

Dispositivos à Fibra Óptica Baseados em Interferência Multimodal (MMI) para Telecomunicações e Sensoriamento

Yanes Checcacci Balod

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PÓS GRADUAÇÃO STRICTU SENSU EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

YANES CHECCACCI BALOD

DISPOSITIVOS À FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM INTERFERÊNCIA
MULTIMODAL (MMI) PARA TELECOMUNICAÇÕES E SENSORIAMENTO

Niterói

2011

YANES CHECCACCI BALOD

DISPOSITIVOS À FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM INTERFERÊNCIA
MULTIMODAL (MMI) PARA TELECOMUNICAÇÕES E SENSORIAMENTO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós
Graduação Strictu Sensu em Engenharia de
Telecomunicações da Universidade Federal
Fluminense para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro

Co-orientador: Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero

Niterói

2011

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

B195 Balod, Yanes Checcacci

Dispositivos à fibra óptica baseados em interferência multimodal (MMI) para telecomunicações e sensoriamento / Yanes Checcacci Balod. – Niterói, RJ : [s.n.], 2011.
168 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2011.

Orientadores: Ricardo Marques Ribeiro, Andrés Pablo López Barbero.

1. Sistema de telecomunicações. 2. Dispositivo de interferência multimodal. 3. Monitoramento. 4. Sensoriamento. 5. Sistema em tempo real. 6. Fibra ótica. I. Título.

CDD 621.382

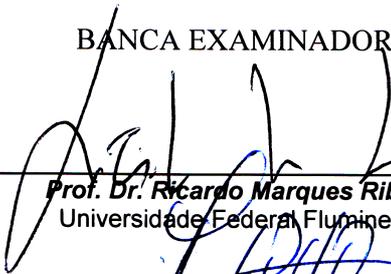
YANES CHECCACCI BALOD

**DISPOSITIVOS À FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM INTERFERÊNCIA
MULTIMODAL (MMI) PARA TELECOMUNICAÇÕES E SENSORIAMENTO**

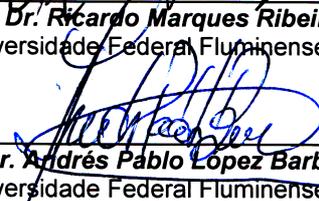
Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em 22 de Julho de 2011.

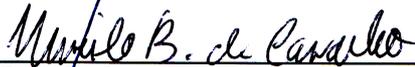
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro
Universidade Federal Fluminense



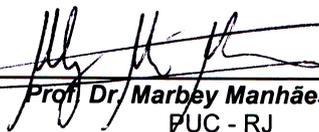
Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero
Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Murilo Bresciani de Carvalho
Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Paulo Acioly Marques dos Santos
Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Marbey Manhães Mosso
PUC - RJ

Niterói

2011

Dedico este trabalho a...

Minha noiva Juliana Sodré Calheiros da Silva pelo apoio,
carinho e paciência no processo de escrita desta
dissertação.

A minha família pelo apoio e carinho, mesmo com a
grande distância física que nos encontramos atualmente.

Ao Dr. Ricardo Marques Ribeiro pela orientação e
oportunidade que resultou neste trabalho.

Aos meus amigos do Laboratório de Comunicações
Ópticas da UFF (LACOP) pelo convívio e
companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao projeto APQ1 E-26/171.158/2005 da Faperj e principalmente ao projeto de título “Sensor Distribuído de Sinais Acústicos e de Perturbações Mecânicas via Controle Modal em Fibra Óptica” do CNPq (474218/2006-6 Edital Universal 2006) que serviram de apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

A Capes pelo fornecimento da bolsa de mestrado.

Aos professores do departamento de Engenharia de Telecomunicações da UFF, em especial aos Doutores Ricardo Marques Ribeiro, Andrés Pablo López Barbero, Murilo Bresciani de Carvalho e ao professor do Instituto de Física da UFF, Doutor Paulo Acioly Marques dos Santos; pelas oportunidades e conhecimentos.

Ao técnico Pedro Flores do Laboratório de Mecânica da UFF pela sua colaboração na confecção de peças mecânicas e técnicas de soldagem.

A minha família; minha noiva Juliana Sodré Calheiros da Silva, minha mãe Tamara Checcacci, meu pai Orlando Costa Balod e meu irmão Yuri Checcacci-Balod pelo apoio e suporte durante todo o processo de escrita desta disserta o.

Aos meus amigos e colegas de aula e laboratório, Jorge Mitrione, Odair Xavier, Sydney Bragantine, Vinicius Nunes, Luiz Anet, Hélio Coelho, Wagner Zanco, Nelson Assis e Leonardo Mendoza pelo convívio e troca de conhecimento durante esta jornada.

E a todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuiram para este trabalho.

“No princípio, Deus criou os céus e a terra.

A terra estava informe e vazia; as trevas cobriam o abismo e o Espírito de Deus pairava sobre as águas.

Deus disse: "Faça-se a luz!" E a luz foi feita.

Deus viu que a luz era boa, e separou a luz das trevas.

Deus chamou à luz DIA, e às trevas NOITE. Sobreveio a tarde e depois a manhã: foi o primeiro dia.”

Gênesis (1:5)

Resumo

Este trabalho descreve e analisa dispositivos de interferência multimodal (MMI) para aplicações em sistemas de Telecomunicações e Sensoriamento. É um tema menos explorado na literatura quando comparado com os demais tipos de sensores ópticos e que no momento atual tem ganhado mais atenção.

O mecanismo de sensoriamento proposto é baseado em fenômenos de MMI criados a partir da fusão de uma fibra SI-SM com uma fibra GI-MM. O sistema é potencialmente capaz de monitorar a integridade física de cabos ópticos devido à grande sensibilidade em tempo real, não atingidos pelo uso da tradicional técnica de OTDR. O sistema é analisado tanto de forma qualitativa como quantitativa, dedicando-se nos fenômenos que geram sensibilidade e quais as melhores formas de aprimorá-lo.

Na primeira parte do trabalho descreve-se qualitativamente e quantitativamente um primeiro dispositivo MMI como de tipo “modalmétrico SMS reflexivo”, onde são contribuições originais a descrição do dispositivo em si e a demonstração do ponto de vista estatístico da obtenção do aumento de sensibilidade com um aumento do desalinhamento lateral SM/MM em até $6,8 \mu m$. Há uma proposta de uma técnica de detecção e localização de uma perturbação, através de um algoritmo simples via simulação computacional no segmento “ativo” do sistema (fibra “sensitiva”).

Na segunda parte do trabalho, são analisados acopladores 2x2 formados pela fusão de fibras ópticas SI-SM e GI-MM. O dispositivo é classificado como do tipo MMI. Depende das condições de injeção de luz e das portas de entrada/saída utilizadas, se comportando como um de três diferentes tipos de filtros ópticos ou interferômetro multimodo (MMI). Ao concluirmos este trabalho, são sugeridas outras aplicações e linhas de desenvolvimento para se dar continuidade do trabalho e pesquisa.

Palavras-chave: acoplador, filtro óptico, interferência multimodo, não-reciprocidade, fibra óptica, monitoramento, sensoriamento, tempo real, enlace de comunicação.

Abstract

This paper describes and analyzes multimodal interference devices (MMI) for applications in telecommunications and sensing systems. This kind of sensor is less frequently studied in the literature compared with other types of optical sensors and at present has gained more attention.

The sensing mechanism is proposed based on MMI phenomena created by the merger of a SI-SM to a GI-MM fiber. The system is potentially capable of monitoring the physical integrity of optical cables due to the high sensitivity in real time, untouched by the use of the traditional OTDR technique. The system is analyzed both qualitatively and quantitatively, dedicated to the phenomena that generate sensitivity and the best ways to improve it.

In the first part of the work is described qualitatively and quantitatively as a first MMI “reflective profile SMS modalmetric device”, which are original contributions describing the device itself and demonstration of the statistical point of view of obtaining increased sensitivity with an increase in offset e SM/MM up to $6.8\mu m$. There is a proposal of a technique for detecting and locating a disturbance through a simple algorithm via computer simulation in the “active” segment of the system (sensory fibers).

In the second part of the work are analyzed 2x2 couplers formed by the fusion of optical fibers SI-SM and GI-MM. The device is classified as type MMI. Depends on the injection of light and door entry/exit used, behaving as one of three different types of optical filters or multimode interferometer (MMI).

Upon completion of this work are suggested other lines of development applications for continuity of work and research.

Keywords: coupler, optical filter, multimode interference, non-reciprocity, fiber optic, monitoring, sensing, real time, communication link.

Sumário

1	Introdução	16
2	Revisão bibliográfica e fundamentos teóricos	18
2.1	Estudos anteriores	18
2.2	Perda de acoplamento na estrutura SMS	19
2.3	Auto-imageamento em dispositivos SMS	21
2.4	perturbações mecânicas / acústicas em dispositivos SMS	22
3	Dispositivo modalmétrico SMS em modo reflexivo - Qualitativo (<i>Finger-Print</i>)	24
3.1	Introdução	24
3.2	Experimento	25
3.3	Estabilidade e resposta na banda “C”	27
3.4	Desalinhamento Lateral	30
3.5	Experimentos qualitativos com o dispositivo SMS (<i>Fingerprint</i>)	32
3.6	Análise e discussão sobre o dispositivo modalmétrico SMS	35
3.7	Análise e discussões sobre o dispositivo modalmétrico SMS (<i>fingerprint</i>)	36
4	Dispositivo modalmétrico SMS em modo reflexivo - Quantitativo	38
4.1	Experimento quantitativo com o dispositivo SMS	45
4.1.1	Medidas realizadas para 1 metro de comprimento ativo.	45
4.1.2	Medidas realizadas para 376 metros de comprimento ativo.	54
4.1.3	Medidas realizadas para 1265 metros de comprimento ativo.	63
4.1.4	Medidas realizadas para 1641 metros de comprimento ativo.	72
4.2	Resultados do dispositivo modalmétrico SMS em modo reflexivo - Quantitativo	81
4.3	Estimativa de tempo de vôo dos pulsos	86
4.4	Estimativa do tempo de interação da perturbação na fibra GI-MM	87
5	Proposta de uma Técnica de Localização de Perturbações com Dispositivos SMS	91
5.1	Conceitos básicos sobre filtragem-reversa	93
5.2	Resultados de modelagem matemática	97
5.3	Observações finais ao sistema de localização	100

6	Acopladores SM/MM Operando como Filtros ou Dispositivos MMI	102
6.1	Introdução	102
6.2	Método experimental	103
6.3	Resultados	107
6.3.1	Respostas de transmissão espectral com injeção sentido direto . . .	107
6.3.2	Respostas de transmissão espectral com injeção sentido reverso . . .	110
6.3.3	Resposta espectrais gráficas com injeção em sentido direto MM (<i>Mode-Scrambler</i>).	113
6.3.4	Resposta espectrais gráficas com injeção em sentido reverso MM (<i>Mode-Scrambler</i>).	116
6.4	Discussões	119
7	Conclusões e sugestão de trabalhos futuros	122
7.1	Sugestões para aplicações	123
	Referências Bibliográficas	125
	Apêndices	128
A	Trabalho: X SEMEC UFF / 2008	129
B	Trabalho: PET-TELE UFF / 2008	131
C	Publicação 1: SBRT 2008	136
D	Publicação 2: SBRT 2009	142
E	Código de algoritmo MATLAB	149
F	Datasheets	153
G	Relação de equipamentos ópticos utilizados	166
H	Tabela de canais do laser DWDM de banda C	167
I	Tabela com dados técnicos do acoplador 2x1 SM de 3 dB	168

Lista de Figuras

2.1	Modelo sistemático de uma estrutura SMS.	18
2.2	Exemplo de dispositivo SMS com presença de micropressões seriadas. . . .	19
3.1	Esquema experimental do sistema modalmétrico em modo reflexivo baseado em uma emenda SM/MM.	25
3.2	Modelo sistemático do sistema modalmétrico SMS em modo reflexivo. . . .	27
3.3	Fonte (a), isolador (b) e acoplador 2x1 (c) utilizados no sistema modalmétrico.	28
3.4	Medidor de potência óptica [FPM-300 <i>Power Meter</i> (EXFO)].	29
3.5	Gráfico de resposta espectral do dispositivo modalmétrico na ausência de perturbações intencionais.	29
3.6	Máquina de emendas utilizada nas fusões, <i>SUMITOMO (25-S)</i>	30
3.7	Vista em perspectiva das emendas realizadas (alinhamento lateral).	31
3.8	Fotodiodo <i>pigtail</i> com receptáculo FC conectado à entrada de um amplificador de transimpedância da <i>Roithner Lasertechnik</i>	33
3.9	Emenda SM/MM.	33
3.10	Sinais modalmétricos observados a 0,5s/div e 1,0V/div.	34
3.11	Sinal <i>fingerprint</i> de dispositivo modalmétrico observado a 50 mV/div e 0,2 s/div.	34
3.12	Interferências observadas na emenda <i>Delta</i> a 2.50ms/div e 500mV/div de um quique de esfera elástica ao plano.	37
4.1	Modelo de rampa e a esfera rolante, sistema este projetado para induzir perturbações de forma controlada no dispositivo.	38
4.2	Sistema de Esfera e Rampa obtidos/confecionados para o experimento. . . .	39
4.3	Vistas do sistema de indução de perturbação criado para caracterizar o dispositivo SMS.	40
4.4	Receptor com amplificador de transimpedância embutido.	41
4.5	Conjunto experimental pronto em bancada.	42
4.6	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1 metro e amplificador com ganho G=40 dB.	45
4.7	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1 metro a ganho G=40 dB.	47
4.8	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1 metro e amplificador com ganho G=50 dB.	48

4.9	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1 metro a ganho G=50 dB.	50
4.10	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1 metro e amplificador com ganho G=60 dB.	51
4.11	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1 metro a ganho G=60 dB.	53
4.12	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=376 metros e amplificador com ganho G=40 dB.	54
4.13	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=376 metros a ganho G=40 dB.	56
4.14	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=376 metros e amplificador com ganho G=50 dB.	57
4.15	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=376 metros a ganho G=50 dB.	59
4.16	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=376 metros e amplificador com ganho G=60 dB.	60
4.17	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=376 metros a ganho G=60 dB.	62
4.18	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1265 metros e amplificador com ganho G=40 dB.	63
4.19	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1265 metros a ganho G=40 dB.	65
4.20	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1265 metros e amplificador com ganho G=50 dB.	66
4.21	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1265 metros a ganho G=50 dB.	68
4.22	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1265 metros e amplificador com ganho G=60 dB.	69
4.23	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1265 metros a ganho G=60 dB.	71
4.24	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1641 metros e amplificador com ganho G=40 dB.	72
4.25	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1641 metros a ganho G=40 dB.	74
4.26	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1641 metros e amplificador com ganho G=50 dB.	75

4.27	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1641 metros a ganho G=50 dB.	77
4.28	Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1641 metros e amplificador com ganho G=60 dB.	78
4.29	Medidas realizadas e média entre <i>offsets</i> para comprimento L=1641 metros a ganho G=60 dB.	80
4.30	Valores em dB de médias das amostras realizadas com <i>offset</i> 0,9 μm e 6,8 μm	82
5.1	Modelo sistemático de uma estrutura SMS.	91
5.2	Pulsos gaussianos separados por $\Delta t \approx 0.4$, supostamente de entrada.	98
5.3	Funções envolvidas na aproximação do erro pelo algoritmo LMS.	99
5.4	Resultado da aproximação pelo algoritmo LMS para separação de sinais sobrepostos.	100
5.5	Esquema básico do sistema SMS com implantação de linha de atraso.	101
6.1	Esquema experimental convencional do dispositivo modalmétrico SMS.	102
6.2	Nova configuração do sistema SMS utilizando dispositivo MMI.	103
6.3	Acoplador não recíproco SM/MM.	104
6.4	<i>Mode-scrambler</i> para fibras MM de sílica da AC Photonics.	104
6.5	Esquema experimental utilizado na caracterização espectral do acoplador SM/MM onde PM (<i>Power Meter</i>) é o medidor de potência óptica.	105
6.6	Conjunto de medidores de potência óptica “de mão” (<i>hand-held</i>) utilizados nos experimentos.	105
6.7	Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido direto.	107
6.8	Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido direto do dispositivo SM/MM.	109
6.9	Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido reverso.	110
6.10	Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido reverso do dispositivo SM/MM.	112
6.11	Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido direto MM (uso de <i>Mode-Scrambler</i>).	113
6.12	Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido direto do dispositivo SM/MM utilizando <i>mode-scrambler</i>	115
6.13	Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido reverso MM (uso de <i>Mode-Scrambler</i>).	116
6.14	Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido contrário do dispositivo SM/MM utilizando <i>mode-scrambler</i>	118

Lista de Tabelas

3.1	Dados das emendas geradas pela máquina de fusão (SUMITOMO 25-S).	32
4.1	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1 metro e amplificador com ganho G=40 dB.	45
4.2	Medidas comparativas entre offsets para L=1 metro a ganho G=40 dB.	46
4.3	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1 metro e amplificador com ganho G=50 dB.	48
4.4	Medidas comparativas entre offsets para L=1 metro a ganho G=50 dB.	49
4.5	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1 metro e amplificador com ganho G=60 dB.	51
4.6	Medidas comparativas entre offsets para L=1 metro a ganho G=60 dB.	52
4.7	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=376 metros e amplificador com ganho G=40 dB.	54
4.8	Medidas comparativas entre offsets para L=376 metros a ganho G=40 dB.	55
4.9	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=376 metros e amplificador com ganho G=50 dB.	57
4.10	Medidas comparativas entre offsets para L=376 metros a ganho G=50 dB.	58
4.11	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=376 metros e amplificador com ganho G=60 dB.	60
4.12	Medidas comparativas entre offsets para L=376 metros a ganho G=60 dB.	61
4.13	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1265 metros e amplificador com ganho G=40 dB.	63
4.14	Medidas comparativas entre offsets para L=1265 metros a ganho G=40 dB.	64
4.15	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1265 metros e amplificador com ganho G=50 dB.	66
4.16	Medidas comparativas entre offsets para L=1265 metros a ganho G=50 dB.	67
4.17	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1265 metros e amplificador com ganho G=60 db.	69
4.18	Medidas comparativas entre offsets para L=1265 metros a ganho G=60 dB.	70
4.19	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1641 metros e amplificador com ganho G=40 dB.	72
4.20	Medidas comparativas entre offsets para L=1641 metros a ganho G=40 dB.	73
4.21	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1641 metros e amplificador com ganho G=50 dB.	75

4.22	Medidas comparativas entre offsets para L=1641 metros a ganho G=50 dB.	76
4.23	Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento L=1641 metros e amplificador com ganho G=60 dB.	78
4.24	Medidas comparativas entre offsets para L=1641 metros a ganho G=60 dB.	79
4.25	Valores em dB de médias das amostras realizadas com <i>offset</i> 0,9 μm e 6,8 μm	81
4.26	Valores em dB de desvios padrão das amostras realizadas com <i>offset</i> 0,9 μm e 6,8 μm	81
4.27	Valores de <i>RiseTime</i> e Banda para as amostras realizadas com <i>offset</i> 0,9 μm	83
4.28	Valores de <i>RiseTime</i> e Banda para as amostras realizadas com <i>offset</i> 6,8 μm	83
4.29	Tabela de resultados das diferenças em dB das emendas de <i>offset</i> 0,9 μm e 6,8 μm	84
6.1	Medidas por injeção no sentido direto do dispositivo (<i>dBm</i>).	108
6.2	Medidas por injeção no sentido reverso do dispositivo (<i>dBm</i>).	111
6.3	Medidas por injeção no sentido direto do dispositivo utilizando <i>Mode-Scrambler</i> (<i>dBm</i>).	114
6.4	Medidas por injeção no sentido contrário do dispositivo utilizando <i>Mode-Scrambler</i> (<i>dBm</i>).	117
H.1	Canais / comprimentos de onda da grade de DWDM permitidos no LASER.	167
I.1	Dados técnicos do acoplador 2x1 SM de 3 dB.	168

LISTA DE ABREVIACES

CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico
FAPERJ	Fundao de Amparo  Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
LACOP	Laboratório de Comunicações ticas
UFF	Universidade Federal Fluminense
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MMI	<i>Multi-Mode Interference</i>
SM	<i>Single Mode</i>
MM	<i>Multi Mode</i>
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometer</i>
SI	<i>Step Index</i>
GI	<i>Graded index</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
SMS	<i>Single-Mode - Multi-Mode - Single-Mode</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
SS	<i>Spot Size</i>
LTI	<i>Linear Time-Invariant</i>
SNR	<i>Signal-Noise-Rate</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
LMS	<i>Least mean Square</i>
TCI	Termo Cruzado de Interferência
MFD	<i>Mode-Field Diameter</i>

1 Introdução

Quando ouve-se falar em transmissões de informação em altas taxas, a primeira idéia que vem à tona é da utilização de cabos de comunicações ópticas. Tais cabos contém fibras ópticas (sílica) que possuem características de confinamento que permitem a propagação de pulsos luminosos dentro de seu segmento. A fibra óptica possui características como alta banda de transmissão, insensibilidade à interferência eletromagnética e baixa perda, porém, são relativamente frágeis às forças de tração e não podem ser curvadas com ângulos muito agudos. Mesmo com estas desvantagens, suas qualidades são mais que suficiente, tornando-as escolhas eficientes e seguras quanto a transmissão de informações.

Cabos ópticos de Telecomunicações são tradicionalmente monitorados quanto às atenuações, reflexões, curvaturas excessivas, e descontinuidades de suas fibras por meio de uma técnica conhecida como Refletometria Óptica no Domínio do Tempo (*OTDR*). A técnica de *OTDR* tradicional apesar de poderosa e muito útil, possui limitação em sua sensibilidade e não funciona em tempo real, pois requer a aquisição e promediação de uma grande quantidade de medidas de formatos de onda de retroespalhamento *Rayleigh*, processo que pode levar até vários minutos. Isto deve-se ao fato de que o sinal retroespalhado está dezenas de dBs abaixo do sinal óptico de varredura, o que produz um formato de onda extremamente ruidoso. A técnica de *OTDR* não é então capaz de detectar distúrbios atuantes no cabo óptico, como por exemplo, aqueles decorrentes de simples contato mecânico nas fibras ou vibrações num determinado local. Se um intruso quiser acessar fisicamente à uma fibra óptica do cabo ou uma retroescavadeira estiver operando muito próxima de um cabo óptico terrestre enterrado, este será submetido a esforços transversais e axiais de muito baixa magnitude os quais o *OTDR* não será capaz de detectar nem em tempo remoto, exceto obviamente, se a fibra acabar se rompendo ou for suficientemente curvada. Além, o *OTDR* utiliza injeção de certa quantidade de pulsos ópticos na fibra óptica, logo, uma sequência de pulsos haveria de coincidir no espaço e no tempo com cada perturbação aleatória.

Soluções para este problema seriam de cameras a sensores físicos pois apresentam resultados em tempo real. Independente da escolha, a solução acaba por gerar um gasto de alimentação e de transmissão de dados a mais no sistema pois para atender o monitoramento, é certo da necessidade de várias unidades de controle ao longo do enlace.

Uma possível solução para o problema é apresentada neste trabalho, o qual trata a própria fibra como um sensor distribuído de contato ou perturbação, extinguindo a

necessidade de utilização de unidades de controle ou alimentação ao longo do segmento a se monitorar, simplificando bastante e diminuindo custos do sistema envolvido.

A referência inicial deste trabalho foi o projeto de pesquisa aprovado e financiado pelo *CNPq* (474218/2006-6) sob o título “Sensor Distribuído de Sinais Acústicos e de Perturbações Mecânicas via Controle Modal em Fibra Óptica”, desenvolvido no LA-COP/UFF.

O objetivo deste trabalho é desenvolver e caracterizar um sistema de monitoramento em tempo real de perturbações mecânicas aleatórias de baixa magnitude em cabos ópticos. A motivação parte pela utilização de dispositivos MMI formados por emendas SM/MM cujo aplicação é pouco explorada na literatura. Posteriormente, procura-se gerar o mesmo sistema utilizando acopladores 2x2 formados pela fusão de fibras ópticas SI-SM e GI-MM. Tais acopladores são idealizados para gerar um sistema mais eficiente visto que de acordo com as condições de injeção de luz nas portas de entrada/saída, apresentam comportamentos diversos como filtro óptico ou interferômetro multimodo (MMI).

O trabalho apresentado é então analisado por definidas partes onde:

No capítulo 2, é apresentado uma revisão bibliográfica e apresentação dos fenômenos recorrentes MMI referentes à acopladores SM/MM.

No capítulo 3, é apresentado e analisado o sistema SMS em modo reflexivo para monitorar cabos ópticos sob uma perspectiva qualitativa, a apresentação do efeito de desalinhamento lateral e sua resposta em “repouso”.

No capítulo 4, é apresentado e analisado o sistema SMS para monitoramento de cabos ópticos sob uma perspectiva quantitativa, apresentando resultados para diferentes comprimentos de enlace, estimativa do tempo de vôo das interferências geradas e dissertação sob ponto de vista estatístico quanto a variação da sensibilidade na detecção de perturbações físicas.

No capítulo 5, apresenta-se uma proposta para a localização de perturbações aleatórias utilizando um algoritmo matemático (LMS) em simulador matemático.

No capítulo 6, mostra-se acopladores SM/MM operando como filtros ou dispositivos GI-MMI, resposta para as diferentes configurações possíveis e dissertação dos resultados inéditos destes dispositivos.

Por fim, no capítulo 7 serão apresentadas conclusões do trabalho assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica e fundamentos teóricos

2.1 Estudos anteriores

O sensor modalmétrico é um sensor cujo mecanismo básico de funcionamento responde à estímulos gerados pela diferença de distribuições de modos dentro de um meio confinado. Está diretamente relacionado ao fenômeno MMI cuja interferência gerada entre os modos propagantes acaba por redistribuí-los ou alterar a fase entre eles.

A resultante da união das fibras SI-SM/GI-MM é denominada como dispositivo SMS cuja característica gera o fenômeno MMI, responsável pelo acoplamento dos modos propagantes da fibra GI-MM para a SI-SM. A mesma pode ser melhor entendida pela figura 2.1.

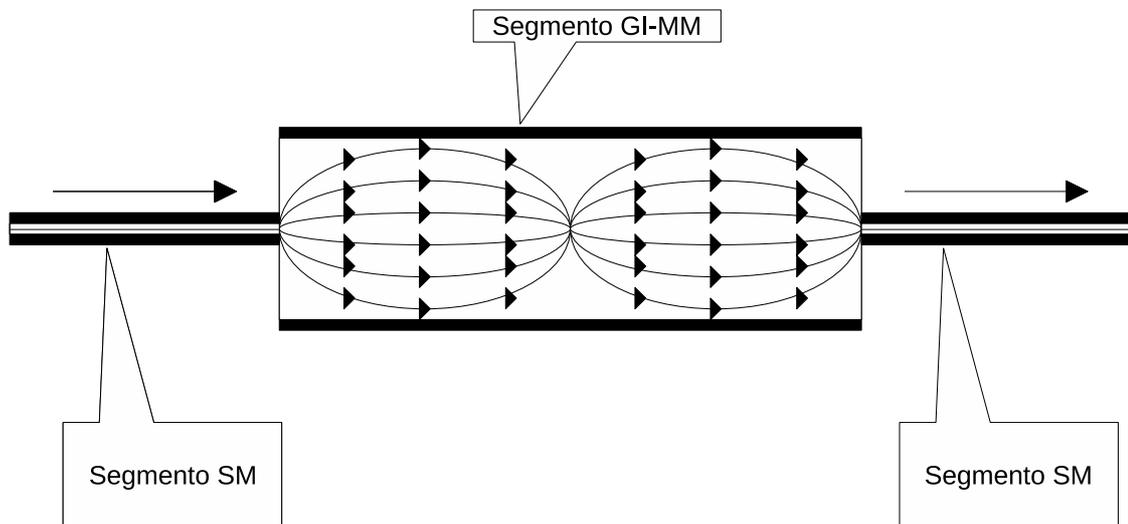


Figura 2.1: Modelo sistemático de uma estrutura SMS.

Foi demonstrado anteriormente em outros trabalhos [21], um sensor modalmétrico baseado na emenda SI-SM/GI-MM como um sensor pontual de estiramento (*strain*) operando em 1310 nm ou 1550 nm com medidas de intensidade óptica. A seguir foi investigado o mesmo sensor modalmétrico para estiramento e distúrbios, no domínio do espectro óptico entre 1530 nm a 1610 nm [23]. Estes trabalhos sugerem um mecanismo de

detecção baseado em interferência multimodal ou filtragem espacial de modos modulados pela trajetória dos raios para cada estiramento da fibra GI-MM [21].

A fibra SM possui apenas um modo permitido e sendo assim possui nele toda a energia do sinal. Na figura 2.1 é visto que na junção da fibra SM/MM a energia que é transferida para a fibra GI-MM é distribuída nos vários modos permitidos da mesma. Na segunda junção com a fibra SM, somente parte da energia de um ou alguns modos da fibra GI-MM será transferida para o único modo permitido da segunda fibra SM. Em especial, os modos de maiores ordem na fibra multimodo não reacoplam com boa eficiência na fibra SM, gerando um perfil de perda total aumentado consideravelmente [8].

O dispositivo MMI provê interferência intermodal. Em estudo anterior fora comprovado que este apresenta-se também como sendo 2 vezes mais sensível aos sensores à FBG e que quando os dispositivos SMS respondem a variações de temperatura e estiramento, não há uma dependência da amplitude com o comprimento de onda significativa [25]. O sistema inclusive já apresentou resultados de ultra-sensibilidade (estiramento a 18,6 pm) em trabalhos anteriores [30].

2.2 Perda de acoplamento na estrutura SMS

Quando são introduzidas micropressões seriadas (*microbends*) no dispositivo SMS, o perfil de perda é alterado. Essa deformação resulta em um novo acoplamento do modo fundamental e os de maiores ordem da fibra GI-MM [8].

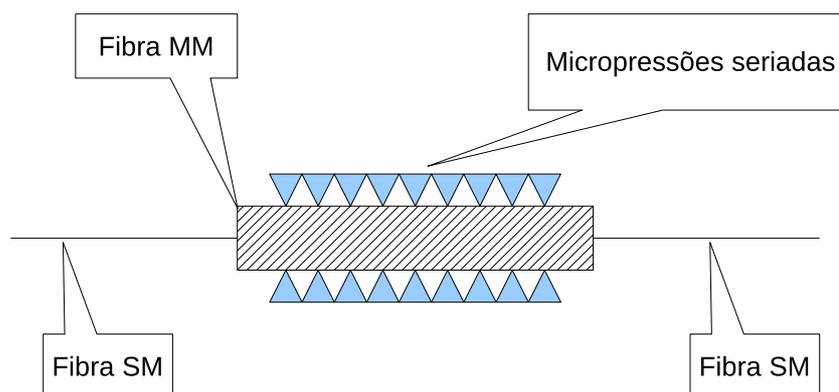


Figura 2.2: Exemplo de dispositivo SMS com presença de micropressões seriadas.

A reflexão ocorrida na interface da fibra SI-SM com a GI-MM devido ao desca-
samento de índices de refração é de valor muito pequeno ($< 0.2\%$) e pode ser desprezado em cálculos [20].

Pela característica simétrica circular do modo fundamental na fibra SI-SM, a luz injetada assume uma distribuição de campo $E(r, 0)$. Quando a luz é injetada na fibra GI-MM, esta pode ser decomposta por autovetores $\{LP_{nm}\}$ [20].

O número de modos LP_{0m} que podem ser propagados na fibra multimodo é calculado como:

$$M \approx \frac{V}{\pi} \left(V = \{2\pi/\lambda\} a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \right) \quad (2.1)$$

onde “ a ” é o raio do núcleo da fibra multimodo, n_{co} e n_{cl} são o índice de refração do núcleo e casca da fibra multimodo e λ é o comprimento de onda no espaço livre.

Por definição, temos que o perfil de campo LP_{0m} e $F_m(r)$ (e os autovetores na fibra multimodo são normalizadamente descritos ($\int_0^\infty |E(r, 0)|^2 r dr = \int_0^\infty |F_m(r)|^2 r dr$, $m = 1, 2, \dots$)) como:

$$E(r, 0) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \quad (2.2)$$

onde c_m é o coeficiente de excitação para cada modo e pode ser calculado pela relação das integrais¹ de $E(r, 0)$ e $F_m(r)$:

$$c_m = \frac{\int_0^\infty E(r, 0) F_m(r) r dr}{\int_0^\infty F_m(r) F_m(r) r dr} \quad (2.3)$$

E assim o campo que propaga-se até uma distancia z pode então ser calculado por:

$$E(r, z) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \exp(i\beta_m z) \quad (2.4)$$

onde β_m é a constante de propagação de cada modo “ m ” na fibra multimodo [20].

¹O campo elétrico E resultante na fibra MM é a superposição do campo elétrico E de cada modo.

A diferença de distâncias de propagação corresponde à diferença de perfis de campo em sessão cruzada enquanto que a taxa de acoplamento é correspondente ao comprimento físico da fibra multimodo.

Com o cálculo da transmissão² entre o campo $E(r, z)$ de entrada e seu valor na saída monomodo, temos a saída na fibra monomodo com as mesmas características de quando a luz estava da fibra de entrada (monomodo). Utilizando-se das características de ortogonalidades entre os autovetores da luz (modos) na fibra multimodo, temos então a perda de acoplamento calculada como:

$$L_s(z) = 10 \log_{10} \left(\left\| \sum_{m=1}^M c_m^2 \exp(i\beta_m z) \right\|^2 \right) \quad (2.5)$$

que expandindo o somatório³, temos:

$$L_s(z) = 10 \log_{10} \left(\sum_{m=1}^u \sum_{k=1}^u c_m^2 (c_k^2)^* \exp^{i(\beta_m z - \beta_k z)} \right) \quad (2.6)$$

A perda ocorrida no acoplamento está também relacionada da fibra GI-MM ($L_s(z)$). Além disso, o dispositivo SMS pode apresentar-se tanto como um filtro passa-alta quanto como um filtro passa-banda [20], etc.

2.3 Auto-imageamento em dispositivos SMS

Re-imageamento é a propriedade de guias de onda multimodo cujo perfil do campo de entrada é reproduzido em uma única ou múltiplas imagens a certos intervalos espaciais na direção de propagação do guia. Neste fenômeno há ocorrerências de acoplamentos com perda de inserção menores a 0,5 dB, balanceamento a 0,2 dB e figuras de cruzamento a -30 dB [16].

O fenômeno do auto-imageamento (*self-imaging*) [6] provavelmente começou a ser investigado a partir de sua observação ou previsão teórica de ocorrência em fibras ópticas multimodo tipo SI [18]. É observado e bastante conhecido em fibras multimodo tipo GI (devido a focalização e desfocalização da luz em curvas) de Telecomunicações.

²Utilizando um método convencional para simplificação da integral.

³Na equação 2.6 observa-se que os termos cruzados são os que descrevem o fenômeno MMI.

Acopladores tipo "splitter" (divisor) com circuitos fotônicos combinados são confeccionados⁴ com base no fenômeno de interferência multimodal (MMI) e seu funcionamento é melhor descrito em termos do princípio do fenômeno do re-imageamento.

O fenômeno de re-imageamento pode ser descrito como comprimento de acoplamento L_C , que é escrita como:

$$L_C = \frac{4n_r W_{eff}^2}{3\lambda} \quad (2.7)$$

Onde a largura efetiva do guia de onda é:

$$W_{eff} = W + \frac{\lambda}{\pi} (n_r^2 - n_c^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Onde n_r e n_c são os índices de refração das cascas das guias de onda e λ é o comprimento de onda no espaço-livre.

2.4 perturbações mecânicas / acústicas em dispositivos SMS

A fibra óptica já foi caracterizada como excelente guia para transmissão de perturbações de natureza mecânica/acústica com possibilidade de transmissão de potência ultrasônica alta (20 a 100 Khz) [15] e particularidade oposta quando comparada às perturbações de natureza eletromagnética [2]. A banda para perturbações físicas/sonoras não ultrapassam 1 MHz [11].

A teoria enfatiza que o modo fundamental o qual se propaga na fibra SM, ao ser injetado na fibra GI-MM terá sua potência será dividida em vários modos e que será predominantemente distribuída nos modos de baixa ordem. Quando se fala em modos de baixa ordem, utiliza-se então dois primeiros modos para ilustrar o comportamento. Sendo assim, podemos escrever a potência do modo fundamental redistribuindo em 2 modos na fibra MM e sofrendo interferência como [30]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[\frac{2\pi \Delta n L}{\lambda} \right] \quad (2.9)$$

⁴Visto sua alta banda, baixa sensibilidade à polarização e boa tolerância de fabricação.

Onde I é a potência do modo fundamental, I_1 é a potência do primeiro modo de baixa ordem, I_2 é potência do segundo modo de baixa ordem e Δn é a diferença dos índices de refração, que também pode ser escrita [30] como:

$$\Delta n \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda L} \quad (2.10)$$

Onde $\Delta\lambda$ é o espaçamento em comprimento de onda entre os feixes interferentes e é inversamente proporcional ao comprimento da fibra GI-MM. A interferência é dependente da distribuição de potência entre os modos de baixa ordem. Logo, quando existe então uma perturbação de baixa intensidade, a distribuição dos modos na fibra mudará e com isso o pico de energia também será deslocado [30].

3 Dispositivo modal métrico SMS em modo reflexivo - Qualitativo (*FingerPrint*)

3.1 Introdução

A fibra GI-MM foi inventada nos anos 70 [7] com a finalidade de obter um aumento da banda-passante em relação à fibra SI-MM, para isto apresenta um padrão senoidal de trajetórias imposto aos raios propagantes na fibra. Tais trajetórias são moduladas senoidalmente com período espacial típico (*pitch*) de 1 mm o que minimiza os atrasos temporais relativos entre os raios. Este padrão de trajetórias deriva do re-imageamento o qual pode ser definido com as equações 2.7 e 2.8.

Com estas propriedades foi sugerido um mecanismo de sensoriamento de estiramento (*strain*) baseado no descasamento entre o período das trajetórias cíclicas e o “*pitch*” intrínseco da fibra GI-MM [21].

O sistema SMS na literatura encontrada é sempre apresentado na configuração “transmissiva” (representado pela fusão de fibras SM-MM-SM da figura 2.1). Neste trabalho, utiliza-se a configuração em modo “reflexivo”, o que significa que o segmento de fibra SM é único e o segmento GI-MM deverá ter ao fim de seu comprimento físico seu terminal clivada à 90° (preferencialmente espelhada). Sendo assim, quando os modos da fibra GI-MM alcançarem o terminal clivado, serão refletidos seguindo em sentido contrário em destino à fibra SM inicial. Logicamente, na reflexão sempre haverá perda da energia confinada nos modos propagantes, porém suficiente para ser detectada pelo fotodetector. A utilização do sistema “reflexivo” é necessária visto que para identificar a localização de uma perturbação, é necessário a diferença de dois pulsos, os quais só existem nesta configuração.

O sistema ainda é analisado tanto em “repouso” como para quando sofre uma perturbação, validando os conceitos envolvidos. É apresentado também o conceito de “desalinhamento lateral” e sua importância para a sensibilidade apresentada do sistema.

3.2 Experimento

O sistema de sensoriamento funciona quando a luz (LASER/LED) é injetada numa fibra monomodo (SM). Esta fibra possui uma emenda com uma fibra multimodo de índice gradual (GI-MM) que possui comprimento desejado até a extremidade que se queira monitorar. No fim da fibra GI-MM, há uma interrupção que poderá ser realizada por clivamento ou melhor, por clivamento com deposição de algum metal para efeito de espelhamento, para assim o feixe retornar com quase 100% de reflexão pela mesma fibra GI-MM até a emenda SM/MM. A ilustração do sistema é vista pela figura 3.1.

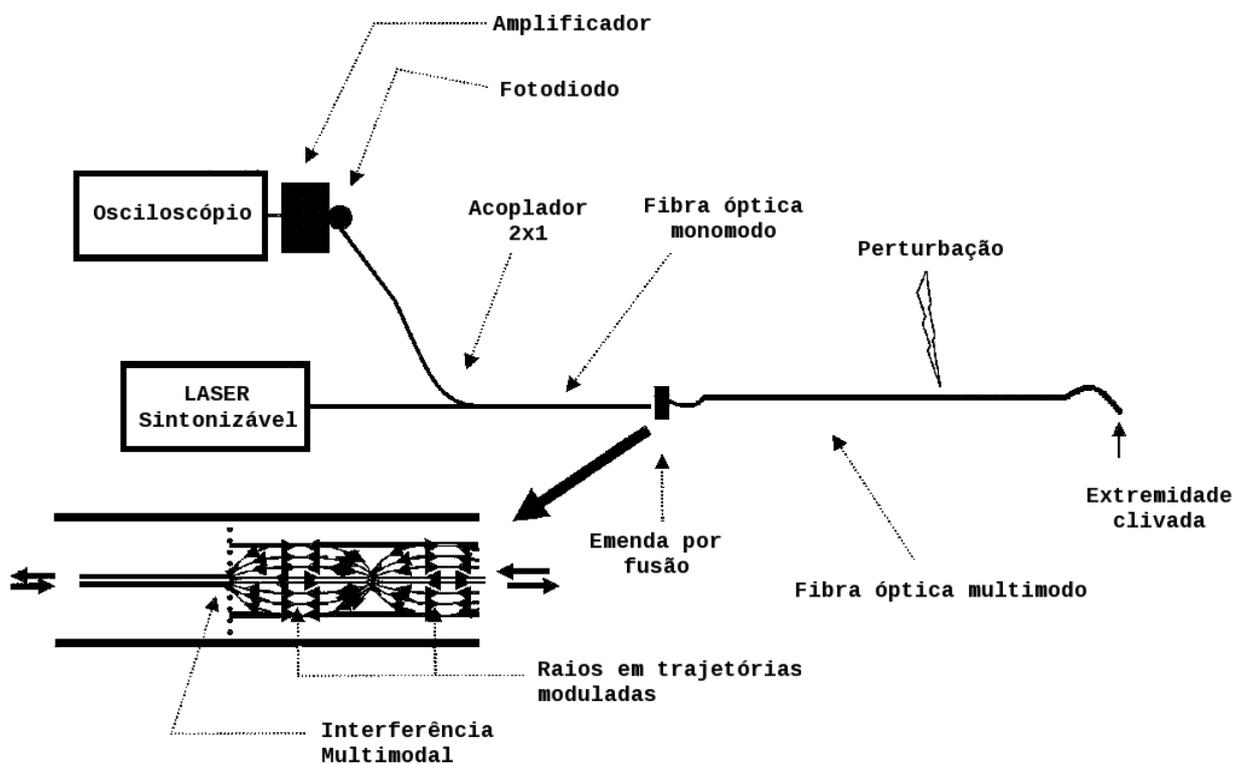


Figura 3.1: Esquema experimental do sistema modalmétrico em modo reflexivo baseado em uma emenda SM/MM.

O núcleo da fibra SM é 5 a 20 vezes menor a fibra MM. Quando há uma emenda de uma fibra SM e MM, cria-se um filtro de modos onde toda luz injetada da fibra SM para a MM sofre um acoplamento modal. Este acoplamento é caracterizado como uma interferência entre os vários modos na fibra GI-MM, onde somente alguns serão re-transmitidos à fibra SM.

Quando um estiramento é aplicado na fibra MM, ocorre uma modulação espacial da fase do grupo de raios (figura 2.1) que é convertida em variação de intensidade óptica

quando o sinal é re-injetado na emenda SM/MM. O sensor modalmétrico agora aplicado apenas para a detecção de distúrbios, gera um sinal de interferência na emenda SM/MM que modula o re-acoplamento na fibra SM, sendo originado pela superposição de N modos propagantes [22].

A idéia por trás de um sensor modalmétrico aqui apresentado remonta dos anos 80, a partir da emenda por fusão de uma fibra SM (SI) com outra multimodo (SI-MM ou GI-MM), com a finalidade original de realizar medidas de retroespalhamento (OTDR) com filtragem modal. Este procedimento permitiu a caracterização da flutuação de parâmetros físicos de um enlace de fibra GI-MM [10]. Nos anos 90, um sensor modalmétrico foi descrito como um sensor de distúrbios em fibras SM padrão com medidas no domínio das frequências elétricas [13]. O mecanismo foi atribuído às interferências ópticas entre os raios que são re-acoplados de volta à fibra SM para o comprimento de onda operacional que no caso foi visível [13]. A intensidade da interferência multimodal pode ser escrita como [22]:

$$I' = I_{CW} \pm \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sqrt{|I_j(r, \Theta) I_k(r, \Theta)|} \cos[\Psi_j(r, \Theta) - \Psi_k(r, \Theta) + \Delta\Phi_{jk}] \quad (3.1)$$

onde,

I_{CW} = nível DC de intensidade óptica.

j, k = designa os modos propagantes na fibra GI-MM.

