

**IRACEMA APARECIDA SUASSUNA DE OLIVEIRA**

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS  
PLÁSTICAS PARA APLICAÇÃO EM TELECOMUNICAÇÕES**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

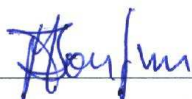
Orientador: Prof. Marlio José do Couto Bonfim, Dr

**Curitiba 2004**

# ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS PARA APLICAÇÕES EM TELECOMUNICAÇÕES

**Iracema Aparecida Suassuna de Oliveira**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná



Prof. Marlio José do Couto Bonfim, Dr.

Orientador



Prof. Oscar da Costa Gouveia Filho, Dr.

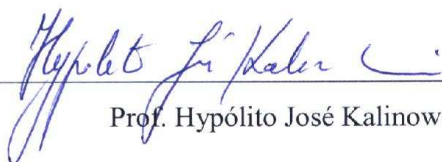
Coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

## Banca Examinadora



Prof. Marlio José do Couto Bonfim, Dr.

Presidente



Prof. Hypólito José Kalinowski



Prof. Wilson Arnaldo Artuzi Júnior, Dr.

Curitiba, 31 de agosto de 2004.

**Ficha Catalográfica**

Oliveira, Iracema Aparecida Suassuna  
ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS PARA  
APLICAÇÕES EM TELECOMUNICAÇÕES

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia/  
Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

**Referência Bibliográfica**

OLIVEIRA, I. A. S. (2004). ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS PARA APLICAÇÕES EM TELECOMUNICAÇÕES Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 162 p.

## Agradecimentos

Prof. Dr. Ivo A. Hümmelgen - Departamento de Física / UFPR – Pelo empréstimo do Laboratório de Dispositivos Optoeletrônicos Orgânicos.

Adriano Dubiel - Departamento de Física / UFPR – Pelos ensinamentos quanto à operação do microscópio metalográfico.

Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski – CPGEI / CEFET – Pelo empréstimo da fibra óptica plástica

Prof. Dr. Maurício Lepiensi - Departamento de Física / UFPR - Pelo empréstimo do Laboratório de Metalografia

Alberto Natori - Departamento de Elétrica / UFPR – Pela colaboração e apoio em algumas discussões pertinentes ao assunto.

Dirceu Busker - Busker Radio Comunicações – Pela execução do suporte para a fibra óptica plástica nas medições de atenuação

Marinoel Joaquim (Mestrando em Engenharia Elétrica) - Departamento de Elétrica / UFPR – Pelos ensinamentos de programação assim como tantos empréstimos de material (livros e lasers).

Rodrigo Sardeto Valloto (Bolsista de iniciação científica, graduando em Engenharia Elétrica na UFPR) - Departamento de Elétrica – UFPR – Pela execução do circuito pulsado para as medidas de dispersão

Aos amigos do Mestrado pela colaboração, apoio e incentivo constantes.

Ao meu Orientador Marlio Bonfim  
pela segunda chance, paciência e excelente orientação.

## **Dedicatória**

À minha melhor amiga,

**Elma Núbia Suassuna de Oliveira**

## Resumo

Fibras ópticas poliméricas (POF) têm despertado interesse crescente nas aplicações em telecomunicações de curtas distâncias, devido à sua maior simplicidade de instalação e menor custo se comparadas às fibras ópticas de sílica. Neste trabalho foi realizado um estudo das POFs com vistas às aplicações em comunicações, tendo sido analisados os diversos parâmetros que definem suas características tais como absorção, dispersão, máxima capacidade de transmissão, etc. Foi efetuado também uma etapa experimental de caracterização de parâmetros ópticos relevantes para comunicações: medidas de atenuação espectral e dispersão intermodal. As medidas de absorção espectral foram efetuadas na faixa do visível ao infra vermelho próximo, região onde as POFs apresentam alta transparência. Com os dados obtidos foi possível a verificação de janelas ópticas de transmissão, além da comparação com dados disponíveis da literatura. As medidas de dispersão intermodal são de fundamental importância nas aplicações em comunicação, pois definem a banda passante ou máxima taxa de transmissão de dados em uma rede óptica. Foram efetuadas medições para três comprimentos de onda distintos (650, 780 e 850 nm). Do comprimento de 850 nm, que apresenta menor largura do pulso óptico facilitando a observação do efeito de dispersão da fibra, não foi possível o registro dos dados devido à sua atenuação muito alta, tendo o sinal na saída da fibra imerso em ruído. Para os outros comprimentos de onda, os resultados obtidos foram comparados com valores teóricos e dados da literatura. De modo geral, obteve-se coerência nos dados experimentais, que comprovam a validade dos procedimentos desenvolvidos para as medições.

## Abstract

Plastic optical fibers (POF) have shown increasing interest in short distances telecommunications, due to its higher simplicity of installation and minor cost if compared with silica optical fibers. In this work a study of the POFs with sights to the applications in communications was carried through, having been analyzed the diverse parameters that define its characteristics such as absorption, dispersion, transmission rate, etc. An experimental characterization of the most relevant optical parameters for communications was also done: spectral measurements of attenuation and intermodal dispersion. The spectral attenuation measurements had been done from the visible to the next infra-red region, where the POFs presents high transparency. With the gotten data, it was possible to verify optical windows of transmission, in addition to the comparison with available literature data. The intermodal dispersion measurements are of great importance for the applications in communication, since they define the bandwidth and data-communication rate in an optical link. Measurements for three distinct wavelengths had been carried out (650, 780 and 850 nm). In despite of the narrow pulse width of 850 nm wavelength, which become easier the verifying of dispersion effect in the fiber, it was not possible to get data about because of its very high atenuation. The output pulse in the end of the fiber was mixed with the noise. For the other wavelengths, the results were compared to theoretical values and data from literature. In general, a good agreement on the experimental data was gotten, what proves the validity of the procedures developed for the measurements.

## Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	Fibras ópticas poliméricas para telecomunicações.....	1
1.2	Caracterização das fibras ópticas poliméricas.....	5
1.3	Descrição dos capítulos.....	6
2	Fibras ópticas poliméricas (POFs).....	8
2.1	Estrutura física das POFs .....	8
2.2	Propriedades ópticas das POFs multimodo.....	11
2.2.1	Absorção (A) e transmitância luminosa (T) de um material .....	11
2.2.2	Perfil refrativo da fibra óptica .....	12
2.2.3	Diferença relativa entre índices de refração ( $\Delta$ ) .....	14
2.2.4	Frequência normalizada (V) .....	14
2.2.5	Número de modos de Propagação dentro da fibra multimodo .....	15
2.2.6	Ângulo crítico, ângulo de aceitação e NA da fibra óptica ID.....	15
2.2.7	Atenuação da fibra óptica.....	17
2.3	Caracterização das perdas de transmissão em fibras ópticas .....	18
2.3.1	Caracterização da perda de potência óptica (atenuação).....	18
2.3.2	Caracterização da capacidade de informação (dispersão).....	20
2.3.3	Técnica de <i>Cut Back</i> .....	21
2.4	Acoplamento óptico em fibras ópticas .....	22
2.4.1	Preparação das terminações das POFs.....	23
2.4.2	Condições de lançamento da luz na fibra óptica .....	24
2.4.3	Comprimento de equilíbrio modal ( $L_{eq}$ ) .....	27
3	Atenuação em POFs.....	30
3.1	O espectro óptico das POFs .....	30
3.2	Mecanismos básicos de atenuação em POFs .....	32
3.2.1	Perdas intrínsecas – Absorção por ressonância molecular .....	33
3.2.2	Perdas intrínsecas – Absorção por ressonância eletrônica .....	35
3.2.3	Perdas intrínsecas – Espalhamento de Rayleigh .....	35
3.2.4	Perdas extrínsecas – Absorção por impurezas.....	36
3.2.5	Perdas extrínsecas – Perdas por radiação .....	37
3.2.6	Perdas extrínsecas – Absorção por imperfeições geométricas e estruturais do guia de onda (Espalhamento de Mie) .....	40
3.3	Procedimento experimental para a medida da atenuação óptica.....	41
3.3.1	Aparato da medida de atenuação espectral.....	41
3.3.2	Parâmetros de resolução do fotospectrômetro RS-325.....	44
3.3.3	Terminação e acabamento da POF .....	46
3.3.4	Posicionamento da POF no compartimento de amostragem do fotospectrômetro .....	47



3.3.5	Condições do acoplamento óptico.....	49
3.3.6	Manipulação dos dados adquiridos .....	52
3.4	Resultados experimentais das medidas de atenuação óptica.....	53
3.4.1	Obtenção do espectro óptico da POF PF PMMA ID.....	54
3.4.2	Incremento da atenuação em função da macrocurvatura induzida na fibra	57
4	Dispersão óptica em POFs .....	61
4.1	O fenômeno da dispersão óptica .....	61
4.1.1	Dispersão intramodal (ou cromática) .....	63
4.1.2	Dispersão não linear .....	66
4.1.3	Dispersão intermodal ou multipercursos .....	66
4.2	Dispersão total do pulso óptico em fibras ópticas multimodo .....	67
4.3	Dispersão intermodal em fibras multimodo índice gradual .....	68
4.4	Dispersão intermodal em fibras multimodo de índice degrau.....	68
4.4.1	Medida da dispersão no domínio do tempo e da frequência .....	71
4.4.2	Parâmetros da dispersão intermodal medidos no domínio do tempo .....	72
4.4.3	Banda passante .....	75
4.5	Procedimento experimental para a medida de dispersão intermodal .....	77
4.5.1	Aparato da medida da dispersão intermodal no domínio do tempo .....	77
4.5.2	Circuito Gerador dos Pulsos Ópticos .....	79
4.5.3	Circuito de Detecção .....	80
4.5.4	Condições do acoplamento óptico.....	81
4.6	Resultados experimentais relacionados à medida de dispersão intermodal.....	83
4.6.1	Alargamento do pulso óptico no domínio do tempo .....	83
4.6.2	Análise dos parâmetros obtidos experimentalmente .....	91
5	Conclusão.....	99
6	Referências bibliográficas.....	101

## **Anexos**

Anexo 1 – Especificações técnicas da fibra Mitsubishi ESKA EXTRA.....	109
-----------------------------------------------------------------------	-----

## Apêndices

Apêndice 1 – Cálculos dos parâmetros básicos da POF PF PMMA ID.....	111
Apêndice 2 – Procedimento de polimento na POF (etapas do polimento).....	112
Apêndice 3 – Medida de atenuação – Diagrama do Fotoespectrômetro RS-325.....	115
Apêndice 4– Medida de atenuação – Menu do aplicativo RS do fotoespectrômetro...	116
Apêndice 5 – Medida de atenuação - Procedimento do ajuste do ponto focal da POF	117
Apêndice 6 – Medida de atenuação – Fluxograma da Obtenção do Espectro de transmitância /absorção da POF .....	118
Apêndice 7 – Medida de Atenuação - Planilha da medição da atenuação espectral da fibra óptica PMMA PF ID POF .....	122
Apêndice 8 – Medida de dispersão - Diagrama dos equipamentos para a medida de dispersão intermodal no domínio do tempo.....	124
Apêndice 9 – Medida de dispersão - Sistema de acoplamento do lado transmissor para a medição de dispersão intermodal.....	125
Apêndice 10 – Medida de dispersão - Sistema de acoplamento do lado receptor para a medição de dispersão intermodal.....	126
Apêndice 11 – Medida de dispersão - Armazenamento dos dados obtidos do osciloscópio no programa Scope Explorer – Trace List.....	127
Apêndice 12 – Medida de dispersão - Procedimento para a extração dos parâmetros de interesse dos pulsos de entrada e saída .....	129
Apêndice 13 – Medida de dispersão - Planilha de registros das medidas de dispersão intermodal .....	131
Apêndice 14 – Medida de dispersão - Diagrama do circuito gerador de pulsos de corrente para a medição da dispersão .....	134
Apêndice 15 - – Medida de dispersão – Quadro-resumo dos resultados de dispersão intermodal .....	135
Apêndice 16 –Simulação da dispersão do pulso óptico injetado na POF .....	136

## Lista de Figuras

Figura 1-1 Comparação das dimensões de núcleo e casca entre uma fibra óptica de sílica monomodo e uma fibra óptica plástica (típica). .....	2
Figura 2-1 Estrutura física de uma fibra óptica plástica. ....	8
Figura 2-2 Perfis de índice de refração das fibras ópticas plásticas (raio do núcleo = a). .....	10
Figura 2-3 Perfis de índice de refração em função do expoente $g$ . ....	14
Figura 2-4 Definição da abertura numérica (NA) em uma fibra de índice degrau (ID). 16	
Figura 2-5 Técnica de <i>Cut-Back</i> : sem alterar as condições de potência e lançamento do sinal luminoso são realizadas medidas (a) em uma fibra de referência e (b) na fibra sob teste. ....	22
Figura 2-6 Condições de lançamento do sinal óptico na fibra: (a) condição de sub-iluminamento (b) condição de super-iluminamento. ....	26
Figura 2-7 Potência óptica <i>versus</i> comprimento da fibra multimodo para diferentes condições de lançamento .....	28
Figura 3-1 Exemplo de espectro óptico de POFs de materiais diferentes. ....	31
Figura 3-2 Monômero MMA. ....	34
Figura 3-3 Mecanismo responsável pelas perdas por macrocurvaturas. ....	38
Figura 3-4 Esquemático do aparato de medida da atenuação espectral da POF .....	42
Figura 3-5 Posicionamento da fibra óptica no compartimento de amostra do fotoespectrômetro junto com os suportes adaptados na transmissão e recepção. ....	43
Figura 3-6 Fotografia do fotoespectrômetro com a POF posicionada nos suportes de transmissão e recepção. ....	43
Figura 3-7 Imagem dos suportes para a entrada (esquerda) e para a saída (direita) do sinal luminoso na fibra. ....	47
Figura 3-8 Posicionamento da fenda adicional junto à fenda do monocromador. ....	49
Figura 3-9 Esquemático para o cálculo do NA de lançamento na ponta transmissora do fotoespectrômetro. ....	50
Figura 3-10 Esquemático para o cálculo do NA de lançamento na ponta receptora do fotoespectrômetro. ....	51
Figura 3-11 Posicionamento (esquema e imagem) da POF em relação à superfície sensível do fotodetector. ....	52

Figura 3-12 Espectro de atenuação da POF PF PMMA ID.....	54
Figura 3-13 Comparação entre o espectro de atenuação do fabricante (ESKA Premium – curva da GH4001) e o obtido experimentalmente.....	56
Figura 3-14 Gráfico da atenuação espectral da POF em função do raio de curvatura. ...	58
Figura 3-15 Gráfico de comparação do incremento de atenuação em função do raio de curvatura em POF PF PMMA ID -Mitsubishi Rayon (dados experimentais e do fabricante). .....	59
Figura 4-1 Alargamento de um pulso óptico após a transmissão em diferentes tipos de fibras. ....	62
Figura 4-2 Efeito de ISI entre dois pulsos adjacentes em uma fibra óptica. ....	63
Figura 4-3 Dispersão material do polímero amorfo perfluorinado, do PMMA e da sílica (SiO <sub>2</sub> ).....	65
Figura 4-4 Representação esquemática da transmissão da luz e alargamento do pulso luminoso através de 15 m de POF ID e POF IG.....	67
Figura 4-5 Definições dos parâmetros de dispersão.....	73
Figura 4-6 Conceitos de banda passante elétrica e óptica na curva de transferência H(f). .....	75
Figura 4-7 Diagrama de blocos do aparato de medida da dispersão do pulso óptico no domínio do tempo. ....	77
Figura 4-8 Fotografias do experimento de medição de dispersão intermodal: a) vista geral; b) detalhe do circuito gerador de pulsos com diodo laser e fibra acoplada. ...	78
Figura 4-9 Gráfico da tensão da descarga do circuito pulsador em função do tempo....	80
Figura 4-10 Circuito de detecção adaptado em conector BNC. ....	80
Figura 4-11 Comparação dos pulsos de entrada para os comprimentos de onda de 650, 780 e 850 nm.....	84
Figura 4-12 Medida em 780 nm em POF com filtro de modos (Medida 1).....	86
Figura 4-13 Medidas com POF enrolada normal (medida 2) e POF esticada (medida 3). .....	87
Figura 4-14 Comparação dos pulsos de saída (ampliados) das medidas da POF normalmente enrolada (medida 2) e da POF esticada (medida 3).....	88
Figura 4-15 Comparação dos pulsos de saída da POF com filtro de modos (medida 1), da POF enrolada normalmente (medida 2) e da POF esticada (medida 3).....	89
Figura 4-16 Medidas dos pulsos de entrada e saída no comprimento de onda de 650 nm. ....	90

Figura 4-17 Formato ampliado do pulso de saída para o comprimento de onda de 650 nm. ....	90
Figura 6-1 – Procedimento da extração dos parâmetros dos pulsos medidos no domínio do tempo. ....	129
Figura 6-2 Diagrama do circuito gerador de pulsos de corrente para a medição da dispersão .....	134
Figura 6-3 Exemplo do gráfico gerado pelo programa de simulação da dispersão.....	138
Figura 6-4 Comparação entre os pulsos de entrada experimental e simulado para 650 nm. ....	139
Figura 6-5 Comparação entre Pulso de saída experimental e simulado para 650 nm..	139
Figura 6-6 Comparação entre pulso de entrada experimental e simulado para 780 nm	140
Figura 6-7 Comparação entre pulso de saída experimental e simulado para 780 nm..	140
Figura 6-8 Comparação entre pulso de entrada experimental e simulado para 850 nm	141

## Lista de Tabelas

Tabela 1-1 Distâncias alcançadas no enlace para o padrão de rede GigaBit Ethernet em 1,25 Gbps.....	2
Tabela 2-1 Exemplos da diferença de índice de refração em POFs da Mitsubishi Rayon (PF PMMA ID).....	9
Tabela 2-2 Classificação das POFs multimodo conforme seu perfil de índice de refração. ....	11
Tabela 3-1 Fatores de perdas e limites de atenuação teóricos para POFs.....	30
Tabela 3-2 Atenuação em fibras com diferentes composições de núcleo.....	31
Tabela 3-3 Comprimentos de onda obtidos experimentalmente para as vibrações fundamentais das ligações C-X.....	33
Tabela 3-4 Perdas induzidas por contaminantes.....	36
Tabela 3-5 Opções de ajuste dos módulos do fotospectrômetro. ....	46
Tabela 3-6 Coef. de atenuação experimental ( $\alpha_{\text{experim.}}$ ) e a especificada pelo fabricante ( $\alpha_{\text{fabric.}}$ ). ....	55
Tabela 3-7 Cálculo teórico do raio de curvatura crítico em função do comprimento de onda.....	60
Tabela 3-8 Recomendações práticas para o raio de curvatura na literatura e fabricantes. ....	60
Tabela 4-1 Fórmulas da diferença dos tempos de propagação para fibra multimodo ID. ....	70
Tabela 4-2 Fórmulas de dispersão intermodal rms para fibra multimodo ID. ....	71
Tabela 4-3 Cálculo da NA e ângulo de aceitação das lentes do lado da transmissão. ...	82
Tabela 4-4 Cálculo da NA e ângulo de aceitação das lentes do lado do receptor. ....	83
Tabela 4-5 Parâmetros FWHM dos pulsos para as medidas em 780nm. ....	89
Tabela 4-6 Dispersões teóricas rms e FWHM calculadas. ....	91
Tabela 4-7 Dispersões rms e FWHM da fibra obtidos experimentalmente. ....	92
Tabela 4-8 Cálculo teórico da banda passante.....	92
Tabela 4-9 Banda passante obtida experimentalmente.....	92
Tabela 4-10 Valores de banda passante divulgados na literatura para a POF ESKA EXTRA.....	93

Tabela 4-11 Atraso, tempos mínimo e máximo de propagação experimentais.....	94
Tabela 4-12 Cálculo teórico da diferença dos tempos de propagação (independente do comprimento de onda e para impulso na entrada da fibra óptica).....	95
Tabela 4-13 Diferença dos tempos de propagação obtidos experimentalmente. ....	96
Tabela 6-1 Tabela dos parâmetros fixos e expressões para a POF amostrada. ....	111
Tabela 6-2 Freqüência normalizada e número de modos de propagação para 650, 780 e 850 nm para a POF PF PMMA ID. ....	111
Tabela 6-3 Tempo necessário de polimento das extremidades finais da POF. ....	113
Tabela 6-4 Comparação de estágios e granulometria nos <i>kits</i> comerciais (2 estágios), em experimento publicado (3 estágios) e os utilizados neste estudo (4 estágios).....	113
Tabela 6-5 Fórmulas para o cálculo da atenuação, dispersão (rms e FWHM) e capacidade do sistema (banda passante).....	130
Tabela 6-6 Medidas do parâmetro FWHM do pulso de entrada. ....	137
Tabela 6-7 Tensão de pico do pulso de entrada elétrico medida (Amplitude $A_0$ ). ....	138
Tabela 6-8 Coeficiente de atenuação fornecido pelo fabricante para a fibra ESKA PREMIER .....	138



## Índice de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Alternate Current</i>
ASC	ASCII (formato de arquivo de dados)
ATM	<i>Asynchronous Transfer mode</i>
BBP	<i>Benzyl n-Butyl Phtalate</i> (dopante)
BEM	<i>Benzyl Benzoate</i> (dopante)
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BNC	<i>Bayonet Neill Concelman connector; British Naval Connector; Bayonet Nut Connector</i>
CAMI	<i>Coated Abrasives Manufactures Institute</i> (norma americana)
CCITT	<i>Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique</i>
CIEL	Centro de Instrumentação Eletrônica (UFPR)
CYTOP	Designação comercial para a POF PF desenvolvida pela Asahi Glass
D2B	<i>Digital Data Bus</i> (5,6Mbps)
DC	<i>Direct Current</i>
DMSO	<i>Dimethyl Sulfoxide</i> (dopante)
DP	<i>Diamond Paste</i>
DPS	<i>Diphenyl Sulfide</i> (dopante)
DPSO	<i>Diphenyl Sulfoxide</i> (dopante)
EH 4001	POF ESKA EXTRA da Mitsubishi (código comercial)
EMD	<i>Equilibrium Modal Distribution</i> (distribuição de equilíbrio modal)
FDDI	<i>Fiber distributed data interface</i> (100 Mbps),
FOTP	<i>Fiber Optic Test Procedure</i>
FWHM	<i>Full Width of the pulse at its Half-Maximum value</i>
GH4001	POF ESKA PREMIUM da Mitsubishi (código comercial)
GPS	<i>Global positioning System</i>
GSM	GSM Global System for Mobile Communication
HV	<i>High Voltage</i> (seletor de tensão no fotoespectrômetro)
ID	Índice Degrau (ou SI – <i>Step Index</i> )
IDB-1394	<i>Intelligent transport system Data Bus</i> - protocolo baseado no IEEE 1394
IG	Índice Gradual (ou GI – <i>Graded Index</i> )

IM	Índice Multidegrau
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
ITU-T	<i>International Telecommunications Union - Telecommunications Standards Section</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LD	<i>Laser Diode</i>
LT	Linha de transmissão
MMA	<i>Methyl Metha Acrylato (Monômero)</i>
MOST	<i>Media Oriented System Transport (25 Mbps)</i>
NA	<i>Numerical Aperture (Abertura Numérica)</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>
PC	Policarbonato
PD	<i>Photo Diode</i>
PD	Polímero perdeuterado
PF	Fluorpolímero; Perfluorinada; polímero amorfo fluorinado
PIN	<i>Positive-Intrinsic-Negative diode</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PMMA	Poly Methyl Metha Acrylato
PMMA-d8	PMMA Perdeuterado
POF	<i>Plastic Optical Fiber ou Polymeric Optical Fiber</i>
POF-LAN	Redes LANs baseadas em POFs
PS	Poliestireno
SAN	<i>Storage Area Network</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SMD	<i>Surface Mount Devices</i>
TIA	<i>Telecommunication Industries Association</i>
TPP	<i>Triphenyl Phosphate (dopante)</i>
TTL	Lógica Transistor Transistor
UV	Ultravioleta

## Índice de Símbolos

$v$	Velocidade da luz em um material qualquer [m/s]
$\Delta$	Diferença relativa dos índices de refração da fibra óptica
$\lambda$	Comprimento de onda da luz que propaga através da fibra óptica [nm]
$\alpha$	Coefficiente de absorção/atenuação [dB/m]
$\tau$	Dispersão [ns/m]
$\omega$	Frequência angular em banda base; domínio da frequência [Hz]
$\sigma$	Largura rms do pulso óptico [ns]
$\Delta\lambda$	Largura espectral rms da fonte óptica [ns]
$\theta_{\text{aceitação}}$	Ângulo de aceitação da fibra óptica [°]
$\theta_{\text{crítico}}$	Ângulo crítico da fibra óptica [°]
$\tau_{\text{FWHM}}$	Dispersão intermodal FWHM [ns/m]
$\tau_{\text{guia}}$	Dispersão guia de onda [ns/(nm.m)]
$\theta_i$	Ângulo de incidência [°]
$\tau_{\text{intermodal}}$	Dispersão intermodal [ns/m]
$\alpha_{\text{macrocurvaturas}}$	Coefficiente de perdas de radiação por macrocurvaturas
$\tau_{\text{material}}$	Dispersão material [ns/(nm.m)]
$\delta_{\text{máx}}$	Ângulo de lançamento da luz na fibra óptica [°]
$\Delta T$	Diferença dos tempos de propagação [ns]
$\tau_{\text{total}}$	Dispersão total ( $\tau_{\text{total}}$ ) sofrida pelo pulso óptico ao longo da fibra óptica
$A$	Absorção [dB]
$a$	Raio do núcleo da fibra óptica [ $\mu\text{m}$ ]
$B$	Banda passante ou Largura de banda [Hz]
$B_{\text{elétrica}}$	Banda passante elétrica ou largura de banda elétrica [GHz.m]
$A_o$	Amplitude máxima do pulso [V]
$B_{\text{óptica}}$	Banda passante óptica ou largura de banda óptica [GHz.m]
$c$	Velocidade da luz no vácuo ( $3 \cdot 10^8$ m/s)
$C$	Taxa de transmissão de dados [Mbps]
$d$	Distância de acoplamento entre a POF e o fotodetector [cm ou mm]
$d_{\text{fibra}}$	Diâmetro externo da fibra óptica [ $\mu\text{m}$ ou mm]
$d_{\text{focal}}$	Distância focal no compartimento de amostra do fotoespectrômetro [cm]

$d_{\text{núcleo}}$	Diâmetro do núcleo da fibra óptica [ $\mu\text{m}$ ]
$f_{\text{lente}}$	Distância focal da lente [mm]
$g$	Expoente (ou parâmetro) do perfil da fibra óptica
$h$	Resposta ao impulso no domínio do tempo
$H(\omega)$	Função de transferência de potência
$L$	Comprimento da fibra óptica [m]
$L_{\text{col}}$	Lente colimadora
$L_{\text{eq}}$	Comprimento de equilíbrio modal ou comprimento de acoplamento [m]
$L_{\text{foc}}$	Lente focalizadora
$M$	Número de modos em uma fibra óptica multimodo [modos]
$n$	Índice de refração
$n_1$	Índice de refração no núcleo da fibra óptica
$n_2$	Índice de refração da casca da fibra óptica
$NA$	Abertura numérica da fibra óptica ( <i>Numerical Aperture</i> )
$NA_{\text{lançamento}}$	Abertura numérica de lançamento ( $NA_{\text{launching}}$ )
$P_{\text{entrada}}$	Potência óptica de entrada na fibra óptica
$P_i$	Potência óptica incidente [W]
$P_{\text{saída}}$	Potência óptica de saída da fibra óptica
$P_t$	Potência óptica transmitida [W]
$r$	Distância radial no núcleo a partir do eixo de simetria da fibra óptica
$R$	Raio de curvatura da fibra óptica [cm ou mm]
$R_{\text{crítico}}$	Raio de curvatura crítico da fibra óptica [cm]
$r_{\text{ilum}}$	Raio da área iluminada [mm]
$r_{\text{lente}}$	Raio da lente [mm]
$T$	Transmitância luminosa
$t_{\text{FWHM}}$	Largura do pulso medida na metade no ponto FWHM [ns]
$T_{\text{máx}}$	Atraso máximo de propagação do raio luminoso na fibra [ns]
$T_{\text{mín.}}$	Atraso mínimo de propagação do raio luminoso na fibra [ns]
$t_{\text{operação}}$	Temperatura de operação ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V$	Frequência normalizada ou parâmetro estrutural da fibra óptica
$V_{\text{pico}}$	Tensão de pico do pulso óptico
$W$	Largura do pulso no domínio do tempo [ns]

# 1 Introdução

## 1.1 Fibras ópticas poliméricas para telecomunicações

O rápido desenvolvimento de tecnologias de microprocessadores, softwares e “displays” tem possibilitado um avanço contínuo das comunicações multimídia (dados, áudio e imagens). Como consequência estão aumentando os requisitos da camada física de transmissão uma vez que existe demanda por taxas de dados cada vez maiores. Em curto prazo esta necessidade está estimada em 100 Mbps a 1 Gbps para aplicações domésticas, o que significa uma melhora de 10.000 sobre as capacidades existentes [1].

No âmbito das curtas distâncias, os meios metálicos de transmissão (par trançado, coaxial, etc) apresentam certa limitação de taxa de bits e não garantem compatibilidade magnética, além de elevarem os custos [2]. Já as fibras ópticas de sílica têm potencial para atender esta demanda embora com custos relativamente elevados decorrentes da natureza de sua tecnologia. Estes fatores têm impulsionado as pesquisas em outros meios físicos, sendo a tecnologia de fibras ópticas plásticas uma forte candidata. Sendo assim, nos últimos 30 anos as fibras ópticas poliméricas ou POF (*Plastic Optical Fiber* ou *Polymeric Optical Fiber*) têm despertado maior interesse da comunidade científica e comercial à medida que as pesquisas direcionadas ao seu desempenho e a descoberta por novas aplicações vêm se ampliando.

É importante ressaltar que a fibra óptica plástica não vem competir com a fibra óptica de sílica visto que suas características não se adequam às longas distâncias (alta perda de transmissão). As POFs são, portanto, uma excelente alternativa para os enlaces de curta distância (até 1 km) nos quais meios como o par trançado e o cabo coaxial poderão ser substituídos, com a vantagem de uma imunidade maior às interferências eletromagnéticas além de ocuparem menor espaço físico pois são menos volumosas e mais leves. A ampla aplicação das fibras de sílica em telecomunicações torna inevitável a freqüente comparação das fibras poliméricas com as de sílica no decorrer deste estudo.

A título comparativo, a Tabela 1-1 mostra o alcance máximo para diversos meios físicos de transmissão utilizando o padrão Ethernet (atualmente a tecnologia de rede de dados mais amplamente utilizada) operando em 1,25 Gbps - *GigaEthernet*.

Tabela 1-1 Distâncias alcançadas no enlace para o padrão de rede GigaBit Ethernet em 1,25 Gbps [3].

Meio físico	Distância alcançada no enlace
Cobre	100 m
Fibra de sílica multimodo	550 m
Fibra de sílica monomodo	5 km
POF PF IG (com bom desempenho de BER)	990 m

O interesse em fibras ópticas plásticas é principalmente decorrente dos custos materiais, de produção, instalação e manutenção apreciavelmente mais baixos tanto sob o aspecto da conectorização quanto para a fibra em si. As atuais fibras ópticas de sílica possuem um núcleo pequeno que requer conectores de alta precisão, causando um sério aumento no custo do sistema óptico [4]. As fibras ópticas plásticas, por sua vez, possuem dimensões do núcleo e fibra bem maiores (120-980  $\mu\text{m}$  / 300-1000  $\mu\text{m}$ ) em relação ao diâmetro do núcleo das atuais fibras de sílica (8 a 10  $\mu\text{m}$  monomodo e 50 a 62,5  $\mu\text{m}$  multimodo). A Figura 1-1 fornece uma comparação das dimensões entre estes dois tipos de fibras. Em geral, as POFs possuem diâmetros de núcleo grandes correspondendo, tipicamente, a 96% da secção transversal do diâmetro da fibra [5].

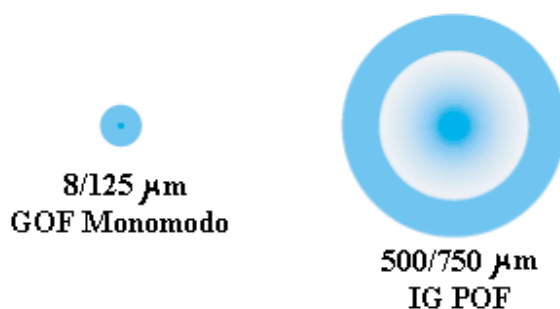


Figura 1-1 Comparação das dimensões de núcleo e casca entre uma fibra óptica de sílica monomodo e uma fibra óptica plástica (típica) [6].

As maiores dimensões físicas da seção transversal das POFs possibilitam a adoção de conectores fabricados através de moldagem por injetoras de plástico o que resulta num dispositivo mais barato [4]. O baixo nível de exigência de precisão no alinhamento facilita a manipulação no ponto de conexão, sem as exigências de ferramentas específicas e mão de obra especializada. Também, devido ao grau de dureza do material PMMA (Poli Metil Meta Acrilato) – a matéria prima mais comum - a terminação da fibra torna-se muito mais fácil e rápida de ser realizada se comparada à fibra de sílica. Os conectores para a tecnologia POF podem ser facilmente montados usando-se um ferrolho de plástico de baixo custo, resultando em perdas de acoplamento experimentais de 0,8 dB para um comprimento de onda de 850 nm [3].

Embora as POFs estejam disponíveis já há alguns anos, apenas recentemente elas tiveram aplicações como meio de alta capacidade de transmissão em razão dos sucessivos melhoramentos em sua atenuação e largura de banda. Em sua história, as fibras ópticas plásticas apresentaram três momentos mais significativos no desenvolvimento de sua tecnologia:

- Em 1968, a primeira fibra óptica plástica feita de material PMMA (Poli Metil Meta Acrilato) com índice degrau (POF PMMA ID) foi fabricada pela Dupont [7].
- Em 1982, a Universidade de Keio (Japão) reportou a primeira fibra óptica plástica com índice gradual (IG). O perfil refrativo foi adaptado para variar gradualmente de forma a melhorar as condições de confinamento da energia luminosa no núcleo e diminuir a dispersão modal que era muito grande nas fibras ID (índice degrau). Isto resultou em significativo aumento na velocidade de transmissão [7].
- Em 1996, o Prof. Koike da Universidade de Keio em conjunto com a empresa Asahi Glass (ambas japonesas) desenvolveram a primeira fibra perfluorinada<sup>1</sup> POF PF IG apresentando significativa redução da absorção de luz no guia de onda. Em Junho de 2000, a fibra POF PF IG foi oficialmente comercializada [8]. A POF de polímero amorfo fluorinado, desenvolvida e designada comercialmente pela Asahi por CYTOP,

---

<sup>1</sup> Perfluorinação - modificação química sofrida pela estrutura molecular do PMMA na qual o hidrogênio é substituído pelo elemento Flúor [7].

apresenta uma atenuação de aproximadamente 30 dB/km, permitindo distâncias de até 1 km para velocidades de transmissão de 1,2 Gbps.

Atualmente, os países líderes no desenvolvimento e aplicação das POF são o Japão (produção) e a Alemanha (instalação em automóveis) [1]. Na indústria automotiva a rede POF cumpre funções de controle do funcionamento do carro além de possibilitar aplicações multimídia, navegação, rádio, GPS/GSM, segurança, etc. A chave para o sucesso da penetração das POF's na indústria automotiva foi o desenvolvimento de padrões de protocolos de rede multimídia para veículos tais como D2B, o MOST (utilizado pela Daimler-Chrysler, BMW, Audi e Volkswagen) e o IDB-1394.

O tipo de fibra - se ID ou IG (mais usuais) - depende basicamente da taxa de transmissão necessária e a distância a ser coberta pelo enlace óptico, fatores correlacionadas respectivamente com a dispersão e a atenuação óptica.

Para aplicações em redes de dados de alta velocidade (até 2,5 Gbps) com enlaces de comprimento de até 1 km, as POFs IG apresentam potencial para aplicações de *office networking* e padrões como o ATM (até 622 Mbps), SDH, FDDI (100 Mbps), Gigabit Ethernet (1,25 Gbps) e Fast Ethernet (100 Mbps). Atualmente, o maior exemplo de rede de comunicações totalmente baseada em POF é a rede da *University of Keio* (Programa *Gigabit House*) no Japão, operando em 1 Gbps [2].

Redes LANs baseadas em POFs (POF-LAN) abrangendo curtas e médias distâncias podem ser implantadas em veículos, trens, aeronaves [2], edifícios, SANs (*Storage Area Network*), aplicações industriais (controle, monitoramento e automação de maquinaria) e em *Home Networks*, redes domésticas de alta velocidade cujo exemplo mais clássico é o barramento serial IEEE 1394 (até 400 Mbps) [24]. O tipo da POF variará de caso para caso.

No âmbito das curtíssimas distâncias, as POFs ID estão aptas a atender ao mercado dos dispositivos digitais domésticos (interfaces de vídeo e áudio), aplicações médicas (transmissão de imagens) e interconexão de sistemas - dentro do próprio equipamento (intrasistema) ou entre equipamentos (extrasistemas) - pois, devido à sua grande flexibilidade, adequam-se perfeitamente ao pequeno espaço disponível. Estas fibras vem



sendo estudadas também para aplicações de interconexão de processadores (microchips eletrônicos e multichips) [1].

## 1.2 Caracterização das fibras ópticas poliméricas

A caracterização de uma fibra óptica é importante pois oferece parâmetros que são fundamentais para a sua aplicação. Estes parâmetros possibilitam ao projetista de sistemas de transmissão ópticos saber se determinada fibra atende aos requisitos de desempenho da aplicação em questão. Os testes para a caracterização da fibra óptica podem ser [10]:

- Perda de potência óptica da fibra: atenuação e comprimento de onda de corte
- Capacidade de informação da fibra: dispersão e largura de banda
- Propriedades geométricas da fibra: diâmetro da casca e do núcleo, abertura numérica e diâmetro de campo modal (*mode field diameter*)
- Medidas de dispersão de polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*): determina a birrefringência e o acoplamento dos modos de polarização.
- Propriedades mecânicas: resistência à tensão, dureza, flexibilidade e durabilidade.

Em laboratório, estes experimentos são em geral feitos com comprimentos contínuos de fibra não cabeada para minimizar a influência de fatores externos sobre as medidas. Porém, a aplicação do guia de onda em campo requer que o projetista preveja uma possível deterioração nas características de transmissão da fibra decorrente da instalação do sistema.

Esta dissertação trata do estudo e caracterização experimental das perdas de transmissão ópticas em POFs visando a aplicação em comunicações de dados. A caracterização será centrada nas medidas de atenuação e dispersão dos sinais que trafegam em uma fibra óptica por serem estes os parâmetros mais usuais nas especificações técnicas destes guias de onda. Com base nestes parâmetros pode-se calcular o desempenho da fibra no que se refere ao alcance dinâmico e a banda passante de transmissão do enlace óptico.

Nas especificações das POFs publicadas pelos fabricantes, no que diz respeito à atenuação, é comum a divulgação do gráfico espectral de atenuação total. Em se tratando dos dados relativos à dispersão, em geral é divulgado apenas a banda passante, porém sem as especificação precisas de como a medida foi efetuada. Com este trabalho pretende-se estabelecer conhecimento teórico e prático na área de POFs em telecomunicações e outros temas afins. A metodologia utilizada na caracterização permitirá obter, além das informações tradicionais, dados complementares tais como acoplamento de modos, desempenho óptico em POF sob condições específicas, etc. Em pesquisa na rede Internet durante o decorrer deste trabalho, não foi encontrada nenhuma empresa ou universidade que dispusesse de tais medições. A falta de prestação deste serviço deve-se, em parte, ao fato de que a fibra óptica plástica ainda tem uma aplicação restrita.

Recentemente uma empresa de grande porte, fabricante de fibras ópticas de sílica no Brasil, tentou realizar a medição de atenuação de um cordão óptico do qual é representante, porém não obteve sucesso. A grande dificuldade reside no acoplamento entre a fibra e os dispositivos de transmissão e recepção da luz. Apesar de seu grande núcleo, que deveria facilitar as medições, ainda não há grande disponibilidade de dispositivos de acoplamento para as POFs como há para as fibras de sílica. O confinamento da luz é realizado com o auxílio de um sistema óptico de lentes colimadoras e convergentes, contudo, o alinhamento destas lentes com os dispositivos e a fibra é relativamente crítico, o que dificulta a obtenção da repetibilidade nas medidas.

No momento atual, não há disponibilidade comercial no Brasil de POFs para fins de comunicação de dados, o que tornou difícil a obtenção de uma fibra para os testes pretendidos. No comércio brasileiro as POFs são encontradas apenas para fins de iluminação. Além disso, apesar da promessa de baixo custo devido à natureza de seu material, ela ainda é cara em função de sua produção em pequena escala.

### **1.3 Descrição dos capítulos**

O capítulo 2 trata sobre os aspectos tecnológicos das POFs que são relevantes para este trabalho. É feita uma abordagem sobre sua estrutura física, assim como sobre as suas propriedades ópticas que são amplamente aplicadas nos testes de caracterização de

atenuação óptica e dispersão, cujas metodologias e outros assuntos relacionados também são detalhadas.

O capítulo 3 é dedicado especificamente aos assuntos diretamente relacionados à atenuação nas POFs, sendo primeiramente abordado a teoria dos mecanismos básicos das perdas que ocorrem na POF (intrínsecas e extrínsecas). Na seqüência é detalhado todo o procedimento adotado para a medição da atenuação espectral assim como todos os recursos desenvolvidos para a viabilização das medidas. Por fim, são apresentados os resultados experimentais acompanhados de suas respectivas análises.

O capítulo 4 apresenta, por sua vez, as medidas de dispersão modal nas POFs, tratando num primeiro instante da teoria dos fenômenos de dispersão que sofrem os diferentes tipos de fibras poliméricas. Depois, segue a explanação sobre os procedimentos experimentais adotados com posterior apresentação dos resultados experimentais e suas respectivas análises.

Por fim, o capítulo 5 discorre sobre as conclusões de maior relevância deste trabalho assim como perspectivas e recomendações para medições futuras.

## 2 Fibras ópticas poliméricas (POFs)

### 2.1 Estrutura física das POFs

Uma fibra óptica é um guia de onda composto basicamente de material dielétrico transparente (em geral sílica ou plástico) altamente flexível, constituindo uma longa estrutura cilíndrica de dimensões transversais bastante reduzidas. Estruturalmente, as fibras ópticas plásticas diferenciam-se das fibras de sílica por serem construídas de material polimérico, suportarem maior tensão mecânica e possuírem um núcleo muito maior. Os materiais poliméricos utilizados para sua fabricação são o Poliestireno (PS), o Poli Metil Meta Acrilato (PMMA), o Fluorpolímero (PF), o Policarbonato (PC) e derivados de Poliolefinas. O material mais utilizado comercialmente é o PMMA cuja transmitância (ou transparência) atinge 92 %, pouco menos do que a do Óxido de Silício (fibra de sílica) que é praticamente 100 % na faixa de 400 a 800 nm.

A estrutura cilíndrica básica da POF é formada por uma região central denominada núcleo, envolta por uma camada denominada casca. Usualmente, a seção em corte transversal do núcleo é a circular, porém alguns tipos de fibras ópticas especiais podem apresentar um outro tipo de seção, como por exemplo, a elíptica, cujo objetivo é manter a polarização da luz ao longo do comprimento da fibra [22].

Se a fibra for cabeada, ela será recoberta por uma capa de proteção mecânica que provê robustez sendo em geral feita de polietileno, embora *polivinilchloride* e polietileno clorinado possam também ser usados [7]. A Figura 2-1 ilustra a estrutura da POF.



Figura 2-1 Estrutura física de uma fibra óptica plástica.

