de PMMA.

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 decisor no receptor não será mais capaz de diferenciá-los. Assim, a taxa de transmissão se torna limitada [2], uma vez que menos bits por segundo deverão ser transmitidos para permitir a correta identificação de cada um.

Nas POFs a largura de banda diminui com NA^2 devido ao aumento da diferença nos tempos de propagação dos modos, que leva a um aumento da dispersão (Subseção 2.2.9 B)). 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 pré-compensar e pós-compensar a dispersão [2].

2.2.9. Fenômenos Ópticos Importantes para as POFs

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

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

O acoplamento modal pode reduzir a dispersão na fibra óptica, aumentando sua largura de banda, devido à possibilidade de transferência da energia dos modos de ordem mais elevada para modos de ordem mais baixa, reduzindo a diferença nos tempos de chegada dos diversos modos [2]. O contrário também pode acontecer, contudo, a prática revela que em fibras ópticas nas quais o acoplamento modal é intenso, como as POFs, é estatisticamente mais comum a transferência de energia de modos lentos para modos [5].

A conversão de modos pode ser considerada um caso especial de acoplamento modal no qual o número de modos não pode aumentar [2]. Nas POFs a conversão de modos ocorre comumente na interface núcleo-casca e é caracterizada pela alteração do ângulo de propagação.

Os modos de fuga (leaky modes) são ondas que não conseguem alcançar as condições necessárias para serem guiadas, mas que atingem distâncias razoáveis, podendo ser detectados em até dezenas de metros de fibra óptica, provocando grande influência nas medidas realizadas, uma vez que é possível detectar estes modos no receptor se a fibra for utilizada em distâncias muito curtas [2] [5]. A maioria dos modos de fuga é eliminada após percorrer alguns centímetros de fibra óptica. De certa forma, são modos intermediários que se encontram entre os modos guiados e os modos da casca, sofrendo atenuação por radiação ao longo da fibra óptica. Estes modos de fuga podem ser expulsos da fibra óptica (mode stripping) utilizando-se curvaturas planejadas, que afetem muito pouco a propagação dos modos guiados [5].

B) Dispersão Modal e Cromática

O alargamento do pulso nas fibras ópticas ocorre devido ao fenômeno da dispersão. Todos os tipos/subtipos de dispersão presentes em fibras ópticas estão sumarizados na Figura 2.13. Esta classificação definida por [2] não será considerada em sua totalidade neste trabalho, uma vez que outros autores [10], [11], [12], classificam a dispersão dependente do perfil de índice de refração apenas no grupo de dispersão cromática. A dispersão de guia de onda e a dependente do modo de polarização não são de grande relevância para fibras multimodo como as POFs [2].



Figura 2.13: Tipos de dispersão presentes nas fibras ópticas [2] - (traduzida pelo autor).

Nas fibras ópticas SI a luz propaga por diferentes modos com velocidades distintas, chegando à extremidade de saída em intervalos de tempos diferentes, o que provoca o alargamento do pulso no tempo, conforme ilustrado na Figura 2.14. O tempo necessário para cada modo excitado por um mesmo comprimento de onda percorrer seu caminho de propagação em fibras SI é dado pela Equação (2.14) [2]. A diferença de tempo entre o modo mais rápido e o mais lento (**dispersão modal**) nas fibras SI é definida pela Equação (2.15) [2]. A Equação (2.16) define o parâmetro Δ , que indica a diferença de índice de refração relativa entre a casca e o núcleo da fibra.



Figura 2.14: Efeito da dispersão no sinal de saída [2] – (traduzida pelo autor).

$$t_n = L_n \cdot \frac{n_1}{c} \tag{2.14}$$

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

n₁: índice de refração do núcleo;

c: velocidade da luz no vácuo.

$$\Delta t_{mod} = \frac{L_1}{2 \cdot c \cdot n_2} \cdot NA^2 \approx \frac{L_1 \cdot n_1}{c} \cdot \Delta$$
(2.15)

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$
(2.16)

L₁: comprimento do caminho de propagação do modo mais rápido (comprimento da

fibra óptica);

n₂: índice de refração do casca;

 Δ : diferença de índice de refração relativa.

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

A dispersão dependente do perfil de índice de refração é um fenômeno mais complexo que ocorre em fibras GI, constituindo uma dispersão modal não compensada. Por esta razão, acredita-se que [2] define esta dispersão como modal e cromática, para que seja possível considerar a dispersão modal residual das fibras ópticas GI. A referência [11] define que a dispersão de perfil ocorre porque o parâmetro de perfil de índice de refração é dependente do comprimento de onda, de forma que a otimização de um perfil para um comprimento de onda pode não ser ideal para outro comprimento de onda e, assim cada um experimentará um atraso diferente, levando ao alargamento do pulso. Como a dependência com o comprimento de onda define a dispersão cromática, a dispersão dependente do perfil de índice de refração é considerada um subtipo de dispersão cromática. Para um perfil de índice de refração é considerada um subtipo de dispersão cromática. Para um perfil de índice de refração parabólico, bastante comum, o alargamento temporal provocado por esta dispersão pode ser calculado segundo a Equação (2.17) [2].

$$\Delta t_{perfil} = \frac{L_1 \cdot n_1}{c} \cdot \frac{\Delta^2}{2} \tag{2.17}$$

A **dispersão de guia onda** nas POFs é causada pela presença do deslocamento de Goos-Hänchen, que é dependente do comprimento de onda do raio luminoso [2]. A luz percorre os caminhos da casca e do núcleo com diferentes velocidades, levando ao alargamento do pulso. Contudo, apenas uma pequena porção da luz em modos de ordem mais alta penetra na casca, de forma que a dispersão de guia de onda é mais importante para fibras ópticas monomodo [2].

A **dispersão material**, por sua vez, é importante tanto para fibras ópticas multimodo como para as monomodo [2]. Esta dispersão ocorre porque cada comprimento de onda propaga com uma velocidade diferente em um mesmo meio provocando alargamento do pulso, uma vez que as fontes luminosas são policromáticas. Esta dispersão é calculada segundo a Equação (2.18) [2] e a Figura 2.15 ilustra seu efeito sobre o sinal propagado.

$$\Delta t_{mat} = L \cdot \Delta \lambda \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} = L \cdot \Delta \lambda \cdot M(\lambda)$$
(2.18)

Δλ: largura espectral da fonte luminosa; n(λ): índice de refração como função do comprimento de onda; M(λ): parâmetro de dispersão material [ps/km · nm].



Figura 2.15: Efeito da dispersão material [2] – (traduzida pelo autor).

2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE POFS

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

Como características gerais, as fibras ópticas apresentam grande largura de banda, são leves e possuem pequeno diâmetro, o que facilita seu armazenamento, transporte e instalação. Sua elevada largura de banda permite expandir o sistema sem que exista necessidade de realizar um novo cabeamento, desde que a fibra óptica não esteja operando em sua capacidade máxima. Assim, torna-se possível aumentar a quantidade de informação transmitida apenas com a atualização dos equipamentos envolvidos [2]. Além disso, as fibras ópticas são imunes a interferências eletromagnéticas, uma vez que são fabricadas a partir de material dielétrico, e não interferem no sinal de outras fibras ópticas nem cabos metálicos adjacentes. São mais seguras do que os cabos metálicos em relação a acidentes envolvendo energia elétrica, uma vez que não há fluxo de elétrons no interior delas, de forma que não são capazes de provocar faíscas nem choques elétricos. Em relação à transmissão de dados, além da alta capacidade de transmissão, as fibras ópticas são meios físicos praticamente invioláveis, uma vez que não irradiam informação para o meio externo e uma interferência física no enlace com a finalidade de identificar os dados trafegados, implicaria em um não fornecimento temporário ao cliente ou em redução perceptível da potência óptica recebida [8]. Deve-se enfatizar que para comunicação de dados a potência transmitida pela fibra óptica deve ser baixa, para evitar a influência de efeitos não-lineares que podem degradar o sinal.

As POFs, especificamente, são caracterizadas pela facilidade de conexão, que advém de sua elevada NA e grande diâmetro, permitindo utilizar tecnologias de conexão baratas e simples [8]. Sua instalação pode ser feita por qualquer pessoa não especializada, desde que sejam fornecidos os equipamentos necessários para realizar esta tarefa. A Figura 2.16 mostra uma conexão realizada com conectores FC e dois equipamentos simples para clivagem da extremidade da fibra e para decapar a POF. O baixo custo destes equipamentos reduz o custo de implementação do sistema. As dimensões um pouco maiores das POFs também facilitam seu manuseio e fornecem maior resistência mecânica, além de reduzir a sensibilidade a curvaturas, quando comparadas com as fibras de sílica [8].



Figura 2.16: Conexão realizada com conectores FC e ferramentas utilizadas para clivagem e decapagem da POF.

As POFs operam no espectro visível, trazendo maior segurança para o operador, pois a luz visível é menos danosa à visão do que a luz infravermelha quando direcionada para os olhos. Para o usuário comum, o uso da luz visível também facilita verificar se o sinal está sendo transmitido ou não, uma vez que é possível a identificação visual (fibra acesa ou apagada), conforme Figura 2.17. A Figura 2.18 ilustra as extremidades de uma POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo e diâmetro total igual a 2,2 mm, sendo possível diferenciar bem o núcleo e o revestimento.



POF Nua Acesa



Figura 2.17: POF nua (bare fiber) acesa.



Figura 2.18: POF SI de PMMA com 1 mm de núcleo, revestida.

As POFs, em geral, apresentam elevada atenuação quando comparadas com as fibras de sílica existentes, devendo ser utilizadas, portanto, em aplicações que exijam elevada capacidade de transmissão em pequenas distâncias e a baixo custo. Com o avanço das tecnologias de fabricação essa atenuação diminuiu e novos tipos de POFs surgiram, permitindo uma possível expansão da aplicabilidade destas fibras ópticas. Esta evolução está ilustrada na Figura 2.19.

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.

As POFs podem ser classificadas quanto:

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



Figura 2.19: Evolução da atenuação nas POFs [2] – (traduzida pelo autor).

Nas Subseções 2.2.4 e 2.2.5 foram apresentadas as classificações quanto ao número de modos – multimodo –, e quanto ao perfil de índice de refração – GI e SI –, respectivamente. Nesta seção serão apresentados alguns tipos de POFs com relação ao polímero utilizado.

2.3.1. POFs de PMMA

O PMMA termoplástico, Plexiglas[®], é o material mais utilizado para fabricação de POFs [2]. Sua estrutura molecular pode ser observada na Figura 2.20 e suas principais propriedades estão sumarizadas na Tabela 2.5.



Figura 2.20: Estrutura molecular do PMMA [2].

Parâmetro	Unidade	Valor
Índice de refração	_	1,492
Temperatura de transição vítrea T _g	°C	115
Densidade	g/cm ³	1,18
Absorção de água até saturação	%	0,5
Condutividade térmica	W/m.K	0,17
Coeficiente de expansão térmica	Mm/m.K	0,07
Resistividade	Ohm.cm	10^{15}
Tensão de ruptura	kV/mm	20-25
Temperatura de combustão espontânea	°C	~ 430

Tabela 2.5: Propriedades do PMMA [2] – (modificada pelo autor).

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. A Figura 2.12, repetida abaixo, ilustra a curva característica de atenuação para uma POF padrão de PMMA. As POFs fabricadas a partir deste material não suportam condições ambientais extremas, como elevadas temperaturas, de forma que são comumente utilizadas em redes de curta distância que não exigem características especiais, como as redes residenciais ou as de armazenamento (*Storage Area Networks*, SANs).

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



Figura 2.12: Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA [2] – (traduzida pelo autor).

2.3.2. POFs de Policarbonato

Aplicações em que existem condições mais adversas exigem o emprego de outros tipos de POFs. Por exemplo, em ambientes com elevadas temperaturas, como redes em automóveis, nas quais trechos das fibras ópticas passam próximo ao compartimento do motor, onde as temperaturas podem chegar a 125°C, ou em redes industriais nas quais as fibras ópticas são instaladas próximas a equipamentos que emitem muito calor, utilizam-se POFs de policarbonato (PC-POFs). Estas POFs apresentam uma temperatura de transição vítrea maior do que as de PMMA e são suficientemente transparentes para a aplicação à qual se destinam [2]. A Figura 2.21 compara a curva característica de atenuação da POF de PMMA com a PC-POF. A grande desvantagem é que elas se deterioram rapidamente quando em contato com umidade [2].

A possibilidade de operação em temperaturas mais elevadas é obtida em troca de uma maior atenuação total da fibra óptica, conforme observado nas Figura 2.21 e Figura 2.22. A Tabela 2.6 ilustra algumas propriedades da PC-POF ESKA FH4001-TM da Mitsubishi.



Figura 2.21: Comparação entre a atenuação da POF de PMMA e PC-POF [2] – (traduzida pelo autor).



Figura 2.22: Curvas características de atenuação de diversas PC-POFs [2] – (traduzida pelo autor).

Parâmetro [2]	Unidade [2]	Valor [2]
Faixa de temperatura de operação	°C	-55 a 125
Temperatura de operação com elevada umidade	°C	85
Atenuação máxima em 770 nm	dB/km	800
Raio mínimo de curvatura	Mm	25
Material da casca/núcleo	—	fluoropolímero/ policarbonato
Índice de refração casca/núcleo	—	1,392/1,582
Abertura numérica	_	0,75

Tabela 2.6: Características da PC-POF ESKA FH4001-TM da Mitsubishi.

2.3.3. POFs de Polímeros Deuterados

Os compostos orgânicos apresentam grande número de ligações C-H. Os átomos de hidrogênio dessas ligações podem ser substituídos por átomos mais pesados, contribuindo muito para a redução da absorção intrínseca em determinados comprimentos de onda, uma vez que ocorre um deslocamento dos harmônicos de ressonância [2], conforme ilustra Tabela 2.7.

Harmânica	С-Н	C-D	C-F	C-Cl	C=O	O-H
пагшошсо	$\lambda (nm)$	λ (nm)	λ (nm)	$\lambda(nm)$	$\lambda(nm)$	$\lambda(nm)$
ν ₀	3.390	4.484	8.000	12.987	5.417	2.818
ν ₁	1.729	2.276	4.016	6.533	2.727	1.438
ν ₂	1.176	1.541	2.688	4.318	1.830	979
ν ₃	901	1.174	2.024	3.306	1.382	750
ν_4	736	954	1.626	2.661	1.113	613
ν_5	627	808	1.361	2.231	934	523
ν ₆	549	704	1.171	1.924	806	—
ν_7	—	626	1.029	1.694	710	—
ν ₈	_	566	919	1.515	635	—
ν ₉	-	-	830	1.372	_	_

Tabela 2.7: Harmônicos de ressonância para ligações C-X [2] – (traduzida pelo autor).

Uma das substituições possíveis é trocar o hidrogênio comum pelo hidrogênio "pesado", conhecido como deutério, formando ligações C-D. Algumas curvas de atenuação para fibras GI deuteradas estão ilustradas na Figura 2.23. Observa-se que a atenuação mínima obtida para este tipo de fibra óptica, aproximadamente 20 dB/km em 680 nm, é bem menor do que a atenuação mínima da POF padrão (POF SI de PMMA), aproximadamente 60 dB/km em 520 nm (Figura 2.12).

A grande desvantagem das POFs deuteradas é a intensa absorção de água na presença desta substância, elevando novamente a atenuação por absorção intrínseca, devido à intensa absorção dos harmônicos do íon OH⁻. Além disso, o deutério utilizado para construir as novas ligações apresenta um preço proibitivo para aplicações que utilizam POFs e visam o baixo custo do sistema [6].



Figura 2.23: Curvas características de atenuação de diversas POFs deuteradas [2] – (traduzida pelo autor).

2.3.4. POFs de Polímeros Fluoretados

Outra substituição possível para as ligações C-H são as ligações C-F, que deslocam ainda mais os harmônicos quando comparadas com as ligações C-D (Tabela 2.7). Essa substituição reduz a atenuação da POF de forma significativa, sendo o limite teórico menor do que 0,2 dB/km, comparável às fibras de sílica. Contudo este limite teórico é extremamente difícil de ser alcançado [2].

Até 2008 a menor atenuação produzida, 8 dB/km em 1070 nm, foi alcançada utilizando poli-perfluoro-butenil-vinil-éter, conhecido comercialmente como CYTOP[®], fabricado pela Asahi Glass e cuja estrutura molecular pode ser observada na Figura 2.24., em que todos os hidrogênios do polímero foram substituídos por flúor [2]. Com uma redução tão acentuada da atenuação, as POFs, especificamente as PF-POFs, podem finalmente ser empregadas em substituição a fibras de sílica multimodo em redes de acesso [2].

A curva de atenuação característica das POFs fabricadas com CYTOP[®] está ilustrada na Figura 2.25, em comparação com a atenuação da fibra de sílica.



Figura 2.24: Estrutura molecular do CYTOP[®] [2] – (traduzida pelo autor).



Figura 2.25: Comparação entre atenuação da fibra de sílica e da PF-POF [2] – (traduzida pelo autor).

2.4. PADRÕES PARA POFS

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

Nas comunicações de dados, as áreas de maior aplicação para POFs e padronizações utilizadas são [2]:

- Redes em edifícios: ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) Forum, IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 1394 e Ethernet;
- Redes internas, por exemplo, em residências: IEEE 1394 e Ethernet;

- Redes em automóveis: D2B (Domestic Digital Bus), MOST (Media Oriented Systems Transport), Byteflight e Flexray;
- Redes para realização de medições: JIS (*Japanese Industrial Standard*), IEC (*International Electrotechnical Comission*) e VDE/VDI (*Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V./ Verein Deutscher Ingenieure e. V.*);
- Redes para automação de máquinas: SERCOS (Serial Realtime Communication System), Interbus, Profibus e Ethernet.

Cada padrão definido para as diversas POFs existentes foi elaborado de acordo com a aplicação a qual se destina, de forma a obter o melhor desempenho possível. O padrão IEC 60793-2 descreve fibras ópticas em geral, sendo as POFs padronizadas na parte 2-40 (Fibras Multimodo Categoria A4) [2], e sua edição mais atual para POFs data de 2009 (Ed. 3.0). As Tabela 2.8a e Tabela 2.8b mostram algumas características das POFs padronizadas no IEC 60793-2-40 Ed.3.0 [13]. As classes A4a, A4b e A4c referem-se às POFs SI de PMMA, a classe A4d descreve POFs DSI de PMMA, a classe A4e refere-se às POFs MSI e GI, e as classes A4f, A4g e A4h tratam das GI-PF-POFs [2].

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

Tabela 2.8a: Características e aplicações das fibras categoria A4 [13] – (traduzida

pelo autor).

Parâmetro	A4e	A4f	A4g	A4h		
φ do Núcleo	≥ 500	200	120	62.5		
φ da Casca	750	400	400	245		
(µm)	750	490	490	243		
NA	$0,25^{t}$	0,190 ^e	0,190 ^e	0,190 ^e		
λ de Operação (nm)	650	650, 850, 1300	650, 850, 1300	850, 1300		
Aplicações	Interfaces audiovisuais digitais e transmissão de dados.	Industrial e móvel; compatível com equipamentos de transmissão A3.	Transmissão de dados.	Transmissão de dados; primariamente utilizada em estruturas "ribbon"		

NOTA 1: Tipicamente 15 μm a 35 μm menor do que o diâmetro da casca.

NOTA 2: Outros comprimentos de onda potenciais para fibras A4a estão descritos no Anexo J.

^t Teórico.

^e Efetivamente medido.

Tabela 2.8b: (Cont. Tabela 2.8a) Características e aplicações das fibras categoria A4

[13] – (traduzida pelo autor).

3. MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA SOBRE FIBRAS ÓPTICAS POLIMÉRICAS

3.1. INTRODUÇÃO

A multiplexação surge nas Telecomunicações como um processo para melhorar o aproveitamento da largura de banda dos meios físicos. Esta tecnologia permitiu o estabelecimento de um processo de comunicação mais eficiente e contribuiu para um maior avanço das Telecomunicações. Existem diversos tipos de multiplexação, e antes de tratar sobre o WDM em si, é interessante definir primeiro o que são os processos de multiplexação e demultiplexação, e por que são utilizados nos sistemas de Telecomunicações. Assim, este capítulo discute, inicialmente, a multiplexação de forma geral, aprofundando, posteriormente, os conhecimentos correlatos. Serão discutidas, ainda, algumas motivações para o uso de WDM sobre POFs e, em seguida, serão apresentados alguns dispositivos já desenvolvidos.

3.2. MULTIPLEXAÇÃO: DEFINIÇÃO E MOTIVAÇÃO

Em grande parte dos 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 3.1), 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 consiste na separação do meio em canais, de acordo com algum parâmetro específico, pelos quais trafegam os sinais individuais sem interferir (idealmente) nos canais adjacentes.

Os principais parâmetros utilizados para definir a multiplexação são o tempo (*Time Division Multiplexing*, TDM), a frequência (*Frequency Division Multiplexing*, FDM) ou o comprimento de onda (WDM), e o espaço (*Space Division Multiplexing*, SDM). Existe ainda uma multiplexação que utiliza códigos ortogonais entre si para separar os canais de transmissão, denominada CDM (*Code Division Multiplex*), que costuma ser utilizada apenas como método de acesso ao meio, CDMA (*Code Division Multiple Access*).

O TDM (Figura 3.2) é caracterizado por dividir o tempo em intervalos denominados quadros, sendo cada quadro subdividido em intervalos de tempo menores, denominados *timeslots*, durante os quais cada fonte pode transmitir uma fração do seu sinal.



Figura 3.1: Utilização da banda passante de um meio físico genérico em uma transmissão comum e utilizando multiplexação.

Banda passante do meio



Figura 3.2: Esquema de multiplexação TDM.

O SDM atualmente é considerado um tipo de multiplexação, apresentando grande importância para sistemas sem fio. Em meios com fio não ocorre de fato multiplexação porque cada sinal é enviado sobre um fio individual. Já no SDM 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.

O FDM (Figura 3.3) separa o espectro em diferentes faixas de frequências, alocadas para cada usuário enviar seu sinal, formando os canais individuais. O WDM (Figura 3.4) é equivalente ao FDM, porém aplicado ao domínio óptico. Nesta multiplexação os canais são separados por faixas de comprimento de onda em vez de faixas de frequência, de forma que cada sinal enviado pode ocupar apenas a faixa à qual foi alocado.



Figura 3.3: Esquema de multiplexação FDM.

Os dispositivos necessários para realizar qualquer um dos tipos de multiplexação 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, e na extremidade receptora os sinais que chegam por esse meio são separados e repassados para seus respectivos receptores. Este conjunto será denominado neste trabalho como MUX/DEMUX. Um esquema de sistema utilizando um MUX/DEMUX WDM está ilustrado na Figura 3.5. Nesse sistema existem três transmissores, cada um emitindo em um comprimento de onda diferente (azul, verde e vermelho), que trafegam por fibras ópticas distintas e são combinados 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, representados na figura por fotodetectores (*PhotoDetector*, PD).

O interesse desta dissertação está focado na aplicação do WDM em redes ópticas residenciais, portanto, apenas este tipo de multiplexação será explorado.



Figura 3.4: Esquema de multiplexação WDM.



Figura 3.5: Exemplificação esquemática de um sistema simples utilizando WDM de três canais.

3.3. MULTIPLEXAÇÃO WDM

Conforme mencionado anteriormente, o WDM é um tipo de multiplexação em que são reservadas faixas de comprimento de onda para definir diferentes canais em uma única fibra óptica. Para utilizar estas faixas reservadas são necessárias fontes luminosas 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.

O WDM é um processo transparente para o sinal propagante, isto é, cada canal é capaz de transportar um sinal óptico diferente, com taxas de transmissão e protocolos distintos, e que podem carregar qualquer tipo de informação, seja voz, vídeo ou dados. Assim, cada canal constitui um meio de transmissão virtual independente dos outros canais.

Os sistemas que utilizam WDM apresentam grande flexibilidade na capacidade de transmissão, bastando, por exemplo, aumentar o número de canais transmitidos (aumentar o número de fontes luminosas com diferentes comprimentos de onda – equipamentos terminais) para elevar a capacidade total do sistema, sem a necessidade de instalar novas fibras ópticas ou trocar os equipamentos intermediários já utilizados, desde que estes sejam capazes de suportar essa modificação. Além disso, o WDM permite também a utilização de enlaces bidirecionais *full-duplex*, importantes para comunicações de dados.

O uso do WDM já é bem dominado e está muito bem estabelecido 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 dos sistemas ópticos em geral. Alguns destes documentos estão listados abaixo, incluindo aqueles que padronizam sistemas que de alguma forma utilizam o WDM:

- G.671: Transmission characteristics of optical components and subsystems;
- **G.694.1**: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid;
- **G.694.2**: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid;
- **G.695**: Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications;
- **G.696.1**: Longitudinally compatible intra-domain DWDM applications;
- **G.697**: Optical monitoring for dense wavelength division multiplexing systems;
- **G.698.1**: Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces;

- **G.698.2**: Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical interfaces;
- **G.698.3**: Multichannel seeded DWDM applications with single-channel optical interfaces;
- **G.973.1**: Longitudinally compatible DWDM applications for repeaterless optical fiber submarine cable systems;
- **G.973.2**: Multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces for repeaterless optical fiber submarine cable systems;
- **G.975.1**: Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems;
- **G.983.3**: A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation.

Analisando apenas os títulos das recomendações mencionadas nessa lista, verifica-se que a ITU-T subdivide o WDM em dois tipos, denso (*Dense* WDM, DWDM) e esparso (*Coarse* WDM, CWDM). Há, ainda, menção ao WWDM (*Wide/Wideband* WDM) na recomendação ITU-T G.671. 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 (3.1).

$$\Delta f \approx \frac{c \cdot \Delta \lambda}{\lambda^2} \tag{3.1}$$

- Δf : faixa de frequências;
- $\Delta \lambda$: faixa de comprimentos de onda;
- c: velocidade da luz no vácuo;

 λ : comprimento de onda central da banda.

O **DWDM** se caracteriza por utilizar canais mais estreitos do que o CWDM, requerendo transmissores mais robustos e, consequentemente, mais caros, que apresentem um

mecanismo de controle capaz de manter a estabilidade da frequência de transmissão, ou seja, transmissores capazes de enviar sinais que apresentem pouca flutuação na frequência de operação. Além disso, as fontes luminosas utilizadas devem ser Lasers (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) com largura espectral muito pequena para que não haja interferência entre os canais estabelecidos.

O **CWDM**, por sua vez, costuma ser implementado em sistemas que requeiram menor custo, porém, mantendo-se uma qualidade elevada. A redução desse custo é alcançada devido à possibilidade de utilização de equipamentos menos robustos, que apresentem menor controle de estabilidade e com fontes ópticas de espectro mais largo. O uso destes equipamentos se torna possível devido à maior largura espectral dos canais, ao maior espaçamento entre os canais e à menor rigidez quanto à tolerância dos comprimentos de onda estabelecidos.

No caso do **DWDM**, a recomendação ITU-T G.694.1 [14] define canais de 12,5, 25, 50 e 100 GHz. São permitidos também canais com mais de 100 GHz de largura espectral, sendo estes obrigatoriamente múltiplos inteiros de 100 GHz. Já para o **CWDM**, a recomendação ITU-T G.694.2 [15] define 18 canais de 20 nm cada, estabelecidos de acordo com o comprimento de onda central de cada um, variando de 1270 nm a 1610 nm, conforme ilustra Figura 3.6.



Figura 3.6: Canais CWDM definidos pela ITU-T [16] – (traduzida pelo autor).

Na literatura são definidos, ainda, outros tipos de WDM, como o UDWDM (*Ultra*-DWDM) e o WWDM, que apresentam diferentes faixas reservadas para seus canais, contudo, apenas as grades espectrais do DWDM e do CWDM estão padronizadas pela ITU-T. Para o **WWDM** a ITU-T apenas especifica na recomendação G.671 [17] que o espaçamento entre canais deve ser maior do que 50 nm. Em geral são utilizadas as bandas O e C, com os canais centrados em 1310 e 1550 nm. A grade espectral **UDWDM** ainda não está padronizada, mas acredita-se que existirão mais canais dentro de uma mesma faixa, comparando-se ao DWDM, de forma que será possível obter uma capacidade ainda maior.

3.3.1. Técnicas de Multiplexação WDM

O WDM pode ser implementado utilizando diversas técnicas, cada uma baseada em fenômenos ópticos diferentes, como refração, difração e interferência. É possível utilizar uma combinação destas técnicas, originando dispositivos mais complexos. Nesta seção serão apresentadas as técnicas que utilizam prisma, redes de difração, guias de ondas e filtros de interferência.

A) Dispersão por Prisma

A forma mais simples de realizar a multiplexação ou a demultiplexação de feixes luminosos é a utilização de prismas ópticos, contudo é pouco indicada por apresentar grandes perdas [18]. Estes elementos são capazes de separar e combinar a luz incidente devido à sua estrutura e composição. No processo de demultiplexação, quando um feixe de luz policromática incide sobre a superfície do prisma cada componente desse feixe experimentará o meio de modo diferente (dispersão cromática), de forma que ao emergir através da superfície oposta estarão separadas por um determinado ângulo. Utiliza-se uma lente para auxiliar a convergência das componentes separadas em suas respectivas fibras ópticas receptoras. A multiplexação é realizada pelo caminho inverso. A Figura 3.7 ilustra o esquema da demultiplexação utilizando um prisma e a fotografia de um feixe luminoso dispersado por um prisma real.



Figura 3.7: (a) Esquema de demultiplexação utilizando prisma [19] e (b) dispersão de um feixe luminoso de luz branca provocada por um prisma [1] – (traduzida pelo autor).

B) Difração e Interferência por Grade de Difração

Outro elemento óptico que pode ser utilizado para realizar a multiplexação e a demultiplexação da luz é a grade de difração. Neste caso a separação angular dos comprimentos de onda ocorre devido à difração provocada pela grade e à interferência entre esses raios difratados. A Figura 3.8 ilustra o esquema da demultiplexação realizada utilizando grade de difração. O caminho inverso pode ser utilizado para multiplexar os sinais. Nesta figura também está ilustrado o funcionamento de uma grade de difração difratando uma luz "azul" (policromática).

C) Difração e Interferência por AWG

Os processos de multiplexação e demultiplexação podem ser realizados, também, utilizando AWGs (*Arrayed WaveGuides*), que consistem em um conjunto de guias de onda curvados com diferentes comprimentos. O sinal de entrada sofre difração e é repassado para os múltiplos guias curvados. Como os comprimentos são diferentes para cada guia de onda, os sinais atingem a outra extremidade com fases distintas e provocam interferência uns nos outros, sendo, então, separados em feixes diferentes que são recolhidos pelas fibras ópticas de

saída [19]. A multiplexação é realizada no caminho inverso. A Figura 3.9 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.

(a)



Figura 3.8: (a) Esquema de demultiplexação utilizando grade de difração [19] e (b) fotografia de uma grade de difração real difratando a luz policromática incidente [1] – (traduzida pelo autor).

D) Interferência por Filmes Finos (Filtros de Interferência)

Finalmente, dentre as técnicas simples para realizar multiplexação e demultiplexação cita-se o uso dos filtros de interferência. 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. A Figura 3.10 ilustra o esquema de demultiplexação realizada com filtros de interferência e mostra também uma fotografia de um filtro deste tipo combinando um feixe luminoso vermelho com um verde, originando um feixe único, alaranjado.



Figura 3.9: (a) Esquema de demultiplexação utilizando um AWG [19], (b) esquema da difração e interferência sofridas pelo feixe luminoso no AWG [1] e (c) AWG real utilizado para WDM em fibras de sílica [1] – (traduzida pelo autor).

Esta técnica é relativamente simples de ser implementada, estando de acordo com a simplicidade e facilidade de operação das POFs e sua tecnologia correlata. Apesar de seu desempenho não ser o melhor dentre as técnicas citadas, para sistemas baseados em POFs que não requerem desempenho extraordinário como os baseados em sílica, ela cumpre seu papel de forma aceitável. Assim, neste trabalho serão utilizados filtros de interferência, mais especificamente filtros dicroicos, para construir o dispositivo MUX/DEMUX.


Figura 3.10: (a) Esquema de demultiplexação utilizando filtros de interferência [19] e (b) multiplexação de dois feixes luminosos, verde e vermelho, utilizando um filtro de interferência [1] – (traduzida pelo autor).

Qualquer que seja a técnica utilizada para desenvolver o dispositivo MUX/DEMUX, para aplicar o WDM às POFs, 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 interferência entre canais adjacentes. A taxa de transmissão máxima possível pode ser obtida a partir da Equação (3.2) [20], utilizando r = 1 (codificação NRZ) e c = 1/2 (caso médio), originando a Equação (3.3) [2], que pode ser empregada para N canais.

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.

para 1 canal:
$$R = \frac{1}{c} \cdot B \cdot r$$
 (3.2)
 $r = 1 e c = \frac{1}{2} \therefore$
 $\therefore R \approx 2B$

para N canais: $R \approx 2BN$ (3.3)

c: fator de caso (caso médio, pior ou melhor)³;

r:relação entre o número de elementos de dados transportados pelos elementos de sinal;

B: largura de banda (analógica) da fibra óptica;

N: número de fontes luminosas utilizadas (canais WDM).

3.3.2. WDM Aplicado a POFs

Com relação às POFs, os sistemas WDM ainda estão muito pouco desenvolvidos, principalmente devido à indisponibilidade comercial de um dispositivo que realize os processos de multiplexação e demultiplexação com um desempenho aceitável a um custo razoável. Nesta seção serão apresentadas algumas pesquisas relacionadas ao assunto e a motivação da aplicação do WDM a sistemas baseados em POFs.

A) Motivação

As POFs apresentam inúmeras vantagens como meio de transmissão, conforme mencionado ao longo desta Dissertação. Relembrando algumas destas características: as POFs apresentam elevada capacidade de transmissão, são fáceis de manipular e conectar, possuem elevada resistência mecânica, são pouco sensíveis a curvaturas, são livres de interferências eletromagnéticas, permitindo sua instalação junto a cabos metálicos ou outras fibras ópticas, são mais seguras para o operador, constituem uma tecnologia *do-it-yourself* e os dados que por ela trafegam são praticamente invioláveis. As POFs apresentam, então, grande potencial para substituir o meio (guiado) de transmissão mais comum nas redes internas dos usuários, os cabos metálicos. O autor não espera que as POFs substituam também os sistemas sem fio,

³ O pior caso ocorre quando é necessário obter a taxa de sinal máxima; o melhor, para a taxa de sinal mínima; e o caso médio, para a taxa de sinal intermediário [20]. A referida taxa de sinal é o número de elementos de sinal enviados na forma de bit 1, quanto maior for, maior será a banda necessária para transmissão [20].

como o Wi-Fi, uma vez que estes apresentam uma característica que atualmente é indispensável: a mobilidade.

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 elevem 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 HANs, a presença de mais fios no interior da residência provoca um incômodo visual. A POF é vantajosa também neste sentido, uma vez que uma única fibra pode substituir os cabos metálicos dispersos pela residência. Para aumentar a largura de banda efetiva em uma fibra óptica pode-se aumentar a taxa de transmissão, porém isto provoca uma redução na relação sinal-ruído (RSR) [21]. Outra 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.

B) Dispositivos MUX/DEMUX para POFs

O número de canais multiplexados em POFs é limitado, uma vez que existem poucas janelas de transmissão (azul, verde, laranja e vermelho), conforme ilustrado na Figura 2.12, repetida a seguir, e as fontes luminosas utilizadas em conjunto com esse tipo de fibra óptica costumam apresentar grande largura espectral, sendo possível, basicamente, utilizar uma fonte em cada janela. Devido a essas características, é impossível realizar um DWDM em POFs de PMMA utilizando as fontes luminosas atuais.

A escolha dos comprimentos de onda de operação para um MUX/DEMUX WDM não é tão simples como parece, devendo-se considerar outros critérios além da atenuação. Por exemplo, a fonte luminosa deve apresentar o mínimo deslocamento de comprimento de onda com a temperatura, a menor largura espectral possível, alta potência óptica⁴, pequeno ângulo e pequena área de emissão, longa vida útil em serviço, possibilidade de utilizar modulações

⁴ Alta potência óptica, mas não tão elevada a ponto de provocar efeitos não-lineares.

eficientes, baixo custo, diversidade de fabricantes, dentre outras características [2]. Considerando-se estas propriedades minimiza-se, por exemplo, os efeitos não lineares, a interferência entre canais adjacentes, a dispersão modal e pode haver um aumento na taxa de transmissão.