$\Delta\Phi_{jk}$ = Diferença de fase modulada pela perturbação no segmento de fibra GI-MM.

Ψ_j, Ψ_k = Fases aleatórias referente aos modos “j” e “k”.

Ainda podemos simplificar a equação para:

$$I' = I_{CW} \pm I(r, \Theta) \quad (3.2)$$

onde,

$$I(r, \Theta) = \text{Termo Cruzado de Interferência (TCI)}.$$

Averiguando as equações 3.1 e 3.2, sabe-se que o nível DC (I_{CW}) pode saturar o fotodetector, diminuindo a resolução do TCI. A solução para este problema seria cortar/bloquear totalmente o nível DC de luz (operação ainda impossível de ser realizada).

O projeto desenvolvido neste trabalho combina a interferência multimodo (ou a modulação temporal dos modos) e condições de re-imageamento [4]. Quando há uma interferência física na fibra óptica, há uma mudança no perfil de reimageamento, provocando uma modulação na fase. Com isso a luz que retorna à fibra SM, terá seu perfil de reentrada diferente comparada ao momento anterior. De uma forma sucinta, a intensidade da perturbação física mudará as fases dos modos que se propagam na fibra sensora e na emenda SM/MM ocorre conversão para modulação na amplitude.

3.3 Estabilidade e resposta na banda “C”

O sistema SMS caracterizado quanto a sua resposta em “repouso” (sem incidência de perturbações) pode ser visualizado pela figura 3.2.

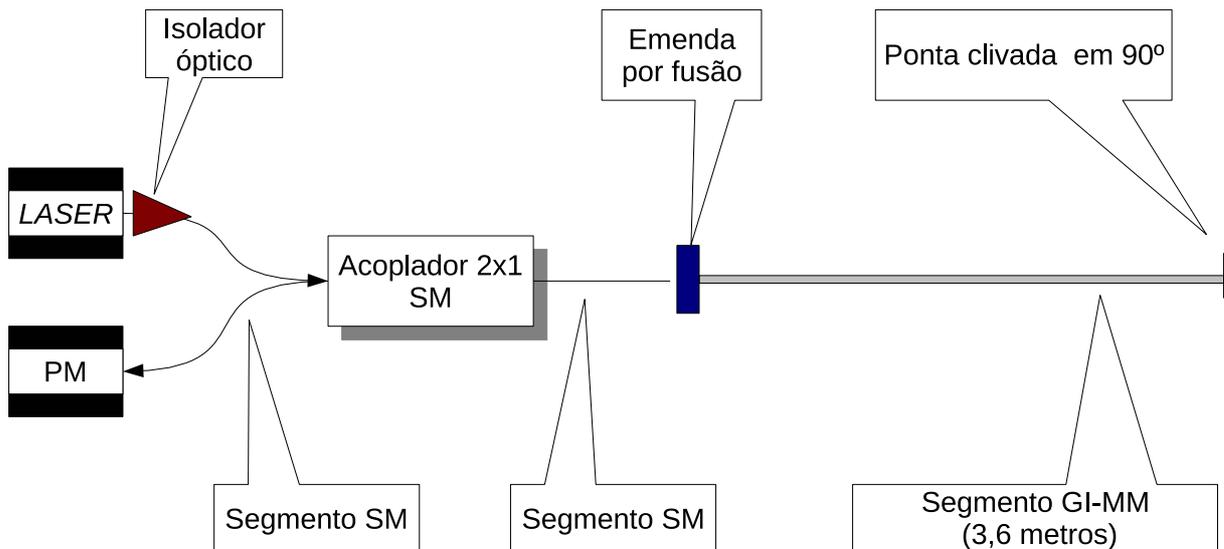


Figura 3.2: Modelo sistemático do sistema modal métrico SMS em modo reflexivo.

Um LASER sintonizável na banda “C” emitindo 20 mW de potência óptica em onda contínua (CW) é injetado, atravessa um isolador óptico, e a seguir um acoplador SM 2x1 de 3 dB.



(a) Laser sintonizável na banda “C”.



(b) Isolador óptico SM.



(c) Acoplador 2x1 SM de 3 dB.

Figura 3.3: Fonte (a), isolador (b) e acoplador 2x1 (c) utilizados no sistema modalétrico.

Na saída do acoplador foi emendada por fusão um segmento de 3,60 m de fibra GI-MM o qual em seu terminal livre é clivado à 90°. A luz proveniente do LASER após passar

pelos estágios já citados, é refletida na extremidade clivada e re-injetada na fibra SM pela emenda SM/GI-MM, quando novamente passa pelo acoplador 2x1 e é então detectada pelo medidor de potência óptica (figura 3.4) instalado no outro segmento disponível do acoplador 2x1.



Figura 3.4: Medidor de potência óptica [FPM-300 Power Meter (EXFO)].

Foram realizadas 3 sequências de medidas de potência óptica de saída sendo que cada sequência em um dia diferente. Com essas medidas construiu-se um gráfico (figura 3.5) da potência normalizada $\frac{P_{out}}{P_{in}}$ (em dB) em função do comprimento de onda na banda “C” .

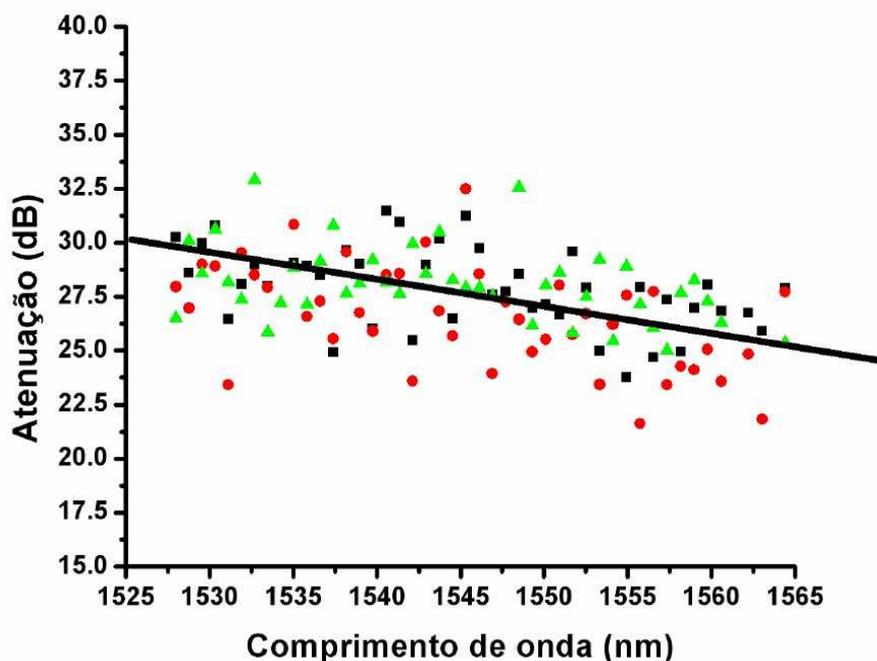


Figura 3.5: Gráfico de resposta espectral do dispositivo modalmétrico na ausência de perturbações intencionais. 29

A figura 3.5 mostra três conjuntos de medidas na ausência de perturbações intencionais. Para qualquer sequência medida, observa-se instabilidade do sinal de resposta estática à medida que o comprimento de onda é variado (1527,99 nm a 1563,05 nm).

A linha contínua é um auxílio visual que permite grosseiramente estimar uma diminuição da atenuação com o aumento do comprimento de onda. Em todas as seqüências de medidas, observa-se uma tendência de aumento da atenuação quando é reuzido o comprimento de onda. No caso, estima-se grosseiramente uma queda média de aproximadamente 5 dB ao longo da banda “C”.

Estes resultados dispersos mostram a natureza interferométrica (instável) do dispositivo mesmo sem a aplicação de perturbações intencionais. É visível a instabilidade causada pelo próprio meio ambiente (vibrações, sinais acústicos e movimentos de ar), visto pois o sensor não se encontra isolado ou blindado mecânicamente. E ainda, com a diminuição de λ o MFD da fibra SM diminui, dificultando o reacoplamento.

3.4 Desalinhamento Lateral

As emendas de fibra SM/MM utilizadas no desenvolvimento qualitativo e quantitativo do dispositivo modalmétrico foram confeccionadas pela máquina de fusão cuja foto é mostrada na figura 3.6.



Figura 3.6: Máquina de emendas utilizada nas fusões, *SUMITOMO (25-S)*.

Quando ocorre uma emenda entre fibras de mesma categoria, a máquina que realiza a emenda tenta realizar a emenda com a melhor qualidade possível (centralizada e alinhada com a finalidade de diminuir a perda no acoplamento de uma fibra para a outra). Porém como já mencionado, uma emenda SM possui o núcleo de 20 a e 5 vezes menor ao de uma fibra MM e é graças a esta particularidade que há ocorrência da conversão de modulação de fase da luz em modulação em amplitude. Com esse fato, fica então a motivação de se verificar se o (des)alinhamento lateral (*offset*) das emendas geradas apresentam alguma contribuição na conversão da modulação de fase à amplitude.

A máquina de emendas por fusão utilizada (*SUMITOMO 25-S*) atende às necessidades, porém não permite selecionar alguns parâmetros como no caso, o próprio desalinhamento lateral (*offset* entre as fibras SM e MM). Para a máquina o desalinhamento é interpretado como “falha” e sendo assim, tenta evitá-lo no momento da fusão (procura realizar uma emenda perfeita). Isto irá prejudicar ou inviabilizar o futuro enlace modalétrico procurado.

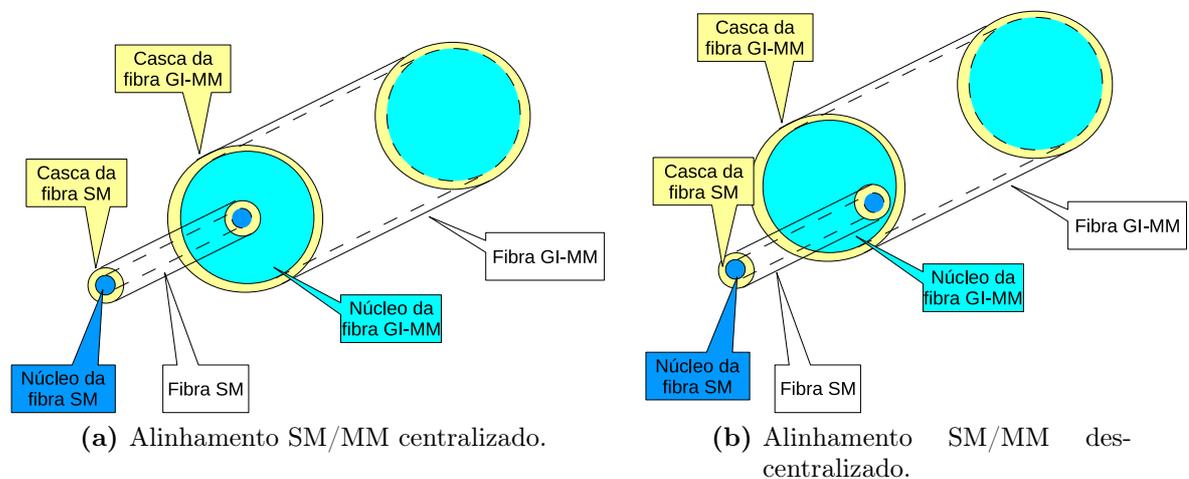


Figura 3.7: Vista em perspectiva das emendas realizadas (alinhamento lateral).

Todas as emendas selecionadas foram geradas por tentativa e “esperança” onde selecionou-se quatro emendas com desalinhamentos lateral onde a máquina estimou e forneceu. Realizou-se quatro emendas e destas, selecionou-se duas (extremos) que foram utilizadas no experimento quantitativo (*Alfa* e *Delta*) e uma (*Alfa*) que foi utilizada no experimento qualitativo (*Fingerprint*).

Emenda	Offset	Cut L	Cut R	Gap
Alfa	6,8 μm	0,8 °	0,3 °	26,6 μm
Beta	5,5 μm	0,3 °	0,1 °	24,04 μm
Gama	5,8 μm	0,6 °	0,4 °	22,9 μm
Delta	0,9 μm	2,0 °	0,2 °	23,4 μm

Tabela 3.1: Dados das emendas geradas pela máquina de fusão (SUMITOMO 25-S).

A emenda “Alfa” possui o maior desalinhamento lateral enquanto a “Delta” possui o menor. Sendo assim foram as emendas utilizadas no dispositivo modal métrico. Os desalinhamentos laterais “Beta” e “Gama” são muito próximos e estão com seus valores próximos de uma média estimada entre as emendas “Alfa” e “Delta”. Os desalinhamentos angulares (“Cut L” e “Cut R”) assim como a distância de uma fibra a outra (“Gap”) também não apresentam variações muito expressivas entre si, logo, os mesmos não são significativos para este trabalho.

3.5 Experimentos qualitativos com o dispositivo SMS (*Fingerprint*)

Na configuração mostrada pelas figuras 3.1 e 3.2, a luz ao sair do LASER passa pelo isolador, passa pelo acoplador 2x1, passa pela emenda SM/MM e passa por todo segmento GI-MM até a sua extremidade. A luz então tem parte de sua potência refletida e segue o mesmo caminho de volta até o acoplador 2x1 onde parte de sua potência segue para o segmento da fibra SM onde será detectada pelo fotodetector.

Ainda com a mesma configuração, substitui-se apenas o medidor de potência óptica por osciloscópios (digital ou analógico) conectado a um conjunto montado de receptor de InGaAs com um amplificador de transimpedância. Utilizou-se para a detecção um fotodiodo de InGaAs em regime fotovoltaico com receptáculo FC conectado à um amplificador configurável com ganho de transimpedância de 10^5 V/A (figura 3.8).

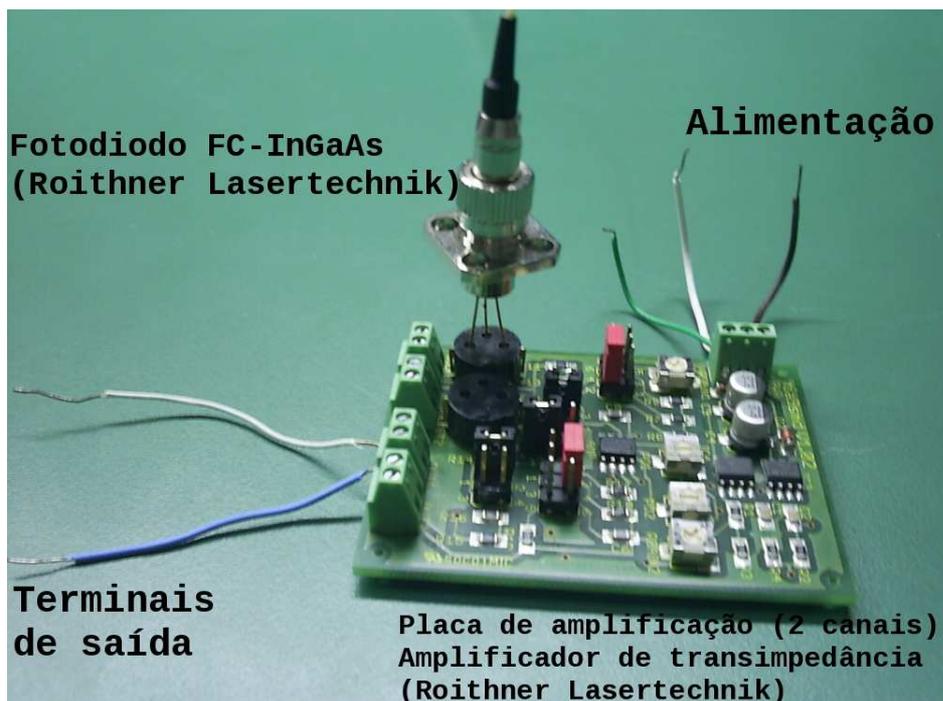


Figura 3.8: Fotodiodo *pigtail* com receptáculo FC conectado à entrada de um amplificador de transimpedância da *Roithner Lasertechnik*.

No braço de saída do acoplador SM 2x1 de 3 dB (visto na figura 3.3 (c)) é emendado o segmento SM/MM contendo a emenda *Alfa* e depois *Delta*. Na extremidade do segmento MM da emenda *Alfa*, foi emendado por fusão o segmento de fibra¹ GI-MM de 3,60 metros com sua extremidade livre clivada à 90°.

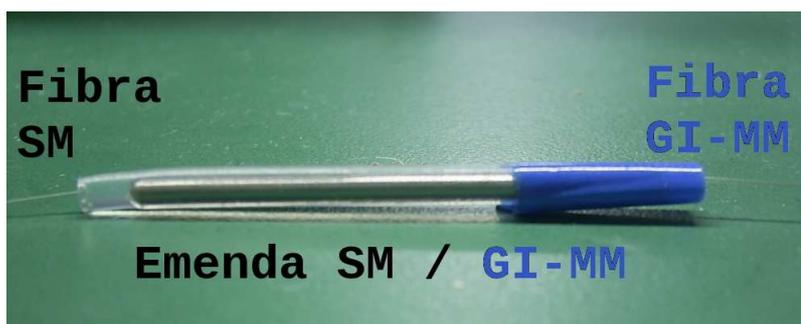
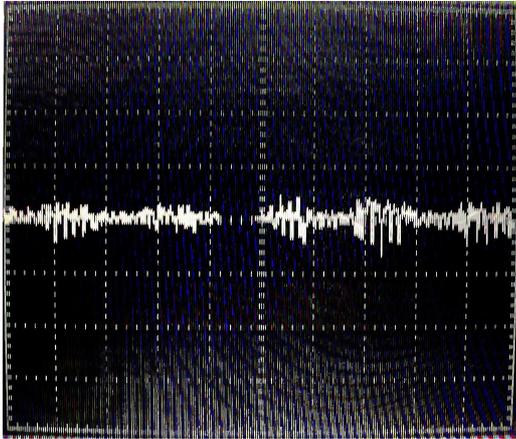


Figura 3.9: Emenda SM/MM.

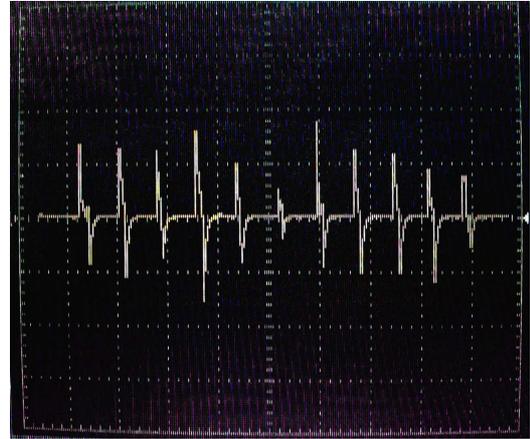
Com a configuração experimental montada em bancada, são geradas perturbações pontuais no segmento de fibra GI-MM com leves toques de dedo (*fingerprint*) e posteriormente, com a colocação de um telefone celular em modo *VibraCall* em cima do segmento

¹Neste trabalho, lembra-se que nunca foi retirado o encapamento de proteção da fibra que sofre perturbações.

GI-MM. Nas figuras 3.10 e 3.11 é visto a tela capturada dos osciloscópios para os tipos de perturbações.



(a) Sinal do modalmétrico gerado pelo *VibraCall* de um telefone celular.



(b) Sinal modalmétrico gerado por toque *fingerprint*.

Figura 3.10: Sinais modalmétricos observados a 0,5s/div e 1,0V/div.

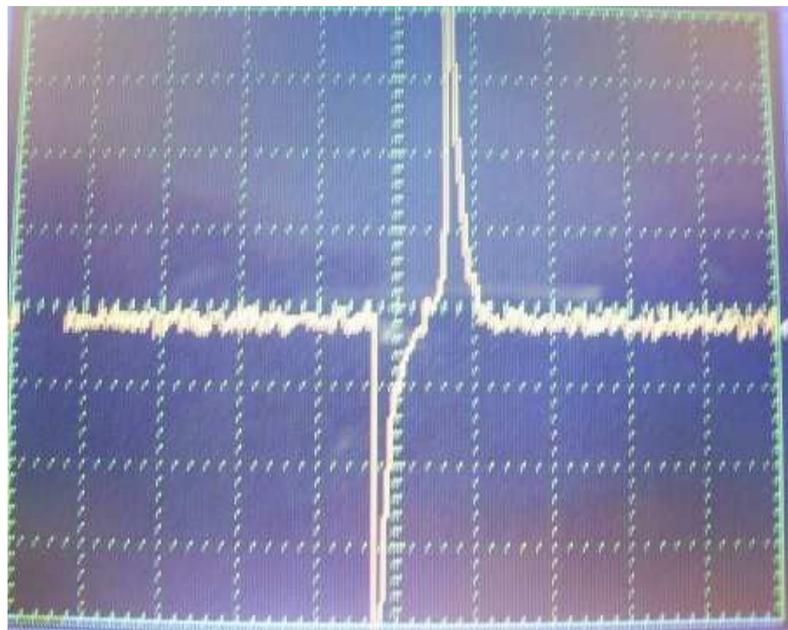


Figura 3.11: Sinal *fingerprint* de dispositivo modalmétrico observado a 50 mV/div e 0,2 s/div.

Nas figuras 3.10 (b) e figura 3.11, é possível observar perturbações de contato mecânico de muito baixa magnitude que foram aplicadas pontualmente na fibra sensora GI-MM. Tais distúrbios foram obtidos com um simples e suave toque de dedo num ponto

qualquer da fibra GI-MM-GI de 3,6 m de comprimento. Formatos de onda mostrados no osciloscópio em acoplamento AC foram obtidos e fotografados apresentando similaridades com grande frequência.

Conforme já explicado, o mecanismo de funcionamento do presente dispositivo sensor de distúrbios pode ser explicado como sendo o de um interferômetro de múltiplos raios (ou modos) propagantes ao longo da fibra GI-MM que modula o re-acoplamento na fibra SM. Sob o ponto de vista da perturbação mecânica não quantificadas, podem ser compreendidos subjetivamente e facilmente reproduzidos.

Somente o segmento MM-GI mostrou-se “sensível” às perturbações, o que torna legítimo a idéia que a detecção só poderá ocorrer usando o segmento de fibra multimodo do sistema.

3.6 Análise e discussão sobre o dispositivo modalmétrico SMS

Variando apenas o comprimento de onda na banda “C” injetado no dispositivo, obteve-se uma resposta de potência normalizada dispersa em torno de uma média que cresce (ou a atenuação diminui) quando o comprimento de onda varia. Tal dispersão de valores evidencia a instabilidade do dispositivo devido a sua natureza interferométrica.

A figura 3.5 mostra que de fato o dispositivo possui natureza interferométrica pois pontos experimentais estão muito dispersos devido à instabilidade perante perturbações ambientais.

Pelo menos na banda C de Telecomunicações não há uma evidência de um valor ótimo de λ para ser usado no sistema modalmétrico. Entretanto, grosseiramente pode-se verificar uma tendência de diminuição da atenuação do sistema modalmétrico quando λ aumenta (dentro da banda C). Isto não é explicado segundo a figura 4 do artigo de Arun Kumar [5] de 2003. Pode-se neste, claramente notar da figura 4 que no intervalo em torno de 1550 nm a saída de luz diminui de potência, o que está invertido com o presente resultado experimental. Deve-se também notar que a referência [5] faz simulação por $L = 2m$ de fibra MM em modo transmissivo enquanto que o presente experimento foi feito com $L = 1m$ em modo reflexivo (percorrendo assim $2m$).

3.7 Análise e discussões sobre o dispositivo modal métrico SMS (*fingerprint*)

É observado que dentro da configuração utilizadas o sistema apresenta o sinal de monitoramento com certo ruído, em virtude de sua própria natureza interferométrica. Uma solução boa para diminuir o efeito do ruído é a combinação do fotodetector com o amplificador que deverão possuir uma largura de banda compatível com a resolução temporal necessária para detectar a perturbação, assim como manter o ganho necessário.

Não foi possível observar resposta às súbitas ou lentas variações de temperatura ocorrendo pontualmente bem próximas da fibra sensora GI-MM. No experimento, foi aproximado lentamente e rapidamente um isqueiro aceso. Obviamente, colocando o isqueiro abaixo da fibra há observação de interferências, porém estas são relacionadas a movimento do ar por convecção, criadas pela chama do isqueiro. Era esperado algum resultado porém o sistema não apresentou variações ou interferências, diferente do que já observado em estudos anteriores [30]. Espera-se então que para ambientes com temperaturas constantes e muito elevadas (onde possa ocorrer dilatação física significativa na fibra) possam sim contribuir com diferença nas leituras.

Sob comportamento dinâmico, uma perturbação mecânica bastante fraca num ponto qualquer da fibra GI-MM sensora é suficiente para que seja observado uma resposta em tempo real no domínio do tempo, evento o qual é impossível de monitorar com o uso da tradicional técnica de OTDR. Há sinais com amplitude que facilmente podem ultrapassar 200 mV em milisegundos de duração.

Na realização do experimento “*fingerprint*”, percebe-se com uma certa frequência que as perturbações geradas apresentam um ou dois picos sequenciais de polaridades oposta conforme mostrado na figura 3.10 (b). Os picos podem ser explicados pelo ato de encostar e desencostar do dedo na fibra GI-MM. Em grande parte das amostras, obteve-se um atraso relativo de aproximadamente 0,2s, porém atrasos menores e maiores também foram observados desde que o ato de encostar / desencostar sejam feitos mais rapidamente ou lentamente.

Na ocorrência de algumas perturbações foi observado outras perturbações derivadas (amostras de fraca magnitude). A ocorrência destas perturbações derivadas possivelmente foram geradas por tênues ondas de choque cujas ocorrências geraram interferências construtivas e destrutivas na emenda SM/MM (como visto na equação 3.1).

Ao fim dos experimentos qualitativos, foi observado que a esfera elástica (a ser utilizada nos experimentos quantitativos do dispositivo SMS) ao cair de uma altura aleatória (valores aproximados da altura) sobre o plano onde a fibra GI-MM sensora se encontrava, a uma distância próxima à fibra, provocou ondas de choque que foram detectadas pelo dispositivo.

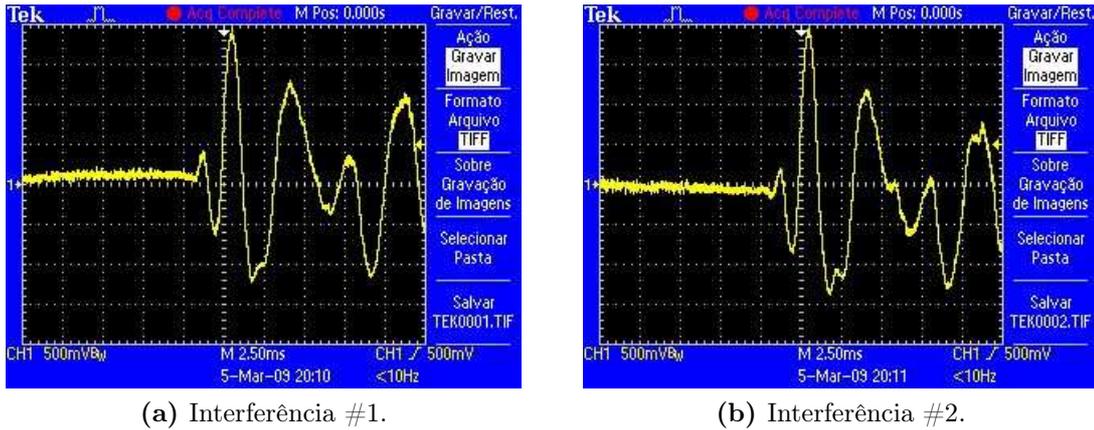


Figura 3.12: Interferências observadas na emenda *Delta* a 2.50ms/div e 500mV/div de um quique de esfera elástica ao plano.

Estas ondas de choque sobre o modalmétrico podem ser entendidas como inúmeras perturbações distribuídas que ocorreram no comprimento total da fibra GI-MM. A cada quique é observado um padrão de perturbação distribuída. A assinatura destas ondas de choque pode ser vista na figura 3.12 onde são mostrados dois lançamentos da esfera sobre o plano (alturas de lançamento diferentes, porém muito próximas).

4 Dispositivo modalmétrico SMS em modo reflexivo - Quantitativo

De acordo com os resultados obtidos no capítulo 3, é proposta e demonstrada uma técnica para padronizar e quantificar as perturbações facilitando comparações com versões aperfeiçoadas do dispositivo modalmétrico SMS em modo reflexivo. Optando pela simplicidade e construção própria, foi pensado em um modelo de rampa posicionada a uma distancia fixa onde uma esfera semi-elástica inicia sua trajetória sempre de uma posição determinada. Tal modelo pode ser observado pela figura 4.1.

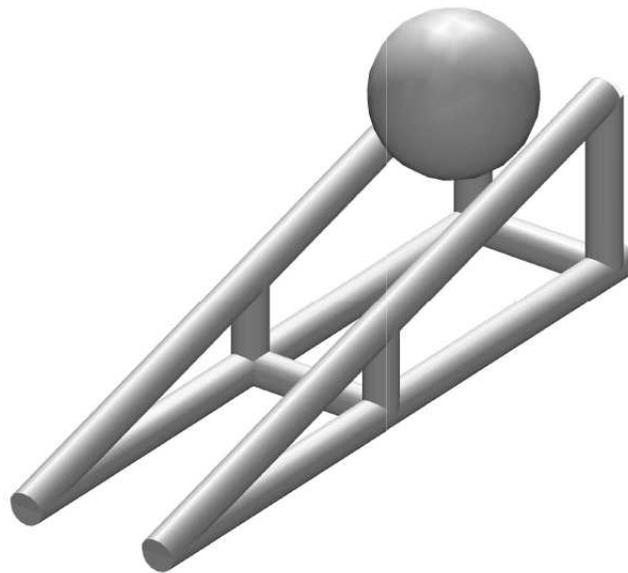
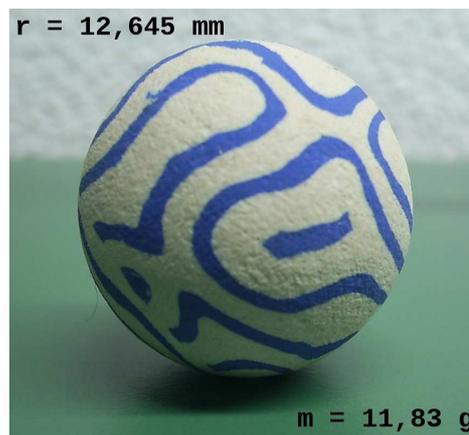


Figura 4.1: Modelo de rampa e a esfera rolante, sistema este projetado para induzir perturbações de forma controlada no dispositivo.

A esfera saindo da rampa¹, passa pela fibra transversalmente em um movimento de “atropelamento”. Esse sistema permite que as perturbações sejam sempre as mesmas sob um ponto de vista estático e apresenta um dt de perturbação definido e que poderá ser verificado posteriormente. Do modelo visto na figura 4.1, a esfera semi-elástica que estará em repouso de um ponto de altura h estabelecido, ganhará velocidade ao rolar

¹construída pela solda de varetas cilíndricas idênticas de aço inox.

até o fim da rampa². A altura h como sendo a única variável do sistema (e sendo fixa na configuração), pode-se sugerir que a velocidade, direção e sentido da esfera ao sair da rampa serão sempre os mesmos, garantindo a padronização do evento de interferência. Naturalmente que, com exceção de h , todos os outros parâmetros dinâmicos do processo de indução perturbativo são de natureza estatística.



(a) Esfera semi-elastica.



(b) Rampa confeccionada.

Figura 4.2: Sistema de Esfera e Rampa obtidos/confeccionados para o experimento.

A rampa foi fixada com fita adesiva no plano do sistema SMS e posicionada a uma distância de 15 cm do ponto onde a esfera começa a rolar (final da rampa) até a fibra MM. A necessidade desta distância é eliminar a influência de “quiques da esfera” (provenientes de sua natureza elástica) no momento em que a mesma deixa o plano da rampa.

²a velocidade da esfera pode ser calculada a partir da teoria da *Roda de Maxwell*.

mas características de captura porém com ganhos de amplificação reguláveis (e largura de banda também variável). É importante frisar que o receptor foi trocado³ mas a configuração base do sistema não foi alterada, mantendo assim válido o método experimental.



Figura 4.4: Receptor com amplificador de transimpedância embutido.

Com todos os arranjos prontos, conecta-se o *LASER* sintonizável na banda “C” junto com o isolador (conectados em série) ao braço “SM - in” do acoplador 2x1 SM (visto na figura 3.3 (c)); o braço “SM - out/in” do acoplador 2x1 SM emenda-se ao segmento SM da emenda *Alfa/Delta*; a emenda-se o segmento MM da emenda *Alfa/Delta* com o segmento de comprimento de fibra MM a ser analisado; o receptor de transimpedância ao braço “SM - out” do acoplador 2x1 SM e por fim, um osciloscópio digital ou analógico aos terminais de saída do receptor de transimpedância (figura 4.4).

A montagem do experimento (esquematizado pela figura 3.2) e visto fisicamente montado (foto) na figura 4.5.

³Foto-receptor de InGaAs com amplificador de transimpedância integrado da ThorLabs INC. modelo PDA10CS.



Figura 4.5: Conjunto experimental pronto em bancada.

Para caracterizar quantitativamente o dispositivo SMS, foram coletados 20 eventos para cada emenda selecionada (*Alfa* e *Delta*) com diferentes configurações de comprimentos de fibra GI-MM e ganhos de amplificação.

O roteiro de medidas da emenda *alfa* (desalinhamento lateral de $6,8 \mu m$) foi:

$$\text{emenda } \alpha \left\{ \begin{array}{l} L = 1 \text{ m} \\ L = 376 \text{ m} \\ L = 1265 \text{ m} \\ L = 1641 \text{ m} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \\ G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \\ G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \\ G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} 20 \text{ amostras} \\ 20 \text{ amostras} \end{array} \right.$$

E o mesmo para a emenda *delta* utilizada (desalinhamento lateral de $0,9 \mu m$).

$$\text{emenda delta} \left\{ \begin{array}{l} L = 1 \text{ m} \\ L = 376 \text{ m} \\ L = 1265 \text{ m} \\ L = 1641 \text{ m} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 20 \\ 20 \\ 20 \end{array} \right\} \text{ amostras} \\ \left\{ \begin{array}{l} G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 20 \\ 20 \\ 20 \end{array} \right\} \text{ amostras} \\ \left\{ \begin{array}{l} G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 20 \\ 20 \\ 20 \end{array} \right\} \text{ amostras} \\ \left\{ \begin{array}{l} G = 40 \text{ dB} \\ G = 50 \text{ dB} \\ G = 60 \text{ dB} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 20 \\ 20 \\ 20 \end{array} \right\} \text{ amostras} \end{array} \right.$$

Onde L é o comprimento físico da fibra GI-MM e G é o ganho selecionado no amplificador. Como são 20 amostras para cada configuração, temos no total para cada emenda 240 amostras. Como foram utilizadas 2 emendas então 480 medidas foram realizadas.

Destes eventos, foi obtido o desvio padrão e média com finalidade de analisar o efeito do desalinhamento lateral das emendas no desempenho do modal métrico. As médias de cada emenda são apresentadas em dB , obtidas pela conversão da equação 4.1.

$$NdB = 20 \log \frac{\text{Offset emenda alfa } (6.8 \mu\text{m})}{\text{Offset emenda delta } (0.9 \mu\text{m})} \quad (4.1)$$

Foi estimado o “ τ_R ” (*RiseTime*) e “ B ” (Banda) do modal métrico para algumas amostras selecionadas neste trabalho. Pode-se definir o “ τ_R ” como:

$$\tau_R = t_{2(90\%)} - t_{1(10\%)} \quad (4.2)$$

onde.

$t_{2(90\%)}$ → é o tempo corrido para que o pulso alcance 90% de seu valor máximo.

$t_{1(10\%)}$ → é o tempo corrido para que o pulso alcance 10% de seu valor máximo.

Como a assinatura dos pulsos obtidos tem forma aproximada à um pulso Gaussiano, para o cálculo de “ B ” basta aplicar o valor do *RiseTime* medido na equação 4.3:

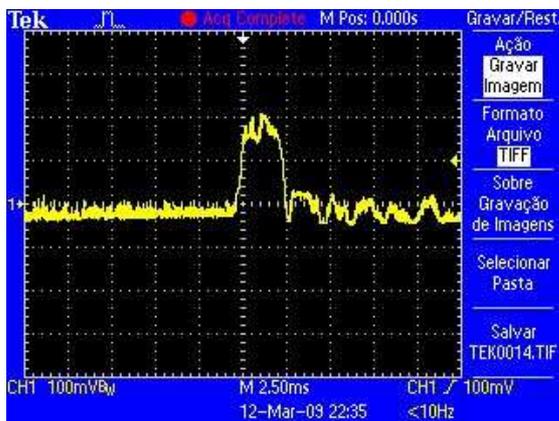
$$B = \frac{0,35}{\tau_R} \quad (4.3)$$

Onde o valor “0,35” é o parâmetro numérico atribuído a um pulso Gaussiano.

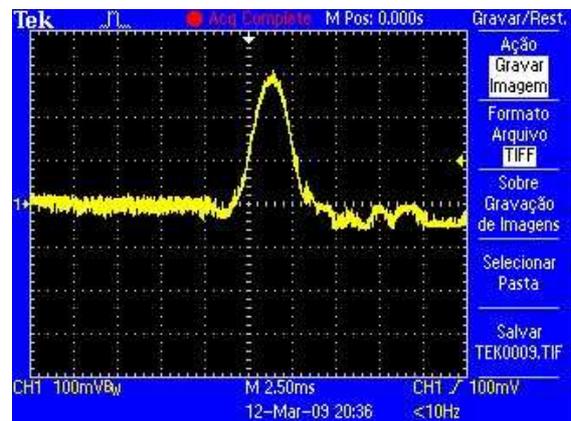
4.1 Experimento quantitativo com o dispositivo SMS

4.1.1 Medidas realizadas para 1 metro de comprimento ativo.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu\text{m}$ e offset $6,8 \mu\text{m}$ com ganho de 40 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu\text{m}$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu\text{m}$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.6: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1$ metro e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de *Offset* $0,9 \mu\text{m}$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de *Offset* $6,8 \mu\text{m}$.

Tabela 4.1: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1$ metro e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	110	200
2	100	300
3	210	200
4	200	400
5	220	170
6	100	190
7	145	190
8	100	200
9	180	185
10	110	300
11	120	400
12	275	200
13	100	400
14	200	100
15	200	100
16	200	130
17	200	200
18	180	320
19	200	330
20	180	400
-	-	-
Média	166,5	245,75
Desvio Padrão	51,56	101,48

Tabela 4.2: Medidas comparativas entre offsets para L=1 metro a ganho G=40 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{245,75 mV}{166,5 mV} = 3,381 dB \quad (4.4)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,0 ms - 0,5 ms = 0,5 ms \mid \tau_{R_{6,8}} = 1,5 ms - 0,5 ms = 1,0 ms \quad (4.5)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \mid B_{6,8} = \frac{0,35}{1,0 ms} = 0,35 kHz \quad (4.6)$$

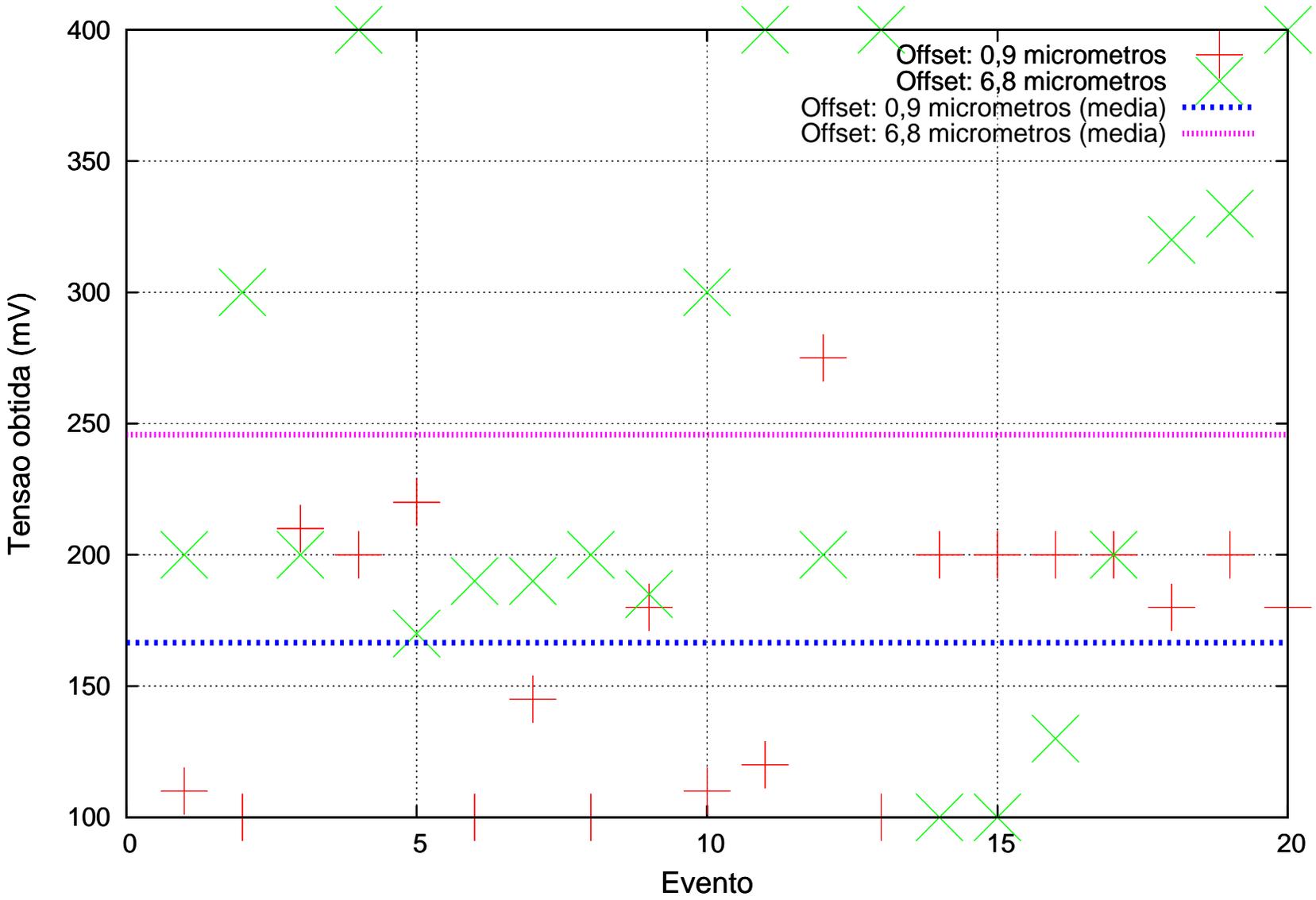
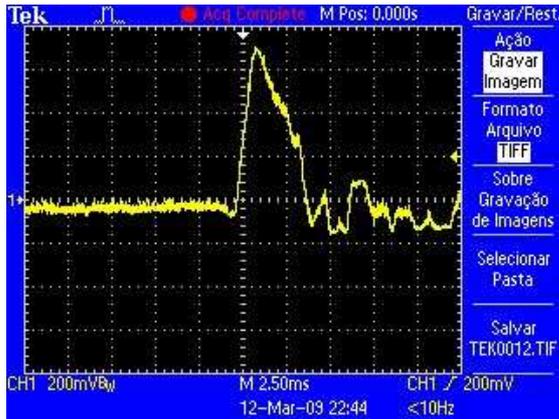
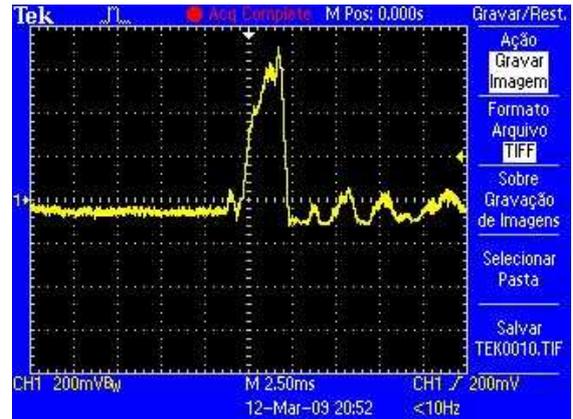


Figura 4.7: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1$ metro a ganho $G=40$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 50 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.8: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1$ metro e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	200	mV
V_{TRIG}	200	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	200	mV
V_{TRIG}	200	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.3: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1$ metro e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	800	800
2	600	800
3	220	400
4	300	400
5	400	800
6	400	800
7	800	800
8	800	600
9	300	800
10	580	800
11	380	600
12	800	400
13	750	800
14	600	200
15	250	400
16	800	600
17	350	200
18	480	800
19	350	550
20	300	800
-	-	-
Média	513	617,5
Desvio Padrão	214,75	214,77

Tabela 4.4: Medidas comparativas entre offsets para L=1 metro a ganho G=50 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{617,5 mV}{513 mV} = 1,610 dB \quad (4.7)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,25 ms - 0,5 ms = 0,75 ms \mid \tau_{R_{6,8}} = 1,5 ms - 0,5 ms = 1,0 ms \quad (4.8)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,75 ms} = 0,466 kHz \mid B_{6,8} = \frac{0,35}{1,0 ms} = 0,35 kHz \quad (4.9)$$

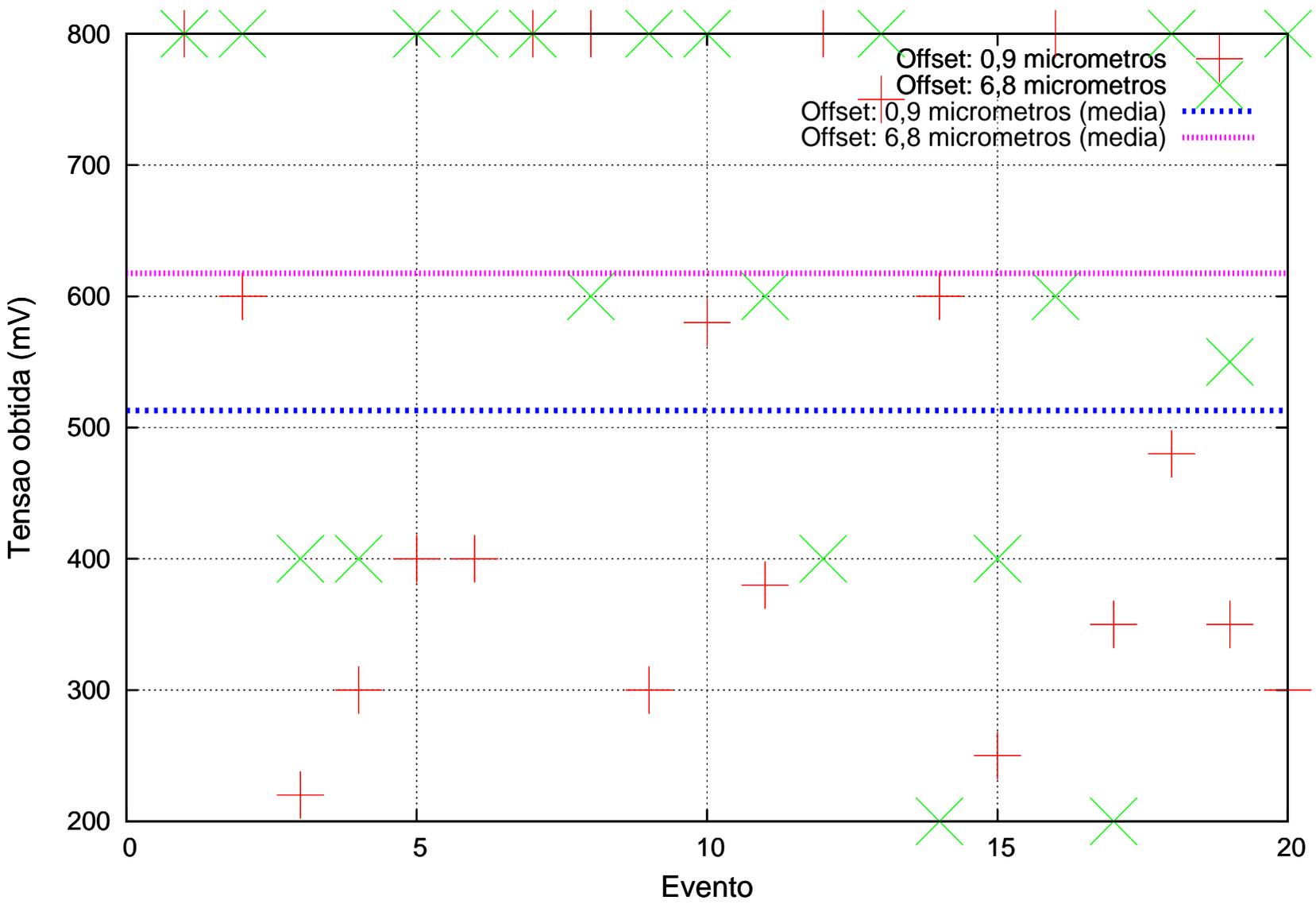
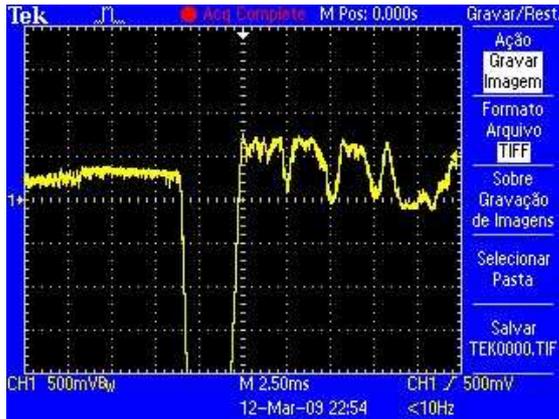
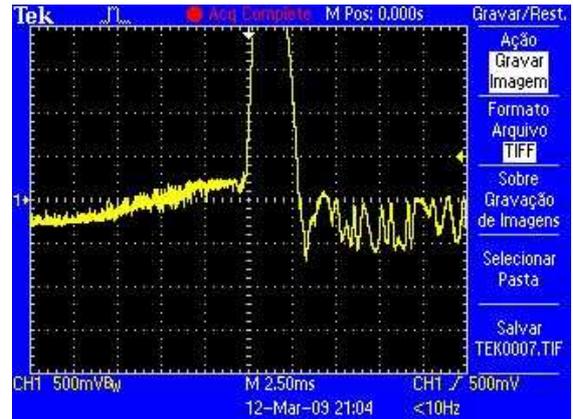


Figura 4.9: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1$ metro a ganho $G=50$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu\text{m}$ e offset $6,8 \mu\text{m}$ com ganho de 60 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu\text{m}$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu\text{m}$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.10: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1$ metro e amplificador com ganho $G=60$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	500	mV
V_{TRIG}	500	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu\text{m}$.