Em função de sua própria concepção – dimensão de núcleo grande - a fibra óptica plástica possui comportamento multimodo. Não obstante, tecnicamente é viável a construção de uma POF do tipo monomodo.

O mecanismo básico de propagação da luz ao longo da fibra baseia-se na reflexão total que ocorre na interface núcleo-casca, sob a condição de que o ângulo de incidência do raio luminoso com a interface seja maior que o ângulo crítico. Desta forma, a luz é repetidamente refletida até atingir o final da fibra. A condição física que determina a propagação da energia luminosa através do núcleo da fibra óptica é que o índice de refração da casca seja ligeiramente inferior ao do núcleo, tipicamente valores entre 0,001 a 0,02 (ou 0,1 % a 2 %) para sílica [32]. Já para as fibras poliméricas estes valores são um pouco maiores, em torno de 0,05 (5 %), podendo chegar a 0,1 (10 %) [9] o que resulta em uma maior abertura numérica (NA).

A diferença do índice de refração  $n$  do núcleo com relação à casca é representada pelo perfil de índices da fibra óptica. A alteração do índice de refração é obtida através do uso de materiais dielétricos distintos ou através de dopagem. No caso da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é comum a utilização de dopantes de materiais semicondutores (óxidos de não-metais ou semi-metais) como o óxido de Germânio ( $\text{GeO}_2$ ), o óxido de Fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e o óxido de Boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ). Já no caso das POFs, os dopantes são em geral monômeros tais como o *Benzyl n-Butyl Phthalate* BBP ( $n=1,540$ ), o *Benzyl Benzoate* BEM ( $n=1,568$ ), o *Diphenyl Sulfide* DPS ( $n=1,633$ ), o *Triphenyl Phosphate* TPP ( $n=1,563$ ), o *Diphenyl Sulfoxide* DPSO ( $n=1,606$ ) e o *Dimethyl Sulfoxide* DMSO ( $n=1,479$ ) [25]. A Tabela 2-1 compara os índices de refração entre núcleo e casca para diferentes tipos de POF's.

Tabela 2-1 Exemplos da diferença de índice de refração em POFs da Mitsubishi Rayon (PF PMMA ID).

Tipo	$n_{\text{núcleo}}$	$n_{\text{casca}}$	Dif. dos índices de refração
ESKA, Super ESKA e ESKA Premier	1,492	1,402	0,0585
ESKA Extra	1,492	1,417	0,0490
ESKA D-type ( <i>heat resistance</i> )	1,492	1,392	0,0648
ESKA F-type ( <i>heat resistance</i> )	1,582	1,392	0,1129

Os perfis de índice de refração das fibras plásticas são classificados conforme a Figura 2-2 em índice degrau ID (ou SI – *Step Index*), índice Multidegrau, índice gradual IG (ou GI – *Graded Index*) e Multinúcleos [7].

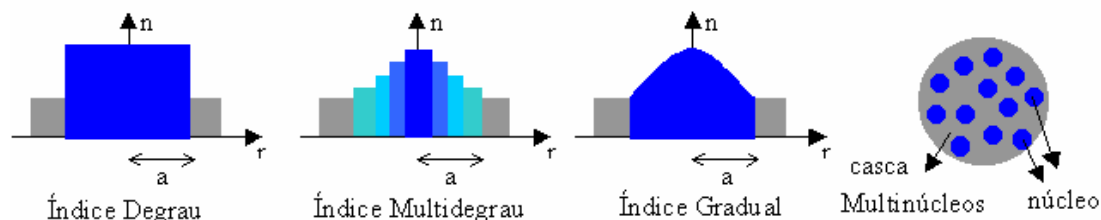


Figura 2-2 Perfis de índice de refração das fibras ópticas plásticas (raio do núcleo =  $a$ ).

Em telecomunicações, as fibras poliméricas com maior disponibilidade comercial atualmente são as de perfil de índice degrau (ID) e de índice gradual (IG). O tipo de perfil é fortemente responsável pelo alargamento sofrido pelos pulsos luminosos ao longo da fibra, fenômeno denominado dispersão. Tanto para as fibras de vidro quanto para as POFs é fundamental o conhecimento sobre o perfil refrativo e seu relacionamento com a dispersão do pulso luminoso na fibra. Este assunto será tratado com detalhes no capítulo 4.

Nas POFs ID, o núcleo geralmente é feito de PMMA enquanto na casca é usado o fluor-polímero (PF). Neste caso, a diferença dos índices de refração entre núcleo e casca está em torno de 0,1, resultando em uma NA consideravelmente grande, e conseqüentemente, numa maior dispersão. A NA típica para uma POF ID está em torno de 0,5 (ângulo de aceitação de  $60^\circ$ ). Há também as POFs ID de NA pequena, as quais permitem a propagação apenas dos modos de baixa ordem reduzindo desta forma a dispersão modal.

Em geral as POFs ID são aplicadas para transmissão de dados, guia de imagem e iluminação. Em comparação com as POFs IG, as POFs ID apresentam atenuação mais alta e largura de banda modal limitada, sendo portanto amplamente empregada em enlaces curtos de baixo custo.

Devido à alta dispersão presente nas POFs ID, foi desenvolvida a fibra POF IG cuja distribuição de índices no núcleo apresenta um perfil parabólico, compensando os efeitos

da dispersão. Este fator é o que torna as fibras plásticas IG a solução mais apropriada para a comunicação de dados entre computadores e LANs.

A Tabela 2-2 apresenta as principais aplicações das POFs em telecomunicações em função das suas capacidades de transmissão de dados.

Tabela 2-2 Classificação das POFs multimodo conforme seu perfil de índice de refração [7].

Perfil Refrativo	Capacidade de transmissão (BxL)	Aplicação em telecomunicações
Índice Degrau (ID)	3 MHz.km 5 MHz.km [12]	Comunicações de curtas distâncias
Índice Multidegrau (IM)	30 MHz . km	Comunicações de curtas e médias distâncias. Baixa dispersão modal. Adequada para a produção em massa.
Índice Gradual (IG)	600 MHz . km	Comunicações de curtas e médias distâncias. Baixa dispersão modal
Multinúcleos	55 MHz . km	Alta estabilidade de atenuação para curvaturas.

## 2.2 Propriedades ópticas das POFs multimodo

As expressões aqui descritas são provenientes do método de Análise Óptico-Geométrico, apropriado para as fibras ópticas multimodo. Visto que o enfoque do presente estudo é experimental, a formulação apresentada foi obtida da teoria vigente neste campo sem que ela tenha sido verificada matematicamente. Várias referências foram analisadas sendo escolhida a mais coerente do ponto de vista conceitual para os propósitos desta pesquisa quando as fontes apresentavam diferenças de formulação entre elas.

### 2.2.1 Absorção (A) e transmitância luminosa (T) de um material

Quando um material opticamente absorvente é atravessado por um feixe luminoso ele deixa passar parte da luz (transmitância), sendo que outra parte é absorvida no próprio

material (absorção) em sua estrutura molecular, ou ainda refletida na sua superfície (Refletância). Estes parâmetros são dependentes do comprimento de onda da luz.

A transmitância luminosa é definida como sendo a razão entre a potência radiante transmitida através do material e a potência radiante incidente [26] podendo ser expressa como uma relação de potências:

$$T = \frac{P_t}{P_i} \quad (2-1)$$

onde  $P_t$  é a potência óptica transmitida e  $P_i$  é a potência óptica incidente.

A absorção (A) é dada pelo logaritmo da razão entre a potência radiante incidente e a potência radiante transmitida através da amostra de um determinado material, ou seja, a absorção é o logaritmo do inverso da transmitância (em dB):

$$A = \log_{10} \left( \frac{P_i}{P_t} \right) = \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) = -\log_{10} T \quad (2-2)$$

A curva de transmitância demonstra a transparência do material, isto é, quanto maior a razão, mais luz foi transmitida através da amostra e mais transparente é o material.

### 2.2.2 Perfil refrativo da fibra óptica

Uma forma de classificar opticamente um material transparente é através do índice de refração que é dado pela razão da velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s) e a velocidade da luz no material transparente ( $v$ ):

$$n = c/v \quad (2-3)$$

O índice de refração é uma importante propriedade a ser considerada nos projetos de sistemas ópticos. Em uma POF, o índice de refração do núcleo varia com a distância radial, definindo desta forma o perfil refrativo da fibra, que pode ser expresso por [7]:



$$\text{Para } r \leq a \quad n(r) = n(0) \cdot \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} = n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} \quad (2-4)$$

$$\text{Para } r > a \quad n(r) = n(0) \cdot \sqrt{1 - 2\Delta} = n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 \quad (2-5)$$

Onde  $a$  é o raio do núcleo da fibra

$r$  é a distância radial no núcleo a partir do eixo de simetria da fibra

$n(r)$  é a variação do índice de refração na direção radial

$n(0)$  é o índice de refração no eixo de simetria da fibra (centro)

$\Delta$  é a diferença relativa dos índices de refração

$n_1$  é o índice de refração no núcleo

$n_2$  é o índice de refração da casca

$g$  é o expoente do perfil da fibra

O fator  $g$  é denominado expoente (ou parâmetro) do perfil da fibra óptica visto que diferentes perfis do índice de refração estão relacionados a diferentes valores para este expoente. Os valores usuais para  $g$  são basicamente três:  $g = 1$  (IG perfil triangular);  $g = 2$  (IG perfil parabólico);  $g = \infty$  (ID perfil degrau). Na prática, o valor ótimo para o fator  $g$  situa-se próximo do valor 2, condição que minimiza a dispersão e conseqüentemente possibilita uma maior largura de banda. A Figura 2-3 ilustra os vários perfis refrativos de acordo com o parâmetro  $g$ .

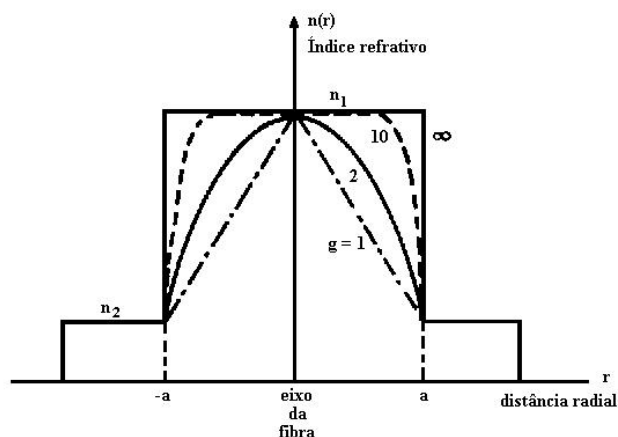


Figura 2-3 Perfis de índice de refração em função do expoente  $g$ .

### 2.2.3 Diferença relativa entre índices de refração ( $\Delta$ )

A diferença relativa entre índices de refração ( $\Delta$ ) refere-se à relação fracionária da modificação do índice de refração na interface núcleo-casca sendo dada por ([13], [43], [7], [29] e [32]):

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2.n_1^2} \quad (2-6)$$

Para a condição na qual a diferença relativa dos índices é muito menor do que a unidade ( $\Delta \ll 1$ ) a seguinte aproximação pode ser considerada ([13],[33],[12],[29] e [30]):

$$\Delta(\Delta \ll 1) = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad (2-7)$$

### 2.2.4 Frequência normalizada ( $V$ )

Um importante parâmetro relacionado à condição de corte é o número  $V$ , também designado por frequência normalizada ou parâmetro estrutural. O parâmetro estrutural  $V$  é um número adimensional que determina quantos modos a fibra pode propagar. Ele também

define a fronteira entre o comportamento monomodal e o multimodal da energia óptica ao longo da fibra, sendo expresso por ([13], [43], [33], [7] e [32]):

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-8)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz que propaga através da fibra

NA é a abertura numérica da fibra (*Numerical Aperture*)

### 2.2.5 Número de modos de Propagação dentro da fibra multimodo

O número V pode ser também usado para expressar o número de modos M em uma fibra multimodo quando V for considerado grande ( $V \gg 1$ ). Para este caso, uma estimativa do número total de modos suportado pela fibra é ([13], [7], [29] e [32]):

$$M \approx \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \right)^2 \cdot (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2} \quad (2-9)$$

### 2.2.6 Ângulo crítico, ângulo de aceitação e NA da fibra óptica ID

Um feixe de luz meridional, como mostrado na Figura 2-4 para uma fibra ID, entrando no núcleo da fibra com um ângulo  $\theta_i$  a partir de um meio com índice de refração n (supõe-se como sendo o ar), sofre refração num ângulo  $\theta_r$  com o eixo, e colide com a interface núcleo-casca em um ângulo normal  $\theta$ . Se este raio incidir na interface em um ângulo menor que o chamado ângulo crítico ( $\theta_{\text{crítico}}$ ), ele será refratado para a casca. Caso contrário, se o ângulo de incidência situar-se além do ângulo crítico, o raio será totalmente refletido (fenômeno de reflexão interna total) seguindo então sucessivas reflexões internas no núcleo da fibra e ao longo dela até a extremidade final. Da Lei de Snell, o ângulo crítico que dá suporte à reflexão interna total para o raio é dado por:

$$\theta_{\text{crítico}} = \text{arc.sen} \frac{n_2}{n_1} \quad (2-10)$$

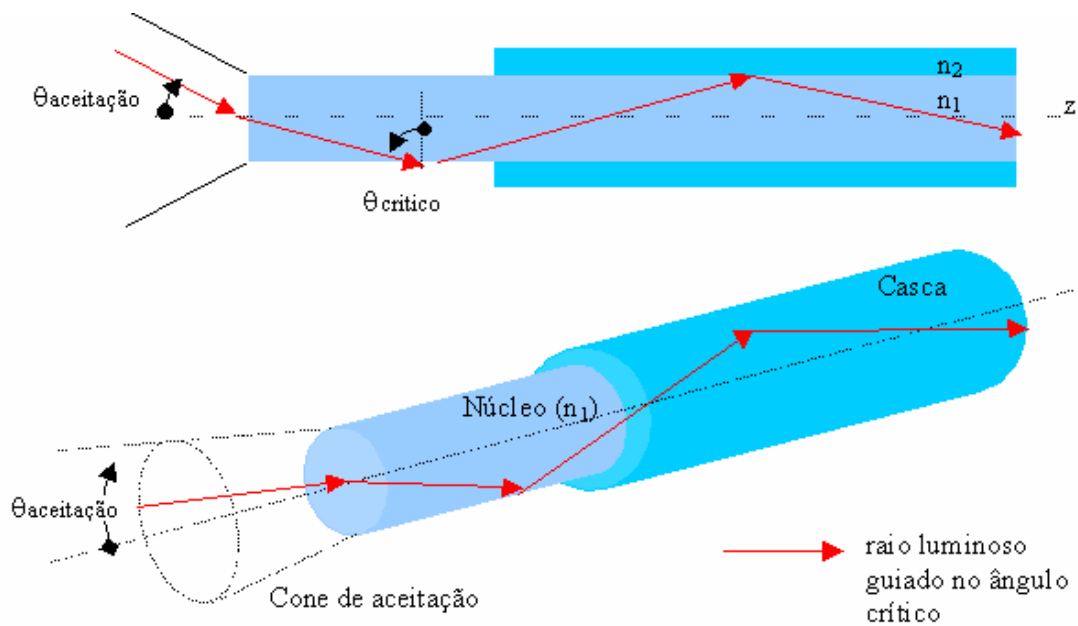


Figura 2-4 Definição da abertura numérica (NA) em uma fibra de índice degrau (ID).

A condição da equação anterior pode ser relacionada ao ângulo máximo de entrada - denominado de ângulo de aceitação da fibra - através da relação:

$$\text{sen}\theta_{\text{aceitação}} = n_1 \cdot \text{sen}\theta_{\text{crítico}} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2-11)$$

$$\text{ou} \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-12)$$

Onde  $n_1$  é o índice de refração no núcleo

$n_2$  é o índice de refração da casca

$\theta_{\text{aceitação}}$  é o ângulo de aceitação da fibra (em relação à normal)

A abertura numérica (ou NA) também pode ser dada em função de  $n_1$  e  $\Delta$ :

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2-13)$$

Portanto para o cálculo do ângulo de aceitação da fibra tem-se:

$$\theta_{\text{aceitação}} = \arcsen NA \quad (2-14)$$

A abertura numérica (NA) de uma fibra óptica ID é definida como sendo o campo angular dentro do qual qualquer raio luminoso será aceito e guiado internamente dentro da fibra óptica. Este campo angular é obtido do ângulo de aceitação da fibra. A NA é um importante parâmetro óptico da fibra que afeta características tais como a eficiência na capacidade de captura e guiamento da luz, a frequência normalizada da fibra ( $V$ ), o número de modos de propagação dentro da fibra (também definindo a região de modo único nas fibras monomodo) os quais afetam a dispersão intermodal e, possivelmente, a atenuação da fibra (atenuação diferencial de modos).

Uma NA grande indica maior capacidade para aceitar a luz, facilitando o acoplamento (alinhamento) da POF à fonte opto-eletrônica. A NA típica de uma fibra plástica (em geral em torno de 0,5) é muito grande quando comparada às das fibras de sílica com NA 0,14 cujo ângulo de aceitação é  $16^\circ$  [9]. Entretanto, uma NA grande traz consigo a desvantagem de possibilitar um grande número de modos de propagação (proporcional a  $NA^2$ ), que causa um efeito de aumento na dispersão intermodal.

### 2.2.7 Atenuação da fibra óptica

No contexto das comunicações ópticas, a atenuação representa a perda de potência enquanto o sinal luminoso trafega ao longo de uma fibra óptica, sendo o resultado dos fenômenos de absorção, espalhamento e irradiação presentes no guia de onda [10]. Cada mecanismo de perda contribui de forma independente para o montante total da atenuação na fibra. Esta atenuação total varia com o comprimento de onda e, portanto, sua medida é feita em função deste.

O coeficiente de atenuação da fibra óptica ( $\alpha$ ) expressa o valor da atenuação como uma função do comprimento  $L$  de uma fibra esticada de forma que não haja atenuações por macrocurvaturas [7]. Considerando  $z$  o eixo de propagação ao longo do guia, este coeficiente é definido em termos da relação de potência luminosa na entrada da fibra ( $z = 0$ ) e a potência luminosa em um outro ponto  $z$  do guia. Esta relação, em dB/m, pode ser expressa das seguintes formas:

$$\alpha = -\frac{1}{z} \cdot 10 \log_{10} \frac{P(z)}{P(0)} \quad \text{ou} \quad P(z) = P(0) \cdot 10^{-\alpha \cdot z} \quad (2-15)$$

onde  $P(0)$  é a potência luminosa na entrada da fibra ( $z = 0$ ) e  $P(z)$  é a potência luminosa em um ponto de comprimento  $z$  da fibra.

Ou seja, a potência decresce exponencialmente com a distância  $z$ . A definição de atenuação também permite que ela seja expressa em base neperiana (Nep/m), isto é:

$$\alpha = -\frac{1}{z} \cdot \ln \frac{P(z)}{P(0)} \quad \text{ou} \quad P_z(t) = P(0) \cdot e^{(-\alpha \cdot z)} \quad (2-16)$$

Na simulação apresentada no Apêndice 16 foi aplicada esta expressão neperiana.

Para fibras ópticas, é interessante a avaliação em termos de perdas de transmissão por comprimento de fibra. Isto é importante, inclusive, para a comparação com as curvas do fabricante da fibra que é fornecida desta forma. No caso das fibras ópticas de sílica, cujos enlaces são na ordem de quilômetros, a atenuação é dada em dB/km. Já para as fibras ópticas plásticas, cujas atenuações são bem maiores, as distâncias estão na ordem de centenas de metros sendo a unidade usual o dB/m.

## 2.3 Caracterização das perdas de transmissão em fibras ópticas

Como o enfoque deste trabalho é a caracterização da perda de potência óptica e da capacidade de informação da fibra, serão analisados apenas os métodos de caracterização pertinentes a estes dois tópicos. Na literatura estudada foram identificadas algumas metodologias para a determinação de atenuação e dispersão em fibras ópticas sendo descritas a seguir.

### 2.3.1 Caracterização da perda de potência óptica (atenuação)

A perda de potência numa fibra é um fator limitante porque reduz a potência que alcança o receptor. Uma vez que receptores ópticos precisam de um nível mínimo de potência para a recuperação do sinal de forma correta, a distância de transmissão está inerentemente limitada pela fibra óptica. Portanto, a atenuação, dada em função da perda de

potência pela distância, determina a distância máxima que um enlace óptico pode alcançar em um dado comprimento de onda (alcance dinâmico).

Para a medida da atenuação total em uma fibra óptica, os seguintes métodos podem ser utilizados:

- **Método de perda de Inserção:** uma potência óptica em determinado comprimento de onda é inserida na fibra sendo a atenuação medida com um medidor de potência (*powermeter*) na outra extremidade. Este método não oferece muita exatidão pois é dependente da repetibilidade das condições de acoplamento. É muito utilizado em testes de campo.
- **Método de fotoespectrometria:** utiliza uma fonte de luz branca (policromática) como transmissor, um fotodetector e um analisador de espectro óptico. Nesta montagem, a diferença dos dois sinais (em dB) é obtida em função da frequência óptica, permitindo avaliar, simultaneamente, a atenuação da fibra para vários comprimentos de onda. Outras designações podem ser encontradas para este método tais como método de *Cut-Back* Sofisticado [22] e técnica de “Dois Pontos” ou Diferencial [35].
- **Método de Reflectometria com OTDR:** através do equipamento OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*), em um determinado comprimento de onda, pode-se visualizar todas os eventos de atenuação e reflexão ao longo da fibra assim como suas localizações. Este teste é mais adequado para a utilização de enlaces já instalados em campo.

Neste trabalho foi adotado o método no domínio da frequência com fotoespectrômetro utilizando técnica de *Cut-Back*. Para tanto, utilizou-se equipamento de fotoespectrometria por dispersão angular com elemento dispersor da luz baseado em grades de difração. Este método, entre os outros métodos existentes, é tido como sendo de elevada resolução e boa sensibilidade, garantindo assim um resultado confiável [22].

### 2.3.2 Caracterização da capacidade de informação (dispersão)

A dispersão limita o desempenho dos sistemas de comunicação por fibra óptica pelo alargamento dos pulsos ópticos no domínio do tempo enquanto eles se propagam ao longo da fibra. O alargamento dos pulsos é decorrente dos diferentes valores de velocidade de grupo durante a transmissão. A partir da medida de dispersão, examina-se as limitações da fibra em termos de capacidade de transmissão, sendo expressa pela taxa de transmissão (em bps) ou pela banda passante (em Hz), para sistemas digitais ou analógicos respectivamente. Os seguintes métodos de medidas são utilizados:

- **Medidas dos atrasos de grupo no domínio do tempo com osciloscópio de amostragem:** é o método mais utilizado em laboratório apesar de exigir certa complexidade e espaço pelos equipamentos de medida. Este método está associado à técnica de *Cut-Back* e oferece uma visão bem concreta dos aspectos de alargamento dos pulsos luminosos.
- **Método no domínio da frequência:** a dispersão da fibra óptica é obtida pela análise espectral do pulso óptico na entrada e após passar pela fibra óptica.
- **Método indireto baseado na medida do raio do núcleo da fibra:** neste método a dispersão é calculada teoricamente a partir das características geométricas e materiais da fibra.

Neste trabalho foi adotado o método dos atrasos de grupo no domínio do tempo com osciloscópio de amostragem, uma vez que a Universidade Federal do Paraná, através do CIEL (Centro de Instrumentação Eletrônica), já dispunha dos equipamentos necessários. Foram necessárias algumas adaptações adicionais, tais como o circuito gerador de pulsos para o diodo laser (pulsador) e o circuito detector de pulsos ópticos, além do aparato para o alinhamento da fibra óptica junto ao pulsador e detector.

Este procedimento de medição no domínio do tempo envolve a geração e o lançamento de pulsos de luz (nanossegundos) dentro de uma amostra de POF seguido da detecção e o armazenamento de dados referentes à dispersão (alargamento) do pulso na



saída da fibra. A partir dos pulsos de entrada e saída do enlace óptico pode-se estimar a largura de banda óptica e elétrica da fibra óptica sob teste. Uma descrição detalhada das medidas será apresentada no capítulo 4.

### 2.3.3 Técnica de *Cut Back*

O método de *Cut Back* ou método Diferencial [29] é um recurso que pode ser utilizado tanto para medidas de atenuação quanto para dispersão. Em ambas as medidas faz-se necessário caracterizar a potência injetada na fibra ( $P_{\text{entrada}}$ ) e a potência que sai da fibra ( $P_{\text{saída}}$ ) para que se possa verificar e quantificar os parâmetros de interesse. Para tanto, duas medidas são feitas, uma para a entrada e a outra para a saída sem que sejam alteradas as condições de medida (intensidade do sinal, condições de acoplamento, NA de lançamento) alterando-se apenas a extensão da fibra. A Figura 2-5 ilustra como são feitas as duas medidas. Desta forma, é possível levar em conta apenas os efeitos das potências transmitida e absorvida (atenuação) enquanto que a parcela refletida, por ser compensada na medida diferencial, pode ser desconsiderada. É importante realçar que a técnica de *Cut Back* é um recurso aplicável a vários tipos de medidas diferentes sendo sempre associada a alguma outra técnica de medida.

Em um experimento, a técnica de *Cut-Back* é aplicada da seguinte forma:

- 1 – Medida do parâmetro de entrada: inicialmente é realizada a medida da potência na extremidade da saída da fibra com seu comprimento total (fibra de amostra).
- 2 - Sem modificar as condições de lançamento de potência luminosa na entrada e saída do enlace, a medida é refeita com uma fibra de referência, a qual pode ser um pedaço curto cortado da própria fibra sob teste (fibra de amostra), originando daí o nome da técnica.

O comprimento recomendado para a fibra de referência varia de autor para autor, compreendendo valores entre 1 a 3 metros [35]. Sênior [29] explicita-o melhor definindo-o como sendo um valor menor que 1 % do comprimento da fibra sob teste.

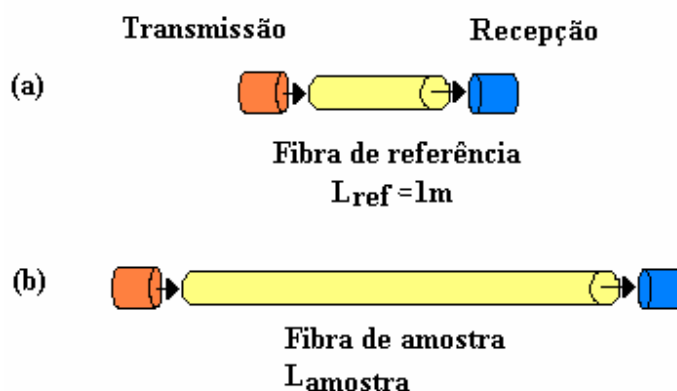


Figura 2-5 Técnica de *Cut-Back*: sem alterar as condições de potência e lançamento do sinal luminoso são realizadas medidas (a) em uma fibra de referência e (b) na fibra sob teste.

Para o caso das medidas de atenuação e dispersão utilizando-se a técnica de *Cut Back*, deve-se considerar a diferença dos comprimentos das fibras de referência e de teste nas equações pertinentes. Isto é, divide-se o parâmetro medido por  $(L_{amostra} - L_{referência})$ .

A técnica de *Cut-Back* é referenciada em recomendações para fibras ópticas pela ITU-T<sup>1</sup> (*International Telecommunications Union - Telecommunications Standards Section*) tais como G650 e G651. A EIA/TIA (*Electronic Industries Alliance* associada com a *Telecommunication Industries Association*) possui as especificações EIA/TIA-455-46 (ou FOTP-46) e EIA/TIA-455-78 (FOTP-78) que referem-se à técnica de *Cut Back* aplicada respectivamente para as fibras multimodo e monomodo [29].

## 2.4 Acoplamento óptico em fibras ópticas

Tanto para a medida de atenuação quanto para dispersão, a fibra óptica deve atender a condições básicas para que se obtenha um correto acoplamento da luz entre a fibra e os dispositivos ativos (transmissor e receptor). Uma das condições diz respeito à qualidade das terminações e extremidades, de modo a reduzir as perdas nos acoplamentos. Outra condição importante refere-se ao lançamento da luz na fibra, sendo relevantes a abertura numérica da própria fibra e do feixe de luz incidente.

<sup>1</sup> O ITU pode também estar referenciado na literatura por CCITT (*Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique*), sua designação anterior.

Adicionalmente, de forma a obter maior eficiência no acoplamento e reprodutibilidade dos resultados, pode-se utilizar o recurso de equalização de índice de refração nos acoplamentos da fibra através da aplicação de um gel com índice refração muito similar ao índice do núcleo da fibra [29].

#### 2.4.1 Preparação das terminações das POFs

Em qualquer medida óptica em fibras é essencial que as facetas das duas extremidades do guia estejam adequadamente preparadas de forma a oferecer um mínimo de penalidade quando do acoplamento transmissor-fibra e fibra-detector. O preparo é feito através das seguintes técnicas:

**Técnica de polimento:** Similar ao processo usado para ferrolhos MT de fibras de sílica, o polimento é executado em 3 estágios com a diminuição do tamanho do grão (16  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ ) [14]. Esta técnica oferece excelente acoplamento óptico cuja qualidade depende da habilidade do operador, porém, onera os custos devido ao tempo dispensado ao polimento [34].

**Técnica de corte com navalha (*Razor Cut*):** O corte é executado com a lâmina de uma navalha guiada pela faceta do ferrolho de um conector. A obtenção de corte reto na extremidade é crítica em consequência das propriedades mecânicas do polímero. Também, a lâmina deve estar muito bem afiada. Esta técnica [34] não provê o nível de acoplamento requerido para transmissão de dados.

**Técnica de corte com lâmina quente (*Hot Knife Cutting*):** O corte é realizado com uma lâmina aquecida e guiada pela faceta do ferrolho de um conector. A obtenção de corte reto na extremidade é crítica, implicando em um controle muito cuidadoso deste alinhamento para que se obtenha a reprodutibilidade do procedimento. Este método é rápido, diminuindo significativamente o custo da terminação [14]. Contudo não provê o nível de acoplamento requerido para transmissão de dados devido à rugosidade remanescente na faceta causada pela lâmina.

**Técnica de nivelamento com superfície plana quente (*Hot Plate Flattening*):** Na terminação com superfície plana quente, a extremidade da fibra, inserida no ferrolho de um conector, é colocada em contato com uma superfície aquecida ( $\approx 120$  °C) durante um breve período de tempo, tipicamente 0,5 s. Este método provê qualidade, é rápido e reprodutível com ferramentas manuais extremamente simples. A qualidade depende da superfície da placa quente e do ferrolho. Parâmetros como tempo de contato, temperatura e protrusão da fibra no ferrolho ( $\approx 0,5$  mm) são críticos, porém é um método que oferece rapidez e maior reprodutibilidade em comparação com o *hot knife cutting* [34].

**Técnica de corte com laser (*Laser Cut*):** Este método exige ferramentas (laser) significativamente caras porém oferece boa reprodutibilidade e qualidade no acoplamento óptico para o uso em comunicação de dados [34].

No presente estudo optou-se pela técnica de corte com Lâmina de aeromodelismo (equivalente à técnica de *razor cut*) associada com polimento para prover bom nível de acoplamento óptico. No Apêndice 2 está detalhado o procedimento realizado para o polimento.

#### 2.4.2 Condições de lançamento da luz na fibra óptica

Para qualquer medição óptica, a condição de lançamento da luz no interior da fibra é de suma importância para a obtenção de dados confiáveis. Este problema é mais relevante em fibras multimodo. Em fibras monomodo, a potência óptica deve ser lançada apenas no modo fundamental, o que é conseguido através de um filtro de modo [10]. Já para fibras multimodo, a distribuição de potência entre os modos da fibra deve ser monitorada através do controle do tamanho do feixe de luz de lançamento e da distribuição angular, cujas definições são:

- **Área iluminada de lançamento (*Launch spot size*):** é a área da face da fibra iluminada pelo feixe de luz oriundo da fonte óptica (*spot*).
- **Distribuição angular:** é a distribuição Angular do feixe de luz incidente na face de entrada da fibra.

Ambos dependem do tamanho do NA da fonte óptica e das propriedades dos elementos ópticos (lentes objetivas) dispostos entre a fonte e a face de entrada da fibra.

As condições de lançamento em fibras ópticas multimodo são tipicamente caracterizadas como [10]:

- **Sub-iluminada (*underfilled*):** nesta condição, a maior parte da potência óptica está concentrada no centro da fibra. Neste caso, o *spot* de lançamento e a distribuição angular são menores do que o núcleo da fibra. O sub-iluminamento da fibra excita principalmente os modos de menor ordem.
- **Super-iluminada (*overfilled*):** este lançamento ocorre quando o *spot* de lançamento e a distribuição angular são maiores do que o núcleo da fibra. A luz que incide fora do núcleo ou em ângulos maiores do que o ângulo de aceitação do núcleo da fibra será perdida. O super-iluminamento da fibra excita modos de baixa e de alta ordem.

As condições de lançamento afetam significativamente os resultados e medidas de atenuação em fibras multimodo. Se houver super-iluminamento, a perda de potência dos modos de alta ordem dominará os resultados da atenuação. Se, ao contrário, a fibra for sub-iluminada, perdas de potência de modos de alta ordem terão um efeito mínimo no resultado das medidas. A Figura 2-6 ilustra as condições de iluminamento da fibra.

A largura de banda da fibra também depende muito das condições de lançamento seja para POFs ID ou IG. Quando a NA de lançamento é menor do que a NA da POF, a largura de banda obtida é maior do que para a condição onde a NA de lançamento é maior do que a NA da fibra [9]. Portanto, é mais apropriado que medidas em fibras multimodo estejam sob a condição de sub-iluminamento. Entretanto, em uma pesquisa divulgada [9], alguns pesquisadores realizaram medições na condição de superiluminamento afirmando que esta situação fornece dados confiáveis e práticos porque é a condição encontrada no cotidiano operacional das fibras ópticas poliméricas.

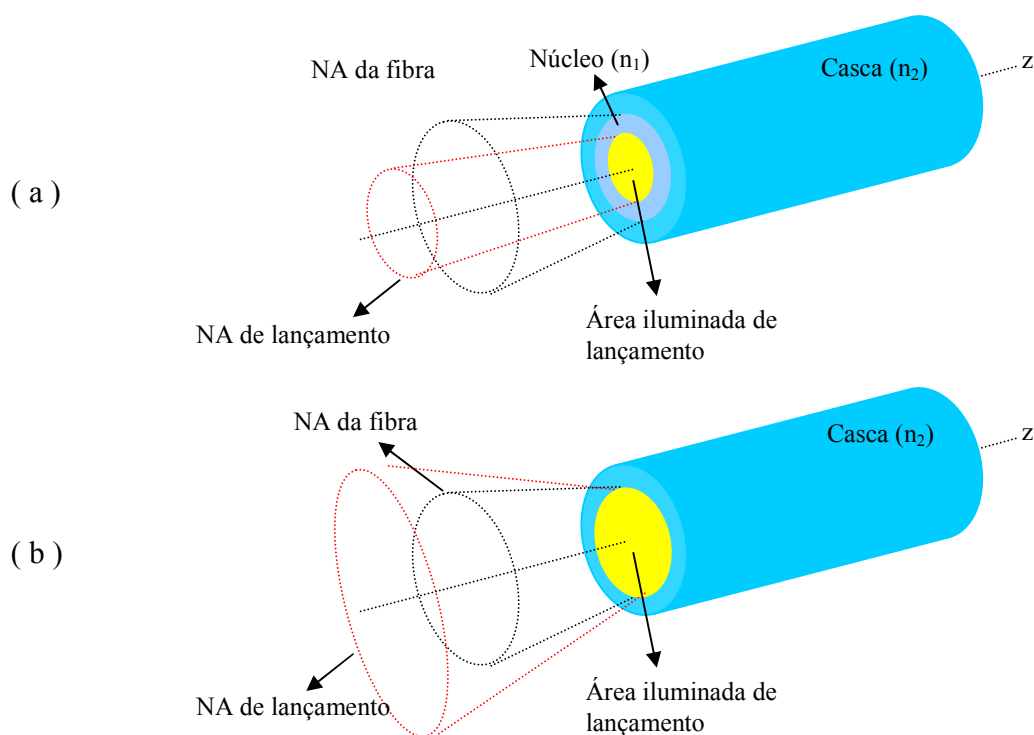


Figura 2-6 Condições de lançamento do sinal óptico na fibra: (a) condição de sub-iluminamento (b) condição de super-iluminamento ([10] figura adaptada).

Para que as condições de lançamentos em uma medição possam propiciar resultados confiáveis é preciso levar em conta os seguintes aspectos nos acoplamentos ópticos presentes no enlace a ser medido:

- Acoplamento entre emissor e POF: a NA do emissor deve estar adequada em relação à NA da POF. A eficiência deste acoplamento se dá pelo total confinamento dos modos dentro da fibra.
- Acoplamento entre POF e detector: todo o sinal luminoso deve incidir de forma certa na área do fotodetector, isto é, a área efetiva do fotodetector deve ser compatível com a NA da POF.

Algumas dificuldades são encontradas para a efetiva realização destes acoplamentos, sendo ela maior no lado da recepção, devido às dimensões reduzidas da área

fotosensível do fotodetector. Por este motivo, elementos ópticos tais como lentes colimadoras e convergentes são utilizadas de forma a obter o devido confinamento da luz, controlando assim o NA de lançamento do sinal luminoso para dentro da fibra e/ou para o receptor. O alinhamento destas lentes com os dispositivos e a fibra deve garantir o acoplamento de todos os modos da fibra multimodo.

### 2.4.3 Comprimento de equilíbrio modal ( $L_{eq}$ )

O acoplamento de modos (ou *mode mixing*) em um enlace óptico é causado pelas imperfeições na composição da fibra ou geometria e fatores externos tais como microcurvaturas e emendas, sendo responsável pelo incremento de atenuação (devido à radiação) dos modos de ordem mais alta assim como pela redução na dispersão intermodal na fibra. Neste fenômeno ocorre a transferência de energia entre os modos de alta e baixa ordem em um comprimento inicial da fibra. Após um determinado comprimento  $L_{eq}$  designado “comprimento de equilíbrio modal” (ou comprimento de acoplamento) este intercâmbio de modos completa-se atingindo uma “distribuição de equilíbrio modal” ou simplesmente EMD (*Equilibrium Modal Distribution*).

O comprimento de acoplamento está diretamente relacionado à NA da fibra. Quanto menor a NA, maior é o valor para o comprimento de acoplamento, sendo o equilíbrio alcançado mais tardiamente. Em fibras ópticas plásticas, o comprimento de acoplamento é muito menor do que aquele observado em fibras convencionais de sílica, para os quais  $L_{eq}$  é da ordem de muitos quilômetros. Isto ocorre porque as POFs têm maior NA e também devido ao grande número de imperfeições estruturais, principalmente na interface núcleo-casca.

A Figura 2-7 mostra um gráfico logarítmico da potência em uma fibra em função do seu comprimento para diferentes condições de lançamento. Após o comprimento  $L_{eq}$ , a distribuição de equilíbrio é estabelecida e, nesta condição, as características de transmissão (atenuação e dispersão) independem do comprimento da fibra medida. Em resumo, o acoplamento de modos é afetado pelo NA de lançamento, entretanto, se durante a medição for estabelecida a condição de equilíbrio do acoplamento dos modos (além do  $L_{eq}$ ), a

atenuação e a dispersão não devem mais depender de condições de lançamento particulares, assumindo então valores bem definidos.

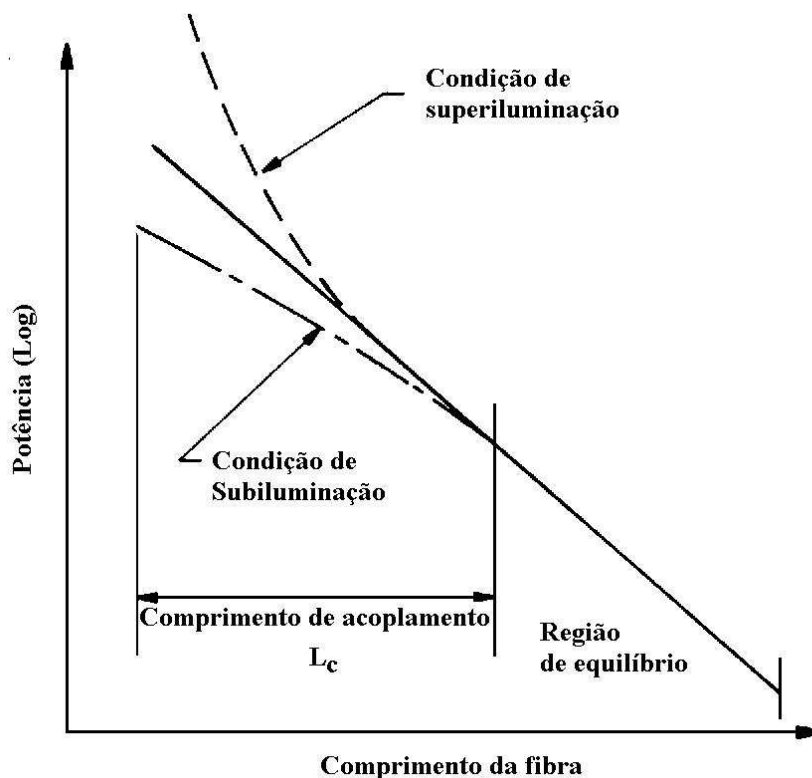


Figura 2-7 Potência óptica *versus* comprimento da fibra multimodo para diferentes condições de lançamento [33].

A potência dos modos de alta ordem pode ser minimizada pelo controle do *spot* e da distribuição angular ou através de recursos aplicados à fibra que causam perturbações mecânicas cujo objetivo é antecipar (redução de  $L_{eq}$ ) uma distribuição de equilíbrio [29]. Estes recursos são:

- **Misturador de modos** (*mode mixer* ou *mode scrambler*): é um dispositivo que induz o acoplamento precoce dos modos em uma fibra óptica através do recurso de adicionar um pedaço de fibra extra ( $\sim 1$  m) sujeita a algum tipo de perturbação mecânica [35]. Tipicamente este dispositivo é inserido no início do enlace óptico (entrada da fibra) a ser medido mas pode ser também aplicado na saída da fibra, em alguns casos.



- **Supressor de modos da casca** (*cladding-mode stripper*): é um dispositivo que remove a potência dos modos que se propagam na casca da fibra. A maior parte dos supressores de modos da casca consiste de material com índice de refração maior que o da casca da fibra. Na maioria das fibras, sua própria capa age como tal [10].

- **Filtro de modos:** consiste na atenuação seletiva de certos modos propagantes na interface núcleo-casca ou nas proximidades dela (modos de ordem superior e modos de fuga) dentro da fibra óptica. A maioria destes filtros caracterizam-se pelo enrolamento da fibra multimodo em volta de um cilindro (*mandrel wraps*) ou fazendo-se voltas na própria fibra numa forma livre (*free-form loops*) [10]. Em geral recomenda-se aplicar estes filtros no lançamento óptico do enlace (entrada da fibra) mas ele também é aplicável na ponta receptora [36].

### 3 Atenuação em POFs

Neste capítulo serão analisados os diversos mecanismos responsáveis pela perda de potência óptica em POFs que levam à atenuação do sinal óptico transmitido.

#### 3.1 O espectro óptico das POFs

A resultante das contribuições de todos os tipos de perdas de potência óptica (atenuação) em função do comprimento de onda da luz injetada na fibra óptica é ilustrada graficamente pelo espectro óptico. Este espectro é extremamente útil para que se possa identificar as regiões nas quais o material do qual a fibra óptica é feita apresenta atenuação mínima. Estas regiões são denominadas de “janelas ópticas” e auxiliam na escolha do melhor comprimento de onda a ser utilizado no enlace óptico.