Figura 2.12: Atenuação e janelas de transmissão para POFs de PMMA [2] – (traduzida pelo autor).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um MUX/DEMUX WDM que opere com dois canais apenas, podendo, assim, ser classificado com um dispositivo WWDM. É interessante que este MUX/DEMUX seja simples e barato, para que esteja em acordo com as características das tecnologias envolvidas nos sistemas baseados em POFs.

Apesar de ainda não existirem MUX/DEMUX WDM para POFs disponíveis comercialmente que apresentem desempenho aceitável a um custo razoável, diversas pesquisas já foram realizadas sobre o assunto e muitas chegaram ao desenvolvimento de um protótipo, utilizando diferentes técnicas de multiplexação. Existem, também, estudos sobre a padronização da grade espectral a ser utilizada em sistemas WDM para POFs.

Uma destas pesquisas foi realizada em um instituto da Universidade de Eindhoven dirigido pelo Prof. Khoe, chegando-se ao desenvolvimento de um demultiplexador WDM para POFs baseado em grades de difração, conforme ilustra Figura 3.11. Foi utilizada POF GI com 750 μm de núcleo e NA = 0,29 como meio de transmissão e as saídas do demultiplexador foram feitas com POFs SI de 1 mm e NA = 0,46. Como fontes luminosas foram utilizados

Lasers Diodo (*Lasers Diode*, LDs) centrados em 645 e 675 nm e o dispositivo apresentou uma atenuação menor que 5 dB [2].



Figura 3.11: Esquema do dispositivo demultiplexador baseado em redes de difração, desenvolvido na Universidade de Eindhoven [2] – (traduzida pelo autor).

No POF-AC (POF-*Application Center*) em Nürnberg foi montado um sistema WDM com quatro canais, utilizando filtros de interferência, e um segundo sistema utilizando cubos *beam-splitter*, empregados como MUX/DEMUX. Um sistema semelhante foi montado no Instituto Fraunhofer em Nuremberg, 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). A Figura 3.12 ilustra um esquema de aplicação do MUX/DEMUX do Instituto Fraunhofer e o dispositivo desenvolvido [2].



Figura 3.12: (a) Esquema de aplicação e (b) protótipo do MUX/DEMUX desenvolvido no Instituto Fraunhofer [2] – (traduzida pelo autor).

Na Universidade de Ciências Aplicadas de Harz (*Harz University of Applied Sciences*), foi desenvolvido um kit de estudos de enlaces ópticos contendo um MUX WDM capaz de operar com os canais azul (470 nm), vermelho (660 nm) e verde (530 nm), conforme ilustrado pela Figura 3.13 [2].



Figura 3.13: Transmissor WDM desenvolvido na Universidade de Ciências Aplicadas de Harz [2].

Em 2008, nesta mesma universidade também 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 [21].

Também foram desenvolvidos dispositivos WDM para PF-GI-POFs, porém estes não serão mencionados por estarem além do foco desta dissertação, que é o desenvolvimento de um MUX/DEMUX WDM para POFs de PMMA.

Nos casos apresentados anteriormente, os sistemas WDM montados pra teste dos dispositivos desenvolvidos eram unidirecionais [2]. Existem estudos também voltados para sistemas WDM bidirecionais. Ambos estes sistemas, unidirecional e bidirecional, são de grande importância para aplicações em redes residenciais, seja para enviar mais de um serviço pela mesma fibra óptica, seja para estabelecer enlaces *full-duplex*.

Em 1997 foi montado um sistema WDM bidirecional entre a Universidade de Ulm e o Centro de Tecnologia da Deutsche Telekom utilizando como fontes luminosas um LED vermelho (650 nm) e outro verde (520 nm), cujos sinais foram transmitidos sobre uma SI-POF. Para multiplexar e demultiplexar os sinais foram utilizados *splitters* 2x1 com filtros ópticos coloridos. Foi possível alcançar uma taxa de 10 Mb/s a uma distância de 63 m.

Um ano depois, a Sony introduziu um dispositivo MUX/DEMUX construído com um prisma, uma lente e um espelho óptico, conforme ilustrado pela Figura 3.14. Este módulo foi capaz de alcançar uma taxa de 125 Mb/s a uma distância de 10 m apenas.



Figura 3.14: Esquema do MUX/DEMUX desenvolvido pela Sony para aplicação em enlace bidirecional [2] – (traduzida pelo autor).

Um módulo mais complexo foi desenvolvido pela Sharp em 2002, sendo utilizado para transmissão de dados IEEE 1394 a taxas de 125, 250 e 500 Mb/s a uma distância de 10 m. O esquema do módulo está ilustrado na Figura 3.15



Figura 3.15: Esquema do módulo MUX/DEMUX desenvolvido pela Sharp para aplicação em enlaces bidirecionais [2] – (traduzida pelo autor).

A Toyota desenvolveu um dispositivo mais inovador e 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 esculpido no dispositivo utilizando a técnica de LISW⁵ (*Light-Induced Self-Written*) [22]. A Figura 3.16 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 em seus próprios automóveis, e não disponibilizá-lo para venda comercial.



Figura 3.16: (a) Esquema de enlace bidirecional utilizando o MUX/DEMUX desenvolvido [22] e (b) fotografia do dispositivo [22] – (traduzida pelo autor).

A DieMount também participou deste processo de desenvolvimento de tecnologias WDM para POFs. Ela introduziu dois sistemas WDM utilizando *splitters* com baixa atenuação e baixo NEXT (*Near-End CrossTalk*)⁶.

Em 2011, com os avanços dos estudos sobre WDM aplicado a POFs, pesquisadores⁷ da Universidade de Ciências Aplicadas de Harz propuseram uma primeira definição para a grade espectral que poderia ser utilizada para WDM sobre POFs, em busca de uma padronização como a 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 (exceto as PF-GI-POFs), e deve ser definida levando em consideração a operação com LEDs, que estão disponíveis em diversos comprimentos de onda do visível [23] e apresentam grande largura espectral. É válido salientar que é de suma importância para operação com WDM que os canais estabelecidos não interfiram uns nos outros.

⁵ LISW é uma tecnologia utilizada para construir circuitos ópticos tridimensionais de baixa perda em fotopolímeros utilizando radiação de uma fibra óptica [22].

⁶ NEXT é um ruído induzido pela recepção do próprio sinal emitido na extremidade transmissora.

⁷ M. Joncic, M. Haupt e U. H. P. Fischer

Uma das propostas, baseando-se na padronização do DWDM, utilizou a frequência como parâmetro para montar a grade espectral, que foi ancorada à frequência do canal vermelho, 461,2 THz (650 nm), apresentando um espaçamento de 22,2 THz. As frequências centrais de cada canal foram definidas de acordo com a Equação (6.5) [23].

$$f_i = 461, 2 + i \cdot 22, 2 \tag{3.4}$$
$$i = 0, 1, 2, ..., 13$$

Dessa forma, são estabelecidas 14 frequências centrais, apresentando canais centrados exatamente nos vales de atenuação principais, 461,2 THz (650 nm), 527,8 THz (568nm) e 572,2 THz (524 nm), conforme ilustrado pela Figura 3.17.



Figura 3.17: Grade espectral para WDM sobre POFs com espaçamento de 22,2 THz [23] – (traduzida pelo autor).

Outra abordagem dos pesquisadores desta universidade utilizou como parâmetro o comprimento de onda, evitando a variação no espaçamento entre os canais existente quando se utiliza uma grade espectral baseada em frequências (Figura 3.17). Foram 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 [23];
- 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 [23];

• 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 [23].

Apesar de não ter estabelecido de fato uma grade espectral com as melhores características possíveis, esta última pesquisa constitui um primeiro passo para a padronização de sistemas que utilizarão WDM sobre POFs.

4. REDES ÓPTICAS DE CURTO ALCANCE

4.1. INTRODUÇÃO

A criação de novos serviços de Telecomunicações e o aprimoramento dos antigos requer um refinamento das tecnologias utilizadas por eles, incluindo o meio físico. Dentre estes serviços se encontram vídeo sob demanda (*Video on Demand*, VoD), vídeo/televisão de alta definição (HDTV), televisão sobre IP (IP *Television*, IPTV), jogos online multijogador (*Massive Multiplayer Online Game*, MMOG), computação em nuvem (*Clouding Computing*), videoconferências e voz sobre IP (*Voice over* IP, VoIP). Todos eles, e outros não mencionados, passaram a exigir grande qualidade e capacidade do canal de transmissão, propriedades muito limitadas nos meios físicos tradicionais como os cabos metálicos e o canal de transmissão sem fio. A Figura 4.1 ilustra o requisito de largura de banda para diversos serviços oferecidos aos usuários.



Figura 4.1: Requisito de largura de banda para algumas aplicações e largura de banda oferecida por alguns meios físicos [24] – (traduzida pelo autor).

Obs.: Fiber-To-The-Premisses, FTTP.

Os meios de transmissão disponíveis para fornecer estes serviços são os cabos metálicos, as tecnologias à rádio e as fibras ópticas. Para prover melhor qualidade e maior capacidade para estes serviços, evitando o congestionamento da rede, é interessante substituir os cabos metálicos por fibras ópticas, que apresentam pequenas dimensões, elevada capacidade e grande alcance de transmissão. Essa substituição 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*) e as SANs. A Tabela 4.1 mostra algumas tecnologias utilizadas sobre os meios físicos mencionados.

Tecnologia	Desempenho	Vantagens/Desvantagens		
Sistemas à Rádio				
UMTS	2 Mb/s em 70 m	V: Grande mobilidade		
	300 kb/s em mais de 100 m	D: Sem rede local		
Bluetooth	1 Mb/s em 10 m	V: Rede extremamente simples		
	50 Mb/s (802.15.3)	D: Capacidade e alcance muito limitados		
ATM sem fio	25 Mb/s em 30 m	V: Suporta diversos serviços		
		D: Relativamente caro		
LAN sem fio	54 Mb/s em 30 m (802.11g) 288,8 Mb/s em 70 m (802.11n)	V: Simples instalação		
		D: Muito sensível a interferências		
		eletromagnéticas, taxa de dados decai muito com a		
		distância		
Cabos Metálicos				
PNA	Alguns Mb/s	V: Requer existência de linha telefônica		
		D: Sensível a interferências eletromagnéticas		
Cabo coaxial	Maior que 100 Mb/s	V: Elevadas taxas de transmissão		
		D: Requer conversores relativamente caros,		
		sensível a interferências eletromagnéticas		
Cabo de dados	1 Gb/s em 100 m	V: Amplamente difundido em LANs		
		D: Cabo de grande espessura, taxa de transmissão		
		muito limitada pelo padrão utilizado		
PLC	45 Mb/s	V: Fácil de instalar		
		D: Grande sensibilidade a interferências		
		eletromagnéticas		

Obs.: Universal Mobile Telecommunications System, UMTS; Phoneline Networking Alliance, PNA; Power Line Comunication, PLC.

Tabela 4.1a: Tecnologias disponíveis para redes de curta distância [2] - (modificada

pelo autor)

Tecnologia	Desempenho	Vantagens/Desvantagens		
Cabos Ópticos				
Sílica monomodo	Praticamente ilimitada	V: Taxas de transmissão elevadíssimas, baixas		
		taxas de erro		
		D: Custo de instalação e manutenção elevados,		
		dificuldade para instalação		
Sílica multimodo	2,5 Gb/s	V: Taxas de transmissão elevadas, baixas taxas de		
		erro		
		D: Custo de instalação e manutenção elevados		
PMMA- POF	Centenas de Mb/s em 100 m (1 canal WDM)	V: Instalação extremamente fácil, tecnologia de		
		baixo custo, altas taxas de transmissão		
		D: Elevada atenuação		
PF-POF	1,25 Gb/s em 1 km	V: Fácil instalação		
		D: Tecnologia de custo médio, atenuação mediana		
		no infravermelho, menor disponibilidade comercial		
		quando comparada à POF padrão		

Tabela 4.1b: (Cont. Tabela 4.1a) Tecnologias disponíveis para redes de curta distância[2] – (modificada pelo autor)

4.2. REDES DE LONGA DISTÂNCIA E FTTX

Em WANs e MANs, a necessidade de substituição dos cabos metálicos por fibras ópticas para estabelecer redes de alta velocidade e qualidade excepcional deu origem a uma nova arquitetura de rede de banda larga, denominada genericamente como FTTx, em que o "x" representa o ponto da rede até o qual a fibra óptica é levada. O equipamento no qual a fibra termina é denominado ONT, segundo a ITU-T, ou ONU, segundo o IEEE⁸. A Figura 4.2 ilustra um destes equipamentos terminais na localidade do usuário.

Algumas classificações comuns para as redes FTTx são FTTN, FTTC, FTTB e FTTH, que estão representadas na Figura 1.1, repetida a seguir para maior comodidade. A grande vantagem do FTTx é a possibilidade de oferecer elevada capacidade de transmissão em distâncias muito longas, uma vez que é implementado com fibras de sílica⁹. Contudo, essa solução apresenta elevado custo de instalação inicial, principalmente devido ao investimento necessário para enterrar as fibras ópticas (Figura 4.3) e adquirir os equipamentos ópticos.

⁸ ONT x ONU: em geral costuma-se utilizar ONT quando apenas um usuário é servido e ONU quando múltiplos usuários são servidos.

⁹ Em geral, no núcleo da rede utiliza-se fibra de sílica monomodo e na última milha utiliza-se fibra de sílica multimodo.

O FTTx já está bem estabelecido em diversas regiões do mundo, especialmente nos países asiáticos. Na América Latina, contudo, apesar de esta tecnologia já ter começado a ser implementada, ainda não está amplamente disponível para a população. A Figura 4.4 mostra o número de assinantes no mundo em junho de 2011, especificamente para o FTTH/B.



Figura 1.1: Exemplos de soluções FTTX (X = B, H, N e C)

ONU



Figura 4.3: Instalação de fibra óptica de sílica (Fonte 1: [27]; Fonte 2: [28]).



Figura 4.4: Distribuição mundial dos assinantes de FTTH/B em Junho de 2011 [29] – (traduzida pelo autor).

Recomenda-se ao leitor consultar a referência [30] para maiores informações sobre as tecnologias FTTx, incluindo suas diversas arquiteturas, padronizações e estado atual do mercado, uma vez que o objetivo deste trabalho não é descrever toda essa tecnologia, e sim, apenas introduzi-la.

4.3. REDES DE CURTA DISTÂNCIA E FITH

A continuação lógica do FTTP é a substituição dos cabos metálicos das redes internas por fibras ópticas, dando origem ao FiTH (*Fiber-in-The-Home*), termo que pode ser empregado tanto para redes em residências quanto em edifícios. A implementação do FiTH também pode ser realizada quando as redes de acesso utilizam cabos metálicos ou canais sem fio, nestes casos o aprimoramento da qualidade e da capacidade será apenas na rede interna e o usuário não experimentará integralmente os benefícios de uma rede totalmente óptica.

Nas redes de curta distância em geral, como interfaces de áudio e vídeo, interconexão de sistemas e microprocessadores, SANs, redes em automóveis, aviões e navios, e LANs residenciais e em escritórios, os requisitos de instalação e de capacidade 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, em navios e aviões este comprimento aumenta para cerca de 200 m [2]. As LANs em residências e escritórios podem apresentar comprimentos que variam entre 25 e 100m [2]. 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 [2]. Já em LANs residenciais e em escritórios é necessário considerar uma futura expansão e o uso de equipamentos que implementam diferentes tipos de protocolos [2].

Além disso, ao contrário da instalação em redes de longa distância, em uma pequena rede um usuário comum, não especializado, deve ser capaz de instalar a própria fibra óptica e os equipamentos correlatos, como conversores de mídia. Outra questão que deve ser considerada é que edifícios e casas mais antigos não foram planejados prevendo uma futura instalação de fibras ópticas, o que pode dificultar a implementação de sistemas que utilizem este meio físico. Deve-se lembrar, também, que estes sistemas não estão sujeitos às intempéries de um ambiente externo, mas ainda estão expostos à umidade e a elevadas temperaturas, dependendo do local de instalação da fibra óptica, à poeira e a macro/microcurvaturas acentuadas.

Quanto à capacidade, usuários comuns requerem cada vez mais largura de banda e elevadas taxas de transmissão, mas essa capacidade exigida é apenas uma pequena fração daquela necessária para o núcleo da rede, que transporta sinais para diversos usuários simultaneamente. Assim, devido ao elevado custo, à pequena exigência de capacidade comparada a das grandes redes e a características relacionadas à instalação em ambiente interno, não é indicada a utilização da fibra de sílica monomodo em redes de curta distância. A questão passa a ser, então, qual é o tipo de fibra, dentre os restantes, mais adequado para instalação em redes de curta distância. Em algumas literaturas, como [2] e [31], o meio físico preferencial para este tipo de rede é a POF. Estas fibras ópticas apresentam diversas vantagens já citadas ao longo deste trabalho. Comparada aos pares metálicos, as POFs são leves, apresentam pequeno diâmetro e maior largura de banda, além de melhores perspectivas de aprimoramento das suas características técnicas, devido à intensa pesquisa sobre o assunto [6]. Estas e outras características permitem que as POFs sejam instaladas junto à fiação elétrica no interior dos conduítes, sobre carpetes ou, ainda, por trás dos rodapés. A Figura 4.5 ilustra a taxa de transmissão máxima alcançada em relação à distância para alguns meios de transmissão.



Figura 4.5: Comparação das taxas de transmissão máximas alcançadas em relação à distância para alguns meios de transmissão [6] – (traduzida pelo autor).

Dentre os tipos de POF existentes, as POFs GI 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) [4]. Contudo, as POFs SI padrão (POFs SI de PMMA) são as únicas disponíveis em larga escala e a um preço moderado [2], sendo ideais para implementação de redes de curta distância que não exijam uma taxa de dados tão elevada.

As redes de alta velocidade em automóveis já possuem diversas padronizações, sendo os padrões mais representativos o CAN (*Controller Area Newtork*), o D2B, o MOST, o IEEE 1394 e o Byteflight [2]. As LANs residenciais e em escritórios em sua plenitude ainda estão em desenvolvimento, mas já existem empresas que oferecem a solução óptica, empregando alguns equipamentos ópticos já desenvolvidos, como os conversores de mídia. No entanto, ainda existem outros equipamentos que precisam ser criados para que o usuário possa ter uma experiência completa de sua rede de alta velocidade, como dispositivos WDM e amplificadores ópticos para POFs. As redes em automóveis não serão exploradas neste trabalho.

Em HANs os serviços dominantes são aplicações de vídeo, voz e dados, como televisão, telefonia e internet, respectivamente, levando à implementação de três redes de comunicação distintas e uma rede adicional para alimentação de todos os equipamentos elétricos e eletrônicos. Esta rede de alimentação é, geralmente, a única que interconecta todos os cômodos da residência. Por esta razão, empresas como a Nyce Newtorks utilizam a infraestrutura elétrica para criar uma infraestrutura óptica e formar um *backbone* óptico na residência. Contudo, apesar do estabelecimento deste *backbone*, ainda é necessário realizar a conversão óptico-elétrico para repassar os sinais para os 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.

4.3.1. Redes Ópticas Residenciais

Dentre as redes de curta distância já mencionadas na Seção 4.3, 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 as residências dos usuários, contudo, existem diversos serviços no interior de cada domicílio que requerem largura de banda elevada, como HDTV, VoD e MMOGs (Figura 4.1). 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, apesar de as fibras de sílica constituírem um meio "à prova de futuro", os custos relacionados à tecnologia podem ser insustentáveis para um usuário residencial, além de sua implementação ser mais complexa. 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. O avanço nesta tecnologia permitiu atingir taxas de até 1 Gb/s sobre POFs SI e 5,3 Gb/s sobre POFs GI [31], taxas estas suficientes para atender à demanda atual.

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 MUX/DEMUX WDM (Capítulo 3), por exemplo, permite a transmissão de diversos serviços sobre um único meio e a implementação de enlaces bidirecionais *full-duplex*, ou o fornecimento de um único serviço com maior taxa de transmissão.

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 [32] criou um conversor de mídia para Fast Ethernet 10 Mb/s e o projeto EU POF-ALL [33] desenvolveu uma tecnologia que permite a entrega de mais de 100 Mb/s às residências à baixo custo. Além disso, existem diversos estudos realizados com a finalidade de obter maiores taxas de transmissão, melhor uso da largura de banda [34] e transmissão de sinais CATV (*Community Antenna Television*) [35], HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*) [36], Gigabit [37] e Fast Ethernet [38]sobre POFs.

É interessante que todos os serviços assinados pelos usuários possam ser utilizados em qualquer ponto da residência que o cliente desejar, de forma que a instalação da fibra óptica deve ser bem planejada. 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, conforme mencionado na seção anterior, a solução adotada por muitas empresas é utilizar os conduítes elétricos para cabear toda a residência com a fibra óptica. Caso exista um planejamento prévio, podem ser utilizados cabos híbridos (óptico+metálico), conforme ilustra

Figura 4.6 para cabear a residência, apresentando pontos de conexão de fibra óptica em todas as tomadas elétricas. Em alguns cômodos não é comum a existência de conectores Ethernet, por exemplo, como banheiros e cozinhas, mas instalando-se a fibra óptica nos conduítes é possível obter um ponto de conexão nestes locais utilizando conversores de mídia nas tomadas elétricas



Figura 4.6: Cabo híbrido POF-Cobre [2].

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 aliar duas ou mais tecnologias para fornecer conectividade em toda a residência. É possível, por exemplo, utilizar a fibra óptica em conjunto com uma tecnologia sem fio auxiliar, que estabeleça picocélulas no interior da residência, fornecendo mobilidade e facilitando a conectividade. Pode-se utilizar, então, uma tecnologia como o RoF (*Radio-over-Fiber*) para criar um *backbone* híbrido com e sem fio, como propõe o projeto OMEGA (*hOME Gigabit Access*) [39].

A tecnologia RoF consiste em uma transmissão analógica na qual o sinal de rádio é aplicado à portadora óptica utilizando modulação direta ou externa da fonte luminosa [40]. O princípio de operação do RoF pode ser observado na Figura 4.7, na qual um laser sintonizável é modulado em frequência e os dados são adicionados ao sinal através do modulador Mach-Zehnder que modula o sinal em amplitude. A frequência de modulação do laser deve estar dentro dos limites de largura de banda da fibra.

O padrão de tecnologia sem fio mais bem estabelecido em redes residenciais é o IEEE 802.11 que fornece no máximo 54 Mb/s em sua versão "g" e promete um limite máximo de 600 Mb/s em sua versão mais recente, "n". Esta limitação da taxa de transmissão poderá se tornar um gargalo em um futuro próximo, uma vez que é mais complexo elevar a taxa de transmissão em um meio sem fio do que em um meio com fio como a POF, que constitui uma área de intenso estudo, atualmente. Dessa forma, novos padrões de tecnologia sem fio estão surgindo ou estão em desenvolvimento e prometem até 7 Gb/s por canal utilizado [41] A Tabela 4.2 ilustra três destes padrões. A grande desvantagem destas tecnologias é que todas elas apresentam uma área de cobertura reduzida, sendo pequena mesmo para HANs, uma vez que muitas estão sendo desenvolvidas para operação na faixa não licenciada de 57 a 66 GHz [41], que produz ondas incapazes de atravessar paredes, confinando o sinal em cômodos. A solução para aumentar esta pequena área de cobertura é a utilização do RoF que é transparente ao protocolo rádio e ao formato de modulação utilizado [41] e emprega o meio óptico como um repetidor analógico passivo [31]. É possível, assim, utilizar o meio óptico como um repetidor para o padrão IEEE 802.11, enquanto a demanda por capacidade não ultrapassa seu limite. Apesar de ser uma possível solução para a conectividade, também se pode utilizar a combinação já implementada em grande parte das residências (sobre cabos metálicos): o uso de Ethernet sobre o meio com fio (fibra óptica) chegando a um ponto de acesso Wi-Fi que transmitirá sobre o meio sem fio segundo o protocolo IEEE 802.11. Mais informações sobre o RoF podem ser encontradas em [40].



Figura 4.7: Princípio de operação do RoF [2] – (traduzida pelo autor)

Padrão	Ano	Taxa de Transmissão
IEEE 802.15.3c	2009	20 a 5.670 Mb/s
WirelessHD	2009	952 a 7.138 Mb/s
IEEE 802.11ad	2012	385 a 6.757 Mb/s

Tabela 4.2: Padrões de banda larga sem fio [41].

Um bom exemplo de HAN óptica pode ser visto em [42], 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) e a Nyce Networks. A Figura 4.8 ilustra alguns dos dispositivos comercializados, como conversor de mídia Ethernet, tomada óptica e *switch* óptico. Contudo, nenhuma delas oferece dispositivos WDM para POFs 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. Este trabalho propõe, portanto, o desenvolvimento do primeiro¹⁰ dispositivo WDM para operação com POFs, brasileiro, passível de comercialização.



Figura 4.8: Alguns dispositivos comercializados para uso em HANs [1].

¹⁰ No conhecimento do autor.

5. INTRODUÇÃO AOS FILTROS ÓPTICOS DICROICOS

5.1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste breve capítulo é trazer alguns aspectos *qualitativos* sobre os filtros ópticos e conceitos relacionados a este assunto. Dessa forma, não será realizada uma abordagem matemática sobre o assunto, para tal indica-se a referência [3].

Para compreender o funcionamento dos filtros ópticos dicroicos é necessário, primeiramente, entender alguns aspectos relacionados aos filmes finos e revestimentos ópticos, uma vez que estes são importantes para a construção de filtros ópticos em geral e outros componentes, conforme sugere a citação a seguir.

"Desde tempos antigos, o homem vem tentando não apenas decifrar a natureza da luz, mas também aproveitar seu poder. A fascinação do homem pela luz desencadeou a curiosidade de muitos cientistas, que ao longo dos anos adicionaram conhecimento ao nosso entendimento sobre a luz e outras formas de energia eletromagnética. Os fundamentos estabelecidos por Young, Huygens, Fresnel, Poisson, Fraunhofer, Maxwell, Fabry, Perot e outros, foram críticos para o desenvolvimento dos revestimentos ópticos. Contudo, avanços na tecnologia foram necessários para a produção de revestimentos ópticos. Os revestimentos ópticos de filmes finos modernos começaram a ser produzidos apenas em 1930, com o desenvolvimento da tecnologia a vácuo. Desde então, grandes avanços nessa tecnologia e na de deposição aumentaram o nível de sofisticação dos revestimentos ópticos. Hoje, revestimentos ópticos são utilizados em nível de componente em quase todos os ramos da tecnologia." – (trecho retirado de [43] e traduzido livremente).

5.2. FILMES FINOS

Um filme fino é uma película com espessura variável entre poucos nanômetros e alguns micrômetros, composta por um material que apresenta características ópticas específicas, sendo capaz de provocar reflexão, refração e/ou absorção da luz incidente [3].

Supondo um filme fino não absortivo, quando um raio incide sobre a superfície *superior*, parte do raio é refletida e outra parte é refratada. O raio *refratado* incide sobre a superfície *inferior* e novamente será parcialmente refletido e refratado. O raio *refletido* na superfície *inferior* emerge pela superfície *superior* e se encontra com o primeiro raio *refletido*, conforme ilustrado na Figura 5.1. Estes raios podem estar em fase ou fora de fase entre si, de forma que ao interferirem uns sobre os outros provocam interferência construtiva ou destrutiva, respectivamente, originando uma nova onda. A interferência entre os raios irá depender do

comprimento de onda incidente e da espessura óptica¹¹ do filme [44], calculada segundo a Equação (5.1). As intensidades dos feixes refletido e refratado podem ser controladas para um comprimento de onda específico, no momento do projeto do filme fino [3].



Figura 5.1: Esquema da interação de feixes luminosos com um filme fino de espessura d.

$$d_{opt} = n \cdot d_{fis} \tag{5.1}$$

n: índice de refração do meio;

d_{fis}: distância física de um ponto a outro.

5.3. REVESTIMENTOS ÓPTICOS

Um revestimento óptico é formado por um conjunto composto por um único filme fino sobre um substrato óptico, ou por centenas deles empilhados em camadas alternadas metálicas e dielétricas depositados sobre um substrato óptico. Este revestimento tem como finalidade criar efeitos de interferência para melhorar propriedades de reflexão, transmissão e absorção de um sistema óptico. A Figura 5.2 ilustra o esquema de um revestimento óptico de múltiplas

¹¹ Distância óptica é definida como a distância que a luz viajaria no vácuo no mesmo tempo em que leva para atravessar o elemento óptico em questão [44].

camadas. O desempenho desse revestimento depende do número de camadas que o compõe, da natureza destas camadas, das espessuras individuais de cada camada e da diferença de índice de refração na interface entre camadas adjacentes [45].



Figura 5.2: Esquema de revestimento óptico com múltiplas camadas.

Diversos tipos de revestimentos ópticos já foram desenvolvidos, como o antirreflexo, o altamente reflexivo, o divisor de feixe luminoso, e os que apresentam outras propriedades de filtragem [45]. Uma estrutura composta por múltiplos filmes finos apresenta algumas características singulares, como propriedades que se alteram com o ângulo de incidência e cujas modificações podem ser dependentes da polaridade da luz incidente. Por exemplo, a refletância e a absorbância de um filtro que contenha camadas de absorção dependerão, em geral, da superfície (inferior \rightarrow superior ou superior \rightarrow inferior) sobre a qual a luz incide inicialmente [3].

5.4. FILTROS ÓPTICOS

Um filtro óptico é um dispositivo ou material capaz de modificar a distribuição de intensidade espectral, dependente ou não do comprimento de onda, ou do estado de polarização de uma onda eletromagnética que incide sobre ele [3]. Segundo essa definição, um revestimento óptico por si já constitui um filtro óptico.

Estes filtros podem exercer sua função baseando-se em diferentes fenômenos físicos, como absorção, refração, interferência, difração, espalhamento e polarização [3]. De acordo com o comportamento da luz ao interagir com o filtro, eles podem ser divididos em: "passaborda" (*edge-pass*), densidade neutra (*neutral density*) ou filtro neutro, divisor de feixe (*beam-splitter*), filtro de rejeição (*notch/minus filter*), dentre outros [3]. Na prática pode haver um "mistura" dessas funcionalidades, por exemplo, neste trabalho foram utilizados, segundo a classificação de [3], filtros *edge-pass* baseados em interferência da radiação eletromagnética com o objetivo de dividir/combinar feixes luminosos, como os *beam-splitters*.

Deve-se enfatizar que filtros de interferência refletem a luz rejeitada, enquanto filtros absortivos absorvem esta luz, transformando-a em calor. Dessa forma, os filtros de interferência em geral sofrem menor desgaste em longo prazo.

Um filtro *edge-pass* pode ser passa-baixa (*short-pass*) ou passa-alta (*long-pass*). No primeiro caso o filtro possui um comprimento de onda de corte (*cut-off*) acima do qual se estabelece uma faixa de rejeição e abaixo do qual ocorre transmissão. Para o filtro *long-pass* define-se um comprimento de onda de corte (*cut-on*) abaixo do qual se encontra a faixa de rejeição e acima do qual ocorre transmissão [3]. No caso dos filtros *notch*, estabelece-se uma banda de rejeição estreita e bem definida, de forma a minimizar a transmissão para comprimentos de onda dentro dela e maximizar a transmissão para os que estão fora dela [3]. A Figura 5.3 ilustra um esquema do espectro de transmitância dos filtros *edge-pass* e *notch*, e na Figura 5.4 encontram-se fotografias destes filtros.

Os *beam-splitters* são filtros capazes de dividir (e combinar, no sentido inverso de propagação) o feixe luminoso incidente em dois outros feixes, sendo um transmitido e o outro refletido [3]. Os filtros neutros (Figura 5.5) são um caso especial de *beam-splitters*, sendo utilizados quando há necessidade de reduzir a intensidade da luz de forma uniforme em todo o espectro desejado [3]. Existem também os *beam-splitters* acromáticos, que são utilizados

quando se deseja dividir o feixe luminoso em dois feixes que apresentem uma composição espectral relativa aproximadamente igual, mas que se propaguem em direções diferentes [3].



Comprimento de Onda





Figura 5.4: Filtros (a) short-pass, (b) long-pass e (c) notch – Edmund Optics [46].



Figura 5.5: Filtros neutros diversos – Edmund Optics [46].

Os *beam-splitters* podem ser construídos de forma a apresentar sensibilidade ao comprimento de onda, sendo então denominados *beam-splitters* dicroicos ou apenas filtros dicroicos. Estes são utilizados para separar o feixe incidente em dois feixes: um composto pelas componentes refletidas e o outro pelas transmitidas, separando, assim, a luz incidente em feixes de "cores" diferentes. Em geral estes filtros são fabricados para serem utilizados com um ângulo de 45° em relação ao feixe incidente, de forma a provocar uma reflexão a 90° [3]. Além disso, são dependentes da polarização da luz e do ângulo de incidência, mas também podem ser projetados de forma a influência destes parâmetros. Os comprimentos de onda de corte (*cut-off/on*) podem ser escolhidos pelo projetista e estes filtros inserem uma perda praticamente desprezível no sistema [3]. A Figura 5.6 exemplifica o funcionamento de um filtro dicroico. Estes foram os filtros utilizados neste trabalho.



Figura 5.6: Esquema do funcionamento de um filtro dicroico.

6. INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA DE CRISTAIS LÍQUIDOS

6.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo introduzir conceitos relacionados aos cristais líquidos, de forma qualitativa. Serão apresentados os principais tipos de cristais líquidos e suas características, mostrando também algumas aplicações deste material. A análise qualitativa sobre esse assunto é de extrema complexidade e em diversos aspectos ainda não é completamente compreendida pelos estudiosos.

6.2. HISTÓRICO

Os LCs são materiais mesomorfos¹² descobertos há muitos anos. Diversos estudiosos participaram da história dos LCs, mas apenas alguns dos grandes contribuintes serão mencionados nesta subseção.

O primeiro LC data de 1888 e foi descoberto por Friedrich Reinitzer, botânico do Instituto de Fisiologia das Plantas da Universidade Alemã de Praga. Ele observou a existência de dois pontos de fusão em uma molécula originada do colesterol, enquanto estudava a função desta substância nas plantas. No primeiro ponto de fusão, 145,5 °C, a substância sofria transição de um estado sólido cristalino para um estado líquido opaco, e no segundo ponto de fusão, 178,5 °C, se transformava em um líquido transparente [47]. Este botânico realizou também estudos preliminares sobre filmes finos, verificando a faixa espectral refletida e transmitida com a diminuição da temperatura até a transição para o estado de sólido cristalino [47].

Durante algumas décadas, um físico alemão, Otto Lehmann, estudou algumas amostras enviadas por Reinitzer, utilizando um microscópio equipado com um polarizador e um controlador de temperatura, e verificou que após o primeiro ponto de fusão a substância apresentava características de fluidos convencionais, mas se comportava como um cristal na presença de luz polarizada, originando o termo Cristal Líquido [48]. Analisando outros LCs

¹² Mesomorfia neste caso indica um estado intermediário entre os três estados convencionas nos quais a matéria pode ser encontrada.

descobertos ao longo dos anos, este físico observou também a existência de duas fases de LC e o efeito da orientação das moléculas provocada pela presença de substratos [47].

Um químico alemão, Daniel Vorlander, realizou, posteriormente, um estudo mais aprofundado sobre o assunto, conseguindo identificar as características moleculares que apresentavam maior possibilidade de formar LCs [48].

Em 1922, Georges Friedel publicou um trabalho no qual descreveu as diferentes fases em que os LCs podiam ser encontrados, originando a classificação de Friedel, que definiu as fases nemática, esmética e colestérica (Subseção 6.3). Ele explicou também o porquê da existência de variações da orientação das moléculas [48]. O LC observado por Reinitzer em 1888 apresentava uma estrutura helicoidal e foi obtido a partir do colesterol, originando o termo "colestérico", que denomina uma classe de LCs (*Cholesteric Liquid Crystals*, CLCs).

Diversos pesquisadores começaram então a tentar modelar matematicamente as características e os fenômenos relacionados aos LCs. Entre 1920 e 1958 Carl Oseen e F.C. Frank realizaram um estudo teórico, denominado "Teoria Contínua", que descreveu as propriedades elásticas dos LCs. Em 1942 V. Tsevtkov introduziu o parâmetro de ordem, *S*, (Subseção 6.3) [48].