Atributos	Valores configurados	Unidade
V_{DIV}	500	mV
V_{TRIG}	500	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu\text{m}$.

Tabela 4.5: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1$ metro e amplificador com ganho $G=60$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	2000	2000
2	1800	2000
3	1000	750
4	2000	1000
5	2000	2000
6	1000	2000
7	1000	1750
8	2000	2000
9	600	1250
10	2000	1450
11	1500	1000
12	1000	2000
13	750	1000
14	1200	2000
15	600	2000
16	1300	2000
17	1500	2000
18	2000	1500
19	2000	1100
20	1300	2000
-	-	-
Média	1427,5	1640
Desvio Padrão	517,45	456,42

Tabela 4.6: Medidas comparativas entre offsets para L=1 metro a ganho G=60 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{1640 mV}{1427,5 mV} = 1,205 dB \quad (4.10)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 0,5 ms - 0,2 ms = 0,3 ms \mid \tau_{R_{6,8}} = 0,5 ms - 0,2 ms = 0,3 ms \quad (4.11)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,3 ms} = 1,167 kHz \mid B_{6,8} = \frac{0,35}{0,3 ms} = 1,167 kHz \quad (4.12)$$

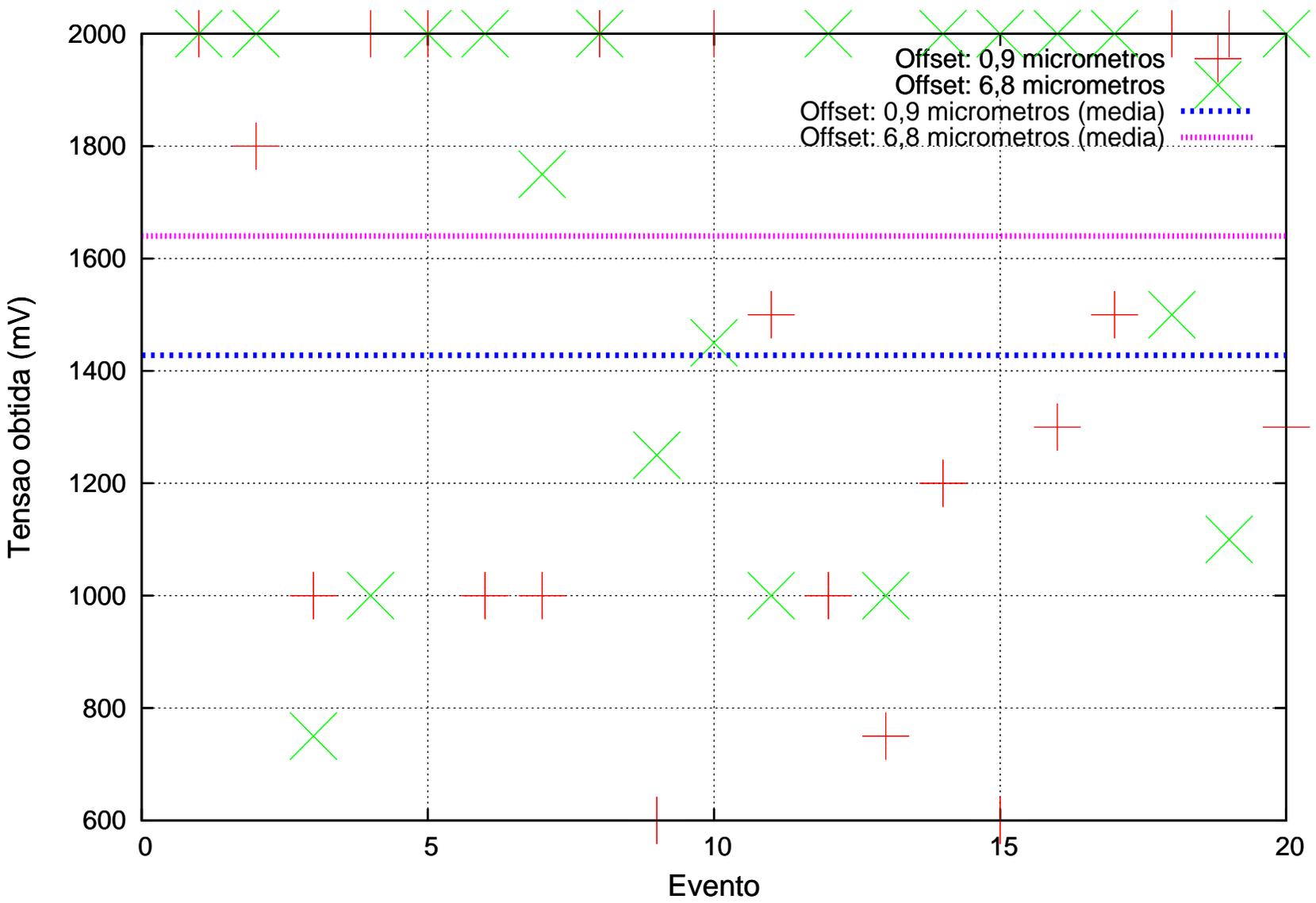
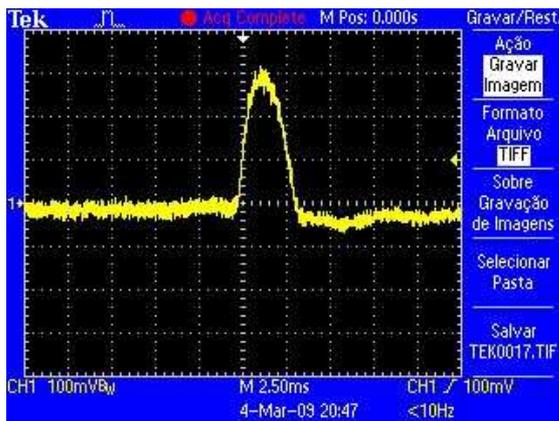


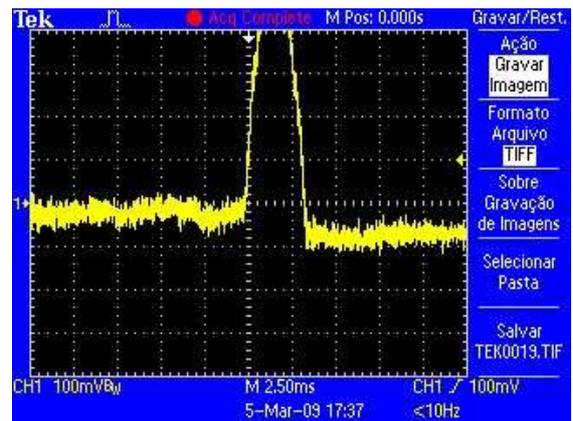
Figura 4.11: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1$ metro a ganho $G=60$ dB.

4.1.2 Medidas realizadas para 376 metros de comprimento ativo.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 40 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.12: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=376$ metros e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.7: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=376$ metros e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	100	110
2	380	150
3	200	250
4	500	330
5	100	390
6	200	400
7	180	230
8	90	280
9	290	240
10	100	185
11	110	310
12	270	180
13	100	115
14	180	250
15	120	250
16	170	120
17	100	210
18	290	380
19	305	130
20	270	400
-	-	-
Média	202,75	245,5
Desvio Padrão	111,82	97,96

Tabela 4.8: Medidas comparativas entre offsets para L=376 metros a ganho G=40 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{245,5 mV}{202,75 mV} = 1,661 dB \quad (4.13)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,5 ms - 0,5 ms = 1,0 ms \mid \tau_{R_{6,8}} = 1,5 ms - 0,2 ms = 1,3 ms \quad (4.14)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{1,0 ms} = 0,35 kHz \mid B_{6,8} = \frac{0,35}{1,3 ms} = 0,27 kHz \quad (4.15)$$

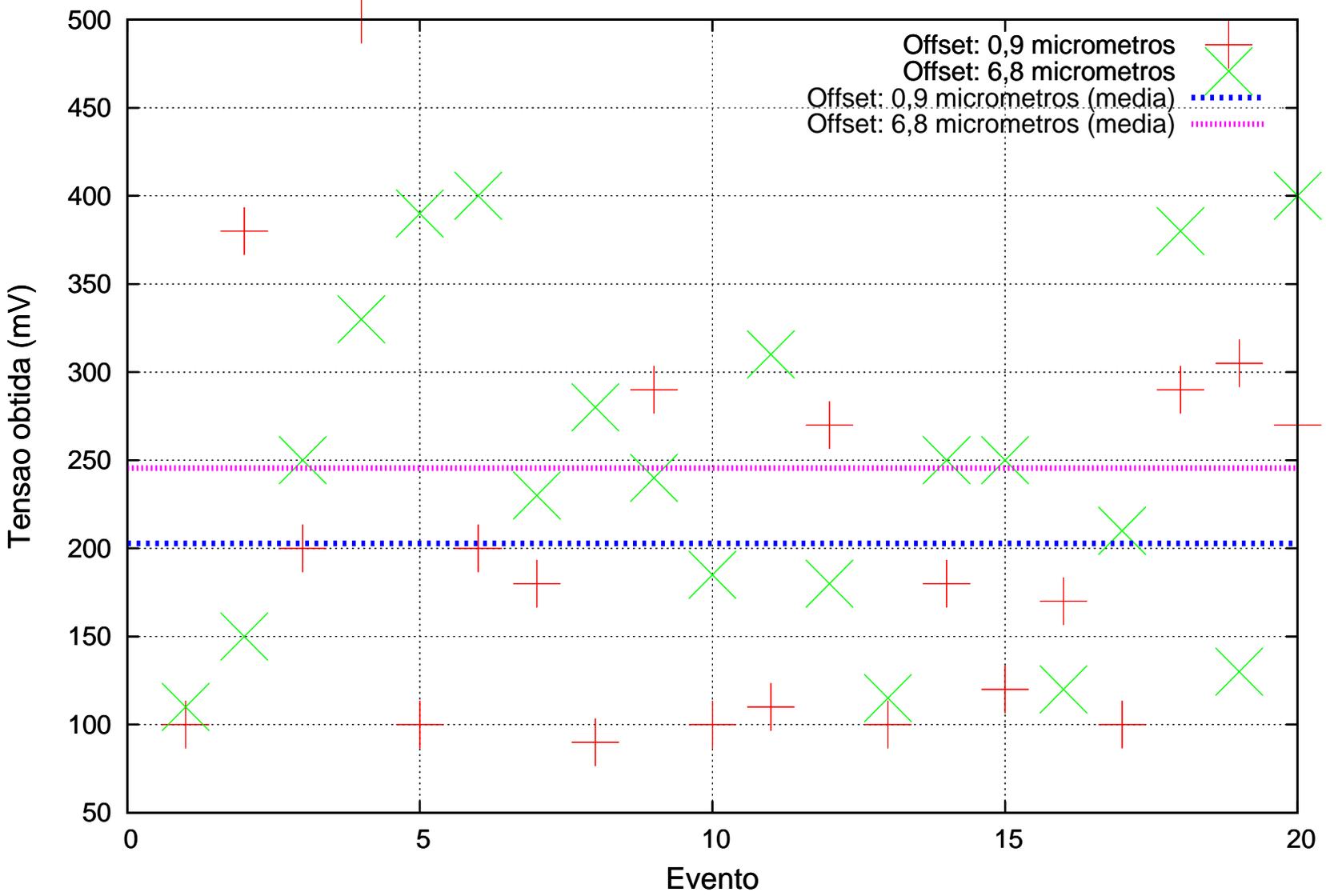
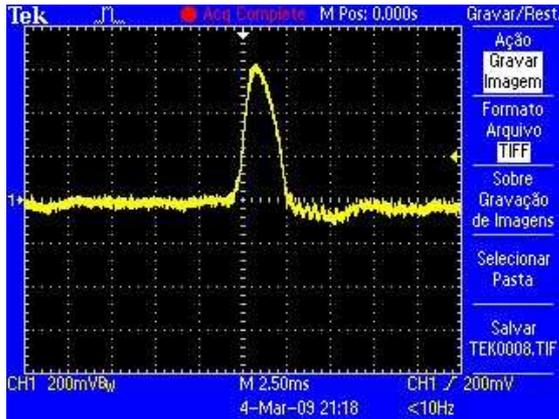
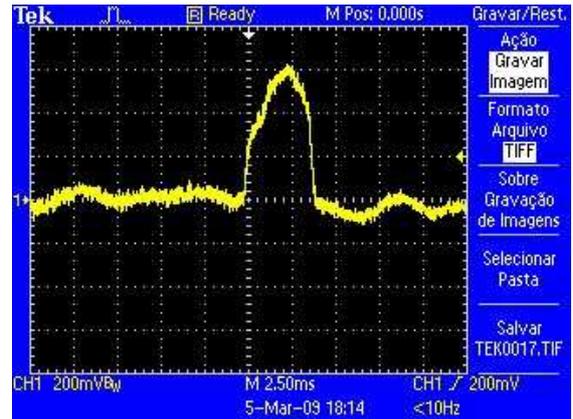


Figura 4.13: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=376$ metros a ganho $G=40$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu\text{m}$ e offset $6,8 \mu\text{m}$ com ganho de 50 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu\text{m}$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu\text{m}$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.14: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=376$ metros e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	200	mV
V_{TRIG}	200	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu\text{m}$.

Atributos	Valores configurados	Unidade
V_{DIV}	200	mV
V_{TRIG}	200	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu\text{m}$.

Tabela 4.9: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=376$ metros e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	400	800
2	250	800
3	300	380
4	630	800
5	240	500
6	800	480
7	380	440
8	400	800
9	600	370
10	220	580
11	750	800
12	800	570
13	220	600
14	640	570
15	800	320
16	800	800
17	600	510
18	370	610
19	220	220
20	400	800
-	-	-
Média	491	587,5
Desvio Padrão	222,9	186,57

Tabela 4.10: Medidas comparativas entre offsets para L=376 metros a ganho G=50 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{587,5 mV}{491 mV} = 1,558 dB \quad (4.16)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,0 ms - 0,5 ms = 0,5 ms \quad | \quad \tau_{R_{6,8}} = 2,0 ms - 0,5 ms = 1,5 ms \quad (4.17)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \quad | \quad B_{6,8} = \frac{0,35}{1,5 ms} = 0,234 kHz \quad (4.18)$$

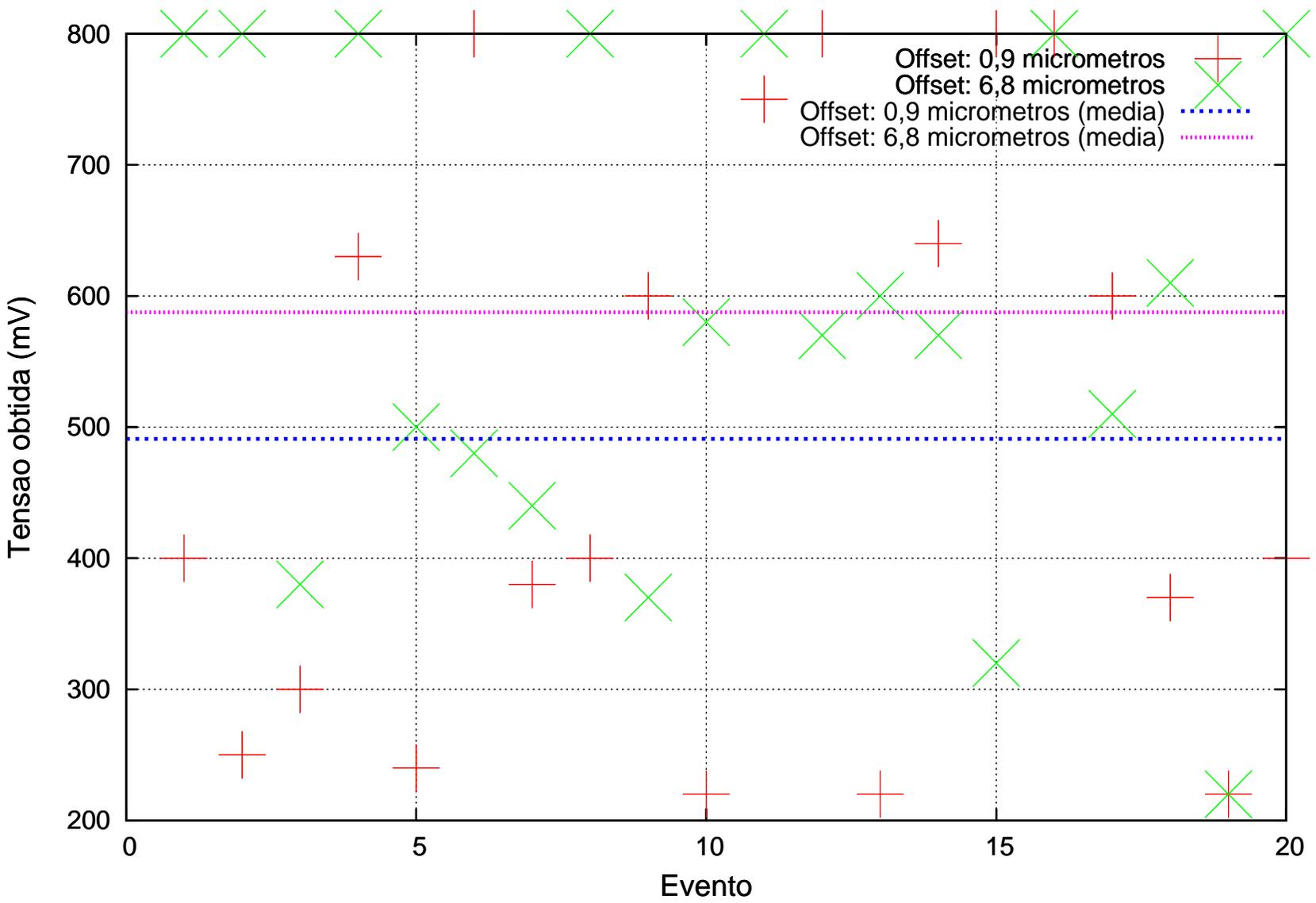
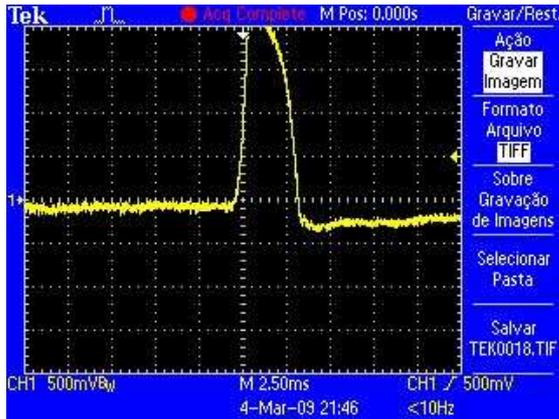
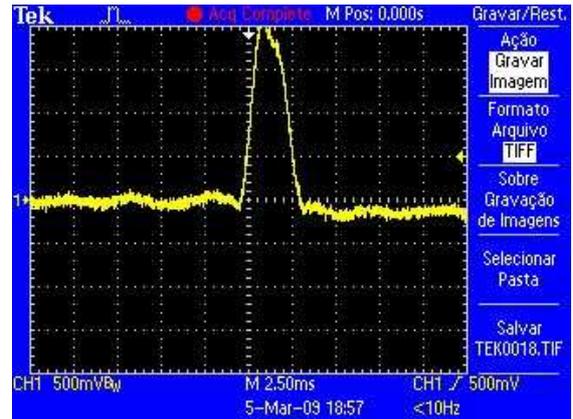


Figura 4.15: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=376$ metros a ganho $G=50$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 60 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.16: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=376$ metros e amplificador com ganho $G=60$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	500	mV
V_{TRIG}	500	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	500	mV
V_{TRIG}	500	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.11: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=376$ metros e amplificador com ganho $G=60$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	750	1300
2	1000	580
3	850	1500
4	1600	1800
5	2000	1400
6	2000	1250
7	600	2000
8	900	1700
9	2000	1350
10	1700	800
11	900	2000
12	1000	1500
13	850	1200
14	1300	1000
15	1600	650
16	2000	2000
17	1300	920
18	1200	1450
19	2000	2000
20	900	2000
-	-	-
Média	1322,5	1420
Desvio Padrão	494,57	465,93

Tabela 4.12: Medidas comparativas entre offsets para L=376 metros a ganho G=60 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{1420 mV}{1322,5 mV} = 0,618 dB \quad (4.19)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,0 ms - 0,5 ms = 0,5 ms \mid \tau_{R_{6,8}} = 1,2 ms - 0,5 ms = 0,7 ms \quad (4.20)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \mid B_{6,8} = \frac{0,35}{0,7 ms} = 0,5 kHz \quad (4.21)$$

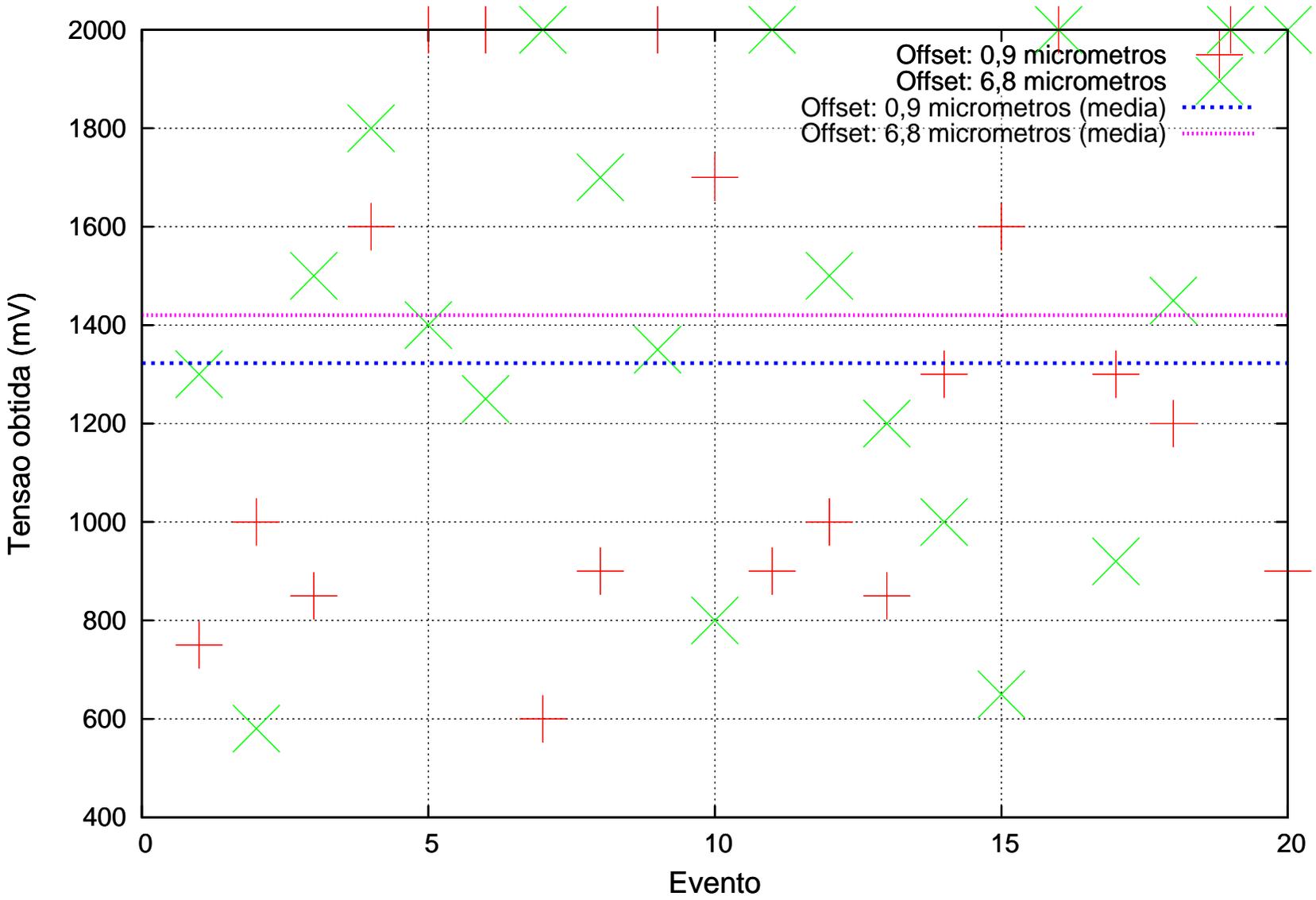
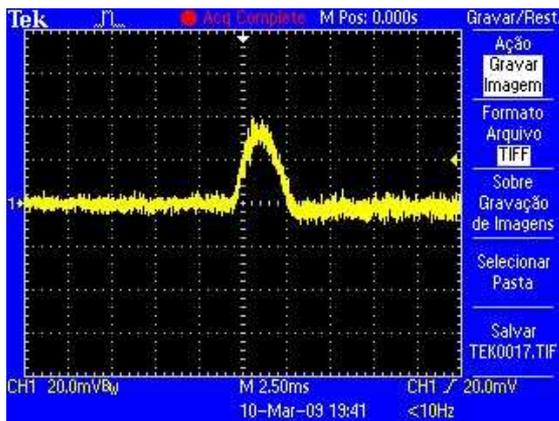


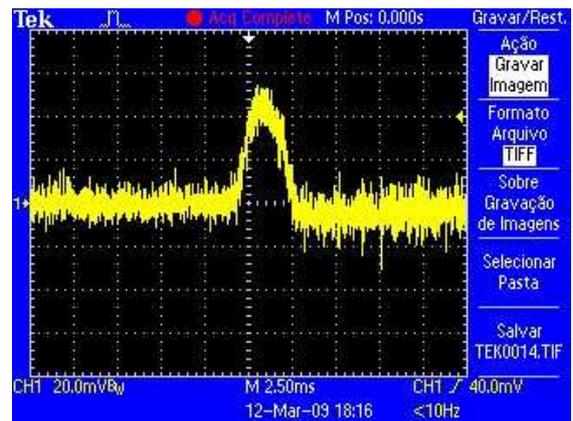
Figura 4.17: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=376$ metros a ganho $G=60$ dB.

4.1.3 Medidas realizadas para 1265 metros de comprimento ativo.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 40 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.18: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1265$ metros e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	20	mV
V_{TRIG}	20	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	20	mV
V_{TRIG}	40	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.13: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1265$ metros e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	55	20
2	32	40
3	20	35
4	15	20
5	36	25
6	50	80
7	35	40
8	53	80
9	80	20
10	20	35
11	20	50
12	30	20
13	40	20
14	20	40
15	40	40
16	32	20
17	23	20
18	35	20
19	32	40
20	60	20
-	-	-
Média	36,4	34,25
Desvio Padrão	16,39	18,52

Tabela 4.14: Medidas comparativas entre offsets para L=1265 metros a ganho G=40 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{34,25 mV}{34,4 mV} = -0,038 dB \quad (4.22)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,2 ms - 0,3 ms = 0,9 ms \quad | \quad \tau_{R_{6,8}} = 1,0 ms - 0,3 ms = 0,7 ms \quad (4.23)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,9 ms} = 0,389 kHz \quad | \quad B_{6,8} = \frac{0,35}{0,7 ms} = 0,5 kHz \quad (4.24)$$

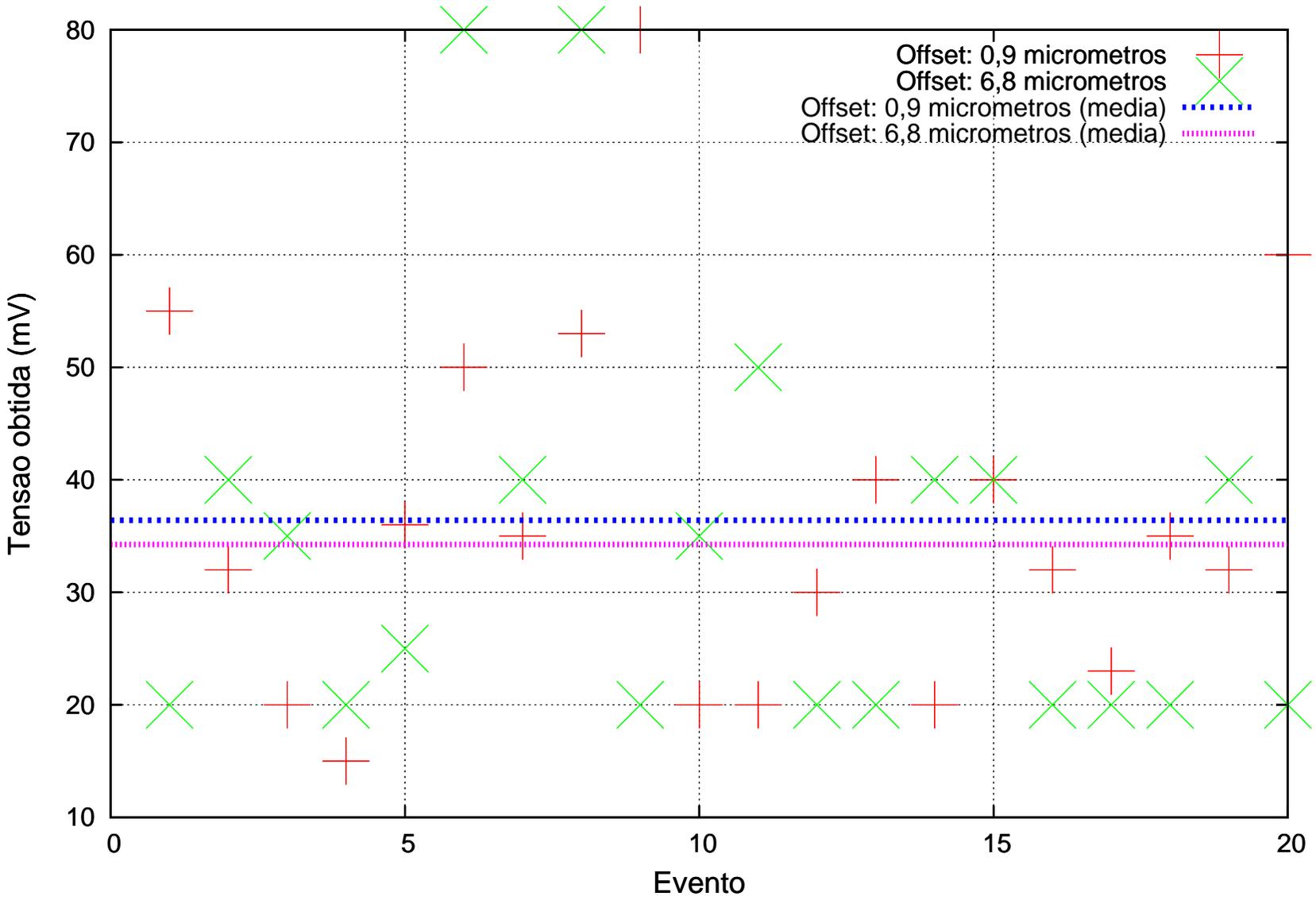
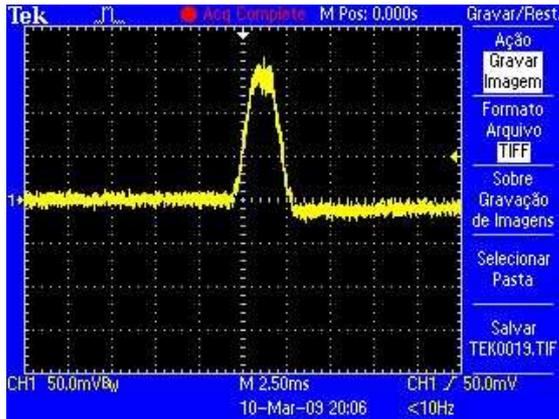
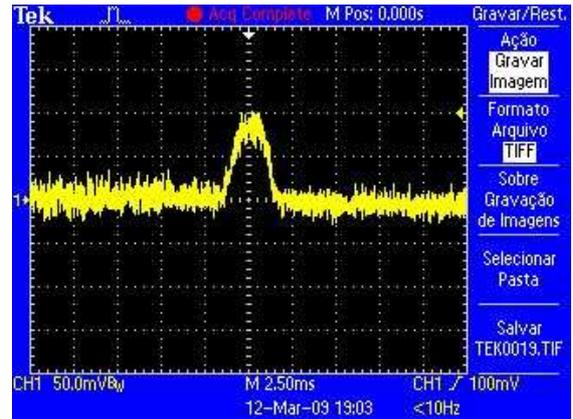


Figura 4.19: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1265$ metros a ganho $G=40$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 50 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.20: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1265$ metros e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	50	mV
V_{TRIG}	50	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	50	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.15: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1265$ metros e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	75	80
2	60	80
3	75	100
4	120	80
5	60	80
6	65	115
7	66	100
8	80	70
9	55	75
10	60	100
11	130	145
12	50	70
13	55	100
14	55	60
15	110	200
16	73	100
17	55	60
18	52	85
19	52	100
20	145	90
-	-	-
Média	74,65	94,5
Desvio Padrão	28,41	31,78

Tabela 4.16: Medidas comparativas entre offsets para L=1265 metros a ganho G=50 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{94,5 mV}{74,65 mV} = 2,048 dB \quad (4.25)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,0 ms - 0,5 ms = 0,5 ms \mid \tau_{R_{6,8}} = 1,5 ms - 0,5 ms = 1,0 ms \quad (4.26)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \mid B_{6,8} = \frac{0,35}{1,0 ms} = 0,35 kHz \quad (4.27)$$

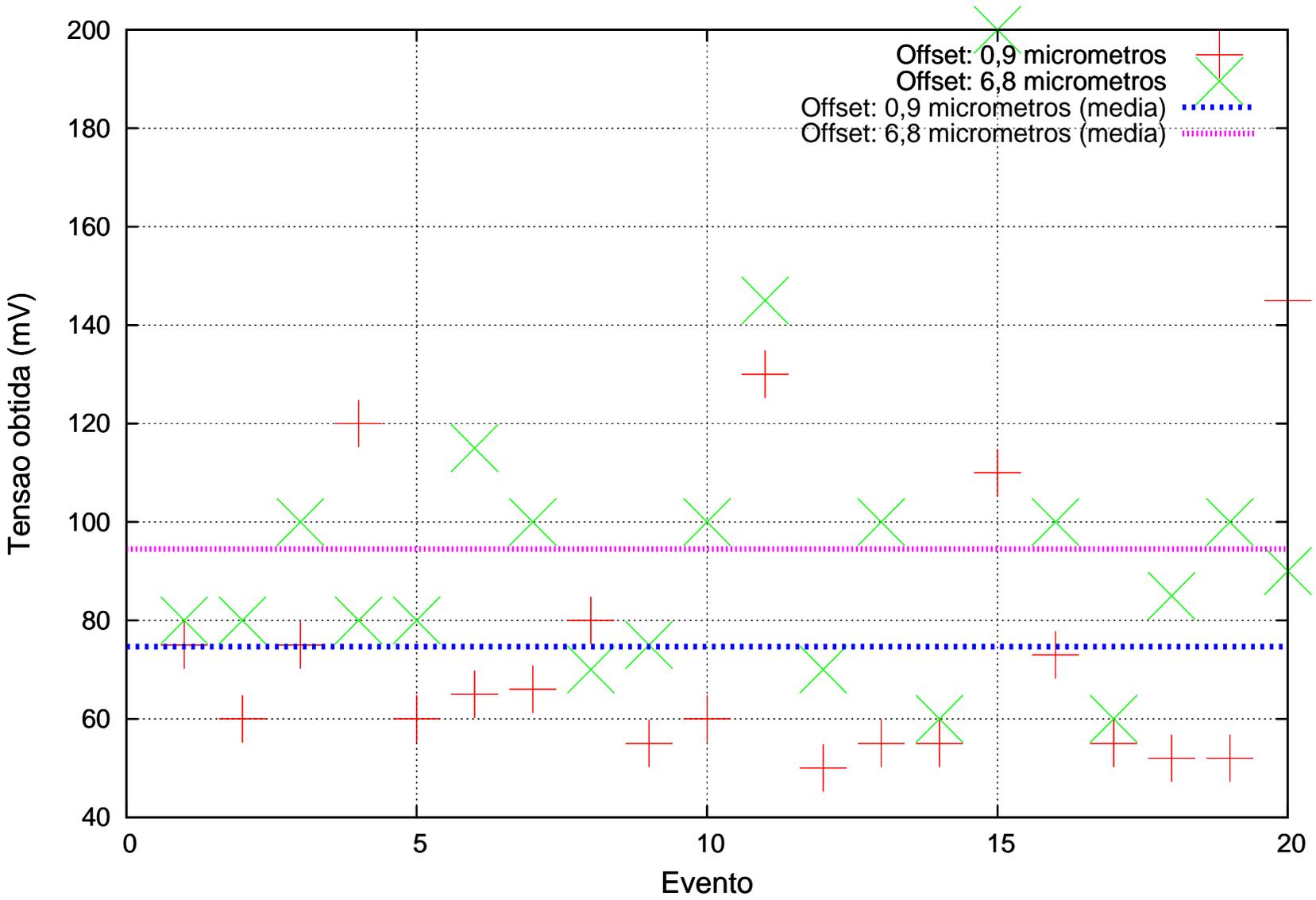
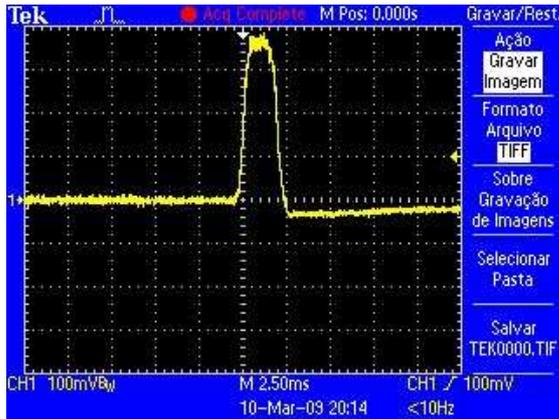
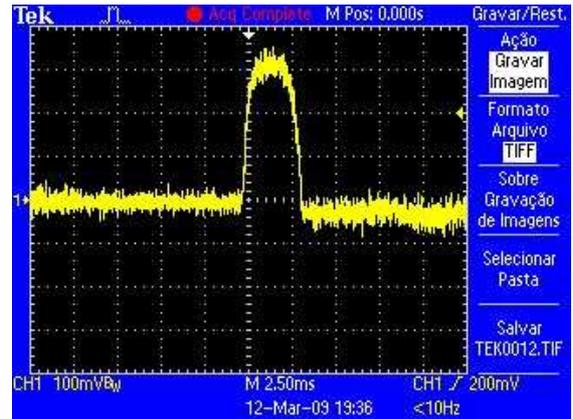


Figura 4.21: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1265$ metros a ganho $G=50$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 60 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.22: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1265$ metros e amplificador com ganho $G=60$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	200	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.17: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1265$ metros e amplificador com ganho $G=60$ db.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	380	280
2	200	350
3	110	400
4	200	400
5	100	190
6	120	200
7	200	200
8	100	200
9	400	200
10	180	220
11	170	205
12	120	250
13	300	300
14	180	290
15	400	400
16	130	200
17	85	250
18	115	200
19	100	300
20	360	285
-	-	-
Média	197,5	266
Desvio Padrão	109,02	73,5

Tabela 4.18: Medidas comparativas entre offsets para L=1265 metros a ganho G=60 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{266 mV}{197,5 mV} = 2,586 dB \quad (4.28)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,2 ms - 0,5 ms = 0,7 ms \quad | \quad \tau_{R_{6,8}} = 1,2 ms - 0,2 ms = 1,0 ms \quad (4.29)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,7 ms} = 0,5 kHz \quad | \quad B_{6,8} = \frac{0,35}{1,0 ms} = 0,35 kHz \quad (4.30)$$

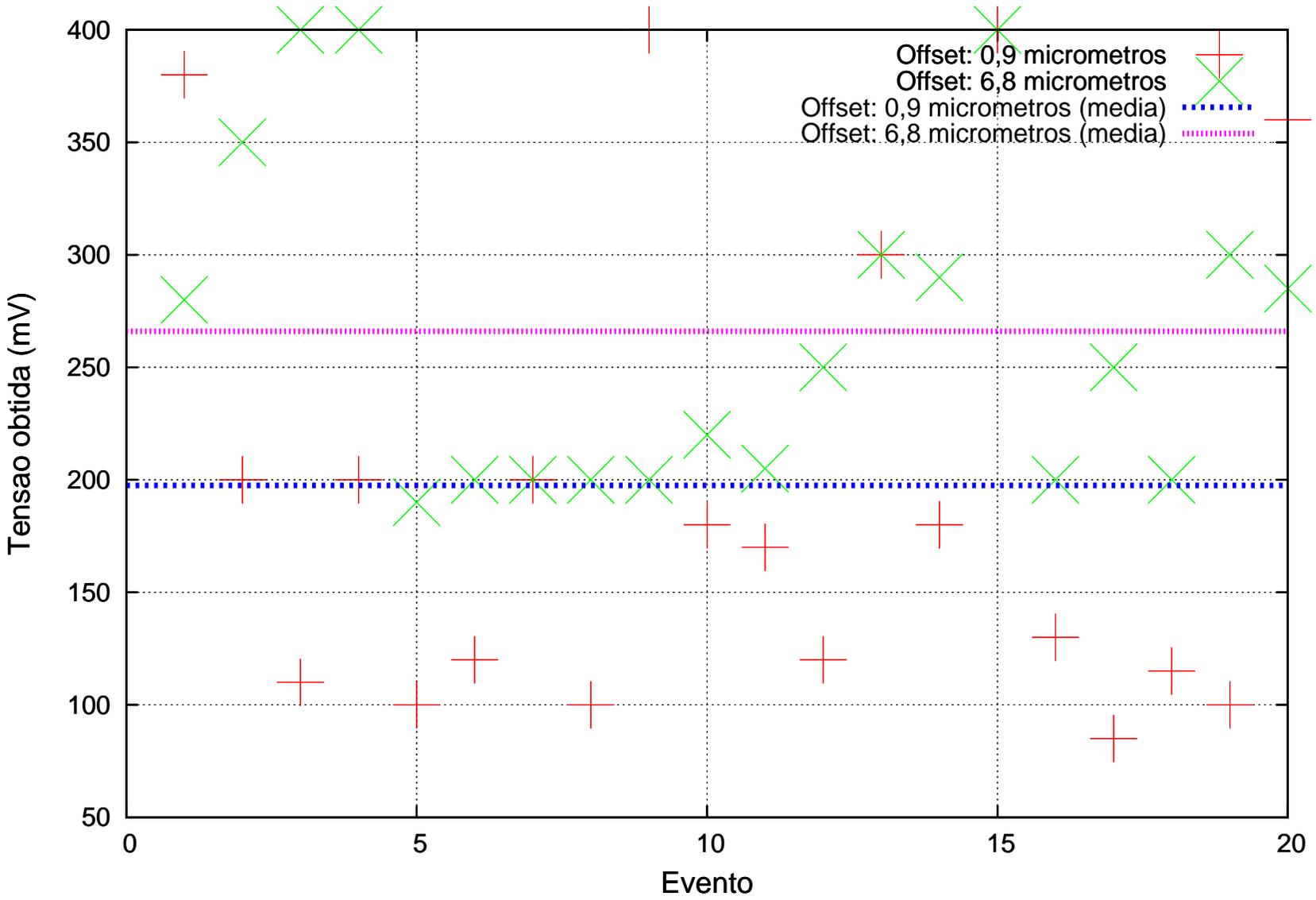
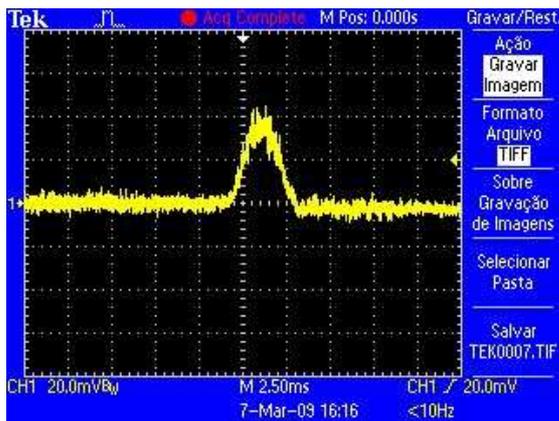


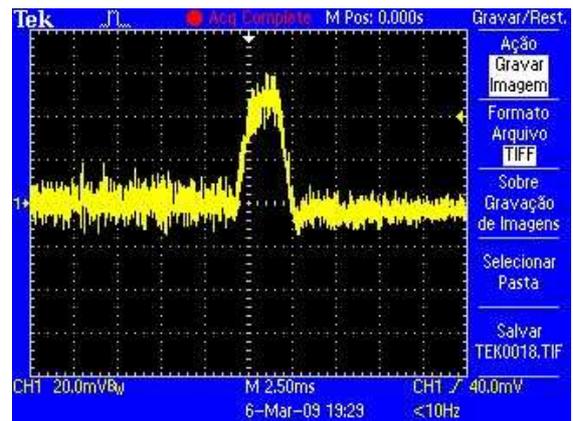
Figura 4.23: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1265$ metros a ganho $G=60$ dB.