Nas aplicações em comunicações ópticas, o objetivo principal é obter alcances cada vez maiores, o que implica em atenuações mais baixas possíveis. A tecnologia das POFs vem se desenvolvendo no sentido de reduzir continuamente as perdas de transmissão até o chamado limite fundamental (ou limite de atenuação teórico), determinado pela absorção intrínseca do material do qual a fibra é feita. Os valores de atenuação experimentais aproximam-se dos limites de atenuação teórico à medida que os processos de fabricação melhoram. A Tabela 3-1 mostra os limites teóricos para os vários fatores de perdas e os limites de atenuação para as fibras plásticas fabricadas com PMMA, PS e CYTOP\* para os comprimento de onda de 568, 672 e 1300 nm.

Tabela 3-1 Fatores de perdas e limites de atenuação teóricos para POFs [7].

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

<sup>2</sup> CYTOP é o nome comercial da fibra baseada em polímero fluorinado amorfo fabricada pela Asahi-Kasei caracterizada por ser uma fibra do tipo POF PF PMMA IG. É também denominada de Lucina.

A Figura 3-1 mostra a atenuação espectral para diferentes materiais usados para o núcleo da POF: o Poly Methyl Metha Acrylato (PMMA), o PMMA Perdeuterado (PD-PMMA), Policarbonato (PC) e CYTOP.

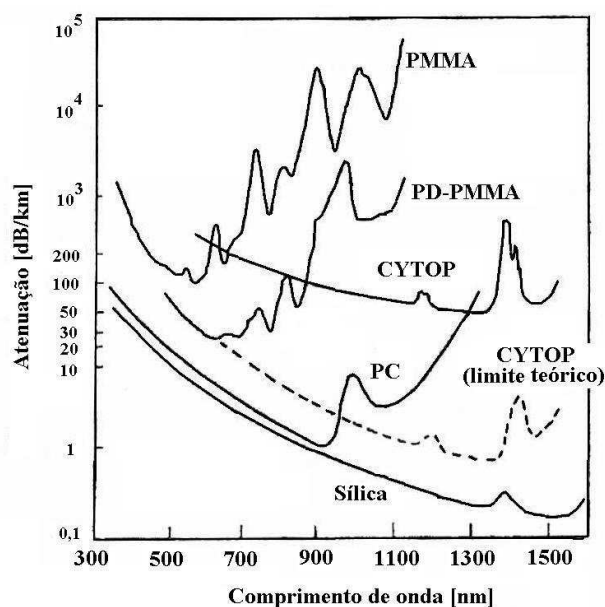


Figura 3-1 Exemplo de espectro óptico de POFs de materiais diferentes [7].

O uso de fibras ópticas de sílica em comunicações ópticas tornou-se viável somente quando as perdas foram reduzidas a um nível aceitável para alcançar uma distância de transmissão de 10 km ou mais [12]. Já a fibra óptica plástica apresenta uma alta atenuação em comparação com as fibras de sílica, alcançando, portanto, distâncias bem menores. A Tabela 3-2 mostra os valores de atenuação a título de comparação para as duas tecnologias.

Tabela 3-2 Atenuação em fibras com diferentes composições de núcleo [7].

	Material	Atenuação	$n_1/n_2$	NA
Fibras poliméricas	PMMA	55 dB/km @ 538nm	1,492/1,417	0,47
	PS	330 dB/km @ 570nm	1,592/1,416	0,73
	PC	600 dB/km @ 670nm	1,582/1,305	0,78
	CYTOP	16 dB/km @ 1310nm	1,353/1,34	---
Fibra de vidro	Sílica	0,5 dB/km @ 1310nm		

### 3.2 Mecanismos básicos de atenuação em POFs

Os mecanismos básicos de atenuação em uma POF são classificados em dois grupos principais:

#### **Absorção material intrínseca:**

Este tipo de atenuação corresponde às perdas causadas pelas características do material em seu estado puro (sem impurezas, sem variações de densidade, homogeneidade do material, etc). A absorção intrínseca estabelece o limite mínimo fundamental de absorção para qualquer tipo de material usado, supondo um processo de fabricação perfeito.

As perdas intrínsecas estão classificadas em espalhamento de Rayleigh - decorrente da composição, orientação e flutuações de densidade - e a absorção dos materiais constituintes subdividida em absorção por ressonância molecular e absorção por ressonância eletrônica.

#### **Absorção material extrínseca**

O grupo das perdas extrínsecas compõe-se daquelas flutuações que não apareceriam numa fibra ideal (pura). Esta atenuação está relacionada às perdas causadas pela contaminação de impurezas que o material da fibra experimenta durante seu processo de fabricação [7]. Entre elas, estão a absorção causada por poluentes metálicos (íons de metais de transição tais como níquel, cobalto, cromo, manganês, ferro) e orgânicos (presença do grupo hidroxila OH) e a absorção provocada por partículas de poeira, microfraturas, bolhas e outras imperfeições na fibra. Adicionalmente, há também as perdas de radiação, originadas pelas perturbações (microscópicas e macroscópicas) na geometria da fibra, embora algumas vezes elas possam não ser significativas. As perdas extrínsecas mais significativas são, em geral, aquelas originadas da absorção devida às imperfeições estruturais na fibra geradas durante o processo de fabricação.

### 3.2.1 Perdas intrínsecas – Absorção por ressonância molecular

As vibrações das fronteiras moleculares C-H, N-H e C=O presente nos materiais poliméricos constituem a mais importante fonte de perdas intrínsecas [7]. A Tabela 3-3 mostra os comprimentos de onda fundamentais, obtidos experimentalmente, dos modos de vibração de ligações C-X típicas nas fibras plásticas poliméricas.

A absorção vibracional dos grupos C-X é mais intensa para os primeiros harmônicos (especificamente, as intensidades de tais picos de absorção decrescem em uma ordem de magnitude quando a ordem de harmônico diminui em uma unidade). Isto explica a alta atenuação das POFs nas regiões de infravermelho e vermelho do espectro [7].

Tabela 3-3 Comprimentos de onda obtidos experimentalmente para as vibrações fundamentais das ligações C-X [7].

Ligação molecular	Vibração fundamental [ $\mu\text{m}$ ]
Carbono – Hidrogênio (C-H)	3,3-3,5
Carbono – Deutério (C-D)	4,4
Carbono – Flúor (C-F)	8,0
Carbono – Cloro (C-Cl)	11,7-18,2
Carbono – Oxigênio (C-O)	7,9-10,0
Carbono – Carbono (C-C)	7,9-10,0
Carbono – Oxigênio (C=O)	5,3-6,5
Oxigênio - Hidrogênio (O-H)	2,8

A Figura 3-2 do monômero MMA a partir do qual o material PMMA é feito ilustra a presença das ligações C-H e C-O. As fibras com núcleos de PMMA apresentam uma séria absorção principalmente causada pela vibração dos harmônicos de ordem elevada do C-H na molécula do polímero [9].

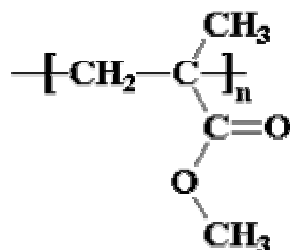


Figura 3-2 Monômero MMA [37]

O fenômeno de ressonância molecular sugeriu um modo de melhorar a transparência da fibra. Substituir os átomos de hidrogênio por elementos mais pesados, ocasiona a comutação das vibrações para regiões de comprimentos de ondas mais longos e, por conseqüência, a influência da absorção vibracional nas regiões do visível e infravermelho (para os quais o espalhamento de Rayleigh é também baixo) torna-se negligível [7]. Historicamente, duas substituições mais importantes foram reportadas: a substituição por flúor e a por deutério (isótopo duas vezes mais pesado que o hidrogênio comum) resultando nas fibras denominadas Perfluorinadas (PF) e Perdeuteradas (PD) respectivamente.

Fibras deuteradas baseadas em PMMA (PD-PMMA ou PMMA-d8) possuem atenuações na ordem de 10 dB/km (ou 0,01 dB/m) [7], entretanto, o alto preço do deutério torna este tipo de fibra proibitiva. Um outro problema da fibra com núcleo PD-PMMA é que ela absorve moléculas de água no polímero resultando em picos de absorção de OH no espectro. A umidade aumenta significativamente a atenuação em razão da forte ressonância dos grupos hidroxilas O-H, especialmente na região do infra vermelho próximo.

Já a substituição por átomo de flúor não apresenta o problema de absorção do vapor de água como ocorre com o deutério. Estas POFs podem ser utilizadas para qualquer comprimento de onda entre 850 e 1330nm, uma vez que suas atenuações nesta faixa permanecem abaixo de 40 dB/km (0,04 dB/m) [7]. A “fluorinação” dos polímeros também possibilitou o uso deste tipo de POF com emissores e receptores projetados para fibras ópticas de sílica.

### 3.2.2 Perdas intrínsecas – Absorção por ressonância eletrônica

Os polímeros, como todos os materiais orgânicos, absorvem luz na região ultravioleta do espectro [7]. O mecanismo para esta absorção depende das transições eletrônicas entre níveis de energia nas ligações moleculares do material. A absorção de um fóton causa uma transição de elétrons em direção a níveis de energia mais altos. Especificamente, a luz absorvida serve para completar as transições do orbital  $n$  para o orbital  $\pi^*$  das duplas ligações carbono-carbono [ $> C=C <$ ] (caso do PS que contém monômero com anéis de benzeno [9]) e as transições  $\pi \Rightarrow \pi^*$  dos grupos carbonil [ $> C=O$ ] (caso do PMMA [9]). Essas transições são responsáveis pela forte absorção na faixa do ultravioleta (UV) para os materiais poliméricos das fibras ópticas plásticas. Embora de constituição físico-química diferente dos plásticos, a sílica fundida e outros tipos de vidros puros também apresentam maiores absorções eletrônicas resultante das transições estimuladas de elétrons na região do ultravioleta [22].

### 3.2.3 Perdas intrínsecas – Espalhamento de Rayleigh

A perda intrínseca conhecida como espalhamento de Rayleigh é causada por flutuações aleatórias na densidade, na orientação e na composição do material da fibra e ocorrem em distâncias muito pequenas quando comparadas com o comprimento de onda de luz transmitida. Este espalhamento é considerado um limite mínimo fundamental da atenuação nas fibras ópticas e embora seja possível reduzir as flutuações na composição do material com técnicas de fabricação mais sofisticadas, as não homogeneidades na densidade do material, originadas no processo de resfriamento, não podem ser evitadas.

As flutuações de densidade (excitação térmica e modos compressionais) dependem da compressibilidade, da constante dielétrica, da densidade e da temperatura. As flutuações de orientação, por sua vez, são causadas pela anisotropia dos monômeros e pela cristalinidade das ligações poliméricas. Finalmente, a adição de substâncias para conseguir os perfis desejados de índices de refração originam as flutuações de composição (caso da POF IG). Estes fenômenos compõem as perdas por espalhamento de Rayleigh que são

inversamente proporcionais à quarta potência do comprimento de onda, ou seja, quanto mais curto é o comprimento de onda ( $\lambda$ ), maiores são as perdas.

Fisicamente, o fenômeno do espalhamento de luz pode ser interpretado da seguinte forma: um raio, enquanto propaga-se na uma fibra óptica, ao encontrar uma variação microscópica no índice de refração da fibra, sofre maior refração e maior reflexão, espalhando-se em todas as direções. Como nem todas as direções correspondem aos raios guiados, parte da luz é perdida por radiação. E mesmo se a direção do novo raio corresponde ao guiado, o sentido de propagação pode ser reverso (retroespalhamento).

### 3.2.4 Perdas extrínsecas – Absorção por impurezas

Durante o processo de fabricação, a POF pode absorver alguns contaminantes. A presença destas impurezas é inevitável e sempre causa absorção de luz. As impurezas podem ser metais de transição (Cobalto, Cromo, Ferro, Níquel, Manganês, etc) ou poluentes orgânicos, em especial, o íon hidroxila  $\text{OH}^-$  [7]. Alguns íons de metais de transição provocam uma atenuação mais alta do que outros, mas a maior parte deles têm bandas de absorções na região do visível e infra-vermelho próximo do espectro óptico. A Tabela 3-4 mostra as perdas causadas pelas impurezas típicas em fibras ópticas.

Tabela 3-4 Perdas induzidas por contaminantes [7].

Íon metálico	Concentração [ppb]	Perda [dB/km]	Vibração fundamental [nm]
Cobalto (Co)	2	10	Visível
Cromo (Cr)	1	1	650
Ferro (Fe)	1	0,7	1100
Cobre (Cu)	1	0,4	850
Hidroxila ( $\text{OH}^-$ )	1	50	1380
		2,4	1130
		1	950

Nota: ppb (parte por bilhão) significa 1 átomo de impureza por  $10^9$  átomos.



Os íons metálicos mais danosos são os íons de Cobalto, os quais aumentam a atenuação em 10 dB/km para concentrações de 2 ppb [7]. Outras impurezas que não aquelas mostradas na Tabela 3-4 não são freqüentemente encontradas em POFs, portanto, não influenciam significativamente as perdas de absorção. O montante de impurezas deve estar abaixo de 1 parte por bilhão para obter-se um nível de perda abaixo de 1 dB/km (para sílica) [12]. É pela técnica de fabricação que é feito o bom controle das impurezas, sendo possível a eliminação dos efeitos dos íons metálicos, mantendo-se a contaminação em níveis aceitáveis (da ordem de 1 para  $10^{10}$ ).

Na Tabela 3-4 pode-se observar que os grupos hidroxilas (OH<sup>-</sup>) originam um importante fator de absorção no material. Sua freqüência de absorção vibracional fundamental origina harmônicos situados nas regiões visíveis e infravermelho do espectro [7]. A causa da presença de grupos hidroxila no material da fibra é a água, podendo ter sido absorvida durante e/ou depois do processo de fabricação. O processo de fluorinização mencionado anteriormente traz vantagem neste aspecto pois os fluoropolímeros não absorvem água facilmente.

### 3.2.5 Perdas extrínsecas – Perdas por radiação

As fibras ópticas estão sujeitas a perdas de transmissão quando submetidas a curvaturas que podem ser classificadas em dois tipos. As macrocurvaturas são curvaturas cujos raios são grandes quando comparados ao diâmetro da fibra. Estas curvaturas em geral originam-se quando do enrolamento da fibra no carretel e/ou durante a instalação da fibra. O segundo tipo, são as denominadas microcurvaturas que são curvaturas microscópicas (irregularidades nas interfaces), aleatórias e de menor escala no eixo da fibra cujos raios de curvatura são próximos ao raio do núcleo da fibra. Podem ser causadas por defeitos na fabricação da fibra ou por pressões laterais não uniformes geradas durante o processo de cabeamento.

Para a transmissão de informação via enlaces ópticos, ambos os tipos de curvaturas devem ser minimizados por meio de uma cuidadosa fabricação e instalação. Para outras

aplicações, tais como projetos de sensores baseados em POF, não obstante, estas características podem oferecer utilidade [7].

### **Perdas de radiação por macrocurvaturas:**

O ângulo de incidência do feixe luminoso na interface núcleo-casca diminui próximo à região onde há uma curvatura, podendo tornar-se menor que o ângulo crítico. Nessa condição, a luz escapa para fora do núcleo da fibra sendo refratada para a casca (ver Figura 3-3). Quando a macrocurvatura na fibra é pequena (raio de curvatura grande), as perdas são praticamente negligenciáveis, porém, à medida que o raio de curvatura diminui, as perdas por radiação aumentam, sendo maiores para POF IG do que para POF ID de um mesmo diâmetro [7].

O aumento da atenuação quando da diminuição do raio de curvatura é exponencial, com um expoente que depende de vários parâmetros tais como o raio de curvatura da fibra, o raio do núcleo da fibra, o índice de refração do núcleo e o comprimento de onda. O mecanismo pelo qual estas perdas aumentam está ilustrado na Figura 3-3. Considerando um guia de onda esticado, o raio de maior ordem reflete na interface núcleo-casca num ângulo igual ao ângulo crítico da fibra. Ao sofrer uma curvatura, este raio passa a incidir num ângulo inferior ao ângulo crítico, o que causa seu refratamento para a casca ocasionando daí uma perda por radiação.

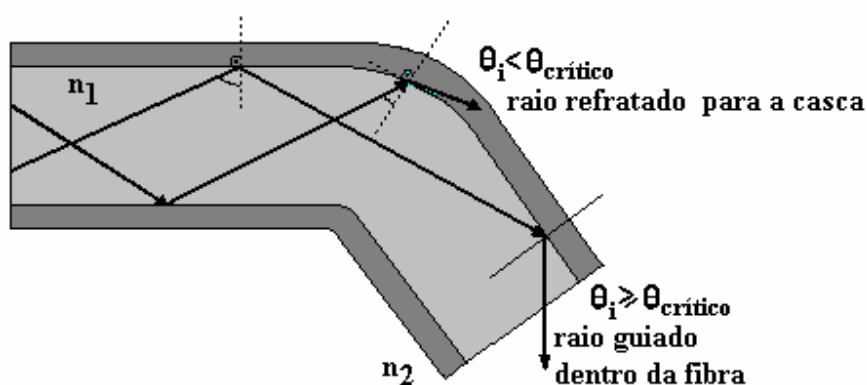


Figura 3-3 Mecanismo responsável pelas perdas por macrocurvaturas [7].

Segundo Giozza [22] e Sênior [29], o raio de curvatura crítico a partir do qual as perdas por curvatura passam a ser muito importantes em fibras multimodo é dado pela expressão:

$$R_{\text{critico}} = \frac{3.n_1^2.\lambda}{(4.\pi.(n_1^2 - n_2^2)^{3/2})} \quad (3-1)$$

Todavia, as perdas por curvaturas nem sempre são desvantagens para a transmissão óptica. Para as fibras multimodo, os modos de propagação de maior ordem são os primeiros a perder energia com a curvatura, pois propagam-se mais próximos da casca. Portanto, uma curvatura devidamente controlada pode servir para diminuir o número de modos propagados, melhorando assim a capacidade de transmissão em fibras multimodo [22].

O coeficiente de perdas de radiação por macrocurvaturas é dado por [32]:

$$\alpha_{\text{macrocurvaturas}} = c_1.e^{-c_2.R} \quad (3-2)$$

onde R é o raio de curvatura da fibra e  $c_1$  e  $c_2$  são constantes.

### **Perdas de radiação por microcurvaturas**

A maior fonte de perdas em fibras cabeadas está relacionada às microcurvaturas, que são distorções axiais randômicas que invariavelmente ocorrem durante a cabeamento, quando a fibra é pressionada contra uma superfície que não é perfeitamente lisa. Microcurvaturas causam um aumento de perda na fibra, seja em fibras monomodo ou multimodo, e podem resultar em uma perda significativa se certos cuidados não forem tomados para minimizá-las.

De acordo com [22], as perdas por microcurvaturas podem ser estimadas pela seguinte relação experimental:

$$\alpha_{\text{microcurvatura}} \propto \left(\frac{a}{r}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{NA}\right)^4 \quad (3-3)$$

A minimização dos efeitos da microcurvaturas nas perdas de transmissão exige fibras ópticas com NA e/ou relação de diâmetros da casca-núcleo grandes, além de cuidados especiais no projeto de revestimento e cabeamento das fibras. No caso de fibras multimodo, as perdas por microcurvaturas são relativamente pequenas e independentes do comprimento de onda podendo na maioria dos casos serem negligenciadas nas POFs.

As perdas por microcurvaturas provocadas pelo processo de cabeamento da fibra contudo não tendem a mudar a forma do espectro de atenuação já que são inteiramente radiativas e, para fibras multimodo, elas são quase que independentes do comprimento de onda.

### **3.2.6 Perdas extrínsecas – Absorção por imperfeições geométricas e estruturais do guia de onda (Espalhamento de Mie)**

Não-homogeneidades randômicas de dimensões comparáveis às do comprimento de onda óptico podem ocorrer durante o processo de fabricação da fibra, resultando numa perda de potência luminosa que é independente do comprimento de onda e pode ser levada em conta pela adição de uma constante de contribuição de perdas. Este tipo de perda é também conhecida por espalhamento de Mie. Estas não-homogeneidades são imperfeições geométricas e estruturais que incluem flutuações no diâmetro, excentricidade, elipicidade e perfil refrativo do núcleo, irregularidades na interface núcleo-casca, presença de bolhas, fissuras, poeira e, até mesmo lacunas moleculares.

A existência dessas imperfeições pode implicar na transferência de energia de um modo guiado para modos irradiados, caso a frequência espacial das perturbações geométricas corresponda ao comprimento de acoplamento de modos [22]. Este tipo de absorção é normalmente desprezível se comparado às absorções intrínsecas ou das impurezas [22], no entanto pode ser significativo se a fibra for exposta a níveis intensos de radiação nuclear.

As perdas por espalhamento de Mie ocorrem principalmente na direção de propagação e devem ser minimizadas no processo de fabricação através dos seguintes cuidados:

- controle de diâmetro da fibra durante o processo de fabricação (tolerância inferior a 2% permite manter desprezíveis tais perdas [22]);
- controle cuidadoso da extrusão e encapamento da fibra;
- aumento da diferença relativa de índices de propagação.

A atenuação causada pelas imperfeições geométricas e estruturais aumenta à medida que o diâmetro da fibra plástica diminui [7]. Este comportamento ocorre porque, na prática, o controle do processo de fabricação é mais difícil para menores diâmetros de POF (maior gradiente térmico), o que resulta em um maior número de imperfeições. Além disso, como o diâmetro do núcleo diminui, os raios incidem mais freqüentemente na interface núcleo-casca, onde as imperfeições são mais freqüentes.

### **3.3 Procedimento experimental para a medida da atenuação óptica**

#### **3.3.1 Aparato da medida de atenuação espectral**

O método utilizado para as medidas pertinentes a atenuação foi o método no domínio da freqüência utilizando-se um fotospectrômetro associado com a técnica de *Cut Back*. O esquemático da medição está ilustrado na Figura 3-4. Como fonte luminosa, uma lâmpada de tungstênio produz uma luz branca policromática que, ao atravessar o monocromador, é segmentada em feixes de luz monocromáticos de forma seqüencial. A lente de quartzo focaliza o feixe para dentro do núcleo da fibra (entrada) que percorre todo o comprimento do guia (sofrendo aí os fenômenos de perdas de transmissão) e incide (saída da fibra) no fotodetector, o qual que armazena os dados coletados em um computador. Pela Técnica Diferencial foram aplicados os comprimentos de 16,45 m e 1 m para a fibra de amostra e fibra de referência, respectivamente.

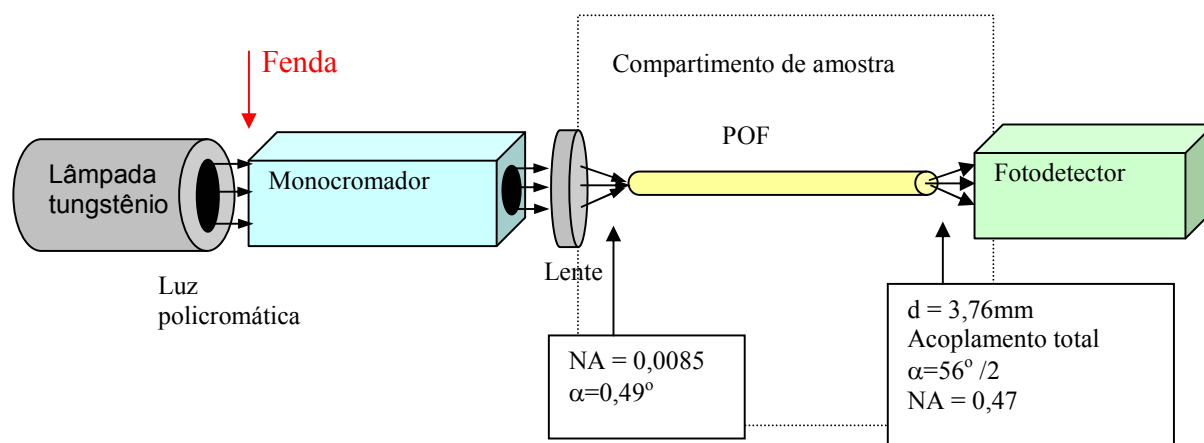


Figura 3-4 Esquemático do aparato de medida da atenuação espectral da POF

O fotospectrômetro RS-325 utilizado (da *Optometrics Corporation*) permite que o módulo fotodetector possa ser fixado em portas de detecção que estão posicionadas a  $90^\circ$  ou  $180^\circ$  em relação ao feixe luminoso dentro do compartimento da amostra. A idéia inicial para a realização das medições foi que o módulo detector estivesse sempre na posição alinhada com a fonte ( $180^\circ$ ). Entretanto, devido ao menor raio de curvatura permitido à POF (2 cm), ocorreu que não havia espaço suficiente dentro do compartimento para o devido posicionamento da fibra. Como solução, optou-se por retirar a lente do lado da porta em  $90^\circ$  e direcionar a fibra (saída) para o fotodetector. A Figura 3-5 mostra este posicionamento da fibra no compartimento de amostra e a Figura 3-6 ilustra o experimento realizado na prática.

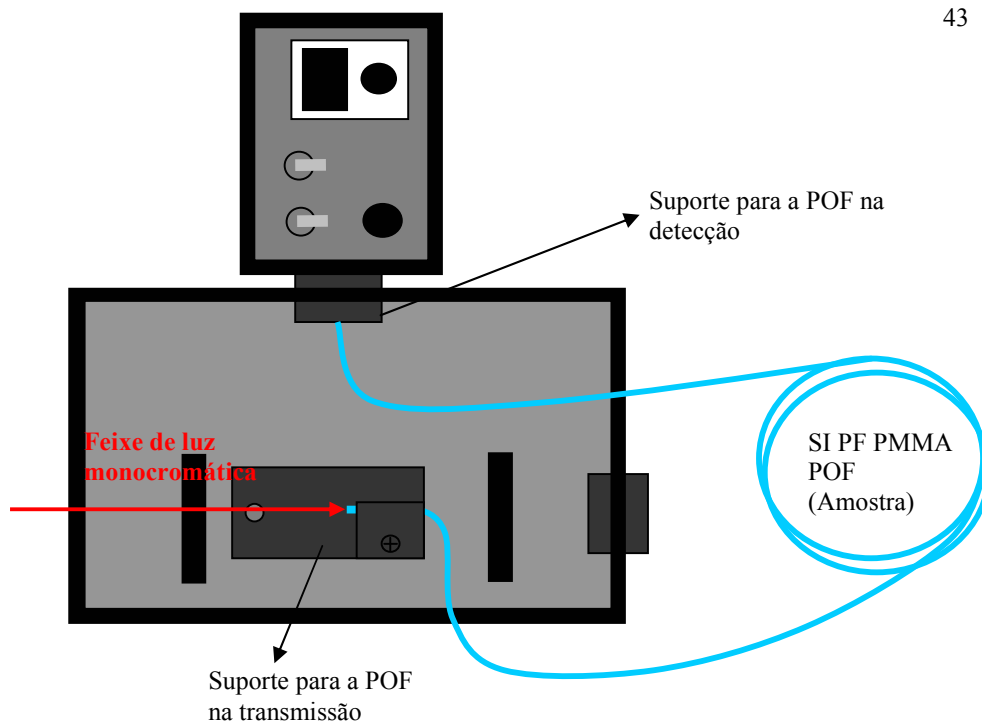


Figura 3-5 Posicionamento da fibra óptica no compartimento de amostra do fotoespectrômetro junto com os suportes adaptados na transmissão e recepção.



Figura 3-6 Fotografia do fotoespectrômetro com a POF posicionada nos suportes de transmissão e recepção.

### 3.3.2 Parâmetros de resolução do fotoespectrômetro RS-325

Os parâmetros de resolução do fotoespectrômetro são importantes para a obtenção correta dos dados. Alguns parâmetros são fornecidos automaticamente pelo próprio equipamento enquanto outros devem ser selecionados nos menus do aplicativo (Apêndice 4).

#### **Taxa de rastreamento (*Scan Rate*):**

A taxa de rastreamento descreve a faixa rastreada a cada segundo, sendo usada para a varredura da referência e da amostra (POF). É fixado pelo *software* do equipamento entre 1 e 100 nm/s. No experimento em questão optou-se pelo valor padrão de 100 nm/s (*default*).

#### **Faixa de varredura do sistema:**

A faixa de varredura em comprimento de onda do sistema, entre 325 e 800 nm, é perfeitamente compatível com a faixa de interesse para a utilização em fibras ópticas plásticas. Inicialmente, foram realizadas medidas no intervalo de 350 a 800 nm, contudo, nesta faixa existe uma ocorrência maior de ruído na região inicial entre 350 e 400 nm. Optamos então por uma faixa mais restrita, a partir de 400 nm. Esta restrição não compromete a análise em questão pois a POF apresenta uma elevada atenuação abaixo de 400 nm, não sendo adequada como meio de comunicação.

#### **Taxa na qual os dados são adquiridos:**

A taxa temporal de obtenção dos dados é obtida pela razão entre o intervalo de varredura e o número de pontos adquiridos pelo fotoespectrômetro (1000 pontos), então

$$Taxa\_obtencao\_dados = \frac{(800 - 400)}{1000} = \frac{400}{1000} = 0,4 \quad (3-4)$$

Portanto, neste estudo os dados foram adquiridos a cada 0,4 nm.



### **Dispersão linear e resolução linear:**

A dispersão linear é um parâmetro fornecido pelo fabricante do fotoespectrômetro que define a extensão para a qual um intervalo espectral é espalhado para fora do campo focal de espectrômetro.

A resolução linear de um fotoespectrômetro é dada pelo produto da largura da fenda pela dispersão linear. A grade de difração de fotoespectrômetro em questão possui 1800 sulcos/mm e uma dispersão linear de 7,41 nm/mm. Dado que a abertura da fenda de entrada é de 300  $\mu\text{m}$ , pode-se calcular a resolução linear<sup>3</sup> do equipamento.

$$\text{Resolução linear} = 300 \cdot 10^{-6} \times 7,41 \cdot 10^{-9} / 10^{-3} = 2,223 \text{ nm} \quad (3-5)$$

A fenda variável, localizada adjacente ao obturador (*shutter*), é usada para alterar a potência óptica do sistema sem afetar a resolução espectral. A radiação incidente pode ser atenuada pela fenda sem alteração do tamanho do feixe em seu ponto focal.

### **Opção AUTORANGE para a plotagem do espectro:**

No menu de plotagem dos dados adquiridos (PLOT DATA MENU) (ver Apêndice 4) pode-se escolher os valores para a faixa fotométrica pertinente à ordenada do gráfico. Na opção *default*, isto é com AUTORANGE ON, os valores são determinados pelo próprio sistema automaticamente. Neste caso, as faixas de mínima e a máxima transmitância variam aproximadamente 1% acima e abaixo dos pontos reais de dados. Neste trabalho, optou-se por AUTORANGE ON e UNITS TRANS.

### **Opções de ajuste no fotoespectrômetro:**

A Tabela 3-5 lista os módulos constituintes do fotoespectrômetro e todas as suas respectivas opções de ajuste (realizadas no menu do aplicativo do equipamento) para as medições necessárias ao experimento.

---

<sup>3</sup> A resolução linear não deve ser confundida com poder de resolução que é a habilidade do instrumento em separar linhas espectrais adjacentes dada pela quantidade total de sulcos na grade de difração.

Tabela 3-5 Opções de ajuste dos módulos do fotoespectrômetro.

Módulo:	Opções de ajuste:	Opção escolhida:
Lâmpada de Tungstênio	“Cortina” ( <i>Shutter Assembly</i> )	Totalmente aberta
Monocromador	Largura da Fenda ( <i>Slit width</i> )	300 $\mu\text{m}$ + fenda adicional em cruz
	Abertura Variável (Variable Aperture – VA)	Abertura total (aprox 90°)
Photodetector	Tensão aplicada ao detector ( <i>High Voltage HV</i> ): MANUAL/REMOTE	MANUAL
	Seletor ( <i>Dial</i> ) de HV	É definida conforme a otimização do equipamento durante as medições
	Ganho (GAIN) = 1X/2X/4X/8X	1X
Aplicativo RS	Modo de medição (DATA MEASUREMENT)	Modo de escaneamento (SCAN MODE)
	Faixa espectral = [200, 800] nm	[400, 800] nm
	AUTORANGE	<i>Default</i> (seleção automática)

### 3.3.3 Terminação e acabamento da POF

Antes de toda e qualquer medida é necessário garantir uma boa qualidade das terminações nas facetas da POF sob teste. Uma vez realizado este acabamento, a POF pode ser utilizada por quantas medidas sejam necessárias, mas com a recomendação de muito cuidado no manuseio da fibra durante as atividades pois foi observado que a fibra de PMMA - sem a proteção de um conector - é susceptível a danos (lascas, arranhões) dada a fragilidade do material. Durante todo o experimento foi monitorado o estado do acabamento nas extremidades das fibras (amostra e referência) usadas.

A técnica de terminação da extremidade da fibra deve ser simples, rápida e reproduzível. Optou-se pela técnica de corte com lâmina para aeromodelismo (equivalente à técnica *razor cut*) por ser uma ferramenta bastante barata. Como esta técnica não provê o nível de acoplamento requerido para transmissão de dados, foi então associado ao

procedimento um processo cuidadoso de polimento em quatro estágios, com o auxílio de uma máquina Politriz STRUERS DP-10 (Rotação 300 e 600) e com acompanhamento dos resultados dos estágios através de microscopia metalográfica (NEOPHOT 21 – Carl Zeiss/Jena – objetiva 12,5).

### 3.3.4 Posicionamento da POF no compartimento de amostragem do fotoespectrômetro

O procedimento experimental em questão exigiu a necessidade de algumas adaptações no que diz respeito ao posicionamento e ajuste focal da fibra óptica plástica no compartimento da amostra. Foram confeccionados dois suportes: uma para a extremidade de entrada do sinal luminoso na fibra (devidamente posicionado no centro focal do compartimento) e outro para a outra extremidade para posicionar o sinal luminoso no centro do dispositivo fotodetector. Os suportes usados durante as medições, mostrados na Figura 3-7, são o resultado de várias tentativas na busca de um resultado confiável e reproduzível. Com o objetivo de minimizar reflexões todas as adaptações desenvolvidas foram pintadas em cor preto fosco. Para a obtenção de uma melhor condição de lançamento do feixe luminoso na fibra, foi adicionada uma fenda horizontal que confina todo o feixe luminoso no núcleo da POF. A seguir estão descritos os pormenores e as implicações no resultado experimental de cada uma das três medidas adotadas.

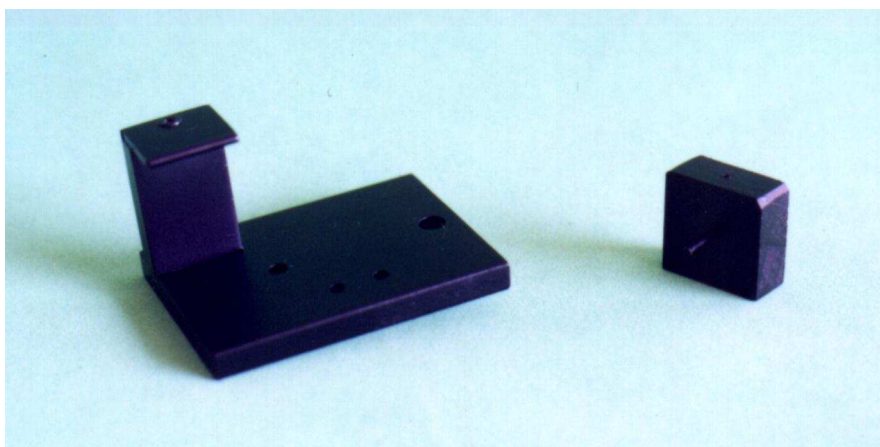


Figura 3-7 Imagem dos suportes para a entrada (esquerda) e para a saída (direita) do sinal luminoso na fibra.

### **Suporte de focalização da radiação luminosa na entrada da fibra óptica:**

Este suporte foi concebido em função das dimensões do compartimento da amostra do equipamento e de forma que a entrada da fibra ficasse exatamente posicionada no ponto focal na área central do compartimento. O suporte sustenta um tubete de aproximadamente 2 mm de diâmetro externo comportando a fibra de 1 mm de diâmetro internamente a ele. O tubete possibilita o ajuste de posição (afastamento ou aproximação) para efeito de focalização do feixe de luz incidente.

Uma vez adicionados tais componentes ao fotoespectrômetro, não foi possível que o compartimento fosse fechado para as medições. Não obstante, o laboratório onde se encontrava o equipamento provia uma adequada isolamento da luz externa, com as paredes totalmente pintadas de preto fosco e sem frestas nas duas portas de acesso existentes.

O suporte em questão foi concebido para que fosse posicionado sobre a base do compartimento, alinhado paralelamente às lentes de quartzo. Durante as medidas verificou-se a necessidade de uma inclinação de  $2,5^\circ$  em relação à lente do lado transmissor no plano horizontal. Esta inclinação não causou prejuízos à medida uma vez que a NA de lançamento foi mantida bem abaixo do valor de NA da fibra sob teste.

### **Suporte de focalização da radiação luminosa no fotodetector:**

Este suporte foi facilmente adaptado a um posicionador já existente no compartimento do fotoespectrômetro junto à porta de  $90^\circ$  para o fotodetector. O suporte tem a forma de um pequeno paralelepípedo confeccionado em madeira nas dimensões apropriadas para a sua inserção no posicionador. A fixação do suporte foi facilmente obtida visto que os posicionadores eram dotados de uma pequena chapa que realiza uma pressão lateral no suporte adaptado. O suporte foi perfurado em sua posição central de forma que a extremidade final da fibra óptica (saída do sinal luminoso) passe através do furo e fique posicionada no centro da área do dispositivo de fotodetecção.

O primeiro modelo testado apresentou inconsistência nos dados obtidos em função da curvatura da POF na parte que sai do suporte em direção ao elemento fotodetector. Isto

ocorre porque a POF baseada em PMMA, devido ao seu caráter flexível, apresenta uma leve curvatura na direção em que permanece enrolada em seu carretel. Desta forma ela fletia progressivamente conforme a extremidade de saída da POF aproximava-se do fotodetector, acusando aumento de atenuação por direcionar-se para fora da área detectora. A solução para esse problema foi obtida com a adição de um tubete rígido até as proximidades do detetor de forma a minimizar o fletimento da fibra durante as medidas.

### **Fenda adicional:**

A fenda adicional foi de simples confecção e teve seu funcionamento aprimorado em poucas tentativas. Consiste num pequeno quadro de cartolina na cor preta com uma fenda horizontal de 750  $\mu\text{m}$  acoplada junto à fenda do monocromador. Para o ajuste focal foi utilizada luz branca através do posicionamento da grade de difração no comprimento de onda de 999 nm.

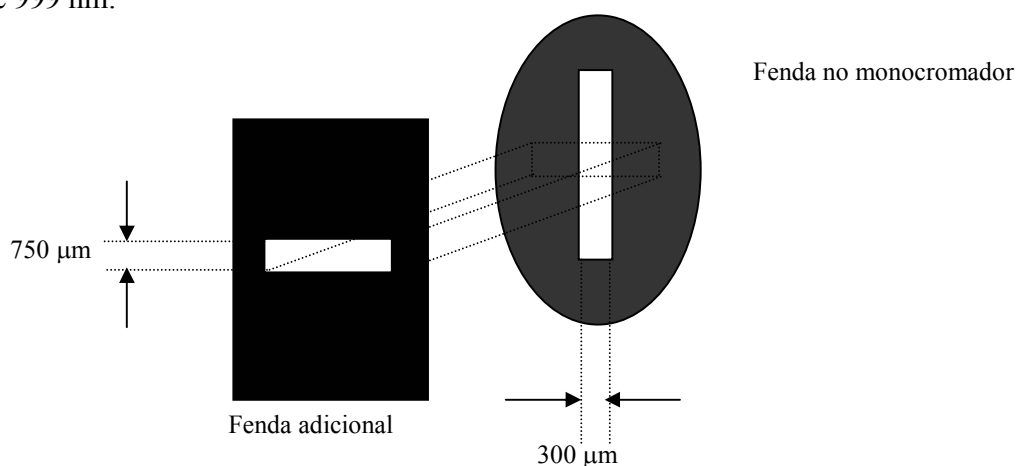


Figura 3-8 Posicionamento da fenda adicional junto à fenda do monocromador.

### **3.3.5 Condições do acoplamento óptico**

#### **NA de lançamento na entrada da fibra (ponta da transmissão):**

A superposição da fenda complementar à fenda do monocromador resulta em um feixe luminoso com seção transversal retangular de 750  $\mu\text{m}$  (da fenda complementar) x 300  $\mu\text{m}$  (da fenda do monocromador). Este feixe transpassa a lente objetiva e incide num ponto

focal a uma distância de 4,75 cm, no centro do compartimento de amostra do fotospectrômetro, como mostrado na Figura 3-9.

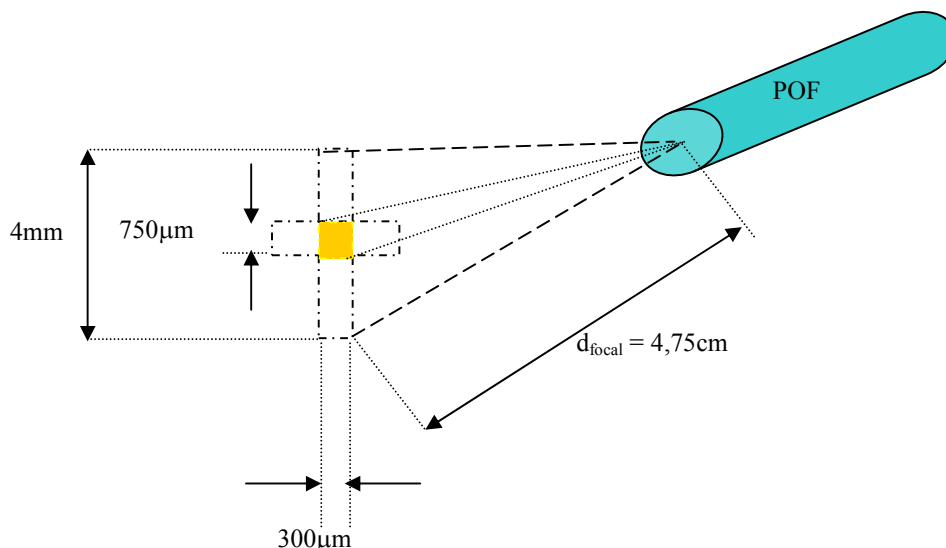


Figura 3-9 Esquemático para o cálculo do NA de lançamento na ponta transmissora do fotospectrômetro.