Em 1957 um químico norte-americano, Glenn Brown, publicou um trabalho de revisão sobre as fases dos LCs, sendo o responsável pela organização da primeira conferência internacional sobre LCs e pela fundação do Instituto de LCs na Universidade de Kent (*Liquid Crystal Institute*, KSU) nos Estados Unidos [48].

Em 1961, dois físicos alemães, Wilhelm Maier e Alfred Saupe, formularam pela primeira vez uma teoria microscópica relacionando as características moleculares com as fases dos LCs e em 1962, George Gray publicou um tratado completo sobre LCs, englobando todo o conhecimento da época, apresentando grandes contribuições no estudo dos LCs macromoleculares (*Polymer* LC, PLC) [49].

Desde então, diversos pesquisadores aprofundaram-se ainda mais nos estudos sobre LCs, aprimorando as definições do passado e descobrindo novas propriedades e novos fenômenos, como as fases cúbicas e a "azul" (*blue phase*), em adição às já existentes. Além disso, com o avanço do desenvolvimento desse assunto, surgiram diversas áreas de aplicações, sendo a maior delas o desenvolvimento de *displays* [47].

6.3. FUNDAMENTOS DOS CRISTAIS LÍQUIDOS

O assunto "Cristal Líquido" é extremamente complexo e ainda não está completamente dominado pelos estudiosos, uma vez que, embora muitos aspectos já tenham sido modelados, vários outros ainda não são bem compreendidos. Esta seção foi construída a partir de uma pesquisa razoavelmente extensa, mas não abordará detalhes sobre os LCs, principalmente matemáticos, uma vez que este não é o foco principal deste trabalho. Para uma abordagem mais abrangente sobre o assunto, englobando os aspectos matemáticos, indica-se a referência [50], um compêndio contendo quatro volumes (vol. 1: *Fundamentals*, vol. 2A: *Low Molecular Weight Liquid Crystals I*, vol. 2B: *Low Molecular Weight Liquid Crystals II* e vol. 3: *High Molecular Weight Liquid Crystals*).

Os LCs são materiais que apresentam propriedades físicas intermediárias entre os estados líquido isotrópico¹³ e sólido cristalino [51] da matéria, conforme ilustrado na Figura 6.1. São fluidos como os líquidos, mas possuem certo ordenamento estrutural, característico dos sólidos, apresentando menor grau de ordenamento quando comparado à matéria sólida. A organização espacial ocorre segundo uma orientação específica, que pode ser modificada alterando-se a temperatura e aplicando-se campos elétricos e magnéticos sobre o material [52]. Caracterizam-se também por apresentarem natureza anisotrópica nos aspectos elétricos, magnéticos e ópticos [52], sendo possível, por exemplo, alterar propriedades do material, como a birrefringência¹⁴, através de variações na temperatura e nos campos aplicados.

A anisotropia elétrica se relaciona com a resposta do LC a um campo elétrico aplicado. Em LCs com moléculas apolares existe apenas uma polarização induzida, subdividida em polarização eletrônica e iônica. Em LCs com moléculas polares, existe uma polarização orientacional, devido à tendência dos dipolos permanentes serem orientados paralelamente ao campo aplicado. De uma forma ou de outra, a permissividade experimentada pela onda em

¹³ Isotropia é uma propriedade do material caracterizada por apresentar as mesmas propriedades em todas as direções estudadas [55]. Anisotropia é a propriedade inversa.

¹⁴ Birrefringência é uma propriedade resultante da anisotropia do material, que passa a apresentar diferentes índices de refração em direções distintas, permitindo a geração de dois raios refratados, com polarização cruzada, a partir de um único raio incidente. Os raios refratados são definidos como raios ordinário e extraordinário [17]. O primeiro experimenta um índice de refração n_o (ordinário) e o segundo experimenta um índice de refração n_e (extraordinário). Estes índices de refração são dependentes do comprimento de onda da luz incidente e nos LCs dependem também da temperatura [52].

direções diferentes são distintas. [53]. A anisotropia magnética é análoga, porém para a permeabilidade.



Figura 6.1: Esquema ilustrativo da organização estrutural dos estados sólido cristalino, líquido isotrópico, e do estado intermediário líquido cristalino (cristal líquido) [54].

Os LCs podem ser classificados em dois principais tipos: termotrópicos e liotrópicos [51]. Os primeiros são formados por moléculas anisométricas¹⁵ e as diferentes estruturas e o ordenamento local das moléculas individuais dependem da temperatura aplicada, de forma que variações neste parâmetro podem provocar transições de fase [55]. Os LCs termotrópicos são importantes não apenas para a física e a química, mas também para o desenvolvimento de aplicações eletro-ópticas e sensores de temperatura e pressão [54].

Os LCs liotrópicos, por sua vez, são formados por uma mistura de moléculas anfifílicas¹⁶ e solventes, e sua formação estrutural depende da temperatura e concentrações relativas dos componentes [55], cujas variações resultam em transição de fase do material. Neste trabalho apenas os LCs termotrópicos serão explorados.

Os LCs termotrópicos podem ser classificados de acordo com a sua organização estrutural. Definem-se, assim três fases de existência para estes LCs (classificação de Friedel): nemática, colestérica ou esmética [51]. O grau de organização nemática das moléculas pode ser definido através do parâmetro de ordem, *S*, calculado segundo a Equação (6.1) [48].

¹⁵ Anisometria é uma propriedade caracterizada pela <u>anisotropia de forma</u> do material, neste caso, anisotropia de forma das moléculas.

¹⁶ Moléculas anfifílicas são aquelas que apresentam ao mesmo tempo uma região polar e outra apolar [55], e.g., os detergentes, que são capazes de se ligar à agua (polar) e a substâncias graxas, como os óleos (apolar).

$$S = \frac{\langle 3\cos^2\theta - 1 \rangle}{2} \tag{6.1}$$

 θ : ângulo entre a direção preferencial das moléculas e a orientação destas moléculas.

Na Equação (6.1) o termo entre os símbolos de maior, ">", e menor, "<", representa uma média estatística. Quando as moléculas do material apresentam a organização de um sólido cristalino, $\theta = 0$, $<\cos^2 \theta >= 1$ e S = 1. Quando o grau de isotropia aumenta, sendo as moléculas distribuídas de forma completamente aleatória como em líquidos isotrópicos, $<\cos^2 \theta >= 1/3$ e S = 0. Para os LCs o valor S se encontra entre 0,3 e 0,9, sendo influenciado pela temperatura de acordo com a Figura 6.2 (T_{NI} é a temperatura de transição para o estado isotrópico).



Figura 6.2: Variação do parâmetro de ordem, S, com a temperatura [48].

6.3.1. Fases dos Cristais Líquidos Termotrópicos

Na fase nemática os eixos das moléculas estão organizados, em média, segundo uma direção preferencial, definindo uma diretriz n. Esta fase pode ser uniaxial ou biaxial, dependendo do formato das moléculas que constituem o LC. Quando há uma característica uniaxial, todas as propriedades físico-químicas macroscópicas do material se mantêm iguais ao longo de qualquer direção perpendicular à diretriz, sendo diferentes das características paralelas a essa diretriz [55]. Caso exista uma característica biaxial, as propriedades do material serão diferentes nas três direções espaciais (eixos x, y e z), mantendo-se iguais ao longo da direção estudada [55]. A Figura 6.3 ilustra a estrutura de um LC nemático uniaxial e imagens de microscopia de um LC nemático real.



Figura 6.3: (a) Esquema da estrutura de um LC nemático uniaxial [56], (b) [57] e (c) [52] microscopia de LCs nemáticos reais.

Na fase colestérica, ou nemática quiral 1^7 , os LCs apresentam diversos planos nemáticos, sendo cada um deles orientado segundo uma direção preferencial, conforme ilustra Figura 6.4. A mudança orientacional de um plano para outro deve ser contínua, de forma a constituir uma estrutura helicoidal com certa periodicidade característica, denominada passo da hélice [55], que constitui a diretriz *n* para estes LCs. A estrutura helicoidal do CLC pode ser obtida a partir de dopantes quirais, responsáveis por modificar o passo da hélice ou a partir de moléculas quirais, que naturalmente formarão a estrutura helicoidal [52]. Na Figura 6.5 estão ilustradas microscopias de um CLC.



Figura 6.4: Esquema da estrutura de um CLC [56].

¹⁷ Quiralidade é uma propriedade que se caracteriza pela inexistência de planos de simetria no material [54].



Figura 6.5: Microscopias de CLCs reais, (a) as linhas na figura são defeitos colestéricos típicos [52], (b) eixo helicoidal paralelo ao plano da imagem [57] e (c) eixo helicoidal perpendicular ao plano da imagem [57].

Os CLCs apresentam uma característica de grande importância para a óptica que é a capacidade de reflexão seletiva da luz sem inversão de fase. Existem relações matemáticas entre o passo da hélice e o comprimento de onda refletido [55], uma delas está definida na Equação (6.2) [58] e determina o comprimento de onda central de reflexão, dependente também do índice de refração médio do LC, calculado pela Equação (6.3) [48]. A banda espectral refletida é calculada de acordo com a Equação (6.4) [58] e a dependência do ângulo de incidência da luz com o comprimento de onda refletido pode ser calculada segundo a Equação (6.5) [48]. Após fabricação do CLC, o passo da hélice pode ser modificado de acordo com a temperatura e o campo elétrico aplicado, possibilitando certa sintonização do comprimento de onda que será refletido, conforme ilustra Figura 6.6.

$$\lambda_c = n_{av} P \tag{6.2}$$

$$n_{av} = \frac{n_e + n_0}{2} \tag{6.3}$$

n_{av}: índice de refração médio;

P: passo da hélice;

n_e: índice de refração extraordinário;

n_o: índice de refração ordinário.

$$\Delta \lambda = \Delta n P \tag{6.4}$$

$$\lambda_c = 2dn_{av}cos\phi \tag{6.5}$$

 Δn : birrefringência $(n_o - n_e)$; d: meio passo da hélice; ϕ : ângulo de incidência da luz.



Figura 6.6: Reflexão seletiva da luz de acordo com o passo da hélice do CLC [59].

Por fim, na fase esmética os LCs apresentam uma estrutura em camadas empilhadas umas sobre as outras. Dentro de cada camada não existe posição fixa para as moléculas, havendo apenas certo ordenamento na orientação destas moléculas, porém cada camada apresenta uma posição fixa na formação da estrutura. A relação angular entre os planos das camadas e a diretriz *n* determinada pela orientação das moléculas nestas camadas definem diversas estruturas para os LCs esméticos, sendo as mais citadas na literatura as estruturas A, C e C*, que estão ilustradas na Figura 6.7. A Figura 6.8 apresenta uma microscopia de LCs esméticos reais.



Figura 6.7: Esquema da estrutura dos LCs esméticos A, C e C* [56].


Figura 6.8: Microscopias de LCs esméticos reais (a) [52], (b) [57] e (c) [57].

6.4. APLICAÇÕES

Os LCs são materiais mesomorfos que apresentam características singulares. Sua natureza dielétrica e anisotrópica, habilidade de reorientação das moléculas, capacidade de reflexão seletiva, controle de características através da aplicação de campos elétricos e magnéticos e da variação de temperatura, tornam os LCs bastante atrativos para aplicações em diversas áreas da ciência. A área de maior aplicação no mundo é a construção de *displays* baseados em LCs, como *displays* de televisores, *palm-tops*, celulares, notebooks, monitores de computador e muito mais [52].

Os CLCs especificamente, capazes de refletir comprimentos de onda diferentes de acordo com o passo da hélice, podem ser utilizados como espelhos sintonizáveis, sensores de cor e temperatura, e filtros ópticos sintonizáveis, ou não [52]. Em [60] é relatada a construção de um switch totalmente óptico utilizando uma combinação de CLC com LC nemático.

Os LCs podem ser aplicados, ainda, no desenvolvimento de janelas inteligentes, que se tornam opacas ou transparentes conforme desejado, na fabricação de lasers sintonizáveis e guias de onda baseados neste material, e nos processos de imageamento óptico e análise de falhas nos produtos de indústrias de semicondutores. Também podem ser utilizadas no desenvolvimento de óculos 3D passivos ou ativos, na construção de cavidades de Fabry-Perrot e divisores de polarização. Algumas destas aplicações estão descritas em [52].

6.5. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE FILTROS BASEADOS EM LCS

Em geral, em experimentos e aplicações tecnológicas os LCs são confinados entre duas placas planas de vidro. Estas placas interagem com o LC de forma bastante complexa e ainda não completamente compreendida [54], impondo uma orientação específica às suas moléculas. Com relação a essas interações, sabe-se que utilizando alguns métodos de tratamento de

superfícies, conhecidos como técnicas de alinhamento, é possível induzir determinada orientação às moléculas de LC. Algumas técnicas utilizadas são: fricção de superfícies poliméricas, deposição oblíqua de surfactantes e utilização de polímeros fotossensíveis [54]. O método de fricção é o mais simples e mais utilizado, mas pode depositar impurezas ou gerar cargas elétricas na superfície friccionada, originando defeitos orientacionais na estrutura do LC confinado entre as placas [54], como os defeitos ilustrados na Figura 6.5a. Esta foi a técnica utilizada para fabricar os filtros utilizados neste trabalho.

Na técnica de fricção é depositada uma camada de alinhamento em um substrato para induzir a interação com as moléculas do LC. Esta camada costuma ser um filme polimérico, que serve como âncora para as moléculas do LC que se posicionarão ou paralelamente ou perpendicularmente ao substrato [52]. Este filme é então friccionado com um pano de veludo, como um polimento da superfície, gerando energia livre nas moléculas poliméricas que estarão na interface com o LC, de forma a serem capazes de alinhar as moléculas do LC na mesma direção de fricção [52]. Em outro substrato é realizado o mesmo procedimento. O alinhamento do LC pode ser homeotrópico (perpendicular ao substrato); planar ou homogêneo (paralelo ao substrato), também conhecido como textura de Grandjean; ou inclinado, conforme ilustrado pela Figura 6.9. A composição dos substratos, separados por alguns micrômetros através de bastões de vidro, com o LC confinado entre eles é denominada célula [52].



Figura 6.9: Esquema dos alinhamentos (a) homeotrópico, (b) planar/homogêneo e (c) inclinado [48].

Amostras de filtros LC utilizadas nesta Dissertação...

Os filtros CLC empregados neste trabalho foram fabricados utilizando-se substratos de vidro, sobre os quais foram depositados filmes de poliimida SE410 da Nissan Chemicals diluída em verniz, da mesma empresa. Os filmes foram friccionados sobre os substratos, com um pano de veludo para determinar a direção de alinhamento das moléculas do LC, formando uma textura de Grandjean. Foram utilizadas duas células e, para haver um alinhamento

paralelo, cada célula foi construída com direção oposta à outra e o LC confinado estava em sua fase colestérica [52]. Os substratos foram espaçados com bastões de vidro de 5 μm revestidos pela cola NOA63 da Norland Glues. É importante salientar que o filtro óptico fabricado é passivo e independente da polarização da luz incidente [52].

A primeira célula foi preenchida com o LC nemático MLC-100-6846 da Merck Corporation, com birrefringência igual a 0,09, que foi dopado com o dopante quiral levogiro S811, também da Merck Corporation, a uma proporção de 30% de dopante para 70% de LC [52]. Para preencher a segunda célula foi utilizado o mesmo LC nemático, porém dopado com o dopante dextrogiro R811, da mesma empresa, na mesma proporção. A hélice foi formada perpendicularmente ao substrato. As células foram empilhadas e grudadas uma na outra com a cola NOA 63 [52]. A célula com CLC levogiro é responsável por refletir 50% da luz, sendo os outros 50% refletidos pela célula com CLC dextrogiro [52]. A Figura 6.10a ilustra o esquema das células montadas formando o filtro CLC e na Figura 6.10b observa-se a fotografia deste filtro em uma base "*homemade*".



Figura 6.10: (a) Esquema da composição das células para formar o filtro de CLC e (b) fotografia do filtro de CLC fabricado.

7. DESENVOLVIMENTO DO MUX/DEMUX WDM BASEADO EM FILTROS ÓPTICOS COMERCIAIS

7.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos os experimentos realizados para investigar o desempenho de filtros ópticos comerciais dielétricos operando como filtros dicroicos, com o objetivo de utilizá-los como núcleo do MUX/DEMUX proposto. O projeto do MUX/DEMUX será apresentado na Seção 7.2, antes da discussão sobre os experimentos para que seja possível definir uma diretriz a ser seguida. Um primeiro protótipo deste dispositivo, baseado em filtros ópticos comerciais foi desenvolvido e caracterizado, e será apresentado no Capítulo 10. Além disso, investiga-se também a necessidade da utilização de lentes colimadoras para melhorar o desempenho dos processos de multiplexação e demultiplexação. Os resultados destes experimentos serão apresentados e discutidos ao longo deste capítulo. No Apêndice APÊNDICE A - encontram-se descritos os equipamentos utilizados na realização dos experimentos.

7.2. PROJETO DO CUBO MUX/DEMUX

Para construir o cubo MUX/DEMUX foi proposta a utilização de um filtro dicroico comercial. Adiantando o resultado final, dentre os filtros testados, aquele que apresentou a especificação mais adequada para o propósito do dispositivo foi o filtro modelo 69215 da Edmund Optics (Figura 7.1). A escolha deste filtro será melhor entendida adiante neste capítulo. As conexões foram projetadas para utilização de conectores FC, três para cada cubo, em cujas extremidades devem ser colocadas lentes colimadoras, conforme ilustrado pela Figura 7.2.



Figura 7.1: Filtro óptico modelo 69215 da Edmund Optics.

O material escolhido para construção do cubo foi o *nylon*. Este material foi usinado na oficina mecânica da Universidade Federal Fluminense, seguindo a ideia apresentada no esboço ilustrado na Figura 7.3, desenhado com auxílio do software AutoCad. Esta peça, de forma cúbica e com dimensões aproximadas 40x40x40 mm, utiliza o filtro modelo 69215 centralizado na diagonal do cubo. Em três faces do cubo devem ser feitos furos, seguindo as medidas ilustradas na Figura 7.3d, nos quais serão encaixados, por pressão, os conjuntos conector FC + lente. Todas as dimensões do modelo e a representação em três dimensões do protótipo estão ilustradas na Figura 7.3.



Figura 7.2: Conectores FC e lentes colimadoras.



Figura 7.3: Modelagem do cubo MUX/DEMUX: (a) vistas frontal e (b) 3D, (c) modelo 3D, (d) vista superior e medidas do conjunto conector FC + lente.

Este cubo simples baseia-se na técnica de multiplexação por filtros de interferência explicada na Subseção 3.3.1 D). Como se deseja separar e combinar apenas dois canais, de acordo com as janelas de transmissão da POF de PMMA padrão (azul, verde, laranja, vermelho), apenas um filtro dicroico é necessário em cada dispositivo. No modelo apresentado, para a demultiplexação o sinal composto entra pela extremidade A+B, sendo parcialmente transmitido para a extremidade A e parcialmente refletido para a extremidade B, conforme ilustrado na Figura 7.4. O processo de multiplexação ocorre no sentido inverso.

Os experimentos realizados e apresentados neste capítulo têm como objetivo caracterizar os elementos a serem utilizados e verificar se o modelo de dispositivo apresentado é uma solução viável para realização dos processos de multiplexação e demultiplexação.



Figura 7.4: Esquema do processo de demultiplexação realizado utilizando o cubo MUX/DEMUX proposto.

7.3. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversos dispositivos foram utilizados para realizar os experimentos descritos neste capítulo e nos posteriores, como fontes luminosas, fontes de alimentação, geradores de função,

adaptadores, analisadores de espectro, dentre outros. Estes elementos estão descritos no Apêndice APÊNDICE A -. A Tabela 7.1 exibe um sumário dos equipamentos utilizados para realizar os experimentos descritos neste capítulo.

Equipamento	Fabricante	Modelo	
Fonto do Tonção	ICEI	PS 4100	
Fonte de Tensão	ICEL	PS 1500	
Espectrômetro	Thorlabs	SP1-USB	
	Thorlabs	SPLICCO	
Softwares de análise	OriginLab	Origin	
Osciloscópio	LeCroy	WaveJet 352 ^a	
Fotodetector	Thorlabs	PDA10A	
	Hamamatsu	S6468-02	
Gerador de funções	Tektronix	AFG3251	
Bias-Tee	Mini-Circuits.	ZX85-12G+	
Acoplador	Microparts	LIP101ES7	
Filtras ánticos	Edmund	52530	
r nu os opucos	Optics	69215	
Lantas colimadores	W/T & T	015-POF980	
Lentes comitador as	WIQI	011-POF980	
Fibras ópticas	-	POF padrão	
	Optimedia	OM-GIGA	
Medidor de potência óptica	Thorlabs	PM20A	
	DieMount	Diversos	
LEDs	Laser Roithner	LED470/660-04 ^a	
	OSRAM	LCW W5AM	
	Genéricos	Diversos	

	1	•	4.11 1	• •
Tabela 7 T. Numario dos (dignogitivog e	equinamentos	infilizados nos	evnerimentos
	uispositi tos c	cyuipamentos	umizauos nos	capermentos

7.3.1. Colimação para Injeção e Captura de Luz

1ª Etapa: Investigação sobre a utilização das lentes

Os testes de colimação foram realizados em duas etapas. Na primeira as medidas foram feitas no domínio do comprimento de onda, comparando-se o sinal recebido sem utilizar as lentes modelo 015-POF980 com aquele recebido utilizando-as. A distância L entre as

extremidades das POFs foi variada, conforme ilustrado no esquema da Figura 7.5a e na fotografia da configuração experimental da Figura 7.5b.

Nesta etapa foi utilizada a fonte de quatro canais (Figura A.6) que possui picos centrados (medidos) em 461, 521, 595 e 650 nm. A conexão com o espectrômetro CCD foi feita utilizando um *pigtail* de POF, em vez do *pigtail* padrão de sílica, para melhorar a captura de luz, uma vez que a abertura numérica da POF é consideravelmente maior que a da fibra de sílica, permitindo ao espectrômetro detectar a luz em uma distância L um pouco maior do que com o *pigtail* de sílica. Este *pigtail* de sílica também pode ser substituído em casos nos quais a luz chega ao espectrômetro com uma intensidade luminosa muito baixa, dificultando o processamento do feixe luminoso.

O problema do *pigtail* de POF é que ele provoca uma alteração, ainda não compreendida, no CCD na faixa de comprimentos de onda do turquesa (entre o azul e o verde), levando a deformações do espectro entre 475 e 519 nm, conforme ilustrado na Figura 7.6, que mostra o espectro da fonte de quatro canais medido com o *pigtail* de POF. Uma aproximação do espectro correto está indicada por um pontilhado vermelho nesta mesma figura. Enfatiza-se que estas deformações não afetam os resultados deste experimento, uma vez que se deseja apenas comparar a intensidade das medidas com e sem lentes, e não o formato do espectro. As medidas foram realizadas para L = 0, 35, 75 e 105 mm. Os espectros medidos estão ilustrados nas Figura 7.7 a Figura 7.10.

Para a distância de 0 mm (Figura 7.7), observa-se que o uso da lente insere uma perda de aproximadamente 5,5 dB em relação à mesma medida realizada sem lentes. Com o aumento da distância esta perda relativa se torna cada vez *menor*, até que as intensidades dos sinais com e sem lente se tornam aproximadamente iguais a uma distância de 35 mm (Figura 7.8).

Aumentando ainda mais a distância, 75 mm (Figura 7.9), o uso da lente apresenta melhor eficiência, pois o ganho devido à colimação passa a superar a perda por inserção da lente. Neste caso, o sinal sem lente fica 3,72 dB abaixo do sinal com lente. Por fim, para uma distância de 105 mm (Figura 7.10), o sinal com lente ainda pode ser detectado, enquanto o sinal sem lente se torna apenas ruído, sendo a diferença entre o sinal e o ruído aproximadamente igual a 2,63 dB.

Assim, conclui-se que quando as extremidades das fibras estão encostadas é mais vantajoso não utilizar as lentes, devido à perda por inserção introduzida por elas, contudo, à

medida que as extremidades das fibras se afastam, se torna mais vantajoso utilizar as lentes, devido à maior colimação proporcionada por elas.



Figura 7.5: (a) Esquema e (b) fotografia da configuração experimental utilizada para o experimento de colimação.



Figura 7.6: Espectro da fonte de quatro canais utilizando pigtail de POF.



Figura 7.7: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 0 mm.



Figura 7.8: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 35 mm.



Figura 7.9: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 75 mm.



Figura 7.10: Espectro do sinal com e sem lentes para uma distância de 105 mm.

2ª Etapa: Investigação sobre a substituição das lentes

Na segunda etapa do experimento o objetivo foi buscar a melhor forma de injetar a luz incidente e captar a luz refletida ou transmitida pelo filtro, investigando a possibilidade de utilizar a POF OM-GIGA como fibra GRIN (Apêndice APÊNDICE A - - A.2), para substituir as lentes colimadoras da WT&T, que apresentam um custo elevado. Nesta etapa as medidas foram realizadas de forma comparativa, mantendo-se a distância L e a quantidade de emendas utilizadas constantes, bem como o comprimento das fibras ópticas. Foram feitas diversas combinações entre as lentes colimadoras (Figura A.19a), uma seção de POF PMMA padrão (NA \cong 0,5) e outra de POF OM-GIGA (NA \cong 0,3). Em todas as medidas foi utilizado um líquido casador de índice de refração em cada emenda. O esquema da configuração experimental é o mesmo ilustrado na Figura 7.5a. Na Figura 7.11 observa-se a configuração experimental em bancada.



Figura 7.11: Configuração experimental para medidas de acoplamento e desacoplamento de luz.

Nesta etapa as medidas foram realizadas com o uso do medidor de potência óptica PM20A (Figura A.16). Os resultados obtidos estão sumarizados na Tabela 7.2. Observando os dados nesta tabela, nota-se que as melhores opções para acoplamento e desacoplamento da luz são as combinações *Lente* + *Lente* ou *OM-GIGA* + *Lente*. A primeira combinação certamente é a mais evidente, pois apresenta a maior colimação na saída e a maior capacidade de captar luz na entrada. A segunda melhor opção era esperada, pois a POF OM-GIGA apresenta NA menor do que a POF padrão, o que faz o feixe luminoso originar um "cone de saída" mais estreito, de forma que ao chegar à fibra coletora os raios luminosos estão menos dispersos e a lente consegue captar maior quantidade de luz.

Extremidade 1 – Transmissão	Extremidade 2 – Recepção	Potência (µW)
WT&T 015-POF980	WT&T 015-POF980	9,3
WT&T 015-POF980	SI-POF PMMA	3,3
WT&T 015-POF980	OM-GIGA POF	3,6
SI-POF PMMA	WT&T 015-POF980	4,3
SI-POF PMMA	SI-POF PMMA	2,6
SI-POF PMMA	OM-GIGA POF	2,1
OM-GIGA POF	WT&T 015-POF980	6,3
OM-GIGA POF	SI-POF PMMA	2,4
OM-GIGA POF	OM-GIGA POF	1,4

Tabela 7.2: Resultados das medidas de acoplamento e desacoplamento de luz.

Com estes experimentos conclui-se que o uso de lentes colimadoras melhora o desempenho do acoplamento/desacoplamento de luz na fibra a partir de uma pequena distância entre as extremidades das fibras (pouco menor que 35 mm). Como as distâncias envolvidas na transmissão e reflexão no interior do cubo MUX/DEMUX WDM estão em torno deste valor,

recomenda-se o uso das lentes. Além disso, pelo menos uma lente colimadora (transmissão) pode ser substituída por uma POF especial, OM-GIGA, para diminuir o custo, mas esta substituição acrescenta ao sistema uma perda de desempenho de aproximadamente 1,7 dB.

7.3.2. Filtro Modelo 52530

O filtro modelo 52530 da Edmund Optics (Figura 7.12) foi caracterizado espectralmente, utilizando a fonte de quatro canais (Figura A.6) como fonte luminosa. Esta fonte luminosa é interessante para realização de medidas espectrais devido à presença dos quatro principais canais existentes nas POFs de PMMA (janelas de transmissão), permitindo verificar o comportamento de cada canal individualmente. As medidas foram realizadas com o auxílio do *pigtail* de POF e, portanto, apresentam a deformação na faixa espectral do turquesa, conforme explicado na Subseção 7.3.1.



Figura 7.12: Filtro óptico modelo 52530 da Edmund Optics.

O objetivo desta caracterização espectral é investigar o comportamento óptico do filtro quanto aos comprimentos de onda transmitidos e refletidos quando o feixe luminoso incide a 45°, para determinar se seria possível utilizá-lo como núcleo do cubo MUX/DEMUX proposto.

Para medir ambos os espectros de transmissão e reflexão deste filtro foram utilizadas as montagens experimentais ilustradas nos esquemas das Figura 7.13a e Figura 7.13b, respectivamente. As Figura 7.14a (transmissão) e Figura 7.14b (reflexão) mostram a montagem em bancada para este experimento, no qual foram utilizadas as lentes da WT&T modelo 015-POF980 (Figura A.19a).



Figura 7.13: Esquema da configuração experimental para medidas de (a) transmissão e (b) reflexão utilizando o filtro modelo 52530 da Edmund Optics.

A Figura 7.15 mostra o resultado obtido para o espectro de transmissão, no qual se observa a presença dos canais azul, centrado em 461 nm, e vermelho, centrado em 650 nm. Os canais verde e laranja emitidos pela fonte de quatro canais são bloqueados pelo filtro. A linha pontilhada em vermelho indica uma aproximação do espectro "real" que seria obtido caso não existisse a deformação provocada pelo uso do *pigtail* de POF, utilizado para que a luz coletada pelo CCD fosse suficiente para suplantar o ruído.

A Figura 7.16 ilustra o espectro de reflexão obtido para o filtro modelo 52530. Neste caso todos os quatro canais estão presentes, sendo o azul (461 nm) e o vermelho (650 nm) quase bloqueados. Os canais verde, centrado em 521 nm, e laranja, centrado em 595 nm, estão presentes com maior intensidade. Novamente, a linha pontilhada vermelha ilustra uma aproximação do espectro "real" que seria obtido caso o CCD não saturasse nessa região devido ao uso do *pigtail* de POF.



Figura 7.14: Configurações experimentais para medidas de (a) transmissão e (b) reflexão, utilizando o filtro modelo 52530 da Edmund Optics.

Analisando as Figura 7.15 e Figura 7.16, conclui-se que o filtro modelo 52530 da Edmund Optics é um bom refletor para os canais verde e laranja, mas não é eficiente nem na transmissão nem na reflexão dos canais azul e vermelho. Assim, sua utilização como núcleo de um MUX/DEMUX não é adequada, pois ele não é capaz de separar nenhum conjunto de canais de forma eficiente. Devido a este resultado, não se seguiu para a próxima etapa da caracterização espectral deste filtro, na qual seria utilizado um LED branco para medir a transmitância e a refletância reais deste filtro. Apesar disso, esta primeira investigação contribuiu para a confirmação de que é possível utilizar um filtro óptico comercial como núcleo do cubo MUX/DEMUX proposto, bastando que os comprimentos de onda a serem

separados sejam definidos e, então, que seja adquirido um filtro que apresente as características espectrais ideais.



Figura 7.15: Espectro de transmissão do filtro modelo 52530 da Edmund Optics a 45°.



Figura 7.16: Espectro de reflexão do filtro modelo 52530 da Edmund Optics a 45°.

7.3.3. Substituição do Filtro Modelo 52530

Inicialmente, o filtro modelo 52530 (Figura 7.12) da Edmund Optics foi escolhido para ser utilizado no cubo WDM por ser o único, dentre os filtros **disponíveis** em laboratório, a apresentar características ópticas razoáveis para operar como filtro dicroico, conforme ilustrado pela sua curva de transmissão na Figura 7.17. Esta curva nominal foi obtida junto ao fabricante após a realização dos experimentos descritos na Subseção 7.3.2. A linha grossa representa a transmitância do filtro orientado a 60°, e a linha fina diz respeito a uma orientação de 0°. Esta curva excursiona entre estes limites para ângulos entre 0 e 60°. No entanto este filtro foi fabricado, de fato, para operar a 0°, não sendo tão adequado para a aplicação proposta (a 45°), conforme foi comprovado na Subseção 7.3.2. Dessa forma, foi necessário realizar uma pesquisa buscando outros filtros comerciais que pudessem apresentar desempenho melhor do que o filtro modelo 52530 escolhido inicialmente. Analisando as curvas de transmissão características de diversos filtros, selecionou--se como principais candidatos para substituir o filtro 52530 os filtros modelos: 66242, 69215 e 47812, todos da Edmund Optics. Suas curvas de transmissão estão ilustradas na Figura 7.18.

A proposta deste trabalho é desenvolver um MUX/DEMUX WDM capaz de operar com dois canais, escolhidos a partir das possíveis combinações entre os canais azul, verde, laranja e vermelho. Esta escolha depende das características ópticas do filtro óptico utilizado como núcleo do dispositivo, isto é, a escolha dependerá de quais canais serão refletidos e transmitidos pelo filtro óptico. O filtro modelo 66242 apresenta comprimento de onda de corte centrado em 600 nm, com subida lenta (de 550 a 625 nm, aproximadamente – $\Delta \lambda = 75 nm$), sendo capaz de separar bem o canal vermelho (650 nm) dos canais azul (460 e 480 nm) e verde (520 nm). O canal laranja (590 nm) é parcialmente transmitido e refletido, não sendo possível utilizá-lo. O filtro modelo 47812 apresenta comprimento de onda de corte centrado em 500 nm, com descida média (de 475 a 625 nm, aproximadamente – $\Delta \lambda = 50 nm$), sendo capaz de separar bem um canal azul estreito (460 nm) dos canais vermelho, verde e laranja. Por fim, o filtro modelo 69215 apresenta comprimento de onda de corte centrado em 550 nm, com descida rápida (de 540 a 560 nm, aproximadamente $-\Delta\lambda = 20 nm$), permitindo a separação dos canais azul e verde dos canais laranja (estreito) e vermelho. Assim, dentre estes três filtros ópticos, o mais adequado para a aplicação proposta é o modelo 69215, por ser capaz de separar um maior número de combinações de canais, tornando-se, portanto, mais versátil. Este filtro pode ser visto na Figura 7.19 em seu suporte "homemade".



Figura 7.17: Curva de transmissão do filtro óptico modelo 52530 da Edmund Optics.



Figura 7.18: Curvas de transmissão dos filtros modelo (a) 66242, (b) 69215 e (c) 47812 –curva amarela – da Edmund Optics.



Figura 7.19: Filtro óptico modelo 69215 da Edmund Optics em suporte "homemade".

7.3.4. Filtro modelo 69215

Uma vez escolhido o filtro modelo 69215 para ser utilizado como núcleo do MUX/DEMUX WDM, após análise dos espectros de transmitância dos possíveis candidatos para substituição do filtro modelo 52530, experimentos de caracterização espectral e temporal foram realizados. Nestes experimentos o *pigtail* de POF foi substituído pelo de sílica para capturar a luz, levando-a ao espectrômetro. Esta modificação foi possível devido à substituição do filtro modelo 52530, com 12,5 mm de diâmetro, pelo modelo 69215, com dimensões 25,2 x 35,6 mm, facilitando a montagem optomecânica e o alinhamento dos feixes luminosos (*Free Space Optics*, FSO), tornando o *pigtail* de sílica capaz de capturar luz suficiente para entregar ao espectrômetro. Os experimentos de caracterização espectral e demultiplexação serão descritos na Subseção 7.3.3 A), e os de caracterização temporal, na 7.3.3 B).

A) Caracterização Espectral

Espectro de Transmissão

A primeira caracterização espectral do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizou as lentes colimadoras modelo 015-POF980 da WT&T, e empregou como fonte luminosa a fonte de quatro canais (Figura A.6), cujo espectro medido com o *pigtail* de sílica pode ser observado na Figura 7.20.

Primeiramente foi obtido o espectro transmitido pelo filtro, incidindo o feixe luminoso da fonte de quatro canais sobre o filtro e medindo o espectro resultante. A Figura 7.13a (página 101) ilustra o esquema da configuração experimental utilizada. Na Figura 7.21 foram adicionados dois detalhes ao lado direito da fotografia da configuração experimental (Figura 7.21a), apenas para mostrar que a luz incidente no filtro (Figura 7.21b), proveniente da fonte de quatro canais, é de cor branca e que a luz transmitida pelo filtro (Figura 7.21c) apresenta um

tom turquesa. O espectro obtido na transmissão pode ser observado na Figura 7.22. Verifica-se que o filtro em questão bloqueia os comprimentos de onda provenientes dos LEDs DieMount laranja e vermelho, centrados em 595 nm e 650 nm respectivamente, transmitindo os canais azul (460 nm) e verde (522 nm) de forma eficiente. Este resultado está de acordo com a curva de transmissão mostrada na Figura 7.18b.