4.1.4 Medidas realizadas para 1641 metros de comprimento ativo.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 40 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.24: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1641$ metros e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	20	mV
V_{TRIG}	20	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	20	mV
V_{TRIG}	40	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.19: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1641$ metros e amplificador com ganho $G=40$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	30	37
2	45	55
3	20	50
4	30	55
5	36	53
6	35	60
7	28	68
8	40	38
9	20	80
10	17	65
11	15	35
12	16	68
13	40	75
14	20	40
15	22	80
16	16	58
17	23	58
18	17	33
19	27	52
20	20	80
-	-	-
Média	25,85	57
Desvio Padrão	9,24	15,28

Tabela 4.20: Medidas comparativas entre offsets para L=1641 metros a ganho G=40 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{57 mV}{25,85 mV} = 6,868 dB \quad (4.31)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,0 ms - 0,5 ms = 0,5 ms \quad | \quad \tau_{R_{6,8}} = 0,7 ms - 0,2 ms = 0,5 ms \quad (4.32)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \quad | \quad B_{6,8} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \quad (4.33)$$

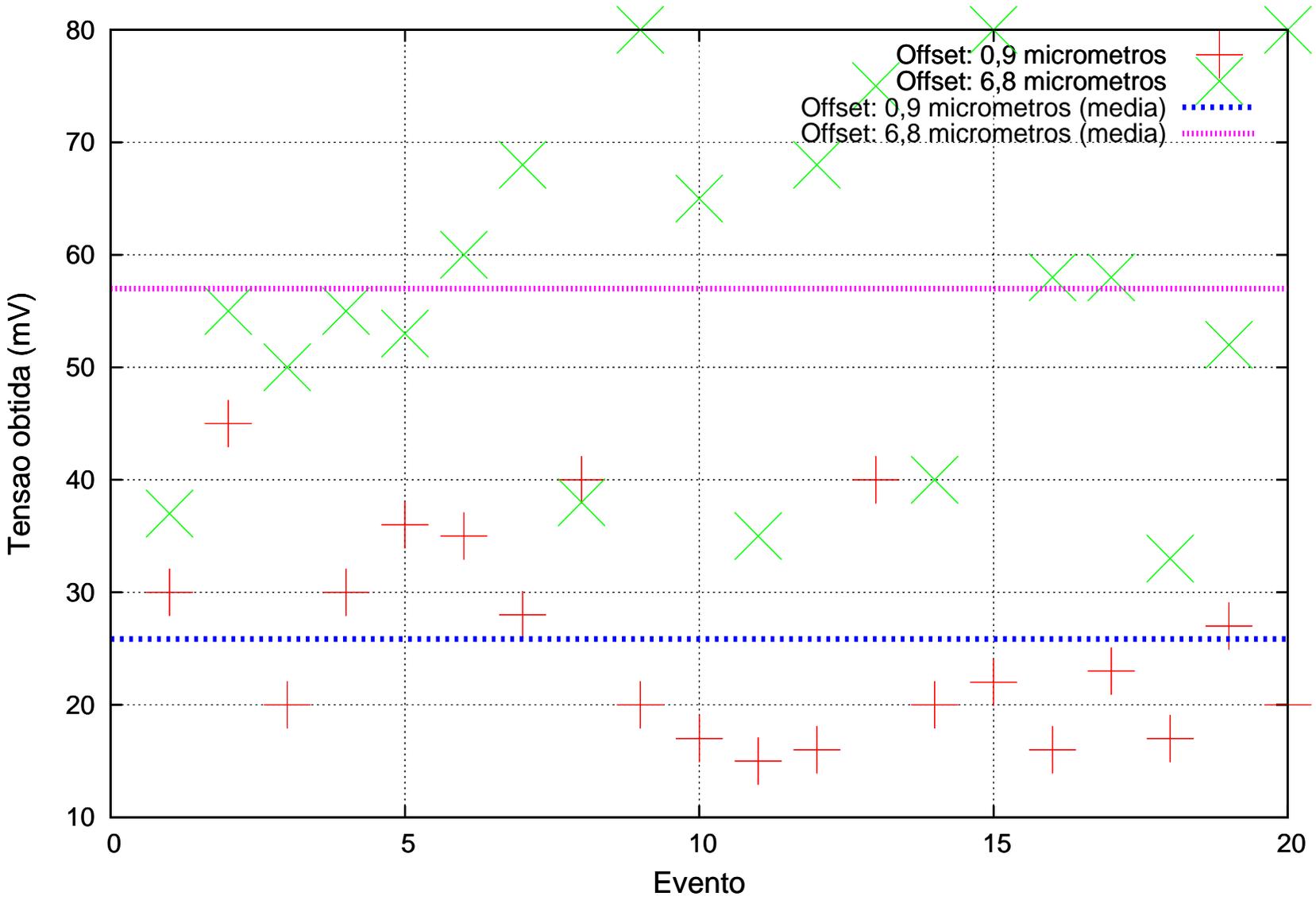
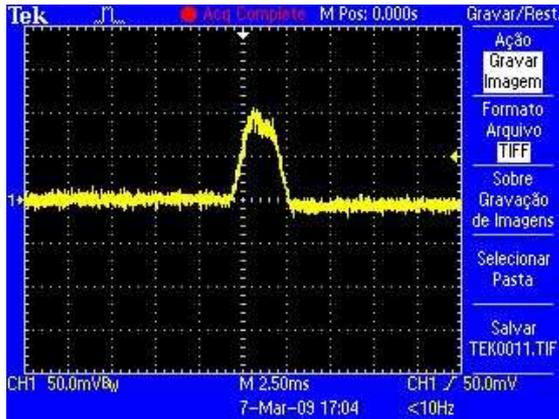
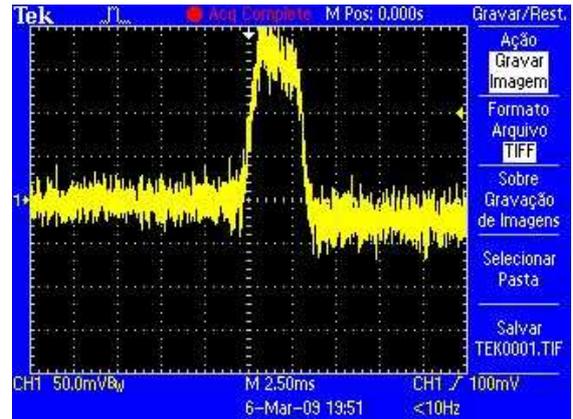


Figura 4.25: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1641$ metros a ganho $G=40$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 50 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.26: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1641$ metros e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	50	mV
V_{TRIG}	50	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	50	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.21: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1641$ metros e amplificador com ganho $G=50$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	50	170
2	90	200
3	70	180
4	50	200
5	70	200
6	60	135
7	75	200
8	80	115
9	60	200
10	75	130
11	55	200
12	90	135
13	55	140
14	75	110
15	55	130
16	60	200
17	125	100
18	50	110
19	110	105
20	60	135
-	-	-
Média	70,75	154,75
Desvio Padrão	20,34	38,98

Tabela 4.22: Medidas comparativas entre offsets para L=1641 metros a ganho G=50 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{154,75 mV}{70,75 mV} = 6,798 dB \quad (4.34)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 0,8 ms - 0,2 ms = 0,6 ms \quad | \quad \tau_{R_{6,8}} = 1,0 ms - 0,5 ms = 0,5 ms \quad (4.35)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,6 ms} = 0,583 kHz \quad | \quad B_{6,8} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \quad (4.36)$$

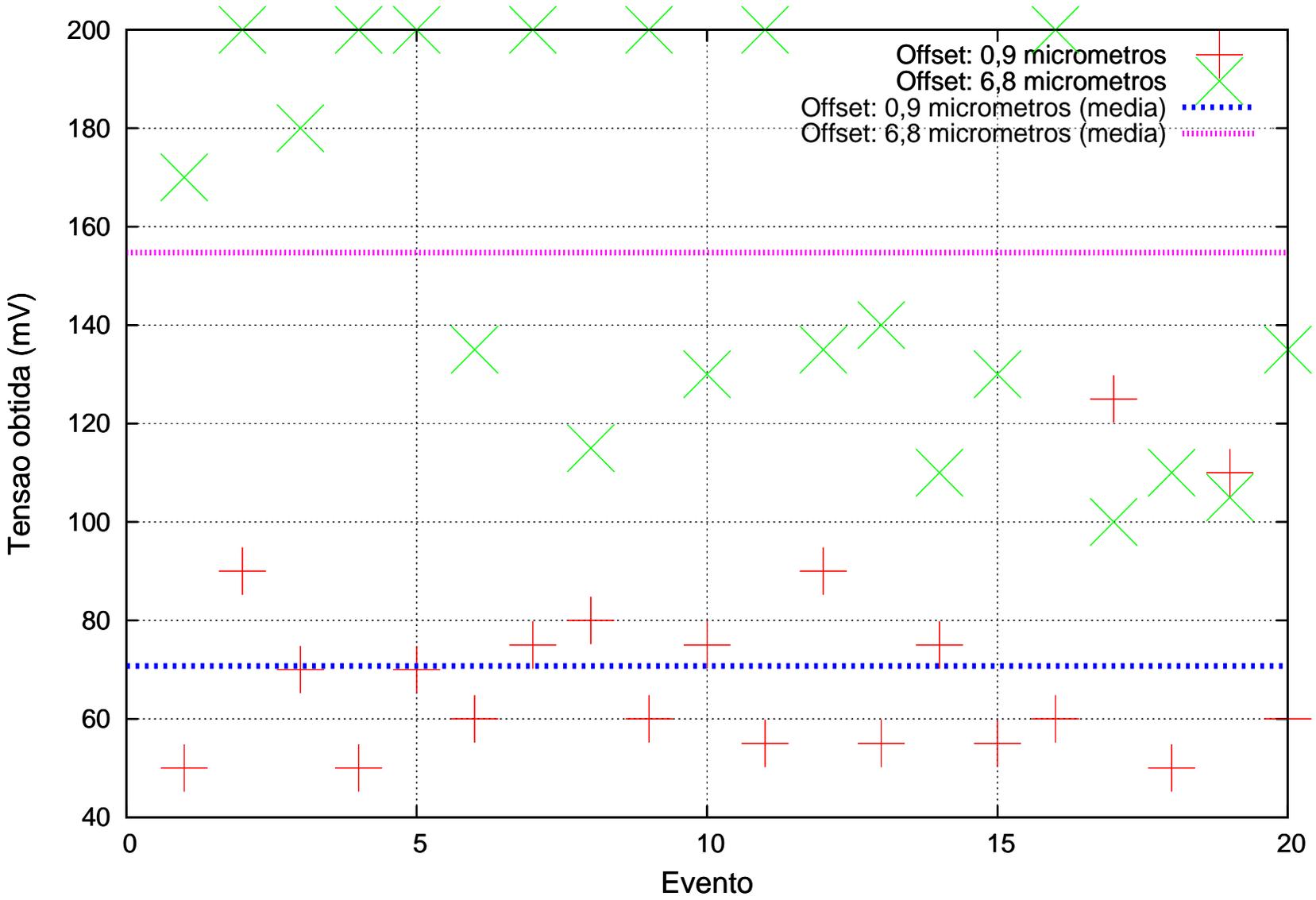
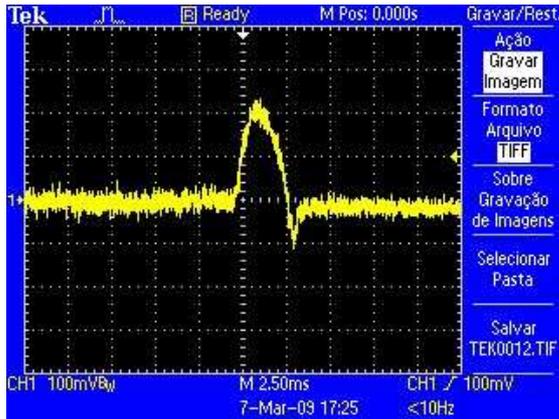
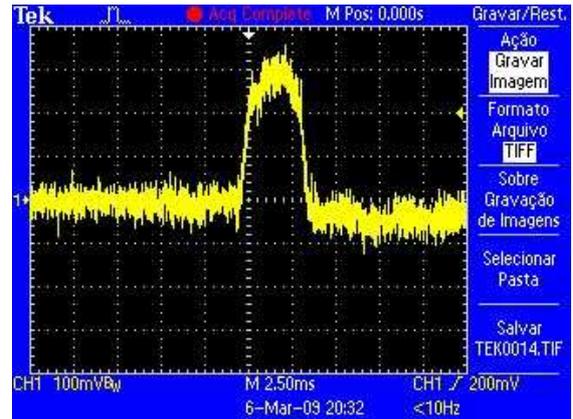


Figura 4.27: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1641$ metros a ganho $G=50$ dB.

Medidas obtidas das emendas SM/MM de offset $0,9 \mu m$ e offset $6,8 \mu m$ com ganho de 60 dB no receptor.



(a) Amostra de interferência obtida com a emenda de $0,9 \mu m$ de desalinhamento lateral.



(b) Amostra de interferência obtida com a emenda de $6,8 \mu m$ de desalinhamento lateral.

Figura 4.28: Exemplo típico de amostras obtidas utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1641$ metros e amplificador com ganho $G=60$ dB.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	100	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(a) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $0,9 \mu m$.

Atributos	Valores	Unidade
V_{DIV}	100	mV
V_{TRIG}	200	mV
t_{DIV}	2,5	ms

(b) Escala no osciloscópio com a emenda de Offset $6,8 \mu m$.

Tabela 4.23: Configurações do osciloscópio utilizando fibra GI-MM de comprimento $L=1641$ metros e amplificador com ganho $G=60$ dB.

Evento	$V_{MAX}mV$ (Offset 0,9 μm)	$V_{MAX}mV$ (Offset 6,8 μm)
1	250	320
2	100	180
3	120	400
4	150	170
5	400	200
6	100	200
7	140	220
8	180	400
9	180	280
10	175	335
11	330	400
12	330	280
13	200	380
14	400	400
15	100	310
16	100	400
17	180	170
18	200	280
19	100	240
20	105	370
-	-	-
Média	192	296,75
Desvio Padrão	99,57	86,52

Tabela 4.24: Medidas comparativas entre offsets para L=1641 metros a ganho G=60 dB.

A diferença de potência óptica entre os *offsets* pode ser calculada como:

$$NdB = 20 \log \frac{296,75 mV}{192 mV} = 3,781 dBv \quad (4.37)$$

O valor do *RiseTime* é medido e a banda é calculada como:

$$\tau_{R_{0,9}} = 1,0 ms - 0,5 ms = 0,5 ms \quad | \quad \tau_{R_{6,8}} = 1,0 ms - 0,2 ms = 0,8 ms \quad (4.38)$$

$$B_{0,9} = \frac{0,35}{0,5 ms} = 0,7 kHz \quad | \quad B_{6,8} = \frac{0,35}{0,8 ms} = 0,4375 kHz \quad (4.39)$$

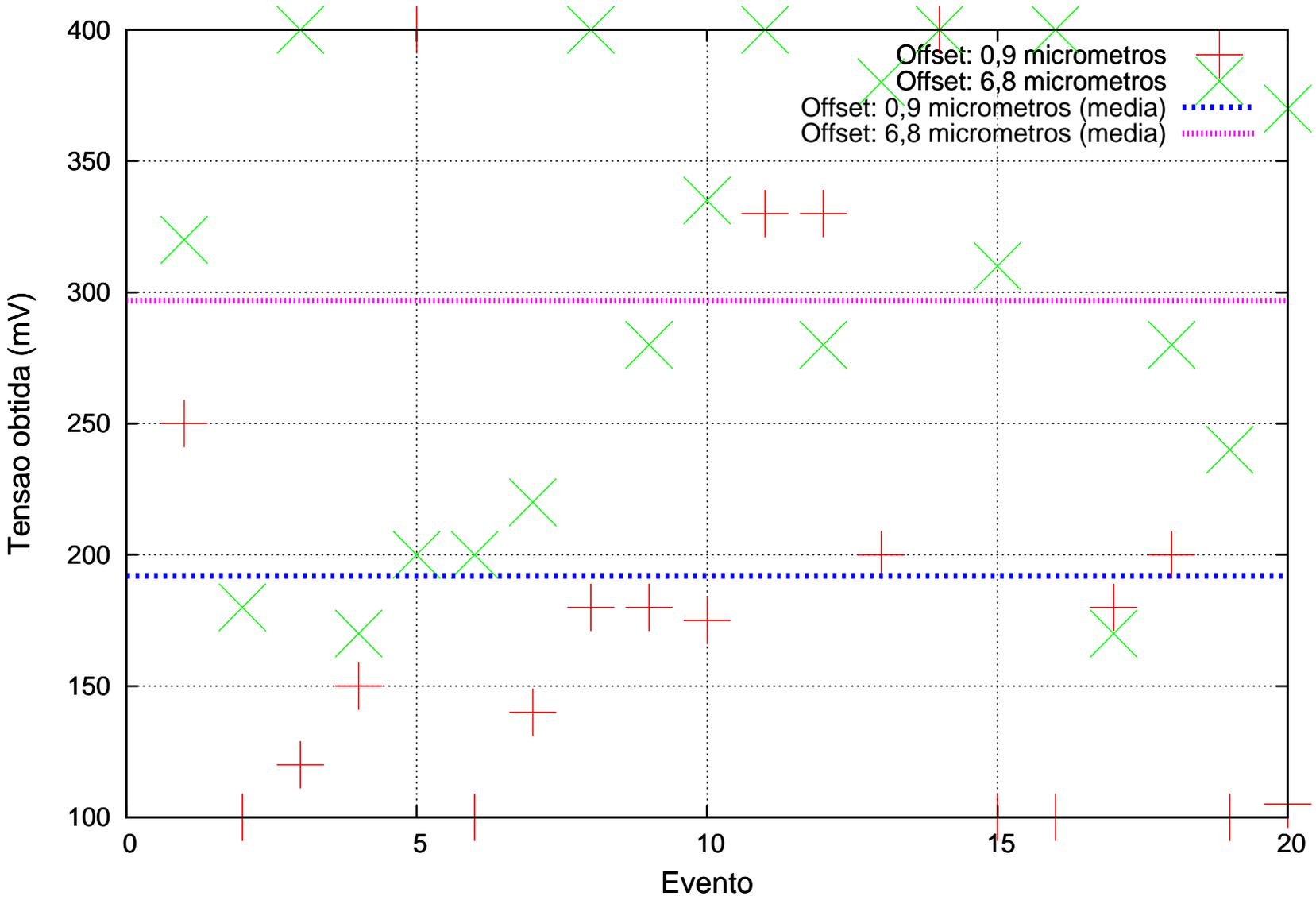


Figura 4.29: Medidas realizadas e média entre *offsets* para comprimento $L=1641$ metros a ganho $G=60$ dB.

4.2 Resultados do dispositivo modalmétrico SMS em modo reflexivo - Quantitativo

Para cada emenda (*offsets* $0,9 \mu m$ e $6,8 \mu m$), apresentam-se nas tabelas 4.25 e 4.26 os valores das médias e desvios padrão convertidos em dB. No gráfico 4.30 é apresentado os valores em dB das médias das emendas utilizadas. Nas tabelas 4.27 e 4.28 são apresentados os valores medidos e calculados de *RiseTime* e Banda das medidas selecionadas. Por fim, na tabela 4.29 são apresentadas as diferenças em dB das médias em relação aos ganhos e comprimentos de enlace utilizados.

comprimento ativo	G 40 dB (dB)	G 50 dB (dB)	G 60 dB (dB)
1 m	44,43	54,2	63,09
376 m	46,14	53,82	62,43
1265 m	31,22	37,46	45,91
1641 m	28,25	36,99	45,67

(a) Médias em dB para emenda de $0,9 \mu m$.

comprimento ativo	G 40 dB (dB)	G 50 dB (dB)	G 60 dB (dB)
1 m	47,81	55,81	64,3
376 m	47,8	55,38	53,37
1265 m	30,69	39,51	48,5
1641 m	35,12	43,79	49,45

(b) Médias em dB para a emenda de $6,8 \mu m$.

Tabela 4.25: Valores em dB de médias das amostras realizadas com *offset* $0,9 \mu m$ e $6,8 \mu m$.

comprimento ativo	G 40 dB (dB)	G 50 dB (dB)	G 60 dB (dB)
1 m	34,25	46,64	54,28
376 m	40,97	46,96	53,88
1265 m	24,29	29,07	40,75
1641 m	19,31	26,17	39,96

(a) Desvio padrão em dB da emenda com *offset* $0,9 \mu m$.

comprimento ativo	G 40 dB (dB)	G 50 dB (dB)	G 60 dB (dB)
1 m	40,13	46,64	53,19
376 m	39,82	45,42	53,37
1265 m	25,35	30,04	37,33
1641 m	23,68	31,82	38,74

(b) Desvio padrão em dB da emenda com *offset* $6,8 \mu m$.

Tabela 4.26: Valores em dB de desvios padrão das amostras realizadas com *offset* $0,9 \mu m$ e $6,8 \mu m$.

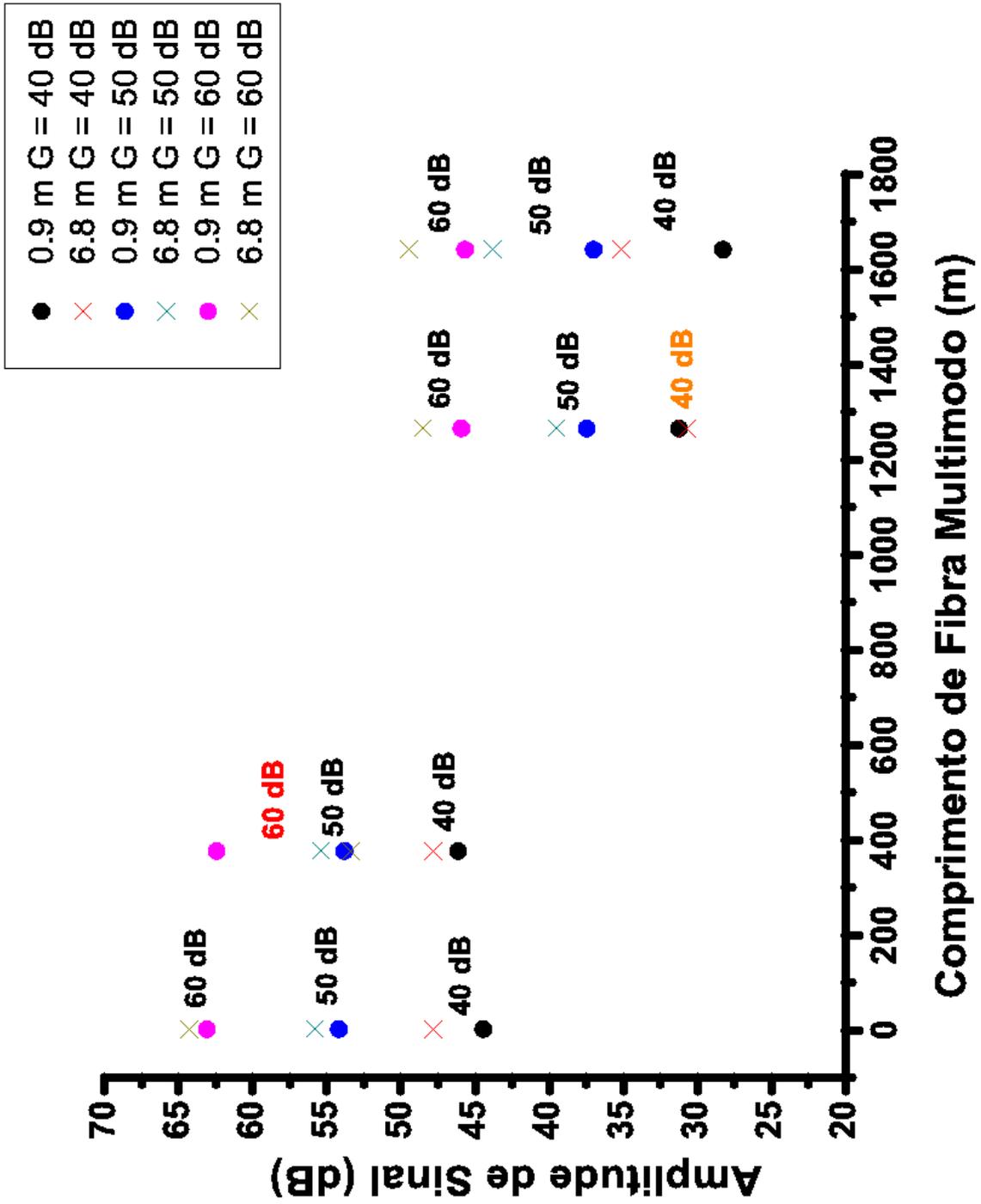


Figura 4.30: Valores em dB de médias das amostras realizadas com *offset* 0,9 μm e 6,8 μm .

comprimento ativo	<i>RiseTime</i> (ms)	Banda (kHz)
1 m	0,5	0,7
376 m	1	0,35
1265 m	0,9	0,389
1641 m	0,5	0,7

(a) Valores de *RiseTime* e Banda para G=40 dB.

comprimento ativo	<i>RiseTime</i> (ms)	Banda (kHz)
1 m	0,75	0,466
376 m	0,5	0,7
1265 m	0,5	0,7
1641 m	0,6	0,583

(b) Valores de *RiseTime* e Banda para G=50 dB.

comprimento ativo	<i>RiseTime</i> (ms)	Banda (kHz)
1 m	0,3	1,167
376 m	0,5	0,7
1265 m	0,7	0,5
1641 m	0,5	0,7

(c) Valores de *RiseTime* e Banda para G=60 dB.

Tabela 4.27: Valores de *RiseTime* e Banda para as amostras realizadas com *offset* 0,9 μm .

comprimento ativo	<i>RiseTime</i> (ms)	Banda (kHz)
1 m	1	0,35
376 m	1,3	0,27
1265 m	0,7	0,5
1641 m	0,5	0,7

(a) Valores de *RiseTime* e Banda para G=40 dB.

comprimento ativo	<i>RiseTime</i> (ms)	Banda (kHz)
1 m	1	0,35
376 m	1,5	0,234
1265 m	1	0,35
1641 m	0,5	0,7

(b) Valores de *RiseTime* e Banda para G=50 dB.

comprimento ativo	<i>RiseTime</i> (ms)	Banda (kHz)
1 m	0,3	1,167
376 m	0,7	0,5
1265 m	1	0,35
1641 m	0,8	0,4375

(c) Valores de *RiseTime* e Banda para G=60 dB.

Tabela 4.28: Valores de *RiseTime* e Banda para as amostras realizadas com *offset* 6,8 μm .

comprimento ativo	G 40 dB (dB)	G 50 dB (dB)	G 60 dB (dB)
1 m	3,381	1,610	1,205
378 m	1,661	1,558	0,618
1265 m	-0,038	2,048	2,586
1641 m	6,868	6,798	3,781

Tabela 4.29: Tabela de resultados das diferenças em dB das emendas de *offset* 0,9 μm e 6,8 μm .

A partir dos dados obtidos, podemos afirmar que quanto menor o enlace, maior será a intensidade detectada das perturbações (logo, maior sensibilidade). Percebe-se também que quanto maior for o comprimento de fibra MM, menor será a variação dos resultados.

Pela figura 4.30, nota-se que de 1 m à 1264 m observou-se uma diminuição média de aproximadamente 15 dB para qualquer uma das emendas utilizadas.

Analisando a tabela 4.29, percebe-se que para cada comprimento utilizado (com exceção do segmento de 1265 metros), há uma tendência da magnitude das diferença diminuir conforme aumento da amplificação do receptor. Apenas no segmento de 1265 metros esta tendência mostrou-se inversa e ainda apresentou um resultado negativo (média quantitativa da emenda de 0,9 μm mostrou-se superior ao obtida da emenda de 6,8 μm) porém pequeno (valores muito próximos).

Teoricamente é esperado que a emenda SM/MM com maior desalinhamento lateral apresente resultados com intensidade maiores. No geral esta premissa é atendida quando os enlaces físicos são maiores (acima de 1000 metros), onde pode-se observar resultados com maior diferença entre as duas emendas utilizadas.

A menor variação de resultados com o aumento do comprimento está provavelmente relacionado com a re-distribuição (acoplamento modal) dos modos propagantes na fibra óptica. Os modos ao percorrerem um segmento GI-MM de maior distância, acabarão por estar distribuídos de uma forma mais homogênea (e isto é verificado com os resultados de 1265 m até os de 1641 m).

Fica bem explícito que o desalinhamento lateral na emenda SM/MM é um fator importante para o efeito de “sensibilidade” no sistema modalmétrico. A justificativa para o fenômeno de maior ou menor “sensibilidade” é que quando há um desalinhamento quase

nulo (alinhamento ideal entre as fibras SM e GI-MM), a potência acoplada da fibra SM à GI-MM excitará poucos modos. Logo, se uma emenda SM e GI-MM for concentricamente perfeita, somente o modo LP_{01} será excitado na fibra GI-MM (nota-se que o modo LP_{01} na fibra GI-MM se estende mais no plano transversal do que na fibra SM devido aos perfis de índices de refração e diâmetros serem diferentes) e desta forma, não haverá modos suficientes na fibra GI-MM para serem modulados em sua fase em virtude de uma perturbação. Porém, quando há um desalinhamento lateral, os modos não simétricos (tipo LP_{nm} onde $n \neq 0$) serão excitados, fato que acaba por implicar numa maior visibilidade das franjas de interferência MMI que ocorre na emenda SM/MM.

O receptor utilizado possui como característica sua capacidade de captura de banda inversamente relacionada a sua capacidade de amplificação. Conclui-se que para obter mais dados de uma interação é melhor utilizar dispositivos mais rápidos. Porém, para todos os casos do experimento a amplificação é efetiva mesmo quando a banda é comprometida pois a interação de interferência é em torno de 1 ms (interação “longa”, o que não permitiu verificar a banda máxima do sistema modal métrico). O ideal seria algum sistema de amplificação que não tivesse sua banda de captura prejudicada e o sistema de testes mais rápido (grandeza ultrasônica) para verificar a verdadeira banda (máxima) do sistema modal métrico.

É importante lembrar que há uma dependência do comprimento físico da fibra sensora com o comprimento de onda para o defasamento dos modos. Logo, dependendo do comprimento físico da fibra sensora o mesmo pode ser utilizado para ampliar ou diminuir a “sensibilidade” do sistema.

4.3 Estimativa de tempo de vôo dos pulsos

Quanto as perturbações observadas nos gráficos anteriores é visto que praticamente todas as perturbações ocorridas apresentam um espaçamento temporal de aproximadamente 2,5 ms. Este pulso detectado pode inicialmente ser confundido com o pulso inicial gerado pela perturbação e concatenado com o de retorno (segundo pulso que está a ir ao fim do segmento MM-GI e retornando fração de sua potência pelo segmento). Porém, analisado matematicamente e supondo a velocidade da luz dentro da fibra como sendo $v = 2 \cdot 10^8 m/s$ e a distância do segmento a maior utilizada no experimento, tem-se:

$$v = \frac{s}{t} \quad (4.40)$$

onde;

v=velocidade da luz na fibra ($2 \cdot 10^8 m/s$);

s=1641 (m);

t=tempo (s)

A distância do segundo pulso será o dobro do comprimento da fibra MM-GI. A diferença destes pulso em relação ao tempo será:

$$2 \cdot 10^8 = \frac{2 \cdot 1641}{t} \quad (4.41)$$

$$10^8 = \frac{1641}{t} \quad (4.42)$$

$$t = \frac{1641}{10^8} \quad (4.43)$$

$$t = 16,41 \mu s \quad (\ll 2,5 ms) \quad (4.44)$$

Comparando com os gráficos obtidos, o pulso visto não é o pulso inicial combinado com o pulso de retorno concatenado. Para que os dois pudessem ser vistos a uma escala de 2,5 ms, verifica-se com os mesmos cálculos que:

$$2 \cdot 10^8 = \frac{s}{2,5 \cdot 10^{-3}} \quad (4.45)$$

$$s = 2 \cdot 10^8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \quad (4.46)$$

$$s = 500 \cdot 10^3 m \text{ (enlace)} \quad (4.47)$$

$$s = \frac{500 \cdot 10^3}{2} \quad (4.48)$$

$$s = 250 \cdot 10^3 m \text{ (comprimento real)} \quad (4.49)$$

Logo, o comprimento de fibra MM-GI necessário para a detecção visual dos pulsos no osciloscópio deveria ser de 250 quilômetros.

4.4 Estimativa do tempo de interação da perturbação na fibra GI-MM

Para os pulsos observados no osciloscópio, estes podem ser explicados com o teorema de conservação de energia. No sistema utilizado (esfera e rampa com o intuito de padronizar a perturbação), temos a esfera com uma certa energia potencial (devido a altura “h” em relação ao plano) que é convertida em energia de rotação e translação do corpo.

Logo, pela conservação de energia existente no sistema, tem-se:

$$E_p = E_c + E_r \quad (4.50)$$

onde,

E_p → Energia potencial

E_c → Energia cinética de translação.

$E_r \rightarrow$ Energia cinética de rotação.

Podemos escrever suas partes como:

$$\begin{aligned} E_p = mgh \quad | \quad E_c = \frac{mv_{cm}^2}{2} \quad | \quad E_r = \frac{I\omega^2}{2} \\ I = KmR^2 \quad | \quad v = \omega.r \quad | \quad \omega = \frac{2v_{cm}}{R} \end{aligned} \tag{4.51}$$

onde,

$m \rightarrow$ Massa (Kg)

$g \rightarrow$ Aceleração da gravidade. (m/s^2).

$h \rightarrow$ Altura (m)

$v_{cm} \rightarrow$ Velocidade do centro de massa (m/s).

$I \rightarrow$ Momento de Inércia (esfera)

$\omega \rightarrow$ Velocidade angular (rad/s).

$K \rightarrow$ Fator geométrico (para esfera, $K = \frac{2}{5}$)

$r \rightarrow$ Distancia de um ponto ao centro de massa do corpo (para esfera, raio) (m)

$R \rightarrow$ Extremo do corpo (para esfera, raio máximo) (m)

Aplicando as formulas:

$$E_p = E_c + E_r \tag{4.52}$$

$$mgh = \frac{mv_{cm}^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} \tag{4.53}$$

$$mgh = \frac{1}{2} [mv_{cm}^2 + (KmR^2)\omega^2] \tag{4.54}$$

$$mgh = \frac{1}{2} \left[mv_{cm}^2 + \left(\frac{2}{5}mR^2 \right) \omega^2 \right] \quad (4.55)$$

$$mgh = \frac{1}{2} \left[mv_{cm}^2 + \left(\frac{2}{5}mR^2 \right) \left(\frac{2v_{cm}}{R} \right)^2 \right] \quad (4.56)$$

$$mgh = \frac{1}{2} \left[mv_{cm}^2 + \left(\frac{2}{5}mR^2 \right) \left(\frac{4v_{cm}^2}{R^2} \right) \right] \quad (4.57)$$

$$mgh = \frac{1}{2} \left[mv_{cm}^2 + \frac{8}{5}mv_{cm}^2 \right] \quad (4.58)$$

$$gh = \frac{v_{cm}^2}{2} \left[1 + \frac{8}{5} \right] \quad (4.59)$$

$$gh = v_{cm}^2 \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{13}{5} \right] \quad (4.60)$$

$$gh = \left(\frac{s}{t} \right)^2 \cdot 1,3 \quad (4.61)$$

$$t^2 = 1,3 \frac{s^2}{gh} \quad (4.62)$$

$$t = \sqrt{1,3 \frac{s^2}{gh}} \quad (4.63)$$

A variável “s” é o espaço percorrido pela esfera, representado por uma seção de arco da curvatura da fibra.

Sendo a esfera supostamente perfeita, sua velocidade não se alterando após a saída da rampa, a fibra GI-MM como um cilindro também perfeito e a fibra possuindo um diâmetro muitas vezes menor ao diâmetro da esfera, podemos sugerir que a distância percorrida é o diâmetro com o efeito de curvatura da esfera. Assim, definida como “ πR ”.

Para a gravidade utiliza-se valor de $9,8 \text{ m/s}^2$ e a altura de lançamento da esfera na rampa é o valor da altura da rampa até o centro de massa da esfera. Sendo o diâmetro

da esfera como 25,29 mm e a altura máxima de lançamento na rampa como 24,24 mm, o, valor totalizado de h é de 33,885 mm (0,036885). A fibra óptica por estar com sua capa tem seu diâmetro de 250 μm . Logo,

$$t = \sqrt{1,3 \left(\frac{(\pi R)^2}{9,8 \cdot 0,036885} \right)} \quad (4.64)$$

$$t = \pi R \sqrt{\frac{1,3}{0,361473}} \quad (4.65)$$

$$t = 3,1415 \cdot \left(\frac{250}{2} 10^{-6} \right) \cdot 1,8964 \quad (4.66)$$

$$t = 0,7447 \text{ ms} \quad (4.67)$$

O tempo de contato que a esfera exerce perturbação na fibra óptica (comprimento ativo) é de aproximadamente 0,7447 ms. A perturbação de 0,7447 ms é referente a pressão exercida (ondas de interferência) da esfera sobre a fibra MM-GI; tão logo após este movimento a fibra óptica procura retornar ao seu estágio antes do evento. Esta regeneração elástica acaba por ser interpretada pelo sistema como outras ondas de interferências com magnitude e tempo próximo a da perturbação original.

5 Proposta de uma Técnica de Localização de Perturbações com Dispositivos SMS

Sempre que uma perturbação ocorre na fibra GI-MM do dispositivo modal métrico aqui tratado, haverá um sinal óptico propagando-se no sentido do terminal da fibra GI-MM (clivado ou espelhado) e outro no sentido contrário (retornando à emenda SM/MM). O fenômeno pode ser observada pela figura 5.1 .

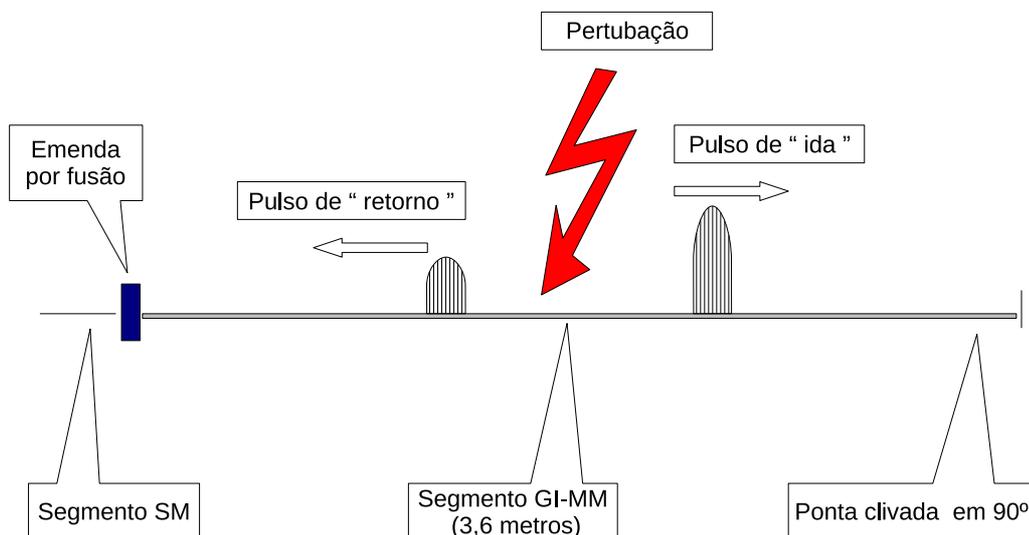


Figura 5.1: Modelo sistemático de uma estrutura SMS.