A projeção do feixe luminoso tem por maior diagonal o valor de 807  $\mu\text{m}$ . A partir desta diagonal, obtém-se o ângulo máximo de lançamento em relação à normal:

$$\delta_{\text{máx}} = \arctg \frac{(\text{diagonal} / 2)}{d_{\text{focal}}} = \arctg \frac{(807 \cdot 10^{-6} / 2)}{4,75 \cdot 10^{-2}} = 0,49^{\circ} \quad (3-6)$$

$$NA_{\text{lançamento}} = \text{sen} 0,49^{\circ} = 0,0085 \quad (3-7)$$

#### **NA de lançamento na saída da fibra (ponta da recepção):**

Conforme o desenho mostrado na Figura 3-10, a limitação para a NA na ponta receptora é apenas função da largura da área fotodetectora do equipamento. Considerando a NA da POF dado pelo fabricante de 0,47 (ângulo de aceitação de 56  $^{\circ}$ ), temos a distância máxima entre a POF e a área fotosensível de modo que seja obtido o acoplamento total:

$$d = \frac{r_{\text{ilum}}}{\text{tg}(\alpha_{\text{aceitação}} / 2)} \quad (3-8)$$

$$d = \frac{2}{\operatorname{tg}(56^\circ/2)} \quad \therefore \quad d = 3,76 \text{ mm} \quad (3-9)$$

onde  $r_{\text{ilum}}$  é raio correspondente à área iluminada no fotodetector

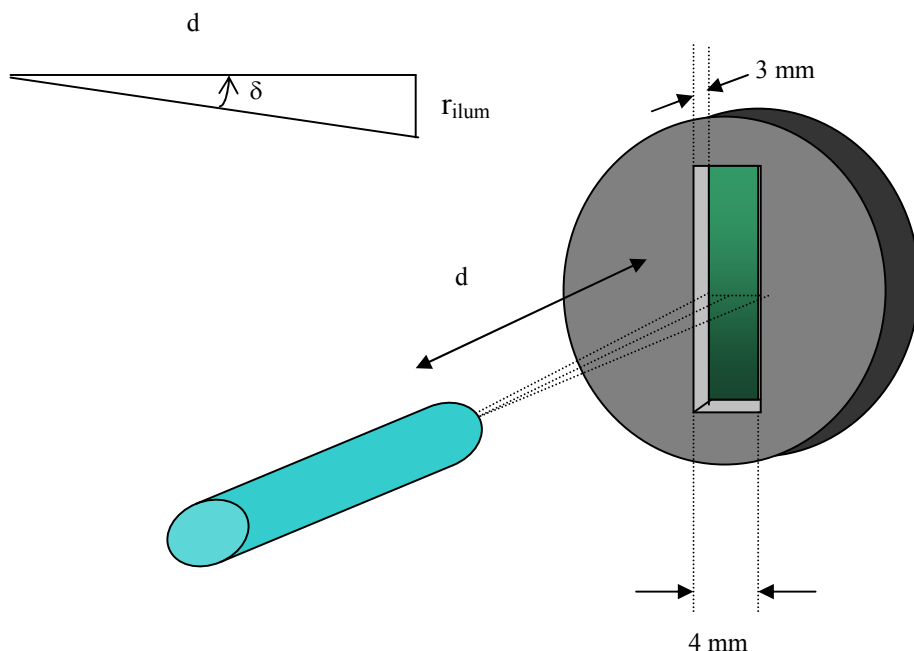


Figura 3-10 Esquemático para o cálculo do NA de lançamento na ponta receptora do fotoespectrômetro.

Considerando que a condição de sub-iluminamento é preferível para a confiabilidade e reprodutibilidade das medidas, foi definida uma guia feita com fita adesiva (“durex”) que manteve a distância fixa de 1,5 mm, o que não muda em nada o ângulo de lançamento (nem a NA), mas modifica a área de iluminação sobre a superfície detectora para:

$$1,5 = \frac{r_{\text{ilu min}}}{\operatorname{tg}(56^\circ/2)} \quad \therefore \quad r_{\text{ilum}} = 1,5 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{56^\circ}{2}\right) = 0,79 \text{ mm} \quad (3-10)$$

Este raio deve garantir o confinamento da potência luminosa na área fotodetectora permitindo uma razoável folga de deslocamento lateral de 1,21 mm para cada lado, embora a fibra tenha sido posicionada para estar exatamente no centro do fotodetector. Contudo, esta condição não mostrou-se adequada pois os resultados das medidas indicaram saturação do fotodetector, devido à concentração de grande potência numa pequena área de

sensibilidade. Como a potência varia com o quadrado da distância, optou-se por colocar a distância de acoplamento total (3,7 mm). Para esta, o comprimento da POF fixado após a “guia de durex” ficou em aproximadamente 32 mm.

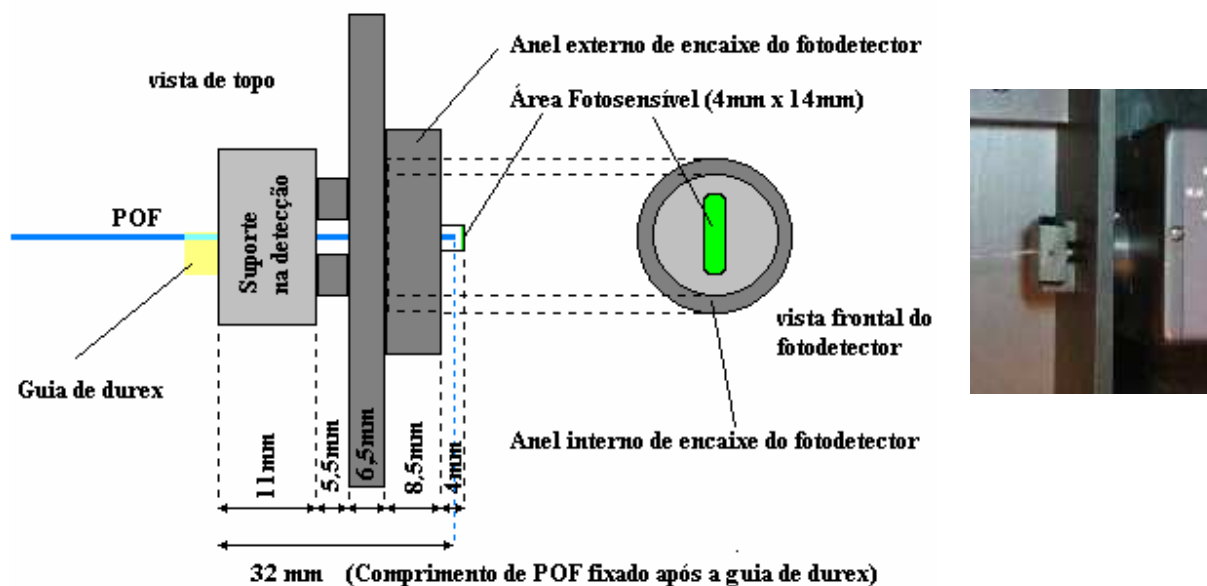


Figura 3-11 Posicionamento (esquema e imagem) da POF em relação à superfície sensível do fotodetector.

### 3.3.6 Manipulação dos dados adquiridos

#### Armazenamento dos dados obtidos do fotoespectrômetro:

Após a varredura no intervalo de comprimento de onda, o fotoespectrômetro armazena seus dados em arquivos de extensão DAT e ASC. O arquivo .DAT é para a visualização no próprio programa do fotoespectrômetro (RS). O arquivo com extensão .ASC (do formato ASCII) pode ser exportado para outros programas. No caso deste experimento os arquivos em formato ASC foram importados para um aplicativo gráfico que permite a apropriada manipulação e representação gráfica necessárias.

O arquivo em formato ASCII armazena os dados na forma de uma matriz 4 colunas x 1000 linhas (4 colunas por 1000 pontos) sendo:



1ª coluna - Comprimento de onda em ordem ascendente [nm]

2ª coluna – Transmitância medida na amostra [V]

3ª coluna - Transmitância medida na referência [V]

4ª coluna - Razão ente a 2ª e a 3ª colunas – Transmitância

### **Tratamento dos dados adquiridos:**

Em aplicativo gráfico, os dados sofreram os seguintes tratamentos matemáticos para a obtenção do coeficiente de atenuação para cada comprimento de onda da faixa espectral adotada:

Cálculo da transmitância: o próprio fotospectrômetro calcula e armazena os valores de transmitância obtidos para uma amostra (4ª coluna no arquivo .ASC).

Cálculo da absorção: a absorção (em base decimal) a partir da transmitância para cada comprimento de onda é dada pela expressão logarítmica (em dB):

$$A = -\log_{10}(T) = \log_{10}(1/T) \quad (3-11)$$

Coeficiente de absorção/atenuação: é obtido pela divisão da absorção pelo comprimento da fibra (dB/m) dado pela expressão

$$\alpha = \frac{10}{(L_{amostra} - L_{referência})} \cdot \log_{10}(1/T) \quad (3-12)$$

## **3.4 Resultados experimentais das medidas de atenuação óptica**

Para as medidas de atenuação espectral foi utilizada a POF PF PMMA ID da Mitsubishi Rayon Corp cujas especificações encontram-se no Anexo 1. Nesta etapa foram obtidos dois resultados experimentais relevantes: o espectro óptico da fibra polimérica e observação do efeito do incremento da atenuação em função de macrocurvaturas.

### 3.4.1 Obtenção do espectro óptico da POF PF PMMA ID

Através do método de fotosspectrometria associado à técnica de *Cut Back* (conforme fluxograma no Apêndice 6) foram realizadas várias medidas (total de 26) sendo suas condições (para cada medição) registradas em uma planilha (Apêndice 7). Estas medidas foram comparadas, sendo selecionadas as que mantiveram boa repetibilidade nos resultados. O resultado do espectro de atenuação apresentado na Figura 3-12 corresponde à média ponto a ponto dos três espectros escolhidos, efetuada com o intuito de redução de ruído aleatório.

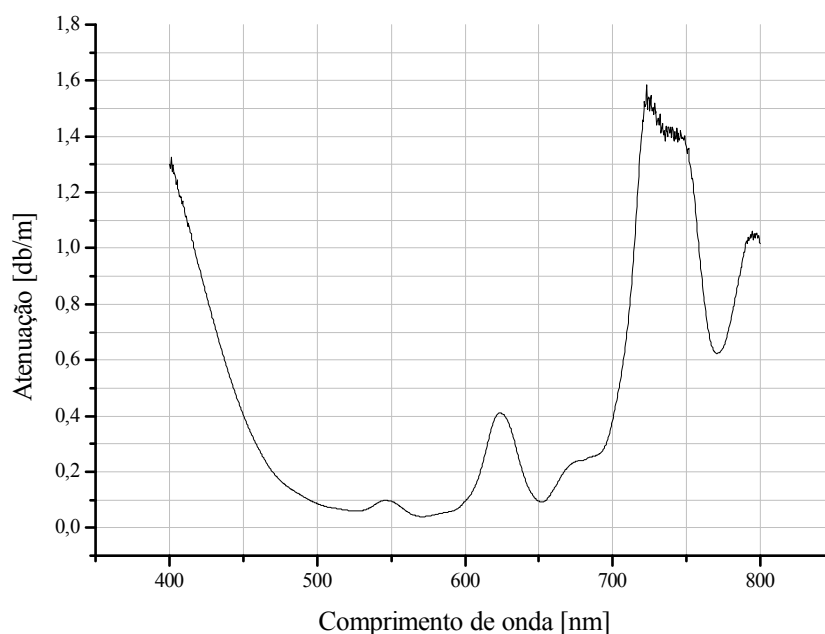


Figura 3-12 Espectro de atenuação da POF PF PMMA ID

A Tabela 3-6 lista os valores de atenuação pontuais obtidos do espectro experimental, nos comprimentos de onda de interesse para esta dissertação, ou seja as principais janelas ópticas da POF (570, 650 e 770 nm) e os comprimentos de ondas dos transmissores ópticos utilizados nas medições de dispersão intermodal apresentada no capítulo 4 (650, 780 e 850 nm).

Tabela 3-6 Coef. de atenuação experimental ( $\alpha_{\text{experim.}}$ ) e a especificada pelo fabricante ( $\alpha_{\text{fabric.}}$ ).

$\lambda$ [nm]	$\alpha_{\text{experim.}}$ [dB/m]	$\alpha_{\text{fabric.}}$ [dB/m]	
		POF Eska Premium [42]*	POF Eska Extra [39]**
570	0,04	0,07	---
650	0,092	0,13	0,18 a 0,25
770	0,623	0,59	---
780	0,746	0,90	---
850	---	2,21	---

\* Estimativa a partir de gráfico obtido por técnica de Cut Back com  $NA_{\text{launching}} = 0,1$ .

\*\* NA de lançamento não especificado.

Não foi possível a obtenção de um espectro de atenuação fornecido pelo fabricante da POF testada. No catálogo da Edmund Optics [39] foi fornecida a faixa para o valor do coeficiente de atenuação específico (máximo) entre 180 a 250 dB/km em 650 nm (sem a especificação da NA de lançamento). Foi também fornecido o gráfico espectral porém sem a definição necessária para que pudesse ser utilizado de modo comparativo nesse trabalho. No *website* da Mitsubishi Rayon, há um comunicado de cancelamento da produção de todos os itens da série ESKA EXTRA - da qual a fibra amostra faz parte [40] - não sendo, portanto, encontrada as especificações técnicas para esta fibra. Não obstante, neste *website* pode ser encontrado um relatório técnico de comparação entre as fibras ESKA EXTRA e ESKA PREMIER publicado em 2001, pela própria Mitsubishi [41], no qual o fabricante afirma que não há diferenças no espectro de atenuação de ambas as fibras. A partir deste fato, para efeito de comparação dos resultados, adotou-se neste trabalho a consulta ao espectro de atenuação da fibra ESKA PREMIER [42], em substituição ao da fibra ESKA EXTRA.

Para melhor comparação, o espectro experimental foi convertido para escala logarítmica mostrado ao lado da espectro do fabricante na Figura 3-13 obtido, também, por técnica de *Cut Back* sobre 10 m de POF PF PMMA ID (diâmetro de 1  $\mu\text{m}$ ) e 1 m de fibra de referência, com lançamento de luz branca (lâmpada de tungstênio) num  $NA_{\text{lançamento}}$  de 0,1.

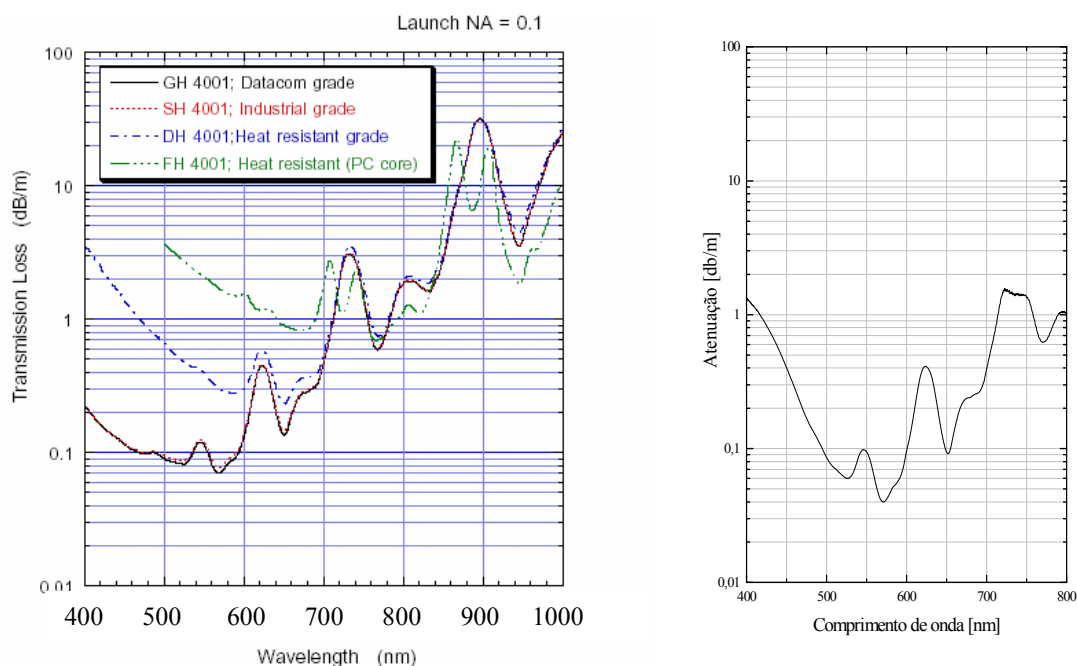


Figura 3-13 Comparação entre o espectro de atenuação do fabricante (ESKA Premium – curva da GH4001) e o obtido experimentalmente.

Os valores de atenuação obtidos experimentalmente para os comprimentos de onda de interesse mostraram-se coerentes com os dados do fabricante apresentando vales e picos coincidentes, porém com valores absolutos medidos inferiores aos do fabricante para a faixa do espectro acima de 500 nm. A causa dessa divergência é a condição de lançamento aplicada no experimento ter sido bem menor ( $NA_{\text{lançamento}} = 0,0085$ ) do que a do fabricante ( $NA_{\text{lançamento}} = 0,1$ ). Um NA de lançamento menor implica num confinamento maior de modos de baixa ordem dentro da fibra (raios luminosos mais próximos ao eixo) com menor quantidade de modos de alta ordem, o que resulta numa menor perda de transmissão total na amostra. Também, é muito provável, conforme verificado na estimativa do comprimento do equilíbrio modal da fibra (na seção 4.6.2), que esta fibra ainda não tenha atingido a condição de equilíbrio que, associada ao sub-iluminamento do guia provoca um efeito de menor atenuação total no guia.

A manutenção das condições de lançamento apropriadas em ambas as extremidades da fibra apresentou algumas dificuldades. A maior delas foi a saturação do fotodetector devido à proximidade da POF com a sua superfície. A radiação recebida de forma

concentrada sobre uma pequena área, causa saturação local do elemento fotossensível, levando à uma não linearidade na medida.

### 3.4.2 Incremento da atenuação em função da macrocurvatura induzida na fibra

Ainda aplicando-se o método de fotoespectrometria associada à técnica de Cut Back, foi simulada a situação de macrocurvatura na POF sob teste de forma a obter o valor de raio crítico assim como para efeito de comparação com os dados da literatura. O raio crítico define a máxima curvatura sofrida pela POF, sem que haja queda significativa em seu desempenho óptico. Foi imposta a curvatura de  $360^\circ$  (volta completa) à POF através de um transferidor no qual foram demarcados os pontos de curvaturas desejadas (raios de 1 , 1,5 , 2 até 6 cm). A cada medição, a fibra era fixada com fita adesiva nos pontos de interesse. A condição de volta completa possibilita uma avaliação mais rápida dos efeitos da curvatura, tendo sido registrados apenas o resultado desta situação.

Nesta etapa obteve-se o espectro óptico simulado para os vários valores de curvatura da fibra. O procedimento seguiu a seqüência estabelecida no fluxograma (Apêndice 6), porém o equipamento foi calibrado e otimizado uma só vez, sendo gravadas as curvas de atenuação obtidas seqüencialmente para cada raio de curvatura. O sinal de referência foi obtido no início da medição.

A Figura 3-14 representa o resultado obtido para o espectro de atenuação nos diferentes raios de curvatura no qual pode-se observar a atenuação aumentando à medida que a fibra é curvada.

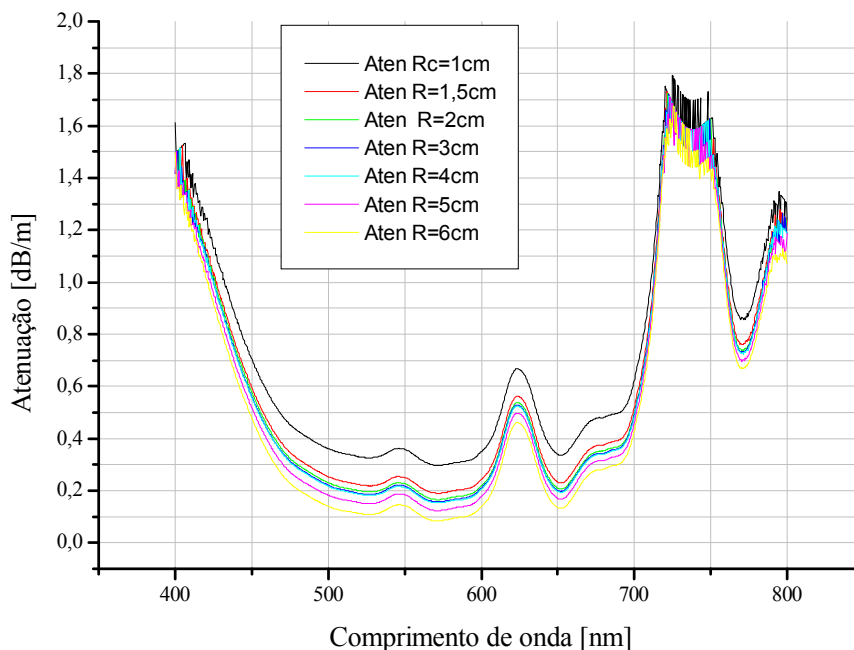


Figura 3-14 Gráfico da atenuação espectral da POF em função do raio de curvatura.

Visto que, teoricamente, no ponto de raio de curvatura de 6 cm, a fibra não deve sofrer atenuação óptica, foi escolhido este ponto como referência para o cálculo do incremento de atenuação nas demais curvaturas. O resultado está ilustrado na Figura 3-15.

Não foi possível a construção da curva teórica para a macrocurvatura visto que a expressão que a define (página 39) depende de constantes não fornecidas pelo fabricante da fibra, entretanto foi possível a comparação através do gráfico do relatório técnico (EH 4001 é o código da fibra ESKA EXTRA). Considerando que o fabricante aplicou uma curvatura de 90° (*quarter bend*), os dados experimentais desta pesquisa (em 360°) foram divididos por quatro. Desta forma é possível a sobreposição dos gráficos, como pode ser visto na Figura 3-15

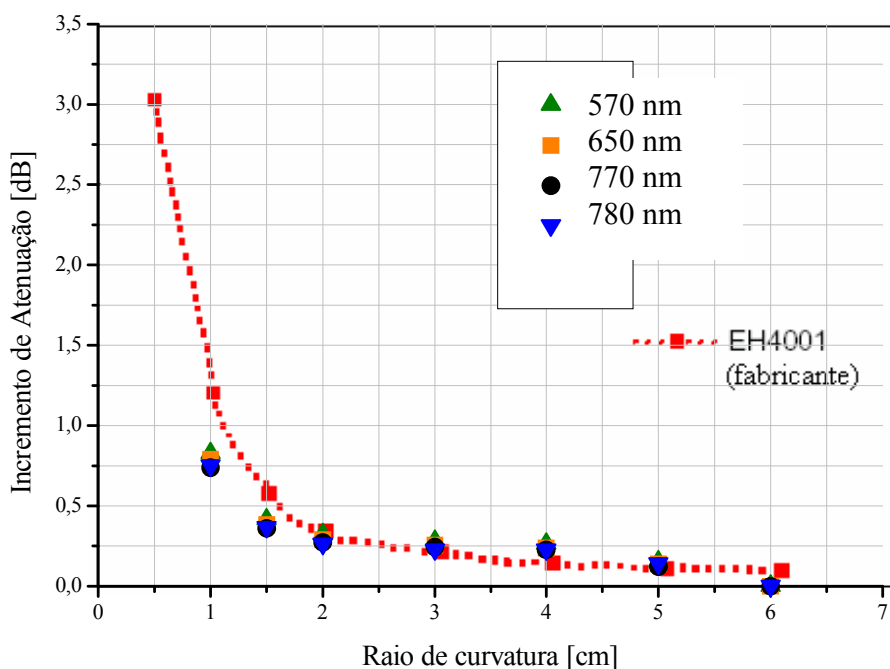


Figura 3-15 Gráfico de comparação do incremento de atenuação em função do raio de curvatura em POF PF PMMA ID -Mitsubishi Rayon (dados experimentais e do fabricante).

De acordo com o gráfico comparativo do incremento de atenuação vs. raio de curvatura pode-se verificar que os dados experimentais corroboram com os dados do fabricantes. É facilmente identificável uma atenuação mais significativa para raios de macrocurvatura inferiores a 2 cm, tal qual indicado pelo fabricante.

A partir da expressão definida por Giozza [22] e Sênior [29] foram obtidos os valores teóricos para o raio de curvatura crítico em função do comprimento de onda, sendo listado na Tabela 3-7. Embora não tenha sido citado nas fontes, constatou-se que o comprimento de onda deve ser aplicado em [ $\mu\text{m}$ ] na fórmula do raio crítico.

$$R_{\text{critico}} = \frac{3.n_1^2.\lambda}{(4.\pi.(n_1^2 - n_2^2)^{3/2})} \quad \therefore \quad R_{\text{critico}} = 102,34 . \lambda \quad (3-13)$$

Pela fórmula da equação 3-13, quanto maior o comprimento de onda, mais sensível é a fibra para as macrocurvaturas. Pela Tabela 3-7, observa-se que o valor de 2 cm indicado pelo fabricante aplica-se à situação do menor comprimento de onda (200 nm). No entanto,

este efeito de dependência com o comprimento de onda mostrou-se desprezível dado que experimentalmente os valores medidos para os quatro comprimentos de onda estão muito próximos (quase superpostos).

Tabela 3-7 Cálculo teórico ([22] e [29]) do raio de curvatura crítico em função do comprimento de onda.

$\lambda$ [nm]	Raio crítico ( $R_{\text{crítico}}$ ) [cm]
200	2,05
300	3,07
400	4,10
500	5,12
600	6,14
700	7,16
800	7,20

Na Tabela 3-8 estão calculados, para a fibra sob estudo, os valores para o raio de curvatura conforme recomendações na literatura vigente e fabricante.

Tabela 3-8 Recomendações práticas para o raio de curvatura na literatura e fabricantes.

Referência	Recomendação	POF PF PMMA ID ( $d_{\text{fibra}}=1$ mm)
[22] (para sílica)	$R_{\text{crítico}} = 2 \times \text{raio crítico}$	$R_{\text{crítico}} = 4$ cm
[7]	$R_{\text{crítico}} > 10 \times \text{diâmetro da fibra}$	$R_{\text{crítico}} > 1$ cm
[18] e [39]	$R_{\text{crítico}} \geq 20 \times \text{diâmetro ext. da fibra}$	$R_{\text{crítico}} \geq 2$ cm

Na recomendação de Giozza [22], o valor mostra-se subdimensionado, visto que foi comprovado que a POF poder sofrer curvatura maior sem comprometimento do seu desempenho óptico. Cabe lembrar que esta recomendação é específica para fibras de sílica, as quais não apresentam a característica de grande flexibilidade das POFs. As referências dos fabricantes Toray [18] e Mitsubishi [39] comprovam a validade do experimento aqui realizado. Já a recomendação de Zubia *et al.*[7], apesar de referir-se a um material exclusivamente sobre fibras ópticas poliméricas, não se mostra adequada. Pelos dados do fabricante, com 1 cm de curvatura, a fibra já apresenta atenuação em torno de 1,2 dB (perda de potência de 24%).



## 4 Dispersão óptica em POFs

Neste capítulo serão analisados os aspectos do alargamento (dispersão) sofrido pelo pulso óptico ao trafegar pela fibra, cujos dados obtidos experimentalmente possibilitam o dimensionamento da banda passante (e a capacidade de transmissão) suportada pela POF.

### 4.1 O fenômeno da dispersão óptica

Um pulso de luz que propaga-se através de uma fibra óptica experimenta um efeito de alargamento temporal conhecido como dispersão temporal ou simplesmente dispersão. Este fenômeno, ilustrado na Figura 4-1 para vários tipos de fibras, é o resultado dos diferentes atrasos de propagação dos modos que transportam a energia luminosa. O pulso na saída é a envoltória das várias componentes espectrais que constituem o pulso luminoso.

A dispersão em qualquer enlace óptico é um parâmetro importante porque limita e determina a máxima capacidade de informação transmitida pela fibra óptica. A dispersão afeta as comunicações analógicas porque produz uma distorção na forma de onda do sinal o que pode comprometer o conteúdo da informação e reduzir a banda passante da fibra óptica (Hz). Já no caso da transmissão digital, o alargamento de um pulso pode vir a causar sobreposição com os pulsos adjacentes num efeito conhecido por interferência intersimbólica (ISI – *Inter Symbol Interference*), ilustrado na Figura 4-2. Neste caso, o alargamento do pulso óptico determina a máxima taxa de transmissão (bps) de informação através da fibra.

Três tipos de dispersão são identificados: intramodal, intermodal e não-linear, sendo que a primeira subdivide-se ainda em dispersão material e dispersão de guia de onda. A presença destes diferentes mecanismos na dispersão total da fibra óptica é ditada pelo tipo de fibra. De maneira geral, a capacidade de transmissão das fibras multimodo ID é afetada principalmente pela dispersão modal, enquanto que a capacidade de transmissão das fibras multimodo IG é afetada pelas dispersões modal e material. Vale lembrar que as fibras multimodo IG surgiram para minimizar os efeitos da dispersão modal que ocorrem nas fibras ID. Já no caso das fibras monomodo (sílica) faz-se presente principalmente as dispersões material e de guia de onda.

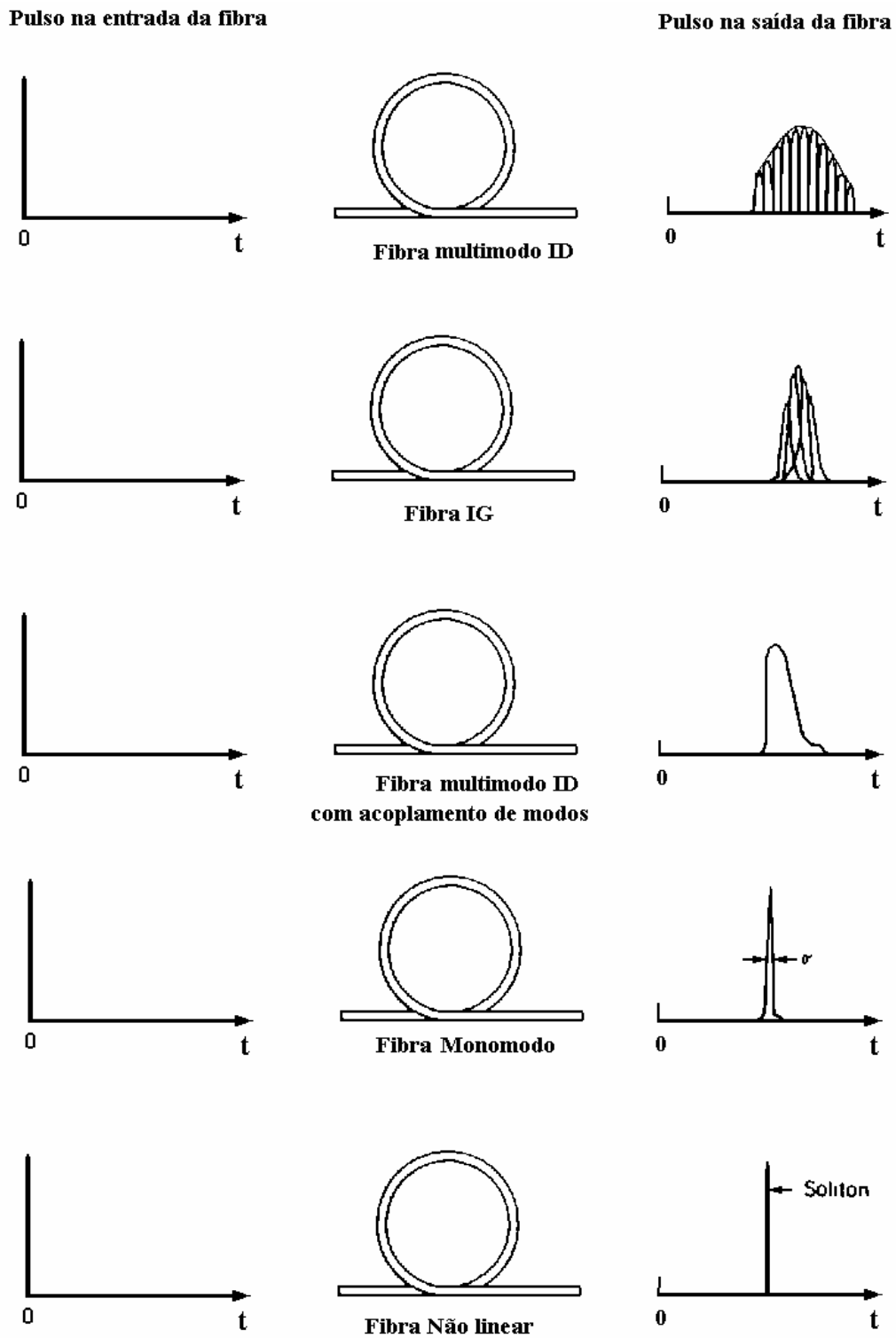


Figura 4-1 Alargamento de um pulso óptico após a transmissão em diferentes tipos de fibras [30].

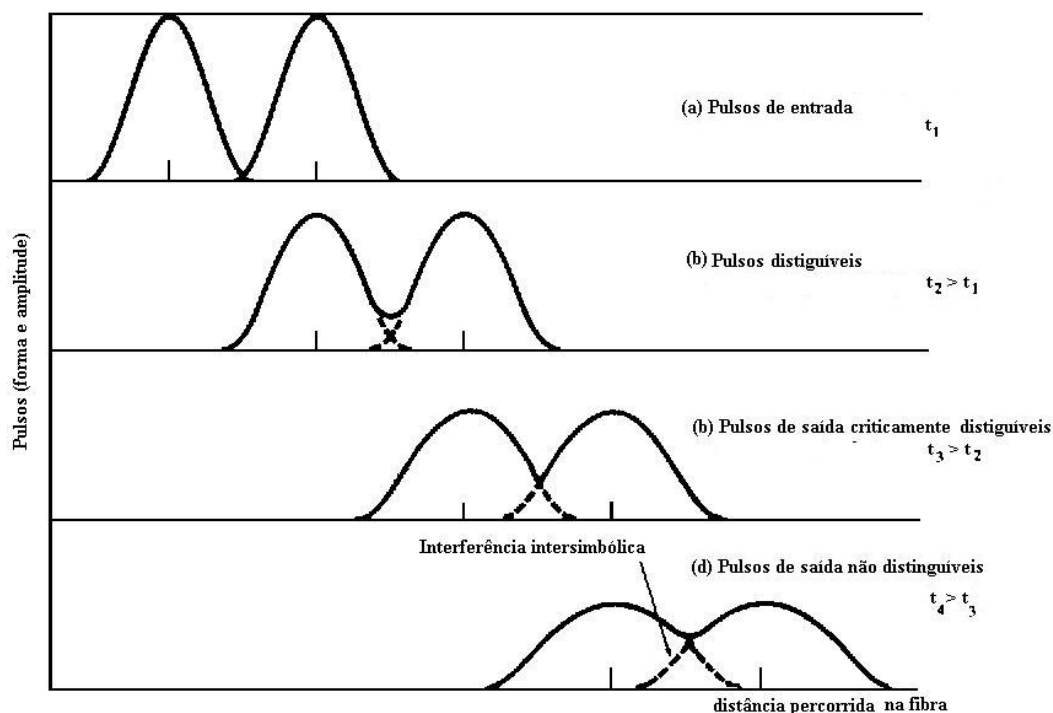


Figura 4-2 Efeito de ISI entre dois pulsos adjacentes em uma fibra óptica [13].

A dispersão intermodal independe da largura de pulso da fonte de luz (largura espectral) sendo usualmente especificada pelo alargamento característico do pulso e pelo comprimento da fibra, em geral em unidades de ns/m ou ns/km [32]. Ao contrário, a dispersão intramodal depende diretamente da largura de pulso da fonte. Para remover esta dependência, tanto para a dispersão material quanto para a dispersão do guia de onda, a especificação da dispersão deve ser dividida pela largura espectral da fonte (em nm), o que resulta, portanto, numa unidade dada em ns/(m.nm) ou ns/(km.nm).

#### 4.1.1 Dispersão intramodal (ou cromática)

Esta dispersão está correlacionada com cada modo de propagação em si e é dependente do comprimento de onda, vindo daí a sua outra designação de dispersão cromática. A dispersão cromática é resultante da dependência da velocidade de grupo de propagação de um modo individual com relação ao comprimento de onda [22]. Os efeitos na distorção do sinal transmitido aumentam com a largura espectral da fonte luminosa. Esta

dispersão é subdividida em dispersão material e dispersão do guia de onda, as quais possuem uma interdependência bastante complexa. Entretanto, é possível estimar de maneira simples e com razoável precisão os efeitos da dispersão intramodal, somando-se as contribuições da dispersão material e da dispersão do guia de onda calculadas individualmente, uma na ausência da outra.

### **Dispersão (intramodal) material**

Este tipo de dispersão ocorre porque o índice de refração do material é função do comprimento de onda. Neste caso as várias componentes espectrais de um dado modo viajam em diferentes velocidades de propagação e o pulso se alarga. A diversidade de componentes espectrais nos modos transmitidos é imposta pela fonte luminosa utilizada que, em geral, caracteriza-se pela emissão de luz policromática [22].

Sendo  $\Delta\lambda$  a largura espectral rms da fonte óptica, a dispersão material é dada pelo atraso relativo da componente de pulso correspondente ao mais curto comprimento de onda ( $\lambda - \Delta\lambda/2$ ) referenciado à componente correspondente ao maior comprimento de onda ( $\lambda + \Delta\lambda/2$ ), visto que ambas as componentes pertencem ao mesmo modo. Desta forma, pode-se dizer que, as componentes mais curtas do pulso espectral “vêm” um índice de refração maior e viajam mais lentamente do que aquelas representantes mais longas do pulso espectral [7].

A Figura 4-3 ilustra o comportamento da dispersão material para o polímero amorfo perfluorinado e o PMMA em comparação com o dióxido de silício (material do qual são feitas as fibras de sílica).

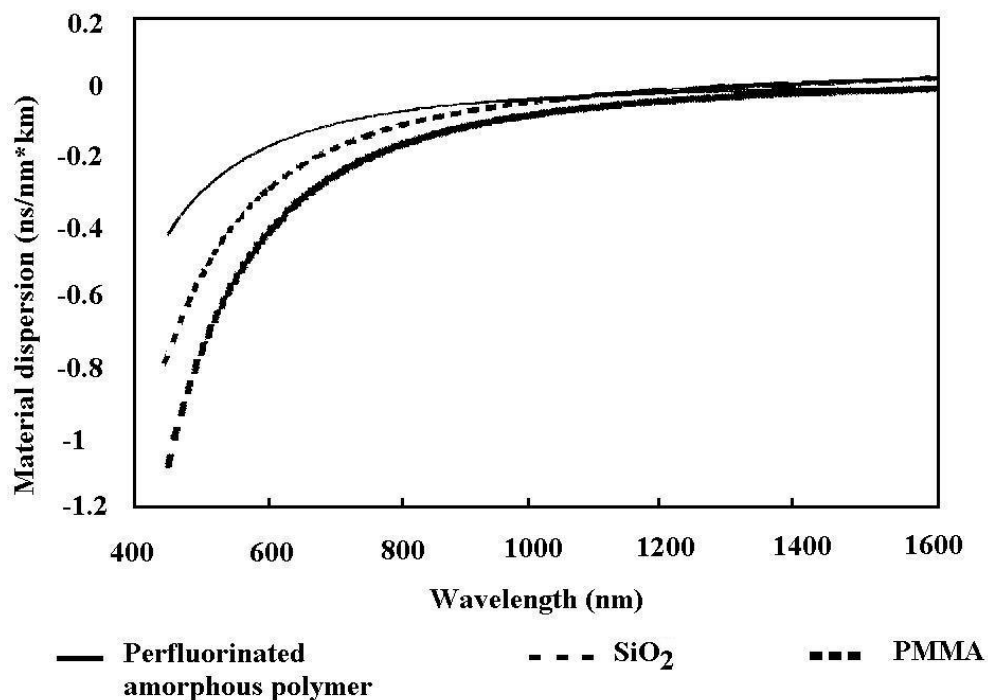


Figura 4-3 Dispersão material do polímero amorfo perfluorinado, do PMMA e da sílica (SiO<sub>2</sub>) [16].

### Dispersão (intramodal) de guia de onda

A dispersão do guia de onda resulta principalmente da dependência do parâmetro  $V$  com relação ao comprimento de onda da luz transmitida. Para um valor fixo qualquer de  $V$ , existe um atraso de grupo de propagação diferente para cada modo, implicando numa distorção do sinal óptico na saída da fibra.

A dispersão do guia de onda é particularmente importante em fibras monomodo de sílica nas quais a dispersão material não é significativa ou em comprimentos de onda para os quais a dispersão material é pequena (aproximadamente  $\lambda = 1300\text{nm}$ ) [30]. Já para fibras que comportam muitos modos, tais como as POFs, a dispersão de guia de onda é geralmente muito pequena comparada com a dispersão material, podendo então ser desprezada [22].

#### 4.1.2 **Dispersão não linear**

Esta dispersão ocorre quando a potência do sinal óptico no núcleo é alta de forma que os índices de refração tornam-se dependentes desta intensidade de potência e o material passa a exibir um comportamento não linear (modulação de auto-fase) [30]. As componentes de alta-intensidade do pulso óptico passam por diferentes mudanças de fase em relação às componentes de baixa-intensidade, alterando sua frequência óptica. Sob certas condições, a dispersão não-linear pode compensar a dispersão material, de forma que o pulso (sóliton) trafega ao longo da fibra sem sofrer alteração em seu perfil temporal. A literatura vigente não faz menção de que este tipo de dispersão seja significativo para as POFs utilizadas para comunicações.

#### 4.1.3 **Dispersão intermodal ou multipercursos**

Esta dispersão ocorre em função dos diferentes percursos traçados pelos modos de propagação ao longo da fibra, razão pela qual também é chamada de dispersão intermodal ou apenas modal. A dispersão intermodal é conhecida por afetar significativamente a transmissão em fibras multimodo e resulta do fato de cada modo de propagação, para um mesmo comprimento de onda, ter uma velocidade de grupo diferente.

Nas POFs ID o modo de propagação de ordem mais baixa percorre o caminho mais curto (eixo) dentro do núcleo da fibra chegando, ao final da fibra, antes do que o modo de ordem mais alta. Esta diferença de tempos de propagação está mostrada na Figura 4-4. Já para as POFs IG, o perfil gradual do núcleo realiza uma equalização dos tempos percorridos, visto que a velocidade da luz num meio é inversamente proporcional ao seu índice de refração. Desta forma, os modos de propagação chegam em momentos muito próximos na extremidade final do guia, causando uma dispersão mínima no pulso luminoso.

Esta dispersão é um dos principais focos deste estudo, sendo melhor detalhada a partir da página 68.

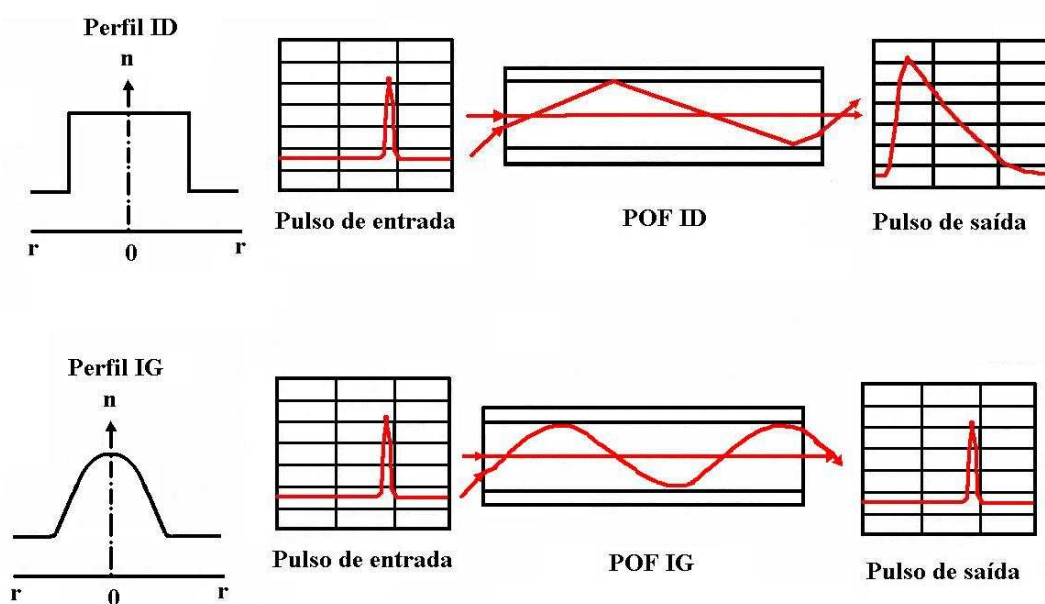


Figura 4-4 Representação esquemática da transmissão da luz e alargamento do pulso luminoso através de 15 m de POF ID e POF IG [9].