Figura 7.20: Espectro da fonte luminosa de quatro canais, medido com pigtail de sílica.



Figura 7.21: (a) Configuração experimental para obtenção do espectro de transmissão e detalhes da luz (b) incidente no filtro e (c) transmitida pelo filtro.



Figura 7.22: Espectro de transmissão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics a 45 °.

Espectro de Reflexão

Mediu-se, então, o espectro refletido pelo filtro utilizando a configuração experimental ilustrada na Figura 7.13b (página 101). Os detalhes inseridos na Figura 7.23, ao lado da fotografia da montagem optomecânica em bancada (Figura 7.23a), mostram a cor do feixe luminoso observado, sendo branco o incidente (Figura 7.23b) e vermelho alaranjado o refletido (Figura 7.23c).

O espectro obtido na reflexão pode ser observado na Figura 7.24. Os comprimentos de onda bloqueados, agora, são aqueles provenientes dos LEDs DieMount centrados em 460 nm e 522 nm. Contudo, este bloqueio não é perfeito, de forma que se verifica a existência de dois espectros de pequena intensidade luminosa centrados em 474 (azul) e 521 nm (verde). Além disso, existe um segundo vazamento do canal verde originando componentes espectrais em torno de 556 nm. Este vazamento ocorre devido à ampla largura espectral da base do POF-*coupled* LED verde da DieMount, que ultrapassa o comprimento de onda de corte do filtro modelo 69215.



Figura 7.23: (a) Configuração experimental para obtenção do espectro de reflexão e detalhes da luz (b) incidente no filtro e (c) refletida pelo filtro.



Figura 7.24: Espectro de reflexão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics a 45 $^\circ.$

Demultiplexação: Canais Verde e Vermelho

Após obtenção destes resultados, que confirmam a curva de transmissão ilustrada na Figura 7.18b (página 106), foram realizados testes de demultiplexação utilizando dois sinais com comprimentos de onda distintos. Este experimento foi dividido em duas etapas e foram utilizadas três fontes luminosas: um LED DieMount (Figura A.1) verde (520 nm), um vermelho (650 nm) e o *dual* LED modelo LED470/660-04 (Figura A.5).

Na primeira etapa foi realizada a demultiplexação dos sinais verde e vermelho emitidos pelos LEDs DieMount, cujos feixes foram combinados através do acoplador 2x1 da Microparts

(Figura A.17), como mostra a Figura 7.25. As configurações experimentais utilizadas para capturar os feixes luminosos transmitido e refletido são as mesmas ilustradas nas Figura 7.13a e Figura 7.13b (página 101), respectivamente, substituindo-se a fonte luminosa de quatro canais por uma de dois canais. O sinal resultante na saída do acoplador 2x1 incide sobre o filtro 69215 a 45° e deve ser demultiplexado, segundo os espectros de transmissão e reflexão mostrados nas Figura 7.22 e Figura 7.24, isto é, o canal vermelho deve ser refletido enquanto o canal azul deve ser transmitido. O espectro do sinal multiplexado pode ser observado na Figura 7.26.



Figura 7.25: Multiplexação dos sinais verde e vermelho provenientes de LEDs DieMount.



Figura 7.26: Espectros dos LEDs DieMount com pico de emissão nominal em 520 nm e 650 nm.

O espectro do sinal transmitido pode ser observado na Figura 7.27. O sinal verde, centrado em 522 nm, é transmitido, como era de se esperar, porém seu espectro é ligeiramente modificado, pois ele apresenta uma base larga que invade a faixa de comprimentos de onda pertencente ao alaranjado e está acima do comprimento de onda de corte (550 nm nominal) do filtro óptico, sendo, portanto, bloqueado na transmissão. O sinal vermelho, centrado em 649 nm, por sua vez, é completamente bloqueado.

A Figura 7.28 mostra o espectro de reflexão medido. Observa-se que o canal vermelho, centrado em 649 nm é eficientemente refletido, apesar de sofrer um leve deslocamento para a esquerda. Além disso, verifica-se que houve, de fato, reflexão da porção do canal verde que invade o comprimento de onda do alaranjado, centrada em 556 nm, e que foi bloqueada na transmissão.



Figura 7.27: Espectro de transmissão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa LEDs DieMount verde e vermelho.



Figura 7.28: Espectro de reflexão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa LEDs DieMount verde e vermelho.

Dos resultados acima descritos nos experimentos de demultiplexação, conclui-se que o filtro modelo 69215 da Edmund Optics não é o ideal para separar os canais verde e vermelho, utilizando POF-*coupled* LEDs da DieMount como fontes luminosas, uma vez que o filtro bloqueia uma parte do sinal centrado em 522 nm, ao transmití-lo, o que representaria uma perda de parte da informação em um enlace de comunicação. Para verificar se essa perda seria o suficiente para degradar a qualidade da comunicação, outros testes devem ser realizados, como a detecção da quantidade de erros de bits produzidos a uma determinada taxa de transmissão e a determinação da influência dessa taxa de erros sobre a qualidade do enlace.

Demultiplexação: Canais Azul e Vermelho

O experimento de demultiplexação foi repetido utilizando-se o *dual* LED da Laser Roithner, com picos de emissão nominal em 480 e 660 nm. É válido ressaltar que o comprimento de onda 660 nm não é ideal para transmissão em POFs por sofrer uma atenuação elevada em sua propagação (Figura 2.12 – página 22). Novamente os esquemas de configurações experimentais ilustrados nas Figura 7.13a e Figura 7.13b (página 101) foram utilizados para obtenção dos espectros de transmissão e reflexão, respectivamente, trocando-se a fonte de quatro canais do esquema pelo *dual* LED (fonte de dois canais), cujo espectro pode ser visto na Figura 7.29. Nota-se que existe um pequeno deslocamento dos picos de emissão medidos para os nominais, sendo os picos de emissão efetivos centrados em 479 e 665 nm. Neste experimento espera-se que, após incidir a 45° sobre o filtro óptico, o feixe luminoso multiplexado seja novamente dividido, sendo o canal azul transmitido e o vermelho refletido. Os espectros obtidos para os sinais transmitido e refletido podem ser observados nas Figura 7.30 e Figura 7.31, respectivamente.

Na Figura 7.30 observa-se que a transmissão do canal azul é bastante eficiente, sendo o vermelho refletido (Figura 7.31), como esperado, porém o comprimento de onda central é deslocado de aproximadamente 1 nm para a direita (666,5 nm), modificação esta que pode ter ocorrido no momento da medição utilizando o software Origin devido ao caráter ruidoso do espectro, sendo, portanto, de pouca importância. Além disso, não se observa vazamento de nenhum dos dois canais.



Figura 7.29: Espectro do *dual* LED modelo LED 470/660-04 da Laser Roithner com picos de emissão nominais em 480 e 660 nm.



Figura 7.30: Espectro de transmissão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa dual LED modelo LED 470/660-04 da Laser Roithner.



Figura 7.31: Espectro de reflexão do filtro modelo 69215 da Edmund Optics utilizando como fonte luminosa dual LED modelo LED 470/660-04 da Laser Roithner.

Dos resultados obtidos utilizando o *dual* LED modelo LED 470/660-04 conclui-se que, para o filtro em questão, seria adequado realizar a demultiplexação de dois sinais azul e vermelho, centrados, neste caso, em 479 nm e 665 nm, respectivamente. Os três experimentos descritos permitem concluir que o filtro 69215 é um bom candidato para ser utilizado como núcleo do cubo MUX/DEMUX proposto, uma vez que possui corte em um comprimento de onda adequado para separação dos canais azul/vermelho de forma eficiente.

Medidas de Transmitância e Refletância

Para complementar a caracterização espectral do filtro 69215, foram realizadas medidas de transmitância/refletância, comparando-as com a curva nominal (Figura 7.18b – página 106). Além disso, verificou-se a variação da curva de transmitância de acordo com o ângulo de incidência.

Para tanto, foi utilizado o LED branco *Golden DRAGON Plus* da OSRAM (Figura A.4), cujo espectro pode ser observado na Figura 7.32, e um goniômetro, sobre o qual foi repousado o filtro modelo 69215 perpendicularmente ao feixe incidente. O ângulo do filtro, que equivale ao ângulo de incidência, foi incrementado de 3° a cada medida, partindo de 0°. O esquema da configuração experimental pode ser observado na Figura 7.33.

A refletância foi medida apenas para o ângulo de 45°, utilizando a configuração experimental ilustrada na Figura 7.13b (página 101). Vale salientar que o espectro de referência (entrada) utilizado para calcular a refletância é o espectro do LED branco *Golden DRAGON Plus* coletado na direção de transmissão, sem a presença do filtro, e não na de reflexão.

A Figura 7.34 mostra a refletância medida para as duas amostras de filtros modelo 69215. Observa-se que a variação entre as duas curvas é muito pequena e que o comprimento de onda de corte (556 nm) está um pouco deslocado do comprimento de onda de corte nominal (550 nm). Existe ainda uma pequena reflexão dos comprimentos de onda em torno de 500 nm, que é pouco significativa.



Figura 7.32: Espectro do LED Branco Golden DRAGON Plus da OSRAM.



Figura 7.33: Esquema da configuração experimental para medida de transmitância em função do ângulo.



Figura 7.34: Refletância das duas amostras de filtros modelo 69215.

Na Figura 7.35 observa-se a variação da curva de transmitância do filtro modelo 69215 com o ângulo de incidência do feixe luminoso para um subconjunto de ângulos ($\alpha = 0, 12, 21, 33, 45^{\circ}$). O comprimento de onda de corte sofre um *blue-shift* e a porcentagem de transmissão da banda passante do filtro diminui quando o ângulo de incidência aumenta, sendo esta diferença de aproximadamente 0,75 dB para o pior caso (0° comparado com 45°).

A existência desse *blue-shift* permite a realização de um ajuste fino do comprimento de onda de corte para o filtro modelo 69215. Com essa sintonização angular seria possível, teoricamente, utilizar este filtro para bloquear o canal do alaranjado em um sinal composto por feixes muito estreitos 590 + 650 nm a 0°, o que não é possível utilizando o filtro a 45°, por exemplo. Para que isso seja possível, é necessário desenvolver um modelo de cubo MUX/DEMUX que permita a variação angular do filtro sem provocar desalinhamento das POFs de entrada e de saída, o que está fora do escopo deste trabalho.



Figura 7.35: Variação do comprimento de onda de corte com o ângulo de incidência, para o filtro modelo 69215 da Edmund Optics.

B) Caracterização Temporal: Enlace Bidirecional

Além da caracterização espectral foi realizada uma caracterização temporal do filtro modelo 69215 para verificar possíveis interferências entre os canais. A configuração experimental utilizada para avaliar o comportamento do MUX/DEMUX WDM proposto em um ambiente quase real é constituída por um enlace bidirecional *full-duplex* e dois terminais, A e B, compostos por um fotodetector (PDA10A da Thorlabs ou S6468-02 da Hamamatsu, Figura A.10) e uma fonte luminosa azul/vermelha (*spotlight* LEDs da DieMount, Figura A.3) ou verde/vermelha (POF-*coupled* LEDs da DieMount, Figura A.1). Cada terminal se comunica em um comprimento de onda distinto, e cada fonte luminosa foi modulada utilizando o gerador de funções modelo AFG3251 da Tektronix (Figura A.12a). A configuração experimental em bancada pode ser observada na Figura 7.36a, juntamente com seu esquema (Figura 7.36b). Em uma segunda etapa, as lentes 011-POF980 da WT&T foram utilizadas na fibra central conforme esquema ilustrado na Figura 7.37¹⁸ para verificar sua influência sobre o sinal detectado.

¹⁸ Dispositivos de análise, fontes alimentadoras e geradores de função foram retirados do esquema para facilitar a visualização



Figura 7.36: Enlace bidirecional: (a)configuração experimental em bancada e (b) esquema do experimento.



Figura 7.37: Enlace bidirecional: esquema simplificado utilizando lentes.

Na Figura 7.36b, o sinal A, azul, é emitido por uma fonte luminosa na extremidade A e incide a 45° sobre o filtro A o qual transmite este sinal, que, por sua vez, é capturado pela POF

central, pela qual trafega até atingir a extremidade B, incidindo a 45° sobre o filtro. Este filtro B também transmite o sinal A, que é captado pela POF e levado ao fotodetector B, chegando, finalmente a um canal do osciloscópio. O sinal B, vermelho, por sua vez, é emitido na extremidade B e incide a 45° sobre o filtro B, responsável por sua reflexão. O sinal B refletido é capturado pela POF central, trafegando por ela até chegar à extremidade A, na qual incide a 45° sobre o filtro A, o qual reflete o sinal, que é capturado pela POF e levado ao fotodetector A, chegando, finalmente, ao outro canal do osciloscópio.

Os *spotlight* LEDs vermelho, com pico de emissão em 645 nm, e azul, com pico de emissão em 476 nm, foram modulados segundo os parâmetros da Tabela 7.3. Seus espectros podem ser observados na Figura 7.38.

Parâmetro	Azul	Vermelho
Tensão de bias (V)	2,7	2,22
Frequência (MHz)	0,5	1
Tensão pico a pico (V)	3	3
Carga na entrada do osciloscópio (Ω)	0	50
Tipo de Onda	Senoidal	Quadrada

Tabela 7.3: Parâmetros de modulação dos sinais azul e vermelho utilizados no enlace WDM bidirecional.



Figura 7.38: Espectro spotlight LED DieMount (650 nm e 460 nm)

Na Figura 7.39 observa-se o sinal recebido em A, proveniente de B (Figura 7.36b). Este sentido de comunicação, de B para A, constitui o canal vermelho. Verifica-se que há um ganho de aproximadamente 4,3 dB quando as lentes são utilizadas.

O sentido de comunicação de A para B, constitui, por sua vez, o canal azul. Neste canal não existe ganho observável quando as lentes são utilizadas, conforme ilustrado na Figura 7.40. Supõe-se que isto aconteça devido à divergência do feixe luminoso, isto é, o feixe vermelho ao incidir sobre o filtro e ser refletido ainda não sofreu grande divergência, de forma que as lentes conseguem capturar maior quantidade de luz. Enquanto que o feixe azul, ao ser transmitido pelo filtro e chegar à lente já sofreu uma divergência significativa, de forma que o uso da lente faz pouca, ou nenhuma, diferença na captura do feixe luminoso. A Figura 7.41 mostra um esquema geométrico da divergência dos feixes luminosos. Além disso, observandose as Figura 7.39 e Figura 7.40 não se verifica influência significativa da senóide de 1 MHz sobre a onda quadrada de 500 kHz e vice-versa, no domínio do tempo.



Figura 7.39: Sinal no canal vermelho (spotlight LED).


Figura 7.40: Sinal no canal azul (spotlight LED).



Figura 7.41: Esquema geométrico da divergência dos feixes luminosos.

O mesmo experimento foi realizado utilizando-se POF-*coupled* LEDs vermelho e verde. A modulação utilizada está resumida na Tabela 7.4. Os resultados obtidos são semelhantes àqueles obtidos para os *spotlight* LEDs azul e vermelho. Para o canal vermelho verificou-se um ganho de 5,7 dB, enquanto que para o canal verde, assim como para o canal azul não foi observado ganho considerável. Estes resultados estão ilustrados nas Figura 7.42 e Figura 7.43, respectivamente.

Parâmetro	Verde	Vermelho
Tensão de <i>bias</i> (V)	2,7	2,22
Frequência (MHz)	0,5	1
Tensão pico a pico (V)	3	3
Carga na entrada do osciloscópio (Ω)	0	50
Tipo de Onda	Senoidal	Quadrada

Tabela 7.4: Parâmetros de modulação dos sinais verde e vermelho utilizados no enlace

WDM bidirecional.



Figura 7.42: Sinal no canal vermelho (LED DieMount).



Figura 7.43: Sinal no canal verde (LED DieMount).

No Capítulo 8 a seguir, será investigado o uso de um novo tipo de filtro como núcleo do cubo MUX/DEMUX WDM. Parte dos experimentos realizados no capitulo atual serão repetidos nesta investigação.

Resumo dos experimentos do capítulo e seus resultados:

Foram realizados experimentos de colimação utilizando as lentes da WT&T e combinações com outros tipos de POFs, e experimentos de caracterização dos filtros 52530 e 69215 da Edmund Optics.

Os experimentos de colimação levaram à conclusão de que o uso de lentes colimadoras melhora significativamente o desempenho do acoplamento/desacoplamento de luz na fibra e, para reduzir o custo devido ao elevado valor das lentes colimadoras, pelo menos uma destas lentes pode ser substituída pela POF OM-GIGA, caso uma pequena perda no desempenho do sistema seja aceitável.

Os experimentos de caracterização dos filtros da Edmund Optics permitiram concluir que o filtro modelo 52530 pode ser empregado, mas não é o mais adequado para a aplicação desejada devido ao seu comprimento de onda de corte. Já o filtro modelo 69215 é adequado para multiplexar/demultiplexar os canais azul/vermelho de forma eficiente e verde/vermelho com alguma perda, quando são utilizados POF-*coupled* LEDs da DieMount. Não foi observada interferência entre os canais em nenhum dos dois casos, no domínio do tempo, e o uso de lentes na fibra central é indiferente para o sinal transmitido, independentemente do comprimento de onda emitido (azul/verde), com as distâncias envolvidas no experimento.

8. FILTROS DE CRISTAL LÍQUIDO OPERANDO COMO FILTROS *NOTCH* E DICROICO

8.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos os experimentos realizados para investigar o desempenho de filtros baseados em LC operando como filtros dicroicos e filtros *notch*, com o objetivo de utilizá-los como núcleo do MUX/DEMUX proposto (ver Seção 7.2) ou como dispositivos eliminadores de interferência entre canais adjacentes (*crosstalk*), respectivamente. Os resultados destes experimentos também serão apresentados e discutidos no decorrer do capítulo.

A utilização dos filtros LC como novo núcleo do cubo MUX/DEMUX WDM visa maior nacionalização deste dispositivo, uma vez que estes filtros foram fabricados com a participação de um pesquisador brasileiro, em parceria com um laboratório francês (Capítulo 6). Além disso, se produzido em larga escala, o custo destes filtros pode chegar a ser menor do que o custo dos filtros comerciais (americanos) utilizados no Capítulo 7. Para completar essa nacionalização, é necessário substituir, também, as lentes colimadoras (canadenses) por outras fabricadas por alguma empresa ou laboratório brasileiro.

A operação destes filtros como filtros *notch* é de grande importância para enlaces que utilizam POFs, uma vez que as fontes ópticas utilizadas em conjunto com esse tipo de fibra geralmente apresentam largura espectral ampla, sendo este um dos motivos pelo qual não é possível a realização do DWDM neste meio físico. Já o WWDM ou até mesmo o CWDM são mais adequados, apesar deste último ainda apresentar um número elevado de canais (Subseção 3.3) para operação com POFs.

Neste trabalho a sugestão é implementar um WWDM adaptado para POFs, utilizando apenas dois canais. Devido à ampla largura espectral das fontes luminosas utilizadas em conjunto com as POFs, é possível que haja interferência entre os canais dependendo dos comprimentos de onda utilizados. Esta interferência pode ser eliminada pelo filtro *notch*, aprimorando a qualidade do enlace óptico.

8.2. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os experimentos descritos nas próximas seções deste capítulo utilizaram grande parte dos equipamentos sumarizados na Tabela 7.1, com algumas alterações. Como o foco agora está direcionado para a utilização de filtros CLC como núcleo do cubo MUX/DEMUX WDM proposto, em substituição aos filtros comerciais utilizados no Capítulo 7, o único elemento novo utilizado para realizar os experimentos deste capítulo é o próprio filtro CLC, cuja fabricação foi descrita na Subseção 6.5. A Tabela 8.1 sumariza os dispositivos utilizados para realizar os experimentos deste capítulo.

Equipamento	Fabricante	Modelo	
Fonto do Tonção	ICEI	PS 4100	
ronte de Tensao	inte de Tensao ICEL	PS 1500	
Espectrômetro	Thorlabs	SP1-USB	
Softwares de	Thorlabs	SPLICCO	
análise	OriginLab	Origin	
LEDs	DieMount	Diversos	
	Laser Roithner	LED470/660-04 ^a	
	OSRAM	LCW W5AM	
	Genéricos	Diversos	
Filtros ópticos	Telecom Bretagne – Optique Departmènt	Amostras diversas de filtros de CLC	
Lentes	WT&T	015-POF980	
colimadoras		013-101700	
Fibras ópticas	_	POF padrão	

Tabela 8.1: Sumário dos dispositivos e equipamentos utilizados nos experimentos.

8.2.1. Operação como Filtro Notch

A primeira etapa para investigar o uso dos filtros CLC como filtros ópticos dicroico e *notch* consistiu na realização de experimentos de caracterização espectral, obtendo-se medidas relacionadas à transmissão e à reflexão do feixe luminoso incidente. Os feixes foram capturados através do *pigtail* de sílica, que leva ao espectrômetro CCD para análise em computador utilizando o software SPLICCO. Em seguida foi investigado o comportamento óptico do filtro CLC com a variação do ângulo de incidência do feixe luminoso.

Diversas amostras de filtros de CLC foram fabricadas na Universidade Télécom Bretagne, em Brest, França, de acordo com o processo explicado na Subseção 6.5, e foram enviadas ao LaCOp, na UFF. Estas amostras foram numeradas para controle e então foi realizada a caracterização espectral de cada uma delas individualmente. Para tanto, foi utilizado o esquema de configuração experimental ilustrado na Figura 7.33, repetida a seguir para maior comodidade. Um LED branco genérico de espectro amplo foi utilizado como fonte luminosa nesta caracterização espectral e seu espectro medido pode ser visto na Figura 8.1.



Figura 7.33: Esquema da configuração experimental para medida de transmitância em função do ângulo



Figura 8.1: Espectro do LED branco genérico.

Primeiramente foram realizadas as medidas de transmissão, a fim de investigar a operação do filtro CLC como filtro *notch*. Neste experimento, a luz proveniente do LED branco incide sobre o filtro CLC a 0° e captura-se a parcela de luz transmitida. Para manter o

filtro CLC a 0° foi utilizado um suporte optomecânico, conforme ilustrado na fotografia da configuração experimental na Figura 8.2.



Figura 8.2: Configuração experimental utilizada para caracterização dos filtros de cristal líquido.

Foram testados oito filtros ao todo e seus espectros de transmitância estão ilustrados na Figura 8.3. Nota-se que os espectros apresentam formatos semelhantes entre si e os vales de atenuação (*notch*) se encontram entre 510 e 525 nm, excetuando-se a amostra 04, cujo notch está centrado em aproximadamente 551 nm. A Tabela 8.2 apresenta os valores, em dB, da atenuação aproximada nos centros dos *notches* de cada amostra.

Observando o espectro de transmitância obtido (Figura 8.3) e a Tabela 8.2 com os valores aproximados de atenuação, nota-se que, dentre as amostras em questão, o filtro CLC que apresenta maior eficiência para operar como filtro *notch* é a amostra 01, uma vez que apresenta uma melhor relação entre o sinal transmitido e o bloqueado. Esta será a amostra com a qual se trabalhará deste ponto em diante, a menos que esteja claramente explícito que outra amostra será utilizada.



Figura 8.3: Espectro de transmitância das 8 amostras de filtros de CLC.

Amostra de Filtro CLC	Atenuação (dB)
01	7,1
02	2,3
03	2,8
04	2,1
05	1,5
06	2,0
07	2,2
08	2,7

Tabela 8.2: Atenuação aproximada nos centros dos vales do espectro de transmitânciadas 8 amostras de filtros de cristal líquido.

Para testar a eficiência do filtro CLC 01 operando como filtro *notch*, foi realizado outro experimento, utilizando a fonte luminosa de quatro canais (Figura A.6). Neste experimento, fez-se incidir o feixe luminoso proveniente da fonte de quatro canais sobre o filtro CLC 01 a 0°, coletando-se a parcela de luz transmitida, conforme esquema da Figura 7.33. O espectro da fonte luminosa de quatro canais e o que foi obtido para a transmissão estão ilustrados simultaneamente na Figura 8.4.

Na Figura 8.4 existe uma atenuação bastante intensa do canal verde, centrado em 521 nm, de forma que é bastante razoável considerar que este canal foi completamente bloqueado pelo filtro CLC 01, comprovando que esta amostra pode ser perfeitamente utilizada como filtro *notch* para este comprimento de onda.



Figura 8.4: Comparação entre o espectro da fonte luminosa e o espectro transmitido pelo filtro CLC 01 a 0° de incidência.

8.2.2. Operação como Filtro Dicroico

A investigação do uso do filtro de CLC como filtro dicroico se inicia supondo-se que seja verdadeira a afirmação de que o filtro de CLC pode ser utilizado como tal e seu comportamento deve ser semelhante ao do filtro modelo 69215 da Edmund Optics caracterizado na Subseção 7.3.4. Em um primeiro experimento, fez-se incidir um feixe luminoso proveniente da fonte de quatro canais sobre o filtro CLC 01 a 45°, coletando-se as parcelas transmitida e refletida, conforme esquema de configuração experimental ilustrado respectivamente nas Figura 7.13a e Figura 7.13b, repetidas abaixo. As Figura 8.5a e Figura 8.5b são fotografias da configuração experimental em bancada utilizada para as medidas de transmissão e reflexão, respectivamente.



Figura 7.13: Esquema da configuração experimental para medidas de (a) transmissão e (b) reflexão utilizando o filtro modelo 52530 da Edmund Optics.



Figura 8.5: Configuração experimental utilizada para captar os feixes luminosos (a) transmitido e (b) refletido.

Os resultados obtidos para transmissão e reflexão podem ser observados simultaneamente na Figura 8.6. Para um ângulo de incidência de 45° ocorre transmissão dos canais verde (519 nm), laranja (597 nm) e vermelho (650 nm), sendo o canal azul (460 nm) refletido. Este canal está parcialmente presente no espectro transmitido e é dividido em duas

componentes, centradas em 453 e 481 nm, o que ocorre devido às características de transmissão e reflexão do filtro CLC 01, ilustradas na Figura 8.7. Nesta figura observa-se que o vale de atenuação encontra-se centrado em 460 nm, significando que este comprimento de onda será refletido; contudo, este vale é bastante estreito, fazendo com que comprimentos de onda pouco acima e pouco abaixo de 460 nm sejam refletidos com menor intensidade, aumentando sua presença no espectro de transmissão. Dessa forma, o espectro largo do LED DieMount azul presente na fonte de quatro canais é dividido em três seções: a que se encontra em uma faixa de comprimentos de onda mais baixos (aproximadamente 455 nm) é parcialmente *transmitida*, a centrada em 460 nm é bastante *refletida* e a que se encontra em comprimentos de onda mais altos (aproximadamente 470 nm) também é parcialmente *transmitida*, levando à formação dos dois picos centrados em 453 e 481 nm. Além disso, ocorre reflexão parcial dos canais verde, laranja e vermelho, uma vez que a eficiência de transmissão é de apenas 55%, aproximadamente (Figura 8.7).



Figura 8.6: Espectros de transmissão e reflexão do filtro CLC 01 a 45°.



Figura 8.7: Espectros de transmitância e refletância do filtro CLC 01.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que o filtro CLC 01 pode ser utilizado para bloquear sinais indesejados centrados em 520 nm de forma efetiva, quando o feixe luminoso incide perpendicularmente a sua superfície. Além disso, existe uma dependência do comprimento de onda bloqueado com o ângulo de incidência do feixe luminoso, uma vez que ao incidir o feixe a 45° o novo comprimento de onda bloqueado pertence ao canal azul, centrado em 460 nm. Este comprimento de onda não somente é bloqueado na transmissão como também é refletido, constituindo um fator importante, uma vez que essa característica de separação de faixas de comprimento de onda permite que o filtro Seja utilizado como filtro dicroico. Adicionalmente, a Figura 8.3 mostra que o filtro CLC 04 possui um vale de atenuação bastante deslocado, tornando possível afirmar que a construção do filtro pode ser manipulada para sintonizar a faixa de comprimentos de onda a ser atenuada.

8.2.3. Variação do Notch com o Ângulo de Incidência

A mudança do vale de atenuação de 521 nm para 460 nm de acordo com a modificação do ângulo de incidência de 0°, a fim de operar com filtro *notch*, para 45°, a fim de operar como filtro dicroico, incitou a investigação da sintonização do comprimento de onda do vale de

atenuação de acordo com o ângulo de incidência. Os experimentos realizados para investigar essa observação serão descritos a seguir.

Para investigar o comportamento óptico do filtro CLC com o ângulo de incidência foi realizado o mesmo experimento descrito na Subseção 7.3.4 A) (a partir da página 116), no qual foi utilizado o LED branco *Golden DRAGON Plus da OSRAM* (Figura A.4), cujo espectro pode ser observado na Figura 7.32 (página 117). Novamente, o ângulo do filtro foi incrementado de 3° a cada medida, tendo 0° como ângulo inicial. O esquema da configuração experimental pode ser observado na Figura 7.33, reproduzida na página 128. A Figura 8.8 representa um subconjunto ($\alpha = 0, 12, 21, 33 \in 45^\circ$) das medidas realizadas.

Observa-se na Figura 8.8 que o vale de atenuação sofre um *blue shift* quando o ângulo de incidência aumenta, assim como aconteceu para o comprimento de onda de corte no experimento com o filtro modelo 69215 da Edmund Optics. A atenuação da faixa de comprimentos de onda transmitidos aumenta aproximadamente 0,97 dB apenas, no pior caso, isto é, comparando-se a transmissão a 45° com aquela a 0°. Este *blue shift* permite realizar um ajuste fino do comprimento de onda central do *notch*, tornando possível utilizar um mesmo filtro CLC para eliminar *crosstalk* no azul (480 nm) ou no verde (520 nm) por exemplo.

Uma nova amostra de filtro CLC foi adquirida posteriormente e será aqui tratada como amostra 09. Nesta amostra não foi utilizada poliimida para realizar o ancoramento. O filtro CLC 09 foi caracterizado utilizando o LED branco *Golden DRAGON Plus da OSRAM* (Figura A.4), variando-se o ângulo de incidência do feixe, conforme configuração experimental ilustrada na Figura 7.33 (reproduzida na página 128). Foram medidas as transmitâncias para os ângulos 0, 12, 21, 33 e 45°, assim como foi feito para o filtro CLC 01. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 8.9.

Comparando-se as curvas das Figura 8.8 e Figura 8.9, observa-se que o filtro CLC 09 apresenta *notches* mais profundos e com comprimentos de onda centrais ligeiramente deslocados em relação à amostra 01. Além disso, é possível notar que a atenuação dos comprimentos de onda transmitidos é um pouco menor na amostra 09, principalmente para o ângulo de 45°, no qual a transmissão passou de 80% para aproximadamente 90%. A Tabela 8.3 resume os valores de atenuação para os vales de ambas as amostras de acordo com o ângulo.



Figura 8.8: Variação do comprimento de onda do *notch* para o filtro CLC 01 de acordo com o ângulo de incidência.



Figura 8.9: Variação do comprimento de onda do *notch* para o filtro CLC 09 de acordo com o ângulo de incidência.

Ângulo (°)	Atenuação Amostra 01 (dB)	Atenuação Amostra 09 (dB)
0	8,2	12,3
12	7,4	10,5
21	7,0	8,9
33	5,9	9,3
45	7,3	9,1

Tabela 8.3: Profundidade do notch (em dB) das duas amostras de filtro CLC, de acordo com o ângulo de incidência.

Acredita-se que essa melhoria na performance tenha ocorrido devido à substituição da poliimida por outra substância, cujas características ópticas são mais adequadas para esta aplicação.

No Capítulo 9 a seguir, serão apresentados experimentos nos quais se comparam as eficiências de três dispositivos quanto à multiplexação: acoplador óptico 2x1, filtro CLC 01 e filtro modelo 69215.

Resumo dos experimentos do capítulo e seus resultados:

Foram realizados experimentos de caracterização dos filtros CLC, a fim de investigar seu uso operando como filtro *notch* e como filtro dicroico. A utilização do filtro CLC como filtro dicroico visa substituir o filtro modelo 69215 da Edmund Optics como núcleo do cubo MUX/DEMUX WDM proposto; e como filtro *notch* visa a eliminação de um possível *crosstalk* em um enlace de comunicação utilizando POFs.

Os experimentos de caracterização dos filtros de CLC permitiram concluir que o filtro CLC 01 é o que apresenta melhor desempenho para operar como filtro *notch* e, em consequência, tomou-se como verdade que ele também apresenta o melhor desempenho para operar como filtro dicroico. Este filtro é capaz de bloquear eficientemente um canal verde centrado em 521 nm quando o feixe luminoso incide a perpendicularmente sobre o filtro (operação como filtro *notch*), e também é capaz de separar os canais azul e vermelho, quando o feixe incide a 45° sobre o filtro (operação como filtro dicroico). Além disso, a análise dos espectros dos filtros CLC 04 e 09 permite afirmar que o comprimento de onda central e a intensidade do *notch* do filtro de CLC podem ser modificados durante o processo de fabricação.

9. COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA MULTIPLEXAÇÃO REALIZADA POR ACOPLADOR E FILTROS ÓPTICOS

9.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos experimentos que visam comparar o desempenho da multiplexação realizada utilizando o acoplador 2x1 modelo LIP101ES7 (Figura A.17), o filtro modelo 69215 (Figura 7.19 – página 107) e a amostra 01 dos filtros CLC (Figura 6.10b – página 89). Os resultados destes experimentos serão apresentados e discutidos.

9.2. EXPERIMENTOS COMPARATIVOS

Com relação aos dispositivos utilizados, nenhum novo elemento foi introduzido na realização dos experimentos desta seção.

Sabe-se que o filtro modelo 69215 da Edmund Optics transmite de forma eficiente o azul e reflete muito bem o vermelho (Figura 7.18b – página 106), conforme visto no Capítulo 7, além disso, a amostra 01 do filtro CLC transmite o vermelho, o laranja e o verde, e reflete o azul, quando o feixe luminoso incide a 45° (Figura 8.8 – página 136), conforme visto no Capítulo 8. Cada um destes dispositivos apresenta uma característica de transmissão diferente, de modo que o formato do espectro de saída também será diferente. Os comprimentos de onda das fontes luminosas foram, então, escolhidos de acordo com o espectro de transmissão de cada dispositivo, de forma que houvesse um conjunto de comprimentos de onda em comum entre eles. Como o acoplador 2x1 modelo LIP101ES7 (Figura A.17) é capaz de multiplexar quaisquer comprimentos de onda do visível, foram escolhidos o azul e o vermelho como fontes luminosas para comparar a eficiência da multiplexação destes dispositivos.

Foram utilizados como fonte luminosa dois *spotlight* LEDs da DieMount, emitindo nominalmente em 460 e 650 nm. Seus espectros estão ilustrados simultaneamente na Figura 9.1. Os comprimentos de onda centrais reais dos exemplares utilizados são aproximadamente 476 nm e 645 nm.

Para que as medidas sejam bem sucedidas, as mesmas condições devem ser mantidas em cada uma delas, tais como: alinhamento, buscando a obtenção da maior intensidade luminosa; número de emendas e comprimento da fibra, para que a atenuação devido a estes parâmetros seja constante; e distâncias, referindo-se às distâncias entre a fibra coletora e a fonte luminosa, que deve ser mantida constante, para que a atenuação devido a este parâmetro não seja modificada. Os dois esquemas de configuração experimental, um para multiplexação utilizando os filtros ópticos e outro para o acoplador óptico, estão ilustrados na Figura 9.2.



Figura 9.1: Espectros dos spotlight LEDs da DieMount (650 e 460 nm nominal).



Figura 9.2: Esquema de configuração experimental para multiplexação utilizando (a) filtros ópticos e (b) acoplador óptico 2x1.

No caso do acoplador óptico, os feixes luminosos provenientes dos *spotlight* LEDs da DieMount são alinhados de forma a incidirem, cada um, sobre uma das duas entradas do acoplador; então são combinados em um único feixe que segue para a saída do acoplador, conectada ao espectrômetro CCD, conforme Figura 9.2b. É válido citar que este componente apresenta uma perda de no mínimo 3 dB devido à sua forma de construção. A Figura 9.3 mostra uma fotografia da configuração experimental utilizada.