Após o sinal ser refletido pela extremidade da fibra, este refletirá parte de sua potência de volta a fibra e o sinal inverte o sentido indo agora para a emenda SM/MM. Logo, será detectado no instante de tempo t_1 o primeiro sinal, e o sinal refletido pela extremidade da fibra será detectado no instante de tempo t_2 . Quando o fotodetector não possui banda suficiente para distinguir os dois sinais, os mesmos serão convertidos com pulsos superpostos com um atraso relativo de $\Delta t = t_2 - t_1$.

Um *OTDR* tradicional utiliza pulsos luminosos de pequena duração (ns à μs) compatível com o comprimento total do enlace de fibra a ser varrido para localizar falhas ou particularidades da fibra. Basicamente o *OTDR* é um instrumento capaz de realizar

uma contagem precisa do intervalo de tempo transcorrido entre a emissão de um pulso óptico e o retorno do retroespalhamento e de reflexões.

Já sistema de monitoramento SMS utiliza luz em onda contínua e a técnica de localização de eventos perturbativos é distinta da utilizada no OTDR. Ao considerar $z = 0$ a localização do fotodetector, $z = z_0$ o ponto onde um certo distúrbio é aplicado, L o comprimento total do enlace de fibra, n_{eff} o índice de refração efetivo da fibra para o comprimento de onda operacional, a velocidade da luz no vácuo como $c = 3 \cdot 10^8$ m/s e a diferença de tempo transcorrido entre a detecção dos pulsos como Δt , um simples cálculo cinemático produz a expressão 5.1 que permite obter a localização z_0 em função do Δt medido.

$$z_0 = L - \frac{c\Delta t}{n_{eff}} \quad (5.1)$$

A partir da equação 5.1, é possível calcular a localização z_0 da perturbação desde que L seja conhecido e Δt possa ser precisamente medido, que é a maior dificuldade da técnica.

Como exemplo, podemos estimar o comprimento mínimo para que se possa observar os dois pulsos separados.

Para uma fibra óptica, estima-se n_{eff} como 1.4488. O ponto ocorrido da perturbação sendo o início do segmento GI-MM, z_0 passa a ter valor 0 e para o tempo de percurso do pulso para possuir uma defasagem de mili segundos, utiliza-se $\Delta t = 100 \mu s$. O valor do comprimento total do enlace passa a ser:

$$0 = L - \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{1.4488} \quad (5.2)$$

$$L = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{1.4488} \quad (5.3)$$

$$L = 207,06792 \cdot 10^2 m \quad (5.4)$$

$$L = 20,706792 Km \quad (5.5)$$

Logo, para que seja possível ver os dois pulsos separados por $100 \mu s$, seria necessário no mínimo 20 quilômetros de fibra GI-MM, além da perturbação ocorrer junto a emenda SM/MM (pois assim o segundo pulso teria mais tempo ao ir até a extremidade, ser refletido e finalmente ser detectado com um Δt mínimo para ser possível vê-los na escala em ms).

Para enlaces onde os sinais chegarão superpostos no fotodetector, torna-se necessário processar o sinal composto para descobrir o atraso relativo Δt , o que implica que o fotodetector combinado com o amplificador deverão ter uma largura de banda compatível e ainda manter o ganho necessário. Uma possível solução para sanar esta deficiência é inserir um linhas de atraso no enlace.

Nas fibras de sílica utilizadas em Telecomunicações o comprimento de onda de corte “C” (*cut-off wavelength*) é tipicamente > 1250 nm de forma que em 1310 nm e nas bandas “S”, “C” e “L”, estas fibras sejam SM. Para que a técnica aqui descrita possa ser utilizada, torna-se então necessário que seja operado < 1250 nm, algo que foi já realizado com 633 nm num enlace de 6,5 km com monitoramento da resposta em frequências elétricas [13].

O sistema fica limitado na distância de operação quando se faz uso de baixos comprimentos de onda. Para 1550 nm há cerca de 40 dB de perda óptica considerando ida e volta num enlace de 100 km para um coeficiente de atenuação de 0,2 dB/km. Para 850 nm onde o coeficiente de atenuação é tipicamente 2,5 dB/km, teríamos uma perda óptica de 250 dB para 50 km de enlace. A situação piora em 700 nm onde 5 dB/km e ainda mais para < 700 nm o qual fica aparentemente limitado a 6,5 km [13]. A fibra de Telecomunicações quando for GI-MM, normalmente utiliza 850 nm e/ou 1310 nm como comprimentos de onda. Neste último caso é fácil multiplexar e demultiplexar 1550 nm cujo comprimento de onda torna-se operativo no monitoramento de distúrbios. Se a fibra de Telecomunicações for SM, pode-se instalar uma fibra GI-MM em paralelo a fibra SM de Telecomunicações na mesma cavidade do cabo óptico, de forma que a primeira se torne apenas uma fibra sensora de distúrbios operando em 1550 nm [22].

5.1 Conceitos básicos sobre filtragem-reversa

A utilização de um filtro-inverso (ou convolução) pode ser útil na detecção temporal da perturbação. A forma de ambos os sinais (detectados em t_1 e t_2) são supostamente iguais e apenas se diferenciam na intensidade (devido a atenuação e perda na reflexão pelo

pulso t_2). A saída $y(t)$ de qualquer sistema linear invariante no tempo (LTI) pode ser modelado considerando a convolução da resposta ao impulso $h(t)$ com o sinal de entrada $x(t)$. A operação de convolução é definida para este sistema como [19]:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (5.6)$$

O sistema é descrito no domínio da frequência através da transformada de *Fourier*. E sendo assim será:

$$y(t) = x(t) * h(t) \iff Y(\omega) = X(\omega) H(\omega) \quad (5.7)$$

No caso da reconstituição do sinal original $x(t)$ utilizando a saída $y(t)$ (que pode ser medida), utiliza-se o termo de deconvolução ou filtragem reversa, a qual pode ser realizada diretamente no domínio do tempo. Ela é obtida pela equação 5.8, a partir da equação 5.7.

$$x(t) = F^{-1} \left[\frac{Y(\omega)}{H(\omega)} \right] \quad (5.8)$$

Apesar de equação 5.8 parecer de simples execução, ela raramente é bem sucedida na prática. A razão é que a convolução geralmente toma a semelhança de um filtro passa-baixa [19], reduzindo a intensidade das componentes de mais alta frequência. Além disso, caso o sinal esteja com sua relação sinal-ruído (SNR) baixa, o ruído será fator significativo para a eficiência do processo de deconvolução. Considerando-se o ruído aditivo é independente do sinal, temos a equação 5.6 re-escrita na equação 5.9.

$$y(t) = x(t) * h(t) + s(t) \quad (5.9)$$

onde, $s(t)$ é a função que representa o ruído.

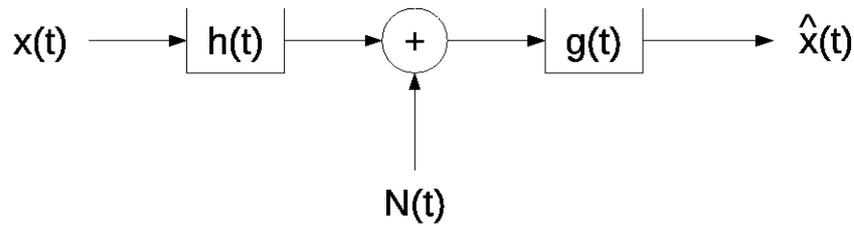
E assim, re-escrivendo a filtragem reversa com a presença do ruído, teremos:

$$x(t) = F^{-1} \left[\frac{Y(\omega)}{H(\omega)} - \frac{S(\omega)}{H(\omega)} \right] \quad (5.10)$$

Existe uma série de artifícios para diminuir a questão de dificuldade de solução da equação 5.10. Todas sugerem que a deconvolução seja realizada no domínio da frequência; uma amostra no domínio do tempo é transformada para o domínio da frequência,

modificada por teoremas e depois re-estabelecida no domínio do tempo. Artifício fácil de ser descrito mas muito difícil de ser realizado em tempo real.

Uma solução é que a resposta ao impulso do filtro-reverso seja pré-computada e aplicada na saída do sinal, usando a convolução normal no domínio do tempo. Para entender melhor a idéia da solução, observa-se o sistema:



$$\hat{x}(t) = g(t) \star [N(t) + h(t) + x(t)] \quad (5.11)$$

$$\hat{X}(\omega) = G(\omega) [N(\omega) + H(\omega) + X(\omega)] \quad (5.12)$$

Se $E(\omega) = X(\omega) - \hat{X}(\omega)$, então:

$$E(\omega) = X(\omega) - G(\omega) [N(\omega) + H(\omega) + X(\omega)] \quad (5.13)$$

E para $J = E | \{ |E(\omega)|^2 \} = E | \{ E(\omega) E^*(\omega) \}$, então:

$$J = E | \{ [X(\omega) - G(\omega) [N(\omega) + H(\omega) + X(\omega)]] \cdot [X^*(\omega) - G^*(\omega) [N^*(\omega) + H^*(\omega) + X^*(\omega)]] \} \quad (5.14)$$

⋮

Atribuindo $E | \{ |N(\omega)|^2 \} \rightarrow S_n(\omega)$, temos:

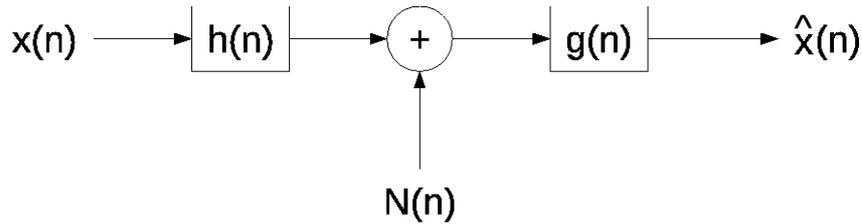
⋮

$$|G(\omega)| = \frac{|H(\omega)| |X(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 |X(\omega)|^2 S_n(\omega)} \quad (5.15)$$

$$|G(\omega)| = \frac{1}{|H(\omega)| \frac{S_n(\omega)}{|X(\omega)|^2}} \quad (5.16)$$

onde $S_n(\omega)$ é a densidade espectral de potência do ruído.

Para que toda a operação seja realizada em “tempo real”, é necessário o emprego de um processamento veloz nos cálculos, propriedade encontrada nos dispositivos DSP (*Digital Signal Processor*). Na aplicação deste, pode ser programada a função de deconvolução como a implementação da resposta ao impulso discreto finito (FIR). Por analogia, observa-se:



$$g(n) = \sum_{k=0}^n a_k \delta(n-k) \quad (5.17)$$

Logo,

$$J = E \{ e^2(n) \} = E \left\{ \left(x(n) - \sum_{k=0}^n a_k [\delta(n-k) + N(n-k)] \right)^2 \right\} \quad (5.18)$$

Para localizar uma ocorrência de perturbação no sistema modal métrico, é preciso processar o impulso de entrada (primeiro impulso em t_1) e a saída que trata-se do mesmo impulso, porém concatenado ao primeiro (com magnitude reduzida). A função de aproximação escolhida utiliza o método dos “mínimos quadrados perfeitos” (*Least Mean Square*,

ou LMS) por ser um algoritmo adaptativo fácil de ser manipulado, não sendo necessário calcular funções de correlação ou cálculo de inversão de matrizes.

O algoritmo *LMS* pode ser utilizado para que seja encontrado $\{a_k\}$ que minimiza J com o seguinte modo¹:

1. Fornece uma sequência de amostras para $x(n)$ filtradas e somadas ao ruído $u(n)$, bem como o resultado desejado $x(n)$.
2. Avalia iterativamente a equação:

$$a(n+1) = a(n) - \alpha U(n) e(n) \quad (5.19)$$

onde:

$$a(n) = \begin{pmatrix} a_0(n) \\ a_1(n) \\ a_2(n) \\ \vdots \\ a_n(n) \end{pmatrix}, \quad U(n) = \begin{pmatrix} u(n) \\ u(n-1) \\ u(n-2) \\ \vdots \\ u(n-N) \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (5.21)$$

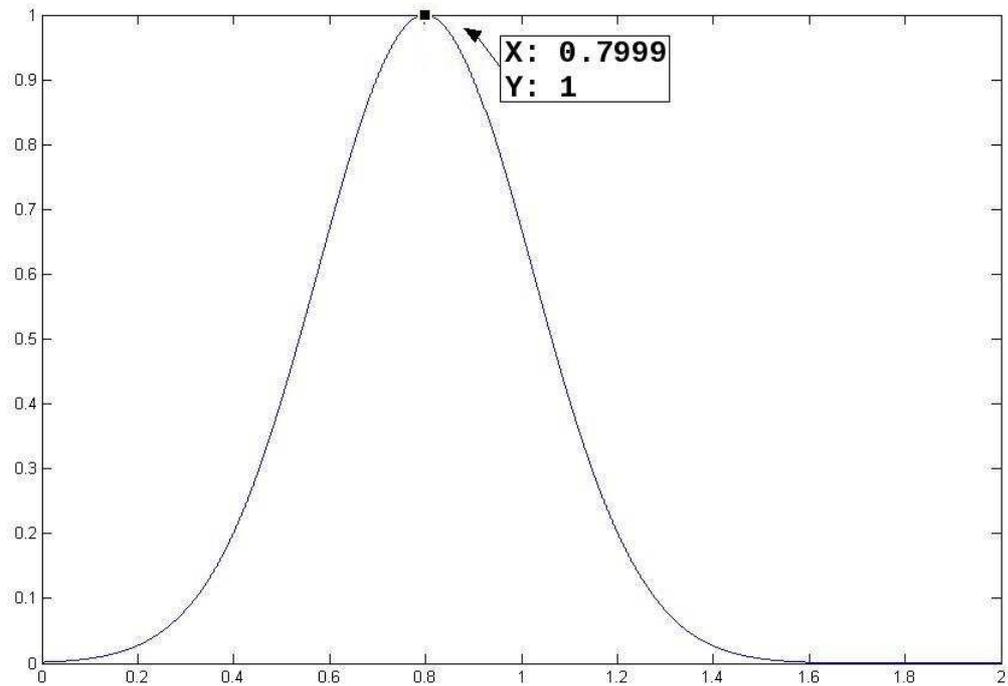
A variável α é um valor (pequeno) do passo de adaptação. Ao final de L interações, $a(L)$ é uma estimativa para o filtro de deconvolução que minimiza o erro quadrático J . Quanto menor for o α , mais lento é a convergência, porém menor é o erro.

5.2 Resultados de modelagem matemática

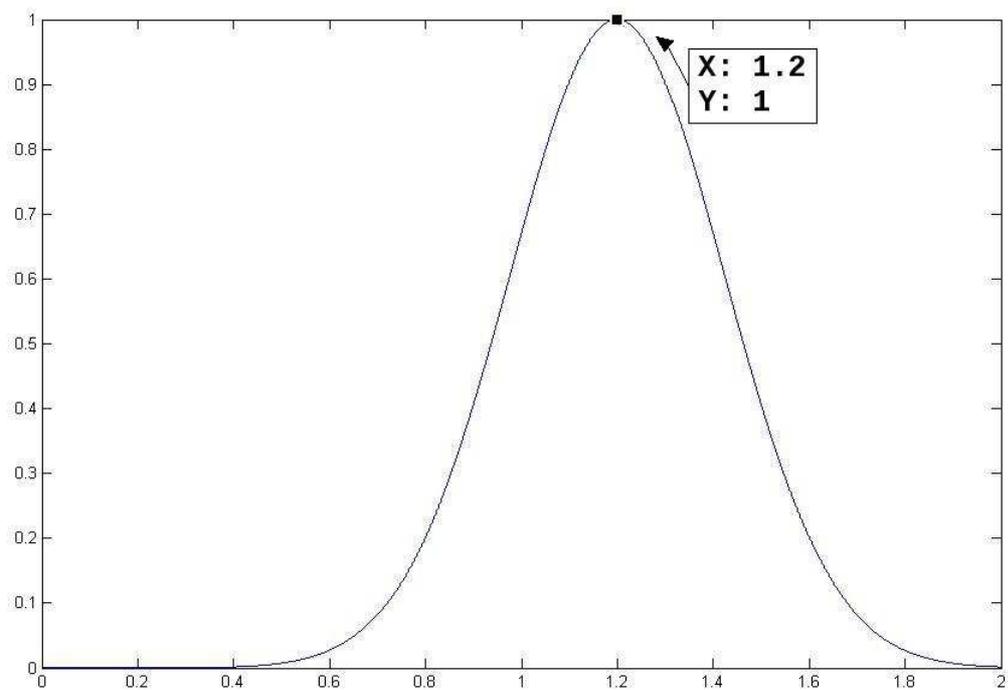
Na simulação, utilizou-se o ambiente *MATLAB* tendo como funções de entrada dois pulsos gaussianos idênticos porém espaçados no tempo pelo fator de $\Delta t = 0.4$ (os pulsos tem seus centros de amplitude máxima nos pontos $t_1 = 0.8$ e $t_2 = 1.2$). Os pulsos devido a proximidade acabam por se apresentarem concatenados em um pulso único. Deste pulso, utiliza-se o algoritmo LMS com a função de entrada (que é um dos pulsos originais). Do resultado, obtém-se a função equalizada e o vetor de erros da função

¹Haykin - Adaptive Filter Theory - Prentice Hall.

equalizada em referência a função gaussiana concatenada. Os gráficos podem ser vistos pelas figuras 5.2 , 5.3 e 5.4:

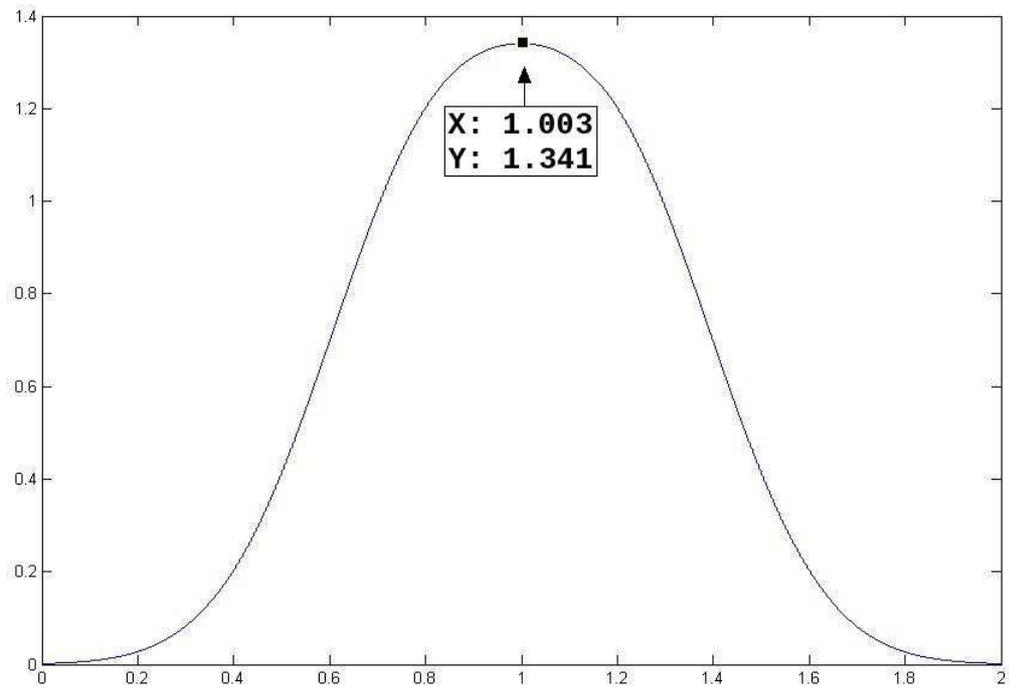


(a) 1^o função gaussiana (pulso direto).

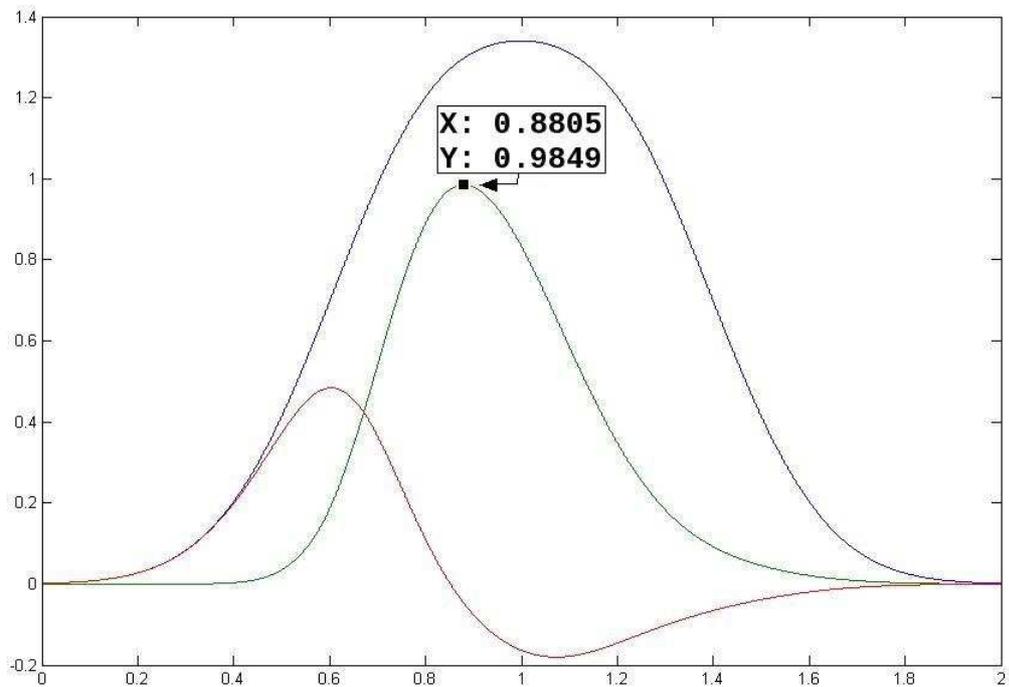


(b) 2^o função gaussiana (pulso atrasado).

Figura 5.2: Pulsos gaussianos separados por $\Delta t \approx 0.4$, supostamente de entrada.



(a) Resultante da superposição dos dois pulsos gaussianos.



(b) Vetor de erros (vermelho) referente da função equalizada (verde) e a função de entrada gaussiana (azul)

Figura 5.3: Funções envolvidas na aproximação do erro pelo algoritmo LMS.

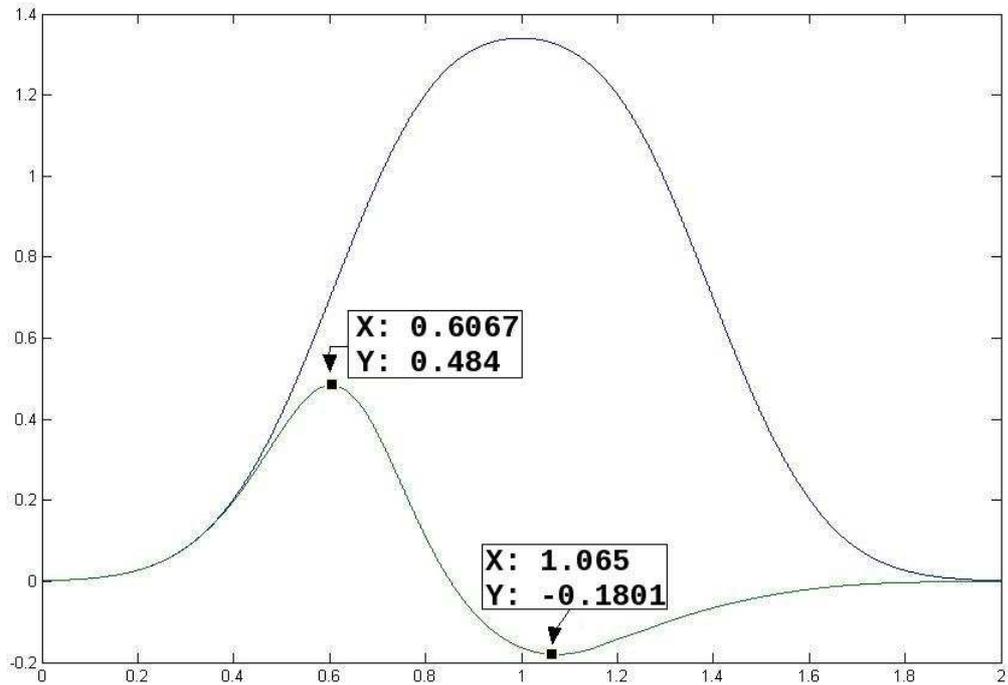


Figura 5.4: Resultado da aproximação pelo algoritmo LMS para separação de sinais sobrepostos.

Nota-se que a diferença dos extremos (verticais) do vetor de erros (apresentado pela função de cor vermelha na figura 5.3 (b) e de cor verde na figura 5.4) representa o valor quase exato da diferença dos dois pulsos gaussianos originais ($\Delta t \approx 0.4$). Caso sejam simulados novos pulsos gaussianos com diferentes espaçamentos entre si, é observado que o filtro possui um limite para as aproximações, sendo necessário recalibrar seus parâmetros quando o objeto exceda a capacidade do mesmo. De qualquer forma, desde que os parâmetros do filtro atendam ao valor mínimo (eventos muito próximos) de espaçamento dos pulsos, este algoritmo do filtro atenderá para qualquer conjunto de pulsos que possuam seus espaçamentos igual ou superior ao limite definido.

5.3 Observações finais ao sistema de localização

Reforça-se que conforme a aplicação específica do sistema modalmétrico SMS, poderá ser necessário inserir ao final da fibra MM sensora, uma pequena bobina também

de fibra MM para constituir-se como uma “linha de atraso” isolada de contato com as perturbações. Esta “linha de atraso” pode ser melhor entendida pela figura 5.5.

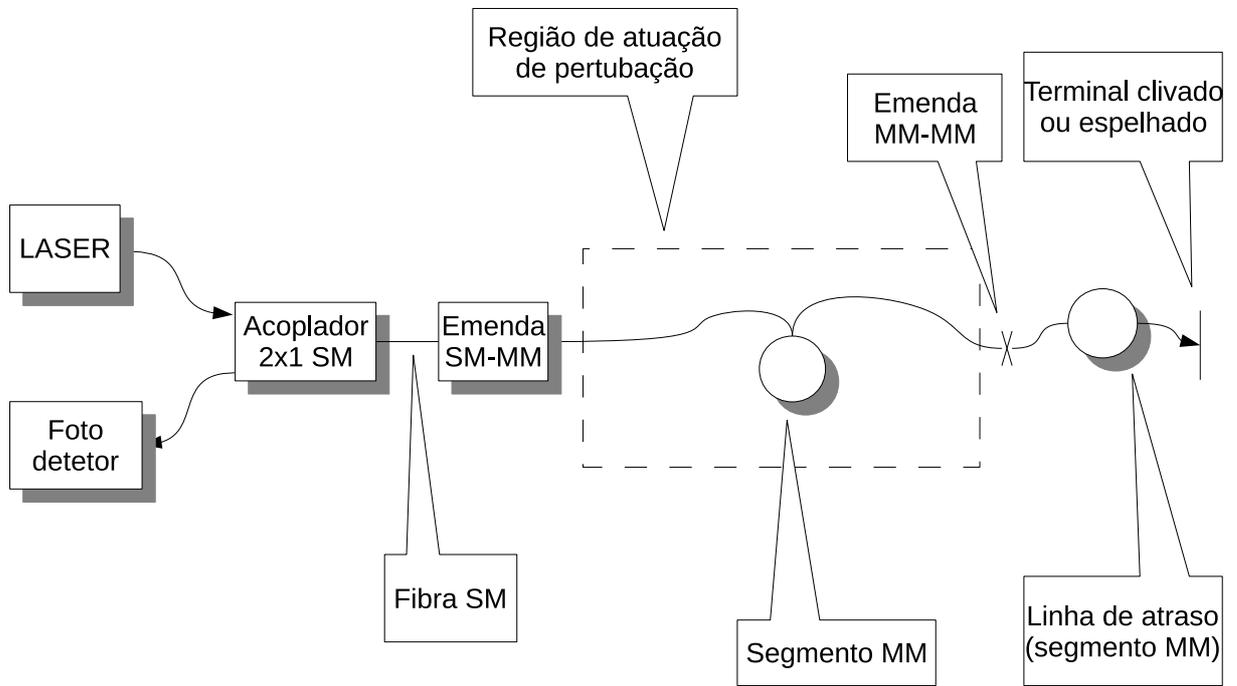


Figura 5.5: Esquema básico do sistema SMS com implantação de linha de atraso.

A função da “linha de atraso” é aumentar o Δt , ou seja, de atrasar o pulso t_2 (que é refletido pela extremidade da fibra MM) em relação ao pulso t_1 (pulso que dirige-se imediatamente à emenda SM/MM). Este procedimento utilizando recursos de circuitos ópticos, deverá simplificar o processamento de sinais.

6 Acopladores SM/MM Operando como Filtros ou Dispositivos MMI

6.1 Introdução

Acopladores SM/MM criados por fusão ou contato tangencial não são comuns e nem mesmo são encontrados para comercialização direta. Teve-se então a idéia original de adaptar o sistema SMS convencional apresentado pela figura 6.1 para uma configuração onde as fibras SM e MM fossem emendadas em efeito “cruzado” por contato tângencial.

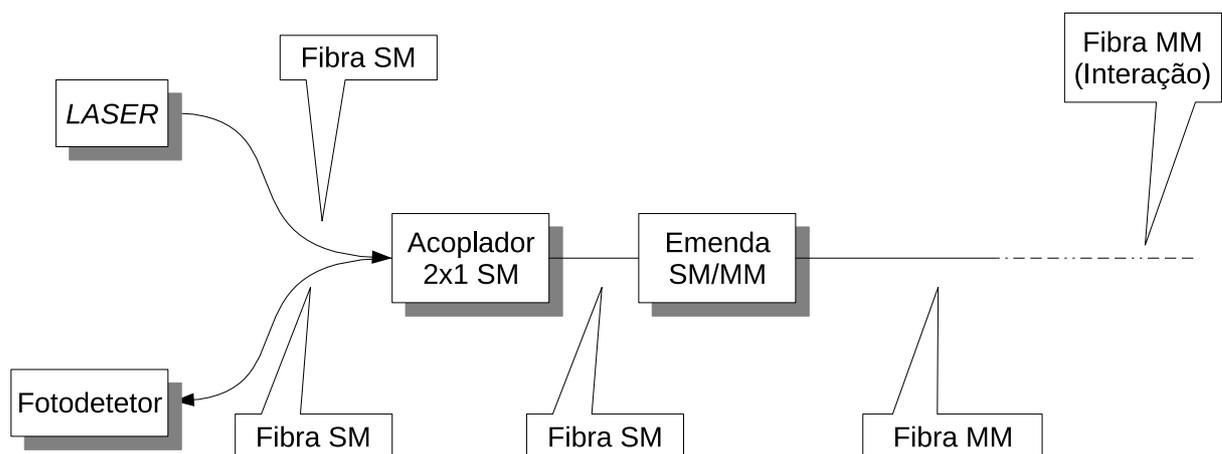
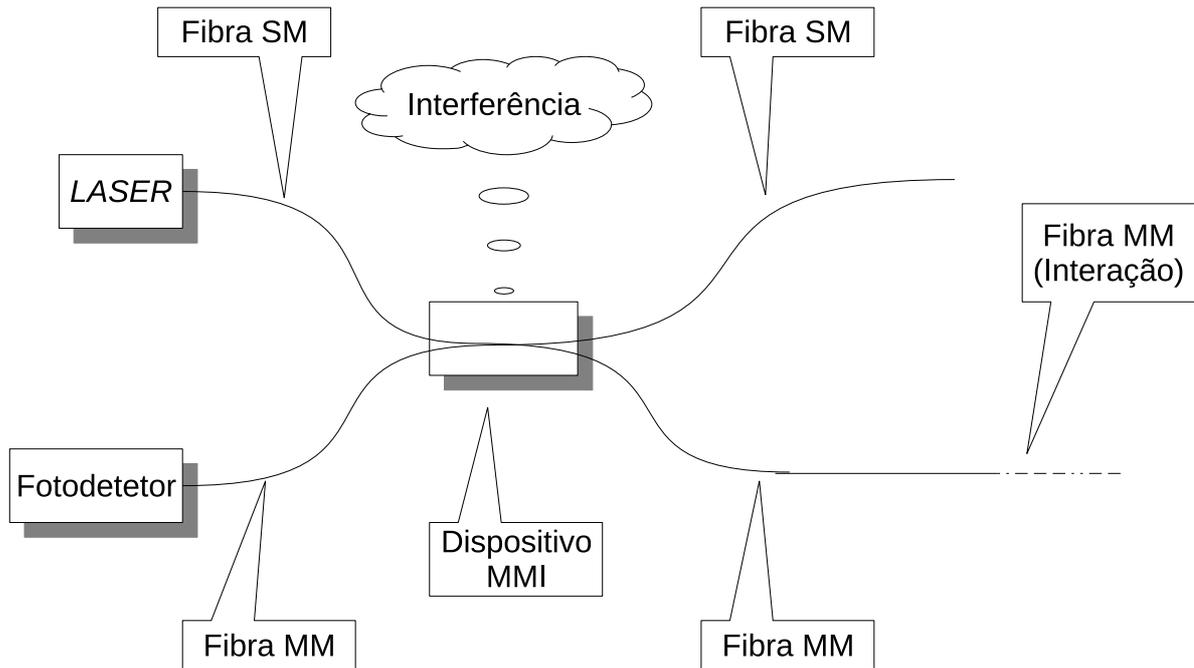


Figura 6.1: Esquema experimental convencional do dispositivo modalmétrico SMS.

O objetivo original foi o de testar a substituição de emenda SM/MM feita por fusão (cujos parâmetros como o desalinhamento lateral dentre outros já foram discutidos anteriormente) e o acoplador SM 2x1, por um dispositivo único, com expectativa de melhorar a eficiência e ainda promover acoplamento para a ocorrência da interferência multimodal (MMI). Para isto, propõe-se um acoplador SM/MM em uma nova configuração, o qual pode ser visto pela figura 6.2.



(a) Esquema experimental de dispositivo SMS utilizando dispositivo MMI.

Figura 6.2: Nova configuração do sistema SMS utilizando dispositivo MMI.

Entretanto, ao realizar testes preliminares verificou-se que conforme a entrada e saída de luz (portas da fibra), o acoplador SM/MM apresentou diferentes transmissões espectrais.

Já foram descritos na década de 1980 3 artigos onde 2 são de natureza experimental [17, 24] e um de natureza teórica [12] que a presente dissertação faz um “resgate” desse conhecimento através da demonstração e uso destes acopladores SM/MM como um dispositivo multi-função que em parte funciona como um dispositivo MMI [12, 17, 24].

6.2 Método experimental

O acoplador 2x2 SM/MM foi confeccionado utilizando a técnica convencional de fusão e estiramento de fibra óptica SI-SM padrão G652 (9/125 μm) com outra GI-MM padrão G651 (62,5/125 μm) enroscada uma com a outra de forma a ficar com aproximadamente 10 mm de comprimento de junção. A fabricação foi ajustada de forma que 2~5% da luz (1550 nm) injetada pudesse sair pela fibra SM quando a injeção se desse pela fibra MM (razão de acoplamento 95.2% / 4.8% e excesso de perda 1 dB).



(a) Esquema do acoplador SM/MM 2x2.



(b) Foto do acoplador SM/MM 2x2.

Figura 6.3: Acoplador não recíproco SM/MM.

Um laser (o mesmo utilizado anteriormente) sintonizável (discretamente) nos canais DWDM ao longo da banda “C” foi acoplado num isolador SM para 1550 nm e este foi conectado ao dispositivo SM/MM. Um misturador de modos (*mode-scrambler*) foi ou não conectado pela entrada MM do acoplador SM/MM.



Figura 6.4: *Mode-scrambler* para fibras MM de sílica da AC Photonics.

A figura 6.5 mostra o esquema experimental utilizado para caracterização espectral do acoplador SM/MM.

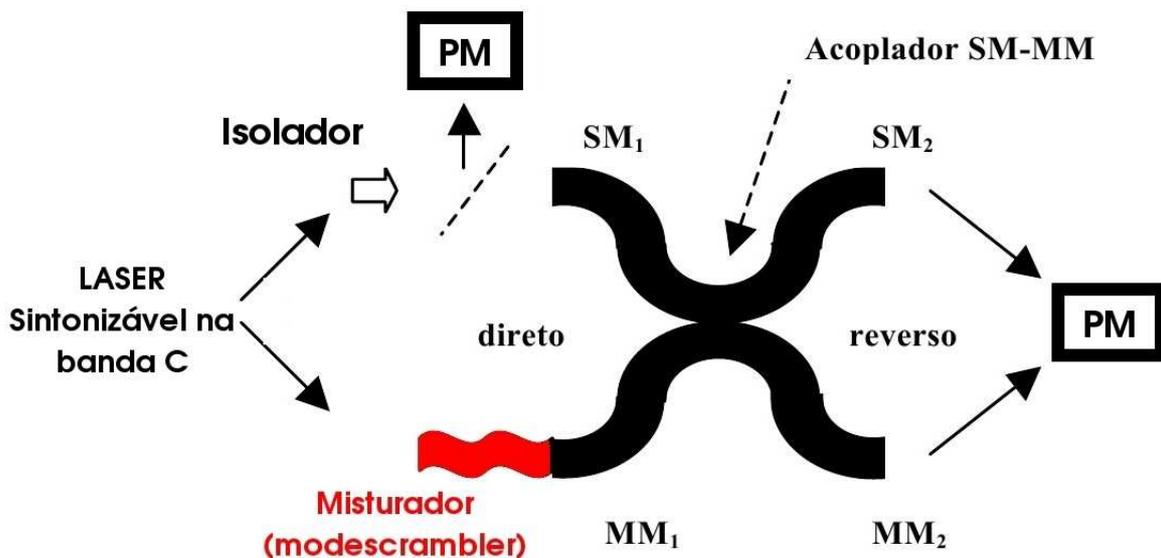


Figura 6.5: Esquema experimental utilizado na caracterização espectral do acoplador SM/MM onde PM (*Power Meter*) é o medidor de potência óptica.

Todos os outros terminais livres (3) são conectados à medidores de potência óptica (PM) com a finalidade de medição da potência óptica transmitida. A figura 6.6 apresenta a fotografia do aparato experimental para caracterização do dispositivo, com os medidores de potência em 1º plano.



Figura 6.6: Conjunto de medidores de potência óptica “de mão” (*hand-held*) utilizados nos experimentos.

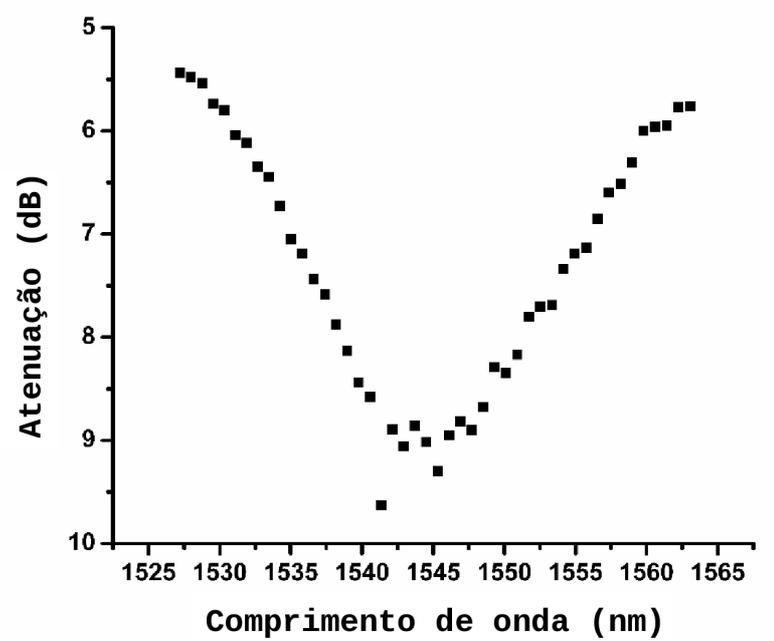
Com uso dos medidores de potência óptica, fez-se primeiramente uma medida da potência do laser (de cada canal DWDM) em função do comprimento de onda na banda

“C” para referência. Em sequência, o acoplador SM/MM foi caracterizado no domínio espectral onde a luz foi injetada nas fibras SM ou GI-MM. No caso de injeção na fibra GI-MM, esta foi feita com conexão diretamente do pigtail do isolador SM do laser (modos de baixa ordem) ou com a inclusão de um *mode-scrambler* para gerar modos distribuídos equilibradamente.

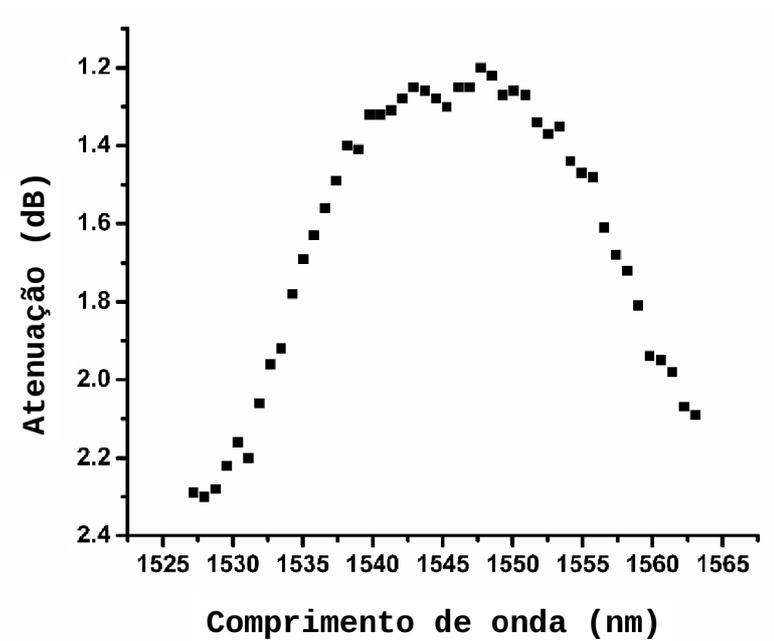
As medidas foram primeiramente feitas no sentido direto e depois repetidas no sentido reverso, conforme convencionado e ilustrado na figura 6.5. Naturalmente que a atribuição de sentido “direto” ou “reverso” foi inteiramente arbitrária, obtendo-se no total 12 gráficos espectrais que serão mostrados e analisados em próxima seção.

6.3 Resultados

6.3.1 Respostas de transmissão espectral com injeção sentido direto



(a) SM1 -> SM2.



(b) SM1 -> MM2.

Figura 6.7: Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido direto.

Feixe	Normalização (SM)	Entrada (Braço SM)		Entrada (Braço MM)	
Canal	PM_1	$PM_1^{(SM)}$	$PM_2^{(MM)}$	$PM_1^{(SM)}$	$PM_2^{(MM)}$
18	12.53	6.77	10.44	-3.78	12.31
19	12.51	6.74	10.44	-3.35	12.26
20	12.47	6.52	10.49	-3.35	12.25
21	12.50	6.54	10.55	-3.49	12.25
22	12.48	6.48	10.54	-4.39	12.25
23	12.48	6.17	10.67	-5.55	12.26
24	12.48	5.97	10.76	-8.72	12.28
25	12.45	5.85	10.77	-11.25	12.30
26	12.45	5.60	10.84	-8.25	12.25
27	12.42	5.29	10.94	-6.67	12.21
28	12.42	5.23	10.95	-5.94	12.13
29	12.42	5.08	10.98	-7.1	12.08
30	12.39	4.70	11.04	-9.44	12.00
31	12.40	4.70	11.03	-15.15	11.98
32	12.38	4.58	11.04	-15.7	12.04
33	12.37	4.20	11.10	-10.57	12.09
34	12.35	4.00	11.09	-7.27	12.08
35	12.32	4.03	11.05	-4.5	12.04
36	12.31	3.63	11.09	-4.09	12.00
37	12.30	3.40	11.10	-3.75	11.97
38	12.29	3.47	11.04	-3.28	11.88
39	12.26	3.31	11.01	-3.28	11.81
40	12.35	3.05	11.05	-3.25	11.81
41	12.25	3.23	10.97	-3.65	11.82
42	12.21	3.35	10.95	-3.71	11.85
43	12.23	3.17	10.98	-4.37	11.91
44	12.17	3.28	10.89	-4.71	11.90
45	12.15	2.52	10.84	-4.15	11.84
46	12.13	3.55	10.81	-3.48	11.78
47	12.12	3.68	10.80	-1.92	11.68
48	12.13	4.00	10.72	-0.72	11.54
49	12.08	4.20	10.68	-0.55	11.50
50	12.07	4.48	10.58	-0.78	11.52
51	12.06	4.62	10.50	-1.76	11.52
52	12.00	4.81	10.37	-3.32	11.70
53	12.00	4.95	10.31	-5.26	11.77
54	11.96	5.23	10.18	-6.74	11.77
55	11.95	5.50	10.03	-6.84	11.76
56	11.95	5.60	9.99	-4.87	11.65
57	11.92	5.80	9.86	-3	11.51
58	11.96	5.92	9.76	-2.18	11.43
59	11.86	6.06	9.70	-2.21	11.43
60	11.83	6.09	9.61	-2.6	11.40
61	11.80	6.26	9.52	-3.63	11.43
62	11.78	6.30	9.48	-5.48	11.51
63	11.77	6.33	9.48	-5.58	11.50

Tabela 6.1: Medidas por injeção no sentido direto do dispositivo (dBm).