De um modo geral, a dispersão intermodal em fibras multimodo (seja ID ou IG) pode ser minimizada reduzindo-se a abertura numérica da fibra. Contudo, esta medida, conforme já visto, afeta negativamente a eficiência de acoplamento da potência luminosa e o confinamento de potência no núcleo, aumentando as perdas induzidas por curvaturas. Isso faz com que a redução da abertura numérica tenha limites práticos. O inverso também é verdadeiro. Se  $\Delta$  for mantido o maior possível (com conseqüente aumento da NA) de forma a acoplar o máximo de luz dentro da fibra, o fenômeno de dispersão intermodal aumenta, prejudicando assim o desempenho destas fibras para o propósito de comunicação.

## 4.2 Dispersão total do pulso óptico em fibras ópticas multimodo

Matematicamente, a dispersão total ( $\tau_{total}$ ) sofrida pelo pulso óptico ao longo da fibra óptica é representada pelo valor rms (*root-mean-square*) do desvio padrão das dispersões intermodal e intramodal, sendo esta última a soma da material com a do guia de onda [7].

$$\tau_{total} = [\tau_{intermodal}^2 + (\tau_{material} + \tau_{guia})^2]^{1/2} \quad (4-1)$$

Como em fibras multimodo os efeitos da dispersão do guia de onda podem ser desprezados, a dispersão total da fibra resulta em [22]:

$$\tau_{\text{multimodo}} = (\tau_{\text{intermodal}}^2 + \tau_{\text{material}}^2)^{1/2} \quad (4-2)$$

Considerando o comportamento multimodal das POFs, adiante será dada ênfase qualitativa e quantitativa à dispersão intermodal. A abordagem está separada de acordo com os dois tipos principais de fibras multimodo (ID e IG) porém com maior ênfase para fibras de índice degrau (ID), por ser o enfoque deste estudo.

### 4.3 Dispersão intermodal em fibras multimodo índice gradual

As fibras multimodo IG caracterizam-se por minimizar os efeitos da dispersão modal. A variação gradual do índice de refração do núcleo neste tipo de fibra, permite uma compensação da velocidade de propagação dos raios cujas trajetórias são mais longas (modos de ordem superior) implicando em uma menor dispersão modal.

De acordo com Sênior [29] e Saleh [30], a dispersão intermodal para fibras IG é dada, respectivamente, por:

$$\tau_{\text{intermodal(IG)}} \approx \frac{L.n_1.\Delta^2}{20\sqrt{3}.c} \quad (4-3)$$

$$\text{e} \quad \tau_{\text{intermodal(IG)}} \approx \frac{L}{c_1} \cdot \frac{\Delta^2}{4} \quad (4-4)$$

### 4.4 Dispersão intermodal em fibras multimodo de índice degrau

Numa fibra ID com núcleo homogêneo, a velocidade de propagação é constante para os todos os fótons de um determinado comprimento de onda. Entretanto, como os fótons injetados incidem com diferentes ângulos (modos) na fibra, existirão percursos ópticos diferentes dentro do núcleo, o que resulta em diferentes tempos de propagação.

O cálculo para a dispersão modal em fibras ID utiliza a Teoria dos Raios através da qual deduz-se o atraso de tempo máximo e o atraso de tempo mínimo [29]:



- O raio axial (modo fundamental de ordem mais baixa), que percorre o trajeto mais curto (L), trafega ao longo da fibra de comprimento L produzindo um atraso mínimo  $T_{\min}$ :

$$T_{\min} = \frac{L}{(c/n_1)} = \frac{L.n_1}{c} \quad (4-5)$$

- O raio meridional extremo (modo de ordem superior), que percorre o maior trajeto, exhibe o atraso máximo  $T_{\max}$ :

$$T_{\max} = \frac{L/\cos\theta}{(c/n_1)} = \frac{L.n_1}{c.\cos\theta_{\text{aceitação}}} \quad (4-6)$$

Manipulando-se adequadamente as expressões fornecidas, obtém-se a diferença de tempo decorrida entre o tempo máximo e o mínimo, a qual pode ser diretamente relacionada ao alargamento total do pulso de saída da fibra [29].

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} = \frac{L.n_1}{c.n_2} - \frac{L.n_1}{c} = \frac{L.n_1^2}{c.n_2} \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) \quad (4-7)$$

A partir desta diferença, diversas referências ([7], [12], [13], [22], [29], [30], [32] e [43]) na literatura chegam a formulações para a dispersão intermodal que são similares em alguns aspectos mas não totalmente consoantes. Todas as oito referências consultadas partem do princípio da diferença nos tempos de propagação tomando por base que é ignorado o atraso comum a todos os modos ( $T_{\min}$ ), sendo considerandos apenas os raios meridionais e os axiais, ignorando-se os raios oblíquos. Também, considera-se que todos os modos excitados pela fonte luminosa, sofrem igual atenuação na fibra e não transferem energia de um modo para outro (desacoplamento de modos). Dessa forma, a densidade de energia por modo na saída da fibra é supostamente a mesma da sua entrada (condição de uma fibra ideal, sem imperfeições). Essas condições, embora permitam uma primeira aproximação dos efeitos da dispersão intermodal, não caracterizam de forma precisa o comportamento das fibras multimodo [22].

Imperfeições nas estruturas geométricas e na composição das fibras, intrínsecas ao processo de fabricação ou induzidas externamente (irregularidades, não homogeneidades, etc), causam os fenômenos de filtragem e acoplamento de modos entre modos adjacentes (*mode-mixing*) que têm implicações importantes na determinação da dispersão modal [22].

Na prática pode ser provado que a dispersão modal efetiva (medida) em POFs ID é significativamente menor do que a calculada para um modelo de fibra ideal sem considerar o acoplamento de modos no enlace [7]. A partir do comprimento de equilíbrio modal, a dispersão modal deixa de ser uma função linear do comprimento L da fibra para crescer segundo uma dependência de  $(L_{eq} \cdot L)^{1/2}$  [22], tal qual pode ser observado na expressão fornecida por Sênior [29] na Tabela 4-1, que lista as expressões encontradas da literatura para a dispersão intermodal em fibras multimodo ID.

Tabela 4-1 Fórmulas da diferença dos tempos de propagação para fibra multimodo ID.

Referência	Expressão matemática
[12] e [29]	$\Delta T \approx \frac{L}{c} \cdot \Delta \cdot \frac{n_1^2}{n_2} \quad (\text{para } \Delta \ll 1) \quad (4-8)$
[7]	$\Delta T = \frac{n_1}{c} \cdot L \cdot \left( \frac{1}{\sin \theta_{\text{critico}}} - 1 \right) \quad (4-9)$
[22], [29] e [43]	$\Delta T \approx \frac{NA^2}{2 \cdot n_1 \cdot c} \cdot L \quad (\text{para } \Delta \ll 1 \text{ e } V \gg \pi) \quad (4-10)$
[43] e [22]	$\Delta T = \frac{L \cdot n_1}{c} \cdot \Delta \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{V} \right) = \frac{L}{c} \cdot \frac{NA^2}{2 \cdot n_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{V} \right) \quad (4-11)$
[33] e [32]	$\Delta T = \frac{L}{c} \cdot (n_1 - n_2) \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{V} \right) \quad (\text{para } \Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}) \quad (4-12)$
[32], [13] e [29]	$\Delta T \approx \frac{L \cdot \Delta \cdot n_1}{c} \quad (\text{para } V > 10) \quad (4-13)$
[29]	$\Delta T \approx \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \sqrt{L \cdot L_{eq}} \quad (4-14)$

O cálculo da dispersão intermodal é mais adequadamente expresso em termos do valor de desvio padrão rms, mostrado na Tabela 4-2, porque traduz o real alargamento do pulso ótico. Este conceito será melhor explicado adiante.

Tabela 4-2 Fórmulas de dispersão intermodal rms para fibra multimodo ID.

Referência	Expressão matemática
[22], [29] e [32]	$\tau_{intermodal(ID)} \approx \frac{L.NA^2}{4\sqrt{3}.n_1.c}$ (para $\Delta \ll 1$ ) (4-15)
[30]	$\tau_{intermodal(ID)} \approx \frac{L}{c_1} \cdot \frac{\Delta}{2}$ (4-16)

#### 4.4.1 Medida da dispersão no domínio do tempo e da frequência

Efeitos de dispersão podem ser caracterizados pela medida da resposta da fibra ao impulso no domínio do tempo ou pela medida da resposta em frequência em banda base (domínio da frequência). Através da utilização de Transformada de Fourier é possível comutar matematicamente entre os domínios do tempo e frequência.

Se for assumido que a resposta da fibra é linear em relação à potência, uma descrição matemática no domínio do tempo para a potência óptica de saída  $P_{saída}(t)$  da fibra pode ser obtida pela convolução da resposta da potência ao impulso  $h(t)$  com a potência óptica de entrada  $P_{entrada}(t)$ :

$$P_{saída}(t) = h(t) * P_{entrada}(t) \quad (4-17)$$

No domínio da frequência a função de transferência de potência  $H(\omega)$  é a transformada de Fourier de  $h(t)$  e, portanto, fazendo-se a transformada de Fourier de todos os membros da equação anterior, tem-se:

$$P_{saída}(\omega) = H(\omega).P_{entrada}(\omega) \quad (4-18)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular em banda base.

Pode-se realizar a medida da dispersão no domínio da frequência (analisador de espectro) e obtê-la matematicamente no domínio do tempo (resposta temporal) ou, medi-la no domínio do tempo (osciloscópio de amostragem) e obter a resposta na frequência (função de transferência). A representação no domínio da frequência é mais complexa, o que torna a medida no domínio temporal mais usual no meio científico, sendo a opção adotada nesta dissertação.

#### 4.4.2 Parâmetros da dispersão intermodal medidos no domínio do tempo

A dispersão da fibra é obtida a partir das duas medidas de largura de pulso obtidas (entrada e saída), as quais são tomadas em qualquer fração conveniente de suas amplitudes sendo as três mais usuais:

- Diferença dos tempos de propagação ( $\Delta T$ ): é equivalente à leitura da largura do pulso de saída tomada na base da curva do pulso e pode ser calculada pelas expressões matemáticas da Tabela 4-1.
- Dispersão modal rms ( $\tau_{\text{rms}}$ ): é obtido do desvio padrão das larguras dos pulsos  $\sigma$  de entrada e saída. Teoricamente pode ser calculado pelas expressões da Tabela 4-2.
- Dispersão modal FWHM ( $\tau_{\text{FWHM}}$ ): obtida do desvio padrão das larguras dos pulsos  $t_{\text{FWHM}}$  (entrada e saída) tomadas na metade de seu valor de amplitude máxima FWHM (*Full Width of the pulse at its Half-Maximum value*).

Para esta análise, foi assumido que pulso de saída possui uma forma aproximadamente gaussiana conforme definido na Figura 4-5, onde podem ser vistos as três possibilidades de medidas para a obtenção da dispersão na fibra óptica [13].

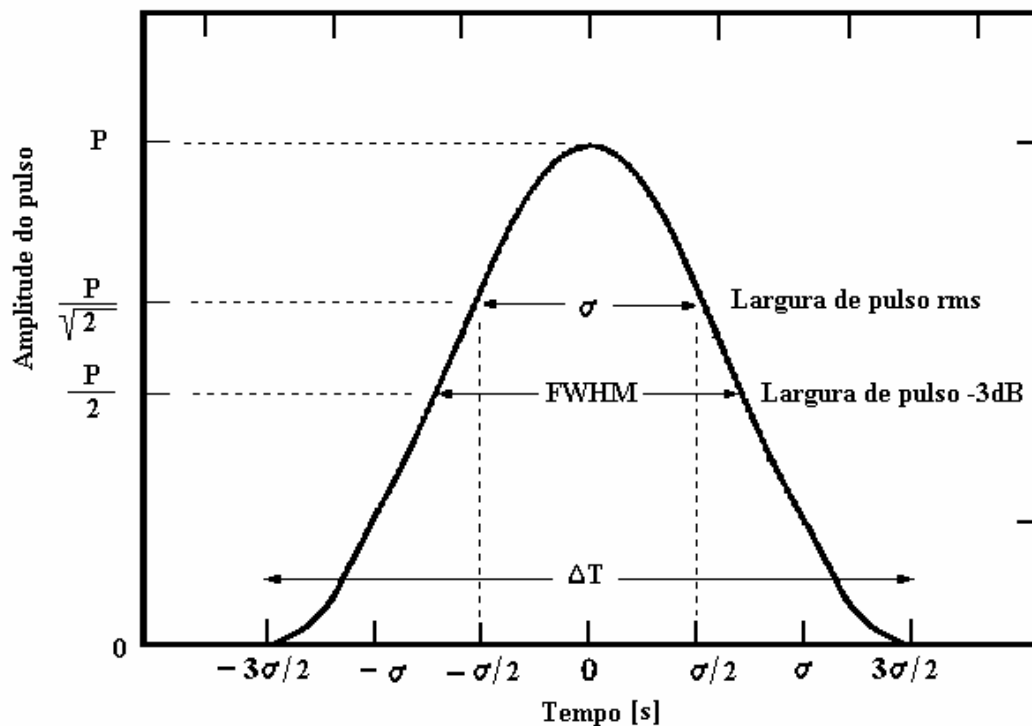


Figura 4-5 Definições dos parâmetros de dispersão

A resposta de saída na fibra óptica aproximada pela função gaussiana descrita por ([33] e [13]) é representada por:

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (4-19)$$

Esta expressão foi utilizada para a simulação da dispersão intermodal do pulso óptico cujos resultados encontram-se no Apêndice 16.

A literatura freqüentemente aborda o cálculo da dispersão intermodal em termos da diferença dos tempos de propagação ( $\Delta T$ ) em um dado comprimento de onda. Contudo, a capacidade do sistema não deve ser dimensionada a partir de  $\Delta T$ . Na prática, para melhor aproveitamento da capacidade da fibra, é permitida alguma sobreposição dos pulsos na

informação (interferência intersimbólica), sendo mais adequados os parâmetros de dispersão rms e FWHM.

### **Alargamento do pulso de saída em termos do valor rms**

A largura de pulso rms ( $\tau_{rms}$ ) é definida como o desvio padrão da largura do pulso (raiz quadrada da variância) e está relacionada ao pulso de entrada e ao pulso de saída. Esta aproximação é feita assumindo-se que o pulso seja simétrico [32]. Como a largura do pulso na saída da fibra é uma combinação da largura do pulso da fonte com o alargamento do pulso na fibra causado pela dispersão, os efeitos estão combinados de acordo com [32]:

$$\sigma_{saída}^2 = \sigma_{entrada}^2 + \tau_{rms\_fibra}^2 \quad (4-20)$$

Através das formas de ondas obtidas para os pulsos de entrada e saída na fibra óptica, obtém-se  $\sigma_{entrada}$  e  $\sigma_{saída}$  e a partir daí pode-se computar a dispersão rms da fibra (em ns/m) por:

$$\tau_{rms\_fibra} = \frac{\sqrt{\sigma_{saída}^2 - \sigma_{entrada}^2}}{(L_{amostra} - L_{referência})} \quad (4-21)$$

Os valores  $\sigma$  na entrada e saída da fibra são obtidos dos valores medidos de  $t_{FWHM}$  (descrito no tópico seguinte) na curva da resposta temporal do pulso óptico de entrada e saída, respectivamente.

### **Alargamento do pulso de saída em termos do valor FWHM**

Neste caso a largura do pulso é medida pelo parâmetro  $t_{FWHM}$  tomado na metade de seu valor de amplitude máxima (ou no ponto de -3 dB), cuja relação com  $\sigma$  é expressa por:

$$t_{FWHM} = 2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \ln 2} = 2,355 \cdot \sigma \quad (4-22)$$

Mantendo a suposição do formato gaussiano para os pulsos de entrada e saída, a equação pode ser escrita na forma:

$$t_{FWHM\_saída}^2 = t_{FWHM\_entrada}^2 + \tau_{FWHM\_fibra}^2 \quad (4-23)$$

onde  $t_{FWHM\_entrada}$  é a largura do pulso de entrada medida no ponto FWHM

$t_{FWHM\_saída}$  é a largura do pulso de saída medida no ponto FWHM

$\tau_{FWHM\_fibra}$  é a dispersão da fibra no ponto FWHM

Tomando em conta o comprimento do guia, a dispersão do pulso na fibra será dada (em ns/m) por:

$$\tau_{FWHM\_fibra} = \frac{\sqrt{t_{FWHM\_saída}^2 - t_{FWHM\_entrada}^2}}{(L_{amostra} - L_{referência})} \quad (4-24)$$

#### 4.4.3 Banda passante

A banda passante pode ser determinada através da banda passante óptica e banda passante elétrica, nos quais os conceitos de frequência -3 dB óptica e -3 dB elétrica são diferentes. A banda passante óptica -3 dB é definida pela frequência na função de transferência da fibra óptica  $H(f)$  onde a potência cai para a metade do valor da frequência de modulação zero (nível DC). Já para a banda passante elétrica o valor -3 dB equivale a 0,707 do valor da potência.

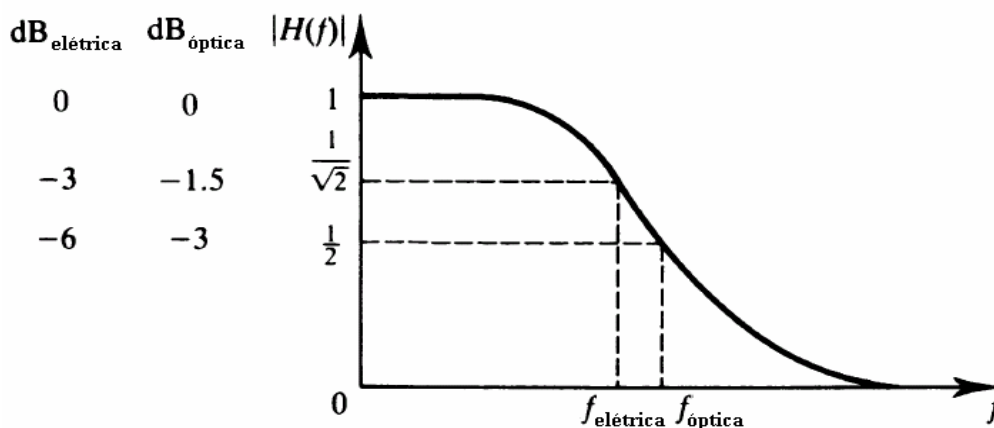


Figura 4-6 Conceitos de banda passante elétrica e óptica na curva de transferência  $H(f)$ .

Em um receptor o nível elétrico na frequência óptica -3 dB equivale a -6 dB [56]. Em geral, a banda passante elétrica é utilizada em projetos de sistemas eletrônicos após o fotodetector.

### **Banda passante óptica:**

A relação entre a largura de banda óptica ( $B_{\text{óptica}}$ ) e o parâmetro  $\sigma$  pode ser obtida da transformada de Fourier do pulso [33], tomando por base que  $|F(w)|$  vale  $\frac{1}{2}$  :

$$|F(\omega)| = \frac{1}{2} = e^{-[\sigma^2 \cdot (2\pi \cdot B_{\text{óptica}})^2] / 2} \quad (4-25)$$

Resolvendo a expressão para o parâmetro  $\sigma$  do pulso em termos da largura de banda óptica (em Hz), tem-se [22][33] e [13]:

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2} \cdot (2\pi \cdot B_{\text{óptica}} \cdot \sigma)^2 \quad (4-26)$$

$$B_{\text{óptica}} \approx \frac{\sqrt{2 \cdot \ln 2}}{2\sigma\pi} = \frac{0,1874}{\sigma} \quad (4-27)$$

A banda passante óptica em função do parâmetro  $t_{\text{FWHM}}$  é dada por [13]:

$$B_{\text{óptica}} = \frac{0,440}{t_{\text{FWHM}}} \quad (4-28)$$

### **Banda passante elétrica:**

A banda passante elétrica e a banda passante óptica estão relacionadas entre si por um fator de  $1/2^{1/2}$  [13] [56]:

$$B_{\text{elétrico}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot B_{\text{óptica}} \quad (4-29)$$

Esta expressão pode ser convertida em termos das dispersões FWHM e rms conforme a expressão [13]:



$$B_{elétrico} = \frac{0,311}{\tau_{FWHM}} = \frac{0,133}{\tau_{rms}} \quad (4-30)$$

## 4.5 Procedimento experimental para a medida de dispersão intermodal

### 4.5.1 Aparato da medida da dispersão intermodal no domínio do tempo

O método utilizado para as medidas pertinentes à dispersão foi o método no domínio do tempo com osciloscópio de amostragem (*LeCroy Wave Runner LT 584*, 1 GHz, 4 GSamples/s) associado com a técnica de *Cut Back* cujo diagrama simplificado está ilustrado na Figura 4-7 e no Apêndice 8 (maior detalhamento). A Figura 4-8 mostra imagens fotográficas do experimento.

Este tipo de medida tipicamente usa um laser semiconductor que emite um determinado comprimento de onda. Este laser é acoplado a uma fonte de corrente pulsada, de modo a produzir pulsos ópticos de curta duração ( $\sim 1$  ns) a uma taxa de repetição da ordem do kHz. Estes pulsos, após propagarem-se ao longo da fibra, são detectados por um fotodiodo e analisados em um osciloscópio digital de amostragem. O receptor óptico pode estar embutido no próprio osciloscópio ou pode ser um receptor externo associado a um osciloscópio convencional. O sincronismo do osciloscópio é proveniente do gerador de pulsos para o diodo laser. O sinal digitalizado pelo osciloscópio é transferido para um computador, possibilitando assim sua posterior análise.

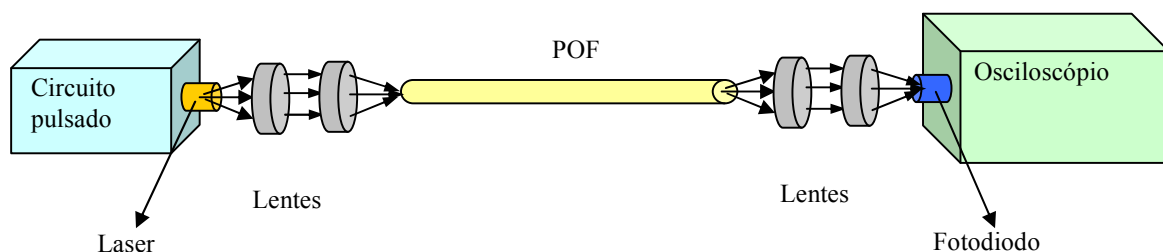


Figura 4-7 Diagrama de blocos do aparato de medida da dispersão do pulso óptico no domínio do tempo.

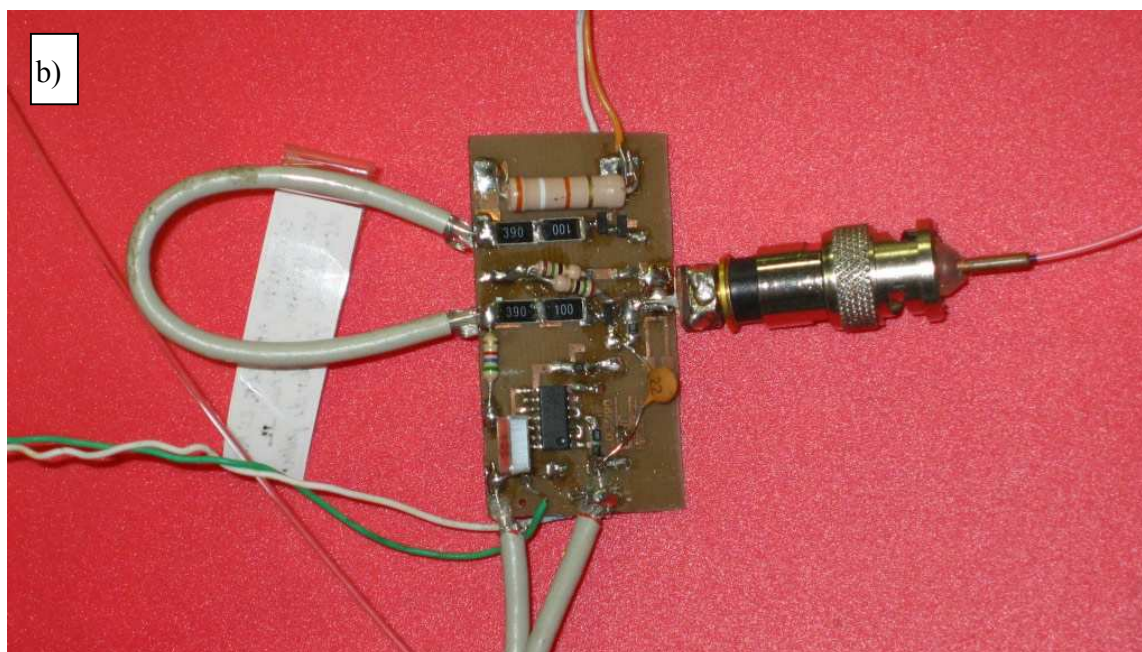
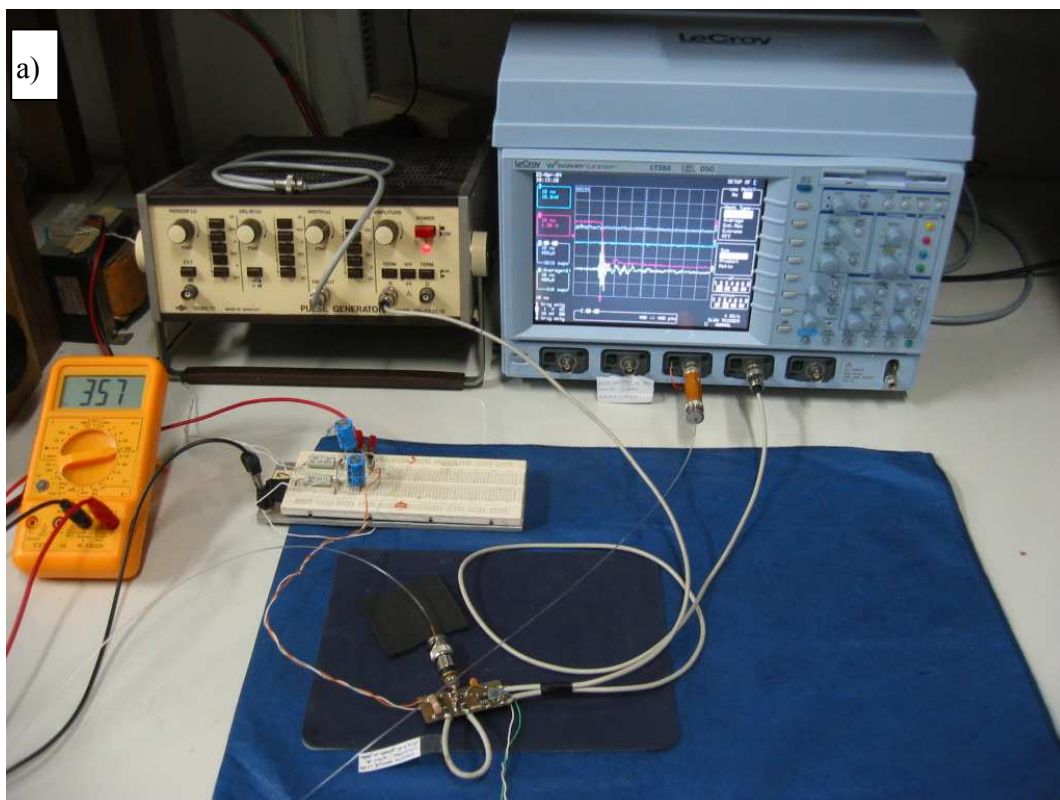


Figura 4-8 Fotografias do experimento de medição de dispersão intermodal: a) vista geral; b) detalhe do circuito gerador de pulsos com diodo laser e fibra acoplada.

Para obtenção dos pulsos ópticos de curta duração, foi confeccionado um circuito gerador de pulsos de corrente em intervalos constantes. Este circuito foi projetado de modo a possibilitar o acoplamento de diferentes fontes, de acordo com o comprimento de onda a ser estudado.

Para a detecção foi aplicado um fotodiodo PIN de pequena área efetiva ( $0,5 \text{ mm}^2$ ), usado para fibras de sílica. A área efetiva reduzida possibilita uma alta banda passante necessária à medida de tempos curtos, porém resultou em dificuldades no seu acoplamento com a POF. Na questão do acoplamento óptico, a extremidade da transmissão mostrou menos problemas do que a extremidade da recepção.

#### 4.5.2 Circuito Gerador dos Pulsos Ópticos

O circuito pulsador foi desenvolvido para fornecer pulsos de corrente da ordem 3A com duração da ordem de  $10^{-9}$  segundos, utilizando transistores como chaves. O Apêndice 14 ilustra em detalhes este circuito pulsador. O ponto crítico do projeto foi a obtenção de uma chave rápida (tempos de comutação inferiores a 1 ns) que operasse com altos níveis de tensão e corrente. Para tanto foi utilizado um transistor bipolar de avalanche, dado que este pode operar com tensões e correntes elevadas (centenas de Volts, dezenas de Ampères) e possui tempos de comutação intrínsecos na casa de centenas de picosegundos. O pulso elétrico de corrente no emissor do transistor avalanche é aplicado a um diodo laser que converte o sinal elétrico para óptico e insere-o na POF.

O circuito utilizado dispõe de uma linha de transmissão do tipo coaxial como elemento de descarga (ilustrada na Figura 4-9), ao invés da tradicional descarga por capacitor. Deste modo a largura do pulso de corrente é definida pelas características da linha (comprimento, constante dielétrica). Foi usada uma linha de transmissão coaxial com impedância característica de  $50 \Omega$  e velocidade de propagação de aproximadamente  $2.10^8$  m/s. Para obtenção de pulsos de aproximadamente 1 ns foi utilizado um comprimento da linha de 10 cm.

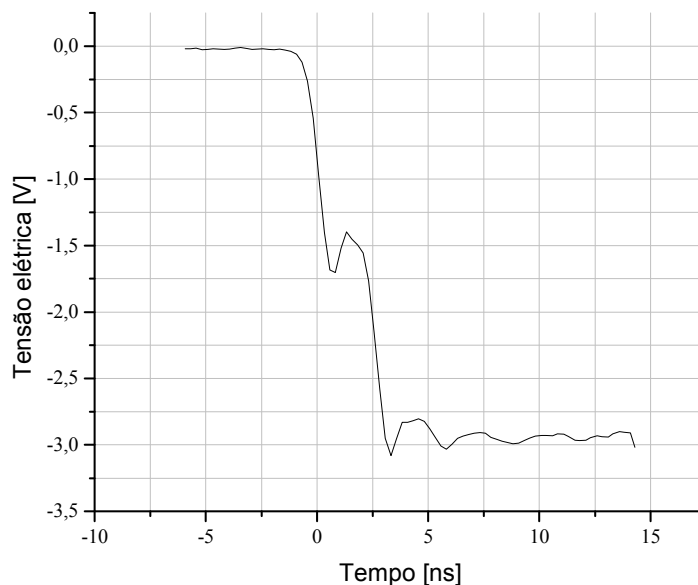


Figura 4-9 Gráfico da tensão da descarga do circuito pulsador em função do tempo.

#### 4.5.3 Circuito de Detecção

Na entrada do equipamento de medida (osciloscópio) foi necessário adaptar um fotodiodo PIN (Hamamatsu S5972) [55] juntamente com a sua polarização, para que a conversão óptica/elétrica fosse realizada. Foi utilizado um conector BNC adaptado (Apêndice 10), no qual foi embutido o fotodiodo associado com um capacitor e um resistor (SMD) para a alimentação do circuito e acoplamento AC da medida (Figura 4-10).

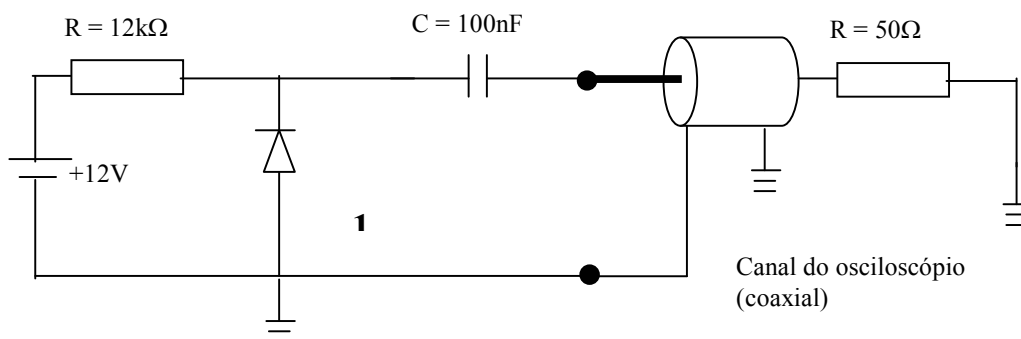


Figura 4-10 Circuito de detecção adaptado em conector BNC.

A frequência de corte para o circuito de detecção é definida basicamente pela capacitância da junção do fotodiodo ( $\sim 5$  pF) associada à impedância de entrada do osciloscópio (50 ohms), o que resulta em aproximadamente 640 MHz. A largura de banda do osciloscópio utilizado é de 1 GHz para escalas iguais ou superiores a 10 mV/div. Para escalas de tensão inferiores tem-se uma redução da banda passante ( $B_{5mV} = 500$  MHz;  $B_{2mV} = 250$  MHz). Desta forma procurou-se sempre utilizar nas medições efetuadas escalas de amplitude iguais ou superiores a 10 mV/div.

A partir destes dados foi simulada a resposta temporal do conjunto fotodiodo-osciloscópio (PSpice), obtendo-se um tempo de subida  $t_r = 0,8$  ns para uma função degrau de entrada, e uma largura à meia altura (FWHM) de 0,5 ns para resposta ao impulso. Com esses dados pudemos concluir que o circuito está adequado às medições aqui propostas, visto que a largura à meia altura dos pulsos de luz laser é da ordem de 2 ns.

#### 4.5.4 Condições do acoplamento óptico

De ambos os lados do enlace óptico, transmissão e recepção, foi montado um dispositivo para permitir o acoplamento do par de lentes (colimadora e focalizadora). Este acoplamento impõe NAs de lançamento diferentes das aplicados para as medidas de atenuação porque tratam-se de elementos ópticos (transceptores e lentes) com características diferentes daqueles.

Aparelhos de medição em alta frequência, tal como o osciloscópio utilizado no experimento, utilizam conectores BNCs fêmea em seus canais de entrada. Por conseqüência, o dispositivo de acoplamento transceptor-POF foi adaptado a partir de conectores BNC (macho e fêmea). O engate do tipo “baioneta” garantiu firmeza do encaixe entre as peças. O condutor central do conector foi substituído por um tubete de 1 mm de raio interno e 2 mm de raio externo de forma a guiar a fibra óptica plástica nua, para não haver fletimento do guia durante o ajuste óptico. A fixação foi realizada com silicone mantendo-se o tubete no centro do BNC. Os sistemas de acoplamento óptico do lado transmissor (LD e POF) e do lado detector (POF e PD) estão detalhados no Apêndice 9 e Apêndice 10, respectivamente.

Do lado do laser, as lentes foram adaptadas no conector BNC de acordo com as distâncias calculadas com posterior ajuste fino durante as medidas, através do osciloscópio, observando-se o ponto de máximo, ao variar a distância fibra-lente. Após o ajuste do lado transmissor, foi efetuado ajuste semelhante para o lado receptor.

A Tabela 4-3 indica o cálculo para a NA dos elementos ópticos presentes no acoplamento do lado transmissor, tendo sido designado  $L_{col}$  para a lente colimadora e  $L_{foc}$  para a lente focalizadora.

Tabela 4-3 Cálculo da NA e ângulo de aceitação das lentes do lado da transmissão.

Parâmetros da lente	$L_{col}$	$L_{foc}$
Espessura	2 mm	3 mm
Raio( $r_{lente}$ )	2,5 mm	3,25 mm
Distância focal estimada ( $f_{lente}$ )	3 mm	5 mm
$NA_{lente}$ [44]	0,64	0,54
Ângulo de aceitação ( $\delta$ )	39,8 °	32,7 °

$$NA_{lente} = n \cdot \sin \delta = \frac{r_{lente}}{\sqrt{r_{lente}^2 + f_{lente}^2}} \quad (4-31) \quad [44]$$

Apesar de não ter sido fornecido um NA de lançamento para o laser, dadas as dimensões do diâmetro do laser e da NA da lente colimadora, é facilmente percebido que não há problemas de acoplamento entre a fonte e a lente. Entre a lente focalizadora e a POF, pode-se afirmar que foi alcançado o acoplamento desejado através do ajuste da distância fibra-lente observando-se o ponto de máximo na tensão do fotodiodo.

A Tabela 4-4 indica o cálculo para a NA dos elementos ópticos presentes no acoplamento do lado receptor valendo a designação de  $L_{col}$  para a lente colimadora e  $L_{foc}$  para a lente focalizadora.

Tabela 4-4 Cálculo da NA e ângulo de aceitação das lentes do lado do receptor.

Parâmetros da lente	$L_{col}$	$L_{foc}$
Espessura da lente	2,5 mm	3,5 mm
Raio da lente ( $r_{lente}$ )	3 mm	3,5 mm
Distância focal estimada ( $f_{lente}$ )	2,5 mm	6 mm
$NA_{lente}$ [44]	0,76	0,5
Ângulo de aceitação ( $\delta$ )	49 °	30 °

Sabendo que a área ativa do fotodiodo é bastante reduzida ( $0,5 \text{ mm}^2$ ), foi colocada como lente focalizadora a lente de menor NA. Mesmo assim, verificou-se que é bastante crítica a focalização exata do feixe na superfície fotosensível. Isto significa que muito provavelmente não foi atingido um acoplamento total de todos os modos presentes na POF para o fotodiodo.

## 4.6 Resultados experimentais relacionados à medida de dispersão intermodal

### 4.6.1 Alargamento do pulso óptico no domínio do tempo

Os registros gráficos dos pulsos ópticos de entrada e saída na fibra amostrada (POF PF PMMA ID) foram armazenados no computador em arquivo texto (Apêndice 11) que, por sua vez, foram importados para um aplicativo gráfico e convenientemente manipulados para uma apresentação adequada. Os gráficos obtidos serão apresentados nesta seção.

A partir destes registros foram extraídos os valores de interesse para este estudo, sendo possível então calcular as dispersões (rms e FWHM) através de um aplicativo de planilha de cálculo (Apêndice 13). No Apêndice 12 consta a forma como foram obtidos e calculados os diversos parâmetros a partir da resposta temporal dos pulsos de entrada e saída na POF.

Foram registrados os pulsos no domínio do tempo para três dispositivos transmissores: 780, 850 e 650 nm. Os diodos de 780 e 650 nm são especificados para

operação em corrente contínua e o diodo de 850 nm é especificado para operação pulsada. Desta forma obteve-se para 850 nm pulsos mais estreitos ( $\sim 1$  ns) que os obtidos em 650 e 780 nm ( $> 2$  ns), tal qual ilustrado na Figura 4-11.

#### **Pulsos de entrada para os comprimentos de onda de 650, 780 e 850 nm:**

Com o objetivo de visualizar o pulso de entrada dos três comprimentos de onda utilizados foi plotado o gráfico da Figura 4-11 no qual pode-se observar as diferenças nas amplitudes, formatos e larguras dos pulsos.

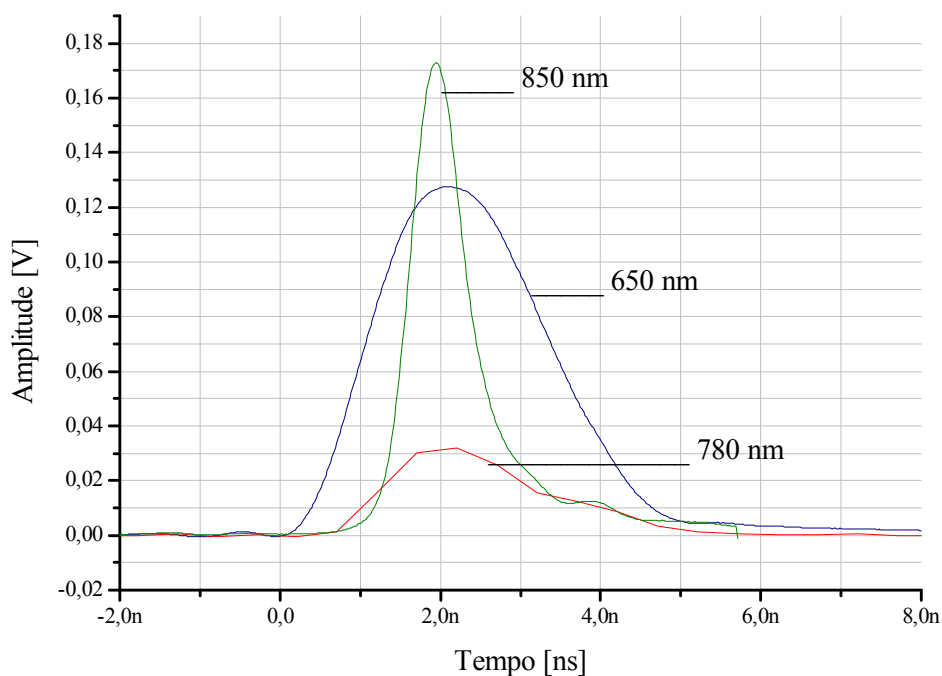


Figura 4-11 Comparação dos pulsos de entrada para os comprimentos de onda de 650, 780 e 850 nm.



**Medidas para  $\lambda = 850$  nm (laser):**

Foi efetuada tentativa de medida com laser de 850 nm porém não foi possível detectar no osciloscópio o pulso de saída devido ao alto coeficiente de atenuação do material polimérico para este comprimento de onda ( $\alpha_{\text{fabricante}} = 2,21$  dB/m). Para o comprimento de fibra amostrada, a atenuação total resulta em 34 dB significando que o pulso de saída representa apenas 0,04 % do pulso de entrada. Lasers neste comprimento de onda são, portanto, inadequados para o propósito das medições realizadas deste trabalho. Para possibilitar essa medida, teria sido necessário a utilização de um fotodetector de maior sensibilidade, dispositivo que não estava disponível durante a realização dos experimentos. Se utilizados para comunicação de informação, estes lasers aplicam-se somente para distâncias muito curtas.

**Medidas para  $\lambda = 780$  nm (laser):**

Para o comprimento de onda de 780 nm, foram registrados os pulsos para três condições da fibra:

Medida 1 - POF com filtro de modos (Figura 4-12).

Medida 2 - POF enrolada normalmente (carretel com 6 cm de raio) (Figura 4-13)

Medida 3 - POF esticada (Figura 4-13)

O filtro de modos a que se refere a medida 1 é constituído de 4 voltas com raio de curvatura de 3 cm Para as medidas 2 e 3, o pulso de entrada foi o mesmo, daí a apresentação em gráfico separado dos pulsos da medida 1. Não obstante, observa-se que foi mantida a largura do pulso de entrada no ponto -3 dB (FWHM) em torno de 2 ns, apesar das diferenças nas amplitudes. Isto permite que os três pulsos de saída possam ser plotados em um mesmo gráfico (Figura 4-15) para efeito de comparação da dispersão. A Tabela 4-5 mostra os valores  $t_{\text{FWHM}}$  medidos para os pulsos de entrada e saída para as três medidas.