Em seguida foi utilizado o filtro CLC 01 para realizar a mesma multiplexação. Agora os feixes luminosos provenientes dos *spotlight* LEDs incidem a 45° sobre o filtro e são transmitidos (vermelho) ou refletidos (azul) e, em seguida, capturados por uma POF que leva o feixe multiplexado ao espectrômetro CCD para análise em computador, conforme esquema ilustrado na Figura 9.2a. A fotografia desta configuração em bancada pode ser vista na Figura 9.4.



Figura 9.3: Configuração experimental para realizar a multiplexação de dois sinais luminosos utilizando o acoplador modelo LIP101ES7 da Microparts.



Figura 9.4: Configuração experimental para realizar a multiplexação de dois sinais luminosos utilizando o filtro CLC 01.

O experimento seguinte utilizou o filtro modelo 69215 da Edmund Optics para multiplexar os dois sinais. O esquema da configuração experimental está ilustrado na Figura 9.2a. Agora o feixe vermelho deve ser refletido e o azul deve ser transmitido. Na Figura 9.5 observa-se a configuração em bancada, que é semelhante à da Figura 9.4, substituindo-se o filtro CLC 01 pelo filtro modelo 69215.



Figura 9.5: Configuração experimental para realizar a multiplexação de dois sinais luminosos utilizando o filtro modelo 69215 da Edmund Optics.

Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 9.6. Nela existem três curvas: a de cor preta (\blacktriangle) refere-se ao acoplador, a de cor azul (\bullet) ao filtro CLC 01 e a de cor vermelha (+) ao filtro modelo 69215.

Nenhum dos dispositivos provoca deformação no espectro, mas sob as mesmas condições nota-se uma diferença acentuada na eficiência de multiplexação de cada um deles. A componente azul (476 nm) é mais atenuada quando se utiliza o acoplador, seguido pelo filtro CLC 01, sendo o filtro modelo 69215 da Edmund Optics o mais eficiente. É válido salientar que para este comprimento de onda, 476 nm, o ângulo de 45° para o filtro CLC 01 não é o ideal para obter a melhor reflexão da componente. Este ângulo deveria estar próximo de 33°, que reflete de forma eficiente componentes centradas em 480 nm, conforme ilustra a Figura 8.8 (página 136). A componente vermelha (645 nm) também é bastante atenuada pelo acoplador, contudo o filtro CLC 01 e o 69215 apresentam desempenho bastante próximo um do outro.

Tomando como referência o espectro do filtro modelo 69215 (curva vermelha), para a componente azul o acoplador (curva preta) atenua o sinal em aproximadamente 10,4 dB, e o filtro CLC 01 (curva azul) em aproximadamente 5,6 dB. Para a componente vermelha o

acoplador atenua o sinal em aproximadamente 10, 8 dB e o filtro CLC 01 em aproximadamente 0,75 dB apenas. Dessa forma, caso seja realizada alguma modificação na construção do filtro CLC para que o azul tenha uma reflexão mais acentuada, é completamente plausível a substituição do filtro modelo 69215 da Edmund Optics pelo filtro CLC. Estes resultados estão resumidos na Tabela 9.1.



Figura 9.6: Espectro dos sinais multiplexados utilizando o acoplador da Microparts, o filtro CLC 01 e o filtro modelo 69215 da Edmund Optics.

	Atenuação		
Dispositivo	Componente centrada	Componente centrada	
	no vermelho	no azul	
Acoplador	10,8 dB	10,4 dB	
Filtro CLC 01	0,75 dB	5,6 dB	

Tabela 9.1: Atenuação do sinal multiplexado tomando como referência o espectro dofiltro modelo 69215 da Edmund Optics.

No Capítulo 10 a seguir, serão apresentadas a construção do protótipo do MUX/DEMUX WDM de dois canais e sua caracterização.

Resumo dos experimentos do capítulo e seus resultados:

Foram realizados experimentos de comparação quanto ao desempenho na multiplexação utilizando um acoplador óptico 2x1, o filtro CLC 01 e o filtro modelo 69215 da Edmund Optics.

Estes experimentos comparativos permitem concluir que o filtro modelo 69215 é superior aos outros dois dispositivos, porém o filtro CLC 01 se equipara ao filtro modelo 69215 com relação ao canal vermelho. Quanto ao canal azul, nem o acoplador, nem o filtro CLC 01 apresentam bom desempenho. Porém, o baixo desempenho do filtro CLC 01 pode ser melhorado modificando-se a estrutura do filtro durante a fabricação, de forma que o canal azul possa ser refletido com maior intensidade, tornando- possível a substituição do filtro modelo 69215 pelo filtro CLC.

10. CARACTERIZAÇÃO DO PROTÓTIPO DO MUX/DEMUX DE 2 CANAIS

10.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o primeiro protótipo do cubo MUX/DEMUX WDM proposto (Seção 7.2). Em seguida, serão descritos os experimentos de caracterização deste dispositivo, apresentando e discutindo os resultados obtidos.

Com relação aos dispositivos utilizados, um novo elemento foi introduzido na realização dos experimentos a seguir: o osciloscópio DSO-X 2012A da Agilent Technologies, ilustrado na Figura 10.1, que possui uma banda passante de 100 MHz e é capaz de realizar 2 "Giga amostras" por segundo.



Figura 10.1: Osciloscópio DSO-X 2012A da Agilent Technologies.

10.2. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O cubo MUX/DEMUX proposto na Seção 7.2 foi construído utilizando o filtro modelo 69215 da Edmund Optics como núcleo, devido ao seu desempenho superior obtido nos experimentos realizados. Os segmentos de POFs foram acoplados aos conectores FC, cada um com uma lente colimadora 011-POF980 da WT&T em sua extremidade. O material do cubo base, *nylon*, foi mantido, contudo, foram necessárias algumas modificações no modelo original para que fosse possível construir a peça com os equipamentos disponíveis na oficina mecânica, mantendo o resultado final semelhante. Essas mudanças foram necessárias devido à pouca praticidade de realizar a fenda central da peça onde seria repousado o filtro, conforme ilustra

Figura 7.3, repetida a seguir, por ela ser profunda (25 mm) em comparação com sua espessura (1 mm), tornando difícil a tarefa de encontrar uma ferramenta e um equipamento que pudessem realizar tal operação na oficina mecânica da UFF. Assim, em vez de realizar a fenda conforme ilustrado nesta figura, foi construída uma fenda maior, indo de uma extremidade à outra da diagonal do cubo, mantendo a mesma profundidade de 25 mm. Este primeiro protótipo pode ser observado na Figura 10.2.



Figura 7.3: Modelagem do cubo MUX/DEMUX: (a) vistas frontal e (b) 3D, (c) modelo 3D, (d) vista superior e medidas do conjunto conector FC + lente.



Figura 10.2: Primeiro protótipo do cubo WDM de 2 canais - cubo primitivo.

O cubo primitivo foi, então, pintado de preto, para diminuir a interferência de luz externa incidente. Em seguida os conectores FC com as lentes acopladas foram encaixados no

cubo. Durante esta montagem houve um problema com a fenda diagonal, que aparentemente teve sua espessura reduzida. Acredita-se que isto tenha sido ocasionado devido à profundidade da fenda, que ocupa pouco mais de 2/3 da profundidade total do cubo, deixando as suas duas metades sem o suporte adequado, o que levou a um leve colapso das paredes laterais. Este problema foi contornado utilizando-se dois espaçadores de aproximadamente 1,2 mm cada, que foram encaixados nas extremidades da fenda diagonal, permitindo a entrada do filtro de 1 mm de espessura. O resultado final deste primeiro protótipo está ilustrado na Figura 10.3.



Figura 10.3: Primeiro protótipo do cubo WDM de dois canais.

10.3. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a finalização da montagem do protótipo os cubos foram caracterizados e testados. A primeira etapa da caracterização consistiu em verificar o comportamento da transmitância de ambos os cubos. Na segunda etapa foi realizado um experimento para testar o desempenho dos cubos em um enlace bidirecional, simulando um ambiente ligeiramente mais real. Estes experimentos serão descritos e seus resultados serão apresentados e discutidos nas Subseções 10.3.1 e 10.3.2, respectivamente.

10.3.1. Caracterização Espectral: Cubos WDM.

Para caracterizar os dois protótipos construídos utilizou-se como fonte luminosa o LED branco *Golden DRAGON Plus da OSRAM*, cujo espectro pode ser observado na Figura 7.32 (página 117). Com o auxílio do espectrômetro CCD e de um computador, foram medidos os espectros transmitido e refletido para cada cubo. O esquema da configuração experimental pode ser observado na Figura 10.4 e os resultados obtidos, na Figura 10.5. Salienta-se que as medidas de reflexão e de transmissão não foram realizadas simultaneamente.



Figura 10.4: Configuração experimental para medidas de transmissão e reflexão do cubo MUX/DEMUX WDM.

O cubo 1 apresenta comprimento de onda de corte centrado em 545 nm e tanto a reflexão como a transmissão são bastante eficientes, sendo ambas aproximadamente iguais a 87%, como pode ser observado na Figura 10.5a. O cubo 2, por sua vez, possui comprimento de onda de corte centrado em 551 nm e uma eficiência de aproximadamente 92% na transmissão e 38% na reflexão, conforme Figura 10.5b. Essa deficiência na reflexão provoca uma atenuação de aproximadamente 3,6 dB no sinal refletido, tomando como referência a refletância do cubo 1 (Figura 10.5c). Os filtros apresentam características de reflexão bastante semelhantes, conforme Figura 7.34, repetida a seguir, portanto, supõe-se que essa parca eficiência na reflexão tenha ocorrido devido a falhas na construção do cubo 2, que provocaram um grande desalinhamento entre a entrada e a saída do feixe refletido. Nestas figuras observa-se também que existe uma elevação na faixa espectral pertencente ao turquesa (entre 480nm e 520 nm), indicando que estes comprimentos de onda não são completamente refletidos. Além disso, comparando-se o conjunto de Figura 10.5 e a Figura 7.34, nota-se que o comprimento de onda de corte foi modificado, o que se deve à imprecisão do ângulo do filtro no interior do cubo.



Figura 10.5: Espectros de transmitância e refletância dos cubos WDM: (a) cubo 1, (b) cubo 2 e (c) comparação entre as refletâncias dos



Figura 7.34: Refletância das duas amostras de filtros modelo 69215.

10.3.2. Caracterização Temporal: Enlace Bidirecional Utilizando os Cubos WDM

O teste do enlace bidirecional realizado na Subseção 7.3.3 B) foi repetido utilizando, agora, os protótipos dos cubos WDM em substituição aos filtros modelo 69215 da Edmund Optics. A configuração experimental utilizada foi a mesma da Figura 7.36b (repetida a seguir), porém na ponta de cada fibra existe uma microlente acoplada.



Figura 7.36: Enlace bidirecional: (a)configuração experimental em bancada e (b) esquema do experimento.

Neste experimento, o sinal vermelho (LED Diemount 650 nm) entra pela fibra V2 do cubo 2, é refletido no filtro, sai pela fibra A+V comum aos dois cubos, entra no cubo 1 ainda pela fibra A+V, é refletido novamente pelo filtro e sai pela fibra V1, onde é recolhido e levado ao fotodetector conectado ao osciloscópio. Para o sinal azul (LED Diemount 460 nm) o filtro é praticamente transparente na transmissão, então este sinal entra no cubo 1 pela fibra A1, passa pelo filtro, sai pela fibra A+V, entra no cubo 2 ainda pela fibra A+V, passa pelo filtro novamente e segue para o fotodetector pela fibra A2. O esquema adaptado da Figura 7.36b, omitindo as fontes de alimentação, para melhor entendimento do processo pode ser visto na Figura 10.6, e a montagem experimental em bancada pode ser observada na Figura 10.7. Os parâmetros utilizados para modular os sinais estão mostrados na Tabela 10.1.



Figura 10.6: Esquema de configuração experimental utilizada no enlace bidirecional com os cubos WDM.



Figura 10.7: Montagem experimental do enlace bidirecional utilizando os cubos WDM.

Parâmetro	Sinal Azul	Sinal Vermelho
Tensão (V)	3,02	2,1
Tensão pico a pico (Vpp)	2	2
Frequência (MHz)	3	1
Carga na entrada do osciloscópio (Ω)	50	0
Tipo de onda	Quadrada	Senoidal

Tabela 10.1: Parâmetros de modulação dos sinais azul e vermelho utilizados no enlace bidirecional com os cubos WDM.

As medidas foram repetidas variando-se os comprimentos de fibra: 2,6 metros com uma emenda (Figura 10.8a), correspondendo apenas ao comprimento dos *pigtails* de POF (A, V e A+V de cada cubo); 44,6 m com 2 emendas (Figura 10.8b); 50,6 m com 3 emendas (Figura 10.8c); e 64,6 m com 3 emendas (Figura 10.8d). Estas emendas foram feitas apenas na fibra compartilhada por ambos os sinais (A+V). Os comprimentos dos enlaces neste experimento não aumentaram gradativamente, com um passo Δ L pequeno, porque o objetivo não é mostrar a atenuação gradativa sofrida pelo sinal com o aumento do enlace, uma vez que isto pode ser calculado matematicamente a partir das características deste enlace, mas sim demonstrar apenas que os cubos WDM construídos podem ser utilizados em enlaces com algumas dezenas de metros e não apenas para montagens experimentais em ambiente de laboratório.

Observando o conjunto de imagens na Figura 10.8, principalmente a Figura 10.8a, aparentemente, os sinais pouco influenciam um no outro (interferência não visível no domínio do tempo), de forma que, desde que sejam estabelecidos instantes de amostragem bem definidos, os sinais serão perfeitamente detectáveis na recepção. Verifica-se também a partir da análise das Figura 10.8b e Figura 10.8c que o sinal senoidal vermelho degrada muito mais intensamente do que o sinal de onda quadrada azul. Na Figura 10.8c o sinal azul ainda pode ser detectado na recepção, embora com elevada taxa de erro, mas o vermelho se torna apenas ruído, resultando em valores completamente errados. Essa maior degradação ocorre, possivelmente, devido à maior atenuação do comprimento de onda do vermelho, quando comparado com o do azul, conforme ilustrado pela curva de atenuação característica da Figura 2.12 (página 22). O enlace de comunicação deve apresentar, então, um comprimento máximo, no qual ainda seja possível detectar os sinais com uma taxa de erro previamente especificada. Este comprimento máximo não será determinado neste trabalho, mas é razoável assumir que ele é menor do que 64 m, utilizando 3 emendas, uma vez que, com estes parâmetros, o sinal recebido, representado na Figura 10.8d, é extremamente ruidoso, não sendo possível detectar a informação carregada por ele.



Figura 10.8: Sinais azul e vermelho no domínio do tempo: enlaces com comprimento L igual a (a) 2,6 m, (b) 44,6 m, (c) 50,6 m e (d) 64,6 m.

Para verificar se existe de fato interferência entre os canais azul e vermelho no enlace bidirecional, foram realizadas medidas no domínio da frequência utilizando o osciloscópio DSO-X 2012A da Agilent Technologies (Figura 10.1). A mesma configuração experimental ilustrada na Figura 10.6 foi utilizada.

Neste experimento foram calculadas as transformadas rápidas de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) utilizando primeiramente o canal 1 como fonte e em seguida o canal 2, dessa forma, foi possível observar a interferência do sinal azul no sinal vermelho e vice-versa. A FFT foi calculada para um intervalo de 500 MHz e os sinais configurados conforme os parâmetros da Tabela 10.2.

Parâmetro	Sinal Azul	Sinal Vermelho	
Tensão (V)	3,22	2,1	
Tensão pico a pico (Vpp)	1	1	
Frequência (MHz)	1	2	
Carga na entrada	50	0	
do osciloscópio (Ω)	50	0	
Tipo de onda	Quadrada	Senoidal	
Canal	2	1	

Tabela 10.2: Parâmetros de modulação dos sinais azul e vermelho utilizados no enlace bidirecional com os cubos WDM.

Embora tenha sido utilizado um intervalo de 500 MHz, os resultados mostram apenas um intervalo menor, de 30 MHZ, pois o espectro de maior interesse se encontra na faixa de 0 a 15 MHz, o restante da banda ilustra basicamente o espectro do ruído. Utilizando o canal 1 como fonte, a FFT é calculada a partir do sinal obtido neste canal, isto é, a FFT é calculada, teoricamente, apenas sobre o sinal Vermelho. Analogamente, tomando o canal 2 como fonte, calcula-se a FFT sobre o sinal Azul.

Utilizando o canal 1 como fonte obteve-se o resultado ilustrado na Figura 10.9. A curva em preto representa a FFT no canal 1 quando ambos os sinais estão desligados, isto é, representa a FFT dos ruídos presentes no enlace, provenientes dos dispositivos e do meio. Mantendo-se apenas o sinal vermelho ligado obtém-se a curva em vermelho, que possui uma raia acentuada centrada em 2 MHz referente à frequência de operação utilizada, e ligando-se apenas o sinal azul obtém-se a curva em verde, que possui diversas raias em diferentes frequências, sendo a raia principal centrada na frequência de operação do sinal azul. A observação do espectro do sinal azul, tendo o canal 1 (vermelho) como referência, indica que o sinal azul está interferindo no sinal vermelho. Deve-se salientar que a frequência da senóide e da onda quadrada utilizadas para medir essas FFTs são diferentes das mostradas na Tabela 10.1, contudo, a mudança na frequência da senóide de 2 para 3 MHz, apenas provocaria uma translação da raia centrada em 2 MHz para 3 MHz, e para a onda quadrada, surgiriam novas raias em outras frequências. De uma forma ou de outra, a conclusão seria a mesma, o sinal azul de onda quadrada interfere no sinal vermelho senoidal.



Figura 10.9: FFT do enlace bidirecional, utilizando como fonte o canal 1 – interferência do sinal azul no vermelho.

Tomando agora o canal 2 como fonte, obtém-se o resultado ilustrado na Figura 10.10. O espectro do sinal azul é representado novamente pela curva verde, que possui raias mais bem definidas agora. Observa-se neste caso que a raia centrada em 2 MHz do sinal vermelho, representado pela curva vermelha, apresenta agora uma amplitude bem menor do que na Figura 10.9, indicando que o sinal vermelho também interfere no sinal azul, porém, com pequena intensidade. Novamente, modificando-se as frequências a conclusão seria a mesma.

Assim, conclui-se a partir da análise dos resultados no domínio do tempo e da frequência, que apesar de existir de fato interferência entre os canais, verificada pela análise das FFTs, a influência dessa interferência nos resultados temporais é tão pequena que seria razoável afirmar que os sinais serão detectados e interpretados de forma correta pelo receptor. Assim, estes cubos podem ser utilizados em enlaces WDM bidirecionais com dois canais em

HANs ópticas baseadas em POFs, a fim de melhorar o aproveitamento da banda passante da fibra e elevar as taxas de transmissão dos sinais.



Figura 10.10: FFT do enlace bidirecional, utilizando como fonte o canal 2 – interferência do sinal vermelho no azul.

11. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esta Dissertação compreende uma parte do projeto **EnerGiga-I**, cuja proposta é implantar uma rede óptica no interior das residências, aproveitando a insfraestrutura elétrica previamente instalada, disponibilizando sinais ópticos a partir das tomadas domésticas, através do uso de conversores de mídia. Este projeto propõe também a possível integração de *transponders* dotados de antenas para compor redes sem fio internas, agregando mobilidade à HAN óptica.

A implementação de uma HAN óptica requer a utilização de alguns dispositivos, como conversores de mídia, *gateways* inteligentes, atenuadores, conectores e filtros ópticos diversos. É interessante também a utilização de amplificadores ópticos, para estender os enlaces; eliminadores de interferência cruzada, para melhorar a qualidade do enlace; e multiplexadores, para aumentar a capacidade do canal, permitindo taxas de transmissão mais elevadas. Esta Dissertação propõe o desenvolvimento e o estudo de alguns destes dispositivos, importantes para as HANs ópticas, contribuindo para um futuro desdobramento pleno do projeto **EnerGiga-I**.

Primeiramente foi investigado o uso de filtros dicroicos como dispositivos WDM, baseando-se na técnica de multiplexação WDM por filtro de interferência. O filtro modelo 52530 da Edmund Optics foi escolhido dentre os filtros ópticos <u>disponíveis</u> em laboratório, e foi caracterizado espectralmente, concluindo-se, a partir dos resultados obtidos, que este filtro não é adequado para separar eficientemente nenhum conjunto de canais presentes em uma POF de PMMA.

Após análise das características espectrais de diversos outros filtros disponíveis comercialmente, o modelo 69215 também da Edmund Optics, foi escolhido para substituir o filtro modelo 52530. Este novo filtro foi caracterizado espectralmente e no domínio do tempo, chegando-se à conclusão de que ele é adequado para multiplexar ou demultiplexar os canais azul e vermelho, considerando-se as fontes luminosas disponíveis em laboratório. Contudo, ele é capaz de separar ou juntar combinações que envolvam, além do vermelho e do azul, os canais laranja e verde, desde que estes dois apresentem uma pequena largura espectral. Não foi detectada interferência entre os canais azul e vermelho no domínio do tempo. Este filtro foi escolhido, então, para ser utilizado como núcleo do dispositivo WDM proposto.

Além dos filtros comerciais, foram investigados filtros baseados na tecnologia de cristais líquidos, para operação como filtro dicroico e filtro *notch*. Estes filtros LC foram fabricados na Universidade Télécom Bretagne, em Brest, França. Inicialmente eles foram projetados para funcionarem apenas como filtros *notch*, mas revelaram-se capazes de operar, também, como filtro dicroico, separando os canais azul e vermelho. Contudo, é necessário modificar suas características ópticas para que a reflexão do canal azul possa chegar próximo de 100%.

O dispositivo efetivamente desenvolvido neste trabalho foi um MUX/DEMUX WDM operando com dois canais do espectro visível, baseado em filtros ópticos comerciais, com conexão para POFs de PMMA de 1 mm de diâmetro. O material utilizado na construção deste protótipo foi o *nylon*, usinado em formato cúbico com dimensões 40x40x40 mm, possuindo furos em três faces para encaixe dos conectores FC com lentes acopladas e uma fenda central para encaixe do filtro modelo 69215. Este dispositivo foi caracterizado espectralmente (comprimento de onda), para verificar sua curva de transmissão, e nos domínios do tempo e da frequência, para investigar possíveis interferências entre os sinais. As caracterizações nos domínios do tempo e da frequência foram feitas utilizando um enlace bidirecional.

A análise dos resultados revelou que um dos protótipos apresentava grande deficiência na reflexão, provocando perdas maiores que 3 dB, devido a um desalinhamento dos feixes luminosos, originado da construção da peça. Além disso, a partir da análise temporal e no domínio da frequência, verificou-se que, apesar de o sinal recebido no domínio do tempo não apresentar modificações devido à influência de um tipo de onda no outro, na frequência existe interferência mais ou menos acentuada entre os canais, dependendo do canal analisado.

Um segundo protótipo, ainda não descrito neste trabalho, foi construído utilizando latão como material. Este protótipo ainda encontra-se em testes e seu objetivo consiste em eliminar as deficiências do protótipo anterior. Ele permite o alinhamento manual dos conectores e o filtro se encontra completamente protegido no interior do cubo. A possibilidade de alinhar os feixes luminosos permitiu melhorar as curvas de transmissão e reflexão deste dispositivo. No entanto, sua grande desvantagem é o seu peso, aproximadamente 1,6 kg para cada cubo, que se deve à elevada densidade do material utilizado (8,5 g/cm³).

Outros aprimoramentos devem ser realizados até que seja alcançada uma versão final do dispositivo, possibilitando sua comercialização. Supondo que o design seja mantido, outro
material deve ser utilizado para fabricação, algo que apresente menor densidade, mas que possua certa rigidez. Desconsiderando seu valor monetário, este material pode ser alumínio $(2,7 \text{ g/cm}^3)$ ou acrílico (PMMA – 1,18 g/cm³), por exemplo, que reduziriam o peso do dispositivo para aproximadamente 500 e 220 g, respectivamente. É interessante também facilitar a inserção e a retirada/troca do filtro óptico, o que pode ser feito projetando-se uma gaveta móvel no interior da peça, na qual possa ser encaixado o filtro. Os conectores FC são necessários para manter a estabilidade mecânica das POFs, fixando-as ao dispositivo, mas as lentes colimadoras utilizadas podem ser dispensadas se forem substituídas por lentes préfabricadas na extremidade de cada fibra, sendo estas lentes otimizadas para operação com a distância entre as extremidades das fibras estabelecida pelas dimensões do dispositivo.

O filtro utilizado apresenta grandes dimensões para facilitar as montagens optomecâncias, que são realizadas manualmente, contudo, em um passo futuro, este filtro pode ser substituído por outro de dimensões menores, permitindo a redução do tamanho total do dispositivo, que varia em função do tamanho do filtro e das lentes utilizadas. Além disso, os filtros LC podem ser projetados novamente visando a operação como filtro dicroico, para substituir o filtro comercial utilizado.

Além da caracterização nos domínios do tempo, da frequência e do comprimento de onda, é necessário realizar também experimentos para 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 BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GOOGLE IMAGENS. Disponível em: https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=wi. Acesso em 2012/2013.
- [2] ZIEMMAN, O.; KRAUSER, J.; ZAMZOW, P. E.; DAUM, W. POF Handbook: Optical short range transmission systems. 2^a Ed. Berlim: Springer, 2008.
- [3] DOBROWOLSKI, J. A. Optical properties of films and coatings. In: BASS, M. et al. (Eds.). *Handbook of optics:* Fundamentals, techniques and design. 2^a Ed. Vol. 1. Estados Unidos: McGraw-Hill Inc., 1995. p. 42.3-42.130.
- [4] OLIVEIRA, A. S. de. Estudo e caracterização de fibras ópticas plásticas para aplicações em telecomunicações. 2004. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [5] DUTTON, J. R. Understanding optical communications. IBM Corporation, 1998.
- [6] ZUBIA, J.; ARRUE, J. Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications. *Optical Fiber Technology*, p. 101-140, Abril, 2001.
- [7] PEREIRA, R. J. G. Fibras ópticas e WDM. Disponível em: http://www.gta.ufrj.br/grad/ 08_1/wdm1/index.html. Acesso em: jan. 2013.
- [8] RIBEIRO, R. M. Optoeletrônica e fotônica: Fibras ópticas poliméricas Capítulo 1. Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Notas de Aula. Niterói, 2011.
- [9] WEGLEITNER, M. Verizon FTTP & FiOS: Transforming the access network. Verizon, 2008.
- [10] LEONI FIBER OPTICS. *Fiber optics:* Light switching, light transportation, light distribution. Catálogo Geral.
- [11] BROWN, T. G. Optical fibers and fiber-optic communications. In: BASS, M. et al. (Eds.). *Handbook of optics:* Devices, measurements and properties. 2^a Ed. Vol. 2. Estados Unidos: McGraw-Hill Inc., 1995. p. 10.1-10.50.
- [12] RAGHAVENDRA, M.; PRASAD, P. V. A novel approach for optimized dispersion in optical fiber communication. *IJRRAS*, p. 177-182, ago. 2010.

- [13] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Pré-visualização IEC 60793-2-40 Ed. 3.0: Optical fibres – Part 2-40: Product specifications – Sectional specification for category A4 multimode fibres. 2009.
- [14] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. *ITU-T G.694.1*: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. 2012.
- [15] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. *ITU-T G.694.2*: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. 2003.
- [16] CIANET. Tecnologia WDM. Disponível em: http://www.cianet.ind.br/pt/produtos/ tecnologias/tecnologia-wdm/. Acesso em: jan. 2013.
- [17] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. *ITU-T G.671*: Transmission characteristics of optical components and subsystems. 2012.
- [18] CISCO SYSTEMS. Introduction to DWDM technology. California, 2001.
- [19] MINOLI, D. Telecommunications technology handbook. 2ª Ed. Artech House, 2003.
- [20] FOROUZAN B. A. Comunicação de dados e redes de computadores. Tradução da 4ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008, p. 1134.
- [21] 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*, p. 1257 1262, set. 2008.
- [22] KAGAMI, M. et al. Light-induced self-written optical waveguides. *IEICE Transactions* on *Electronics*, Vol. E90, No. 5, p. 1061-1070, mai. 2007.
- [23] JONCIC, M.; HAUPT, M.; FISCHER, U. H. P. Spectral grids for VIS WDM applications over SI-POF. 20th International Conference on Plastic Optical Fibers, p. 14-16, set. 2011.
- [24] REED, E. F. *Technology trends and insights:* Policy Consideration for Continued FTTH Investment and Innovation. Nashville, Tennesee, 2008.
- [25] HUGHES, R. FTTH: A MSO's perspective and experiences. *FTTH Conference & Expo*. Estados Unidos Nashville, Tennesee, set. 2008. Slides de Apresentação.

- [26] KREGEL, R.; SCHIAVINATO, R. Moving at the speed of light. *FTTH Conference & Expo*. Estados Unidos Nashville, Tennesee, set. 2008. Slides de Apresentação.
- [27] CTI/HKBN. Hong Kong broadband network limited. FTTH Conference & Expo. Estados Unidos - Nashville, Tennesee, set. 2008. Slides de Apresentação.
- [28] MCGUIRE, G. Enhanced cost solutions for buried fiber. *FTTH Conference & Expo*. Estados Unidos Nashville, Tennesee, set. 2008. Slides de Apresentação.
- [29] IDATE. FTTx 2012: Market & trends, facts & figures. *DigiWorld*. 2012. Disponível em: http://www.idate.fr/private/idate/UserFiles/File/telechargements_associes/pages/ FreeDownload/FTTx2012_WhitePaper_web.pdf. Acesso em: fev. 2013.
- [30] FTTH COUNCIL. FTTH Council Americas. Disponível em: http://www.ftthcouncil.org/. Acesso em: fev. 2013.
- [31] VISANI, D. et al. Towards converged broadband wired and wireless in-home optical networks. *15th International Conference on Optical Network Design and Modeling*, p. 1-6, fev. 2011.
- [32] CÁRDENAS, D. et al. 10 Mb/s Ethernet transmission over 425m of large core step index POF: a media converter prototype. *15th International Conference on Plastic Optical Fibers*, p. 46-50, set. 2006.
- [33] 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*, p. 342-347, set. 2006.
- [34] ZIEMMAN, O. et. al. Multi channel broadband data transmission over thick optical fibers. *15th International Conference on Plastic Optical Fibers*, p.359-366, set. 2006.
- [35] JUNGER, S.; TSCHEKALINSKIJ, W.; WEBER, N. Cable TV transmission over POF. *13th International Conference on Plastic Optical Fibers*, p. 35-39, set. 2004.
- [36] JUNGER, S. et al. Transmission of HDMI signals for HDTV applications using WDM and GI-POF. *15th International Conference on Plastic Optical Fibers*, p. 436-442, set. 2006.
- [37] GROSSKOPF, G. et al. Gigabit Ethernet transmission experiments at 60 GHz. 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, p. 27-34, set. 2004.

- [38] 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, p. 125-132, set. 2004.
- [39] BOUCHET, O. et al. Hybrid wireless optics (HWO): building the next-generation home network. *International Symposium on Communications Systems, Networks and Digital Signal Processing*, p. 283-287, jul. 2008.
- [40] KIM, H. Radio over fiber based network architecture. 2005. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Fakultät IV Eletrotechnik und Informatik, Technischen Universität, Berlim, 2005, p 21-41.
- [41] GUILLORY, J. et al. A 60 GHz wireless home area network with radio over fiber repeaters. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 229, No. 16, 15 ago. 2011.
- [42] RICHNER, T. 1st POF house in Switzerland. 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, p. 40-45, set. 2004.
- [43] NEWPORT THIN FILM LABORATORY INC. Optical coating: Thin film optical coating. 2005. Disponível em: http://www.newportlab.com/optical_coating.htm. Acesso em: jan. 2013.
- [44] CVI MELLES GRIOT. Optical coatings. Catálogo Material Properties.
- [45] EDMUND OPTICS INC. An introduction to optical coatings. Disponível em: http://www.edmundoptics.com/learning-and-support/technical/learning-center/ application-notes/optics/an-introduction-to-optical-coatings/?&viewall. Acesso em: jan. 2013.
- [46] EDMUND OPTICS INC. Edmund Optics. Disponível em: http://www.edmundoptics.com/. Acesso em: jan. 2013.
- [50] GRAY, G. W. Introduction and historical development. In: DEMUS, D. et al. (Eds.). *Handbook of liquid crystals:* Fundamentals. Vol. 1. Wiley-VCH Verlag GmbH., 1998, p. 1-16.
- [47] GRAY, G. W. Introduction and historical development. In: DEMUS, D. et al. (Eds.). *Handbook of liquid crystals:* Fundamentals. Vol. 1. Wiley-VCH Verlag GmbH., 1998, p. 1-16.

- [48] MOREIRA, M. F. Desenvolvimento e caracterização de um sistema laser de cristal líquido colestério acoplado à fibra óptica. 2004. 140 f. Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [49] PEREIRA, L. et al. Cristais liquidos. UFBA, jun. 2008. Disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAABRMUAB/cristais-liquidos. Acesso em: jan. 2013.
- [50] In: DEMUS, D. et al. (Eds.). *Handbook of liquid crystals*. 4 Vols. Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998.
- [51] WU, S.-T. Liquid crystals. In: BASS, M. et al. *Handbook of optics:* Devices, measurements and properties. 2^a Ed. Vol. 2. Estados Unidos: McGraw-Hill Inc., 1995, p. 14.1-14.26.
- [52] SATHAYE, K. Structuring of liquid crystals for optical technologies. 2012. 136 f. Tese (Doutorado) – Optique Départment, Télécom Bretagne, Brest, França, 2012.
- **[53]** SENYUK, B. Liquid crystals: A simple view on a complex matter. Disponível em: http://dept.kent.edu/spie/liquidcrystals/index.html. Acesso em: jan. 2013.
- [54] BECHTOLD, I. H. Cristais líquidos: Um sistema complexo de simples aplicação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 27, No. 3, p. 333-342, 2005.
- [55] NETO, A. M. F. *Os cristais líquidos*. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Notas de Aula. São Paulo.
- [56] BARRETT RESEARCH GROUP. Introduction to Liquid Crystals. Disponível em: http://barrett-group.mcgill.ca/tutorials/liquid_crystal/LC01.htm. Acesso em: jan. 2013.
- [57] CENTRO DE FÍSICA TEÓRICA E COMPUTACIONAL. Cristais líquidos: Um estado híbrido da matéria. Disponível em: http://cftc.cii.fc.ul.pt/PRISMA/capitulos/capitulo3/ modulo7/galeria1.htm. Acesso em: jan. 2013.
- [58] DUNMUR, D.; TORIYAMA, K. Physical properties of loquid crystals. In: DEMUS, D. et al. (Eds.). *Handbook of liquid crystals:* Fundamentals. Vol.1 . Wiley-VCH Verlag GmbH., 1998, p. 189-593.
- [59] ELY, F. et al. Cristais líquidos colestéricos: a quiralidade revela as suas cores. *Química Nova*, Vol. 230, No. 7, p. 1776-1779, 2007.

- [60] SHANKAR, N. K. et al. A 2x2 fiber optic switch using chiral liquid crystals. *IEEE Photonics Technology Letters,* Vol. 22, No. 2, p. 147-149, fev. 1990.
- [61] DIEMOUNT GMBH. DieMount. Disponível em: http://www.diemount.de/. Acesso em: 2012.
- [62] OSRAM GMBH. OSRAM. Disponível em: http://www.osram.com. Acesso em: 2012.
- [63] ROITHNER LASERTECHNIK GMBH. Roithner LaserTechnik. Disponível em: http://www.roithner-laser.com/. Acesso em: 2012.
- [64] WHITE, W. R. et al. Manufacture of perfluorinated plastic optical fibers. *Optical Fiber Communication Conference*, paper ThI1, fev. 2004.
- [65] SUAIDE, A.; TABACNIKS, M. *Física Experimental IV:* Birrefringência e Atividade Óptica. Universidade Federal de São Paulo, Notas de Aula. São Paulo, 2008.
- [66] KAHN, F. J. Cholesteric liquid crystals for optical applications. *Applied Physics Letters*, Vol. 218, No. 8, p. 231-233, mar. 1971.
- [67] OSIPOV, M. A. Theory of the liquid crystalline state: Molecular theories of liquid crystals. In: DEMUS, D. et al. (Eds.). *Handbook of liquid crystals:* Fundamentals. Vol. 1. Wiley-VCH Verlag GmbH., 1998, p. 40-71.