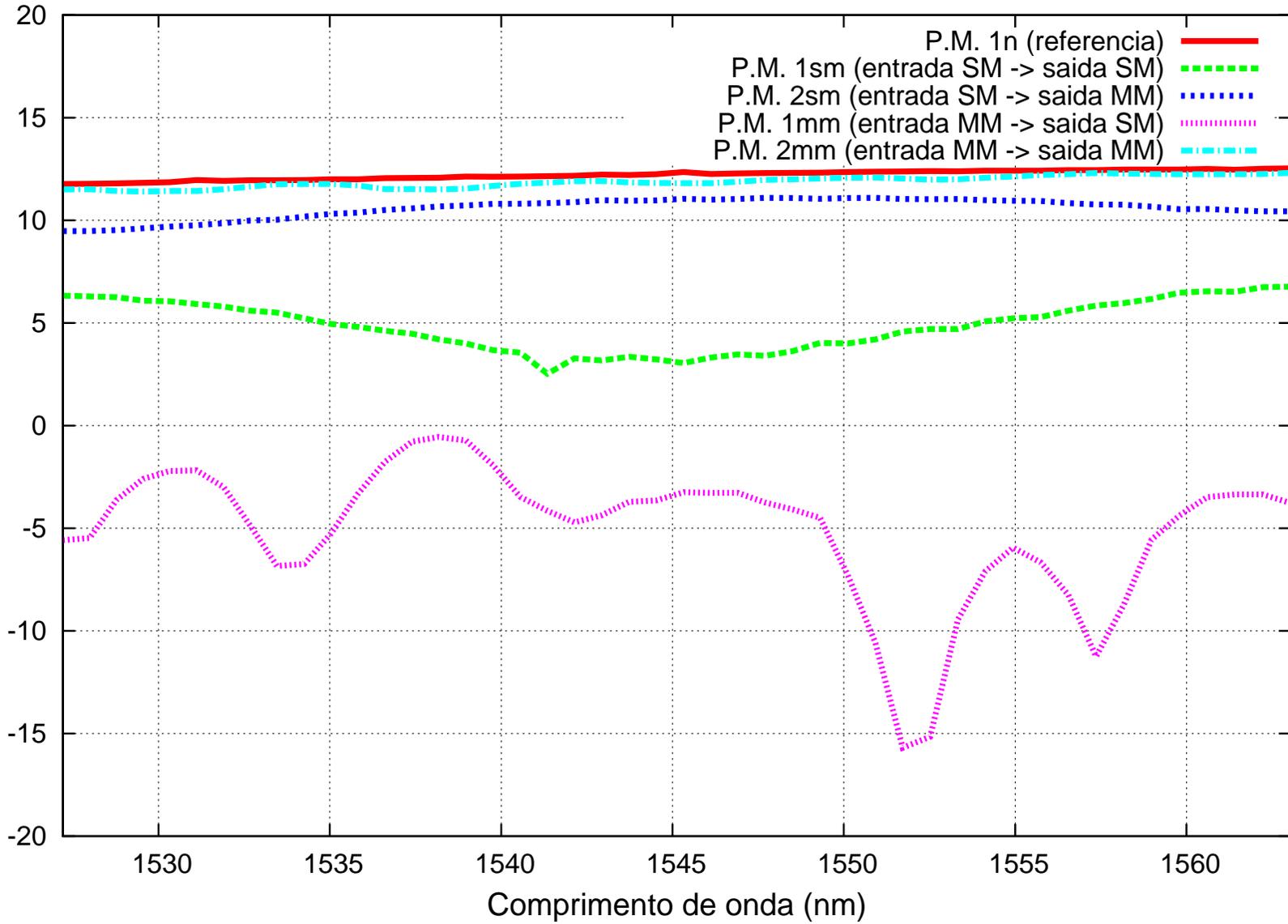
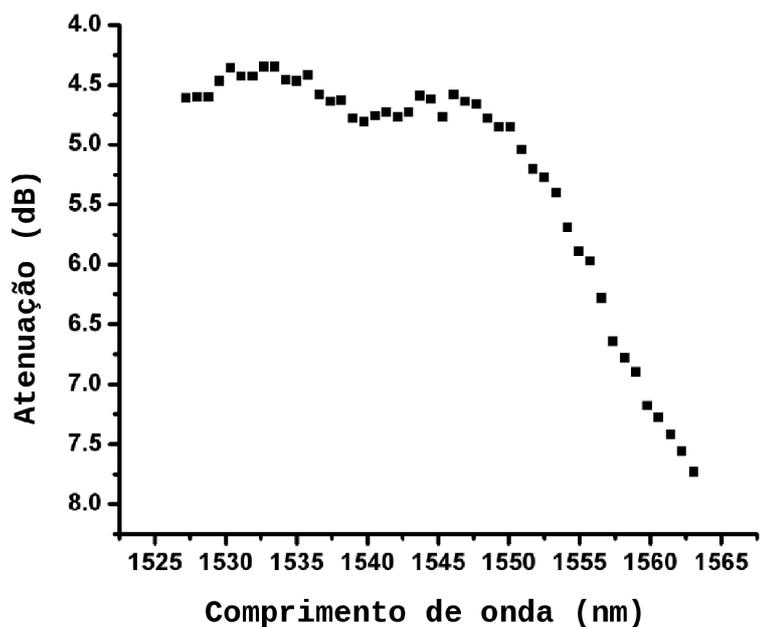
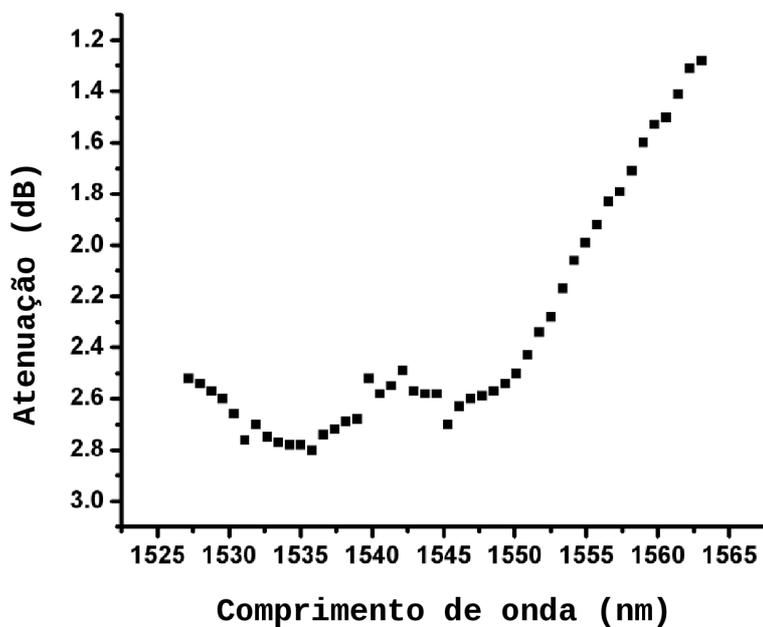


Figura 6.8: Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido direto do dispositivo SM/MM. 109

6.3.2 Respostas de transmissão espectral com injeção sentido reverso



(a) SM2 -> SM1.



(b) SM2 -> MM1.

Figura 6.9: Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido reverso.

Feixe	Normalização (SM)	Entrada (Braço SM)		Entrada (Braço MM)	
Canal	PM_1	$PM_1^{(SM)}$	$PM_2^{(MM)}$	$PM_1^{(SM)}$	$PM_2^{(MM)}$
18	12.53	4.8	11.25	0.1	12.51
19	12.51	4.95	11.2	-0.1	12.43
20	12.47	5.05	11.06	-0.11	12.4
21	12.50	5.22	11	-0.2	12.41
22	12.48	5.3	10.95	-0.3	12.46
23	12.48	5.58	10.88	-0.4	12.51
24	12.48	5.7	10.77	-2.3	12.48
25	12.45	5.81	10.66	-6.63	12.59
26	12.45	6.17	10.62	-9.79	12.43
27	12.42	6.45	10.5	-4.87	12.28
28	12.42	6.53	10.43	-1.28	12.18
29	12.42	6.73	10.36	-0.09	12.32
30	12.39	6.99	10.22	-0.15	12.38
31	12.40	7.13	10.12	-0.51	12.48
32	12.38	7.18	10.04	-1.47	12.48
33	12.37	7.33	9.94	-2.2	12.43
34	12.35	7.5	9.85	-2.08	12.34
35	12.32	7.47	9.78	-1.49	12.28
36	12.31	7.53	9.74	-1.94	12.31
37	12.30	7.64	9.71	-3.6	12.38
38	12.29	7.65	9.69	-5.07	12.46
39	12.26	7.68	9.63	-5.44	12.5
40	12.35	7.58	9.65	-4.26	12.43
41	12.25	7.63	9.67	-2.83	12.34
42	12.21	7.62	9.63	-1.5	12.18
43	12.23	7.5	9.66	-1.12	12.08
44	12.17	7.4	9.68	-1.36	12.17
45	12.15	7.42	9.6	-1.17	12.24
46	12.13	7.37	9.55	-1.87	12.34
47	12.12	7.31	9.6	-3.97	12.47
48	12.13	7.35	9.45	-5.4	12.43
49	12.08	7.45	9.39	-4.57	12.34
50	12.07	7.43	9.35	-3.04	12.18
51	12.06	7.48	9.32	-2.35	12.1
52	12.00	7.58	9.2	-2.15	12
53	12.00	7.53	9.22	-2.48	12.03
54	11.96	7.5	9.18	-3.05	12.1
55	11.95	7.6	9.18	-3.76	12.2
56	11.95	7.6	9.2	-4.1	12.24
57	11.92	7.49	9.22	-4	12.11
58	11.96	7.53	9.2	-3.56	11.97
59	11.86	7.5	9.2	-3.27	11.89
60	11.83	7.36	9.23	-2.33	11.8
61	11.80	7.2	9.23	-1.65	11.85
62	11.78	7.18	9.24	-2.2	11.95
63	11.77	7.16	9.25	-2.25	11.95

Tabela 6.2: Medidas por injeção no sentido reverso do dispositivo (dBm).

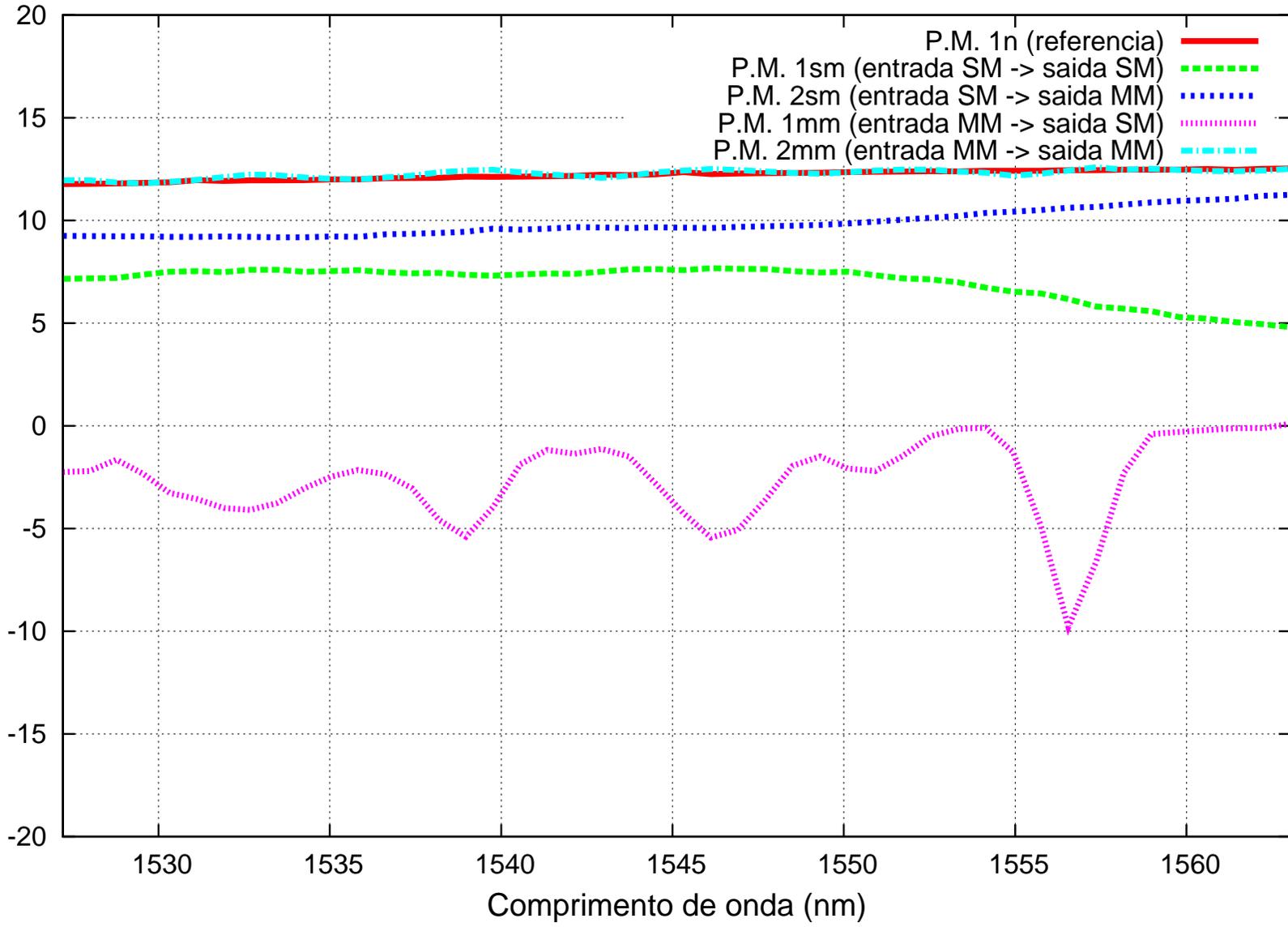
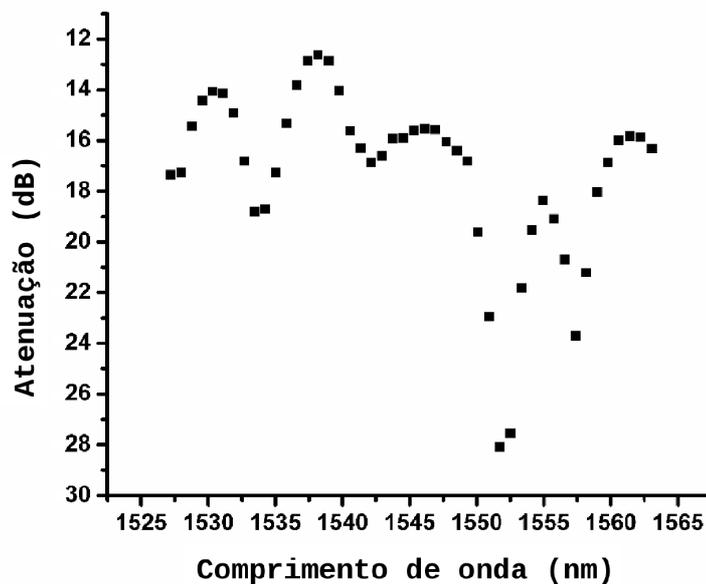
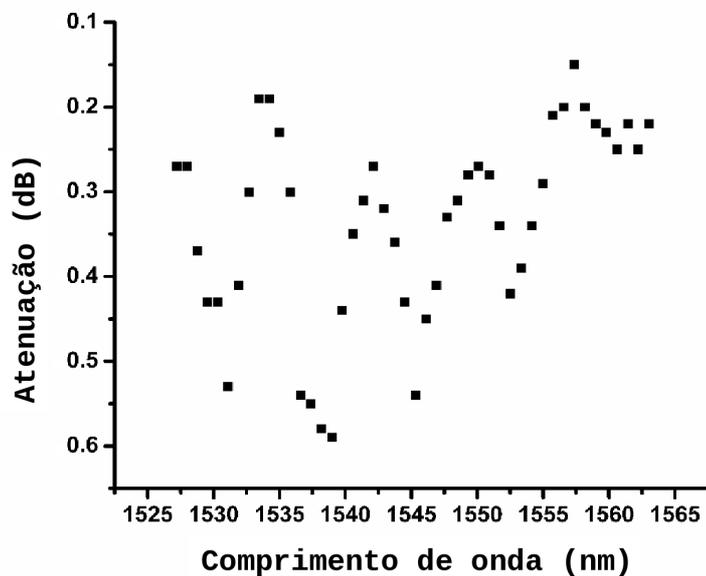


Figura 6.10: Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido reverso do dispositivo SM/MM. 112

6.3.3 Resposta espectrais gráficas com injeção em sentido direto MM (*Mode-Scrambler*)¹.



(a) MM1 -> SM2.



(b) MM1 -> MM2.

Figura 6.11: Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido direto MM (uso de *Mode-Scrambler*).

¹A utilização com *mode-scrambler* só é válida quando a injeção de luz é pelo braço de entrada MM. Por isso, a tabela apresentada possui saída para apenas um braço de entrada (MM).

Feixe	Normalização (SM)	Entrada (Braço MM)	
Canal	PM	$PM_1^{(SM)}$	$PM_2^{(MM)}$
18	13.13	-6.69	12.84
19	13.09	-4.89	12.74
20	13.06	-3.25	12.62
21	13.04	-2.05	12.63
22	13.08	-2.43	12.7
23	13.04	-1.12	12.73
24	13.05	0.63	12.6
25	13.02	-1.25	12.64
26	13	-8.75	12.68
27	12.98	-6.8	12.63
28	12.96	-0.73	12.48
29	12.97	-1.44	12.58
30	12.95	-3.1	12.63
31	12.95	-2.5	12.54
32	12.92	-3.25	12.45
33	12.92	-4.45	12.43
34	12.88	-3.38	12.28
35	12.89	-1.8	12.14
36	12.85	-2.45	12.25
37	12.84	-3.5	12.47
38	12.84	-7.75	12.58
39	12.81	-5.7	12.5
40	12.8	-0.6	12.18
41	12.78	-0.55	12.2
42	12.75	-2	12.34
43	12.75	-0.65	12.26
44	12.71	0.01	12.21
45	12.72	-2.77	12.28
46	12.68	-10	12.4
47	12.7	-9.5	12.44
48	12.64	-4.36	12.3
49	12.64	-4.25	12.19
50	12.64	-3.2	12.12
51	12.6	-1.5	12.13
52	12.57	-1.9	12.15
53	12.53	-5.48	12.2
54	12.54	-11.75	12.2
55	12.52	-8	12.25
56	12.53	-1.9	12.1
57	12.5	-0.55	11.81
58	12.52	0.1	11.7
59	12.47	0.5	11.87
60	12.42	-3.83	12.12
61	12.39	-7.65	12.21
62	12.37	-7.95	12.16
63	12.38	-4.1	12.16

Tabela 6.3: Medidas por injeção no sentido direto do dispositivo utilizando *Mode-Scrambler* (dBm). 114

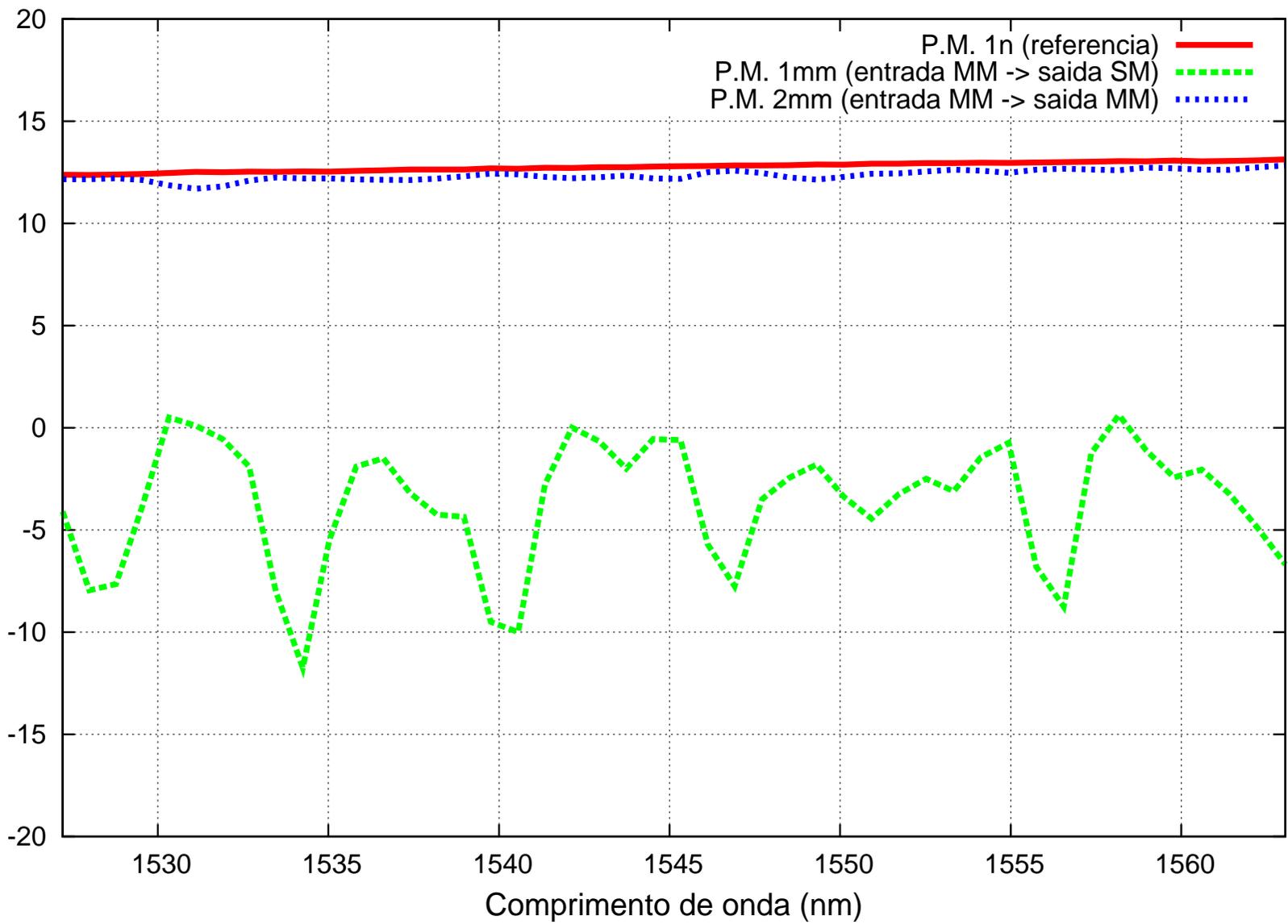
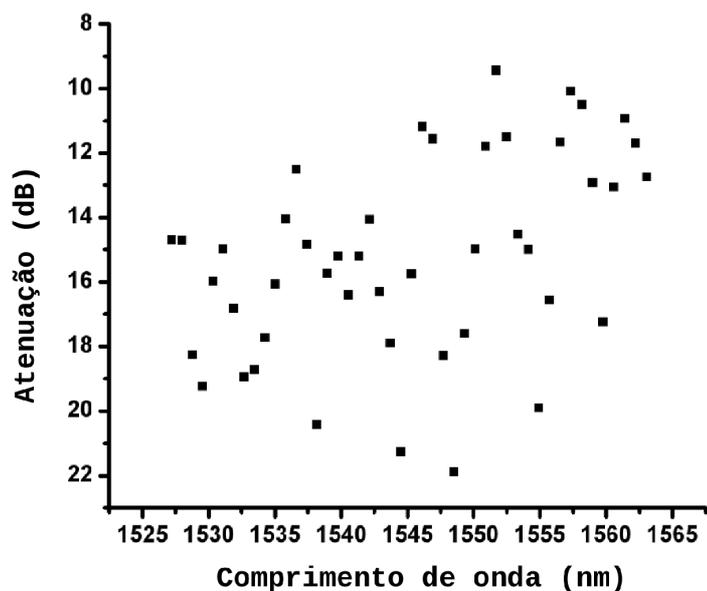
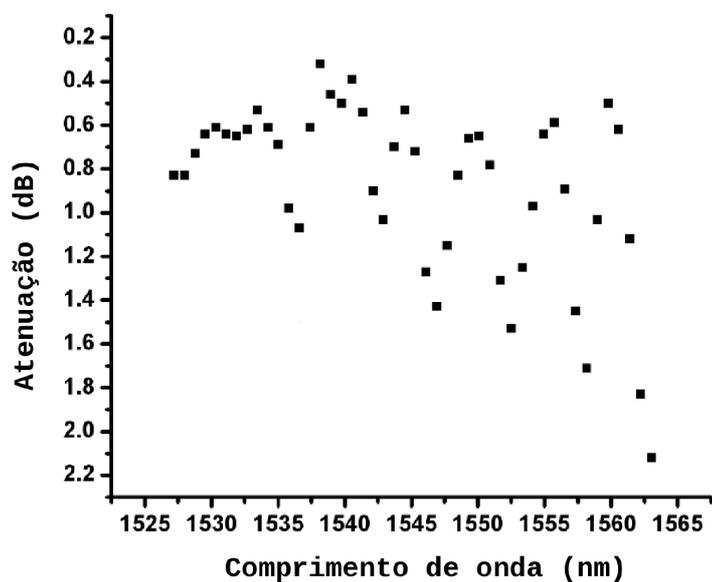


Figura 6.12: Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido direto do dispositivo SM/MM utilizando *mode-scrambler*. 115

6.3.4 Resposta espectrais gráficas com injeção em sentido reverso MM (*Mode-Scrambler*)².



(a) MM2 -> SM1 (Com uso de Mode-Scrambler).



(b) MM2 -> MM1 (Com uso de Mode-Scrambler).

Figura 6.13: Respostas espectrais de transmissão com injeção de luz no sentido reverso MM (uso de *Mode-Scrambler*).

²A utilização com *mode-scrambler* só é válida quando a injeção de luz é pelo braço de entrada MM. Por isso, a tabela apresentada possui saída para apenas um braço de entrada (MM).

Feixe	Normalização (SM)	Entrada no Braço GI-MM	
Canal	PM_1	$PM_1^{(SM)}$	$PM_2^{(MM)}$
18	13.13	0.38	11.01
19	13.09	1.38	11.26
20	13.06	2.13	11.94
21	13.04	-0.02	12.42
22	13.08	-4.15	12.58
23	13.04	0.12	12.01
24	13.05	2.55	11.34
25	13.02	2.94	11.57
26	13	1.33	12.11
27	12.98	-3.58	12.39
28	12.96	-6.96	12.32
29	12.97	-2.02	12
30	12.95	-1.58	11.7
31	12.95	1.45	11.42
32	12.92	3.48	11.61
33	12.92	1.12	12.14
34	12.88	-2.1	12.23
35	12.89	-4.71	12.23
36	12.85	-9.03	12.02
37	12.84	-5.45	11.69
38	12.84	1.27	11.41
39	12.81	1.63	11.54
40	12.8	-2.96	12.08
41	12.78	-8.5	12.25
42	12.75	-5.15	12.05
43	12.75	-3.55	11.72
44	12.71	-1.36	11.81
45	12.72	-2.48	12.18
46	12.68	-3.73	12.29
47	12.7	-2.5	12.2
48	12.64	-3.1	12.18
49	12.64	-7.78	12.32
50	12.64	-2.2	12.03
51	12.6	0.1	11.53
52	12.57	-1.49	11.59
53	12.53	-3.55	11.84
54	12.54	-5.18	11.93
55	12.52	-6.19	11.99
56	12.53	-6.42	11.91
57	12.5	-4.32	11.85
58	12.52	-2.45	11.88
59	12.47	-3.5	11.86
60	12.42	-6.82	11.78
61	12.39	-5.87	11.66
62	12.37	-2.35	11.54
63	12.38	-2.31	11.55

Tabela 6.4: Medidas por injeção no sentido contrário do dispositivo utilizando 117 *Mode-Scrambler* (dBm).

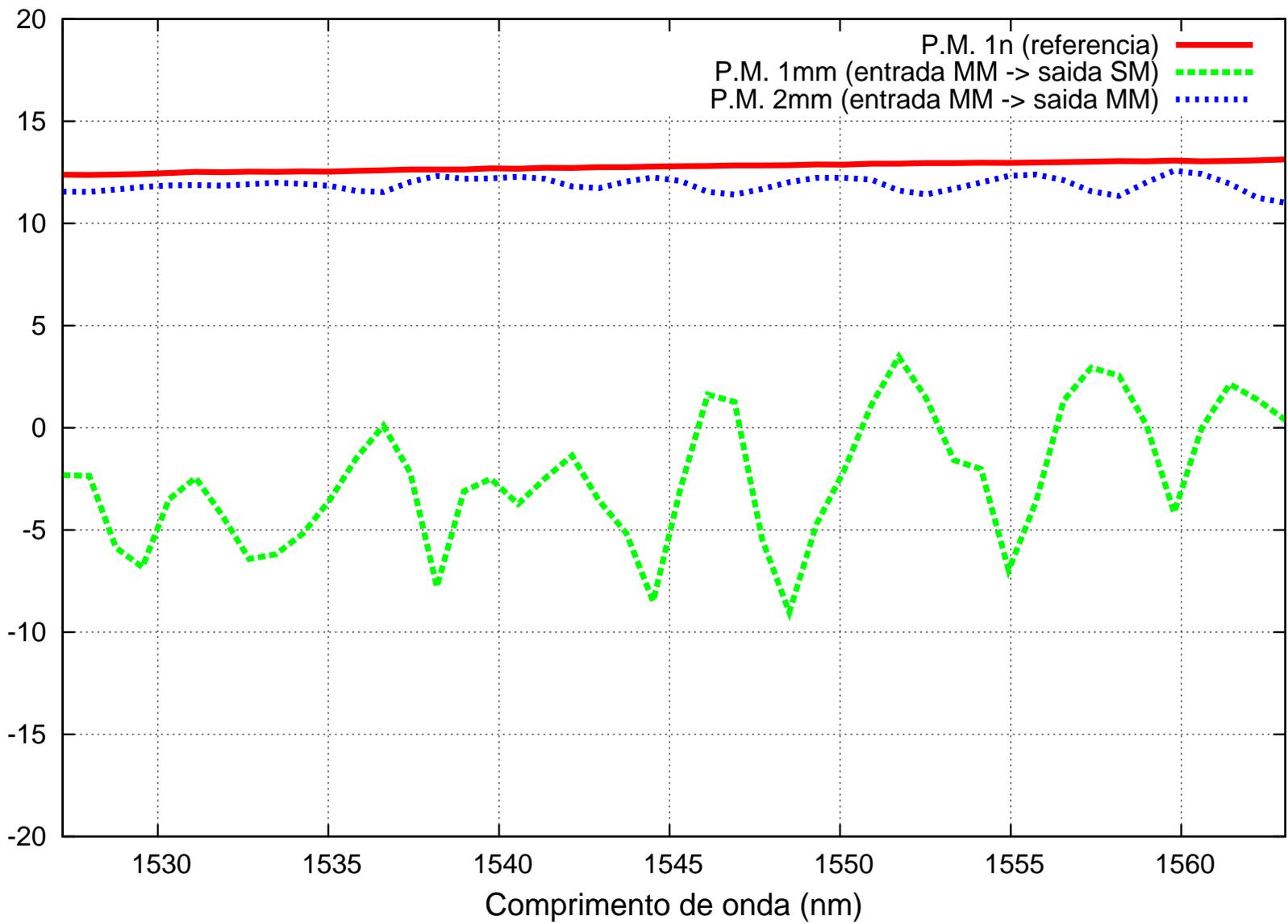


Figura 6.14: Gráfico comparativo das medidas obtidas por injeção de luz no sentido contrário do dispositivo SM/MM utilizando *mode-scrambler*. 118

6.4 Discussões

Inicialmente comenta-se a particularidade de resultados de caracter plano nas medidas de referência de todos os gráfico e na resposta espectral do misturador de modos (*mode-scrambler*) em toda banda “C”.

As Figuras 6.7 e 6.9 mostram a resposta espectral da perda por inserção direta e acoplamento cruzado. Comparando as figura 6.7 (a) e 6.9 (a) observa-se claramente não-reciprocidade quando a foto-deteccção ocorre pela mesma fibra onde a luz foi originalmente injetada, tratando-se de não-reciprocidade na perda por inserção transmissão.

Nas figuras 6.7 (b) e 6.9 (b), observa-se a não-reciprocidade quando a foto-deteccção ocorre pela fibra MM. Esta não-reciprocidade observada ocorre na perda por acoplamento cruzado e não por inserção como no caso anterior. A origem da não-reciprocidade no acoplamento cruzado deve-se ao mecanismo de não-reciprocidade da perda por inserção mencionado anteriormente combinado com o espectro de saída da conservação de energia.

A luz transmitida por cada fibra SM não é a mesmo pois as defasagens relativas dos modos interferentes não são as mesmas. Como a estrutura de guia de onda GI-MM (junção do acoplador) não é a mesma, acredita-se que esta seja a origem da não-reciprocidade a qual se verifica na perda por inserção do acoplador SM/MM.

Comparando as figuras 6.7 e 6.9, observa-se que os gráficos se complementam. Isto está compatível com a conservação da energia cuja luz injetada no dispositivo é partilhada na saída pelas duas portas SM e MM. Existem perdas adicionais por irradiação para o espaço livre e por diretividade (retro-espalhamento)

A figura 6.7 (a) mostra que no sentido direto SM1 \rightarrow SM2 o dispositivo se comporta como um filtro rejeita-banda (*notch-filter*) com profundidade de 4 dB em torno de 1545 nm e largura espectral (-3 dB) de aproximadamente 29 nm (o que torna potencialmente útil para aplicações CWDM). A figura 6.9 (a) mostra que no sentido reverso SM2 \rightarrow SM1 o dispositivo se comporta como um filtro tipo borda (*edge-filter*) apresentando transmissão razoavelmente plana na faixa 1525-1550 nm e filtragem de borda propriamente dita com $+0,23$ dB/nm de inclinação (*roll-off*).

A figura 6.7 (b) mostra que no sentido direto SM1 \rightarrow MM2 o dispositivo comporta-se como um filtro passa-banda (*band-pass*) em torno de 1545 nm, embora seja de baixa amplitude de transmissão (aproximadamente 1 dB). A figura 6.9 (b) mostra que na direção reversa SM2 \rightarrow MM1 o dispositivo comporta-se como um filtro tipo borda (*edge-filter*), porém agora com inclinação oposta a da figura 6.9 (a), apresentando transmissão razoavelmente plana de 1525-1550 nm e filtragem de borda com - 0,10 dB/nm de inclinação.

O comportamento na faixa passa-banda/rejeita-banda ou filtro de borda, não aparece simplesmente em função do intervalo espectral considerado [1]. Nota-se que as regiões planas do filtro de borda não correspondem quando o dispositivo funciona como filtro passa-banda/rejeita-banda.

As figuras 6.7 e 6.9 mostram respostas espectrais similares aos de acopladores de fibras SM 2x2 convencionais ou do tipo WDM, porém apresentam não-reciprocidade e diferenças quanto ao comportamento tipo filtro de borda. Entretanto a figura 6.11 mostra um comportamento bem diferente da resposta espectral de acopladores MM 2x2 convencionais.

A figura 6.11 (a) mostra o espectro de saída quando modos de baixa-ordem são injetados no sentido direto MM1 \rightarrow SM2. Já a figura 6.11 (b) mostra o espectro de saída quando modos de baixa-ordem são injetados no sentido direto MM1 \rightarrow MM2. Fazendo uma comparação entre as figuras 6.11, observa-se similaridades entre os picos e vales, porém com uma profundidade de modulação bastante reduzida quando o sinal óptico sai do dispositivo pelas portas MM.

A figura 6.13 mostra o espectro de saída pelas portas SM1 e MM1 quando modos com distribuição equilibrada são injetados no sentido reverso através da porta MM2. Os vales e picos já não são bem definidos tal como se tem observado em dispositivos SMS [5]. De fato, observou-se a saída de sinais ópticos instáveis frente às diversas perturbações externas como vibrações, contato com a fibra ou outras perturbações físicas [13, 22].

Todas as figuras 6.11 e 6.13 referem-se a injeção de luz através das portas MM com dois diferentes regimes de modos injetados. O primeiro regime refere-se a injeção de modos com distribuição equilibrada utilizando um misturador de modos (*mode-scrambler*) conforme mostrado na figura 6.5. Este primeiro regime é correspondente a uma “interferência multimodal padrão”. O segundo regime compreende a injeção de luz na fibra MM através da fibra SM, obtendo-se então modos de baixa-ordem, também ilustrado na figura 6.5. Espera-se que a maior parte da energia seja acoplada no modo LP_{01} propagante pela fibra MM. Supondo uma emenda perfeitamente concêntrica entre as fibras, apenas os modos

simétricos LP_{0m} serão gerados. Este segundo regime corresponde a uma “interferência multimodal restrita” [16]. Conforme mostrado na 6.11 (a), quando os modos de baixa-ordem são injetados, observa-se um espectro de saída de rápidas oscilações com variação do comprimento de onda de intervalos entre vales < 10 nm e amplitude de profundidade na faixa 6 a 12 dB. Em qualquer comprimento de onda considerado, o sinal é bem atenuado em comparação ao injetado. Por exemplo em ~ 1538 nm temos 12 dB de atenuação, o menor valor. O comportamento mostrado na 6.11 (a) é similar ao do fenômeno do reimageamento [16] característico de estruturas SMS quando o comprimento físico da guia multimodo é alterado. Desta forma, o presente dispositivo poderá ser útil como um sensor de tensão mecânica (*strain-sensor*) [9, 16].

As instabilidades verificadas na A figura 6.13 são características de interferômetros a fibra multimodo [13, 21, 22, 28]. Quando o sinal é injetado pelas portas SM o dispositivo pode operar como uma das três modalidades de filtro espectral qualquer que fosse a porta de saída. Quando modos de baixa-ordem são injetados no sentido MM \rightarrow SM o dispositivo é estável frente a perturbações externas e apresentava espectro similar com vários mínimos de atenuação. Porém, nas figuras 6.11 (b) e 6.13 (b) quando a saída ocorre pelas portas MM, o dispositivo torna-se instável. Nesta última configuração, o dispositivo simultaneamente acoplava luz e gerava fenômeno MMI. Isto pode ser comparado aos sensores tipo modalmétrico [13, 21, 22, 28] baseados na combinação de um acoplador SM convencional com uma emenda por fusão tipo SM/MM. Ao fim, é observado que a figura 6.13 (a) ainda apresenta saída como um sinal óptico instável.

7 Conclusões e sugestão de trabalhos futuros

Os resultados mostram que o sistema modalmétrico tipo SMS em modo reflexivo (e sua fibra GI-MM sensora) é muito sensível à distúrbios mecânicos mesmo de baixa magnitude e que no entanto, não mostrou resposta DC ou AC frente às súbitas variações de temperatura aplicadas pontualmente.

O sistema SMS é potencialmente capaz de localizar perturbações em tempo real, operando com fontes luminosas de onda contínua (CW). Pode-se dizer que o sistema SMS poderia ser descrito como sistema “OTDR com sensibilidade de fase no tempo (ϕ -OTDR)”, cuja sensibilidade e tempo de resposta é muito superior ao do OTDR comum [14].

Fica bastante claro que quanto maior o desalinhamento lateral na emenda SM/MM, mais “sensível” o sistema será. A justificativa para o fenômeno de maior ou menor “sensibilidade” é que quando há um desalinhamento quase nulo (alinhamento ideal entre as fibras SM e GI-MM), a potência acoplada da fibra SM à GI-MM gerará poucos modos circulares simétricos, ou seja, quando uma emenda SM e GI-MM for concêntrica perfeita somente o modo LP_{01} será excitado na fibra GI-MM (nota-se que o modo LP_{01} na fibra GI-MM se estende mais no plano transversal do que na fibra SM devido aos perfis de índices de refração e diâmetros serem diferentes) e desta forma, não haverá modos suficientes na fibra GI-MM disponíveis para a modulação na fase em virtude de uma perturbação. Entretanto, mesmo para uma emenda concêntrica perfeita, alguns modos superiores ao LP_{01} (LP_{0m} , com simetria azimutal onde m é um número inteiro > 1) poderão também ser excitados na fibra GI-MM (sendo que é esperado que a maior parte da energia ficaria no modo LP_{01}) visto que o modo LP_{01} na fibra GI-MM é mais extenso transversalmente que na fibra SM. Com essa ocorrência, este deverá criar um efeito de “filtragem espacial” no momento da re-acoplagem à fibra SM, possibilitando a ocorrência de interferência multimodal (MMI).

Caso seja forçado um desalinhamento lateral, pode-se alocar mais energia do modo LP_{01} para os modos não-simétricos LP_{nm} (os quais irão provocar maior interferência quando forem re-acoplar na fibra SM). A interferência multimodal (MMI) ficará mais acentuada e o dispositivo mais sensível às perturbações mecânicas.

A variação de sensibilidade também está associada com o comprimento físico da fibra MM. Para menores comprimentos da fibra MM, maior energia será refletida. Porém ao aumentar o comprimento físico, o efeito do desalinhamento lateral proporcionará um maior re-acoplamento de modos, permitindo que mais energia possa ser re-injetada à fibra SM.

Quanto a técnica de localização, o algoritmo *LMS* por ser adaptativo precisa ter seus parâmetros re-balanceados caso a aproximação temporal dos pulsos aumente (limiar de projeto) pois a resposta do filtro-pseudo-inverso pode passar a ser instável. Sugere-se para quando o sistema for instalado, a realização de calibração dos parâmetros do filtro com base na pior condição possível que é quando a perturbação ocorre na extremidade terminal do segmento GI-MM. Além disso, pode-se instalar bobinas de fibra MM ao fim do segmento “sensível” a fim induzir atraso entre os pulsos, possibilitando uma detecção dos pulsos mais efetiva.

A resposta espectral propriamente dita (na banda “C”) do acoplador SM/MM sob dois diferentes regimes de propagação e nas diversas combinações de portas de entrada/saída. Como consequência, também é demonstrado que o dispositivo pode ter múltiplas utilidades, como exibir comportamento de filtro espectral de várias modalidades ou de interferômetro multimodal. A terceira contribuição, refere-se a descrição de aplicações específicas, mas não ainda efetivamente realizadas. A não reciprocidade confirmada nos dispositivos MMI abre um novo leque de oportunidades para utilização destes dispositivos em circuitos e redes ópticas. É observado a resposta de filtros (rejeita-banda, passa-banda ou de borda) ou interferômetro multimodo (MMI) não-recíproco. O presente dispositivo pode ser compacto e útil para aplicações em Telecomunicações e Sensores baseados em fibras ópticas. Entretanto, ainda requer o desenvolvimento de um modelo teórico preciso de forma a projetá-lo e otimizá-lo para aplicação específica.

7.1 Sugestões para aplicações

A detecção é caracterizada por um padrão de assinaturas para cada tipo de perturbação. Um sistema de localização trabalhando em conjunto com um banco de dados dinâmico é capaz de identificar inúmeras informações do ambiente. A análise pode utilizar dispositivos eletrônicos de processamento rápidos como DSPs, porém não necessariamente com o *clock* muito elevado. Essa característica possibilita escolha de dispositivos mais baratos e com um grande leque de aplicações para:

Sensores Mecânicos/Acústicos: Como perturbações mecânicas são por natureza apresentadas no espectro de baixa frequência e o sistema modamétrico SMS já mostrou-se sensível o suficiente para detecção de baixas magnitudes, este pode ser utilizado como dispositivo de detecção de perturbações físicas pontuais aleatórias. (exemplo: uma escavadeira gera uma assinatura de perturbação de alta magnitude e baixa frequência. O tipo de sinal que representa esta perturbação pode ser caracterizado e arquivado para identificação posterior).