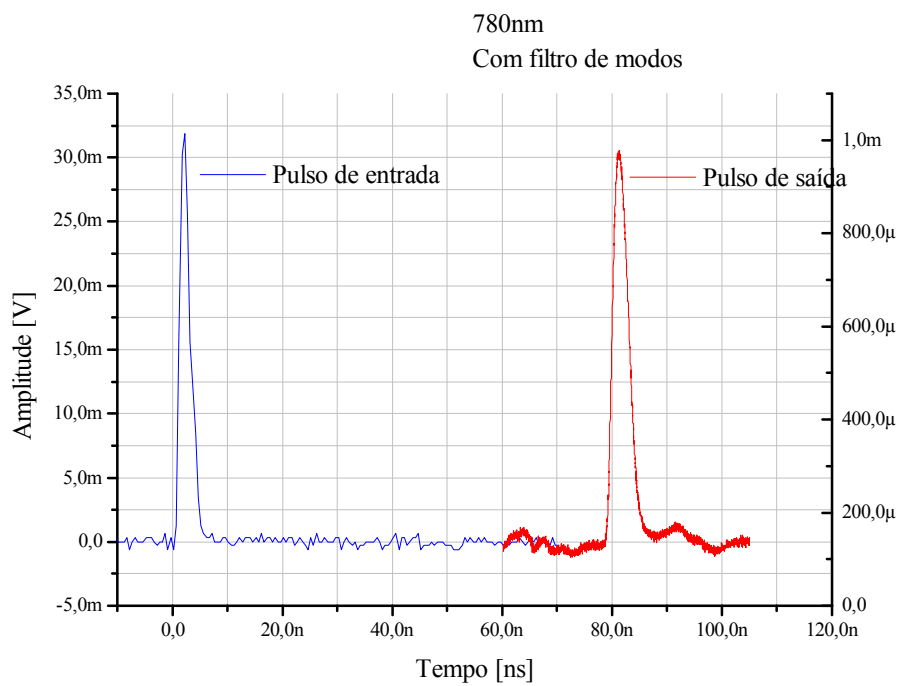


Figura 4-12 Medida em 780 nm em POF com filtro de modos (Medida 1).

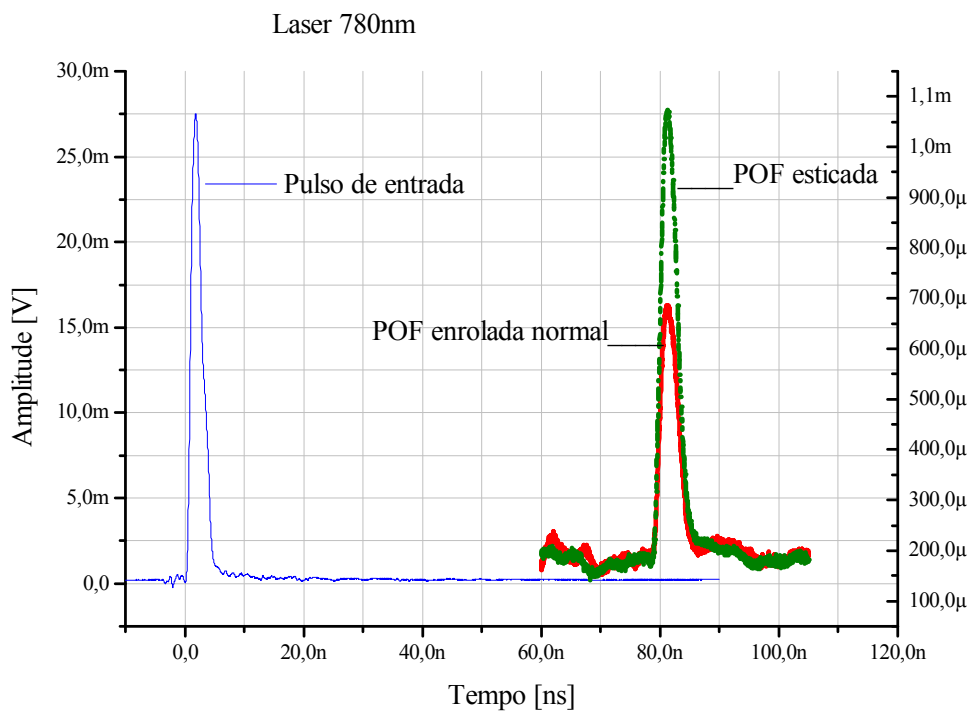


Figura 4-13 Medidas com POF enrolada normal (medida 2) e POF esticada (medida 3).

Aparentemente não há diferença no alargamento do pulso de saída para as medidas 2 e 3, porém, para um mesmo pulso de entrada, verificou-se que a saída na fibra enrolada normalmente apresenta atenuação maior, o que denota uma atenuação causada pela macrocurvatura do enrolamento no carretel.

A Figura 4-14 ilustra os pulsos de saída das medidas 2 e 3 ampliados para a melhor investigar as larguras FWHM. Os valores registrados na Tabela 4-5 atestam uma boa coerência dos valores.

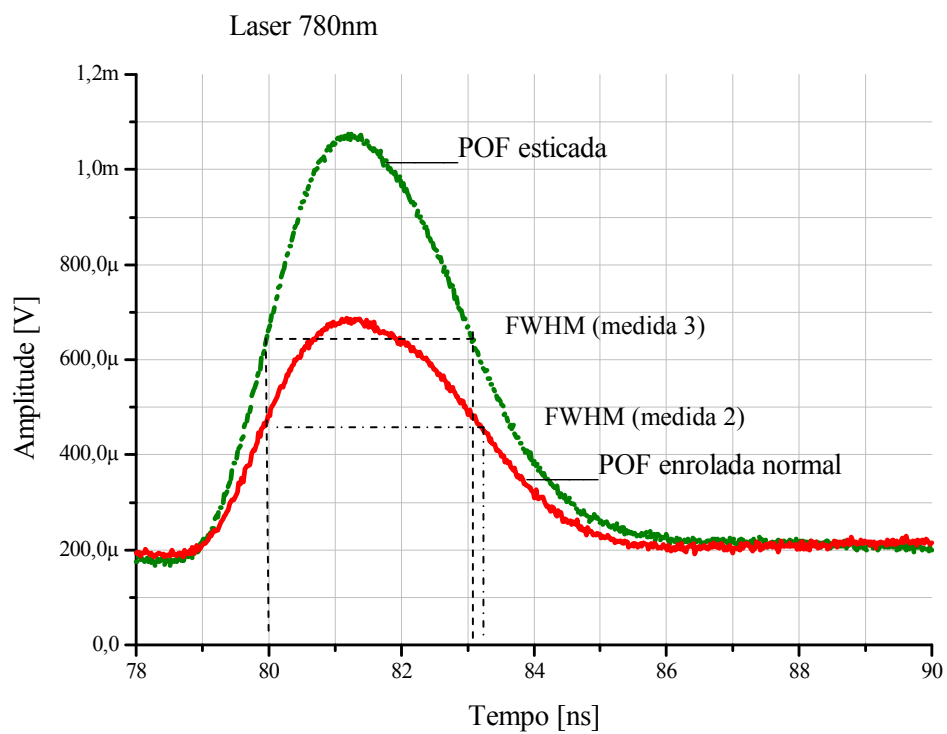


Figura 4-14 Comparação dos pulsos de saída (ampliados) das medidas da POF normalmente enrolada (medida 2) e da POF esticada (medida 3).

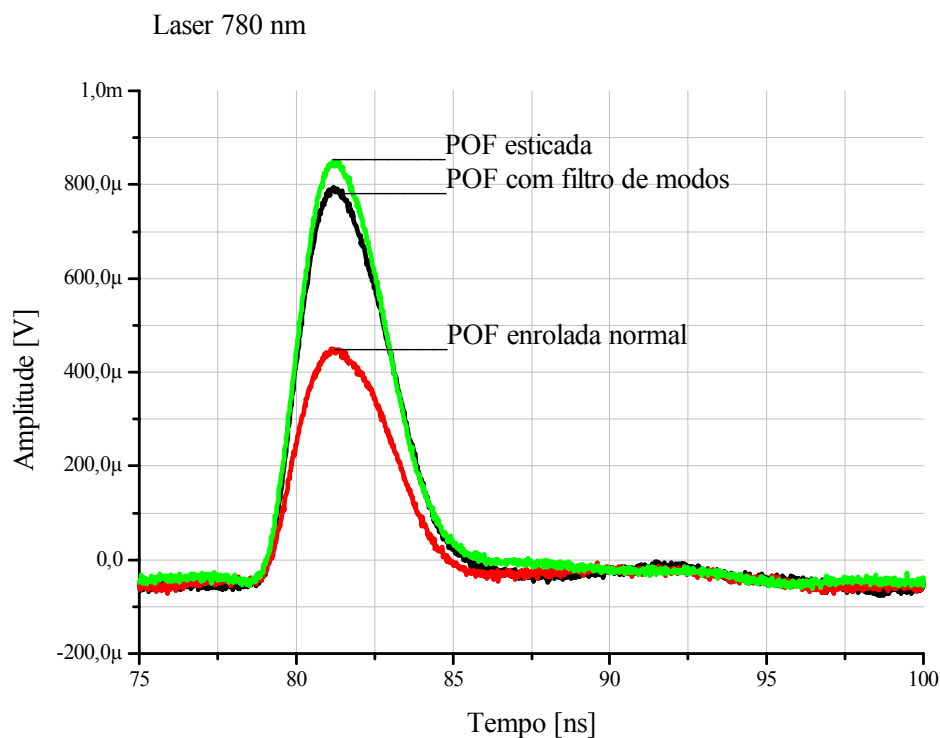


Figura 4-15 Comparação dos pulsos de saída da POF com filtro de modos (medida 1), da POF enrolada normalmente (medida 2) e da POF esticada (medida 3).

Tabela 4-5 Parâmetros FWHM dos pulsos para as medidas em 780nm.

Medida	$t_{FWHM\_entrada}$ [ns]	$t_{FWHM\_saída}$ [ns]
1	2,17	3,41
2	2,00	4,34
3	2,00	4,34

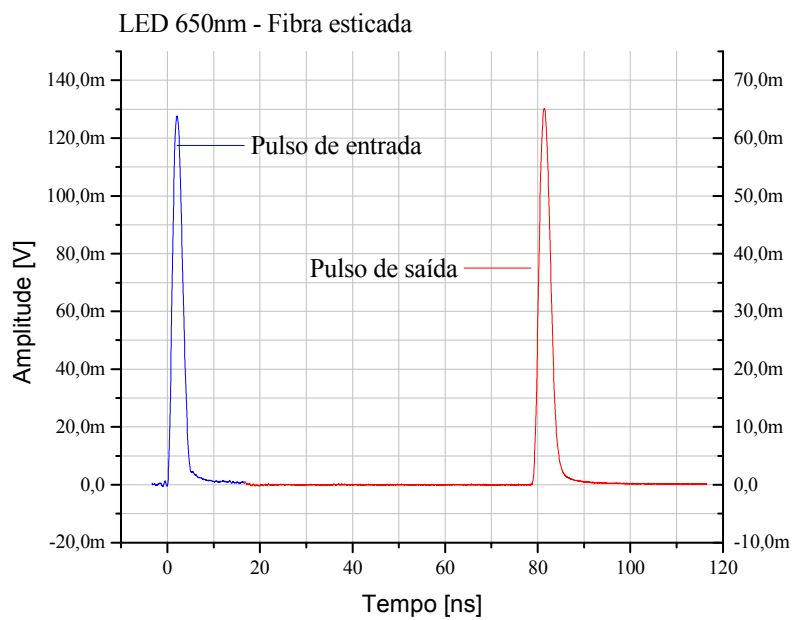
**Medidas para  $\lambda = 650 \text{ nm}$ :**

Figura 4-16 Medidas dos pulsos de entrada e saída no comprimento de onda de 650 nm.

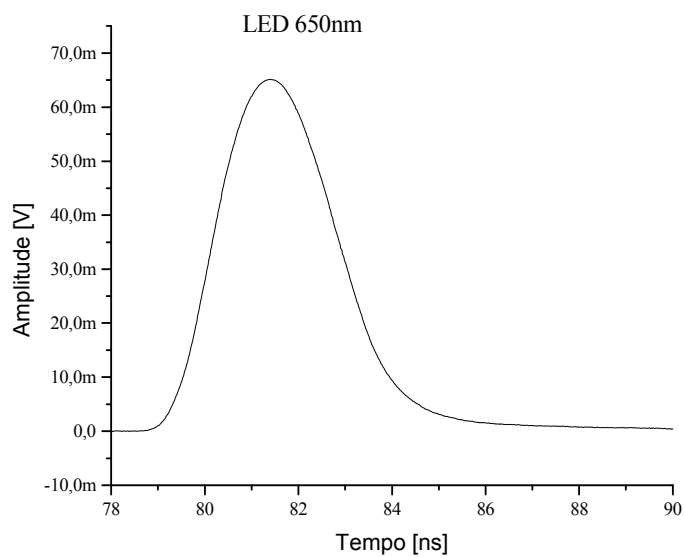


Figura 4-17 Formato ampliado do pulso de saída para o comprimento de onda de 650 nm.

Para o laser de 650 nm cabe destacar a forma do pulso bastante aproximada do formato gaussiano estabelecido para a teoria de dispersão.

#### 4.6.2 Análise dos parâmetros obtidos experimentalmente

A partir das curvas apresentadas no tópico anterior, foram extraídos os valores de interesse para a análise que segue.

##### **Dispersão rms e FWHM da fibra:**

A Tabela 4-6 mostra os valores teóricos calculados para a dispersão rms a partir das fórmulas da Tabela 4-2. Com estes valores é possível calcular a dispersão FWHM da fibra pois  $\tau_{FWHM\_fibra} = 2,355 \cdot \tau_{rms\_fibra}$ . Ambas as dispersões estão especificadas por unidade de comprimento da fibra sendo dadas em ns/m (divisão por 15,45 m).

Tabela 4-6 Dispersões teóricas rms e FWHM calculadas.

Referências	$\tau_{rms\_fibra}$ [ns/m]	$\tau_{FWHM\_fibra}$ [ns/m]
[22], [29] e [32]	0,07	0,17
[30]	0,08	0,19
Média →	0,075	0,18

Sendo muito próximos os valores rms e FWHM teóricos calculados (das referências), foi assumido um valor médio respectivamente para cada um. Como a dispersão pode ser considerada independente do comprimento de onda, estes valores médios foram usados como referência para o cálculo do erro para os valores experimentais listados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 Dispersões rms e FWHM da fibra obtidos experimentalmente.

$\lambda$ [nm]	$\tau_{\text{rms\_fibra}}$ [ns/m]	Erro [%]	$\tau_{\text{FWHM\_fibra}}$ [ns/m]	Erro [%]
780 (1)	0,072	4%	0,170	5,56
780 (2)	0,106	-41,33%	0,249	-38,89
780 (3)	0,076	-1,33	0,178	0
650	0,041	45,33%	0,097	44,44

Pela Tabela 4-7 observa-se que para as medidas 1 e 3 feitas com 780 nm, os resultados experimentais ratificam os calculados pela teoria. No entanto, para os comprimentos de onda de 650 nm e 780 nm (medida 2) há diferença significativa entre os valores medidos e calculados.

### **Banda passante:**

A partir dos valores experimentais da Tabela 4-7 pôde-se dimensionar as bandas passantes óptica e elétrica do sistema (Tabela 4-9) e compará-las com os valores calculados teoricamente (Tabela 4-8).

Tabela 4-8 Cálculo teórico da banda passante

$\tau_{\text{FWHM\_fibra}}$ [ns/m] (média)	$B_{\text{óptica}}$ [GHz.m]	$B_{\text{elétrica}}$ [GHz.m]
0,18	2,51	1,78

Tabela 4-9 Banda passante obtida experimentalmente.

$\lambda$ [nm]	$B_{\text{óptica}}$ [GHz.m]	$B_{\text{elétrica}}$ [GHz.m]	Erro [%]
780 (1)	2,58	1,83	-2,79
780 (2)	1,77	1,25	+29,48
780 (3)	2,46	1,74	+1,99
650	4,53	3,20	-80,48

Neste tópico novamente é observada uma diferença significativa entre as medidas de dispersão para 780 nm (2) e para 650 nm. No caso de 650 nm, provavelmente isto



ocorreu devido a um NA de lançamento na fibra em condição de super-iluminamento (feixe bastante espalhado), havendo baixo acoplamento dos modos de ordem superior na fibra.

Do universo de artigos publicados sobre medidas de dispersão, apenas duas referências citaram medidas com fibra do mesmo tipo da utilizada neste experimento (POF ESKA EXTRA), ambas listadas na Tabela 4-10 com suas respectivas condições discriminadas.

Tabela 4-10 Valores de banda passante divulgados na literatura para a POF ESKA EXTRA.

	B [GHz.m]	NA <sub>lançamento</sub>	$\lambda$ [nm]	d <sub>núcleo</sub> [ $\mu$ m]
[43] Takahashi	4,23	0,65	660	980
[7] Zubia <i>et al.</i>	3,00	---	---	250-1000

Não foi conseguida uma especificação de banda passante para a POF ESKA EXTRA fornecida pela Mitsubishi. A analogia feita com a POF ESKA PREMIUM não se aplica neste caso pois não há afirmação, nem evidências, por parte do fabricante de que as características dispersivas sejam similares.

Outra complicação para esta comparação é que nenhum fabricante, ao fornecer a banda passante de uma POF, especifica se trata-se da banda passante óptica ou da elétrica. Pela aproximação das grandezas analisadas, tudo indica que trata-se de banda passante óptica.

Esta dificuldade na comparação da banda passante, entretanto, não invalida o resultado obtido, uma vez que ele apresentou uma ordem de grandeza compatível com a literatura. Ainda que vaga, mais uma referência da literatura pode ser tomada como base nesta análise. Cirillo [2] cita em seu artigo técnico que uma POF multimodo ID com NA grande apresenta uma banda passante de 4 GHz. Embora seja uma referência que não trata especificamente da POF aqui estudada, a característica de “POF multimodo ID com NA grande” engloba perfeitamente nosso guia de onda.

### Tempos mínimo e máximo de propagação e atraso comum a todos os modos:

A seguir estão calculados separadamente os tempos mínimo e máximo de propagação para a fibra amostrada enquanto que na Tabela 4-11 estão registrados estes valores obtidos experimentalmente. Também está registrado o valor do atraso de propagação comum a todos os modos. Teoricamente o  $T_{\min}$  calculado corresponde ao atraso comum a todos os modos de propagação. Entretanto, na prática, o atraso foi obtido da diferença entre os tempos nos pontos de amplitude máxima (pico) dos pulsos de entrada e saída. Esta forma fornece um dado mais confiável. A obtenção do  $T_{\min}$  através de sua leitura direta no início do pulso de saída é menos precisa.

Cálculo teórico dos tempos mínimo e máximo de propagação (para  $L = 15,45$  m)

$$T_{\min} = \frac{L}{(c/n_1)} = \frac{L.n_1}{c} \quad \therefore \quad T_{\min} = 76,838.10^{-9} \quad (4-32)$$

$$T_{\max} = \frac{L.n_1}{c.\cos\theta_{\text{aceitação}}} \quad \therefore \quad T_{\max} = 87,0244.10^{-9} \quad (4-33)$$

Tabela 4-11 Atraso, tempos mínimo e máximo de propagação experimentais.

$\lambda$ [nm]	Atraso [ns] (centro)	Erro [%]	$T_{\min}$ [ns]	Erro [%]	$T_{\max}$ [ns]	Erro [%]
780 (1)	78,90	-2,68%	78,17	-1,73	87,17	-0,17
780 (2)	79,52	-3,49	78,27	-1,86	85,77	+1,44
780 (3)	79,56	-3,54	78,05	-1,58	87,11	-0,01
650	79,30	-3,20	78,31	-1,91	85,57	+1,67

Nota: no valor do tempo mínimo experimental já está extraído o atraso ocasionado pela linha de transmissão do circuito gerador de pulsos, que gera o disparo do osciloscópio (5 ns).

Os cálculos do erro para o atraso e tempo mínimo experimentais foram feitos tomando-se por referência o tempo mínimo teórico. O erro do tempo máximo experimental toma como referência o tempo máximo teórico.

### Diferença ( $\Delta T$ ) do tempos de propagação:

Os valores constantes na Tabela 4-12 foram calculados a partir das fórmulas teóricas da Tabela 4-1 que consideram a diferença dos tempos de propagação independente do comprimento.

Tabela 4-12 Cálculo teórico da diferença dos tempos de propagação (independente do comprimento de onda e para impulso na entrada da fibra óptica).

Referências	[13], [32] e [29]	[7]	[12] e [29]	[22], [43] e [29]
$\Delta T$ [ns]	3,765	4,067	3,965	3,812

Na Tabela 4-1 também consta fórmulas para a diferença dos tempos de propagação que variam em função do comprimento de onda. Para estas foram calculadas a  $\Delta T$  para a faixa espectral de 350 a 800 nm e foi verificado que os resultados não demonstram variações significativas (diferenças só após a terceira casa) e que apresentam valores muito parecidos com os da Tabela 4-12 (média de 3,832). Diante deste fato, assumiu-se o valor de  $\Delta T_{\text{teórico}} = 3,86$  ns que é a média de todos estes valores, sendo este valor usado como referência para cálculo do erro na Tabela 4-13.

Toda a formulação pesquisada para a diferença dos tempos de propagação considera uma situação ideal na qual o pulso de entrada tem largura desprezível (impulso). Devido a isto, na prática, se considerarmos  $\Delta T$  como uma diferença direta dos tempos de propagação máximo e mínimo medidos, teremos valores muito superiores ao teórico. Deste fato, é conveniente que os valores da diferença dos tempos de propagação experimental sejam dimensionados em termos do desvio padrão das larguras dos pulsos de entrada ( $W$ ). Os resultados deste cálculo estão mostrados na Tabela 4-13 assim como o erro correspondente.

Tabela 4-13 Diferença dos tempos de propagação obtidos experimentalmente.

$\lambda$ [nm]	$W_{\text{entrada}}$ [ns]	$W_{\text{saída}}$ [ns]	$\Delta t_{\text{rms}}$ [ns]	Erro [%]
780 (1)	8,00	9,00	4,12	-6,74
780 (2)	6,34	7,50	4,01	-3,89
780 (3)	6,34	9,06	6,47	-67,62
650	5,40	7,26	4,85	-25,65

De todas as análises comparativas efetuadas anteriormente, elegemos a medida 1 para o comprimento de onda de 780 nm como sendo um resultado alcançado com êxito (erros inferiores a 6%) para a medida de dispersão pretendida neste estudo.

#### Taxa de transmissão de dados:

Na literatura pesquisada, a formulação teórica para a taxa de transmissão de dados apresentou resultados muito diversos, partindo do princípio da taxa em termos da largura total do pulso de saída ( $\Delta T$ ) que é a regra mais simples. Para esta condição, a capacidade de transmissão resultará menor do que o realmente permitido na fibra se considerarmos a possibilidade do fenômeno de interferência intersimbólica. Deste fato, foi escolhida a referência [32] pois mostra-se mais realista e apropriada para os propósitos desta pesquisa ao assumir que o alargamento do pulso tem formato gaussiano com largura rms  $\sigma$ :

$$C \approx \frac{0,2}{\sigma} \quad (4-34)$$

Na prática, esta análise deve ser tomada em termos da dispersão rms ou FWHM. Neste estudo, calculou-se a taxa de transmissão teórica tomando-se o valor  $t_{\text{FWHM}}$  teórico da fibra (em ns) apresentado Tabela 4-6 (média). Como, neste cálculo, ele deve ser aplicado em ns, deve-se multiplicá-lo pelo comprimento da fibra (15,45 m). Para o dimensionamento experimental, realiza-se o mesmo cálculo, porém, assume-se a dispersão FWHM proveniente dos resultados experimentais. Como ficou evidente a medida 1 no comprimento de onda de 780 nm como a mais confiável, segundo analisado previamente,

foi calculada a taxa apenas para ela, sendo o erro calculado tomando-se por referência o valor teórico.

$$\tau_{FWHM\_fibra} = 0,18 \times 15,45 = 2,781 \text{ ns} \quad (\text{teórico}) [29]$$

$$C = \frac{0,2}{\tau_{FWHM\_fibra}(\text{teórico})} \quad (4-35) \quad C_{\text{teórico}} = 71,92 \text{ Mbps}$$

$$\tau_{FWHM\_fibra} = 0,17 \times 15,45 = 2,63 \text{ ns} \quad (\text{experimental / medida 1}) [29]$$

$$C = \frac{0,2}{\tau_{FWHM\_fibra}(\text{experim.})} \quad (4-36) \quad C_{\text{experim.}} = 76,05 \text{ Mbps}$$

$$\text{Erro} = -5,74 \%$$

### **Estimativa do comprimento de equilíbrio modal (Leq):**

A partir da expressão fornecida por [29] para a diferença dos tempos de propagação que considera o fenômeno de acoplamento dos modos dentro do guia, podemos estimar o comprimento equivalente da POF para o qual o sinal atinge o estado de equilíbrio:

$$\Delta T \approx \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \sqrt{L \cdot L_{eq}} \quad \therefore \quad L_{eq} = \frac{1}{L} \left( \frac{\Delta T \cdot c}{n_1 \cdot \Delta} \right)^2 \quad (4-37)$$

Primeiramente, foi calculado o  $L_{eq}$  teórico pela substituição da diferença dos tempos de propagação média teórica, que tem por premissa que o sinal de luz na entrada da fibra é um impulso:

$$\Delta T_{\text{teórico}} (\text{médio}) = 3,86 \text{ ns} \quad \rightarrow \quad L_{eq} = 16,6 \text{ m} \quad (\text{para sinal de entrada impulso}).$$

Na prática, entretanto, o pulso de entrada apresenta uma largura que deve ser considerada para este cálculo. Para o comprimento de onda de 780 nm (medida 1) isto foi realizado em termos do desvio padrão das larguras de entrada ( $W_{\text{entrada}} = 8 \text{ ns}$ ) e saída ( $W_{\text{saída}} = 9 \text{ ns}$ ) do pulso luminoso detectado no osciloscópio (mesmo cálculo efetuado na Tabela 4-13):

$$\Delta T_{rms\_exp.} = \sqrt{W_{saída}^2 - W_{entrada}^2} \quad \therefore \quad \Delta T_{rms\_exp.} = \sqrt{9^2 - 8^2} = 4,12 \text{ ns} \quad (4-38)$$

Aplicando o valor obtido para  $\Delta T_{rms\_exp.}$  para o cálculo de  $L_{eq}$  teremos:

$$L_{eq} = \frac{1}{15,45} \left( \frac{4,12 \cdot 10^{-9} \times 3 \cdot 10^8}{1,492 \times 4,9 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \quad (4-39)$$

que resulta em  $L_{eq} = 18,5 \text{ m}$  (para a largura do pulso de entrada de 8 ns).

Para uma POF com as mesmas dimensões que a utilizada nesta pesquisa, foi citado em artigo técnico publicado por *Bates et al.* [45] um comprimento de equilíbrio de 36 m, calculado por Keiser. Em simulação neste mesmo artigo foi encontrada a faixa de 15 m a 75 m. Destes resultados pode-se perceber que o comprimento de equilíbrio da fibra é um assunto um pouco controverso e inexato. Não obstante, a faixa desta estimativa, entre 16,6 m e 18,5 m, para o comprimento de equilíbrio encontra-se dentro da faixa obtida da simulação no artigo de Bates. Um fator que complica este dimensionamento é as condições da fibra utilizada. Esta fibra indica amarelamento do material polimérico devido à exposição direta (fibra nua) à radiação ultravioleta e, conseqüentemente, pode ter sofrido degradação óptica. Ademais esta fibra apresenta sinais de deterioração física devido à sua grande manipulação o que, certamente, deve ter produzido muitos pontos de microcurvaturas em sua interface núcleo-casca. Estas imperfeições na composição e geometria da fibra óptica intensificam o fenômeno de acoplamento óptico.

Para comprimentos curtos de POF, o acoplamento de modos é benéfico do ponto de vista da dispersão, entretanto, para efeito de caracterização do guia de onda é importante saber o  $L_{eq}$  pois, na prática, a fibra será aplicada em enlaces cujos comprimentos podem ou não estar dentro de sua condição de equilíbrio modal. Contudo, este dimensionamento exato é bastante complicado visto que não se tem domínio das imperfeições presentes no guia, principais responsáveis pelo acoplamento de modos.

## 5 Conclusão

Este trabalho foi centrado no estudo e caracterização de fibras ópticas plásticas visando aplicações em telecomunicações. Inicialmente foi efetuado um vasto levantamento bibliográfico sobre o assunto, tendo-se evidenciado que a utilização das POFs em comunicações ópticas tem crescido progressivamente em nichos onde a fibra óptica de sílica apresenta inconvenientes.

A segunda parte do trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de técnicas experimentais para medição de atenuação espectral e dispersão intermodal em POFs, utilizando equipamentos já disponíveis em laboratórios da UFPR.

O objetivo da medida da atenuação espectral foi devidamente alcançado, porém exigiu algumas adaptações extras para a sua viabilização visto que o fotoespectrômetro utilizado (Laboratório de Dispositivos Opeletrônicos Orgânicos - Dep. de Física) destina-se a amostras de materiais, nas quais a focalização do feixe luminoso não é ponto crítico. Do lado do transmissor foi conseguido o devido alinhamento e uma NA de lançamento que aproximava-se das condições de acoplamento direto. No lado do receptor, se por um lado a grande área da superfície sensível facilitava o acoplamento, por outro, causava a saturação do sinal devido à concentração de energia luminosa num ponto reduzido. Na distância definida como ótima (acoplamento de todos os modos dentro da fibra), o fotodetector ficou num limiar entre o comportamento linear e o de saturação. Como forma de contornar este problema, recomenda-se a substituição do fotodetector em escala linear por um fotodetector em escala logarítmica.

A partir do procedimento de atenuação espectral, observou-se também a atenuação causada por macrocurvaturas. Foi atestada a recomendação do fabricante da POF do valor de 2 cm como curvatura máxima (em 90°) que o guia de onda polimérico pode suportar sem sofrer degradação significativa em seu comportamento óptico.

Quanto às medidas de dispersão intermodal, obteve-se resultados coerentes com as análises teóricas e literatura. Os resultados pertinentes às medidas para o comprimento de

onda de 780 nm (medida 1) atestaram o êxito da caracterização da dispersão intermodal do guia polimérico pretendida.

Não foi possível uma comparação direta da dispersão com a especificação do fabricante (dado não disponível) nem com os artigos técnicos pesquisados. Em alguns artigos estão publicados o gráfico do alargamento do pulso de entrada e saída no domínio do tempo de forma a ilustrar o efeito da dispersão, porém, pouquíssimos forneceram os valores obtidos em seus experimentos e, ainda assim foram valores para fibras IG e não ID.

Quanto ao resultado da banda passante, alguns artigos da IEEE pesquisados IEEE forneceram valores de largura de banda obtidos da dispersão ou de outros recursos como, por exemplo, a medida de taxa de erros. Apenas dois artigos referiram-se a medidas de dispersão em fibra igual ou similar à utilizada nesta dissertação: Takahashi em [43] e Zubia *et al.* em [7]. Comparativamente, apesar da diferença dos valores da literatura com os experimentais, observou-se que estes encontram-se mais próximos dos valores teóricos calculados, o que nos leva a acreditar na coerência dos valores encontrados e que a metodologia de caracterização utilizada foi adequada.

As dificuldades encontradas na parte experimental advêm principalmente das necessidade de adaptações efetuadas junto aos equipamentos de medidas, visto que nenhum deles foi concebido especificamente para medidas em fibras ópticas. Acreditamos ter conseguido alcançar os objetivos pretendidos, entretanto, medidas adicionais seriam necessárias, acompanhadas de uma análise cuidadosa de suas condições e resultados, de forma a reduzir erros e aumentar a precisão. Não obstante, o trabalho efetuado servirá para medições futuras visto que muitas das dificuldades já foram contornadas.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a execução das medidas aqui realizadas com os diferentes recursos descritos na página 27 para a antecipação da condição de equilíbrio dentro da fibra. Visando melhorar a precisão das medidas de dispersão, recomenda-se o uso de fontes de luz com pulsos de largura inferior a 1 ns, tendo em vista o pequeno comprimento de fibra utilizado.



## 6 Referências bibliográficas

- [1] RAJBENBACH, H. Report of the european conference on optical communications. In: THE EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATIONS (ECOC 2001), 27., 2001, Amsterdan, NL. **Report**, European Commission, Directorate-General Information Society.
- [2] CIRILLO, J. High speed plastic networks (HSPN): a new technology for today's applications. In: NATIONAL AEROSPACE AND ELECTRONICS CONFERENCE (NAECON'96), oct. 1996. **IEEE Aerospace and Electronics System Magazine**, v. 11, n. 10, p. 10–13.
- [3] VAN DEN BOOM, H. P. A. ; LI, W. ; VAN BENNEKOM, P.K. ; TAFUR MONROY, I. ; KHOE, G. D. High-capacity transmission over polymer optical fiber. **IEEE Journal**, v. 7, n. 3, may-jun. 2001. Selected Topics in Quantum Electronics, p. 461-470.
- [4] KOIKE, Y. Progress of plastic optical fiber technology. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATION ECOC '96, 22., 1996, Oslo, **IEEE proceeding**, v. 1, p. 41–48.
- [5] MITSUBISHI RAYON CORPORATION. **What is POF?**. Disponível em: <<http://211.132.9.28/pofeskae/tece/whatspofe/whatspofe.htm>>. Acesso em: 16 dez. 2002.
- [6] FUJI FILM. Apresenta texto sobre fibras ópticas poliméricas. Disponível em: <<http://home.fujifilm.com/news/n020927.html>>. Acesso em: 14 nov. 2003.
- [7] ZUBIA, J. ; ARRUE, J. **Plastic optical fibers**: An introduction to their technological processes and application. Bilbao, Spain, v. 7, n. 2, apr. 2001, 40 p.
- [8] KOIKE Y. ; ISHIGURE T. Status and challenges of GI POF in data-com area. In: Eur. Conf. On Opt. Comm (ECOC'01), 27., 2001, Amsterdan. **IEEE proceeding**, pp 72-73.

- [9] KOIKE, Y.; ISHIGURE, T.; NIHEI, E. High-bandwidth graded-index polymer optical fiber. *Journal of Lightwave technology*, v. 13, n. 7, jul. 1995. Invited paper, p.1475-1489.
- [10] INTEGRATED PUBLISHING. Electrical Engineering Training Series. *Website* informativo. Disponível em <<http://www.tpub.com/neets/tm/109-3.htm>>. Acesso em: 14 nov. 2003.
- [11] THOMAS, B.. Plastic optical fiber technology in consumer applications: practical, affordable, and capable. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS, 1991, **IEEE proceeding**, p. 24 –25.
- [12] AGRAWAL, **G. Fiber-optic communication systems**. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley-Interscience Publication, 1997
- [13] KEISER, G. **Optical Fiber Communications**. Series in Electrical and Computer Engineering. 3<sup>a</sup> edição. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- [14] VAN HOVE, A. ; COOSEMANS, T. ; DHOEDT, B. ; VAN DAELE, P. ; BAETS, R. ; VAN KOETSEM, J. ;VAN DEN TORREN, L. Termination of small diameter (125 /spl mu/m) plastic optical fiber for 1/spl times/12 datacommunication. In: ELECTRONIC COMPONENTS & TECHNOLOGY CONFERENCE, 48. **IEEE proceeding**, 1998, p. 783–789.
- [15] GRIMES, G. POF Applications in broadband networks. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATIONS (ECOC'01), 27., Amsterdan, 2001, **IEEE Proceeding**.
- [16] AGC ASAHI GLASS COMPANY. **Technical bulletin**: Lucina (Looke'e'na) Duplex Cable. Japan: Asahi Glass Company, n. 08/2002, T012E ver. 2, p. 01-20.
- [17] INDAC. **Propriedades e vantagens das chapas acrílicas INDAC**. Abr. 2002. Apresenta informações relacionadas aos produtos comercializados pela INDAC. Disponível em: <<http://www.indac.org.br/>>. Acesso em: 07 fev. 2004.

- [18] TORAY INDUSTRIES IN CORPORATION. **Catalog of Toray polymer optical fibers**. Dec 2000. Disponível em: <<http://www.moritexusa.com/downloads>>. Acesso em 17 dez. 2002.
- [19] MORITEX CORPORATION. **Light guide characteristics**. Apresenta informações relacionadas aos produtos fabricados pela TORAY e comercializados pela MORITEX. Disponível em: <[http://www.moritex.co.jp/english/e\\_products/pdf/lig\\_12.pdf](http://www.moritex.co.jp/english/e_products/pdf/lig_12.pdf)>. Acesso em: 08 fev. 2004.
- [20] JOHNSON MATTHEY CATALYSTS. Apresenta informações sobre plastificantes. Disponível em: <<http://www.syntex.com/polymers/markets-plasticisers.htm>>. Acesso em: jan. 2004.
- [21] INDUSTRIAL FIBER OPTICS, INC. - ESKA Optical Fiber Division. **Specification Sheet: SK-40 plastic optical fiber super ESKA – High Performance Plastic Optical Fiber** ESKA, n. DPF0911-15, May 2001. Disponível em: <<http://www.i-fiberoptics.com/fiber/IFOfiber.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2003.
- [22] GIOZZA, W. F.; CONFORTI, E.; WALDMAN, H. **Fibras ópticas: tecnologia e projeto de sistemas**. Rio de Janeiro: Embratel. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1991.
- [23] WITTMANN, B.; JÖHNCK, M.; NEYER, A.; MEDERER, F.; KING, R.; MICHALZIK, R. POF-based interconnects for intracomputer applications. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, n. 5, v. 5, p. 1243–1248. Sep.-oct. 1999.
- [24] YAMAZAKI, S. ; SHIKADA, M. POF for high-speed PC and home networks. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE AND EXHIBIT (OFC '98), 1998. **Technical Digest**, 1998, p. 307.
- [25] TAKAOKY, I.; SATO, M.; KONDO, A.; TSUKIMORI, Y.; KOIKE, Y. Graded-index polymer optical fiber with high temperature and high humidity stability. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, n. 10, v. 20, p. 1818-1825. Oct. 2002,.

- [26] THE DOW CHEMICAL COMPANY. Apresenta informações sobre plásticos. Disponível em: <<http://www.dow.com/engineeringplastics/tech/guide/>>. Acesso em: dez. 2002.
- [27] KOIKE, Y.; ISHIGURE, T.; SATO, M.; NIHEI, E. **Polymer optical fibers**, IEEE proceeding, 1998, p. 13-16. 1998.
- [28] ISHIGURE, T.; TANAKA, S.; KOBAYASHI, E.; KOIKE, Y. Accurate refractive index profiling in a graded-index plastic optical fiber exceeding gigabit transmission rates. **Journal of Lightwave Technology**, v. 20, n. 8, p. 1449–1456. Aug. 2002
- [29] SENIOR, J. M. **Optical fiber communications**. 2. ed. New York, London, Toronto, Sydney, Tokyo e Singapore: Prentice Hall International Series in Optoelectronics, 1992.
- [30] SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals of photonics**. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: a Wiley-Interscience Publication - John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [31] GECKELER, S. **Optical fiber transmission systems**. Norwood, MA, EUA: Artech House, Inc. , 1987.
- [32] POWERS, J. **An introduction to fiber optic systems**. 2. ed. Electrical Engineering Series. Califórnia USA: McGraw Hill International Editions. 1999.
- [33] CHERIN, A. H. **An introduction to optical fibers**. Japan: McGraw-Hill International Book Company, 1983.
- [34] CIRILLO, J.; JENNINGS, K.; LYNN, M.; STEELE, R.. Plastic optical fiber based components for LAN and data communication applications. In: ELECTRONIC COMPONENTS AND TECHNOLOGY CONFERENCE, 42., 1992. **Proceedings**, 1992, p. 648–651.

[35] TECHNICAL STAFF OF CENTRO STUDI E LABORATORI TELECOMUNICAZIONI (CLELT). **Optical Fibre Communication**. Torino, Italy: McGraw-Hill Book Company, 1981.

[36] EXFO. Expertise reaching out. **Fiber-optic T&M, monitoring, manufacturing and assembly solutions**. Apresenta informações sobre testes e medidas em telecomunicações. Disponível em: <<http://www.exfo.com/en/solutions/>>. Acesso em: 22 mar. 2004.

[37] UNIVERSITY OF SOUTHERN MISSISSIPPI. Department of Polymer Science. **PMMA**. Copyright ©1995,1996. Apresenta informações sobre Polymethylmethacrylate. Disponível em: <<http://www.psrc.usm.edu/macrog/pmma.htm>>. Acesso em: dez. 2002.

[38] PROINDUSTRIA. Apresenta informações sobre materiais abrasivos para polimento. Disponível em: <<http://www.proindustria-madeira.com.br/lixas.html>>. Acesso em: 07 fev. 2004.

[39] EDMUND INDUSTRIAL OPTICS. Apresenta informações sobre produtos comercializados pela EDMUND. Disponível em: <[http://www. Edmundoptics.com](http://www.Edmundoptics.com)>. Acesso em: jul. 2003.

[40] MITSUBISHI RAYON CORPORATION. **Closing of the production, Eska Extra**. Apresenta comunicado sobre a suspensão da fabricação da fibra do tipo Eska Extra. Disponível em: <<http://www.pofeska.com/pofeskae/supporte/kaihaie/extrae/extrae.htm>>. Acesso em: abr. 2004.

[41] WEBSITE DA MITSUBISHI RAYON CO. **Technical Report: Comparison between EH4001 and GH4001**. 15 Jun. 2001. Disponível em: <[http://www.pofeska.com/pofeskae/documente/documente/doce/doc\\_de/doc\\_fibere/doc\\_fibere.htm](http://www.pofeska.com/pofeskae/documente/documente/doce/doc_de/doc_fibere/doc_fibere.htm)>. Acesso em: jun. 2004.

[42] INDUSTRIAL FIBER OPTICS. **Specification sheet GH 4001 ESKA PREMIER**. Disponível em <<http://www.i-fiberoptics.com/fiber/IFOfiber.htm>>. Acesso em: jun. 2004.

- [43] TAKAHASHI, S.; ICHIMURA, K. Time domain measurements of launching-condition-dependent bandwidth of all-plastic optical fibres. **Electronics Letters**, v. 27. no. 3, p. 217 –219, jan. 1991.
- [44] SONY. **Laser Diode Guide**. Chapter 2: Handling precautions and reliability. Disponível em: <<http://www.sony.com>> . Acesso em: fev. 2003.
- [45] BATES, R. J. S.; WALKER, S. D. Evaluation of all-plastic optical fibre computer data link dispersion limits. **Electronics Letters**, v. 28, n. 11, p: 996 –998, 21 may 1992.
- [46] JOBIN YVON LTDA. Specialist in Spectroscopy. **The optics of spectroscopy**. Stanmore, North London, UK. Apresenta informações teóricas sobre espectrometria. Disponível em: <[http://www.jyhoriba.co.uk/jy/oos/oos\\_ch1.htm#1.1](http://www.jyhoriba.co.uk/jy/oos/oos_ch1.htm#1.1)>. Acesso em: jul. 2003.
- [47] JOBIN YVON LTDA. Apresenta informações teóricas sobre fotodetectores. Disponível em <<http://www.jobinyvon.co.uk/jy/osd/detectors.htm>>. Acesso em: 14 nov. 2003.
- [48] PTI – PHOTON TECHNOLOGY INTERNATIONAL. **PMT housings general information**: lighth detection. Apresenta informações teóricas sobre fotodetectores. Disponível em <[http://www.pti-nj.com/obb\\_8.html](http://www.pti-nj.com/obb_8.html)> Acesso em: jul. 2003.
- [49] THE OPTOMETRICS CORPORATION. **Operators manual – RS Series Spectrophotometric Systems**. Version 90.6, P/N: 6200-0001, 15 jun. 1994.
- [50] Disponível em <[http://www.elexp.com/opt\\_ftk4.htm](http://www.elexp.com/opt_ftk4.htm)> Acesso em: ago. 2003.
- [51] AGILENT TECHNOLOGIES. **Crimpless connectors for plastic optical fiber and versatile Link**. Technical Data. Disponível em: <[www.agilent.com](http://www.agilent.com)>. Acesso em: jul. 2003.

[52] INDUSTRIAL FIBER OPTICS. Apresenta informações dos produtos para polimentos de POF. Disponível em <<http://www.i-fiberoptics.com/tools/IFOtools2.htm>>. Acesso em: ago. de 2003.