APÊNDICES

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

A.1. ELEMENTOS GERAIS

Como fontes luminosas simples foram utilizados POF-*coupled* LEDs e *spotlight* LEDs da DieMount, LED branco modelo LCW W5AM da OSRAM e LEDs padrão (domo 5 mm) ultrabrilhantes genéricos. Além destas, como fontes luminosas compostas foram utilizados um *dual* LED modelo LED470/660-04A da Laser Roithner e um conjunto de POF-*coupled* LEDs da DieMount.

O POF-*coupled* LED (Figura A.1) é um LED especial, fabricado pela DieMount, que apresenta uma elevada eficiência no acoplamento entre o LED e a POF, produzindo uma maior potência na outra extremidade da POF quando comparado com o LED padrão, para uma mesma corrente [61]. O processo desenvolvido pela empresa consiste em um acoplamento mecânico passivo de alta precisão (Figura A.2), cujo detalhamento pode ser encontrado em [61].



Figura A.1: POF-coupled LEDs da DieMount.



Figura A.2: Acoplamento do POF-coupled LED DieMount [2].

O *spotlight* LED da DieMount (Figura A.3) é composto por um chip semicondutor colocado no foco de um pequeno refletor parabólico, formado por um microrrefletor metálico estendido por um de plástico, de forma que este LED emita um feixe luminoso com um ângulo sólido pequeno, de aproximadamente 4° [61]. Estes LEDs emitem "luz fria", sem componentes espectrais na região do infravermelho [61]. Mais informações sobre este LED podem ser encontradas em [61].



Figura A.3: Spotlight LEDs da DieMount [61].

 O LED branco modelo LCW W5AM da OSRAM (Figura A.4), também chamado Golden DRAGON Plus, possui um pequeno domo de silicone sobre o chip semicondutor. É um LED de alta potência que suporta até 1 A de corrente e possui uma estabilidade de temperatura excelente [62]. Devido à incompatibilidade de acoplamento com a POF foi necessário o uso de um adaptador (Figura A.4).



Figura A.4: LED *Golden DRAGON Plus* da OSRAM (LCW W5AM): fotografia [62] e com adaptador.

O *dual* LED (Figura A.5a) modelo LED470/660-04 da Laser Roithner é um LED bicolor, possuindo, internamente, dois chips semicondutores colocados muito próximos um do outro [63]. Este LED apresenta aparência externa semelhante a dos LEDs padrão ultrabrilhantes, possuindo um domo transparente de 5 mm. Contudo, devido a

sua construção interna, apresenta três terminais externos, em vez de dois, sendo o terminal central comum aos dois chips semicondutores. Assim, é possível ativar apenas um dos chips por vez ou os dois chips simultaneamente, de forma que o LED pode emitir luz azul (470 nm – Figura A.5b), vermelha (650 nm – Figura A.5c), ou ambas ao mesmo tempo (Figura A.5d), dependendo de quais terminais estão ligados. Devido à incompatibilidade no acoplamento do LED com a POF, foi necessário utilizar um adaptador, conforme ilustrado na Figura A.5e.



Figura A.5: *Dual* LED modelo LED470/660-04 Laser Roithner: (a) fotografia [63], (b) emitindo apenas no vermelho, (c) emitindo apenas no azul, (d) emitindo simultaneamente no azul e no vermelho e (d) com o adaptador.

• A outra fonte composta foi montada por Beatriz Alencar Ribeiro, aluna de graduação em Engenharia de Telecomunicações (2013), e utiliza quatro POF-*coupled* LEDs da DieMount, vermelho (650 nm), laranja (590 nm), verde (520 nm) e azul (460 nm), multiplexados dois a dois utilizando miniacopladores 2x1, formando quatro canais, conforme ilustrado na Figura A.6. Estes LEDs foram ligados em paralelo, cada um com um potenciômetro em série para controlar a corrente que passa por eles. Este controle é necessário porque cada LED emite em um comprimento de onda diferente, sendo necessária uma corrente com intensidade diferente para estimulá-los. Além disso, são utilizados um regulador de tensão (que limita a tensão máxima em 5 V) e resistores para proteção dos LEDs contra alguma possível sobrecarga de corrente, uma vez que

estas fontes luminosas apresentam um limite superior de corrente suportada antes de queimarem.

Como fonte de alimentação para as fontes luminosas foram utilizadas duas fontes de tensão da ICEL, uma modelo PS-4100 e outra modelo PS-1500, ilustradas na Figura A.7.



Figura A.6: Fonte luminosa de 4 canais, composta por POF-coupled LEDs da DieMount.



Figura A.7: Fontes de Tensão ICEL modelos (a) PS-1500 e (b) PS-4100.

Um dispositivo de grande importância para os experimentos realizados neste trabalho é o espectrômetro CCD (*Charge-Coupled Device*) que permite a visualização das componentes espectrais dos sinais luminosos. Foi utilizado o espectrômetro modelo SP1-USB 2.0 da Thorlabs (Figura A.8a), operando no espectro visível (400-800 nm), que funciona em conjunto com um software que deve ser instalado em um computador. O espectrômetro pode funcionar utilizando um *pigtail* de sílica (padrão) ou, quando é necessário capturar mais luz, pode ser

utilizado um *pigtail* de POF. O software, SPLICCO (*SPectrometer and Line Camera COntrol*), apresenta uma interface gráfica de usuário (*Graphic User Interface*, GUI) que exibe o espectro capturado pelo espectrômetro em tempo real, permitindo armazenamento em forma de imagem ou tabela de dados para análise posterior, podendo ser utilizado, ainda, para adquirir medidas instantâneas de absorbância e transmitância. A GUI deste software pode ser observada na imagem ilustrada na Figura A.8b, retirada do manual de operação.



Figura A.8: (a) Espectrômetro CCD modelo SP1-USB 2.0 da Thorlabs e (b) captura de tela do software SPLICCO.

No domínio do tempo as medidas foram observadas com o auxílio de dois fotodetectores e um osciloscópio. O osciloscópio utilizado foi o modelo *WaveJet* 352A da LeCroy (Figura A.9), que possui 500 MHz de largura de banda e uma taxa de amostragem de 2 GS/s, permitindo uma visualização detalhada da forma de onda. Foram utilizados um fotodetector modelo PDA10A da Thorlabs (Figura A.10a), que opera na faixa de 200 a 1100 nm com 150 MHz de largura de banda, e um fotodiodo modelo S6468-02 da Hamamatsu (Figura A.10b), que opera na faixa de 320 a 1000 nm. Este fotodiodo foi montado com base no circuito da Figura A.11a, resultando no equipamento ilustrado nas Figura A.11b e Figura A.11c.



Figura A.9: Osciloscópio modelo WaveJet 352A da LeCroy



Figura A.10: (a) Fotodetector PDA10A da Thorlabs e (b) Fotodiodo S6468-02 da Hamamatsu.

Para modular o sinal a ser amplificado foram utilizados dois geradores de funções modelo AFG3251 da Tektronix (Figura A.12a). Para conectar os geradores de funções às fontes luminosas foram necessários dois *Bias-Tee* modelo Zx85-12G+ da Mini-Circuits (Figura A.12b), que possui ampla largura de banda (0,2 a 12.000 MHz) e baixa perda por inserção (0,6 dB), e dois adaptadores elétricos simples. Cada fonte luminosa foi conectada ao adaptador, que foi conectado ao *Bias-Tee*, que, por sua vez, foi conectado ao gerador de função e a uma fonte de tensão contínua da ICEL. Os adaptadores elétricos foram construídos de formas distintas: o primeiro (Figura A.13), mais robusto, utilizou quatro seções retangulares metálicas, um conector BNC e um conector VGA. As seções metálicas foram unidas umas às

outras com o auxílio de parafusos, formando uma caixa metálica, e os conectores foram inseridos na caixa, sendo o encaixe reforçado com cola. A ligação entre os dois conectores foi feita unindo-se o conector BNC a dois pinos do conector VGA, conforme ilustrado na Figura A.14. O segundo adaptador, mais simples, foi construído utilizando uma placa de circuito impresso, na qual foi feito um pequeno circuito, contendo uma entrada para um cabo coaxial com terminação BNC e uma saída para conectar a fonte luminosa, conforme ilustrado na Figura A.15.







Figura A.11: (a) Circuito do fotodiodo S6468-02, (b) e (c) fotodetector resultante da montagem deste circuito.

Para realizar medidas de potência foi utilizado o medidor de potência óptica digital modelo PM20A da Thorlabs, capaz de operar na faixa de comprimentos de onda de 400 a 1100 nm e detectar potências de -60 (1 nW) a 16 dBm (40 mW), além de apresentar versatilidade de conexão, podendo utilizar adaptadores para conectores FC, LC, SC, SMA ou ST. A Figura A.16 mostra este dispositivo.



Figura A.12: (a) Gerador de funções modelo AFG3251 da Tektronix e (b) *Bias-Tee* modelo ZX85-12G+ da Mini-Circuits.



Figura A.13: Adaptador elétrico, vistas (a) frontal, (b) traseira e (c) perspectiva.



Figura A.14: Detalhe da conexão interna do adaptador elétrico, vistas (a) superior e (b) lateral.



Figura A.15: Adaptador elétrico mais simples.



Figura A.16: Medidor de potência óptica modelo PM20A da Thorlabs.

Como forma alternativa de multiplexar e demultiplexar os feixes luminosos foi utilizado um acoplador óptico 2x1 modelo LIP101ES7 da Microparts, ilustrado na Figura A.17. Alguns dispositivos auxiliares adicionais são os transladadores, adaptadores para as POFs e para as fontes luminosas, e os suportes para filtros ópticos. Alguns destes elementos podem ser vistos na Figura A.18.



Figura A.17: Acoplador óptico modelo LIP101ES7 da Microparts.

Os resultados obtidos nos experimentos foram analisados utilizando os softwares SPLICCO, para adquirir as medidas espectrais, e Origin, para montar os gráficos. Os dados das

medidas temporais foram gerados pelo osciloscópio e transferidos para um *pen drive* USB, para posterior análise utilizando o Origin.



Figura A.18: (a) Transladadores, (b) adaptadores e (c) suportes para filtros.

A.2. COLIMAÇÃO

Além de selecionar o filtro, foi necessário optar ou não pelo uso de lentes colimadoras ou outro elemento capaz de substituí-las. Foram realizados experimentos utilizando as lentes modelos 015-POF980 (Figura A.19a) e 011-POF980 (Figura A.19b) da WT&T. Também foi utilizada a POF OM-GIGA de 1 mm da Optimedia (fornecida ao LaCOp gratuitamente pela empresa Fiber Fin), que possui uma NA aproximadamente igual a 0,3 e perfil de índice gradual, com a intenção de investigar a sua operação como lente GRIN (*GRaded INdex*), utilizada para colimar ou focalizar o feixe luminoso.

O efeito de colimação das lentes GRIN ocorre devido à variação do índice de refração no interior da própria lente que faz os raios luminosos percorrerem esta lente por caminhos que lembram senóides (exceto pelo raio central, que é uma linha reta), conforme ilustrado na Figura A.20a. É possível encontrar um comprimento ideal da lente para que os raios possam emergir paralelos entre si (Figura A.20b). Em uma POF GI com perfil parabólico a luz percorre os mesmos caminhos ilustrados na Figura A.20a, logo, seria possível transformar uma POF GI em uma lente GRIN adaptada. Assim, a POF OM-GIGA foi utilizada com a intenção de operar como uma lente GRIN.



Figura A.19: Lentes colimadoras modelos (a) 015-POF980 e (b) 011-POF980 da WT&T.



Figura A.20: (a) Caminhos percorridos por raios luminosos em lente ou fibra com perfil de índice gradual e (b) princípio de operação das lentes GRIN.

ANEXOS

ANEXO I Liquid-Crystal Filters for Visible WDM Channels over Polymer Optical Fibres (Seminatec 2012)	<u>179</u>
ANEXO II Residential Networks Based on Wavelength-Division Multiplexing Links over Polymer Optical Fibres (Momag 2012)	<u>181</u>
ANEXO III - – Development of Cholesteric Liquid-Crystal Spectral Filters for Visible WDM Channels over Polymer Optical Fibres (Momag 2012)	187
ANEXO IV Cholesteric Liquid-Crystal Filters for Visible WDM Channels (ILCC 2012)	<u> 196</u>
ANEXO V Fibras Plásticas Fluorescentes Como Filtros Ópticos Para Uso Em Enlaces Wdr De Comunicações Em Distâncias Curtas (Momag 2010).	n 199
ANEXO VI Datasheet das Microlentes da WT&T	201
ANEXO VII Especificações do Filtro Modelo 52530 da Edmund Optics	205
ANEXO VIII Especificações do Filtro Modelo 69215 da Edmund Optics	207
ANEXO IX Datasheet do Fotodiodo Modelo S6468-02 da Hamamatsu	210
ANEXO X Especificações do Fotodetector Modelo PDA10A da Thorlabs 212	

ANEXO I - LIQUID-CRYSTAL FILTERS FOR VISIBLE WDM CHANNELS OVER POLYMER OPTICAL FIBRES (SEMINATEC 2012)

Liquid-Crystal Filters for Visible WDM Channels over Polymer Optical Fibres

D. S. V. Medeiros,^a <u>R. M. Ribeiro</u>,^a A. P. L. Barbero,^a V. N. H. Silva,^b K. Sathaye,^b and L. Dupont^b ^aDepartamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 24.210-240 ^bOptics Department, Telecom Bretagne, Brest, France <u>E-mail:</u> rmr@pq.cnpq.br

1. Abstract

This paper describes the development of discrete optical filters operating in the visible spectra aiming the WDM links over Poly-Methyl-Methacrylate (PMMA) polymer optical fibres (POFs). The fabrication of notch and dichroic filters was carried out using a nematic liquid crystal (LC) doped with appropriate chiral dopant. In order to have the reflection of above 80% for the desired wavelength we used approximately 20 layers of cholesteric LC in a planar Grandjean texture. In order to operate the device for any given input polarisation, the cholesteric liquid crystal (CLC) with left handed helix will reflect left circularly polarised light while the right handed helix will reflect the right handed circularly polarised light. The device compactness makes it compatible within POF technology.

2. Introduction

WDM over POFs have been proven to be a suitable technology for very short-haul networks (< 1 km) [1]. The WDM technique enables design flexibility and large capacity exploitation for optical fibre links and networks. In order to build XWDM (X = null, C or D) networks, many devices are required and WDM-over-POFs are no exception [2]. Low cost devices like multiplexers/demultiplexers, notch filters and others are strongly recommended for POFs. Although it is not critical for multimode fibres as POFs, the polarisation is also an important issue that needs to be addressed in most optical telecommunication systems as it can hamper their performance. Our device is completely polarisation insensitive and offers a low cost solution. The helical structure of the director of CLC exhibits a periodic birefringence modulation causing selective reflection of circularly polarised light [3]. The fabrication of the (originally to be only) notch filter was carried out using CLC of left and right helicity.

This paper describes the development of polarisation-insensitive notch filter and dichroic beam-splitter based on cholesteric LC for visible spectra operation.

3. Results and Discussions

A. The CLC Device as a Notch Filter

The CLC device was originally engineered to be a notch filter for 0° incidence angle. In order to have the

bandwidth of 20 nm we used a nematic liquid crystal (MLC-6846-000 Merck Corporation) with feeble birefringence of 0.09. This liquid crystal was doped with chiral dopant for right-handed helicity R811 with 70%-30% concentration by weight. The pitch of the CLC can be varied by varying the concentration of chiral dopants eventually also shifting the wavelength of the selective reflection. Rubbed surfaces of the glass sheet substrates give the necessary anchoring to the surface so that the cholesteric helix is aligned perpendicular to such surface. Polyimide SE410 from Nissan chemicals diluted in varnish, the latter provided by same company, was spin coated on carefully cleaned sheet glasses. The achieved mixture was then filled between two of such rubbed polyimide glass plates where each surface is separated by glass rod spacers of 5 µm that were dispensed in NOA63 glue (Norland Glues). Once the cell was completely filled, the borders were sealed using NOA63 glue. Another mixture with same concentration was prepared using now left-handed chiral dopant S811 that was filled with similar process. These two cells were then glued one top of another to complete the entire filter (see Figs.1a and 1b).



Fig.1. Structure (a) and picture (b) of the CLC-based notch filter.

The Fig.2 shows the transmittance spectrum. It displays a 7 dB dip centred on 520 nm, whereas most of the remaining wavelengths are ~80% transmitted.



Fig.2. Transmittance spectrum at 0° incidence of the CLC device operating as a notch filter on 520 nm.

Fig.3 simultaneously shows the 4-channels light source (\blacksquare) generated by multiplexing 460, 520, 590 and 650 nm wavelengths from LEDs and the notch filter transmittance (\bullet) spectra. One can observe the component centred one 520 nm is blocked, whereas the other channels are almost entirely transmitted.



Fig.3. Light source reference and the transmitted WDM spectrum of the CLC filter operating as a notch filter.

B. The CLC Device as a Dichroic Beam-Splitter

Now the same CLC device is placed at 45° angle relative to the incident white light. The Fig.4 shows the transmitted and reflected spectra. It displays cut-on wavelength on 480 nm.



Fig.4. Transmitted and reflected spectra at 45° incidence of the CLC device operating as a dichroic beam-splitter.

Using again the 4-channels light beam (see the reference light of Fig. 3). The transmitted (Fig. 5) and reflected (Fig.6) WDM spectra were both measured.



Fig.5. Transmitted WDM channels spectrum of the CLC device operating as a dichroic beam-splitter.

The Fig.5 shows that the blue channel (460 nm) is barely present in the transmitted spectrum. Therefore, only the green, orange and red channels are transmitted.



Fig.6. Reflected WDM channels spectrum of the CLC device operating as a dichroic beam-splitter.

In Fig.6, which shows the reflected spectrum, one can notice the three channels that were once transmitted (see Fig.5) are now mostly blocked, but the blue channel is rather reflected.

4. Conclusions

Even as a preliminary step, our research has shown the use of CLC device to operate as a notch filter or as a dichroic beam-splitter, the latter at least for a blue/red 2channel WDM. CLC allows us the tailoring of the reflection wavelength for a notch filter and/or dichroic beam-splitter; such filters can be fabricated at any visible wavelength with similar fabrication process. Furthermore, the choice of liquid crystal can be made according to the bandwidth (stop-band) requirements for the notch filter. Both filters are shown to be useful for WDM visible channels commonly used in PMMA POF links.

Acknowledgments

The authors would to thank Dr. Daniel Stoenescou for providing us the liquid crystals with different birefringence and also for providing the appropriate chiral dopants. The authors are also indebt with INCT-CNPq and FaperJ for the partial financial support of this research.

References

[1] M. Kamiya, H. Ikeda and S. Shinohara, "Wavelength-Division-Multiplexed Analog Transmission Through Plastic Optical Fiber for Use in Factory Communications," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 49, no. 2, pp. 507-510. April 2002.

[2] O. Ziemman, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, "POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems," 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, 2008.

[3] A. Denisov and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Resonant gratings in planar Grandjean cholesteric composite liquid crystals," *Appl. Opt.*, vol. 46, pp. 6680-6687, 2007.

ANEXO II - RESIDENTIAL NETWORKS BASED ON WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING LINKS OVER POLYMER OPTICAL FIBRES (MOMAG 2012)

Residential Networks Based on Wavelength-Division Multiplexing Links Over Polymer Optical Fibres

Dianne S. V. Medeiros, Ricardo M. Ribeiro and Andrés P. L. Barbero Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp) Departamento de Engenharia de Telecomunicações Universidade Federal Fluminense Niterói, RJ, Brasil, 24.210-240 E-mail: dianne scherly@yahoo.com.br

Abstract—This paper describes researches concerning the use of Wavelength-Division Multiplexing (WDM) techniques over Polymer Optical Fibres (POFs) links for Residential Networks applications. It is reported the development of a 2-channel WDM Multiplexer/Demultiplexer (MUX/DEMUX) device based on a commercially available dichroic beam-splitter operating in the visible spectra. It describes the use of the MUX/DEMUX device working as a demultiplexer only and afterwards operating in an experimental WDM link over Poly-Methyl-Methacrylate (PMMA) POF.

Keywords-WDM; filters; PMMA, polymer optical fibre; multiplexing; residential networks.

I. INTRODUCTION

The demand for information has dramatically increased in the last years leading to the intensely search of faster and more efficient communication media and modulation formats. Many existing networks are being merged in terms of protocols and physical media, allowing service integration. In order to attend the aforementioned demand an access network solution named Fibre-To-The-x (FTTx) has been developed and nowadays it is already a reality in many places around the world, especially in the developed countries. As an example, in the year 2000 an optical 1 Gbps Local Area Network (LAN) based on Graded Index Plastic Optical Fibres (GI-POF) was implemented in the campus of Keio University, Japan, thereafter optical networks were used in several residences, hospitals and medical conference halls in Tokyo [1]. In Brazil, the Telefônica optical network reaches the customer residence and has been commercially available since 2008 [2]. We believe the FTTx and the home networks are strongly related to one another.

Among the FTTx solutions there is one where x = H, which stands for "Home" (FTTH). This means the fibre reaches an Optical Network Terminal (ONT) placed in the residence from which metallic cables or wireless connections are usually used for local access. It would be of interest to use also optical fibres inside the residence (FiTH – Fibre into The Home), since they have high transmission capacity through an almost deterministic physical channel, low attenuation, high security in data transmission and are free of electromagnetic interference. Among the existing optical fibres, the POFs are

the most suitable for use in very short-haul links such as Small Office/Home Office (SOHO), cars, ships and airplanes networks. Indeed POFs are easy and secure to handle and connect, are flexible, exhibits mechanical resistance, and the related technology is not expensive for commercial and R&D applications. Eventually, in airplane optical networks, polymerclad silica fibres may replace the POFs because the smaller attenuation of the former.

A European project named POF-ALL [3] lead by Italian researchers was finished in 2008. The purpose of such project was to develop the use of standard PMMA POFs in the very last link of FTTH networks. Nowadays the use of POFs in FTTH networks is already a matter of discussion on international conferences. In [4,5] information about FTTH and its status around the world can be found.

Wavelength-Division Multiplexing (WDM) over optical fibres enables large capacity exploitation of optical fibre links and networks [6]. Moreover, WDM allows a flexible design and it would reduce to at least half the amount of fibre used to implement the residential network, since it would be necessary the use of only a single fibre for both upstream and downstream (full-duplex), instead of two, thus also reducing the system cost and simplifying even more the deployment. xWDM techniques are worldwide spread for glass optical fibres, but in the authors knowledge there is no conmercially available WDM multiplexer/demultiplexer (MUX/DEMUX) device for POF links yet.

In Section II, a brief of Residential Networks is presented. Section III describes the background of WDM over POFs. In Section IV, it is discussed the development of a 2-channel WDM MUX/DEMUX device based on a commercially available dichroic beam-splitter for operation over Poly Methyl-Methacrylate (PMMA) POF links. Finally, Section V describes two applications of our 2-channel WDM MUX/DEMUX "cube".

II. RESIDENTIAL NETWORKS

In order to implement home networking it is necessary to use some active and passive devices such as media converters, couplers, connectors, filters, attenuators, residential gateways, fibres, etc. Other devices may be not essential but by using them it would ease the implementation of the infrastructure needed for the system operation and to improve the bandwidth usage, e.g. the use of WDM MUX/DEMUX devices. However, the implementation of home networking may suffer drawbacks such as devices interoperability, functionality of the residential gateway for service distribution and network management, fully connectivity in the whole residence [7], the lack of optical interfaces on equipments such as PCs and TVs, and waste of bandwidth. The use of a MUX/DEMUX device would help to provide a better exploitation of the available bandwidth, since it allows the transmission of several services through a single physical medium or the transmission of a single service with a higher bit rate by using more than one channel. It also enables full-duplex operation.

A network backbone [8], which can use optical and/or nonoptical physical media, e.g. PLC [9], Ethernet through metallic cables [9], wireless technology, and glass optical fibres, can provide connectivity in the whole residence. POFs might also be used and are chosen herein as the best candidate due to their optical characteristics as is explained in Section I. Table I summarizes the performance of several technologies available for residential networking [10].

The wired medium (POF) can be used along with auxiliary wireless Access Points (APs). The latter, establishes in-house wireless picocells, which could be based on the IEEE 802.11 standard, since the optical fibre is transparent to the protocols used, i.e., using RoF technology as to be the wireline - wireless backbone.

The RoF technology consists on an analogue transmission in which the radio signal carrying the base-band is imposed on the optical carrier by using direct or external modulation of the light source [11]. The optical fibre is transparent to the protocols used, e.g. IEEE 802.11 standard. If WiFi-over-Fibre is chosen as to be the wireline-wireless backbone it is not possible to use LEDs as light sources, unless baseband modulation is used. For the latter, LEDs or RC-LEDs might be used.

Compared to the metallic cable solution, the optical home network is in early stage of development; therefore a lot of time has been spent in studies to improve its quality. New components are being developed aiming their use in home networking. As example [7] has developed a Fast Ethernet (10 Mbps) media converter, to be used with SI-POFs, that works up to ~ 400 m. The EU POF-ALL project [3] developed a technology that would allow the delivery of 100+ Mbps for residences at low costs. There are also studies on achieving higher transmission rates over POF links and better bandwidth usage, see [12]; and also applications such as CATV [8], HDMI signals [6], Gigabit [13] and Fast Ethernet [14] transmission over POF.

The deployment of POF links in a home with no previous existing fibre might be a problem, but due to the POFs characteristics, they can be installed in the already existing electrical conduits [15], behind the walls, near the baseboard or even under the carpet [10]. The optical output can be placed in a power outlet where a media converter should exist, such as a hybrid optical power outlet, see [16] for detailed information. In [17] one can get information about the first private home in Switzerland (2004) where a home network based on POF was installed. Some companies such as Home Fibre, Huber+Suhner, Reichle & De-Massari (R&M) and NyceNetworks have specialized their products and solutions in order to attend the growing market of residential networks. However, in spite of offering a wide variety of products and solutions for FiTH, none of them offers WDM devices for POFs yet.

TABLE I - AVAILABLE TECHNOLOGIES FOR RESIDENTIAL NETWORKS

Technology	Performance	Specific Advantages/Disadvantages				
Radio systems						
UMTS	2 Mbps over 70 m 300 kbps over some 100 m	No local cross-linking				
Bluetooth	1 Mbps over 10 m	Very easy cross-linking Very limited capacity and operation distance				
Wireless ATM	25 Mbps over 30 m	Supports several services Relatively expensive				
	Сорре	r cables				
PNA	Some Mbps	Requires existing telephone lines; suffers disturbance				
Coaxial cables	Some 100 Mbps	Requires existing coaxial lines; relatively costly converters				
Data cables	1 Gbps over 100 m	Thick cable; most widely spread LAN technology Bit rate limited by the used standard				
PLC	Some Mbps	Easy to install Susceptibility to disturbances and emissions.				
Optical cables						
Glass SMF	Practically unlimited	Externely high bit rates Extremely expensive installation				
Glass MMF	2.5 Gbps	High bit rates Limited expense for installation				
PMMA- POF	Some 100 Mbps over 100 m (1 WDM channel)	Extremely easy installation; low cost technology High attenuation				
PF-POF	1.25 Gbs over 1 km	Easy installation; medium cost technology; medium attenuation in the infrared				

III. WDM-OVER-POFS

A disadvantage of using standard PMMA SI-POFs as the backbone of a home network is the limitations on range due to relative high attenuation and on the bandwidth x distance product due to mode dispersion. Experiments have been done to address the bandwidth needs of home networking services [18]. Since range and bandwidth limitations might consist on problems in the home network implementation, it is necessary to find an easy and cost efficient solution for increasing both parameters. Multiplexing techniques are proven to be a good solution in order to improve the bandwidth usage of the physical medium, aggregating several services in only one media instead of using one physical medium for each service [19]. Further, if only one service is offered, in order to have a full-duplex communication with no channel cross-talk, the signals of each side transmitters have to operate with different parameters so as to be multiplexed.

There are several techniques that can be used to build a WDM MUX/DEMUX such as prism refraction, diffraction gratings, arrayed waveguide gratings and multilayer interference filters.

Toyota Gosey using a technique named Light Induced Self-Written (LISW) to create light paths on 2-channel WDM MUX/DEMUX based on diffraction gratings [20] developed an interesting WDM device prototype. Toyota aims to use their WDM device in the networks of its own automobiles. A 2 and 3-channels WDM MUX/DEMUXs based on interference filters were also reported [21].

IV. THE 2-CHANNEL WDM MUX/DEMUX FOR PMMA POFS UNDER DEVELOPMENT

The chosen technique to be used in the development of our 2-channel WDM MUX/DEMUX is based on interference filters. Indeed we used a short-pass filter rotated at 45° (dichroic beam-splitter) in order to combine and separate the light beam with different wavelengths. The schematic drawings of the proposed WDM MUX/DEMUX "cubes" are shown in Fig.1. Although there are two schemes drawn in Fig.1, indeed in present preliminary stage a single device was developed that can be used for both multiplexing and demultiplexing processes. The lenses illustrated in Fig.1 will be responsible for collimating the light beam that exits the fibre and traverses the filter. The latter must be placed at 45° angle relative to the incident beam. The lenses can be replaced by any element that can focus the light beam into the core of the target fibre.

Because the optical coupling through free-space optics is crucial (see Fig.1), a further study was accomplished in order to minimise the MUX/DEMUX insertion loss. The latter task was carried out by experimenting many possible combinations among PMMA SI-POF (NA ~ 0.5), PMMA GI-POF (OM-GIGA POF, NA \approx 0.3 from OptiMedia) and a 011-POF980 model lens from WT&T for launch and capture of the light beam. The obtained results are summarized in Tab.II. By observing these results, it is fair to conclude that the use of a pair of 011-POF980 model WT&T lenses is the best option to achieve the higher optical power output, whereas the second best option is launching the light beam with the PMMA GI-POF and capturing it with a WT&T lens. We expected the latter as second option due to the lower NA of the PMMA GI-POF compared to the PMMA SI-POF, which means the light beam diverges less before being captured by the lens.

The NT69-215 model short-pass filter from Edmund Optics was characterised in [22]. Such filter is designed for 45° incidence angle thereby the rejected light spectrum is reflected at 90°, making it suitable to operate as a dichroic beam-splitter. It has a cut-off wavelength on 550 nm, transmitting ~95% of the blue channel and ~0% of the red channel. This filter was used in both experiments discussed in Section V. It was placed at 45° angle relative to the incident light beam in order to combine (multiplex) and split (demultiplex) such beams. Fig.2 shows the bench prototype used to multiplex two different light beams.

The multiplexing techniques are well known. However, there is no commercially available WDM MUX/DEMUX

device for POFs yet, probably due to the high cost for industrialization. Therefore, several papers on this matter can be found, but nowadays every research incurring the development of a WDM MUX/DEMUX has the same main purpose, which is to improve the optical fibre bandwidth usage. The differences between the reported prototypes are the multiplexing technique and the external connections used, e.g. lenses and filters.

Since there is no such device commercially available, the authors decided to produce their own MUX/DEMUX device. Furthermore, this is an opportunity to present the first Brazilian WDM MUX/DEMUX device aiming POF links. The development is still in preliminary stage and it will be improved.

V. EXPERIMENTAL SETUPS, RESULTS AND DISCUSSIONS

A. An Example of Demultiplexing

The LED470/660-04A model Dual LED from Laser Roithner emitting at 470 and 660 nm wavelengths was used as a multiplexed light source because their semiconductor dies are placed very close each other. Its external appearance is exactly the same of an ultra-bright LED with a standard 5 mm-size transparent dome, but instead of only two electrical inputs it has three: one is a common input for both chips and the other two are used to activate the red and the blue die semiconductor. Therefore, the dual LED can emit at only one of the wavelengths or both wavelengths simultaneously, depending on the electrical inputs. Fig.3 shows a scheme where the multiplexed light generated from the dual LED traverses the NT69-215 short-pass filter, placed at 45° angle relative to the incident beam, which in turn splits the incoming beam into two separate light beams (demultiplexing). The dual LED spectrum is shown in Fig.4.

TABLE II. COLLIMATION RESULTS WHERE THE LAUNCHED OPTICAL POWER

IS THE SAME IN ALL COUPLING-DECOUPLING COMBINATIONS					
Light beam	Light beam	Optical Power Output			
coupling	decoupling	(μW)			
011-POF980 lens	PMMA SI-POF	3.3			
011-POF980 lens	011-POF980 lens	9.3			
011-POF980 lens	OM-GIGA POF	3.6			
PMMA SI-POF	PMMA SI-POF	2.6			
PMMA SI-POF	011-POF980 lens	4.3			
PMMA SI-POF	OM-GIGA POF	2.1			
OM-GIGA POF	PMMA SI-POF	2.4			
OM-GIGA POF	011-POF980 lens	6.3			
OM-GIGA POF	OM-GIGA POF	1.4			



Figure 1. Schematic drawing of the proposed WDM MUX/DEMUX "cubes": Multiplexer (left) and Demultiplexer (right).



Figure 2. The NT69-215 short-pass filter operating as multiplexer.



Figure 3. Schematic drawing of the demultiplexing of the dual LED light



Figure 4. The LED470/660-04A model dual-LED spectrum.

The light exiting the dual LED was coupled into the POF by using a homemade adapter. None lenses were here used. The multiplexed beam from the dual LED propagates along the POF and incides on the NT69-215 short-pass filter, which separates the light beams. The transmitted and reflected light beams were analysed using the USB 2.0 CCD-Spectrometer 400-800 nm from Thorlabs. Both spectra are shown in the same plot in Fig.5.

In Fig.5 none cross-talk between the red and blue channels is observed, i.e. there is no "reak" of the blue component in the reflected spectrum and vice-versa. Thus, the NT69-215 model short-pass filter can be efficiently used for demultiplexing red/blue channels.



Figure 5. Transmitted and reflected spectra of the short-pass filter at 45° angle incidence using the LED470/660-04A model dual LED as light source.

B. The WDM Bidirectional Link

In order to test the short-pass filter NT69-215 as to be the core of the WDM MUX/DEMUX "cube" device in a more realistic environment, we set up a full-duplex bidirectional link. The latter uses a blue and a red DieMount spotlight LEDs as light sources (the spectra are shown under the same graph in Fig.6) and two photodiodes models (S6468-02 from Hamamatsu and PDA10A from Thorlabs). The light sources were intensity modulated using the electrical parameters shown in Tab.III. The Fig.7 shows the scheme and Fig. 8 shows the picture of the experimental setup. In this preliminary experiment the length of the optical fibre was not an important data, since its sole purpose was to confirm the possibility of using the WDM cube in a bidirectional link, therefore this data was not measured.

The spotlight LED comprises a semiconductor die placed in the focus of a parabolic micro-reflector so that the spotlight LED emits the light beam within a small solid angle of $\sim 4^{\circ}$ [23]. Fig.9 shows a picture of the spotlight LEDs used in the experiment. The plastic parabolic micro-reflector can be observed in the picture of a broken spotlight LED.

Using a Wavejet 352A model oscilloscope from LeCroy, the signal received by both transceivers was measured with and without using the model 011-POF980 WT&T lenses which are placed in the tip of the POF that capture the light beam, as illustrated in Fig.7.

Fig.10 shows the waveform carried by the red channel. There is an optical gain of \sim 4.3 dB by using the WT&T lenses when comparing with SI-POFs without lenses. No gain is observed for the blue channel (see Fig.11) even when the lenses are used. This happens due to the divergence of the light beam: when the red light beam traverses the filter it is not widely spread yet, thus the lens is still able to capture a great amount of the reflected light, whereas the blue light beam has already diverged in a way that the lens is not able to make difference relative to the capture light anymore. Fig.12 shows a screenshot of the 2-channel oscilloscope display when measuring the signals received by both transceivers and using

different electrical modulation parameters (not shown in this paper). It seems that none cross talks occurs between the WDM channels.

TABLE III.	ELECTRICAL	MODULATION	PARAMETERS

Electrical Parameter	Blue spot-light LED	Red spot-light LED
Bias voltage (V)	2.70	2.22
Frequency (MHz)	0.5	1.0
Peak to peak voltage (V)	3	3
Load on the oscilloscpe input (Ω)	50	50
Waveform	Sine	Square



Figure 6. Typical spectra of blue and red DieMount spotlight LEDs.