Filtros Espectrais: Como já visto, emendas SM/MM as quais possibilitem formar dispositivos de características MMI podem ser utilizados para confecção de filtros passivos dentre eles: borda, *notch* e passa-banda.

Sabe-se no entanto que para esta aplicação, muito depende da modelagem matemática que irá definir os parâmetros de fabricação das emendas SM/MM.

Medidores de λ : Por fim, o sistema SMS pode direcionar para aplicações como sensores de variação de λ , estabilização (*locking*) e medidores de LASER DFB ou DWDM.

Referências Bibliográficas

- [1] A. M. Hatta, G. Farrell, Q. Wang, G. Rajan, P. Wang and Y. Semenova, “**Ratio-metric Wavelength Monitor Based on Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Structure**”, Microwave and Optical Technology Letters, 50, 12, pp. 3036-3039, 2008.
- [2] Abdelrafik Malki, Rachid Gafsi, Laurent Michel, Labarrère, Pierre Lecoy, “**Impact and Vibration detection in composite materials by using intermodal interference in multimode optical fibers**”, Applied Optics, Vol. 35, No. 25, 1 September (1996).
- [3] Agus Muhamad Hatta, Gerald Farrell, Qian Wang, ”**A simple integrated ratio-metric wavelength monitor based on multimode interference structure**”, Institute of Technology, Kevin Street, Dublin, Ireland.
- [4] Alok Mehta, Waleed Mohammed, Eric G. Johnson, “**Multimode interference-based Fiber-Optic Displacement Sensor**”, IEEE Photonics Technology letters, Vol. 15, No. 8, August (2003).
- [5] Arun Kumar, Ravi K. Varshney, Siny Antony C., Pratha Sharma, “**Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures**”, Optics Communications 219, 215-219, (2003).
- [6] Chrisada Sookdhis, Ting Mei, Hery Susanto Djie, “**Wavelength Monitoring With Low-Contrast Multimode Interference Waveguide**”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 4, April 2005.
- [7] D. Gloge and E. A. J. Marcatili, "Multimode theory of graded-core fibres", Bell System Technical Journal, 52, 9, 1563-1578 (1973).
- [8] Denis Donlagié, Brian Culshaw, “**Microbend Sensor Structure for Use in Distributed and Quasi-Distributed Sensor Systems based on Selective Launching and Filtering of the Modes in Graded Index Multimode Fiber**”, Journal of lightwave technology, Vol. 17, No. 10, October 1999.
- [9] Enbang Li, “**Temperature Compensation of Multimode-Interference-Based Fiber Devices**”, Optics Letters, Vol. 32, No. 14, July 15 2007.

- [10] M. Eriksrud and A. Mickelson, "**Application of the backscattering technique to the determination of parameter fluctuations in multimode optical fibres**", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-30, 10, 1466-1471 (1982).
- [11] FOPSSTM LDS Technical Specifications, "**Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers**", TS-FFT-LDS Ver. 1.0, September (2000).
- [12] H. C. Chang, H. S. Huang and J. Wu, "**Wave Coupling Between Parallel Single-Mode and Multimode Optical Fibers**", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-34, 12, pp. 1337-1343, 1986.
- [13] I. Oanca, G.Y. Yang, J. Katsifolis and E. Tapanes, "**Simultaneous wavelength multiplexed fiber optic communications and cable integrity monitoring technique**", CLEO, paper WP4, 106-107, 16th July (1997).
- [14] Juan C. Juarez, Eric W. Maier, Kyoo Nam Choi, Henry F. Taylor, "**Distributed Fiber-Optic intrusion Sensor System**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 6, June (2005).
- [15] J. Tschepe, K. Desinger, M. Herring, G. Müller , "**The Transmission of High and Low Power Acoustical Transient Waves Via Optical Fibers**", 1051-0117/94/0000-1899 IEEE, 1994.
- [16] Lucas B. Soldano, Erik C. M. Pennings, "**Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications**", Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 4, April 1995.
- [17] M. S. Whalen, T.H. Wood, "**Effectively Nonreciprocal Evanescent-Wave Optical-Fibre Directional Coupler**", Electronics Letters, Vol. 21, No. 5, 28th February 1985.
- [18] O. Bryngdahl, "**Image formation using self-imaging techniques**", Journal of Optical Society of America, 63, 4, pp. 416-419, 1973.
- [19] Patrick Gaydecki, "**A Versatile Real-Time Deconvolution DSP System Implemented Using a Time Domain Inverse Filter**", Meas. Sci. Technol., Institute of Physics Publishing 12. 82-88, 2001.
- [20] Qian Wang, Gerald Farrell, Wei Yan, "**Investigation on Single-Mode-Multimode-Single-Mode Fiber Structure**", Journal of lightwave technology, Vol. 26, No. 5, March 1 2008.

- [21] R.M. Ribeiro and M.M. Werneck, "**An intrinsic graded-index multimode optical fibre strain-gauge**" *Sensors and Actuators A*, 111, 210- 215 (2004).
- [22] Ricardo M. Ribeiro, Yanes C. Balod, Andrés P. L. Barbero e Paulo A. M. dos Santos. "**Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de Telecomunicações Usando um Sistema Modalmétrico no Domínio do Tempo**" - XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT'08), 02-05 de Setembro de 2008, Rio de Janeiro, RJ.
- [23] Ricardo M. Ribeiro, "**Spectral Response of a Modalmetric Optical Sensor Based on the Graded-Index Multimode Fibre**", submetido ao *Optics Communications* (2008).
- [24] R. J. Boughton, M. Farhadiroushan, D. Kreit, R. C. Youngquist and I. P. Giles, "**Optical-fiber systems with nonreciprocal couplers**", *Optics Letters*, 12, 3, pp. 205-207, 1987.
- [25] Saurabh Mani Tripathi, Arun Kumar, Ravi K. Varshney, Y. Bala Pavan Kumar, Emmanuel Marin, Jean-Pierre meunier "**Strain and Temperature Sensing Characteristics of Single-Mode-Multimode-Single-Mode Structures**", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 13, July 1 2009.
- [26] Tatsuya Sadoka, Yoshito Sonoda, "**Measurement of Low-Frequency Ultrasonic Wave in Water Using an Acoustic Fiber Sensor**", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. Vol. 53, No. 4, April 2006.
- [27] Timo Aalto, Päivi Heimala, Pekka Katila, "**Integrated Optical Circuits: An Overview and an Optical Beam Combiner Circuit**", ECCTD'01 - European Conference on Circuit Theory and Design, August 28-31, Finland 2001.
- [28] W. S. Mohammed, A. Mehta and E. G. Johnson, "**Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference**", *Journal of Lightwave Technology*, 22, 2, pp. 469-477, 2004.
- [29] Waleed S. Mohammed, Xija Gu, Joachim Meier, Peter W. E. Smith, "**All Fiber on-axis Coupling Scheme between Single Mode Fiber and GRIN Fiber**", *Journal of Modern Optics* Vol. 55, No. 7, 1033-1049, 10 April 2008.
- [30] Yu Liu, Li Wei, "**Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers**", *Applied Optics*, Vol. 46, No. 13, 1 May (2007).

Apêndices

A Trabalho: X SEMEC UFF / 2008

*SENSOR MODALMÉTRICO DE PERTURBAÇÕES
BASEADO EM FIBRA ÓPTICA DE SÍLICA MULTIMODO
DE ÍNDICE GRADUAL APLICADO A ENGENHARIA
MECÂNICA*

Andrés P. L . Barbero, Murilo B. de Carvalho, Ricardo M.
Ribeiro, Yanes C. Balod

(Departamento de Engenharia de Telecomunicações ad Federal
Fluminense, Niterói / RJ)

Paulo A. M. dos Santos

(Instituto de Física ad Federal Fluminense, Niterói / RJ)

SENSOR MODALMÉTRICO DE PERTURBAÇÕES BASEADO EM FIBRA ÓPTICA DE SÍLICA MULTIMODO DE ÍNDICE GRADUAL APLICADO A ENGENHARIA MECÂNICA

AUTORES

Andrés P. L. Barbero
Murilo B. de Carvalho
Ricardo M. Ribeiro
Yanes C. Balod

Departamento de Engenharia de Telecomunicações
 Universidade Federal Fluminense, Niterói / RJ - Brasil

Paulo A. M. dos Santos

Instituto de Física
 Universidade Federal Fluminense, Niterói / RJ - Brasil

OBJETIVO

Diversas estruturas necessitam ter seus parâmetros físicos monitorados de forma distribuída na posição e ao longo do tempo. Dentre tais parâmetros, podemos destacar a temperatura, estiramento, compressão e vibração.

O objetivo desta pesquisa é desenvolver sensores a base de fibra óptica utilizando a conhecida técnica de Refletometria Óptica no Domínio do Tempo (OTDR).

O dispositivo que vem sendo desenvolvido possui como atribuições a simplicidade, baixo custo e capacidade de monitorar distúrbios de fraca intensidade como pequenas vibrações, transdução acústica distribuída e monitoramento de ações de invasão e vandalismo em instalações.

Diferente do equipamento OTDR, o sistema desenvolvido aqui é capaz de localizar perturbações em tempo real, opera com fontes luminosas de onda contínua e possui técnicas de detecção diferentes.

PRINCÍPIO

O fenômeno ocorre quando uma fonte de luz (LASER/LED) é aplicada a uma fibra monomodo (SM) e esta terá uma emenda com uma fibra multimodo de índice gradual (MM GI). O núcleo da fibra SM é 5 a 20 vezes menor que uma fibra MM. A emenda de uma fibra SM/MM cria um filtro de modos onde toda luz injetada da fibra SM para a MM sofrerá um acoplamento modal onde somente alguns modos da luz serão re-transmitidos à fibra SM.

O mecanismo é baseado na interferência multimodal entre os vários modos propagantes, que acontece na emenda entre as fibras monomodo (SM ; alimentação) e multimodo de índice gradual (MM GI ; sensora).

A fibra MM GI impõe um padrão senoidal de trajetórias aos raios propagantes na fibra. Quando um estiramento é aplicado na fibra, ocorre uma modulação espacial da fase do grupo de raios (Fig. 1) que é convertida em variação de intensidade óptica quando o sinal é re-injetado na emenda SM/MM.

Foi observado que o sistema não apresenta sensibilidade térmica, porém é esperado que em ambientes com temperaturas constantes e muito elevadas (onde possa ocorrer dilatação da fibra) possam contribuir com certa interferência nas leituras.

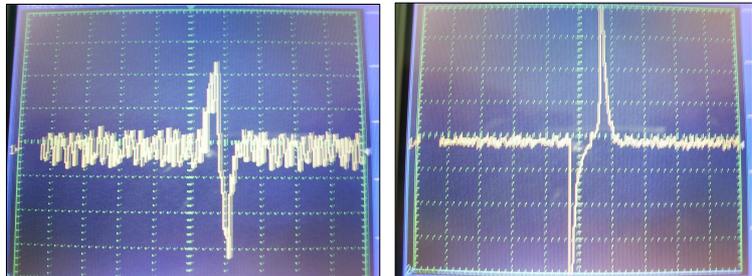


Figura 2: Resposta temporal obtida do osciloscópio (50 mV/div e 0,2s/div)

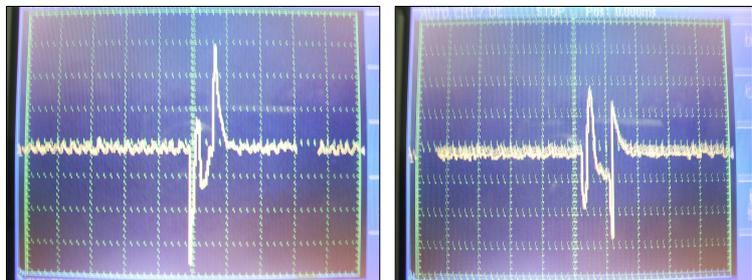


Figura 3: Resposta temporal obtida do osciloscópio (50 mV/div e 0,2 s/div)

O sensor modalométrico detecta um sinal de interferência que modula o re-acoplamento dos modos propagantes na fibra SM, originado pela superposição de N modos, dado pela equação (1).

$$I(r, \theta) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sqrt{I_j(r, \theta) I_k(r, \theta)} \cos[\psi_j(r, \theta) - \psi_k(r, \theta) + \Delta\Phi_{jk}] \quad (1)$$

Onde:

Na Eq. (1), j e k designam os modos propagantes na fibra MM, $\Delta\Phi_{jk}$ é a fase modificada pela perturbação e ψ_j e ψ_k são as fases aleatoriamente distribuídas dos modos j e k (respectivamente).

RESULTADOS

Aplicando perturbações mecânicas bastante fracas em qualquer ponto da fibra multimodo, observa-se respostas sob a forma de sinais de voltagem no osciloscópio com amplitudes que facilmente alcançam 200 mV em até centenas de milissegundos de duração total. Tal resposta temporal extremamente sensível aos distúrbios não é possível ser obtida com o uso do equipamento OTDR e não são detectadas perturbações na fibra óptica monomodo (SM) do sistema.

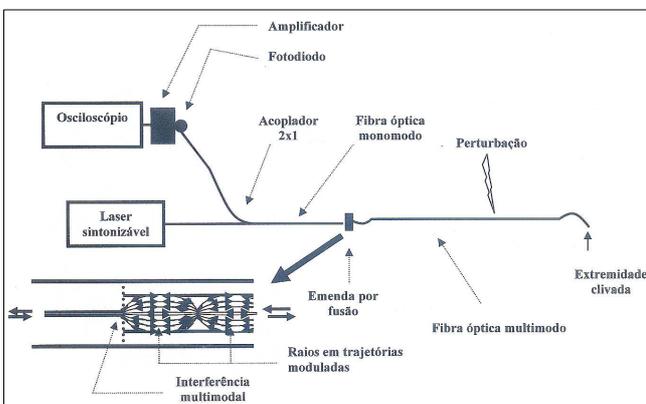


Figura 1: Configuração experimental onde uma inserção ilustra o princípio de funcionamento do dispositivo

CONSIDERAÇÕES & DETECÇÃO

Em uma perturbação, há um sinal óptico no sentido da extremidade clivada e outro no sentido contrário (retornando). O sinal que retorna será detectado no instante de tempo t_1 e sinal que será refletido na extremidade retornará e será detectado no instante de tempo t_2 . O fotodetector irá capturar os dois sinais superpostos com um atraso relativo $\Delta t = t_2 - t_1$, que pode ser obtido pela Eq. (2).

$$z_0 = L - \frac{c\Delta t}{n_{\text{eff}}} \quad (2)$$

Onde c é a velocidade da luz, L é a distância total do enlace, n_{eff} é o índice de refração efetivo da fibra óptica e z_0 é a localização da perturbação.

Para enlaces com $L < 100$ km, os sinais chegarão superpostos no fotodetector e com isso, torna-se necessário uso de técnicas de processamento de sinais para a identificação da perturbação. Uma abordagem consiste em interpretar os dois pulsos superpostos como a saída de um sistema linear cuja resposta ao impulso possui a forma de um dos pulsos isolados, onde na entrada aplica-se dois impulsos com uma separação temporal igual a Δt . Desse modo pode-se construir um sistema inverso que produza em sua saída dois impulsos quando o sinal combinado dos dois pulsos superpostos for aplicado à sua entrada, obtendo-se assim a separação desejada.

**B Trabalho: PET-TELE UFF /
2008**

*Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de
telecomunicações Usando um Sistema Modal métrico no
Domínio do Tempo*

Aluno: Yanes Checcacci Balod

Orientador: Ricardo Marques Ribeiro


 Universidade Federal Fluminense
 Departamento de Engenharia de Telecomunicações

Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de Telecomunicações Usando um Sistema Modalmétrico no Domínio do Tempo

Aluno: Yanes Checcacci Balod
 Orientador: Ricardo Marques Ribeiro

2008

1

Índice:

- Motivação
- Objetivo
- Princípio
- Configuração do dispositivo
- Detecção: Intensidade
- Detecção: Localização
- Resultados
- Vídeos
- Processamento de Sinais
- Justificativas do P.S.
- Conclusões
- Agradecimentos
- Referências
- Dúvidas

2

Motivação:

- Diversas estruturas necessitam ter seus parâmetros físicos monitorados de forma distribuída na posição e ao longo do tempo.
- Atribuir ao dispositivo a capacidade de monitorar distúrbios de fraca intensidade como pequenas vibrações, transdução acústica distribuída e ações de invasão / vandalismo.

3

Objetivos:

- Desenvolver sensores de fibra óptica utilizando conhecimentos do fenômeno modalmétrico com aplicação de técnicas de processamento de sinais.
- Dispositivo deverá ser apto a detectar e caracterizar as perturbações em intensidade, localização e natureza.

4

Princípio:

- Fonte de luz (LASER/LED) é aplicada a uma fibra SM emendada a uma fibra MM GI.
- A fibra MM GI impõe um padrão senoidal de trajetórias aos raios propagantes. Na presença de uma perturbação, há uma modulação espacial da fase do grupo de raios.
- A modulação é convertida em variação de intensidade óptica quando o sinal é re-injetado na emenda SM/MM. O acoplamento de modos ocorre por interferência multimodal e assim somente alguns modos da luz serão re-transmitidos à fibra SM.

5

Configuração do dispositivo:

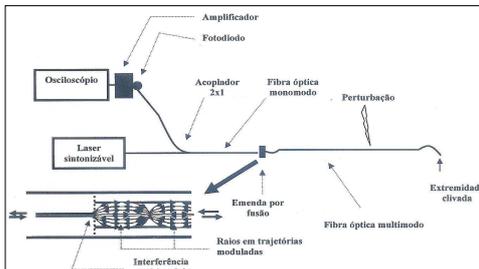


Figura 1: Configuração experimental onde uma inserção ilustra o princípio de funcionamento do dispositivo

6

Configuração do dispositivo:

- Amplificador de transimpedância do grupo ROITHNER LASERTECHNIK configurado para único estágio.
- Fotodetector FC-InGaAs do grupo ROITHNER LASERTECHNIK operando em regime fotovoltaico.
- LASER WDM com $\lambda_0 = 1550$ nm.
- Comprimento do enlace: $L = 3,6$ m.
- Ponto para realização das perturbações: $z_0 = 1,8$ m.

7

Detecção: Intensidade

- O sensor modalétrico detecta um sinal de interferência que modula o re-acoplamento dos modos propagantes na fibra *MM GI* originado pela superposição de N modos. O fenômeno pode ser expresso pela equação (1).

$$I(r, \theta) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sqrt{I_j(r, \theta) I_k(r, \theta)} \cos[\psi_j(r, \theta) - \psi_k(r, \theta) + \Delta\Phi_{jk}]$$

Equação (1): j e k designam os modos propagantes na fibra *MM GI*, $\Delta\Phi_{jk}$ é a fase modificada pela perturbação e ψ_j e ψ_k são as fases aleatoriamente distribuídas dos modos j e k (respectivamente).

8

Detecção: Localização

- Há um sinal óptico no sentido da extremidade clivada e outro no sentido contrário.
- O sinal que retorna é detectado no instante de t_1 .
- O sinal que segue é detectado no instante t_2 .
- O atraso relativo é dado pela equação (2):

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

Equação (2): Atraso relativo.

9

Detecção: Localização

- O fotodetector detectará os impulsos com certo atraso relativo. Com este é possível detectar exatamente a localização das perturbações com a equação (3).

$$z_0 = L - \frac{c \Delta t}{n_{\text{eff}}}$$

Equação (3): Onde c é a velocidade da luz, L é a distância total do enlace, n_{eff} é o índice de refração efetivo da fibra óptica e z_0 é a localização da perturbação.

10

Resultados:

- Aplicando perturbações de baixa magnitude em qualquer ponto da fibra *MM GI*, observa-se respostas sob a forma de sinais de voltagem no osciloscópio com amplitudes que facilmente alcançam 200 mV em até centenas de milissegundos de duração.
- Tal resposta temporal extremamente sensível e veloz aos distúrbios não é possível ser obtida com o uso do equipamento *OTDR*.

11

Resultados:

- Não são detectadas perturbações na fibra óptica monomodo (SM) do sistema.
- Foi observado que o sistema não apresenta sensibilidade térmica, porém é esperado que em ambientes com temperaturas constantes e muito elevadas (onde possa ocorrer dilatação da fibra) possam contribuir com certa interferência nas leituras.

12

Fotos:

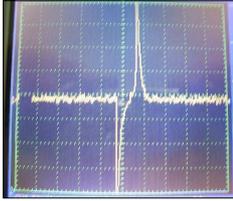


Figura 2: Resposta temporal obtida do osciloscópio
(50 mV/div e 0,2s/div).

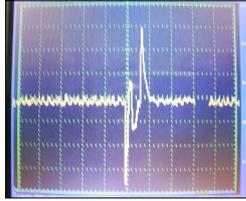


Figura 3: Resposta temporal obtida do osciloscópio
(50 mV/div e 0,2 s/div).

13

Videos:

14

Processamento de Sinais:

- Para $L < 100$ km os sinais chegarão superpostos. Torna-se necessário então, o uso de técnicas de processamento de sinais para caracterizar as perturbações.
- Uma abordagem consiste em interpretar os dois pulsos superpostos como a saída de um sistema linear cuja resposta ao impulso possui a forma de um dos pulsos isolados, onde na entrada aplica-se dois impulsos com uma separação temporal igual a Δt .
- Constroi-se então um sistema inverso que produza em sua saída dois impulsos quando um sinal combinado for aplicado à sua entrada.

15

Justificativa do P.S.:

- Usa-se a perturbação da figura (2) como exemplo onde a cada quadricula representa na horizontal 0,2s.
- A perturbação ocorre por aproximadamente 1,5 quadros. Logo, o tempo total da perturbação é de 0,3s.
- O valor de 0,3s será usado para simular que o sinal visto na figura (2) fosse os dois impulsos (sentido para a extremidade clivada e retornando) gerados por uma perturbação simples.
- Definimos um valor hipotético de 3.35 para n_{eff} para ser verificado na equação (3) a relação entre L e z_o .

16

Justificativa do P.S.:

- $N_{\text{eff}} = 1,55 \mid c = 3.10^8 \text{ m/s}^2 \mid \Delta t = 0,3\text{s}$

$$Z_o = L \cdot \frac{c \Delta t}{n_{\text{eff}}} \quad L - Z_o = \frac{c \Delta t}{n_{\text{eff}}} \quad L - Z_o = \frac{3.10^8 (0,3)}{1,55}$$

$$L - Z_o = 58064517\text{m}$$

$$L - Z_o \approx 58,064517 \cdot 10^3 \text{ km}$$

- Supondo $L = 59 \cdot 10^3$ km:

$$59,000 \cdot 10^3 - Z_o = 58,064517 \cdot 10^3 \text{ km}$$

$$Z_o \approx 936 \text{ km}$$

17

Justificativa do P.S.:

- Como visto, se o intervalo de 0,3 segundos representasse os dois impulsos (ida e volta) dos feixes de luz gerados de uma perturbação, seria necessário um enlace de 59.000 km para uma perturbação ocorrida em z_o de 936 km.
- Como o enlace utilizado no experimento foi de 3,6 metros, o tempo de 0,3 segundos adquirido corresponde ao sinal de duas perturbações diferentes onde cada sinal visto possui dois impulsos dos feixes de luz superpostos.

18

Conclusões:

- É um sistema de monitoramento de perturbações e integridade física em tempo real.
- Técnicas de processamento de sinais são necessárias para a detecção da localização das perturbações.
- O sistema não apresenta sensibilidade térmica, porém é esperado que em ambientes com temperaturas constantes e muito elevadas possam contribuir com certa interferência nas leituras.
- O sensoriamento é somente ativo no segmento *MM GI*.

19

Agradecimentos:

- Dr. Ricardo M. Ribeiro (ENG)
- Dr. Murilo B. de Carvalho (ENG)
- Dr. Andrés P. L. Barbero (ENG)
- Dr. Paulo A. M. dos Santos (FIS)
- Equipe do Laboratório de Comunicações Ópticas da UFF (LACOP)
- CNPq

20

Referências:

- An intrinsic graded-index multimode optical fibre strain-gauge – *R.M. Ribeiro, M.M. Werneck* / *Sensors and Actuators A* 111 (2004) 210-215.
- A versatile real-time deconvolution DSP system implemented using a time domain inverse filter – *P. Gaydecki* / *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001) 82-88.
- Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de Telecomunicações Usando um Sistema Modalmétrico no Domínio do Tempo - *Ricardo M. Ribeiro, Yanes C. Balod, Andrés P. L. Barbero e Paulo A. M. dos Santos* - SBRT'08, 2008.

21

Dúvidas:



22

C Publicação 1: SBRT 2008

Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de Telecomunicações Usando um Sistema Modalométrico no Domínio do Tempo

Ricardo M. Ribeiro, Yanes C. Balod, Andrés P. L. Barbero e Paulo A. M. dos Santos

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES
SBrT '08, 02-05 DE SETEMBRO DE 2008, RIO DE
JANEIRO, RJ.

Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de Telecomunicações Usando um Sistema Modalmétrico no Domínio do Tempo

Ricardo M. Ribeiro, Yanes C. Balod, Andrés P. L. Barbero e Paulo A. M. dos Santos

Resumo – Este trabalho descreve pela primeira vez a resposta temporal de um sensor modalmétrico à fibra óptica para perturbações de contato mecânico aplicado ao monitoramento sensível da integridade física de cabos ópticos de Telecomunicações. Tal monitoramento é impossível de ser feito por Refletometria Óptica no Domínio do Tempo (OTDR) tradicional. O mecanismo do sistema modalmétrico é baseado na interferência entre os vários modos propagantes, que acontece na emenda entre as fibras monomodo (SM) e multimodo de índice gradual (GI-MM). O dispositivo é extremamente sensível a um contato mecânico de baixa magnitude, mas não a variação de temperatura, ambos aplicados pontualmente.

Palavras-chaves – Sensor modalmétrico, fibra óptica multimodo, perturbação, interferômetro, integridade física, cabo óptico.

I. INTRODUÇÃO

Cabos ópticos de Telecomunicações são tradicionalmente monitorados quanto às atenuações, reflexões, curvaturas excessivas e descontinuidades de suas fibras usando a conhecida técnica de Refletometria Óptica no Domínio do Tempo (OTDR) [1]. A técnica de OTDR tradicional apesar de poderosa e muito útil, possui limitação em sua sensibilidade. Além do mais, não funciona em tempo real, pois requer a aquisição e promediação de uma grande quantidade de medidas de formatos de onda de retroespalhamento Rayleigh, processo este que pode levar vários minutos. Isto deve-se ao fato de que o sinal retroespalhado está dezenas de dBs abaixo do sinal óptico de varredura, o que produz um formato de onda extremamente ruidoso. A técnica de OTDR não é capaz de detectar distúrbios atuantes no cabo óptico, como por exemplo, aqueles decorrentes de simples contato mecânico nas fibras ou vibrações num determinado local do cabo. Se um intruso quiser acessar fisicamente a uma

fibra do cabo ou uma retroescavadeira estiver operando muito próxima do cabo óptico, este será submetido a esforços transversais e axiais de muito baixa magnitude que o OTDR não será capaz de detectar nem em tempo remoto, exceto, obviamente, se a fibra for rompida ou suficientemente curvada.

Neste trabalho, descreve-se pela primeira vez medidas de resposta no domínio do tempo de um sensor modalmétrico à fibra óptica operando em torno de 1550 nm sob a ação de perturbações de contato mecânico de muito baixa magnitude. Embora de caráter parcialmente qualitativo, os resultados mostram que a fibra sensora comporta-se como uma espécie de “nervo de vidro” muito sensível aos distúrbios mecânicos de baixa magnitude, que no entanto, não mostraram resposta DC ou AC às súbitas variações de temperatura aplicadas pontualmente.

A técnica aqui descrita, embora em estágio de pesquisa experimental básica, tem o potencial de monitorar experimentalmente cabos ópticos de forma a detectar possíveis ameaças a sua integridade física, ou seja, antes mesmo que o dano ocorra, além de localizar a posição do distúrbio.

II. EXPERIMENTO E O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA MODALMÉTRICO

A Figura 1 esquematiza a configuração experimental utilizada nos testes iniciais, assim como ilustra o princípio de funcionamento do dispositivo.

Um laser sintonizável capaz de cobrir toda a banda C emitindo 20 mW de potência em cada canal foi utilizado como fonte de luz. O sinal em onda contínua é injetado num acoplador SM 2x1 de 3 dB. O braço de saída do acoplador é emendado por fusão em 3,60 m de fibra GI-MM onde a mesma é clivada em 90° na sua extremidade livre. As perturbações são aplicadas pontualmente na fibra MM. A luz refletida na extremidade retorna, é re-injetada na fibra SM, passa novamente pelo acoplador e é então detectada. Para isto, utilizou-se um foto-diodo de InGaAs em regime fotovoltaico acondicionado num receptáculo FC. O sinal elétrico gerado é amplificado com ganho de transimpedância de 10^5 V/A e mostrado num osciloscópio analógico ou digital.

Ricardo M. Ribeiro, rmr@pq.cnpq.br, Yanes C. Balod, yanes@pobox.com, Andrés P. L. Barbero, Pablo@telecom.uff.br, Laboratório de Comunicações Ópticas, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, 24.210-240 Niterói RJ Brasil, Paulo A. M. dos Santos, pams@if.uff.br, Laboratório de Óptica Não Linear & Aplicada, Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói RJ Brasil. Os autores agradecem ao MCT/CNPq pelo apoio financeiro recebido através das concessões 3031102/2006-3 e 474218/2006-6.

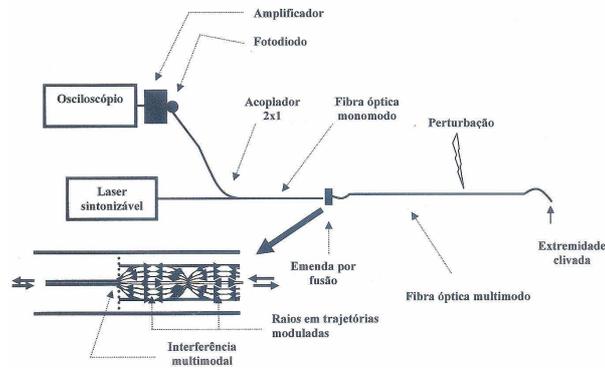


Fig. 1. Configuração experimental do dispositivo. A inserção (em baixo e a esquerda) ilustra o seu princípio de funcionamento.

Diversos mecanismos ópticos de detecção e monitoramento de distúrbios têm sido registrados na literatura [2-5]. A ideia por trás de um sensor modalétrico aqui apresentado remonta dos anos 80, a partir da emenda por fusão de uma fibra monomodo (SI-SM) com outra multimodo (SI-MM ou GI-MM), com a finalidade original de realizar medidas de retroespalhamento (OTDR) com filtragem modal. Este procedimento permitiu a caracterização da flutuação de parâmetros físicos de um enlace de fibra GI-MM [6]. Nos anos 90, um sensor modalétrico foi descrito como um sensor de distúrbios em fibras SM padrão com medidas no domínio das frequências elétricas [7]. O mecanismo foi atribuído às interferências ópticas entre os raios que são re-acoplados de volta à fibra SM para o comprimento de onda operacional que no caso foi visível ou na entrada do fotodetector [7].

Foi anteriormente demonstrado por um dos autores, um sensor modalétrico baseado na emenda SI-SM/GI-MM como um sensor pontual de estiramento (*strain*) operando em 1310 nm ou 1550 nm com medidas de intensidade óptica [8]. A seguir foi investigado o mesmo sensor modalétrico para estiramento e distúrbios, no domínio do espectro óptico entre 1530-1610 nm [9]. Estes trabalhos [8,9] sugeriram um mecanismo de detecção baseado em interferência multimodal para os distúrbios, e interferência multimodal modulada pela trajetória dos raios para o estiramento da fibra GI-MM.

A fibra GI-MM foi inventada nos anos 70 [10] com a finalidade de obter um aumento da banda-passante em relação à fibra SI-MM com base no padrão senoidal de trajetórias imposto aos raios propagantes na fibra. Tais trajetórias moduladas senoidalmente com período espacial típico (*pitch*) de 1 mm, minimizam os atrasos temporais relativos entre os raios. Foi sugerido um mecanismo de sensoamento de estiramento (*strain*) baseado no descasamento entre o período das trajetórias cíclicas e o *pitch* intrínseco da fibra GI-MM [8]. Quando um estiramento é aplicado na fibra, ocorre uma modulação espacial da fase do grupo de raios (ver inserção da Figura

1) que é convertida em variação de intensidade óptica com período da ordem de 1 mm quando o sinal é re-injetado na emenda SM/MM. Resultados obtidos sugerem um mecanismo não-interferométrico [8], que são corroborados com medidas experimentais adicionais e um modelo teórico simples [9].

O sensor modalétrico agora aplicado apenas para a detecção de distúrbios, gera um sinal de interferência na emenda SM/MM que modula o re-acoplamento na fibra SM, sendo originado pela superposição de N modos conforme descrito por (1).

$$I(r, \theta) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sqrt{I_j(r, \theta) I_k(r, \theta)} \cos[\psi_j(r, \theta) - \psi_k(r, \theta) + \Delta\Phi_{jk}] \quad (1)$$

Em (1), j e k designam dois modos propagantes na fibra MM, $\Delta\Phi_{jk}$ é a fase modificada pela perturbação, enquanto que ψ_j e ψ_k são as fases aleatoriamente distribuídas dos modos j e k , respectivamente [11].

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra a resposta de potência normalizada P_{out}/P_{in} (em dB) do dispositivo como função do comprimento de onda na banda C do DWDM (em torno de 1550 nm), ainda sem aplicar qualquer perturbação.

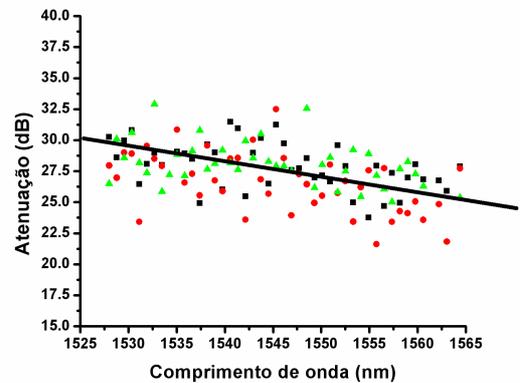


Fig. 2. Resposta espectral estática do dispositivo na banda C, ou seja, entre 1527,99 nm e 1563,05 nm. A linha contínua é um auxílio visual que permite grosseiramente estimar uma diminuição da atenuação com o aumento do comprimento de onda.

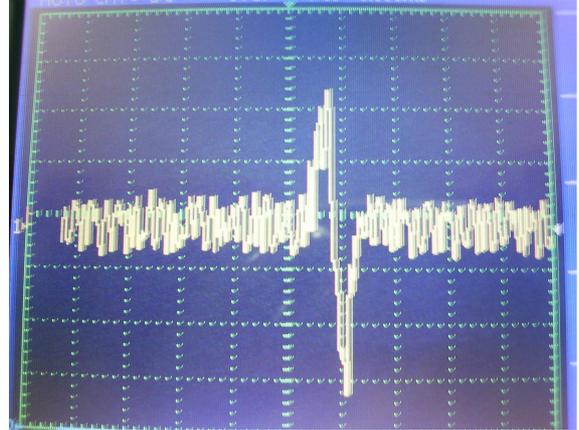
Foram realizadas diversas seqüências de medidas, cada uma em um dia diferente. O gráfico mostra a superposição de três destas medidas. Mesmo para apenas uma medida, observou-se instabilidade do sinal de resposta à medida que o comprimento de onda era variado. Em todas as seqüências de medidas, observa-se uma tendência de aumento da atenuação quando o comprimento de onda diminui. No caso, estima-se grosseiramente uma queda de ~5 dB na média ao longo da banda C (ver no gráfico uma linha contínua de auxílio visual). Estes resultados

dispersos mostram a natureza interferométrica (instável) do dispositivo, mesmo sem a aplicação de perturbações. A referida instabilidade é então causada pelo próprio meio ambiente, pois o sensor não se encontra isolado de vibrações, sinais acústicos e movimentos de ar.

A seguir, perturbações de contato mecânico de muito baixa magnitude foram aplicadas pontualmente na fibra sensora GI-MM. Tais distúrbios são obtidos com um simples e suave toque de dedo num ponto qualquer da fibra GI-MM de 3,6 m de comprimento. Uma grande quantidade de medidas no domínio do tempo foi realizada. Formatos de onda mostrados no osciloscópio em acoplamento AC foram obtidos e fotografados. As Figuras 3 e 4 mostram quatro amostras de medida do dispositivo operando no canal em 1550,11 nm.

Pode-se observar com grande frequência a ocorrência de um ou dois pares de picos com polaridades opostas. Considerando as amostras da Figura 3, pode-se explicar os dois picos como sendo devidos ao ato de encostar e desencostar o dedo na fibra. Em grande parte das amostras, obteve-se um atraso relativo de $\sim 0,2$ s, porém atrasos menores e maiores também foram observados, desde que o ato de encostar e desencostar sejam feitos mais “rapidamente” ou mais “vagarosamente”. Apenas um suave toque de dedo (sem desencostá-lo da fibra) produz apenas um pico de resposta temporal, não mostrado aqui.

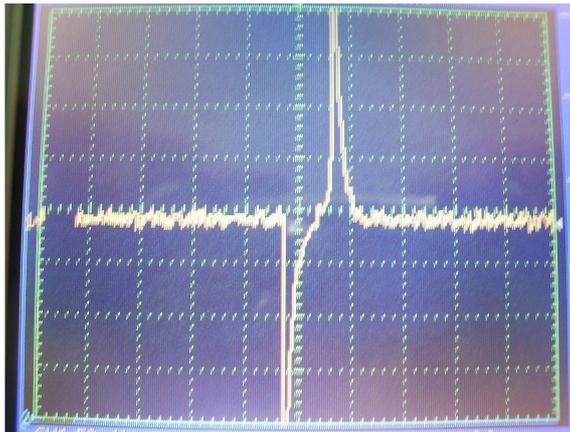
A ocorrência de mais de um par de picos, conforme mostrado na Figura 4, surge provavelmente quando o toque de dedo na fibra acontece ainda com magnitude fraca, mas suficiente para gerar tênues ondas de choque locais capazes de provocar interferências construtivas e destrutivas que modulam o re-acoplamento na emenda SM/MM.



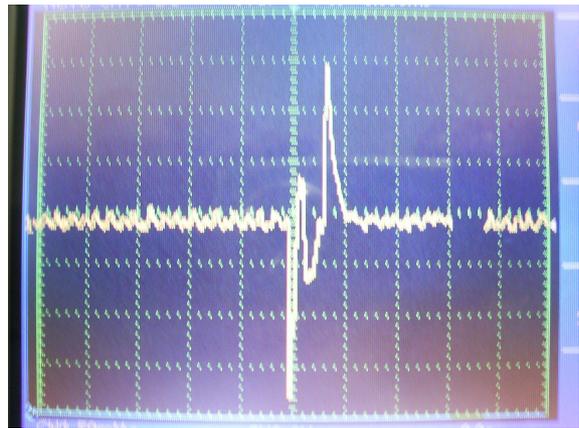
3(b)

Fig. 3. Resposta temporal (50 mV/div e 0,2 s/div) típica consistindo de dois picos de polaridades opostas com (a) $\sim 0,2$ s e (b) $\sim 0,04$ s de atraso relativo.

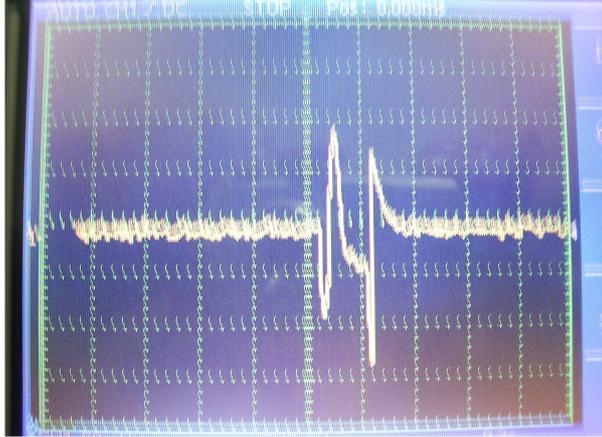
Quando uma fonte de calor como uma pequena chama, é rapidamente ou lentamente aproximada de um ponto qualquer da fibra MM sensora sem tocá-la, surpreendentemente não foi possível observar qualquer resposta temporal DC ou AC na tela do osciloscópio. O máximo que se observou foram sinais que surgem em decorrência do movimento de ar por convecção.



3(a)



4(a)



4(b)

Fig. 4. Resposta temporal (50 mV/div e 0,2 s/div) típica consistindo de quatro picos de polaridades opostas aos pares com < 0,2 s de atraso relativo.

A Figura 5 mostra a assinatura espectral no domínio óptico do mesmo tipo de distúrbio que vem sendo tratado, porém com um enlace de fibra GI-MM com 1,5 km de comprimento [9]. Pode-se notar claramente a possibilidade de detecção de um suave toque de dedo quando este procedimento é feito na extremidade remota do enlace. Quando a fibra não é perturbada, observa-se um sinal de baixa amplitude, que lembra ruído. Surge porque na realidade a fibra não está isolada de vibrações, gradientes de temperatura e ondas acústicas originadas do ambiente.

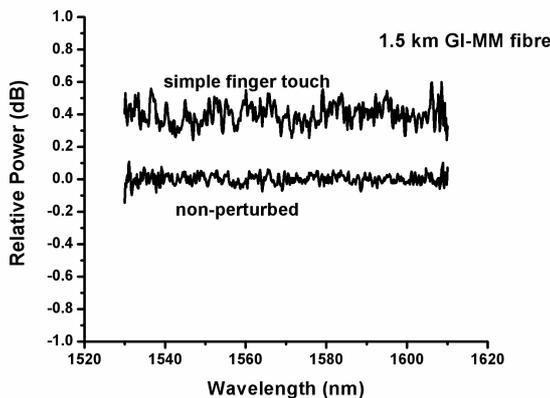


Fig. 5. Resposta espectral no domínio óptico do sensor modalmétrico usando 1,5 km de fibra GI-MM sensora.

Além de detectar a ocorrência de perturbações, o sistema deverá também ser capaz de localizar automaticamente o ponto onde acontece cada um destes distúrbios. Um OTDR tradicional utiliza pulsos luminosos de pequena duração (ns - μ s) compatível com o comprimento total do enlace de fibra a ser varrido para localizar os eventos. Basicamente o

instrumento é capaz de realizar uma contagem precisa do intervalo de tempo transcorrido entre a emissão de um pulso óptico e o retorno do retroespalhamento e reflexões.

O sistema modalmétrico aqui descrito, utiliza luz em onda contínua e a técnica de localização de eventos perturbativos deverá ser distinta da utilizada no OTDR. Considere $z = 0$ a localização do fotodetector, $z = z_0$ o ponto onde um certo distúrbio é aplicado, L o comprimento total do enlace de fibra, n_{eff} o índice de refração efetivo da fibra para o comprimento de onda operacional e $c = 3 \times 10^8$ m/s. A idéia é que em qualquer ponto da fibra há um sinal óptico propagando-se no sentido de sua extremidade clivada, e outro, no sentido contrário, retornando para a emenda SM/MM após ter sido refletido pela referida extremidade da fibra. O sinal viajando para a emenda SM/MM será detectado no instante de tempo t_1 , enquanto que o outro sinal será refletido pela extremidade e retornará para a emenda SM/MM, sendo então detectado depois, no instante de tempo t_2 . Portanto, o fotodetector irá capturar dois sinais com um atraso relativo dado por (2).

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2)$$

Um simples cálculo cinemático produz a expressão (3) que permite obter a localização z_0 em função do Δt medido.

$$z_0 = L - \frac{c\Delta t}{n_{eff}} \quad (3)$$

A partir de (3) é em princípio possível calcular a localização z_0 da perturbação desde que L seja conhecido e Δt possa ser precisamente medido.

No presente caso (ver Figuras 3), onde os sinais apresentam duração total de no mínimo 0,04 s, usando (3) conclui-se que seria necessário um enlace de fibra com ~ 8.000 km de comprimento de forma que os sinais possam ser completamente discriminados. A razão é que um processo perturbativo de contato mecânico produz um sinal temporal com duração típica de dezenas de ms ou mais. Para enlaces usuais ponto-a-ponto onde $L < 100$ km, os sinais chegarão superpostos no fotodetector mas com atraso relativo de Δt . Torna-se então necessário processar o sinal composto para descobrir Δt , o que implica que o fotodetector combinado com o amplificador deverá ter uma largura de banda compatível e ainda manter o ganho necessário. Um possível recurso para aliviar a necessidade do uso de um fotodetector e amplificador de grande largura de banda é inserir uma linha de atraso no enlace, o que pode ser feito emendando alguns quilômetros de fibra enrolada numa bobina compacta no início ou no final do cabo óptico.