[53] A. VAN HOVE, T. COOSEMANS, B DHOEDT, P. VAN DAELE, R. BAETS, J. VAN KOETSEM; L. VAN DEN TORREN. Termination of small diameter (125  $\mu$ m) plastic optical fiber for 10 Gbit/s datacommunication. In: ELECTRONIC COMPONENTS & TECHNOLOGY CONFERENCE, 48., 1998, **IEEE proceedings**, pp. 783–789.

[54] SONY. **Specification sheet GaAlAs Laser Diode SLD104AV**. Disponível em: <<http://www.sony.com>> . Acesso em: fev. 2003.

[55] HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Solid State Division. **Specification sheet Si PIN photodiode S5971, S5972, S5973 series**. Cat. No. KPIN1025E03. Mar 2003 DN.

[56] G. FARREL. Communications Systems. School of Electronic and Communications Engineering, Dublin Institute of Technology. **Dispersion in Fibre**. Apresentação em *slides* (Powerpoint) sobre dispersão em fibras ópticas, 22 out. 2003.

## **Anexos**



### Anexo 1 – Especificações técnicas da fibra Mitsubishi ESKA EXTRA

Fabricante:	Mitsubishi Rayon Corporation, Ltd. – ESKA Optical Fiber Division
Fonte da especificação	Edmund Industrial Optics (catalog)
Tipo da fibra	ESKA EXTRA (PMMA PF SI POF)
Descrição	<i>ESKA Acrylic fiber optics whose core is made of PMMA and is sheathed with a special thin layer of flourine polymer which has a lower refractive index than the fiber core.</i>
$n_1$	1,492 (PMMA)
$n_2$	1,417 (PMMA perfluorinado)
NA	$0,47 \pm 0,03$
Atenuação	180 to 250 dB/km @ 650nm
$\theta_{\text{aceitação}} = 2 \cdot \sin^{-1}[\text{NA}]$	$56^\circ$
$t_{\text{operação}} (^\circ\text{C})$	$-55^\circ$ to $+85^\circ$
Raio mínimo de curvatura	20 x diâmetro externo
Diâmetro da fibra [ $\mu\text{m}$ ] x n° de fibras	1000 x 1
Diâmetro do núcleo [ $\mu\text{m}$ ]	980
Diâmetro da casca [ $\mu\text{m}$ ]	1000
Atenuação máxima	0,18 dB/m
Comprimento da fibra sob teste (medido)	16,45 m

## **Apêndices**

### Apêndice 1 – Cálculos dos parâmetros básicos da POF PF PMMA ID

Aplicando os dados fornecidos pelo fabricante são obtidos os parâmetros fixos da fibra amostrada e as expressões dos parâmetros dependentes do comprimento de onda. Os resultados destes cálculos estão listados na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 Tabela dos parâmetros fixos e expressões para a POF amostrada.

Parâmetro	Expressão matemática	Valor/expressão calculada
Diferença relativa entre índices de refração ( $\Delta$ )	$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2.n_1^2}$	$\Delta = 4,9.10^{-2}$
Abertura numérica (NA)	$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$	$NA = 0,467$
Ângulo crítico	$\theta_{crítico} = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$	$\theta_{crítico} = 71,756^\circ$
Ângulo de aceitação	$\theta_{aceitação} = \arcsen NA$	$\theta_{aceitação} = 27,84^\circ$
Frequência normalizada (V)	$V = \frac{2.\pi.a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$	$V = \frac{1,438.10^{-3}}{\lambda}$
Número de modos de propagação	$M \approx \frac{V^2}{2}$	$M = \frac{1,034.10^{-6}}{\lambda^2}$

Tabela 6-2 Frequência normalizada e número de modos de propagação para 650, 780 e 850 nm para a POF PF PMMA ID.

$\lambda$ [nm]	650	780	850
V	2212,31	1843,59	1691,76
M [modos]	2.447.337	1.699.539	1.431.141

## Apêndice 2 – Procedimento de polimento na POF (etapas do polimento)

Numa primeira fase do estudo foram utilizados como elementos abrasivos (polimento A):

- (1) Papel a prova d'água (lixa) com grana 300;
- (2) Papel a prova d'água (lixa) com grana 1000;
- (3) Solução de Alumina ( $Al_2O_3$ ) n°. 1 com partículas de alumina em suspensão de aproximadamente  $5,0 \mu m$ , suspensa em água destilada (ALUMINA No 40-6351 ALPHA MICROPOLISH – BUEHLER);
- (4) Pasta de Diamante de alto desempenho contendo diamantes monocristalinos de  $\frac{1}{4} \mu m$  (DP-PASTE M - STRUERS A/S – Dinamarca).

Durante o estudo foi necessário refazer o polimento nas extremidades da fibra e, nesta ocasião, alternativamente uma outra seqüência de polimento de quatro estágios (polimento B) foi feita:

- (1) Papel abrasivo a prova d'água com grana 600 (Norton);
- (2) Papel abrasivo a prova d'água com grana 1000;
- (3) Solução de alumina  $1 \mu m$ ;
- (4) Solução de alumina  $0,06 \mu m$ .

O polimento com Alumina e a Pasta de diamante utiliza um substrato de tecido em veludo. O veludo é cortado e adaptado na politriz e, sobre ele, derramado o agente polidor (Alumina ou Pasta de Diamante).

O procedimento de polimento consistiu em inserir a fibra em um furo de 1mm em um suporte de madeira em forma de paralelepípedo (em substituição ao ferrolho) de forma a ficar com a extremidade a ser polida um pouco exposta do outro lado do furo. A fixação foi feita com cera de abelha aquecida cuidando-se para que a temperatura fosse mantida abaixo da temperatura suportada pela fibra. O suporte de madeira é auxiliar de forma a facilitar o polimento e garantir o corte transversal em  $90^\circ$ . Manualmente, este suporte de madeira é então segurado rente sobre o prato da politriz de forma a oferecer total

nivelamento à sua base (com a ponta da fibra), deslizando-a radialmente no prato giratório da politriz para melhor aproveitamento do material abrasivo. A cada minuto, a madeira era mudada em seu sentido, porém sempre em 90° em relação ao polimento anterior. A limpeza da extremidade polida foi realizada com algodão embebido em água. Inicialmente havia sido usado álcool comum para a limpeza, porém, tal qual observado no microscópio metalográfico e confirmado em recomendações de fabricante [17], o PMMA tem baixa resistência aos álcoois, entre outras substâncias. O polimento desejado foi obtido em 4 etapas cujos tempos estão discriminados na Tabela 6-3. Na Tabela 6-4 pode-se comparar os estágios de polimentos realizado neste estudo com os polimentos recomendados nos *kits* comerciais e o polimento publicado em um artigo técnico.

Tabela 6-3 Tempo necessário de polimento das extremidades finais da POF.

Estágio	Polimento A	Polimento B	Tempo
1	Lixa grana 600	Lixa grana 600	< 1min (apenas desbaste)
2	Lixa grana 1000	Lixa grana 1000	2 minutos
3	Alumina 5 µm	Alumina 1 µm	2 minutos
4	Pasta de Diamante ¼ µm	Alumina 0,06µm	4 minutos

Tabela 6-4 Comparação de estágios e granulometria nos *kits* comerciais (2 estágios), em experimento publicado (3 estágios) e os utilizados neste estudo (4 estágios).

Polimentos recomendados em <i>kit</i> comercial (POF)		Polimento conforme estudo [53]	Polimento realizado neste estudo	
[50] e [51]	[52]		Polimento A	Polimento B
grana 600	grana 2000	16 µm	grana 600	grana 600
Filme <sup>4</sup> 3 µm	Filme 3 µm	5 µm	grana 1000	grana 1000
		1 µm	Alumina 5,0 µm	Alumina 1 µm
			Pasta diamante ¼ µm	Alumina 0,06 µm

Nota: grão abrasivo = grana (ou *grit*)

<sup>4</sup> Filmes de polimento (*polishing film*) - quase equivalentes às pastas de diamante - são grãos abrasivos dispostos sobre um substrato plástico.

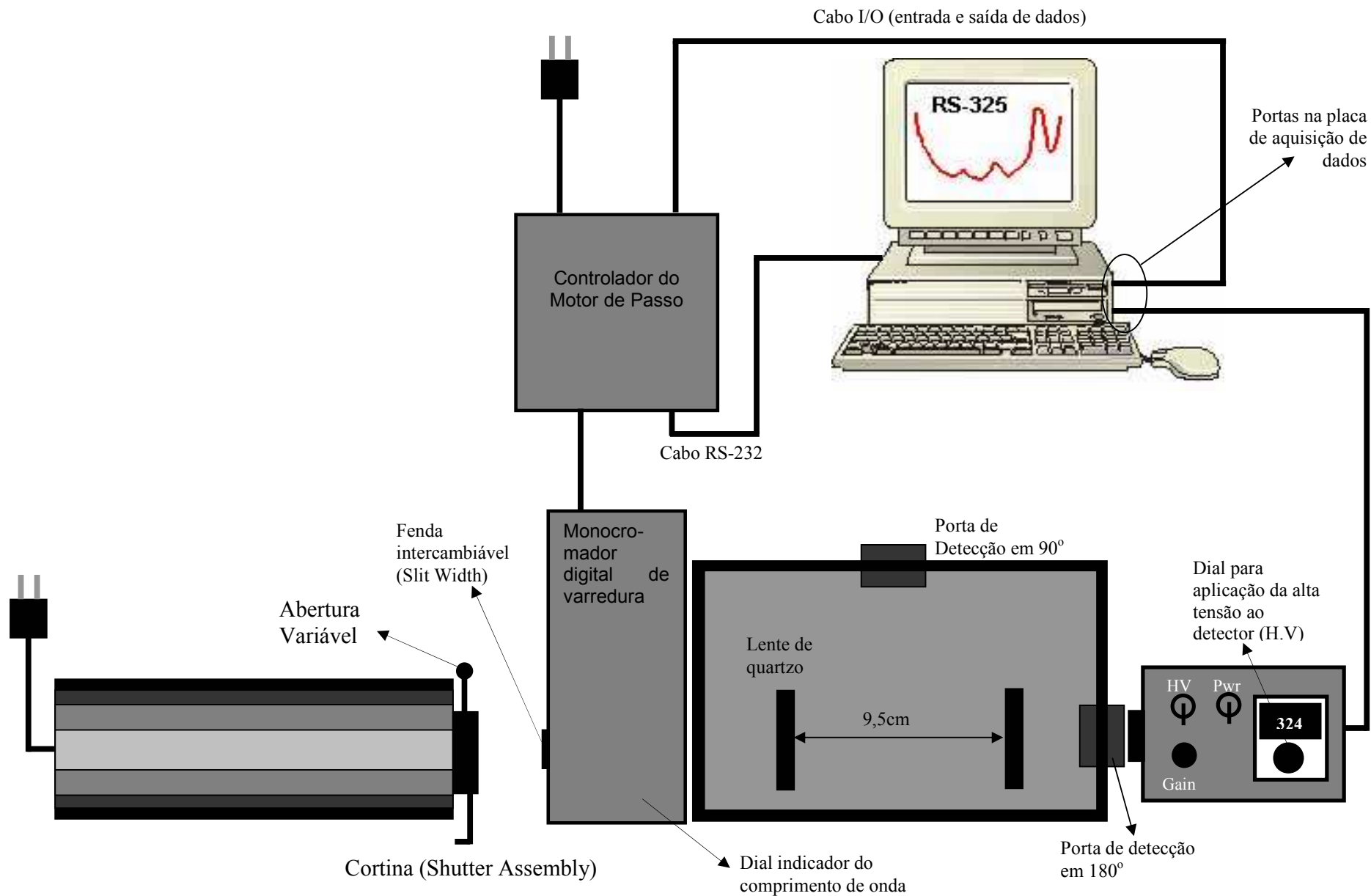
A equivalência entre grana e  $\mu\text{m}$  - da Norma americana CAMI (*Coated Abrasives Manufactures Institute*) muito usada no mercado brasileiro e semelhante ao padrão ABNT NBR 6405 - nos valores de interesse neste estudo são: grana 600 = 15,3 – 16  $\mu\text{m}$ ; 1000 = 9,2 -10,6  $\mu\text{m}$  e 1200 = 6 – 8  $\mu\text{m}$  [38].

Pela Tabela 6-4 espera-se que os polimentos realizados para o experimento resulte em qualidade superior, visto que os grãos aplicados foram de dimensões inferiores ao recomendado comercialmente resultando num polimento muito mais fino. O polimento B deve apresentar desempenho ainda melhor do que o A.

Para otimização do tempo tentou-se inicialmente polir as duas extremidades simultaneamente no mesmo suporte (2 furos). Contudo, isto não é recomendado visto que impõe à fibra óptica plástica tensões mecânicas à sua estrutura próximas às extremidades que podem causar fissuras e até mesmo sua quebra em função da fragilidade do material PMMA.

Em larga escala, o polimento não é adequado como técnica de terminação de fibras pois consome muito tempo. Porém, é importante realçar que para fibras plásticas esta técnica despense bem menos tempo quando comparada à fibra de sílica. Devido à característica de baixa dureza dos polímeros, o polimento torna-se bem mais fácil. Esta característica, inclusive, poderia dispensar o uso da pasta de diamante no polimento realizado.

### Apêndice 3 – Medida de atenuação – Diagrama do Fotoespectrômetro RS-325



#### Apêndice 4– Medida de atenuação – Menu do aplicativo RS do fotospectrômetro

SDMC Model no. 2 RS Spectrophotometer Version 90.60  
 Scan limits 200-800nm (faixa na qual o monocromador está apto a medir)

COMANDO	Sub-comando	Opção	Descritivo
CALIBRATE SYSTEM			Calibragem do sistema. A taxa de varredura é pré-definida, não podendo ser alterada.
SET MODE	SCANNING/TIME BASE	Scanning	Scanning - varredura no domínio do comprimento de onda Time Base - varredura no domínio do tempo
SET PARAMETERS	WAVELENGTH RANGE	From: <u>400nm</u> To: <u>800nm</u>	Faixa escolhida para a medição.
PARAMETERS SCANNING MODE	Scan rate	<u>100nm/s</u> (default)	Entre 1 e 100. O Scan rate é utilizado para a varredura da referência e da amostra.
	Gain	<u>1X</u> (default)	
	OPTIMIZE		Otimização do sistema. A taxa de varredura é pré-definida, não podendo ser alterada
RUN	ACQUIRE SCAN DATA	<u>Reference</u> ou <u>Sample</u>	Medição da Referência e da Amostra.
	Ref. Gain 1X	<u>1X</u> (default)	Ganho da referência
	Samp Gain 1X	<u>1X</u> (default)	Ganho para a amostra
	Operator Log Sample Log Reference Date Operator	---	Identificação dos dados adquiridos.
PLOT DATA PLOT SCAN DATA	WAVELENGTH	Minimum <u>400nm</u> Maximum <u>800nm</u>	Intervalo do comprimento de onda que será mostrado no gráfico plotado.
	ORDINATE VALUES: Autorange ON/OFF Units ABS/TRANS Derivative NONE Minimum .0 Abs Maximum 3.0 Abs	<u>ON</u> (default) <u>ABS</u> ou <u>TRANS</u>	Opções para a plotagem do gráfico.
	DATA HANDLING Labels AUTO/NONE No. labels 5 Smooth 3 cyc Curve fit 13 pts	<u>NONE</u> (default)	A opção AUTO localiza e identifica até 5 picos (ABS) ou vales (TRANS) na ordenada com seus respectivos comprimentos de onda.
	PRINT	---	Impressão do gráfico
FILE OPERATIONS Para armazenar os dados obtidos em um arquivo.	DIRECTORY ► C:\RS RS DATA DIRECTORY DOS DIRECTORY		Seleção do local para o armazenamento do arquivo.
	FILE <nome do arquivo>		Denominação do arquivo para salvá-lo ou carregá-lo.
	SAVE		Salva o arquivo com extensão .DAT
	DELETE		Apaga o arquivo carregado
	SAVE ASCII FILES CURRENT DATA FROM RS		Salva o arquivo em formato ASCII (extensão .ASC)
QUIT			Para sair do programa RS.

Nota: o grifo nas opções indica possibilidade de alteração do parâmetro.



## Apêndice 5 – Medida de atenuação - Procedimento do ajuste do ponto focal da POF

Para facilitar o acoplamento da luz do monocromador na POF através das adaptações concebidas (suportes da POF e fenda adicional), foram definidas as seguintes etapas:

- Com o compartimento da amostra vazio, acionar o comando CALIBRATION no programa. Este comando finaliza sua atuação eliminando a passagem pela grade de difração, de modo que a luz obtida é branca, permitindo melhor visualização do feixe luminoso na entrada da POF.
- Colocar no suporte de entrada do sinal junto com a fibra no compartimento da amostra.
- Ajustar o ponto focal da luz na extremidade de entrada da fibra em duas etapas:
  - Ajustar a posição do feixe na horizontal (vê-se uma fenda vertical proveniente do *slit width* na entrada da fibra) definindo assim a posição angular do suporte.
  - Adicionar a fenda complementar horizontalmente sobre o *slit*, ajustando, desta forma, a altura do feixe.

Na saída da fibra, a luz assume tonalidade verde *neon*, e pode-se por aí, visualmente, ajustar também o ponto de maior potência luminosa confinada dentro da POF.

Tendo-se determinado a melhor posição, é colocada um pedaço de fita adesiva (durex) na fibra (distância de aproximadamente 2,6 cm da ponta) de forma a fixar a posição desejada no tubete. Este “guia” deve ser colocado em ambas as fibras (amostra e referência).

## **Apêndice 6 – Medida de atenuação – Fluxograma da Obtenção do Espectro de transmitância /absorção da POF**

Após do levantamento da rotina do processo de medição do espectro óptico, foi elaborada uma representação gráfica de todos as operações que integram o processo, sob forma seqüencial.

Nomenclatura:

- Opções no menu de comandos do fotoespectrômetro estão mencionados em letras maiúsculas.

Exemplo: CALIBRATING

- Quando houver opções a serem escolhidas no menu do equipamento (via software), a opção escolhida estará sublinhada, podendo ter sido escolhidas pela via tecla <enter> ou digitadas no espaço destinado a elas.

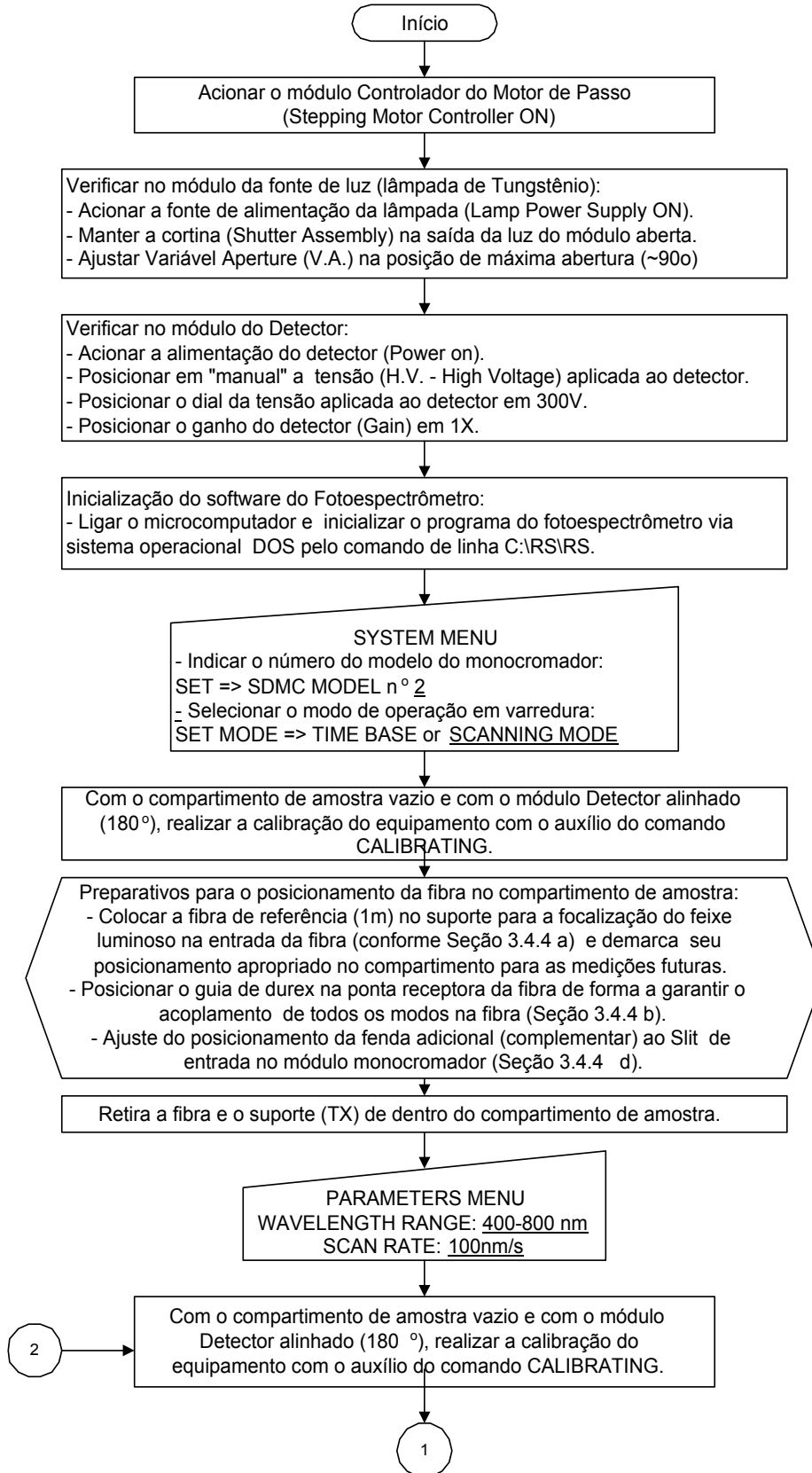
Exemplo: SET MODE => TIME MODE or SCANNING MODE

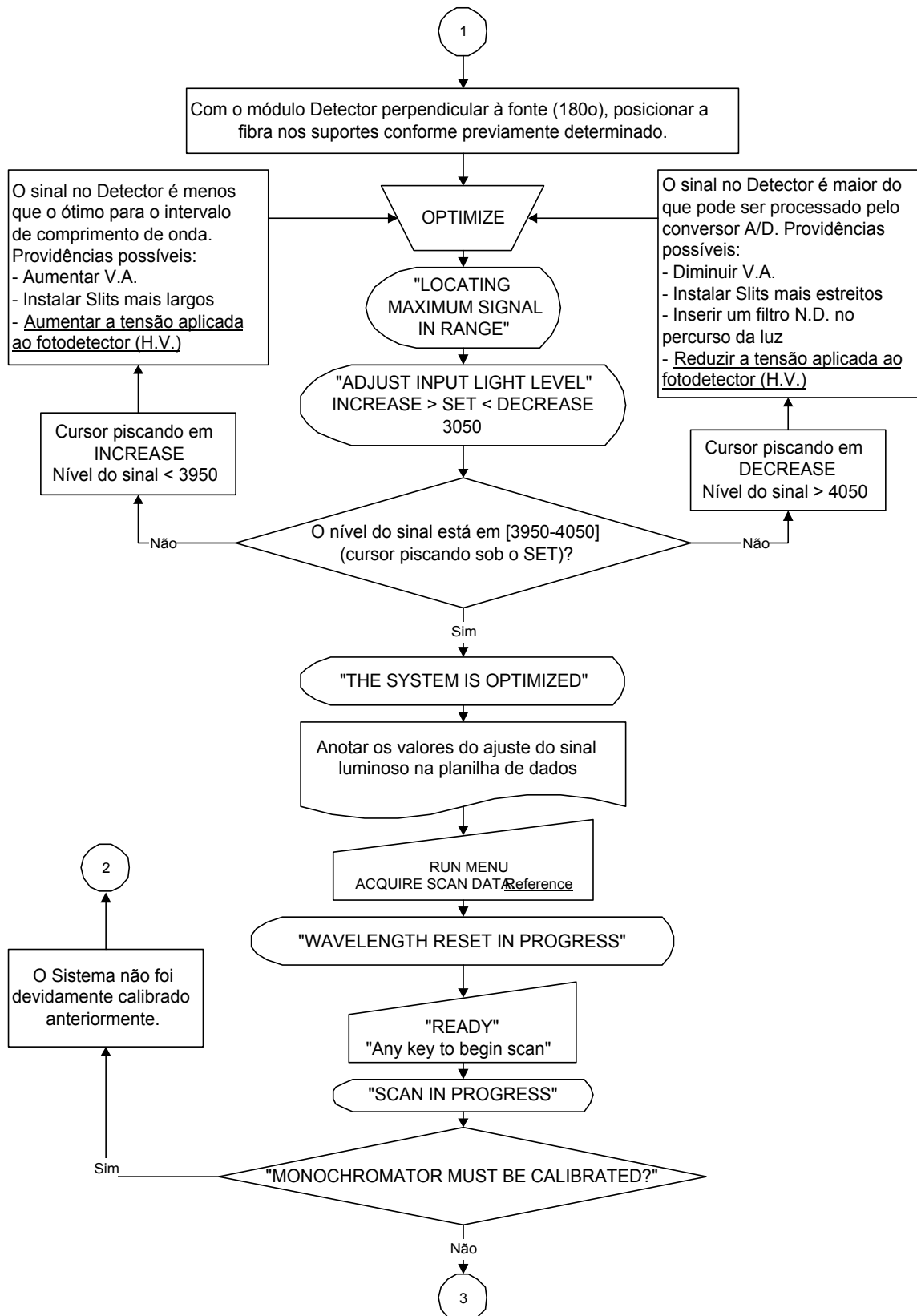
SET MODE é a opção e SCANNING MODE a opção escolhida

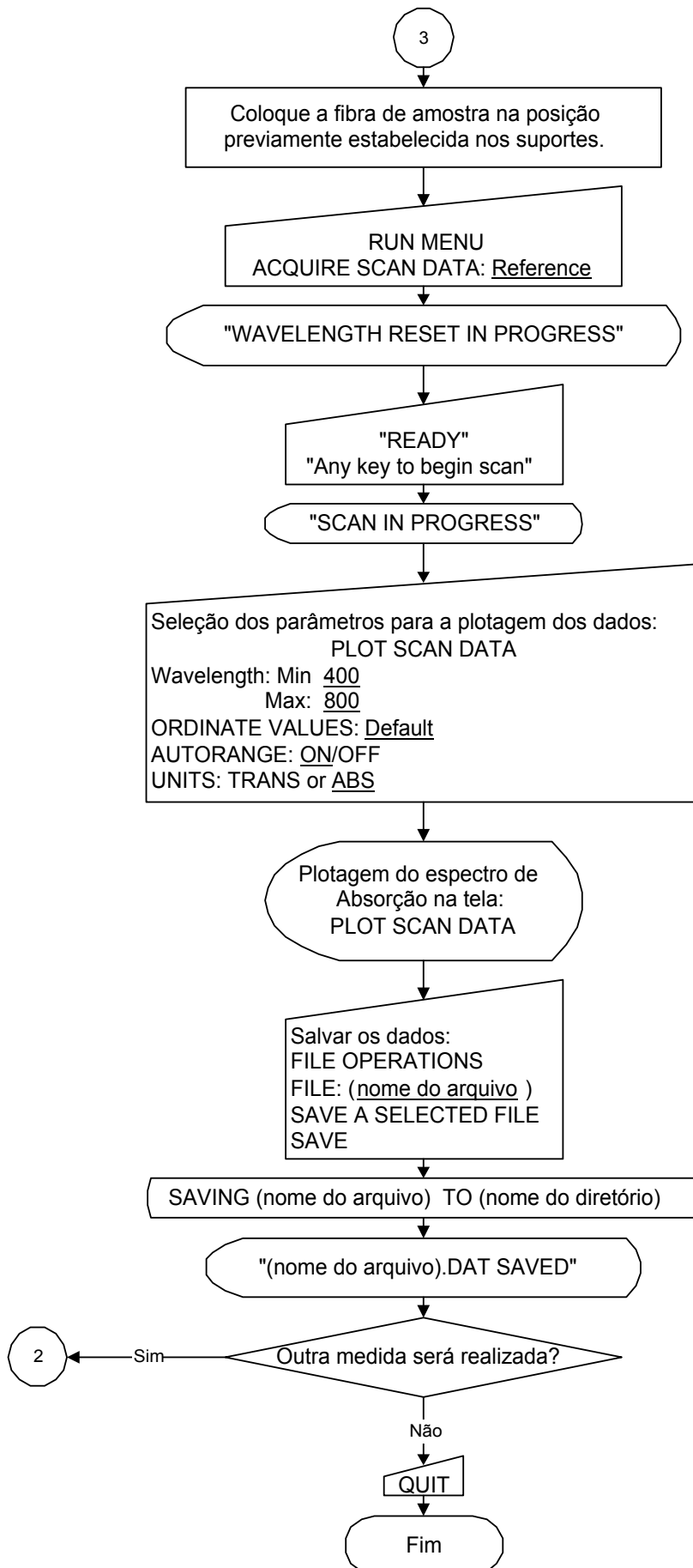
- Mensagens informativas na tela do microcomputador são mencionadas em letras maiúsculas e entre aspas.

Exemplo: “THE SYSTEM IS OPTIMIZED”

## Fluxograma da Obtenção do Espectro de Transmitância/Absorção da POF:







### Apêndice 7 – Medida de Atenuação - Planilha da medição da atenuação espectral da fibra óptica PMMA PF ID POF

Guia dures: 3,2 cm (d = 3,5 mm)

Data: 23 Abril 2004

Arquivo OPJ: Abril2004\_b.OPJ

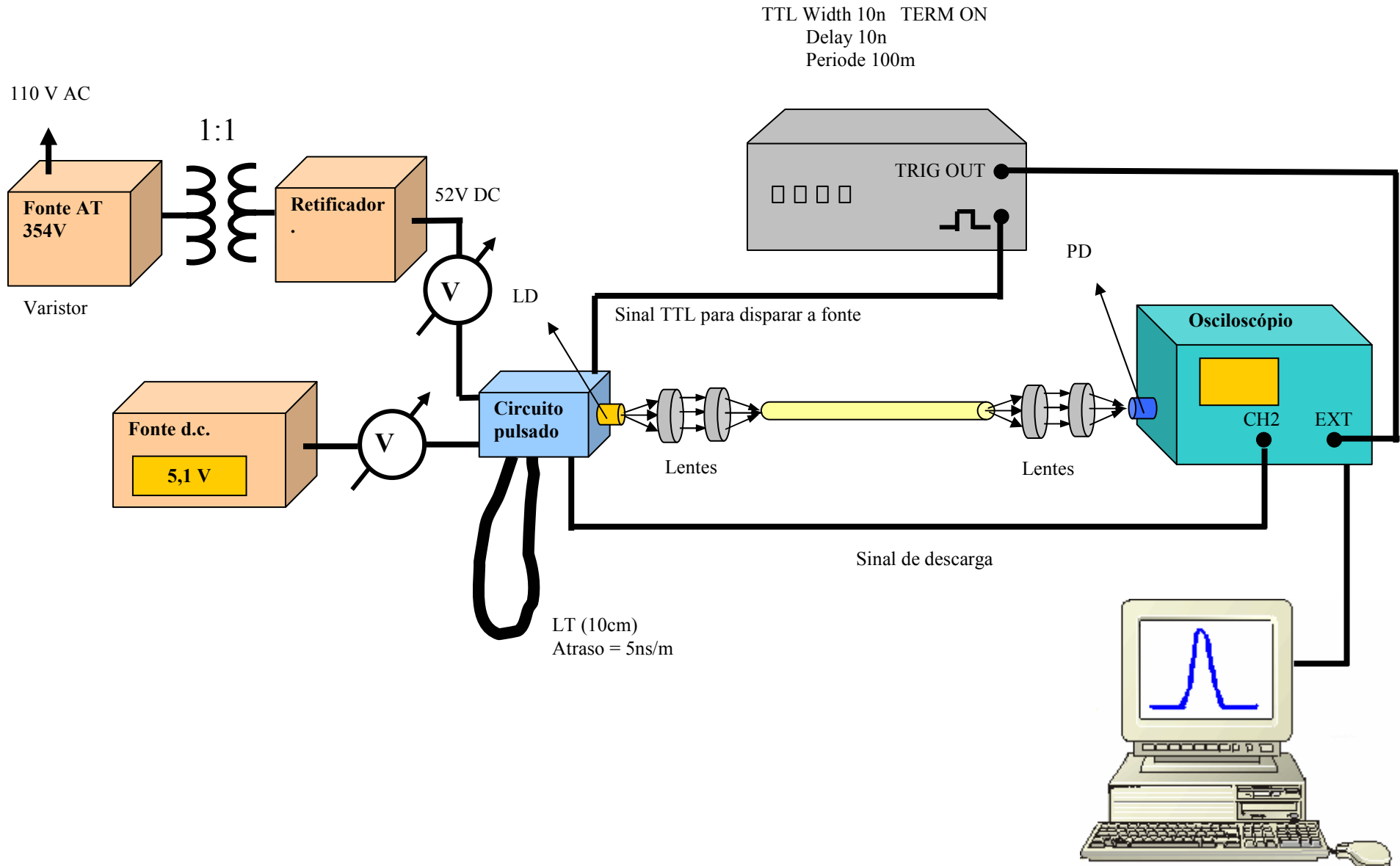
Arquivo ASC	Calib. [nm]	Ganho	V.A [°]	HV [V]	Optimiz.	$\lambda$ [nm]	Trans. [%T] Max / Mín.	Abs. [ABS] Máx / Mín.	Faixa de saturação (9,99756 na referência)
POF16N16	000	1X	90	566	INC/SET	779,6	100/0,3	2,5/0,0	[408-727,92]
POF16N17	000	1X	90	561	INC/SET	779,3	100/0,1 (curva sat. encima)	2,8/0,0	[403-781,58]
POF16N18	000	1X	90	546	INC/SET	779,3	100/0,1 (curva sat. encima)	2,9/0,0	[404-783,18]
POF16N19	000	1X	90	541,5	INC/SET	779,3	73,8/0,1 (curva sat. embaixo)	3/0,1	[433,63-723,12]
POF16N20	000	1X	90	537,5	INC/SET	779,3	100/0,1 (curva sat. encima)	2,8/0,0	[416,42-728,32]
POF16N21	000	1X	90	526,5	INC/SET	779,3	94,2/0,0 (curva sat. embaixo)	3/0,0	[422,42-727,12]
POF16N22	000	1X	90	517,5	INC	779,3	100/0,2 (curva sat. encima)	2,6/0,0	[460,06-714,31]
POF16N23	000	1X	90	457,0	INC/SET	779,3	17,5/0,0 (curva ok)	3/0,7	[569,37-611,41]
POF16N24	000	1X	90	470,5	(inc)SET	779,35	36,7/0,1 (curva ok)	2,8/0,4	NÃO SAT.
POF16N25	000	1X	90	477,0	(inc)SET	779,3	23/0,1	2,9/0,6	NÃO SAT.
POF16N26	000	1X	90	476	(dec)SET	779,3	30,5/0,1	2,9/0,5	[535,33-616,21]
POF16N27	000	1X	90	473,5	(dec) SET	779,3	49,9/0,1 (curva sat. embaixo)	2,9/0,3	[495,29-686,68]
POF16N28	000	1X	90	471,5	(dec) SET	779,3	23,9/0,0 (curva ok)	3,0/0,6	NÃO SAT.
POF16N29	000	1X	90	475	SET	779,3	92,8/0,3 (curva sat embaixo)	2,5/0,0	NÃO SAT.
POF16N30	000	1X	90	474	(dec) SET	779,35	66,9/0,2 (curva sat. embaixo)	2,7/0,1	[559,36-612,21]
POF16N31	000	1X	90	468,5	(dec) SET	779,3	44,8/0,1 (curva sat. embaixo)	2,9/0,3	[470,07-694,7]
POF16N32	000	1X	90	465	(dec) SET	779,3	71,3/0,2 (curva sat. embaixo)	2,7/0,1	[498,09-677,48]
POF16N33	000	1X	90	461	(dec) SET	779,3	85,2/0,2 (curva sat. embaixo)	2,7/0,0	[489,28-681,88]
POF16N34	000	1X	90	474,5	INC/SET	779,3	81,8/0,3 (curva sat. embaixo)	2,5/0,0	NÃO SAT.
POF16N35	000	1X	90	474,5	SET	779,3	74,3/0,2 (curva sat. embaixo)	2,6/0,1	NÃO SAT.
POF16N36	000	1X	90	474	(dec) SET	779,3	74,1/0,2 (curva sat. embaixo)	2,7/0,1	[528,53-658,65]
POF16N37	000	1X	90	471	(dec) SET	779,3	71,7/0,2 (curva sat. embaixo)	2,7/0,1	NÃO SAT.
							Medida errada / desregulou		
POF16N38	000	1X	90	485	(inc) SET	779,3	97,9/0,3 (curva sat. embaixo)	2,5/0,0	NÃO SAT.
POF16N39	000	1X	90	484	(dec) SET	779,3	88,9/0,3 (curva sat. embaixo)	2,5/0,0	[558,56-612,21]
POF16N40	000	1X	90	482,5	(dec) SET	779,3	76,1/0,2 (curva sat. embaixo)	2,7/0,1	[523,32-661]
POF16N41	000	1X	90	475	(dec) SET	779,3	68,5/0,1 (curva sat. embaixo)	2,9/0,1	[466,06-697,49]
POF16N42	000	1X	90	(471)474	(inc) SET	779,3	69,4/0,2 (curva ok)	2,7/0,1	[558,15-612,21]
POF16R6	000	1X	90	469	(dec) SET	779,3	100/0,1 (na tela está 70% ??)	3,0/0,0	[470,47-688,28]

Arquivo ASC	Calib. [nm]	Ganho	V.A [°]	Raio de curvatura [cm]
POF16R5	000	1X	90	5
POF16R4	000	1X	90	4
POF16R3	000	1X	90	3
POF16R2	000	1X	90	2
POF16R15	000	1X	90	1,5
POF16R1	000	1X	90	1

Janelas ópticas:

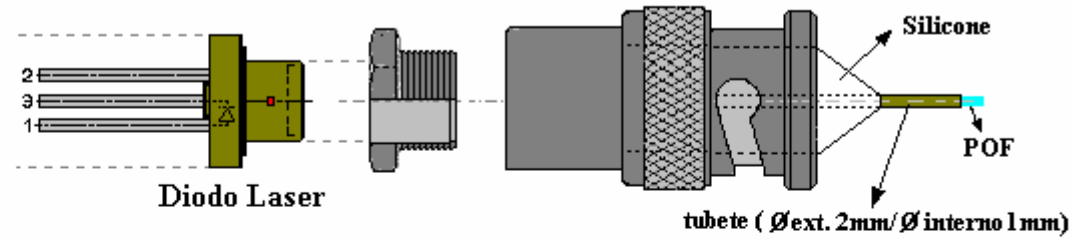
Arquivo	570nm	650nm	770nm	780nm (laser)
POF16N24	0,28205 dB/m (570,17 nm)	0,33642 dB/m (651,45 nm)	0,85912 dB/m (770,77 nm)	0,98289 dB/m (779,98nm)
POF16N25	0,41394 dB/m (569,77 nm)	0,48676 dB/m (651,85 nm)	1,00669 dB/m (770,77 nm)	1,13336 dB/m (779,98nm)
POF16N28	0,40251 dB/m (569,37 nm)	0,47664 dB/m (652,25 nm)	0,99941 dB/m (771,17 nm)	1,11645 dB/m (779,98nm)
<b>POF16N29</b>	<b>0,01984 dB/m (571,37 nm)</b>	<b>0,0726 dB/m (651,85 nm)</b>	<b>0,58385 dB/m (770,77 nm)</b>	<b>0,7006 dB/m (779,98nm)</b>
<b>POF16N34</b>	<b>0,05678 dB/m (570,97 nm)</b>	<b>0,11205 dB/m (651,85 nm)</b>	<b>0,65007 dB/m (771,17 nm)</b>	<b>0,77521 dB/m (779,98nm)</b>
POF16N35 Ref ruim	0,26918 dB/m (570,57nm)	0,32212 dB/m (652,25 nm)	0,8734 dB/m (769,97nm)	1,09839 dB/m (779,98nm)
<b>POF16N37</b>	<b>0,09362 dB/m (570,57 nm)</b>	<b>0,14331 dB/m (651,85 nm)</b>	<b>0,67435 dB/m (769,97 nm)</b>	<b>0,80212 dB/m (779,98nm)</b>
<b>POF16N38</b>	<b>0,00613 dB/m (570,97 nm)</b>	<b>0,05911 dB/m (652,25 nm)</b>	<b>0,6076 dB/m (770,37 nm)</b>	<b>0,73648 dB/m (779,98nm)</b>

Apêndice 8 – Medida de dispersão - Diagrama dos equipamentos para a medida de dispersão intermodal no domínio do tempo

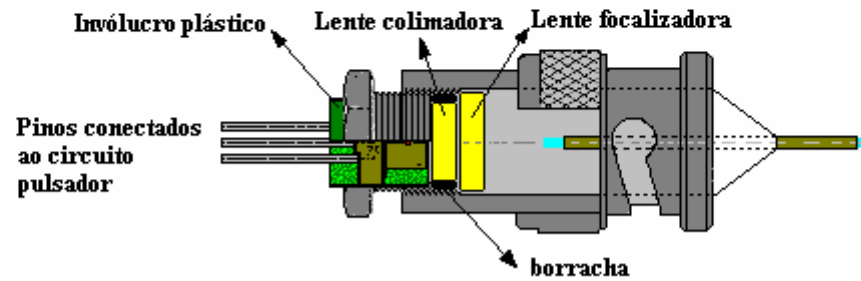




Apêndice 9 – Medida de dispersão - Sistema de acoplamento do lado transmissor para a medição de dispersão intermodal