Figure 7. Scheme of an experimental full-duplex bidirectional fibre link.



Figure 8. Picture of the experimental full-duplex bidirectional fibre link setup.



Figure 9. Blue and red (turned-on) spotlight LEDs from DieMount.



Figure 10. The waveforms of the received signal on the oscilloscope – Red Channel (square waves).



Figure 11. The waveforms of the received signal on the oscilloscope – Blue Channel (sine waves).



Figure 12. Screenshot of the 2-channel oscilloscope display.

VI. CONCLUSIONS

Nowadays, high broadband in-house connections are already a reality around the world. In order to achieve high acceptance in the market, the physical medium of these networks needs to satisfy some requirements such as safe handling, easy installation, low cost and high bandwidth, which are all met by POFs. The latter technology is an attractive media for residential backbone infrastructure and may be mixed with wireless technologies.

Not only the physical media (fibre) is important for home networks, but many others devices as filters and MUX/DEMUXs. The latter are not commercially available for POF systems yet. The WDM MUX/DEMUXs would provide a better use of the available bandwidth and reduce the amount of fibres used in the deployed system. Aiming WDM links over POFs for residential networks, this paper describes the use of a commercially available short-pass filter as the core of a MUX/DEMUX device. It has been shown that the proposed 2channel WDM MUX/DEMUX device is able to demultiplex an incoming signal comprising a blue and a red channel. The device was further tested in the time domain and none bidirectional WDM cross-talk was observed, since the correct wavelengths were chosen.

The next step of our research aims to build the very first version of a relatively simple and inexpensive 2-channel WDM MUX/DEMUX compact prototype to be used in a real scenario.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Dr. Daniel Stoenescou for providing us the liquid crystals with different birefringence and also for providing the appropriate chiral dopants. The authors are also indebt with INCT-Fotonicom/CNPq, the grant number 556073/2010-0 (MSc. scholarship of Dianne S. V. Medeiros) of CNPq and Faperj for the partial financial support of this research.

REFERENCES

- Y. Koike, "Status of POF for broadband society", Proc. of 14th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.3-6, Sep. 2005.
- [2] "Resultados Anuais do Vivo Fixo, nova denominação adotada pelo Grupo para sua operação fixa (Telesp) incluindo quantidade de acessos fixos, receita, margem EBITDA e investimentos.". Available on: http://www.teleco.com.br/Operadoras/vivofixo.asp, accessed in: Mar. 2012.
- [3] R. Gaudino, "The use of large core POF for distance above 100 meters: technical challenges and potential applications as investigated in the EU POF-ALL project", Proc. of 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.342-347, Sep. 2006.
- [4] "The FTTH prism", vol. 5, No. 4, Sep. 2008.
- [5] FTTH Council website. Available on: http://www.ftthcouncil.org. Acessed in: Mar. 2012.
- [6] S. Junger et al., "Transmission of HDMI signals for HDTV applications using WDM and GI-POF", Proc. of 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.436-442, Sep. 2006.
- [7] D. Cárdenas, R. Gaudino, A. Nespola, S. Abrate, "10 Mb/s Ethernet transmission over 425m of large core step index pof: a media converter prototype", Proc. of 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.46-50, Sep. 2006.

- [8] S. Junger, W. Tschekalinskij and N. Weber, "Cable TV transmission over POF", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.35-39, Sep. 2004.
- [9] Ho-In Jeon, "U-Home services and positions of POF", Proc. of 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.38-45, Sep. 2006.
- [10] Nyce Networks website. Available on: http://nycenetworks.com>. Accessed in Mar.2012.
- [11] H.B. Kim, "Radio over Fiber based Network Architecture", Dissertation pp.21.41. Fakultät IV Eletrotechnik und Informatik der Technischen Universität Berlin, 2005.
- [12] O. Ziemann et al., "Multi channel broadband data transmission over thick optical fibers", Proc. of 15th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.359-366, Sep. 2006.
- [13] G. Grosskopf, A. Norrdine, D. Rohde and M. Schlosser, "Gigabit Ethernet transmission experiments at 60 GHz", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.27-34, Sep. 2004.
- [14] H. Kragl, T. Mönnich and G. Müller, "Fast Ethernet full duplex operation over simplex 1 mm standard POF cables", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.125-132, Sep. 2004.
- [15] Y. Takano, Y. Watanabe and T. Arai, "Branching method for existing apartment using perfluorinated graded index plastic optical fiber", Proc. of 14th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.185-188, Sep. 2005.
- [16] W. Tschekalinskij, S. Junger, N. Weber and B. Offenbeck, "Hybrid optical and power outlet for multimedia home networks", Proc. of 14th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.361-364, Sep. 2005.
- [17] T. Richner, "1st POF house in Switzerland", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.40-45, Sep. 2004.
- [18] J.W. Lee, "Bandwidth requirements of FTTH for high speed communication and digital TV", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.82-89, Sep. 2004.
- [19] A.M.J. Koonen et al., "POF application in home systems and local systems" Proc. of 14th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.165-168, Sep. 2005.
- [20] M. Kagami, T. Yamashita, M. Yonemura, A. Kawasaki and Y. Inui, "A light-induced self-written optical waveguide fabricated in photopolymerizing resin and its application to a POF WDM module", Proc. of 12th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.183-186, Sep. 2003.
- [21] S. Junger, W. Tschekalinskij and N. Weber, "Video distribution and multimedia transmission systems for home networks" Proc. of 12th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.237-239, Sep. 2003.
- [22] D.S.V. Medeiros et al. "Development of cholesteric liquid-crystal spectral filters for visible WDM channels over polymer optical fibres", submitted to MOMAG 2012.
- [23] DieMount GmbH website. Available on: http://www.diemount.de >. Accessed in Mar.2012.

ANEXO III - DEVELOPMENT OF CHOLESTERIC LIQUID-CRYSTAL SPECTRAL FILTERS FOR VISIBLE WDM CHANNELS OVER POLYMER OPTICAL FIBRES (MOMAG 2012)

Development of Cholesteric Liquid-Crystal Spectral Filters for Visible WDM Channels Over Polymer Optical Fibres

Dianne S. V. Medeiros, Ricardo M. Ribeiro, Andrés P. L. Barbero Laboratório de Comunicações Ópticas Departamento de Engenharia de Telecomunicações

Departamento de Engenharia de Telecomunicações Universidade Federal Fluminense Niterói, RJ, Brasil, 24.210-240 E-mail: dianne.scherly@yahoo.com.br

Abstract—This paper describes the development of notch filters and dichroic beam-splitters, the latter to be a visible 2-channel WDM Multiplexer/Demultiplexer (MUX/DEMUX). Both discrete devices are intended to be used on very short-haul links based on Poly-Methyl-Methacrylate (PMMA) Polymer Optical Fibres (POFs). The filters were built from commercially available multilayer dielectric stack and also from engineered Cholesteric Liquid Crystals (CLCs). The latter was manufactured by using nematic LC doped with appropriate chiral dopant. In order to have the reflection of above 80% for the desired wavelength and also for non-polarised light we used approximately 20 layers of CLC with both helicities in a planar Grandjean texture. The CLC with left handed helix will reflect left circularly polarised light, while the right handed helix will reflect the right handed circularly polarised light.

Keywords: WDM; filters; cholesteric liquid crystal; PMMA polymer optical fibre; multiplexing; residential networks.

I. INTRODUCTION

Nowadays many existing networks are being merged in terms of protocols and physical media, allowing service integration. In order to implement an integrated service network, as an example a residential network [1], it is need to use some devices such as media converters, couplers, connectors, filters, attenuators and many others [1]. Since Wavelength Division Multiplexing (WDM) over POFs have been proven to be a suitable technology for very short-haul networks (<1 km) [2], a WDM MUX/DEMUX and notch filter devices could be both used to ease the implementation of the infrastructure needed for the telecommunication system operation. Several researches have been made in order to develop such devices. In [3] a hybrid optical and power outlet that plays the role of a media converter was built, and in [4]-[6] MUX/DEMUX devices based on different WDM techniques have been developed.

The WDM technique enables flexible design and large capacity exploitation of optical fibre links and networks. Moreover, this technique would reduce to half the amount of fibre required to implement a network (e.g. residential Vinícius N. H. Silva, Kedar Sathaye, Laurent Dupont Optics Department Telecom Bretagne Brest, France, 29238 E-mail: vinicius.nunes@telecom-bretagne.eu

network), since it would be necessary only a single fibre for both upstream and downstream, instead of two, thus also reducing the system cost and simplifying even more the deployment.

Although it is not critical for multimode fibres as POFs [1], the polarisation is an important issue that needs to be addressed in most optical telecommunication systems as it can hamper their performance. The proposed discrete Liquid Crystal-based (LC-based) filters as to be WDM devices are completely polarisation insensitive and offer a potentially low cost solution. The helical structure of the director of the CLC exhibits a periodic birefringence modulation causing selective reflection of circularly polarised light [7]. The fabrication of the filters was carried out using CLC of left and right helicity. A similar use for a LC device was made in [8] where Nematic Liquid Crystal (NLC) cells were used as active devices to switch the optical path traversed by the input light, guiding it to the desired output, in a 3-channel multiplexer. More information concerning the state-of-art related to Liquid Crystals applied to optical technologies can be found in [9].

At first, this paper describes the development of a 2channel MUX/DEMUX based on a commercially available dichroic beam-splitter. At second, it describes the development of polarisation-insensitive notch filter and dichroic beamsplitter both engineered from CLC for visible spectra operation. Both devices are aimed to be used on WDM over PMMA POF networks.

II. THE COMMERCIALLY SHORT-PASS FILTER AS A DICHROIC BEAM-SPLITTER

The NT69-215 model short-pass filter from Edmund Optics was characterised aiming its use as a dichroic beam-splitter. Four DieMount LEDs centred on 460, 520, 590 and 650 nm wavelengths were multiplexed using three cascaded 2x1 mini POF-couplers. This device was used as a 4-channel WDM reference light source in the present experiments (see the picture on Fig.1). The 4-channel WDM light source typical spectrum is shown on Fig.2. The relative amplitude of each of the channels amplitude could be finely adjusted by tuning the current flowing through each of the LEDs.

The short-pass filter was placed at 45° angle relative to the incident 4-channel light beam and both transmitted (Fig.3) and reflected (Fig.4) spectra were measured. A set of lenses model 015-POF980 from WT&T (Canada) was used for collimating the light beam. The Fig.5 shows pictures of the experimental setup.

The Fig.3 displays the blue and green channels being efficiently transmitted, whereas the orange and red channels are quite blocked. The \sim 35% amplitude reduction of the transmitted blue channel may be due to optical coupling drawbacks occurred with the blue LED in the 4-channels light source (see Fig.1).



Figure 1. The 4-channel WDM light source device.



Figure 2. The typical spectrum of the 4-channels WDM light source.

The Fig.4 displays the reflected spectrum of the short-pass filter. The orange and red channels are almost 100% reflected and the blue channel is missing. However, the green channel is not fully transmitted. The spectrum of the orange channel exhibits a superposed structure peaking on ~565 nm that can be suppressed when the green LED is turned off. Therefore, it is observed a small leaking of green light in the reflected spectrum. This occurs because the green LED has a relatively

broad spectrum that it is partially above the cut-off wavelength (550 nm) of the short-pass filter. A notch filter centred on \sim 565 nm may be useful in order to eliminate such undesirable crosstalk.



Figure 3. The transmitted spectrum of the short-pass filter at 45° incidence.



Figure 4. The reflected spectrum of the short-pass filter at 45° incidence.



Figure 5. Experimental setup used to characterise the short-pass filter: transmission setup (right) and reflection setup (left).

III. THE CLC-BASED OPTICAL FILTERS

A. The CLC-Based Notch Filter

The LC-based device was originally engineered to be a notch filter for 0° incidence angle. In order to have the bandwidth of 20 nm we used a nematic LC (MLC-6846-000 from Merck Corporation) with feeble birefringence of 0.09. This LC was doped with chiral dopant for right-handed helicity R811 with 70%-30% concentration by weight. The pitch of the CLC can be changed by varying the concentration of chiral dopant, eventually also shifting the wavelength of the selective reflection. Rubbed surfaces of the glass sheet substrates give the necessary anchoring to the surface so that the cholesteric helix is aligned perpendicular to such surface. Polyimide SE410 from Nissan chemicals diluted in varnish, the latter provided by same company, was spin coated on carefully cleaned sheet glasses. The achieved mixture was then filled between two of such rubbed polyimide glass plates where each surface is separated by glass rod spacers of 5 µm that were dispensed in NOA63 glue (Norland Glues). Once the cell was completely filled, the borders were sealed using NOA 63 glue. Another mixture with same concentration was prepared using now left-handed chiral dopant S811 that was filled with similar process. These two cells were then glued with the pure Norland NOA63 glue one top of another to complete the entire filter. Fig.6 shows the scheme of the filter structure and a picture of the CLC-based filter sample.

Fig.7 shows the transmittance spectrum for such filter. It displays a 7 dB dip centred on \sim 520 nm, whereas most of the remaining wavelengths are \sim 80% transmitted.

Fig.8 simultaneously shows the 4-channels light source (see Fig.1) spectrum and the transmitted spectrum of the notch filter. It can be observed that the green channel component is blocked, whereas the other channels are almost entirely transmitted.

From Figs. 7 and 8, it is observed that the input signal is attenuated by approximately 7.0 dB and 8.3 dB, respectively. Such difference may occur due to optical misalignment, since the plots result from different experiments and using different light sources. Furthermore, it may also occur due to the noise level (see Fig. 8).

B. The CLC-Based Dichroic Beam-Splitter

The same CLC-based device is placed now at 45° angle relative to the incident white light beam. The Fig.9 shows the transmitted and reflected spectra. It displays 480 nm cut-on wavelength.

Using again the 4-channels light beam (see the reference light spectrum of Fig.8) the transmitted (Fig.10) and reflected (Fig.11) spectra were both measured.

The Fig.10 shows that the blue channel (460 nm) is barely present in the transmitted spectrum and the green, orange and red channels are effectively transmitted. The blue channel is broken into two components, one centred on 453 nm and the other on 481 nm. Observing the transmitted spectrum on Fig.9, it can be noticed that the blue channel centred in 460 nm is not completely blocked, however it is strongly attenuated. Moreover, the wavelengths slightly below and above this dip are partially transmitted, which may explain the presence of the blue components aforementioned (see Fig.10).

In Fig.11 (reflected spectrum), it is seen that the three channels that were once transmitted (see Fig.10) are now mostly blocked, but the blue channel is rather reflected.



Figure 6. Structure (left) and picture (right) of the CLC-based notch filter.



Figure 7. Transmittance spectrum at 0° incidence of the CLC-based device operating as a notch filter on ~520 nm.



Figure 8. Light source reference and the transmitted WDM spectrum of the CLC-based filter operating as a notch filter.



Figure 9. Transmitted and reflected spectra at 45° incidence of the CLCbased device operating as a dichroic beam-splitter.



Figure 10. Transmitted WDM channels spectrum of the CLC-based device operating as a dichroic beam-splitter.



Figure 11. Reflected WDM channels spectrum of the CLC device operating as a dichroic beam-splitter.

IV. COMPARISON BETWEEN THREE DIFFERENT WDM MUX/DEMUX

In this section it is compared the three types of 2-channels multiplexing devices performance: CLC-based operating as a dichroic beam-splitter, NT69-215 short-pass filter and a 2x1 POF-coupler from Microparts. A blue and a red spotlight LEDs from DieMount were used. Fig.12 shows their spectra in the same plot. Such LEDs have an integrated parabolic micro-lens that generates light beam at \pm 4° angle divergence.

In Fig.13 three 2-channels spectra are displayed corresponding to the intensity of the light beam multiplexed by the 2x1 POF-coupler (+), the short-pass filter (\bullet) and the CLC-based device (\blacktriangle).

In order to allow correct comparisons, the spectra for the three devices shown on Fig.13 were all measured under the same conditions, such as optical alignment, light source intensity and distances involved.

The most efficient multiplexing is achieved by using the NT69-215 short-pass filter, followed by the CLC-based dichroic beam-splitter and finally by the 2x1 POF-coupler. It can be observed that the CLC-based beam-splitter and the short-pass filter almost equally transmit the red channel. However, the blue channel is ~6 dB attenuated due to the (preliminary) construction of the CLC-based device. Assuming the spectrum of the short-pass filter as to be the reference, the POF-coupler attenuates the red channel by 11.3 dB and the blue channel by 10.1 dB, whereas the CLC-based beam-splitter attenuates the same channels by 0.5 dB and 5.8 dB, respectively.

An ideal MUX/DEMUX should have a flat response to all wavelengths in a specific range. The CLC-based device response depends on the input wavelength due to its design. It was primary thought to be used as a notch filter only. However, it was observed that the filter operates as a dichroic beam-splitter after an angle tuning of 45°.



Figure 12. Spectrum of a blue and a red spotlight LEDs from DieMount.



Figure 13. Multiplexed 2-channel signal achieved by using the 2x1 POFcoupler, the NT69-215 short-pass filter and the CLC-based beam-splitter.

V. CONCLUSIONS

This paper describes a notch filter and a dichroic beamsplitter in a single device based on CLC technology intended to be used as cross-talk suppression filter and MUX/DEMUX device, respectively, aiming the 2-channel visible WDM over PMMA POF links. The notch filter of 7 dB dip was able to suppress the 520 nm channel. We believe that the CLC-based dichroic beam-splitter is a novel contribution, at least in the scope of POF technology. By using a commercially available short-pass filter another MUX /DEMUX device was built and its performance in the spectral domain was compared with the CLC-based device. The achieved results were promising.

The next step of our research aims to build the very first version of a relatively simple and inexpensive 2-channel WDM MUX/DEMUX compact prototype to be used in a real scenario.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Dr. Daniel Stoenescou for providing us the liquid crystals with different birefringence and also for providing the appropriate chiral dopants. The authors are also indebt with INCT-Fotonicom/CNPq, the grant number 556073/2010-0 (MSc. scholarship of Dianne S. V. Medeiros) of CNPq and Faperj for the partial financial support of this research.

REFERENCES

- O. Ziemman, J. Krauser, P. E. Zamzow and W. Daum, "POF Handbook," 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [2] M. Kamiya, H. Ikeda and S. Shinohara, "Wavelength-divisionmultiplexed analog transmission through plastic optical fiber for use in factory communications", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 49, no. 2, April 2002.
- [3] W. Tschekalinskij, S. Junger, N. Weber and B. Offenbeck, "Hybrid optical and power outlet for multimedia home networks", Proc. of 14th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.361-364, Sep. 2005.
- [4] M. Kagami, T. Yamashita, M. Yonemura, A. Kawasaki and Y. Inui, "A light induced self-written optical waveguide fabricated in photopolymerizing resin and its application to a POF WDM module", Proc. of 12th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.183-186, Sep. 2003.
- [5] L. Barkiv, H. Poisel, Y. Bobitski, "Wavelength Demultiplexer with concave grating for GI-POF systems", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.528-533, Sep. 2004.
- [6] E. A. Dovolnov, S. N. Sharangovich and C.-A. Bunge, "Design of wavelength coupler on the base of photopolymeric gratings for POF data systems", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.559-566, Sep. 2004.
- [7] A. Denisov and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Resonant gratings in planar Grandjean cholesteric composite liquid crystals," Appl. Opt., vol. 46, pp. 6680-6687, 2007.
- [8] P. C. Lallana, C. Vázquez, D. S. Monterol, K. Heggarty and B. Vinouze, "Dual 3x1 multiplexer for POF networks", Proc. of 16th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.63-70, Sep. 2007.
- [9] K. Sathaye, "Structuring of Liquid Crystals for Optical Technologies", 2012, 152 pp. Thesis (Doctorate in Engineering) – Optics Department, Télécom Bretagne, France, March, 2012.

the channels amplitude could be finely adjusted by tuning the current flowing through each of the LEDs.

The short-pass filter was placed at 45° angle relative to the incident 4-channel light beam and both transmitted (Fig.3) and reflected (Fig.4) spectra ware measured. A set of lenses model 015-POF980 from WT&T (Canada) was used for collimating the light beam. The Fig.5 shows pictures of the experimental setup.

The Fig.3 displays the blue and green channels being efficiently transmitted, whereas the orange and red channels are quite blocked. The \sim 35% amplitude reduction of the transmitted blue channel may be due to optical coupling drawbacks occurred with the blue LED in the 4-channels light source (see Fig.1).



Figure 1. The 4-channel WDM light source device.



Figure 2. The typical spectrum of the 4-channels WDM light source.

The Fig.4 displays the reflected spectrum of the short-pass filter. The orange and red channels are almost 100% reflected and the blue channel is missing. However, the green channel is not fully transmitted. The spectrum of the orange channel exhibits a superposed structure peaking on ~565 nm that can be suppressed when the green LED is turned off. Therefore, it is observed a small leaking of green light in the reflected spectrum. This occurs because the green LED has a relatively broad spectrum that it is partially above the cut-off wavelength (350 nm) of the short-pass filter. A notch filter centred on \sim 565 nm may be useful in order to eliminate such undesirable crosstalk.



Figure 3. The transmitted spectrum of the short-pass filter at 45° incidence.



Figure 4. The reflected spectrum of the short-pass filter at 45° incidence.



Figure 5. Experimental setup used to characterise the short-pass filter: transmission setup (right) and reflection setup (left).

III. THE CLC-BASED OPTICAL FILTERS

A. The CLC-Based Notch Filter

The LC-based device was originally engineered to be a notch filter for 0° incidence angle. In order to have the bandwidth of 20 nm we used a nematic LC (MLC-6846-000 from Merck Corporation) with feeble birefringence of 0.09. This LC was doped with chiral dopant for right-handed helicity R811 with 70%-30% concentration by weight. The pitch of the CLC can be changed by varying the concentration of chiral dopant, eventually also shifting the wavelength of the selective reflection. Rubbed surfaces of the glass sheet substrates give the necessary anchoring to the surface so that the cholesteric helix is aligned perpendicular to such surface. Polyimide SE410 from Nissan chemicals diluted in varnish, the latter provided by same company, was spin coated on carefully cleaned sheet glasses. The achieved mixture was then filled between two of such rubbed polyimide glass plates where each surface is separated by glass rod spacers of 5 µm that were dispensed in NOA63 give (Norland Glues). Once the cell was completely filled, the borders were sealed using NOA 63 glue. Another mixture with same concentration was prepared using now left-handed chiral dopant S811 that was filled with similar process. These two cells were then glued with the pure Norland NOA63 glue one top of another to complete the entire filter. Fig.6 shows the scheme of the filter structure and a picture of the CLC-based filter sample.

Fig.7 shows the transmittance spectrum for such filter. It displays a 7 dB dip centred on ~520 nm, whereas most of the remaining wavelengths are ~80% transmitted.

Fig.8 simultaneously shows the 4-channels light source (see Fig.1) spectrum and the transmitted spectrum of the notch filter. It can be observed that the green channel component is blocked, whereas the other channels are almost entirely transmitted.

From Figs. 7 and 8, it is observed that the input signal is attenuated by approximately 7.0 dB and 8.3 dB, respectively. Such difference may occur due to optical misalignment, since the plots result from different experiments and using different light sources. Furthermore, it may also occur due to the noise level (see Fig. 8).

B. The CLC-Based Dichroic Beam-Splitter

The same CLC-based device is placed now at 45° angle relative to the incident white light beam. The Fig.9 shows the transmitted and reflected spectra. It displays 480 nm cut-on wavelength.

Using again the 4-channels light beam (see the reference light spectrum of Fig.8) the transmitted (Fig.10) and reflected (Fig.11) spectra were both measured.

The Fig.10 shows that the blue channel (460 nm) is barely present in the transmitted spectrum and the green, orange and red channels are effectively transmitted. The blue channel is broken into two components, one centred on 453 nm and the other on 481 nm. Observing the transmitted spectrum on Fig.9, it can be noticed that the blue channel centred in 460 nm is not completely blocked, however it is strongly attenuated. Moreover, the wavelengths slightly below and above this dip are partially transmitted, which may explain the presence of the blue components aforementioned (see Fig.10).

In Fig.11 (reflected spectrum), it is seen that the three channels that were once transmitted (see Fig.10) are now mostly blocked, but the blue channel is rather reflected.







Figure 7. Transmittance spectrum at 0° incidence of the CLC-based device operating as a notch filter on ~520 nm.



Figure 8. Light source reference and the transmitted WDM spectrum of the CLC-based filter operating as a notch filter.



Figure 9. Transmitted and reflected spectra at 45° incidence of the CLCbased device operating as a dichroic beam-splitter.



Figure 10. Transmitted WDM character spectrum of the CLC-based device operating as a dichroic beam-splitter.



Figure 11. Reflected WDM charmels spectrum of the CLC device operating as a dichroic beam-splitter.

IV. COMPARISON BETWEEN THREE DIFFERENT WDM MUX/DEMUX

In this section it is compared the three types of 2-channels multiplexing devices performance: CLC-based operating as a dichroic beam-splitter, NT69-215 short-pass filter and a 2x1 POF-coupler from Microparts. A blue and a red spotlight LEDs from DieMount were used. Fig.12 shows their spectra in the same plot. Such LEDs have an integrated parabolic micro-lens that generates light beam at \pm 4° angle divergence.

In Fig.13 three 2-channels spectra are displayed corresponding to the intensity of the light beam multiplexed by the 2x1 POF-coupler (+), the short-pass filter (•) and the CLC-based device (\blacktriangle).

In order to allow correct comparisons, the spectra for the three devices shown on Fig.13 were all measured under the same conditions, such as optical alignment, light source intensity and distances involved.

The most efficient multiplexing is achieved by using the NT69-215 short-pass filter, followed by the CLC-based dichroic beam-splitter and finally by the 2x1 POF-coupler. It can be observed that the CLC-based beam-splitter and the short-pass filter almost equally transmit the red channel. However, the blue channel is ~6 dB attemated due to the (preliminary) construction of the CLC-based device. Assuming the spectrum of the short-pass filter as to be the reference, the POF-coupler attemates the red channel by 11.3 dB and the blue channel by 10.1 dB, whereas the CLC-based beam-splitter attemates the same channels by 0.5 dB and 3.8 dB, respectively.

An ideal MUX/DEMUX should have a flat response to all wavelengths in a specific range. The CLC-based device response depends on the input wavelength due to its design. It was primary thought to be used as a notch filter only. However, it was observed that the filter operates as a dichroic beamsplitter after an angle tuning of 45°.



Figure 12. Spectrum of a blue and a red spotlight LEDs from DieMount.


Figure 13. Multiplexed 2-channel signal achieved by using the 2x1 POFcoupler, the NT69-215 short-pass filter and the CLC-based beam-splitter.

V. CONCLUSIONS

This paper describes a notch filter and a dichroic beamsplitter in a single device based on CLC technology intended to be used as cross-talk suppression filter and MUX/DEMUX device, respectively, aiming the 2-channel visible WDM over PMMA POF links. The notch filter of 7 dB dip was able to suppress the 520 nm channel. We believe that the CLC-based dichroic beam-splitter is a novel contribution, at least in the scope of POF technology. By using a commercially available short-pass filter another MUX /DEMUX device was built and its performance in the spectral domain was compared with the CLC-based device. The achieved result were promising.

The next step of our research aims to build the very first version of a relatively simple and inexpensive 2-channel WDM MUX/DEMUX compact prototype to be used in a real scenario.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Dr. Daniel Stoenescou for providing us the liquid crystals with different birefringence and also for providing the appropriate chiral dopants. The authors are also indebt with INCT-Fotonicom/CNPq, the grant number 556073/2010-0 (MSc. scholarship of Dianne S. V. Medeiros) of CNPq and Faperj for the partial financial support of this research.

REFERENCES.

- O. Ziemman, J. Knauser, P. E. Zamorw and W. Daum, "POF Harabook," 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [2] M. Kamiya, H. Reda and S. Shinohara, "Wavelength-divisionmultiplexed analog transmission through plastic optical fiber for use in factory communications", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 49, no. 2, April 2002.
- [3] W. Tschekalinskij, S. Junger, N. Weber and B. Offenbeck, "Hybrid optical and power outlet for multimedia home networks", Proc. of 14th International Conference on Photic Optical Fibers, pp.361-364, Sep. 2005.
- [4] M. Kagami, T. Yamashita, M. Yonemura, A. Kawasaki and Y. Inui, "A light induced self-written optical waveguide fabricated in photopolymerizing resin and its application to a POF WDM module", Proc. of 12th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp. 183-186, Sep. 2003.
- [5] L. Bartkiv, H. Poisel, Y. Bohitski, "Wavelength Demultiplexer with concave grating for OI-POF systems", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.528-533, Sep. 2004.
- [6] E. A. Dovolnov, S. N. Sharangovich and C.-A. Bange, "Design of wavelength coupler on the base of photopolymeric gratings for POF data systems", Proc. of 13th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp.559-566, Sep. 2004.
- [7] A. Denisov and J.-L. de Bougrenet de la Toenaye, "Resonant gratings in planar Grandjean cholesteric composite liquid crystals," Appl. Opt., vol. 46, pp. 6680-6687, 2007.
- [8] P. C. Lallana, C. Vakuparz, D. S. Monterol, K. Heggarty and B. Vinsazz, "Dual 3x1 multiplexer for POF networks", Proc. of 16th International Conference on Plastic Optical Fibers, pp. 63-70, Sep. 2007.
- [9] K. Sathaye, "Structuring of Liquid Crystals for Optical Technologies", 2012, 152 pp. Thesis (Doctorate in Engineering) – Optics Department, Telécom Berlagne, France, March, 2012.

ANEXO IV - CHOLESTERIC LIQUID-CRYSTAL FILTERS FOR VISIBLE WDM CHANNELS (ILCC 2012)

Cholesteric Liquid-Crystal Filters for Visible WDM Channels

V.N.H. Silva,1* K. Satahye,1 L. Dupont,1 D.S.V. Medeiros,2 R.M. Ribeiro2 and A.P.L. Barbero2

l Optics Department, Telecom Bretagne, Brest, France 2 Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil

1 - Introduction

Notch and dichroic filters for visible spectra are commercially available at US\$ 150-1,300 and ~100, respectively. Besides the complexity of their manufacturing techniques, such filters are expensive for WDM over polymer optical fibres (POFs) to deploy short-haul links [1], e.g. residential networks. The liquid-crystal displays (LCDs) industrie pushes the optical devices based on LCs to be mass-produced at lower cost. This paper describe the development and use of cholesteric liquid-crystal based device to be angle-tuned thus operating as a notch filter or dichroic beam-splitter. The device compactness, simplicity and cost makes it compatible with POF technology [1].

2 - Fabrication and theory of operation

The LC-based device was engineered to be a notch filter for 0° incidence angle. In order to have the bandwidth of 20 nm it was used a nematic LC (MLC-6846-000 Merck Corporation) with feeble birefringence of 0.09. The LC was mixed with a right-handed helicity dopant (R811) to have a cholesteric liquid crystal with a selective reflection tuned in the desired wavelength. The cells are composed by two glasses rubbed with polyimide NISSAN SE410 to give a sufficient anchoring energy and avoiding defects, and glass rod spacers of 5 m dispensed in NOA65 (Norland Glues) which was necessary to glue the substrates and to have a planar uniform cell. Once the cell was completely filled by capillarity, the borders were sealed using the same glue NOA65 without spacers. Another cell with the same characteristics was filled with similar process and mixture concentration, but prepared with a left-handed chiral dopant (S811). These two cells were then put together one top of another to increase the total reflection and complete the entire filter.

3 - Results and discussions

Figure 1 displays the picture of the CLC-device. The glass layers are forming two cells (left and right handed helices) which are overlaid in order to produce the complete filter.



Figure 1 – The picture of the CLC-device.

Figure 2 shows the spectral response of the CLC-device operating at several incident angles: 0° , 12° , 21° , 33° and 45° . There is a blue-shift of the central wavelength of the dips when the incident angle increases, i.e., the CLC-device operates as a angle-tunable filter. It operates as a notch filter at lower incident angles, such as 0° , 12° , 21° and 33° , and as a dichroic beam-splitter at 45° incidence. When used as a notch filter, the central wavelengths of the rejection bands shifts from 520 to 480 nm as the incident angle increases, keeping the spectral widths around 35 nm. When used as a dichroic beam-splitter, it presents 480 nm cut-on wavelength and a 28 nm rejection spectral width.



Figure 2 - The plot of the spectral response when the CLC-device is angle-tuned (notch filter at 00 and dichroic beam-splitter at 450).

Figures 3(a) simultaneously shows the 4-channels light source spectrum generated by multiplexing 460, 520, 590 and 650 nm wavelengths from DieMount LEDs and the notch filter transmittance (\blacktriangle) spectrum at 00. The channel centred on 520 nm is blocked. Figures 3(b) and 3(c) show the transmitted and reflected WDM channels when the CLC-device is operating as a dichroic beam-splitter at 450. There is a leak of the blue channel in the transmitted spectrum. There are also leaks of the green, orange and red channel in the reflected spectrum. The reason is probably due to the primary goal of the CLC-device as to be a notch filter.



Figure 3 – (a) The CLC-device blocking the 520 nm channel at 00, (b) transmitting 520, 590 and 650 nm channels and (c) reflecting the 460 nm channel at 450.

The CLC-device operating as a dichroic beam-splitter might be used to develop WDM multiplexers/demultiplexers based on interference filters technique. It may be used in residential networks and other short-haul links in order to achieve a better exploitation of the link bandwidth and to ease the deployment of the system, since it would be necessary to install half the amount of optical fibres. As a notch filter, the CLC-device might be also used in short-haul links in order to eliminate any undesired crosstalk between adjacent wavelength channels, which may be, or not, WDM channels. The rejection band may be tuned by simply rotating the filter.

References:

[1] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow and W. Daum, *POF Handbook: Optical Short range Transmission Systems*, 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin (2008).

[2] A. Denisov and J. –L. de Bougrenet de la Tocnaye, *Resonant Gratings in Planar Grandjean Cholesteric Composite Liquid Crystals*, Applied Optics, **46**, 6680-6687 (2007).

^{*} presenting author; E-mail: vinicius.nunes@telecom-bretagne.eu

ANEXO V - FIBRAS PLÁSTICAS FLUORESCENTES COMO FILTROS ÓPTICOS PARA USO EM ENLACES WDM DE COMUNICAÇÕES EM DISTÂNCIAS CURTAS (MOMAG 2010)

Fibras Plásticas Fluorescentes Como Filtros Ópticos Para Uso em Enlaces WDM de Comunicações em Distâncias Curtas

Dianne S. V. Medeiros, Patricia Haueisen, Ricardo M. Ribeiro e Andrés P. L. Barbero Laboratório de Comunicações Ópticas Departamento de Engenharia de Telecomunicações Universidade Federal Fluminense Niterói-RJ, Brasil e-mail: dianne_scherly@yahoo.com.br e pathy_03@hotmail.com

Resumo — Este trabalho descreve os experimentos de caracterização espectral de fibras ópticas de poliestireno dopadas com diversos corantes fluorescentes no espectro visível. Tais fibras estão disponíveis comercialmente para propósitos decorativos e de visualização. Estas fibras podem operar como filtros ópticos passa-alta. São de baixo custo e simples de conectar em fibras ópticas de poli-metil-metacrilato (PMMA). Podem ser úteis em enlaces WDM para distâncias curtas baseados nas fibras de PMMA. As características espectrais dos filtros podem ter algum ajuste a partir do comprimento utilizado de fibra fluorescente.

Palavras-chave-Redes de comunicação de dados, fibras ópticas plásticas, fibras ópticas fluorescentes, WDM, filtros ópticos.

I. INTRODUÇÃO

As fibras ópticas de sílica tem sido tradicionalmente utilizadas em enlaces de Telecomunicações, notadamente em médias e longas distâncias [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 tecnologia como um todo é de custo relativamente baixo, incluindo os dispositivos optoeletrônicos necessários [2]. As POFs de PMMA tem sido as mais utilizadas e operam no espectro visível [2]. Os sistemas de multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM) com POFs de PMMA também tem sido desenvolvidos e operam com poucos canais, utilizando LEDs visíveis como fontes ópticas transmissoras [3,4]. Estes canais são usualmente centrados em 470, 505, 525, 570 e 650 nm. As POFs fluorescentes de poliestireno comercialmente disponíveis a baixo custo, são geometricamente compatíveis e de fácil conexão com as POFs de PMMA.

Este trabalho consiste essencialmente em mostrar os resultados da caracterização espectral (transmissão) das POFs fluorescentes, visando a sua utilização como um filtro óptico em sistemas de comunicação baseados em POFs de PMMA.

II. EXPERIMENTAL

A Fig. 1 mostra esquematicamente o sistema experimental utilizado. Um LED branco da Osram, modelo *Dragon*, injeta luz num pequeno segmento de POF de PMMA (70-90 dB/km@570 nm), que, por sua vez, está conectado à POF de poliestireno fluorescente em teste, de comprimento L. Uma POF de poliestireno puro possui atenuação de ~150 dB/km@570 nm. A luz transmitida através da POF fluorescente é capturada por uma fibra óptica de sílica com 50 µm de diâmetro de núcleo, ligada à fenda de entrada de um espectrômetro Thorlabs, controlado por computador, modelo SP1-USB (400-800 nm) baseado num dispositivo de carga acoplada (CCD).



Figura 1. Diagrama esquemático da montagem experimental.

As POFs fluorescentes utilizadas (verde, vermelha e amarela), apresentam uma abertura numérica de 0,58, núcleo de poliestireno com 1,6 de índice de refração e casca acrílica [5]. Cada uma delas apresenta picos de emissão fluorescente ao ser adequadamente excitada. A POF vermelha apresenta um pico de fluorescência centrado em 635 nm e a verde em 490 nm. Porém, a POF fluorescente amarela exibe dois picos de fluorescência, o primeiro centrado em 540 nm e o segundo em 575 nm.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figs. 2, 3 e 4 mostram os espectros de transmissão das POFs fluorescentes verde, amarela e vermelha, respectivamente.

As medidas foram realizadas utilizando o comprimento L da POF fluorescente como parâmetro variando de 0,5 até 10,0 cm, com passos de 0,5 cm entre medidas consecutivas. Observa-se na Figura 2 que com uma POF verde de L = 8,0cm, é possível bloquear em grande parte a transmissão de luz de LEDs azuis, usualmente centrados em 470 nm.

A Fig. 3 mostra que com uma POF amarela de apenas L = 1,0 cm, consegue-se bloquear a transmissão de luz de LEDs centrados em 505 nm, assim como em 470 nm. Observa-se ainda um bloqueio parcial da luz emitida por LEDs verdes centrados em 525 nm.

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



Figura 2. Espectro de transmissão da POF fluorescente verde para L = 0,5 e 8,0 cm.



Figura 3. Espectro de transmissão da POF fluorescente amarela para L = 0,5; 1,0 e 9,5 cm.

A análise da Fig. 4 indica que com uma POF vermelha de L = 6,0 cm, é possível transmitir a luz gerada por LEDs vermelhos, usualmente centrados em 650 nm. Os demais canais visíveis WDM são bloqueados, especialmente o verde e o azul.



Figura 4. Espectro de transmissão da POF fluorescente vermelha para L = 0,5 e 6,0 cm.

Observa-se nos três casos, que os espectros de transmissão (normalizados) exibem uma região de transmissão praticamente nula e outra de transmissão máxima para maiores comprimentos de onda – filtro passa-alta. A transição entre estas regiões é abrupta, quase linear e exibe um "comprimento de onda de corte", para o qual se tem uma transmissão de 0,5. A Fig. 5 ilustra a utilidade (no momento limitada) de uma POF fluorescente inserida num enlace bidirecional WDM com dois canais, no qual as fontes ópticas são LEDs.



Figura 5. Esquema de um enlace bidirecional WDM de POF com 2 canais (PD = foto-diodo).

A POF vermelha utilizada como filtro passa-alta, bloqueia com eficiência a luz azul refletida pelo divisor e retroespalhada pela POF PMMA através do mecanismo de espalhamento Rayleigh. Entretanto, o outro extremo do enlace necessita de pelo menos um filtro passa-baixa, capaz de bloquear o retorno de luz vermelha. Nestas situações, filtros passa-banda (discretos) também podem ser utilizados, embora sejam de integração mais complexa e de maior custo. Filtros passa-baixa discretos são comercializados com custo relativamente alto e sua implementação em fibra óptica parece não ser trivial, mesmo em fibras monomodo [6,7]. No momento, não estão disponíveis filtros passa-baixa em fibras ópticas multimodo [6].

IV. CONCLUSÕES

As POFs fluorescentes disponíveis comercialmente podem servir como filtros ópticos do tipo passa-alta no espectro visível, e permitem um ajuste limitado do comprimento de onda de corte, conforme o L de fibra utilizado. São de baixo custo (< R\$ 0,10/cm) e, por apresentarem diâmetro de 1 mm, são geometricamente compatíveis com POFs de PMMA, o que possibilita conexões fáceis entre ambas as fibras. Medidas de atenuação por inserção em enlaces de POFs de PMMA, tanto de POFs fluorescentes (inclusive com L = 50 cm ou mais) quanto de filtros ópticos discretos, estão em andamento e serão apresentadas no MOMAG2010.

Referências

- G. P. Agrawall, "Fiber-Optic Communication System", 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [2] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow and W. Daum, "POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems", 2nd 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.
- [5] Industrial Fiber Optics <u>www.i-fiberoptics.com</u>.
- [6] N. K. Chen, S. Chi and S. M. Tseng, "Wideband tunable fiber short-pass filter based on side-polished fiber with dispersive polymer overlay", Optics Letters, vol. 29,19, pp. 2219-2221, 2004.
- [7] Y. Chen, Z. Ma, Q. Yang and L. M. Tong, "Compact optical short-pass filters based on microfibers", Optics Letters, vol. 33, 21, pp. 2565-2567, 2008.

ANEXO VI - DATASHEET DAS MICROLENTES DA WT&T

VI.1. MODELO 011

WT&T

www.wttechnology.com; (Tel: +1 -514- 804-0822)

Compact snap-on fiber collimator

Model: 011

Key design features include:

- Compact focusable broadband device with low insertion and polarization dependant losses
- Broadband. Can operate with different FC- SC-ST connectorized fibers. (SMA version is available)
- Epoxy-free light pass for high power operation



Snap-on fiber collimator consists of precise optical lens assembly and can be attached directly to FC-, SC-, ST-or SMA- type optical connector as shown in the photo. It collimates or focuses beams from different multi- or single-mode fiber patch-cords, or couples collimated beams into SM, MM or PM optical fibers. Collimator contains aspheric lens, controllable along Z-axis only, providing collimation or focusing adjustment. Collimator is a compact device, having plastic body.

Preliminary Specifications:

Description	Model 011	Unit
Operating wavelength range	450-2000	nm
Maximum optical power	23	dBm
Size	(5x12)or (4x9)	mm
Collimated beam diameter	~0.3- 1.9	mm
Fiber type*	Hi-980, smf-28, PM, MM (50, 62.5, 105, 200 μm core size)	
Return loss	-3045	dB

* Other connectorized fiber types are available

Fiber core size	Focused beam size ** (FWHM), µm	Collimated beam size *** (FWHM), µm	Collimated beam divergence, Deg
10	~14	~230	0.07
50	~60	1680	0.47
62.5	~75	~1600	0.4
105	~175	~3300	0.9
200	380	~5000	1.8



** Measured at distance of 12 mm from adjusted to focusing device

*** Measured at distance of 200 mm from adjusted to collimation device



Typical field profile, measured at wavelength of 670 nm for collimator attached to AFS 105/125 MM FC/PC connectorized fiber patch-cord. Device was adjusted to focusing



Typical field profile, measured at wavelength of 670 nm for collimator attached to AFS 105/125 MM FC/PC connectorized fiber patch--cord. Device was adjusted to collimation

Applications: optical sensing, active optoelectronic/fiber-optic devices testing, etc.



ALL INFORMATION IS FRELIMENARY AND SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE, PRODUCT MAY VARY FROM PHOTOGRAPH.

VI.2. MODELO 015

WT&T

www.wttechnology.com; (Tel: +1-514- 804-0822)

Pigtailed fiber collimator

Model: 015

Key design features include:

- Compact fiber pigtailed device with low back-reflection and polarization dependant losses
- Broadband device (VIS-IR), choice of pigtail: SM, MM, PM fibers. Optional -connectorization.
- Epoxy-free light pass for high power operation



Compact fiber pigtailed collimator consists of precise optical lens assembly and can be supplied with different type of optical fiber pigtails, having FC/APC, FC/PC or cleaved fiber end, as shown in the photo. It can be set to collimate or focus beams from different multi- or single-mode fibers, or to couple collimated beams into SM, MM or PM optical fibers. Collimator contains aspheric lens, fixed inside metal body, providing collimated or focused beam output. Collimator pigtail can be supplied with optional FC/PC, FC/APC or SMA connectors.

Preliminary Specifications:

Description	Model 015	Unit
Operating wavelength range	450-2000	nm
Maximum optical power	23	dBm
Size	5x30	mm
Collimated beam diameter	~0.6- 1.9	mm
Fiber type*	Hi-980, smf-28, PM, MM (50, 62.5, 105, 200 µm core size)	
	(Length of primary-coated fiber pigtail: ~ 1m)	
Operating temperature	-10 to +65	°C

* Other fiber types are available

Fiber core size	Focused beam size ** (FWHM), µm	Collimated beam size *** (FWHM), µm	Collimated beam divergence, Deg
10	~14	~230	0.07
50	~60	1680	0.47
62.5	~75	~1600	0.4
105	~175	~3300	0.9
200	380	~5000	1.7



** Measured at distance of 12 mm from adjusted to focusing device

*** Measured at distance of 200 mm from adjusted to collimation device



Typical field profile, measured at wavelength of 670 nm for collimator attached to AFS 105/125 MM FC/PC connectorized fiber pigtail. Device was adjusted to focusing. Gaussian fit is shown on the left hand side traces.



Typical field profile, measured at wavelength of 670 nm for collimator attached to 10 micrometers core size FC/PC connectorized fiber pigtail. Device was adjusted to focusing. Gaussian fit is shown on the left hand side traces.

Applications: optical sensing, active optoelectronic/fiber-optic devices testing, etc.



ALLINFORMATION IS PRELIMENARY AND SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE, PRODUCT MAY VARY FROM PHOTOGRAPH.

ANEXO VII - ESPECIFICAÇÕES DO FILTRO MODELO 52530 DA EDMUND OPTICS

VII.1. ESPECIFICAÇÕES

Specifications

Туре	Additive
Color	Blue
Diameter (mm)	12.5
Dimensional Tolerance (mm)	±0.25
Clear Aperture (%)	≥85
Thickness (mm)	2 nominal
Surface Quality	80-50
Angle of Incidence (°)	0
Substrate	BOROFLOAT™
Operating Temperature (°C)	<100
RoHS	Compliant

VII.2. CURVAS



ANEXO VIII - ESPECIFICAÇÕES DO FILTRO MODELO 69215 DA EDMUND OPTICS

VIII.1. ESPECIFICAÇÕES

Specifications	
Dimensions (mm)	25.2 x 35.6
Dimensional Tolerance (mm)	+0.0/-0.1
Thickness (mm)	1.05
Thickness Tolerance (mm)	±0.05
Surface Quality	40-20
Transmitted Wavefront, RMS (λ)	1/4
Transmission Wavelength (nm)	400 - 530
Transmission (%)	>85 Average Polarization
P-Polarization Transmission (%)	>80
S-Polarization Transmission (%)	>80
Cut-Off Wavelength (nm)	550
Cut-Off Tolerance (%)	±2
Reflection Wavelength (nm)	575 - 725
Reflection (%)	>97 Average Polarization
P-Polarization Reflection (%)	>95
S-Polarization Reflection (%)	>95
Slope Factor (%)	3
Angle of Incidence (°)	45
Substrate	Fused Silica
RoHS	Compliant

VIII.2. CURVAS





ANEXO IX - DATASHEET DO FOTODIODO MODELO S6468-02 DA HAMAMATSU

рноторіоі	D E															
												-				
Si PIN photodiode with preamp										8		8	8	P		
So4oo series																
High-speed sensor with preamp																
S6468 series is a high-speed photodetector consisting of a Si PIN photodiode and a preamplifier chip integrated in the same package. They feature high-speed response and high sensitivity over a wide spectral range from visible to near infrared light. The small package (TO-18) allows compact optical design. The amplifier input is at a virtual ground, so external noise which may appear when detecting high-speed signals can be suppressed.																
Features							Ар	plicatio	ons							
 Cut-off frequency (Vcc=5 V) Optical fiber communication S6468 02: 35 MHz Video signal transmission Optical disk pick-up S6468-05: 30 MHz S6468-05: 26 nVrms/Hz^{1/2} S6468-10: 16 nVrms/Hz^{1/2} 																
									~	D DE (0	6468	05/1			1.1.1.1	
Electrical and opt	ical ch	aract	teristics [Ta=25 °	C, Vc S6468	c=5 V,	RL=5	00 Ω, 6468-0	CL=13	S PF (3 Se	6468-0	5	S	=3 p⊢ 6468-1	0	
Electrical and opti Parameter	ical ch Syr	aract	Conditior	Ta=25 °	C, Vc S6468 Typ.	C=5 V, Max.	R∟=5 S Min.	00 Ω, 6468-0 Typ.	CL=13 2 Max.	Min.	5468-0 Typ.	5 Max.	Min.	=3 p⊢ 6468-1 Typ. 0 to 10	0 Max.	Unit
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng	ical ch Syr e α	aract mbol λ .p	teristics [Conditior	Ta=25 ° Min. 3:	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900	c=5 V, Max. 060	RL=5 Min. 32	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800	CL=13 2 Max. 00	S PF (3 St Min. 320	6468-0 Typ. 0 to 100 800	5 Max. 00 -	0. CL S Min. 32	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800	0 Max. 00	Unit nm nm
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity	ical ch Syr e gth λ	aract mbol λ ιp S	teristics [Condition $\lambda = 660 \text{ nm}$ $\lambda = 780 \text{ nm}$	Ta=25 ° Min. 3: - -	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5	C=5 V, Max. 060	RL=5 Min. 32 - -	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11	CL=13 2 Max. 00 - -	Min. 320 - -	5468-0 Typ. 0 to 100 800 7.5 9.5	5 Max. 00 - -	0. CL S Min. 32 - - -	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5	0 Max. 00 - -	Unit nm nm mV/
Electrical and opt Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-impedance	ical ch Syr e gth λ	aract mbol λ μp S 2 7	teristics [Condition $\lambda = 660 \text{ nm}$ $\lambda = 780 \text{ nm}$ $\lambda = 830 \text{ nm}$	Ta=25 ° Min. 3: - - - -	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30	C=5 V, Max. 060 - - -	RL=5 S Min. 32 - - - -	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11 11 20	CL=13 2 Max. 00 - - - -	- - - -	5468-03 Typ. 0 to 100 800 7.5 9.5 9.5 18	5 Max. 00 - - - -	0. CL S Min. 32 - - - -	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10	0 Max. 00 - - -	Unit nm nm mV/ µW
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-Impedance Power supply current	ical ch Syr e gth λ F	aract mbol μ μ β μ μ μ μ μ μ μ μ μ μ μ μ μ	teristics [Condition $\lambda = 660 \text{ nm}$ $\lambda = 780 \text{ nm}$ $\lambda = 830 \text{ nm}$ $R_{L} = \infty$	Ta=25 ° Min. 3: - - - - - - - - - - -	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30 -	c=5 V, Max. 060 - - - - 3	RL=5 S Min. 32 - - - - - - - -	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11 11 20 -	CL=13 2 Max. 00 - - - - 3	- - - - - - - -	5468-0 Typ. 0 to 100 800 7.5 9.5 9.5 18 -	5 Max. 00 - - - - 6.5	0. CL S Min. 32 - - - - - - - - -	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10 -) ' Max. 00 - - - - 18	Unit nm nm mV/ μW kΩ mA
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity wavelend Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage ¹²	ical ch Syr e 2 gth λ F F II	aract mbol λ .p	teristics Condition $\lambda = 660 \text{ nm}$ $\lambda = 780 \text{ nm}$ $\lambda = 830 \text{ nm}$ $R_{L=\infty}$ $R_{L=\infty}$ Pin=0 μ W	Ta=25 ° Min. 3: - - - - - - - - - 0.55	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30 - 0.65	C=5 V, Max. 060 - - 3 0.8	RL=5 S Min. 32 - - - - - - 0.65	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11 11 20 - 0.8	CL=13 2 Max. 00 - - - 3 0.9	Min. 320 - - - - - 1.25	5468-03 Typ. 0 to 100 800 7.5 9.5 9.5 18 - 1.55	5 Max. 00 - - - - 6.5 1.85	Min. 32 - - - - - 1.1	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 5 10 - 1.4	0 Max. 00 - - - - 18 1.8	Unit nm nm mV/ µW kΩ mA V
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage ¹² Temperature coefficient of output bias voltage	ical ch Syr e gth F K	aract mbol λ. μp S 2 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	teristics [Condition λ λ=660 nm λ λ=780 nm λ λ=830 nm RL=∞ RL=∞ Pin=0 µW	Ta=25 ° Min. 3: - - - - - - - 0.55	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30 - 0.65 -2	c=5 V, Max. 060 - - - 3 0.8 -	RL=5 S Min. 32 - - - - 0.65 -	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11 11 20 - 0.8 -2	CL=13 2 Max. 00 - - - 3 0.9 -		5468-05 Typ. 0 to 100 800 7.5 9.5 9.5 18 - 1.55 -4	5 Max. 00 - - - 6.5 1.85 -	Min. 32 - - - - 1.1	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10 - 1.4 -3	0 Max. 00 - - - 18 1.8 -	Unit nm nm mV/ μW kΩ mA V mV/ °C
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage ⁻² Temperature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency watcutter voltage	ical ch Syr e Syr gth A F F Iu V	aract mbol μ μ μ β	teristics [Condition $\lambda = 660 \text{ nm}$ $\lambda = 780 \text{ nm}$ $\lambda = 830 \text{ nm}$ $R \perp = \infty$ $R \perp = \infty$ $Pin = 0 \mu W$ Pin = 10 μW Nonlinear	Ta=25 ° Min. 3: - - - 0.55 - 3 12	C, VC S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30 - 0.65 -2 15	c=5 V, Max.)60 - - - 3 0.8 - -	RL=5 S Min. 32 - - - 0.65 - 28	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 8.0 8.5 11 11 20 - 0.8 -2 35	CL=13 2 Max. 00 - - - - 3 0.9 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	Min. 320 - - - 1.25 - 40	5468-05 Typ. 0 to 100 800 7.5 9.5 9.5 18 - 1.55 -4 50	5 Max. 00 - - - 6.5 1.85 - -	Nin. S Min. 32 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10 - 1.4 -3 100	0 Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	Unit nm mV/ μW kΩ mA V mV/ °C MHz
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-Impedance Power supply current Output bias voltage ¹² Temperature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude	ical ch Syr e gth λ F Γ Ιι ν	aract mbol λ	teristics [Condition $\lambda = 660 \text{ nm}$ $\lambda = 780 \text{ nm}$ $\lambda = 830 \text{ nm}$ $\lambda = 830 \text{ nm}$ $\mu = 0 \mu W$ Pin=10 μW Pin=10 μW	Ta=25 ° Min. 3: - - - - 0.55 - " ³ 12 0.5	C, VC S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30 - 0.65 -2 15 -	c=5 V, Max. 060 - - - 3 0.8 - - -	RL=5 S Min. 32 - - - 0.65 - 28 0.5	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 8.0 8.5 11 11 20 - 0.8 -2 35 -	CL=13 2 Max. 00 3 0.9	S P ((S S (Min. 32(- - - - 1.25 - 40 1.0	5468-05 Typ. 0 to 100 800 7.5 9.5 9.5 18 - 1.55 -4 50 -	Max. 00 - - - 6.5 1.85 - - - - - - - - - - - - -	S Min. 32 - - - - - - - 11.1 - 80 0.8	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 5 10 - 1.4 - 3 100 -)) ' Max. 00 - - - 18 1.8 - - -	Unit nm nm wV/ μW kΩ mA V wV/ °C MHz Vp-p
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage "2 Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output impedance	ical ch Syr ie 2 gth λ F F Iu 1 V	aract mbol λ μp β	teristics Condition λ=660 nm λ=780 nm λ=830 nm RL=∞ RL=∞ Pin=0 μW Pin=0 μW Pin=10 μW Notificear 10 % Max. 10 % Max. Fin=10 % Max.	Ta=25 ° Min. 3: - - - 0.55 - - 0.55 - - 3 12 0.5	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30 - 0.65 -2 15 - 30 - 30 - 30 - 30 - 30 - - 30 - - - - - - - - - - - - -	c=5 V, Max. 060 	RL=5 S Min. 32 - - - 0.65 - 28 0.5 -	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11 11 20 - 0.8 -2 35 - 30 -	CL=13 2 Max. 00	S P ((S S (Min. 320 - - - - 1.25 - 1.25 - 40 1.0 -	5468-05 5468-05 Typ. 10 to 1000 7.5 9.5 9.5 18 - 1.55 -4 50 - 17 - 17 - 20	5 Max. 00 - - 6.5 1.85 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	Nin. 322 	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10 - 1.4 -3 100 - 17)) ' 0 Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	Unit nm nm mW/ μW KΩ mA V mV/ °C MHz Vp-p Ω
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-Impedance Power supply current Output bias voltage "2 Temperature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output impedance Output noise voltage Output noise voltage	ical ch Syr e gth λ F F In N N S S S S S S S S S S S S S S S S S	aract mbol λ	teristics Condition λ=660 nm λ=780 nm λ=780 nm λ=830 nm RL=∞ Pin=0 μW Pin=10 μW Pin=0 μW Pin=10 μW Pin=10 μW Pin=5 μW Pin=10 μW	Ta=25 ° Min. 3 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 15.5 16.5 30 - 0.65 -2 15 - 30 25 -	c=5 V, Max. 060 -	RL=5 S Min. 32 - - - 0.65 - 28 0.5 - - 28 0.5	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11 11 20 - 0.8 -2 35 - 30 28 -	CL=13 2 Max. 00 3 0.9	S (Min. 320 - - - 1.25 - 40 1.0 - - - - - - - - - - - - -	5468-05 5468-05 1yp. 1 to 100 800 7.5 9.5 9.5 9.5 18 - 1.55 -4 50 - 17 26 -	5 Max. 00 - - - 6.5 1.85 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	Nin. 322 	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 4.5 5 5 10 - 1.4 - 3 100 - 17 16 -)) ' Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	Unit nm nm mV/ μW KΩ mA V mV/ °C MHz Vp-p Ω nViHz ¹²¹ %
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity wavelend Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current. Output bias voltage '2 Temperature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output noise voltage Output noise voltage Overshoot Absolute maximum	m ratir	aract mbol β λ β β β	teristics [Condition λ=660 nm λ=780 nm λ=830 nm RL=∞ Pin=0 μW Pin=10 μW Pin=10 μW r=5 Hz Pin=0 μW r=10 μW	Ta=25 ° Min. 3. - - - - - 0.55 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	C, Vc S6468 Typ. 20 to 10 900 13.5 16.5 16.5 30 - 0.65 -2 15 - 30 25 -	C=5 V, Max. 060 	RL=5 S Min. 322 - - - 0.65 - 28 0.5 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	00 Ω, 6468-0 Typ. 10 to 100 8.00 8.5 11 11 20 - 0.8 -2 35 - 30 28 - endec	CL=13 2 Max. 00 - - - 3 0.9 - - - - - - 10	S pr (3 S (6 Min. 32(- - - - 1.25 - 1.25 - 40 1.0 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	00400 Typ. 0 to 1000 8000 7.5 9.5 9.5 18 - 1.555 -4 500 - 17 26 - conditi	Max. Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	S Min. 322 - - - - 1.11 - - 1.11 - - 0.8 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10 - 1.4 - 3 100 - 1.4 - 17 16 -)) ' Max. 00 	Unit nm nm mV/ μW kΩ mA V °C MHz Vp-p Ω nVlHz ¹² %
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity wavelend Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current. Output bias voltage '2 Temperature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output impedance Output noise voltage Overshoot Absolute maximu Parameter	ical ch Syr e gth 2 F l l l v v s m ratir Symbol	aract mbol λ μp λ	teristics [Condition λ=660 nm λ=780 nm λ=780 nm λ=830 nm RL=∞ Pin=0 μW Pin=10 μW Pin=10 μW f=1 MHz Pin=20 μW f=1 MHz Pin=20 μW	Ta=25 ° Min. 3. - - - - - - - - - - - - - - - - - -	C, VC S6468 Typ. 20 to 1(900 13.5 16.5 16.5 30 - 0.65 -2 15 - 30 25 -	C=5 V, Max. 1660 	RL=5 S Min. 322 - - 0.65 - 28 0.5 - - - 28 0.5 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	00 Ω, 6468-0 Typ. 0 to 10 800 8.5 11 11 20 - 0.8 -2 35 - 30 28 - endec ter	CL=13 2 Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	s pr (s s (s (00400 Typ. 10 to 100 800 800 7.5 9.5 9.5 9.5 9.5 1.55 - 1.55 - 1.55 - 1.55 - 1.7 26 - - 26 - - - - - - - - - - - - - - -	5 Max. 100 - - - - - - - - - - - - -	S Min. 32 - - - 1.1 1.1 - - - - - - - - - - - - -	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10 - 1.4 - 3 100 - 17 16 - 468-05 2 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7) 1 0 1 0 0 0 - - - - - - - - - - - - -	Unit nm nm mV/ μW kΩ mA V mV/°C MHz Vp-p Ω nVHz ¹² %
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity wavelend Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage ⁻² Temperature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output impedance Output impedance Output impedance Output impedance Output noise voltage Overshoot Absolute maximu Parameter Power supply voltage ⁴² Power supply voltage ⁴³ Power supply voltage ⁴⁴ Power dissination	ical ch Syn e f f f f f f f f f f f f f f f f f f	πbol πbol λ 0 λ 0 λ 0 λ 0 λ 1<	teristics Condition λ=660 nm λ=780 nm λ=780 nm λ=830 nm RL=∞ Pin=10 µW Pin=10 µW Pin=10 µW Pin=10 µW Fin=10 µW Pin=10 µW Fin=10 µW A Max. 5 7 300 300	Ta=25 ° Min. 3. - - - - - - - - - - - - - - - - - -	C, VC S6468 Typ. 20 to 1(900 13.5 16.5 30 - - 30 25 -	c=5 V, Max. 60 -	RL=5 S Min. 32 - - - 0.65 - 28 0.5 - - - 28 0.5 - - - Supply V	00 02, 0648-0 15, 0648-0 15, 0648-0 10 to 10 10 to 10 800 8.5 11 11 20 - 0.8 - - 35 - - 30 28 - - endec ter voltage	CL=13 2 Max. 00 - - - - 3 3 0.9 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	Star Star Star Star Star Star Star Star	00400 Typ. 10 to 100 800 7.5 9.5 9.5 9.5 9.5 9.5 1.55 -4 1.55 -4 50 - 177 26 - - 177 26 - 5 0 - 177 5 5	Max. 10 - - - - - - - - - - - - -	S 60. CL S Min. 322 - - - - - 1.1 - 80 0.8 - - - - - - - - - - - - -	=3 pF 6468-1 Typ. 0 to 10 800 4.5 5 5 10 - 1.4 - 1.4 - 1.4 - 17 16 - - 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5) - 10 	Unit nm nm mV/ μW kΩ mA V mV/°C MHz Vp-p Ω nVHz ¹² %
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity wavelend Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage ⁻² Temperature coefficient of output soltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output impedance Output impedance Output impedance Output onise voltage Overshoot Absolute maximu Parameter Power supply voltage ⁴² Power supply voltage ⁴² Power supply voltage ⁴² Power dissipation Operating temperature	ical ch Syn e e th 2 th th th th th th th th th th th th th	aract mbol 2 λ 2	teristics [Condition 2.=660 nm 2.=780 nm 2.=780 nm 2.=830 nm R.I=∞ RL=∞ Pin=0 µW Pin=10 µW Pin=10 µW Pin=10 µW f=1 MHz Pin=20 µW f=1 MHz Pin=10 µW h. Max. 5 7 3 300 3 70	Ta=25 ° Min. 3. - - - - - - - - - - - - - - - - - -	C, VC \$6468 Typ. 20 to 11 900 13.5 15.5 16.5 16.5 30 - 0.65 - 30 25 -	C=5 V, Max. 60 	RL=5 S Min. 322 - - 0.65 - - 28 0.5 - - - - - Supply v resista	00 02, (648-0) (648-0) 7yp. 00 to 100 800 8.5 11 11 20 - 0.8 - 20 - 0.8 - 20 - 0.8 - 20 - 0.8 - 20 - 0.8 - 20 - 20 - 0.8 - - 20 - - 0.8 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	Z Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	Stating cc Stating cc 	00460 Typ. 10 to 1000 800 7.5 9.5 9.5 18 - 1.55 -4 155 -4 50 - 17 26 - 17 26 - 5 - -	Max. 100 - - - - - - - - - - - - -	Second Se	=3 pF 6488-1 Typ. 0 to 100 8000 4.5 5 5 5 100 - 1.4 1.4 - 17 16 - 17 16 - 5 5 - 100 - -)	Unit nm mW/ μW KΩ mA V mV/ °C MHz Vp-p Ω nVHz ¹² %
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity wavelend Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage ⁻² Temperature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output impedance Output impedance Output onise voltage Overshoot Absolute maximu Parameter Power supply voltage ⁴ Power dissipation Operating temperature Storage temperature	ical ch Syn e e ath 2 F F F I I V V C P Topr Tstg	aract mbol ↓ λ ↓ μp ↓ 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	teristics [Condition 2.=660 nm 2.=780 nm 2.=780 nm 2.=830 nm R.I=∞ RL=∞ Pin=0 µW Pin=10 µW Pin=10 µW Pin=10 µW f=1 MHz Pin=20 µW f=1 MHz Pin=20 µW f=1 MHz Pin=20 µW f=1 0 µW f	Ta=25 ° Min. 3. - - - - - - - - - - - - - - - - - -	C, VC \$6468 Typ. 20 to 11 900 13.5 15.5 16.5 30 - 0.65 - 30 25 -	C=5 V/ Max. 160 	RL=5 S Min. 322 - - - 0.65 - 28 0.5 - - - - - - Supply v resista ccapaciting term	00 02, (6468-0) 19, (6468-0) 19, (6468-0) 10, (6468-0) 10, (6468-0) 10, (6468-0) 10, (6468-0) 10, (6468-0) 10, (6468-0) 10, (6468-0) 10, (6468-0) 11, (6468-0) 12, (6468-0)	Z Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	Standard Sta	00460 Typ. 10 to 1000 800 7.5 9.5 18 - 1.55 -4 50 - 17 26 - 17 26 - 17 5 - - - - - - - - - - - - -		Second Se	=3 pF 6488-1 Typ. 0 to 100 8000 4.5 5 5 5 100 - 1.4 - 1.4 - 17 16 - 5 5 - 5 - - - - - -) - 10 Max. 00 	Unit nm mW/ μW KΩ mA V mV/ °C MHz Vp-p Ω nVHz ¹² % Unit V Ω O Ω PF °C
Electrical and opti Parameter Spectral response rang Peak sensitivity waveleng Photo sensitivity Trans-impedance Power supply current Output bias voltage '2 Immerature coefficient of output bias voltage Cut-off frequency Maximum output voltag amplitude Output noise voltage Output voltage to Power supply voltage '4 Power dissipation Operating temperature Storage temper	ical ch Syri e	aract mbol λ λ β	teristics [Condition λ=660 nm λ=780 nm λ=830 nm RL=∞ Pin=0 μW Pin=10 μW Pin=10 μW Pin=10 μW Pin=10 μW f=1 MHz Pin=0 μW f=1 mHz f=1 mHz f=	Unit - 0 - -	C, VC S6466 Typ. 20 to 1(13.5 15.5 300 - - 0.65 - 0.65 - - 300 25 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	C=5 V/ Max 160 - - - - - - - - - - - - -	RL=5 S S Min. 322 - - - - - - - - - - - - -	00 00, (1990) 1990) 1990) 1990) 100 10 10 100 10 100 100 100 100 10	CL=13 Max. 00 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	Standard Sta	0 460 00 Typ. 0 to 1000 800 7.5 9.5 9.5 9.5 18 - 1.55 -4 50 - - 1.7 26 - - - - - - - - - - - - -	Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	Second Se	=3 pF =3 pF	0 Max. 00 - - - - - - - - - - - - -	Unit nm mW/ μW kΩ mA V mV/ °C MHz VP-p Ω nVhz ¹² %



ESD
 S6468 series may be damaged or their performance may deteriorate by such factors as electro static discharge from the human body, surge voltages from measurement equipment, leakage voltages from soldering irons and packing materials, etc. As a countermeasure against electro static discharge, the device, operator, work place and measuring jigs must all be set at the same potential. The following precautions must be observed during use:
 To protect the device from electro static discharge which accumulate on the operator or the operator's clothes, use a wrist strap or similar tools to ground the operator's body via a high impedance resistor (1 MΩ).
 A semiconductive sheet (1 MΩ to 100 MΩ) should be laid on both the work table and the floor in the work area.
 When soldering, use an electrically grounded soldering iron with an isolation resistance of more than 10 MΩ.
 For containers and packing, use of a conductive material or aluminum foil is effective. When using an antistatic material, use one with a resistance of 0.1 MΩ/cm² to 1 GΩ/cm².

resistance of 0.1 MΩ/cm² to 1 GΩ/cm² = Wiring = Wiring = RL and CL are total resistive load and capacitive load viewed from the V signal terminal. When connecting a cable or circuit to the latter stage of the basic connection diagram, the cable or circuit resistance and capacitance should also be taken into account. They should be used in accordance with the recommended operating conditions: RLs2600 Ω and CL \leq 13 pF (S6468-05/-10: CL \leq 3 pF). = A bypass capacitor (CE=0.01 µF to 0.1 µF ceramic) is connected between the Vcc lead and the GND lead. = The lead length should be less than 20 mm (S6468/02) and 5 mm (S6468-05/-10). = If electric current or voltage is applied in reverse polarity to an electronic device such as a preamplifier, this can degrade device performance or destroy the device. Always check the wiring and dimensional outline to avoid misconnection.

HAMMAATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions.
 Specifications are subject to change without notice. No patent rights are granted to any of the circuits described herein. @2003 Hamamatsu Photonics K.K.
 HAMMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division
 1126-1 Ichino-cho, Hamamatsu Corporation. 380 Foothil Road, PCL026 Biol, Biolegower, Biol, Bi

Cat. No. KPIN1026E04 Feb. 2003 DN

ANEXO X - ESPECIFICAÇÕES DO FOTODETECTOR MODELO PDA10A DA THORLABS

Si Biased Detector

Chapter 6 Specifications²

Electrical Specifications							
Detector			Si PIN				
Active Area			Ø1 mm (0.8 mm ²)				
Wavelength Range	nge λ		200 to 1100 nm				
Peak Wavelength	λ _p		750 nm (Typ)				
Peak Response	- ℜ(λ	p)	0.45 A/W (Typ)				
Small Signal Bandwidth			150 MHz				
ΝΕΡ (λ _p)	W/√⊦	z	3.5 x 10 ⁻¹¹				
Noise (RMS)			1.5 mVrms				
Max Ouput Current	I _{OUT}		100 mA				
Dark Offset			10 mV				
Load Impedance			50 Ω to Hi-Z				
Transimpedance Gain							
Hi-Z			1 x 10 ⁴ V/A				
50 Ω			5 x 10 ³ V/A				
Output Voltage	Vou	г	0 to 5 V (50 Ω)				
			0 to 10 V (Hi-Z)				
	Gene	ral					
On/Off Switch			Slide				
Output			BNC (DC Coupled)				
Package Size			2.80" x 1.90" x 0.83"				
			(70 mm x 48 mm x 21 mm)				
PD Surface Depth			0.16" (4.1 mm)				
Weight, Detector Only		0.15 lbs					
Accessories			SM1T1 Coupler				
			SM1RR Retainer Ring				
Operating Temp			10 to 50 °C				
Storage Temp			-25 to /0 °C				
AC Power Supply		AC – DC Converter					
Input Power			31 W				
			220 - 240 VAC (50 to 60 Hz)				

Rev C, February 19, 2012

² All measurements performed with a 50 Ω load unless stated otherwise.

Although the power supply is rated for 31 W the PDA10A actual usage is <5 W over the full operating range.

6.1. Response Curve



13054-D02

Page 10