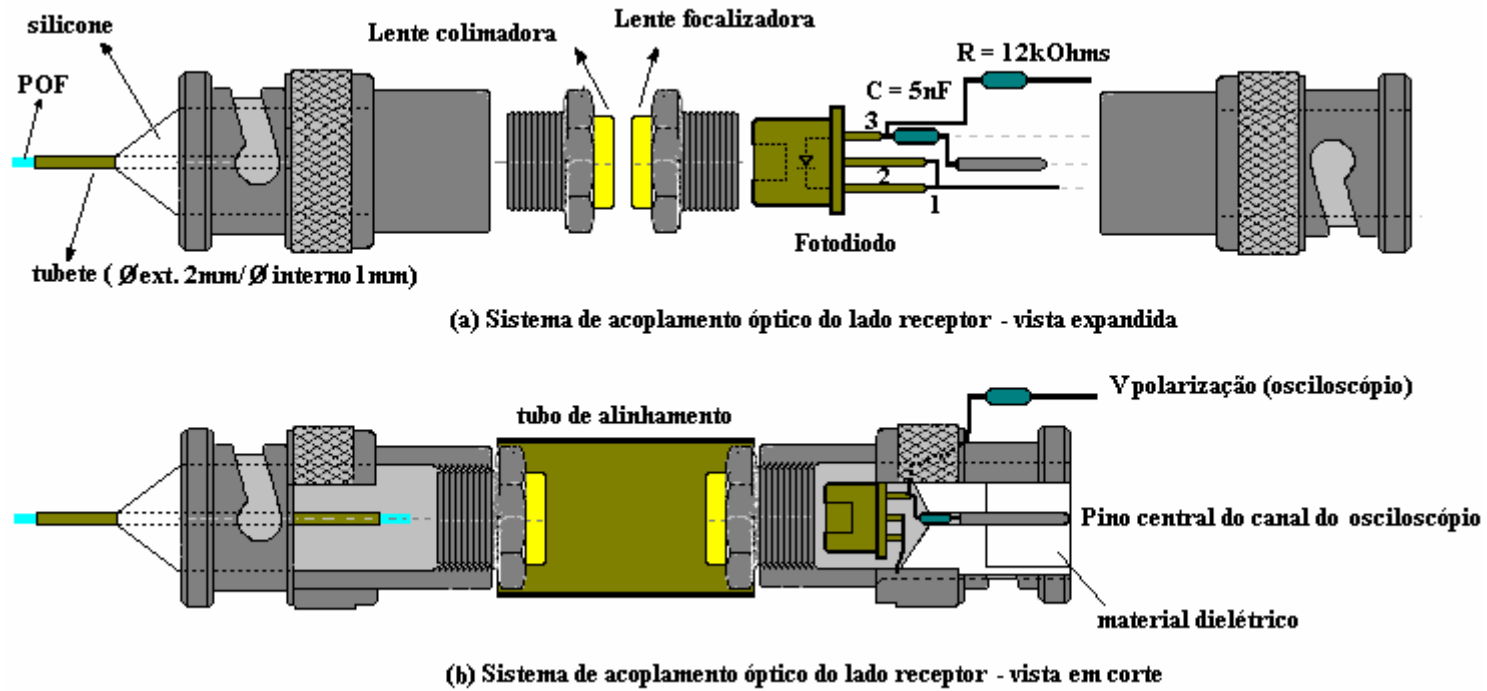


(a) Sistema de acoplamento óptico do lado transmissor - vista expandida



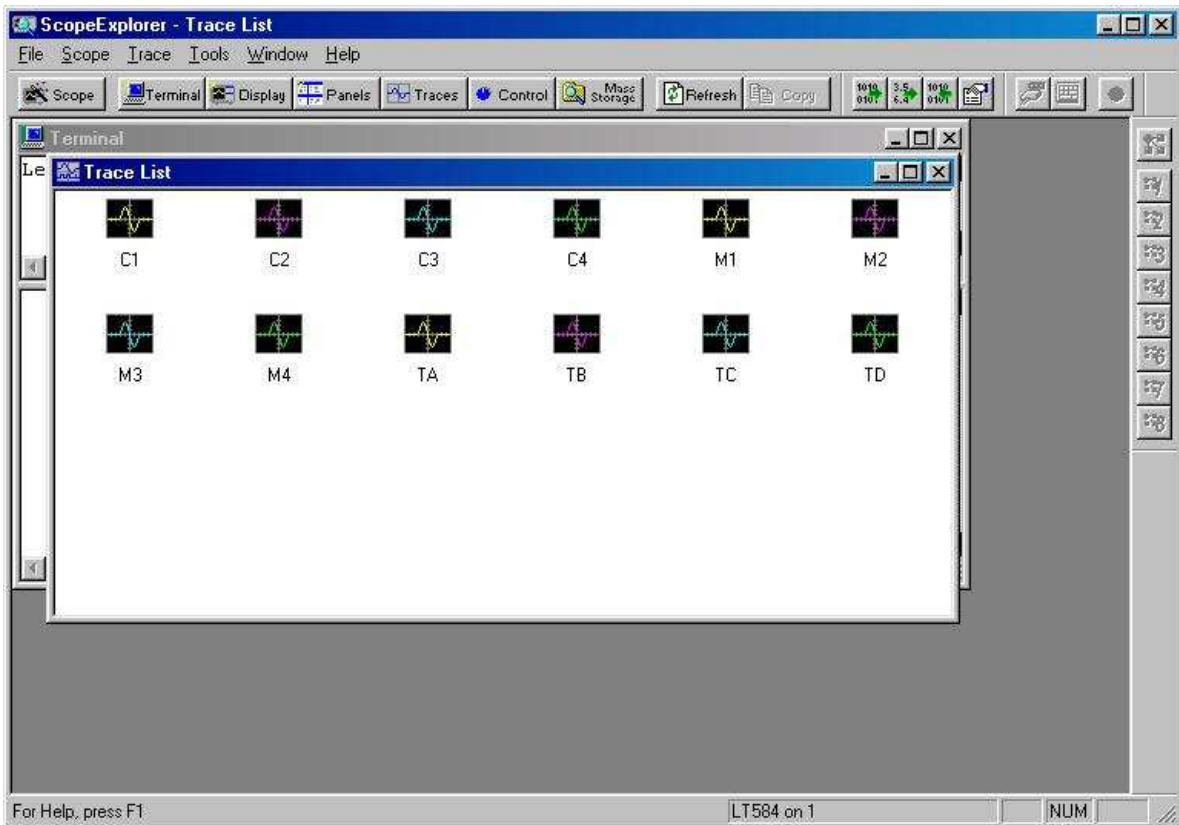
(b) Sistema de acoplamento óptico do lado transmissor - vista em corte

## Apêndice 10 – Medida de dispersão - Sistema de acoplamento do lado receptor para a medição de dispersão intermodal

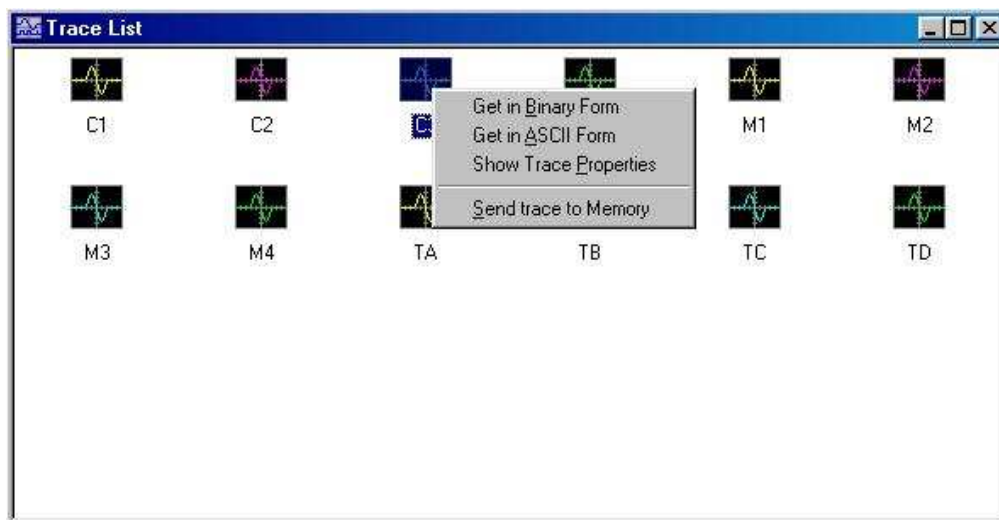


## Apêndice 11 – Medida de dispersão - Armazenamento dos dados obtidos do osciloscópio no programa Scope Explorer – Trace List

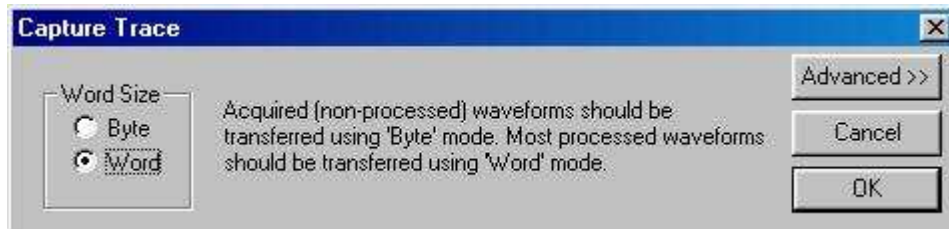
- 1) Com o programa Scope Explorer – Trace List ativo e após a obtenção da curva desejada na tela do osciloscópio, selecionar a opção TRACES na barra de opções. Aparece a janela com as possibilidades de traços “Trace List”.



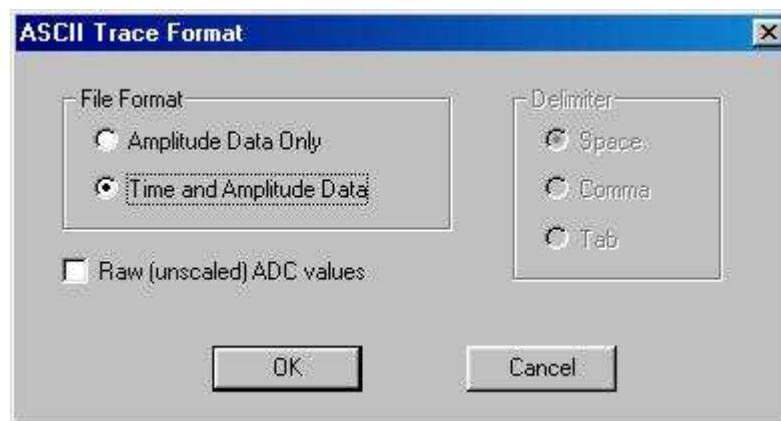
- 2) Clicar com o botão direito do mouse no canal no qual foi realizada a medida da curva (no exemplo é o canal 3 ou C3). Selecionar a opção “Get in ASCII Form”.



- 3) Aparece uma janela indicando a captura dos dados com a seguinte mensagem: “Reading data trace. (The progress will not be shown; Just wait!)”
- 4) Após a captura dos dados, surge uma janela para que seja selecionado o tamanho da palavra correspondente aos dados. Selecione WORD e clique OK. Os dados são gravados.



- 5) A janela seguinte é para a seleção do “ASCII Trace Format” desejado. Selecione “Time and Amplitude Data” e clique OK.



- 6) Abre então a janela para que seja indicado o local onde os dados serão gravados. Basta indicar o caminho no diretório do microcomputador fornecendo o nome do arquivo. Este arquivo de dados é gravado em extensão .TXT.



**Apêndice 12 – Medida de dispersão - Procedimento para a extração dos parâmetros de interesse dos pulsos de entrada e saída**

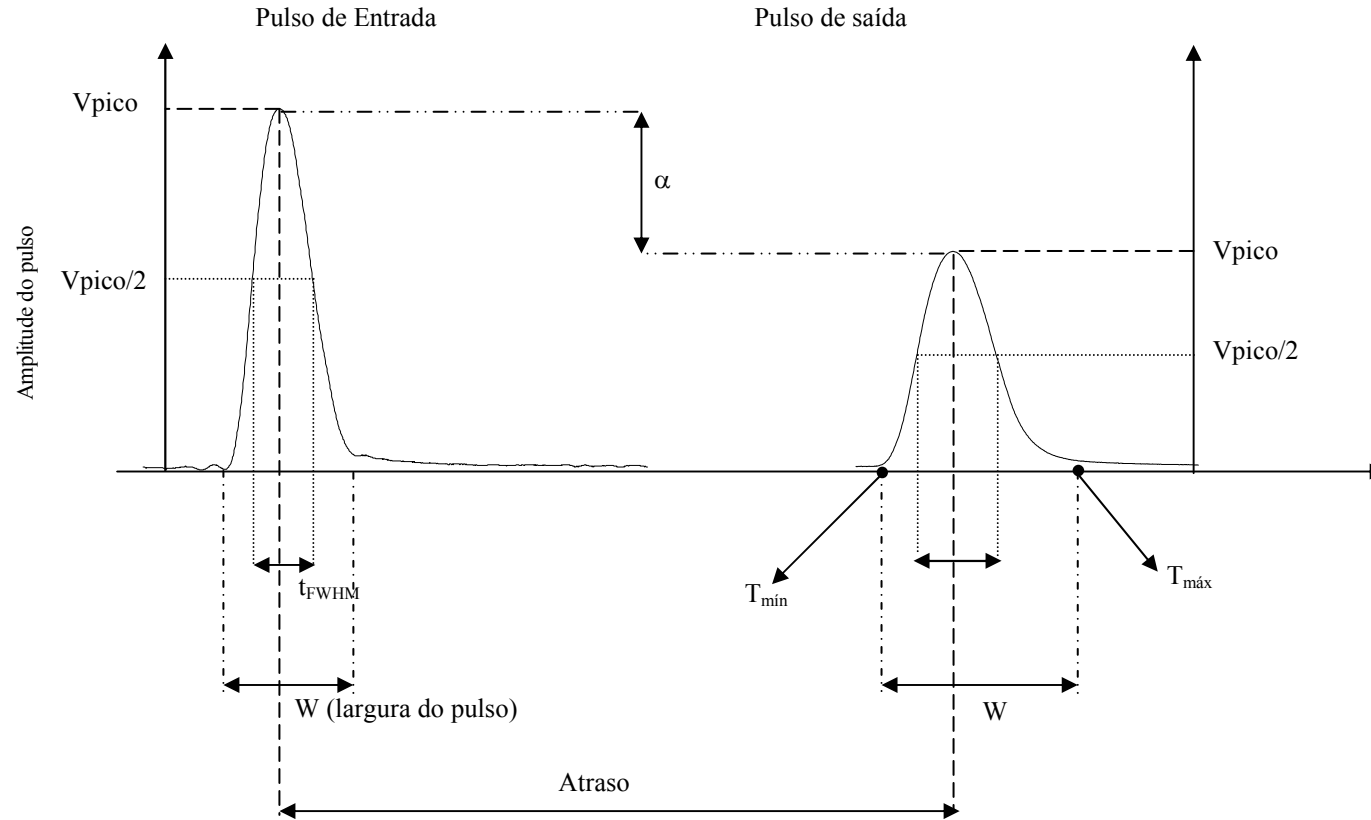


Figura 6-1 – Procedimento da extração dos parâmetros dos pulsos medidos no domínio do tempo.

Tabela 6-5 Fórmulas para o cálculo da atenuação, dispersão (rms e FWHM) e capacidade do sistema (banda passante)

Parâmetros	Expressão matemática
Parâmetro $\sigma$ [s]	$\sigma = \frac{t_{FWHM}}{2,355} \quad (6-1)$
Dispersão rms da fibra [s/m]	$\tau_{rms\_fibra} = \frac{\sqrt{\sigma_{saida}^2 - \sigma_{entrada}^2}}{(L_{amostra} - L_{referência})} \quad (6-2)$
Dispersão FWHM da fibra [s/m]	$\tau_{FWHM\_fibra} = \frac{\sqrt{t_{FWHM\_saida}^2 - t_{FWHM\_entrada}^2}}{(L_{amostra} - L_{referência})} \quad (6-3)$
Banda passante óptica [Hz]	$B_{óptico} = \frac{0,440}{\tau_{FWHM\_fibra}} = \frac{0,187}{\tau_{rms\_fibra}} \quad (6-4)$
Banda passante elétrica [Hz]	$B_{elétrico} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot B_{óptico} = \frac{0,311}{\tau_{FWHM\_fibra}} = \frac{0,133}{\tau_{rms\_fibra}} \quad (6-5)$

### Apêndice 13 – Medida de dispersão - Planilha de registros das medidas de dispersão intermodal

#### 780nm – Medida 1

Técnica de Cut Back

Medida com POF enrolada normal e com Filtro de modos (4 voltas com raio = 3cm)

Pulso de Entrada - Largura total					Pulso de Saída - Largura total					
Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Atraso [s]
3,18750E-02	2,21000E-09	2,10000E-10	8,21000E-09	8,00000E-09	9,71436E-04	8,11100E-08	7,86700E-08	8,76700E-08	9,00000E-09	7,89000E-08
Pulso de Entrada - FWHM					Pulso de Saída - FWHM					
1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	
1,59375E-02	2,21000E-09	1,15614E-09	3,32539E-09	2,16925E-09	4,85718E-04	8,11100E-08	8,00238E-08	8,34327E-08	3,40882E-09	

Dispersão [s]:	Disp. FWHM		Entrada	Saída	Disp RMS	B óptica [Hz]	B elétrica [Hz]
	1,70196E-10	Sigma	9,21125E-10	1,44748E-09	7,22700E-11	2,58526E+09	1,82805E+09

#### 780nm – Medida 2

Técnica de Cut Back

Medida com fibra enrolada normalmente no carretel (raio 6cm)

Pulso de Entrada - Largura total					Pulso de Saída - Largura total					
Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Atraso [s]
2,75142E-02	1,83000E-09	-3,00000E-11	6,31000E-09	6,34000E-09	6,85547E-04	8,13500E-08	7,87700E-08	8,62700E-08	7,50000E-09	7,95200E-08
Pulso de Entrada - FWHM					Pulso de Saída - FWHM					
1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	
1,37571E-02	1,83000E-09	8,82002E-10	2,88439E-09	2,00238E-09	3,42774E-04	8,13500E-08	7,95590E-08	8,38975E-08	4,33850E-09	

Dispersão [s]:	Disp. FWHM		Entrada	Saída	Disp RMS	B óptica [Hz]	B elétrica [Hz]
	2,49111E-10	Sigma	8,50269E-10	1,84225E-09	1,05780E-10	1,76628E+09	1,24895E+09

**780nm – Medida 3**

Técnica de Cut Back

Medida com fibra totalmente esticada

Pulso de Entrada - Largura total					Pulso de Saída - Largura total					
Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Atraso [s]
2,75142E-02	1,83000E-09	-3,00000E-11	6,31000E-09	6,34000E-09	1,07148E-03	8,13900E-08	7,85500E-08	8,76100E-08	9,06000E-09	7,95600E-08
Pulso de Entrada - FWHM					Pulso de Saída - FWHM					
1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	
1,37571E-02	1,83000E-09	8,82002E-10	2,88439E-09	2,00238E-09	5,35740E-04	8,13900E-08	7,98689E-08	8,32777E-08	3,40882E-09	

Dispersão [s]:	Disp. FWHM		Entrada	Saída	Disp RMS	B óptica [Hz]	B elétrica [Hz]	
t FWHM	1,78558E-10		Sigma	8,50269E-10	1,44748E-09	7,58207E-11	2,46419E+09	1,74245E+09

**850nm - Medida 4**

Técnica de Cut Back

Não foi possível realizar a medida pois a saída ficou imersa em ruído

Pulso de Entrada - Largura total					Pulso de Saída - Largura total					
Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Atraso [s]
1,72755E-01	2,95000E-09	1,77000E-09	5,47000E-09	3,70000E-09					0,00000E+00	-2,95000E-09
Pulso de Entrada - FWHM					Pulso de Saída - FWHM					
1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	
8,63775E-02	2,95000E-09	2,59237E-09	3,36710E-09	7,74732E-10	0,00000E+00	0,00000E+00			0,00000E+00	

Dispersão [s]:	Disp. FWHM		Entrada	Saída	Disp RMS	B óptica [Hz]	B elétrica [Hz]
t FWHM			Sigma	3,28973E-10	0,00000E+00		



**650nm – Medida 5**

Técnica de Cut Back

Fibra esticada

<b>Pulso de Entrada - Largura total</b>					<b>Pulso de Saída - Largura total</b>					
Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Vpico [V]	Centro	Início	Final	W	Atraso [s]
1,27587E-01	2,11000E-09	-1,10000E-10	5,29000E-09	5,40000E-09	6,51436E-02	8,14100E-08	7,88100E-08	8,60700E-08	7,26000E-09	7,93000E-08
<b>Pulso de Entrada - FWHM</b>					<b>Pulso de Saída - FWHM</b>					
1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	1/2 Vpico [V]	Centro	Início	Final	t FWHM	
6,37935E-02	2,11000E-09	1,01907E-09	3,46246E-09	2,44338E-09	3,25718E-02	8,14100E-08	8,01070E-08	8,29743E-08	2,86733E-09	

Dispersão [s]:	Disp. FWHM		Entrada	Saída	Disp RMS
t FWHM	9,71190E-11	Sigma	1,03753E-09	1,21755E-09	4,12395E-11

B óptica [Hz]	B elétrica [Hz]
4,53053E+09	3,20357E+09

### Apêndice 14 – Medida de dispersão - Diagrama do circuito gerador de pulsos de corrente para a medição da dispersão

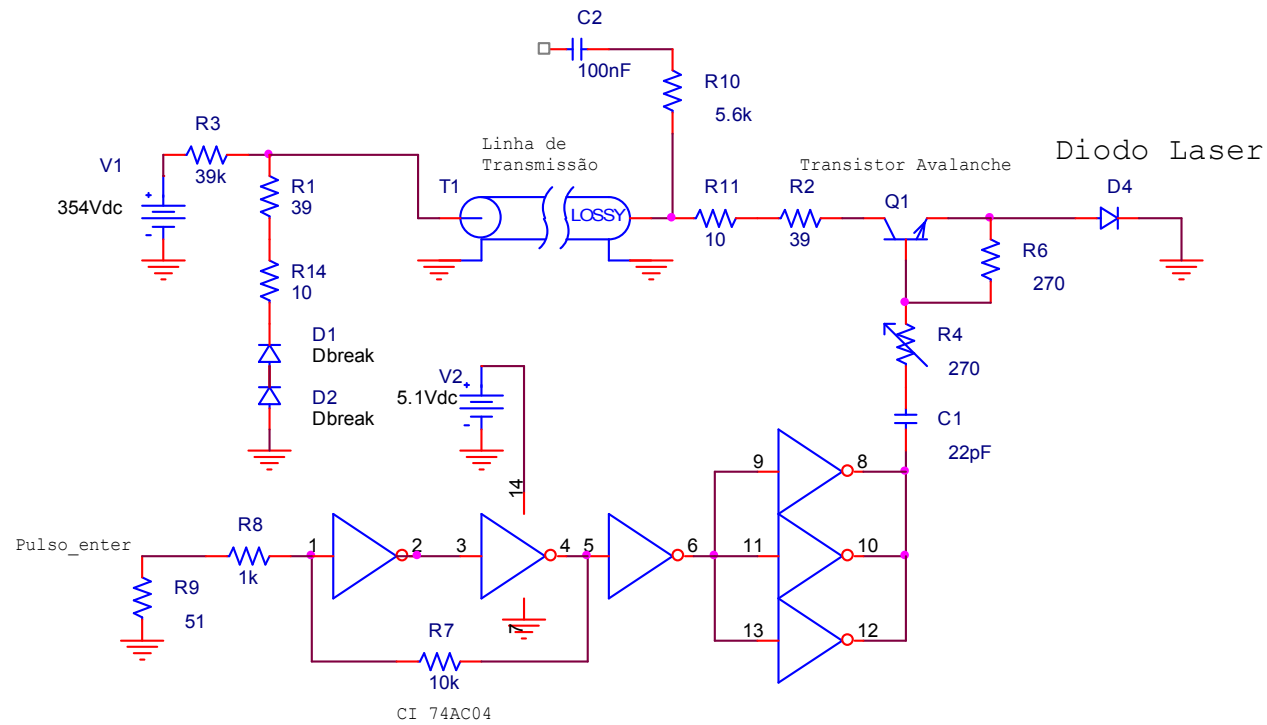


Figura 6-2 Diagrama do circuito gerador de pulsos de corrente para a medição da dispersão

Circuito desenvolvido por Rodrigo S. Valloto, graduando de Engenharia Elétrica na UFPR e bolsista de Iniciação Científica.

### Apêndice 15 - – Medida de dispersão – Quadro-resumo dos resultados de dispersão intermodal

Nota: em negrito estão as referências utilizadas para cálculo do erro (em %)

	Teórico	Experimental			
		780 nm (1)	780 nm (2)	780 nm (3)	650 nm
$\tau_{FWHM}$ fibra [ns]	<b>2,78</b>	2,63	3,86	2,78	1,545
$\tau_{FWHM}$ fibra [ns/m]	<b>0,18</b>	0,17 (+5,56%)	0,25 (-38,89%)	0,18 (0%)	0,10 (+44,44%)
$\tau_{rms}$ fibra [ns]	---	1,11	1,64	1,17	0,63
$\tau_{rms}$ fibra [ns/m]	<b>0,075</b>	0,072 (+4%)	0,106 (-41,33%)	0,076 (-1,33%)	0,041 (+45,33%)
$B_{\text{óptica}}$ [GHz.m]	<b>2,51</b>	2,58 (-2,79%)	1,77 (+29,48%)	2,46 (+1,99%)	4,53 (-80,48%)
$B_{\text{elétrica}}$ [GHz.m]	<b>1,78</b>	1,83 (-2,81%)	1,25 (+29,76%)	1,74 (+2,25%)	3,2 (-79,76%)
$C(\tau_{FWHM}$ fibra) [Mbps]	<b>71,92</b>	76 (-5,67%)	51,78 (+28,00%)	71,92 (0%)	129,45 (-79,99%)
$C(\tau_{FWHM}$ fibra) [Mbps]	<b>172,41</b>	180,00 (-4,40%)	121,95 (+29,27%)	170,94 (+0,85%)	317,46 (-84,13%)
$\Delta t$ [ns] (entrada impulso)	<b>3,86</b>				
$\Delta t_{rms}$ [ns] (considera a largura da entrada)		4,12 (-6,74%)	4,01 (-3,89%)	6,47 (-67,62%)	4,85 (-25,65%)

Banda Passante nas referências bibliográficas

Zubia et al. [7] : 3 GHz.m e Takahashi et al. [43] : 4,23 GHz.m

## Apêndice 16 – Simulação da dispersão do pulso óptico injetado na POF

Como complemento da análise de dispersão intermodal neste trabalho, foi desenvolvido um simulador baseado em aplicativo matemático, que possibilita análise nos três comprimentos de ondas utilizados (650, 780 e 850 nm). Esta simulação analisa o alargamento modal sofrido na saída da fibra a partir de um pulso de entrada através do cálculo da dispersão rms da fibra. O modelo matemático utilizado para o formato do pulso óptico de entrada é o gaussiano. Assumiu-se que o pulso medido para fibra de referência refere-se ao pulso de entrada enquanto que o pulso medido da fibra de amostra refere-se ao pulso de saída.

### Dados fixos:

Comprimento da fibra de referência:	$L_{ref} = 1\text{m}$	
Comprimento da fibra de amostra:	$L_{amostra} = 16,45\text{m}$	
Índice de refração do núcleo:	$n_1 = 1,492$	
Índice de refração da casca:	$n_2 = 1,417$	
Velocidade da luz no vácuo:	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	
Velocidade da luz no núcleo:	$v_1 = c / n_1 = 201,07 \cdot 10^6$	
Abertura numérica (NA):	$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$	(6-6)
Tempo mínimo do raio na fibra de referência:	$T_{min\_ref} = \frac{L_{ref}}{v_1}$	(6-7)
Tempo mínimo do raio na fibra de amostra:	$T_{min\_amostra} = \frac{L_{amostra}}{v_1}$	(6-8)
Dispersão rms da fibra (teórica):	$\tau_{fibra} = \frac{NA^2 \cdot L}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot n_1 \cdot c}$	(6-9)

### Dados dependentes do comprimento de onda:

Amplitude do pulso de entrada ( $A_0$ ):	Tabela 6-7 (experimental)
Coefficiente de atenuação:	Tabela 6-8 (fabricante)
Parâmetro FWHM do pulso de entrada ( $t_{FWHM\_ref}$ ):	Tabela 6-6 (experimental)

Parâmetro  $\sigma$  do pulso de entrada ( $\sigma_{ref}$ ): 
$$\sigma_{ref} = \frac{t_{FWHM\_ref}}{2,355} \quad (6-10)$$

Parâmetro  $\sigma$  do pulso de saída ( $\sigma_{amostra}$ ): 
$$\sigma_{amostra} = \sqrt{\sigma_{ref}^2 + \tau_{fibra}^2} \quad (6-11)$$

Resposta do impulso no domínio do tempo (considerando uma função gaussiana):

$$P_{saída}(t) = A_o \cdot e^{-\left(\frac{t^2}{2 \cdot dispersão^2}\right)} \quad (6-12)$$

Expressão representativa do pulso de entrada:

$$A_{entrada} = A_o \cdot e^0 \cdot e^{-\left(\frac{(t - Ajuste)^2}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{ref}}\right)^2} \quad (6-13)$$

O coeficiente de atenuação é zero visto que a amplitude já é o valor na saída de referência.

Expressão representativa do pulso de saída:

$$A_{saída} = A_o \cdot e^{(-\alpha \cdot L_{amostra})} \cdot e^{-\left(\frac{(t - Ajuste - t_{min\_amostra})^2}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{amostra}}\right)^2} \quad (6-14)$$

Para pulso centralizado em zero no gráfico:  $Ajuste = 0$

Pulso deslocado no tempo:  $Ajuste = T_{min\_ref}$

Tabelas dos valores obtidos das medidas de dispersão intermodal:

Tabela 6-6 Medidas do parâmetro FWHM do pulso de entrada.

$\lambda$ [nm]	$t_{FWHM\_ref}$ [ns]
650	2,44
780 (medida 1)	2,17
780 (medida 2)	2,00
780 (medida 3)	2,00
850	0,775

Tabela 6-7 Tensão de pico do pulso de entrada elétrico medida (Amplitude  $A_0$ ).

$\lambda$ [nm]	Tensão de pico do pulso de entrada [mV]
650	127,59
780 (medida 1)	31,88
780 (medida 2)	27,50
780 (medida 3)	27,50
850	172,76

Tabela 6-8 Coeficiente de atenuação fornecido pelo fabricante para a fibra ESKA PREMIER [42].

$\lambda$ [nm]	Coeficiente de atenuação (alfa)	
	[dB/m]	[Neper/m]
650	0,13	0,0149666
780 (medida 1)	0,90	0,1036150
850	2,21	0,25443242

Nota: 1 Néper = 8,686 dB  $\Rightarrow$  1 dB = 0,115128 Néper (escala linear)

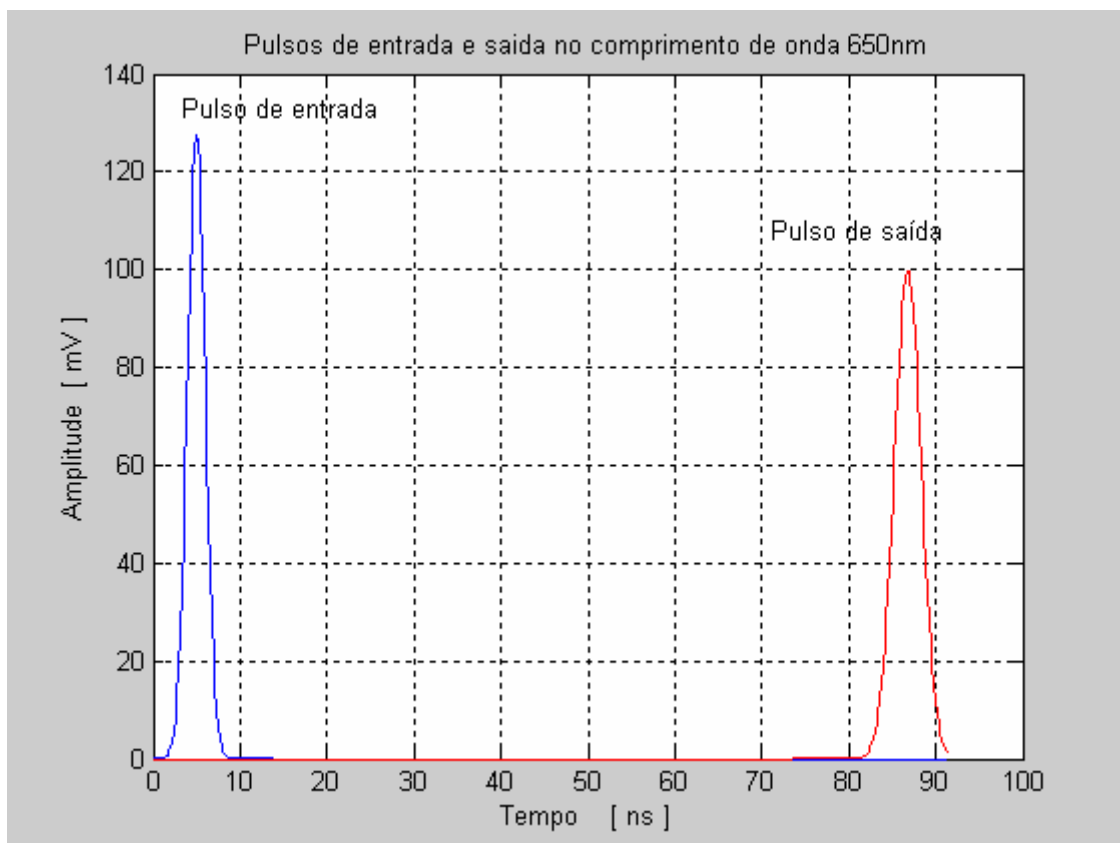


Figura 6-3 Exemplo do gráfico gerado pelo programa de simulação da dispersão.

### Comparação entre os pulsos obtidos experimentais e a simulação

As curvas experimentais e simuladas foram importadas para um mesmo aplicativo gráfico e comparadas, para cada comprimento de onda. A curva perfeitamente simétrica representa a simulação enquanto que a outra é o resultado experimental.

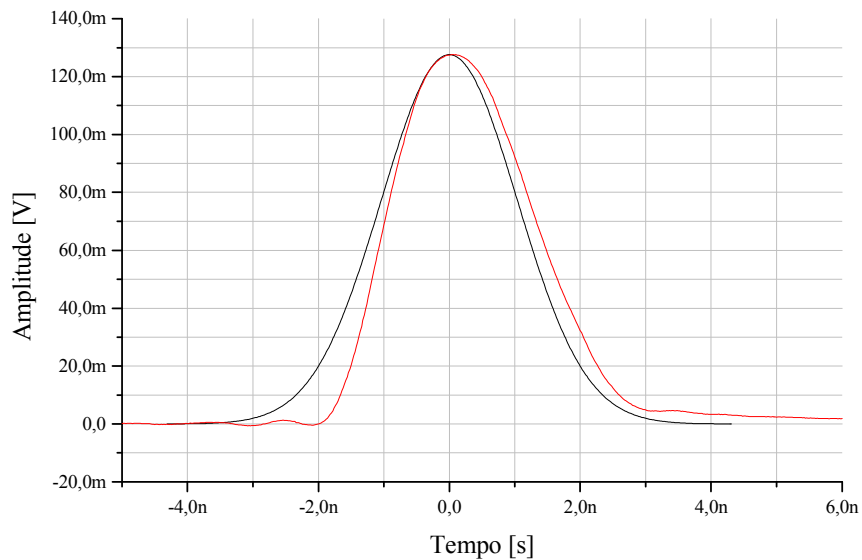


Figura 6-4 Comparação entre os pulsos de entrada experimental e simulado para 650 nm.

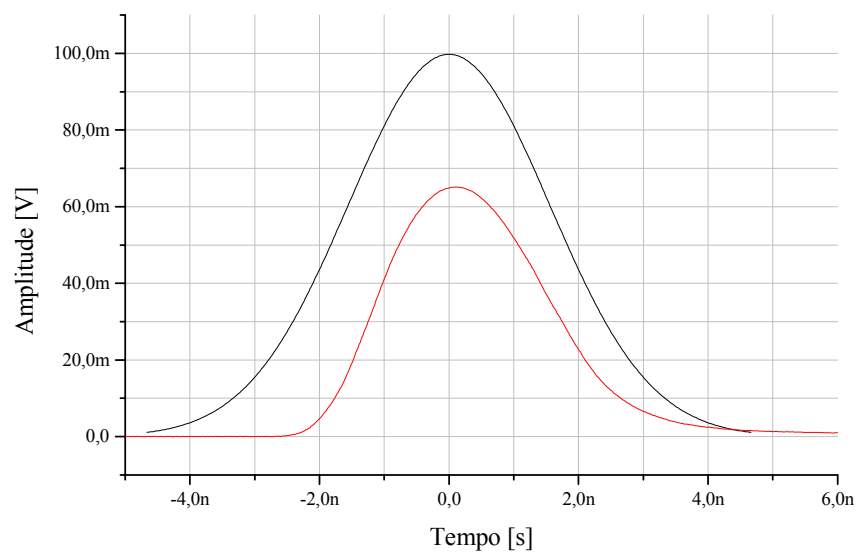


Figura 6-5 Comparação entre Pulso de saída experimental e simulado para 650 nm

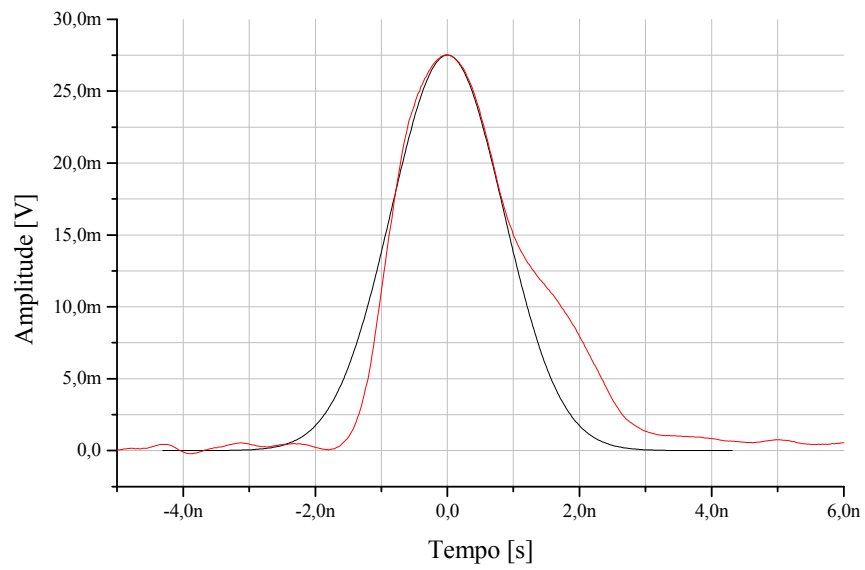


Figura 6-6 Comparação entre pulso de entrada experimental e simulado para 780 nm

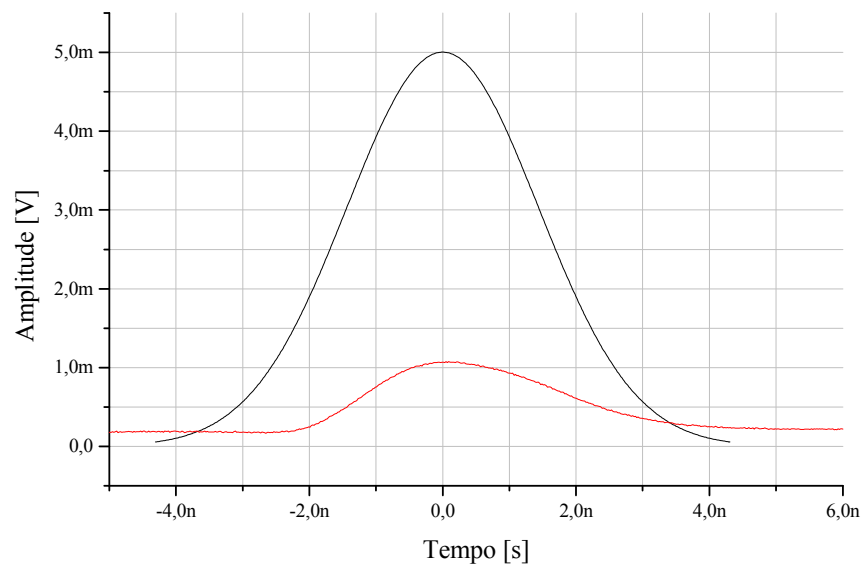


Figura 6-7 Comparação entre pulso de saída experimental e simulado para 780 nm



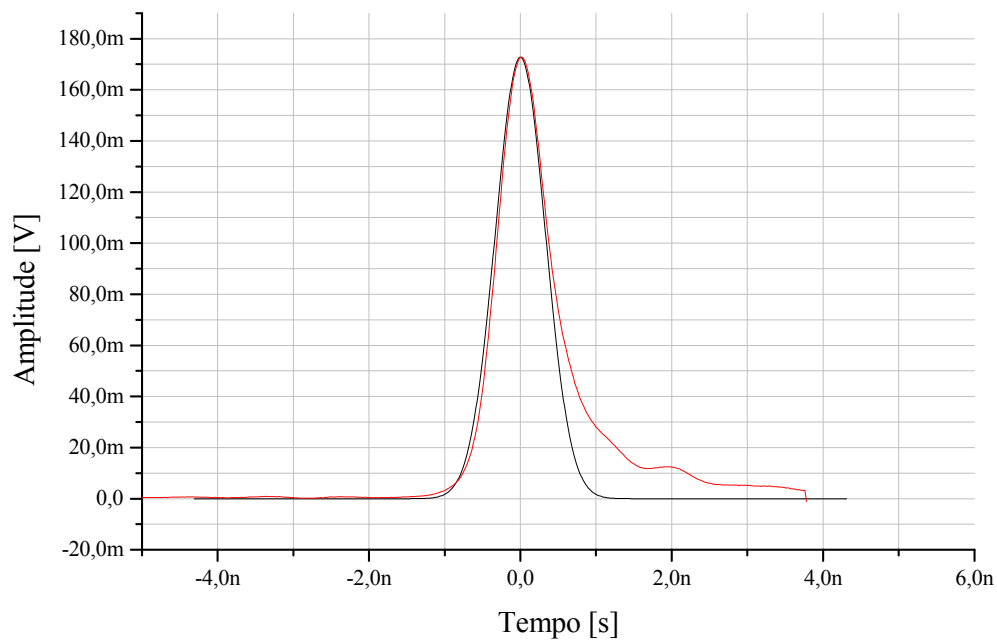


Figura 6-8 Comparação entre pulso de entrada experimental e simulado para 850 nm

As comparações entre os pulsos de entrada experimentais e os simulados para os três comprimentos de ondas atestam a validade da aproximação matemática do formato gaussiano para a análise de dispersão em fibras ópticas.

Da mesma forma, as comparações dos pulsos de saída corroboram a aproximação gaussiana. Também pode-se, através delas, perceber os problemas de acoplamento detectados na parte experimental.

## Programa-fonte da Simulação da dispersão intermodal

```

% Programa para a simulacao da dispersao de um pulso gaussiano
% numa fibra optica multimodo indice degrau (POF PF PMMA ID)

% Dados de entrada para lambda = 780 nm (medida 1)
clear all;
incr = 500; % numero de incrementos
L_ref = 1;
L_amostra = 16.45; % comprimento da fibra optica [m]
c = 3e8; % velocidade da luz no vacuo [m/s]
n1 = 1.492; % indice de refracao do nucleo
n2 = 1.417; % indice de refracao da casca
v1 = c/n1; % velocidade do raio luminoso no centro da fibra
AN = sqrt(n1^2 - n2^2); % abertura numerica da fibra optica
disp_fibra = (AN^2)*L_amostra/(4*sqrt(3)*n1*c); % formula da dispersao modal rms da fibra
T_min_ref = L_ref/v1; % tempo de propagacao do modo mais rapido (pelo centro da fibra)
T_min_amostra = L_amostra/v1; % tempo de propagacao do modo mais rapido (pelo centro da fibra)

% Dados de entrada para lambda
Ao = 27.514; % amplitude do pulso de entrada [mV]
alfa = 0.1036150126; % coeficiente de atenuacao [Neper/m](valor do fabricante)
t_FWHM_ref = 2.00238e-9; % largura do pulso FWHM de entrada (medido)[s]
sigma_ref = t_FWHM_ref/2.352941176; % sera' a entrada da fibra
sigma_amostra = sqrt(sigma_ref^2 + disp_fibra^2); % sigma do pulso de saida

% Parametros do comeco e final do grafico
ajuste = T_min_ref; % ajuste para o pulso de entrada aparecer desde o comeco do grafico
t_inicio = 0;
t_fim = ajuste+T_min_amostra+ 3*sigma_amostra; % Final do grafico

% Calculo da dispersao rms e atenuacao do pulso gaussiano
delta_t = (t_fim - t_inicio)/incr;
for dx = 1:(incr + 1);
    t = t_inicio + (dx - 1)*delta_t;
    po(dx) = Ao*exp(0)*exp(-((t - ajuste)/(sqrt(2)*sigma_ref))^2);
    pf(dx) = Ao*exp(-alfa*L_amostra)*exp(-((t - ajuste - T_min_amostra)/(sqrt(2)*sigma_amostra))^2);
end

% Plotagem dos pulsos em funcao do tempo
dx1 = t_inicio:delta_t:t_fim;
dx1 = dx1/1e-9;
plot(dx1,po,'b',dx1,pf,'r');
title('Pulsos de entrada e saida no comprimento de onda 780 nm (medidas 2 e 3)');
ylabel('Amplitude [ mV ]');
xlabel('Tempo [ ns ]');
grid on;

```