Fibras de sílica utilizadas em Telecomunicações possuem comprimento de onda de corte λ_c (cut-off wavelength) tipicamente > 1250 nm de forma que em 1310 nm e nas bandas S, C e L, estas fibras sejam SM. Para que

a técnica aqui descrita possa ser utilizada, torna-se então necessário que $\lambda_{\text{operacional}} < 1250$ nm o que foi então realizado com 633 nm num enlace de 6,5 km com monitoramento da resposta em frequências elétricas [7]. O sistema fica limitado na distância de operação quando se faz uso de baixos comprimentos de onda. Como exemplo temos em 1550 nm cerca de 40 dB de perda óptica considerando ida e volta num enlace de 100 km para coeficiente de atenuação de 0,2 dB/km. Para 850 nm onde o coeficiente de atenuação é tipicamente 2,5 dB/km, teríamos uma perda óptica de 250 dB para 50 km de enlace. A situação se agrava em 700 nm onde $\alpha \approx 5$ dB/km e ainda mais para $\lambda < 700$ nm conforme utilizado no enlace em [7] que ficou aparentemente limitado em 6,5 km. Adicionalmente fibras ópticas e componentes passivos em regime monomodo para $\lambda_{\text{operacional}} < 1250$ nm são pouco comuns no mercado e exigem núcleos de fibra < 5 μm o que dificulta o acoplamento de luz.

Se a fibra de Telecomunicações já é MM, normalmente utilizará 850 nm e/ou 1310 nm como comprimentos de onda de comunicação. Neste caso é fácil multiplexar e demultiplexar 1550 nm, que se torna o comprimento de onda de operação do monitoramento de distúrbios pelo sistema modalétrico.

Se a fibra de Telecomunicações for SM, então é possível multiplexar e demultiplexar comprimentos de onda menores que 1250 nm, tipicamente menores que 850 nm [7], porém o enlace monitorado fica bem limitado na distância. Alternativamente, pode-se instalar uma fibra GI-MM em paralelo com a fibra SM de Telecomunicações, na mesma cavidade do cabo óptico, de forma que a primeira se torne apenas uma fibra sensora de distúrbios operando em 1550 nm.

IV. CONCLUSÕES

É aqui descrito o desenvolvimento de um sensor a fibra óptica do tipo modalétrico para monitoramento de distúrbios mecânicos. É relativamente bem menos explorado na literatura quando comparado com os demais tipos de sensores ópticos. O foco deste trabalho é aplicar o sistema para o monitoramento da integridade física de cabos ópticos de Telecomunicações num nível de sensibilidade impossível de se atingir com o uso da tradicional técnica de OTDR. O sistema descrito funciona fazendo acesso a apenas uma das extremidades da fibra sensora. É também proposta e discutida uma técnica que permite localizar o ponto do cabo onde acontece o distúrbio.

Variando apenas o comprimento de onda λ na banda C injetado no dispositivo, obteve-se uma resposta de potência normalizada dispersa em torno de uma média que cresce (ou a atenuação diminui) quando λ aumenta. Tal dispersão de valores evidencia a instabilidade do dispositivo devido a sua natureza interferométrica. Uma possível explicação para o fato de que a atenuação diminui com o aumento de λ injetado, pode em parte estar relacionado ao aumento do *Mode-Field Diameter* (MFD)

da fibra SM, o que facilita o re-acoplamento de luz na emenda SM/MM [8,9].

Sob comportamento dinâmico, e aplicando uma perturbação bastante fraca num ponto qualquer da fibra MM sensora, observa-se uma resposta extremamente sensível no domínio do tempo que não é possível detectar com o uso da tradicional técnica de OTDR. Sinais com amplitude que facilmente pode ultrapassar 200 mV na faixa de até centenas de milissegundos na duração total foram obtidos. Não foi possível observar resposta às súbitas ou lentas variações de temperatura ocorrendo pontualmente bem próximas da fibra MM. O mecanismo de funcionamento do presente dispositivo sensor de distúrbios pode ser explicado como sendo o de um interferômetro de múltiplos raios (ou modos) propagantes ao longo da fibra GI-MM que modula o re-acoplamento na fibra SM.

Sob o ponto de vista de perturbação mecânica, estes resultados são ainda parcialmente qualitativos, pois os distúrbios não são quantificados, mas podem ser compreendidos subjetivamente e facilmente reproduzidos. Atualmente está sendo criada uma técnica para quantificar perturbações de contato mecânico de baixa magnitude, assim como a implementação prática da técnica de localização da posição na fibra onde a mesma ocorre, conforme a proposta. A sensibilidade do dispositivo está também sendo aprimorada.

REFERÊNCIAS

- [1] Dennis Derickson, editor, "Fiber Optic Test and Measurement", Prentice Hall, USA (1998).
- [2] Alan D. Kearsy, Michael A. Davis, Heather J. Patrick, Michel LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam and E. Joseph Friebele, "Fiber Grating Sensors", Journal of Lightwave Technology, **15**, 8, 1442-1463 (1997).
- [3] D. Donlagic and M. Završnik, "Fibre-optic microbend sensor structure", Optics Letters, **22**, 11, 837-839 (1997).
- [4] K. F. Voss and K. H. Wanser, "Fibre optic sensor based upon buckling of a freely suspended length of fibre", US Patent 5,818,982 (1998).
- [5] J.C. Juarez, E.W.Maier, K.N. Choi and H.F. Taylor, "Distributed fiber-optic intrusion sensor system", Journal of Lightwave Technology, **23**, 6, 2081-2087 (2005).
- [6] M. Eriksrud and A. Mickelson, "Application of the backscattering technique to the determination of parameter fluctuations in multimode optical fibres", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. **MTT-30**, 10, 1466-1471 (1982).
- [7] I. Oanca, G.Y. Yang, J. Katsifolis and E. Tapanes, "Simultaneous wavelength multiplexed fiber optic communications and cable integrity monitoring technique", CLEO, paper WP4, 106-107, 16th July (1997).
- [8] R.M. Ribeiro and M.M. Werneck, "An intrinsic graded-index multimode optical fibre strain-gauge" Sensors and Actuators A, **111**, 210-215 (2004).
- [9] Ricardo M. Ribeiro, "Spectral Response of a Modalmetric Optical Sensor Based on the Graded-Index Multimode Fibre", submetido ao Optics Communications (2008).
- [10] D. Gloge and E. A. J. Marcatili, "Multimode theory of graded-core fibres", Bell System Technical Journal, **52**, 9, 1563-1578 (1973).
- [11] Yu A. Bykovskii, O. B. Vitrik and Yu N. Kul'chin, "Amplitude spatial filtering in the processing of signals from single-fiber multimode interferometer, Soviet Journal of Quantum Electronics, **20**, 10, 1288-1290 (1990).

D Publicação 2: SBRT 2009

*Acopladores à Fibra Óptica Monomodo- Multimodo como
Dispositivos para Telecomunicações e Sensores*

Ricardo M. Ribeiro, Yanes C. Balod e Andrés P. L. Barbero

XXVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
TELECOMUNICAÇÕES SBrT'09, 29 DE SETEMBRO 02
DE OUTUBRO DE 2009, BLUMENAU, SC.

Acopladores à Fibra Óptica Monomodo-Multimodo como Dispositivos para Telecomunicações e Sensores

Ricardo M. Ribeiro, Yanes C. Balod e Andrés P. L. Barbero

Resumo – Este trabalho mostra pela primeira vez a resposta espectral (banda-C) de acopladores 2x2 não-recíprocos formados pela fusão de fibra óptica monomodo com multimodo. O dispositivo obtido pode ser classificado como do tipo MMI (*multimode-interference*) que dependendo das condições de injeção de luz e das portas de entrada/saída utilizadas, se comporta como um de três diferentes tipos de filtros ópticos ou interferômetro multimodo. Algumas utilidades do dispositivo são também descritas neste trabalho.

Palavras-chave – Acoplador, filtro óptico, interferência multimodo, não-reciprocidade, dispositivo a fibra óptica.

Abstract – This paper show for the first time the spectral response (C-band) of 2x2 non-reciprocal fibre-coupler built from single-mode fused with multi-mode fibre. Such multimode interference (MMI) device may exhibit different spectral transmissions as an optical filter or interferometer depending on the detailed launch conditions. Some applications are also described.

Keywords – Coupler, optical filter, multimode interference, non-reciprocity, fibre optic device.

I. INTRODUÇÃO

Acopladores SM/MM formados pela fusão ou contato tangencial entre fibras ópticas monomodo (SM) com multimodo (MM) não são usuais. Porém, foram descritos na literatura em 1985-1987 [1-3] como sendo dispositivos de natureza não-recíproca. Algumas aplicações interessantes foram já na época realizadas ou propostas como, por exemplo, para compor uma rede óptica em barramento, construir linhas de atraso por anéis de recirculação em fibras, OTDR e em sensores. Desde então, não foi possível encontrar mais qualquer registro de trabalhos publicados que tratem dos tais acopladores SM/MM.

Por um outro lado, em 1973 foi mostrado [4] que o fenômeno do re-imageamento óptico (*self-imaging*) pode ocorrer em guias de ondas multimodo de índice degrau (SI) [5]. O fenômeno do re-imageamento óptico é mais conhecido como aquele que ocorre em fibras ópticas GI-MM de Telecomunicações, onde sob o ponto de vista da

Óptica Geométrica (raios) a propagação ocorre num padrão senoidal com periodicidade (*pitch*) típica de ~1mm, como se fosse um efeito lente de focalização e desfocalização da luz dentro da fibra [6]. Dispositivos baseados no efeito de re-imageamento em guias ou fibras ópticas multimodo são genericamente chamados de dispositivos MMI. Até aproximadamente 1995 [5] as investigações de dispositivos MMI se concentraram em guias ópticas. Desde então, pode-se observar uma quantidade razoável de trabalhos publicados sobre investigações teóricas e experimentais de dispositivos MMI baseados em fibras ópticas, principalmente nos últimos 6 anos [6-15], basicamente consistindo de um segmento de fibra multimodo [14] ou de fibra fotônica [15] emendado por fusão numa fibra óptica monomodo.

No melhor do conhecimento dos autores, este trabalho mostra pela primeira vez resultados de investigações experimentais de acopladores SM/MM também operando como dispositivos MMI. Mais especificamente, três são as novidades aqui relatadas: A resposta espectral propriamente dita (na banda-C) do acoplador SM/MM sob dois diferentes regimes de propagação e nas diversas combinações de portas de entrada/saída. Como consequência, também é aqui demonstrado que o dispositivo pode ter múltiplas utilidades, como exibir comportamento de filtro espectral de várias modalidades ou de interferômetro multimodal. A terceira contribuição, refere-se a descrição de três aplicações específicas utilizando o dispositivo, mas não ainda efetivamente realizadas.

II. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A Figura 1 mostra esquematicamente a configuração experimental utilizada para caracterizar o acoplador SM/MM no domínio espectral. O acoplador SM/MM foi construído utilizando a técnica convencional de fusão e estiramento de fibra óptica monomodo SI padrão G652 (9/125 μm) com outra multimodo GI padrão G651 (62,5/125 μm) enroscada uma com a outra de forma a ficar com ~10 mm de comprimento de junção. A fabricação foi ajustada de forma que 2-5% da luz injetada em 1550 nm pudesse sair pela fibra SM quando a injeção se desse pela fibra MM. Um laser sintonizável nos canais DWDM ao longo da banda-C (1527-1563 nm) foi usado para interrogar opticamente o dispositivo. O laser acoplado num *pigtail* de fibra SM passa por um isolador a fibra antes de ser injetado no acoplador SM/MM em teste.

Ricardo M. Ribeiro, rmr@pq.cnpq.br, Yanes C. Balod, yanes@pobox.com, Andrés P. L. Barbero, Pablo@telecom.uff.br. Laboratório de Comunicações Ópticas, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, 24.210-240 Niterói RJ Brasil. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo MCT/CNPq e Faperj.

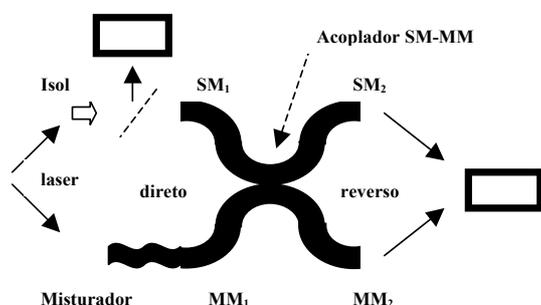


Fig. 1. Configuração experimental para a caracterização espectral do dispositivo MMI consistindo de um acoplador SM/MM. Os retângulos simbolizam medidores de potência óptica.

Com o uso de um medidor de potência óptica, fez-se primeiramente uma medida da potência do laser em função do comprimento de onda para servir como espectro de referência. Foi obtida uma resposta praticamente plana. A seguir, o acoplador SM/MM foi caracterizado no domínio espectral. A luz foi injetada na fibra SM ou MM. Nesta última, a injeção foi feita diretamente do *pigtail* em fibra SM do laser – modos de baixa ordem - ou através de um misturador de modos – modos distribuídos equilibradamente. As medidas foram primeiramente feitas no sentido direto e depois repetidas no sentido reverso, conforme ilustrado na Figura 1. Naturalmente que a atribuição de sentido “direto” ou “reverso” foi inteiramente arbitrária. Desta forma, foi obtido um total 12 gráficos espectrais, mas nem todos estes foram necessários mostrar neste trabalho. A resposta espectral do misturador de modos (*mode-scrambler*) foi também previamente medida como sendo absolutamente plana na banda-C.

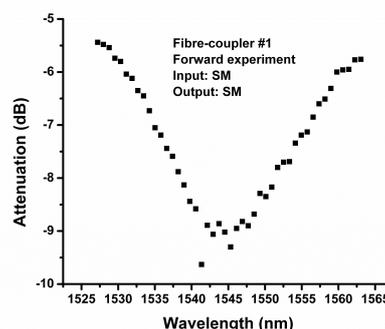
A Figura 2 mostra uma fotografia do aparato experimental utilizado para a caracterização do dispositivo. O laser sintonizável não é mostrado e o acoplador SM/MM aparece na parte superior da fotografia sobre um pequeno retângulo de papel branco. Para a injeção e medida da potência dos sinais ópticos, *pigtails* de fibras SM e MM foram emendadas por fusão nas respectivas fibras de entrada/saída do dispositivo.



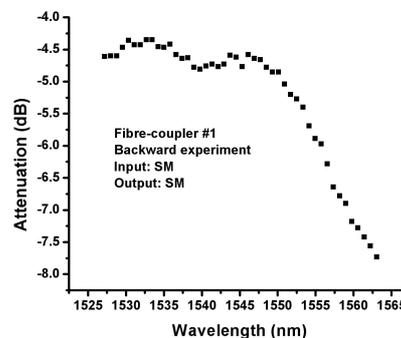
Fig. 2. Fotografia da configuração experimental da Figura 1. Pode-se notar o acoplador SM/MM (com *pigtails* em terminação FC) na parte superior da figura sobre um retângulo de papel branco.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 3 e 4 mostram a resposta espectral da perda por inserção e acoplamento cruzado, respectivamente, quando a luz era injetada em cada uma das portas SM, ou seja, na SM₁ (sentido direto) e depois na SM₂ (sentido reverso). As Figuras 3 referem-se a saída pelas portas SM, enquanto que as Figuras 4 pelas portas MM.



3(a)

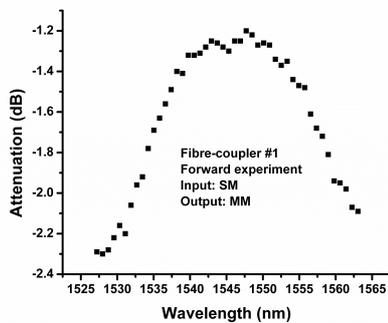


3(b)

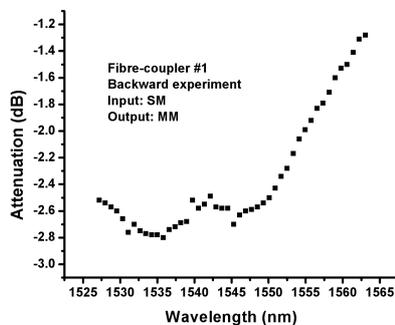
Fig. 3. Resposta espectral da perda por inserção no (a) sentido direto SM₁→SM₂ e no (b) sentido reverso SM₂→SM₁.

Comparando a Figura 3a com a 3b, observa-se claramente não-reciprocidade quando a foto-deteção acontece pela mesma fibra onde a luz foi originalmente injetada. Trata-se de não-reciprocidade na perda por inserção. O espectro transmitido por cada fibra SM não é o mesmo, pois as defasagens relativas das componentes (modos) interferentes não são as mesmas, ou seja, dependem da injeção de luz ser feita no sentido direto ou reverso. A estrutura de guia de onda MM (junção do acoplador) experimentada pelo sinal injetado a partir das fibras SM não é a mesma. Acredita-se então que esta seja a origem da não-reciprocidade que se verifica na perda por inserção do acoplador SM/MM.

Comparando a Figura 4a com a 4b, também claramente observa-se não-reciprocidade quando a foto-deteção acontece pela fibra MM que não é onde a luz foi originalmente injetada. Neste caso, a não-reciprocidade observada acontece na perda por acoplamento cruzado, e não por inserção como no caso anterior. A origem da não-reciprocidade no acoplamento cruzado deve-se ao mecanismo de não-reciprocidade da perda por inserção mencionado anteriormente, em combinação com a complementaridade dos espectros de saída devido a conservação de energia, conforme explicação adicional no parágrafo seguinte.



4(a)



4(b)

Fig. 4. Resposta espectral da perda por acoplamento cruzado no (a) sentido direto $SM_1 \rightarrow MM_2$ e no (b) sentido reverso $SM_2 \rightarrow MM_1$.

Comparando as Figuras 3a com 4a, assim como 3b com 4b, observa-se que os gráficos possuem entre si um caráter complementar em seu formato. Isto está compatível com conservação da energia, onde praticamente toda a luz injetada no dispositivo é compartilhada na saída pelas duas portas SM e MM. Naturalmente que existem perdas adicionais por irradiação para o espaço livre e por diretividade (retro-espalhamento).

A Figura 3a mostra que no sentido direto $SM_1 \rightarrow SM_2$, o dispositivo se comporta como um filtro rejeita-banda (*notch-filter*) com profundidade de ~ 4 dB em torno de 1545 nm e largura espectral (-3 dB) de ~ 29 nm, que o torna potencialmente útil para aplicações CWDM.

A Figura 3b mostra que no sentido reverso $SM_2 \rightarrow SM_1$, o dispositivo se comporta como um filtro tipo borda (*edge-filter*) apresentando transmissão razoavelmente plana na faixa 1525-1550 nm e a seguir o filtro de borda propriamente dito com $+0,23$ dB/nm de inclinação (*roll-off*).

A Figura 4a mostra que no sentido direto $SM_1 \rightarrow MM_2$, o dispositivo se comporta como um filtro passa-banda (*band-pass*) em torno de 1545 nm, embora seja de baixa amplitude de transmissão (~ 1 dB).

A Figura 4b mostra que na direção reversa $SM_2 \rightarrow MM_1$ o dispositivo se comporta como um filtro tipo borda (*edge-filter*), porém agora com inclinação oposta a da Figura 3b, apresentando transmissão razoavelmente plana de 1525-1550 nm e a seguir o filtro de borda propriamente dito com $-0,10$ dB/nm de inclinação.

Pode-se notar das Figuras 3 e 4, que o comportamento passa-banda/rejeita-banda ou filtro de borda não aparece simplesmente em função do intervalo espectral considerado [14]. Basta notar que as regiões espectralmente planas do filtro de borda não correspondem, quando se compara com o dispositivo funcionando como filtro passa-banda/rejeita-banda.

Todas as Figuras 5-8 referem-se a injeção de luz através das portas MM e dois diferentes regimes de modos injetados nas mesmas. O primeiro regime refere-se a injeção de modos com distribuição equilibrada, para isto usando um misturador de modos (*mode-scrambler*) conforme mostrado na Figura 1. Este primeiro regime corresponde a uma “interferência multimodal geral” [5]. O segundo regime compreende a injeção de luz na fibra MM através da fibra SM, obtendo-se então modos de baixa-ordem, também ilustrado na Figura 1. Neste último caso, espera-se que a maior parte da energia seja acoplada no modo LP_{01} propagante pela fibra MM. Supondo uma conexão perfeitamente concêntrica entre as fibras, apenas os modos simétricos LP_{0m} serão gerados. Este segundo regime corresponde a uma “interferência multimodal restrita” [5].

Conforme mostrado na Figura 5, quando modos de baixa-ordem são injetados, observa-se um espectro de saída consistindo de rápidas oscilações com a variação do comprimento de onda com intervalos entre vales < 10 nm e amplitude de profundidade na faixa 6-12 dB. Em qualquer comprimento de onda considerado, o sinal é bem atenuado em comparação com o injetado. Por exemplo em ~ 1538 nm temos 12 dB de atenuação, o menor valor.

O comportamento mostrado na Figura 5 é similar ao do fenômeno do re-imageamento [5] característico de estruturas SMS quando o comprimento físico da guia multimodo é alterado. Desta forma, o presente dispositivo poderá ser útil como um sensor de tensão mecânica [5,10] (*strain-sensor*).

A Figura 5 mostra então o espectro de saída quando modos de baixa-ordem são injetados no sentido direto $MM_1 \rightarrow SM_2$. Um resultado similar foi obtido (mas não é aqui mostrado), no sentido reverso, porém apresentando um ligeiro deslocamento de fase.

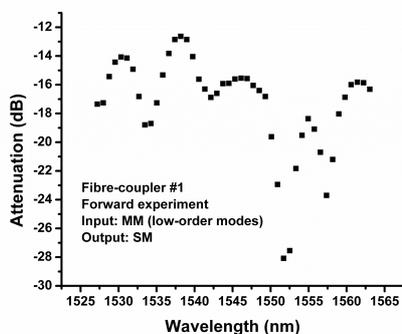


Fig. 5. Resposta espectral da perda por acoplamento cruzado no sentido direto $MM_1 \rightarrow SM_2$ quando modos de baixa ordem são injetados.

A Figura 6 mostra o espectro de saída quando modos de baixa-ordem são injetados no sentido direto $MM_1 \rightarrow MM_2$. Novamente, um resultado similar (não é aqui mostrado) foi obtido para o sentido reverso. Fazendo uma comparação entre as Figuras 5 e 6, observa-se similaridades entre os picos e vales, porém com uma profundidade de modulação bastante reduzida quando o sinal óptico sai do dispositivo pelas portas MM.

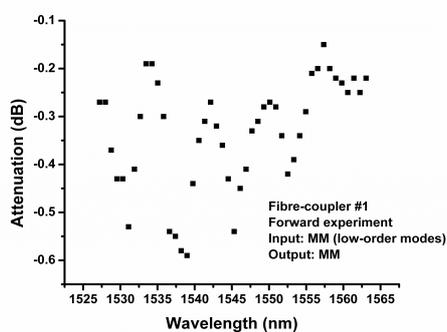


Fig. 6. Resposta espectral da perda por inserção no sentido direto $MM_1 \rightarrow MM_2$ quando modos de baixa ordem são injetados.

As Figuras 3 e 4 mostram respostas espectrais similares aos de acopladores de fibras SM 2x2 convencionais ou do tipo WDM, porém apresentam não-reciprocidade e diferenças quando se trata de comportamento tipo filtro de borda. Entretanto as Figuras 5 e 6 mostram um comportamento bem diferente da resposta espectral de acopladores MM 2x2 convencionais.

As Figuras 7 e 8 mostram o espectro de saída pelas portas SM_1 e MM_1 , respectivamente, quando modos com distribuição equilibrada são injetados no sentido reverso através da porta MM_2 . As Figuras 7 e 8 mostram que vales e picos já não são bem definidos, tal como se tem observado em dispositivos SMS [7]. De fato, no decorrer dos experimentos, observou-se a saída de sinais ópticos instáveis frente às diversas perturbações externas como vibrações, contato com a fibra, etc [15-17]. Tais

instabilidades são características de interferômetros a fibra multimodo [6,8,15-17].

Quando o sinal era injetado pelas portas SM, o dispositivo podia operar como uma das três modalidades de filtro espectral qualquer que fosse a porta de saída. Quando modos de baixa-ordem eram injetados no sentido $MM \rightarrow SM$, o dispositivo era estável frente a perturbações externas e apresentava espectro similar com vários mínimos de atenuação. Porém (ver Figuras 6 e 8), quando a saída acontecia pelas portas-MM, o dispositivo se tornava instável. Nesta última configuração, o dispositivo simultaneamente acoplava luz e gerava interferência multimodo. Isto pode ser comparado aos sensores tipo modalétrico [6,8,15-17] baseados na combinação de um acoplador a fibra óptica SM convencional com uma emenda por fusão tipo SM/MM. A Figura 7 também mostra um sinal óptico de saída instável.

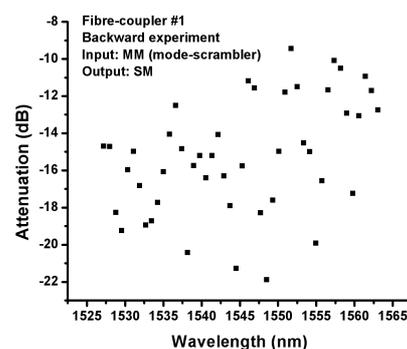


Fig. 7. Resposta espectral da perda por acoplamento cruzado no sentido reverso $MM_2 \rightarrow SM_1$ quando modos distribuídos de forma equilibrada são injetados.

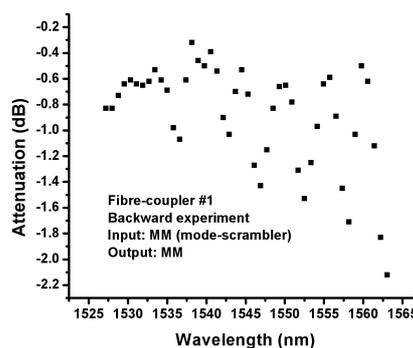


Fig. 8. Resposta espectral da perda por inserção no sentido reverso $MM_2 \rightarrow MM_1$ quando modos distribuídos de forma equilibrada são injetados.

IV. ANÁLISE DO DISPOSITIVO – MEDIDOR DE COMPRIMENTO DE ONDA

Injetando luz na porta SM_2 , as saídas por SM_1 (Figura 3b) e MM_1 (Figura 4b) consistem em respostas tipo filtro de borda, porém com inclinações opostas. Exceto pelo fato de que a perda é desigual na saída de cada braço, o dispositivo aqui tratado poderia constituir-se como um monitor auto-normalizado de comprimento de onda numa só unidade [14]. Para isto, dois medidores de potência óptica são utilizados, um para SM_1 e outro para MM_1 . Os resultados das medidas são por fim subtraídos um do outro, o que pode fornecer (após calibração) um valor bastante preciso de λ [14].

V. ANÁLISE DO DISPOSITIVO – REDE EM BARRAMENTO

Analisando o dispositivo funcionando nos sentidos diretos $MM_1 \rightarrow SM_2$ (Figura 5) e $MM_1 \rightarrow MM_2$ (Figura 6), pode-se notar que de fato possui o comportamento requerido para compor o nó de uma rede em barramento através de uma fibra MM, enquanto as fibras SM fazem a derivação (*tap*) da rede. Em toda a banda C, de fato quase toda a potência injetada prossegue pela fibra MM (ver Figura 6), enquanto que apenas uma fração é derivada para a fibra SM (ver Figura 5). Entretanto, conforme mostra a Figura 5, ao longo da banda C a resposta espectral (atenuação) é bastante não-uniforme. Por exemplo, o canal em 1537,5 nm é atenuado de ~13 dB enquanto que 1552 nm é atenuado de ~28 dB. Esta falta de equalização terá de ser levada em conta num projeto de rede em barramento com multiplexação em comprimento de onda.

As Figuras 7 e 8 no sentido reverso, porém com modos injetados com distribuição equilibrada, mostram mais uma vez que a maior parte da potência é mantida na fibra MM, enquanto que uma pequena fração é desviada para a fibra SM. Porém agora, vales e picos não ficam definidos pois o dispositivo passa a ser instável devido as acentuadas interferências multimodais.

VI. ANÁLISE DO DISPOSITIVO – ANEL DE RECIRCULAÇÃO

Uma forma de se construir um anel de re-circulação é injetar a luz pela fibra SM e emendar por fusão os dois braços MM do acoplador para formar o anel [3]. As Figuras 4 ($SM \rightarrow MM$) mostram que a fração de luz injetada no anel depende do comprimento de onda e do sentido da propagação no dispositivo, que não é recíproco. Por exemplo, o canal em 1545 nm é atenuado de ~ 1,3 dB no sentido direto e 2,6 dB no sentido reverso. No sentido direto, enquanto 1545 nm é atenuado de 1,3 dB, 1527,5 nm é atenuado de 2,3 dB.

Após o sinal óptico completar uma volta no anel de fibra MM, passa pelo acoplador com injeção de modos de baixa ordem se o acoplamento modal puder ser desprezado. Neste caso, é de se esperar um comportamento estável do

dispositivo e as Figuras 5 ($MM \rightarrow MM$) e 6 ($MM \rightarrow MM$) mostram que de fato a maior parte da luz permanece no anel enquanto que uma fração prossegue pela fibra SM. Entretanto, tudo isto mais uma vez depende do comprimento de onda, porém com uma dependência completamente diferente daquela mostrada na injeção no anel (ver Figuras 4).

VII. CONCLUSÕES

É aqui pela primeira vez descrito a caracterização espectral na banda C de um acoplador não-recíproco a fibra SM/MM. Os resultados de nossos experimentos mostraram que o acoplador exibe resposta de filtro (rejeita-banda, passa-banda ou de borda) ou interferômetro multimodo (MMI) não-recíproco, ou seja, dependente das portas de entrada e saída, assim como das condições de injeção de modos.

Três exemplos de aplicações foram descritos com o objetivo de mostrar o potencial do dispositivo quando se considera o tráfego de sinais na banda-C.

O presente dispositivo pode ser compacto e útil para aplicações em Telecomunicações e Sensores baseados em fibras ópticas. Entretanto, ainda requer o desenvolvimento de um modelo teórico preciso de forma a projetá-lo e otimizá-lo para alguma aplicação específica.

REFERÊNCIAS

- [1] M. S. Whalen and T. H. Wood, "Effectively nonreciprocal evanescent-wave optical-fibre directional coupler", *Electronics Letters*, **21**, 5, pp. 175-176, 1985.
- [2] H. C. Chang, H. S. Huang and J. Wu, "Wave Coupling Between Parallel Single-Mode and Multimode Optical Fibers", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **MTT-34**, 12, pp. 1337-1343, 1986.
- [3] R. J. Boughton, M. Farhadiroushan, D. Kreit, R. C. Youngquist and I. P. Giles, "Optical-fiber systems with nonreciprocal couplers", *Optics Letters*, **12**, 3, pp. 205-207, 1987.
- [4] O. Bryngdahl, "Image formation using self-imaging techniques", *Journal of Optical Society of America*, **63**, 4, pp. 416-419, 1973.
- [5] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications", *Journal of Lightwave Technology*, **13**, 4, pp. 615-627, 1995.
- [6] R.M. Ribeiro and M.M. Werneck, "An intrinsic graded-index multimode optical fibre strain-gauge" *Sensors and Actuators A*, **111**, pp. 210-215, 2004.
- [7] A. Kumar, R. K. Varshney, S. Antony and P. Sharma, "Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures", *Optics Communications*, **219**, pp. 215-219, 2003.
- [8] W. S. Mohammed, A. Mehta and E. G. Johnson, "Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference", *Journal of Lightwave Technology*, **22**, 2, pp. 469-477, 2004.
- [9] G. A. Sanchez, A. M. Rios, D. A. M. Arrojo, I. T. Gomez, R. S. Aguilar and J. A. Chavez, "Enhanced tuning mechanism in fibre laser based on multimode interference effects", *Electronics Letters*, **42**, 23, pp. 1337-1338, 2006.
- [10] E. Li, "Temperature compensation of multimode-interference-based fiber devices", *Optics Letters*, **32**, 14, pp. 2064-2066, 2007.
- [11] B. M. Shalaby, V. Kermene, D. Pagnoux and A. Barthelemy, "Transverse mode control by self-imaging process in a multiple fibre laser using a single-mode feedback loop", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **10**, pp. 115303, 2008.

- [12] W. Shin, K. Oh, B. A. Yu, Y. L. Lee, Y. C. Noh, J. Lee and D. K. Ko, "All-fiber wavelength tunable and mode convertible bandpass filter for optical inter-connections", OFC/NFOEC, paper OW11, 2008.
- [13] Q. Wang, G. Farrel and W. Yan, "Investigation on single-mode-multimode-single-mode fiber structure", Journal of Lightwave Technology, **26**, 5, pp. 512-519, 2008.
- [14] A. M. Hatta, G. Farrell, Q. Wang, G. Rajan, P. Wang and Y. Semenova, "Ratiometric wavelength monitor based on singlemode-multimode-singlemode fiber structure, Microwave and Optical Technology Letters, **50**, 12, pp. 3036-3039, 2008.
- [15] Y. Wang, H. Cai, R. Qu, Z. Fang, E. Marin and J. P. Meunier, "Specklegram in a grapefruit fiber and its response to external mechanical disturbance in a single-multiple-single mode fiber structure", Applied Optics, **47**, 20, pp. 3543-3548, 2008.
- [16] I. Oanca, G.Y. Yang, J. Katsifolis and E. Tapanes, "Simultaneous wavelength multiplexed fiber optic communications and cable integrity monitoring technique", CLEO, paper WP4, pp. 106-107, 16th July, 1997.
- [17] R. M. Ribeiro, Y. C. Balod, A. P. L. Barbero, M. B. de Carvalho e P. A. M. dos Santos, "Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de Telecomunicações Usando um Sistema Modalométrico no Domínio do Tempo", artigo **42633**, XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, SBRT'08, 02-05 de Setembro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

E Código de algoritmo MATLAB

```
clear all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Funcao gaussiana

% Parametros globais

a=1; % Amplitude da funcao (A):

t=2; % Dimensaotemporal (t):

na=10000; % Discretizacao do tempo (na):

% Dados do 1o pulso gaussiano

xo1=0.98; % Ponto em x de amplitude maxima (xo)

sigma1=0.01; % Largura da funcao (sigma):

% Dados do 2] pulso gaussiano

xo2=1.02; % Ponto em x de amplitude maxima (xo)

sigma2=0.01; % Largura da funcao (sigma):

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Inclusao de Ruido

% OBS: "na" pode estourar a capacidade da memoria. Atencao aos limites.

% Se mudar o "na" e' certo que precisara' mudar o algoritmo LMS e os

% pesos do objeto linear. (nova configuracao)

%suavisar=50;

%ruído=(randn(na))/(suavisar);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Gerando pulsos gaussianos
```

```

% Definindo variacao de tempo
deltat=(t/(na-1.0));

% Funcoes gaussianas
%x -> Coordenadas do dominio "l"
%o1 -> Valores da funcao 1a funcao gaussiana (referencia)
%o2 -> Valores da funcao 2a funcao gaussiana
%o3 -> Valores do somatorio das duas funcoes gaussianas
for i=1:na
x(i)=deltat*(i-1);
s1(i)=a*exp(-((x(i)-xo1)^2)/sigma1);
s2(i)=a*exp(-((x(i)-xo2)^2)/sigma2);
%o3(i)=s1(i)+s2(i)+ruído(i);
s(i)=s1(i)+s2(i);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Algoritmo com equalizador

% Parametros do objeto linear equalizado e algoritmo LMS
passo_lms=0.07;
fator_lms=1;
n_peso_obj=1;

%Algoritmo LMS
alg_lms=lms(passo_lms,fator_lms);

% Objeto equalizado linear com algoritmo LMS
alg=lineareq(n_peso_obj,alg_lms);

% Equalizador

% y : Vetor da funcao equalizada

```

```

% yd: Vetor de simbolos detectados

% e : Vetor de erros da funcao equalizada em referencia a funcao "S1"

[y,yd,e]=equalize(alg,s,s1(1:na));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Plotando o grafico com as funcoes:

% Limpa figuras (graficos)

clf;

% Plotando grafico da 1a gaussiana

figure('Name','1a Funcao Gaussiana','NumberTitle','off');

plot (x,s1);

%grid;

% Plotando grafico da 2a gaussiana

figure('Name','2a Funcao Gaussiana','NumberTitle','off');

plot (x,s2);

%grid;

% Plotando grafico do somatorio das gaussianas

figure('Name','Resultante do somatorio das funcoes Gaussianas','NumberTitle','off');

plot (x,s);

%grid;

% Plotando grafico do somatorio das gaussianas, funcao equalizada do

% somatorio e o erro (diferenca entre o somatorio e funcao equalizada)

figure('Name','Resultante gaussiana (azul) ; Funcao equalizada (verde) ; Vetor de erros

entre a funcao equalizada e a o sinal de referencia (vermelha)','NumberTitle','off');

plot (x,s,x,y,x,e);

%grid;

% Plotando grafico do somatorio das gaussianas, e o erro (diferenca entre o somatorio e

funcao equalizada)

```

```
figure('Name','Resultante gaussiana (azul) ; Vetor de erros entre a funcao equalizada e a  
o sinal de referencia (verde)','NumberTitle','off');
```

```
plot (x,s,x,e);
```

```
%grid
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

F Datasheets

- FC-InGaAs Photodiode Series Features (Roithner LaserTechnik)
- Multifunctional 2-Channel Amplifier Board (Roithner LaserTechnik)
- PDA10Cs Switchable Gain, Amplified InGaAs Detector (Thor-Labs INC.)

ROITHNER LASERTECHNIK

A-1040 VIENNA, SCHOENBRUNNER STRASSE 7, AUSTRIA

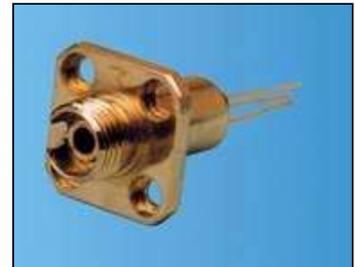
TEL: +43 -1- 586 52 43-0 FAX: +43 -1- 586 52 43-44

e-mail: office@roithner-laser.com http://www.roithner-laser.com

FC-InGaAs Photodiode Series

Features

High Response within 1.0 - 1.65 μm
 Low Dark Current
 Planar Structure
 Broad spectral response range 0.65 - 1.65 μm
 Broad Dynamic Range
 High Reliability



Applications

• FC Connection Firm Coaxial Package • Optical Measurement • Optical Detection • Online Monitor
 Optical Fiber Cable • Output Test for Optical Amplifier • Data Transmission

Absolute Maximum Rating

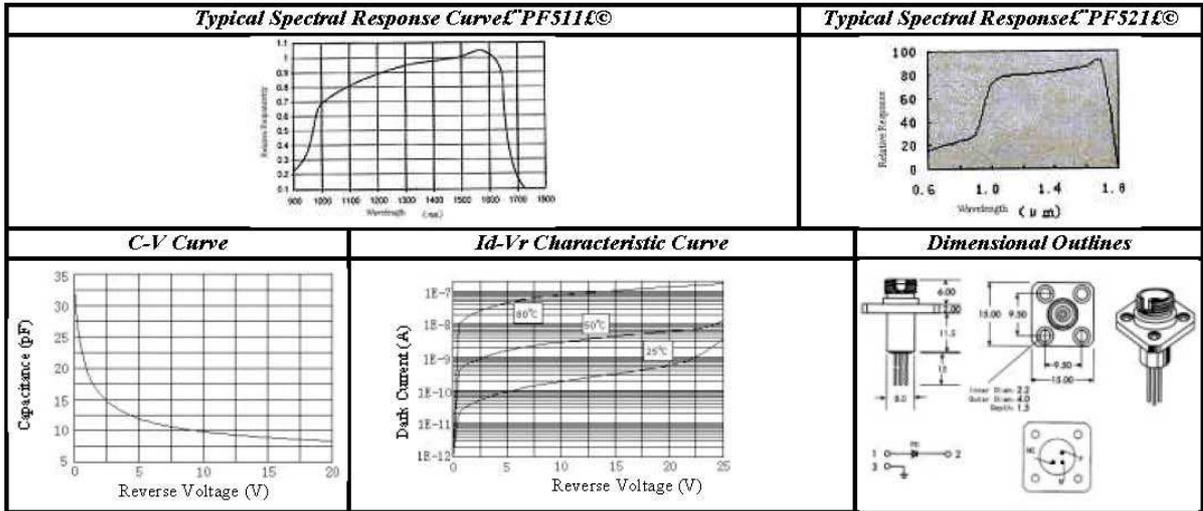
Forward Current	10mA
Optical Current	10mA
Reverse Voltage	25V
Power Waste	100mW
Operating Temp.	$-40 \text{ } \llcorner \llcorner 85 \text{ } \lrcorner$
Storage Temp.	$-40 \text{ } \llcorner \llcorner 85 \text{ } \lrcorner$
Jointing Condition	260 \lrcorner , 10 Second

Description

PF series detectors consist of InGaAs PIN photodiode with sensitive area coupled with FC connection by lenses. PF511 is of the high response within 1.0 - 1.65 μm . Diode structure of PF521 type has been improved so that spectral response can extend to 0.65 - 1.65 μm . Internal optical attenuator of PF512 and PF513 is used to measure higher optical power. The highest detectable optical power of PF512 and PF513 can get to 25dBm and 30dBm, respectively. PF series are mostly applied for optical measurement. User can select appropriate units according to needed wavelength and linear range.

Specifications (25° C)

Type Number	PF511	PF512	PF513	PF521	Units
Wavelength Range	1.0 \llcorner 1.65	1.0 \llcorner 1.65	1.0 \llcorner 1.65	0.65 \llcorner 1.65	μm
Linear Range \lrcorner 0V \lrcorner	-70 \llcorner +10	-55 \llcorner +20	-45 \llcorner +30	-70 \llcorner +10	dBm
Responsibility \lrcorner 0V \lrcorner	R _{1310nm} \lrcorner 0.80 R _{1550nm} \lrcorner 0.85	0.01 \llcorner 0.03 \lrcorner 1.31 μm \llcorner 1.55 μm \lrcorner	0.001 \llcorner 0.003 \lrcorner 1.31 μm \llcorner 1.55 μm \lrcorner	R _{850nm} \lrcorner 0.20 R _{1310nm} \lrcorner 0.80 R _{1550nm} \lrcorner 0.85	A/W
Dark Current \lrcorner -5V \lrcorner	\lrcorner 1/5				nA
Capacitance \lrcorner -5V \lrcorner	\lrcorner 12				pF
Sensitive Diameter	300				μm
Inserting Loss	\lrcorner 0.1				dB
Operating Voltage	0 \llcorner -10				V
Inserting Lifetime	10 ⁵				



NOTES

Protection of the product should abide by precautions of electrostatic sensitive organ.

When sealing pins soldering irons should be grounded to avoid breakdown.

Pins should avoid bend or twist which will bring break or damage.

The ferrule of connector is easy to be stained. If necessary, it could be cleaned by alcohol before using to keep high response.

Application Note

Multifunctional 2-Channel Amplifier Board

Introduction

In most applications of visible blind uv-detectors such as the TW30-series only very small photocurrents are generated. These currents ranging from a microampere down to some picoampere cannot be measured by commonly available multimeters – an amplifier is needed.

We provide a small multifunctional amplifier board for developers to simplify and support application development.



For ordering this board please visit <http://www.roithner-laser.com>, where also frequently updated revisions of this board and the application note as well as information about our uv-photodiodes can be found.

Note: The board is shipped without any photodiodes.

Basics

Photocurrents can be converted to voltages by transimpedance amplifiers (TIA) or switched integrating amplifiers (SIA). Our board utilizes the first type because it does not require digital timing signals. The complete schematic of our board is shown in Appendix B.

For basic knowledge about this device please refer for instance to application notes for device OPA128 from TI at <http://www.ti.com/>. The SIA type is preferably for applications using micro controllers and DSPs – for further information please refer to datasheets and application notes as for instance from <http://www.ti.com/> for device IVC102.

Specifications

The supplied board consists of two independent amplifier channels with adjustable gain. By using jumpers one can select the amplifier type (voltage or transimpedance amplifier) and configuration (two independent amplifiers or single two-stage amplifier) as well as the gain.

The board provides current gain in the range 10^5 V/A... 10^7 V/A and voltage gain from 2...1000 V/V in single-stage configuration. Additionally to the fixed gain factors are potentiometers for custom gain factors in the range 10^4 V/A... 10^6 V/A. By two stages one may reach gains of 10^{10} V/A respectively 10^5 V/V if offsets are carefully adjusted. The maximum usable output voltage range is ± 4 V and must be considered while calculating gain factors.

The circuit is ideally operated with a dual power supply of ± 9 V... ± 24 V. For lower performance measurements a single supply of 24 V...36 V may be used. In both cases stabilisation is not required.

Note: Applying operating voltage with a wrong polarity will destroy the board.

The photodiodes plug directly into sockets or are externally connected via screw terminals. The output voltages are available on screw terminals.

The boards dimensions are 45 mm x 60 mm and the height is about 12 mm without photodiodes.

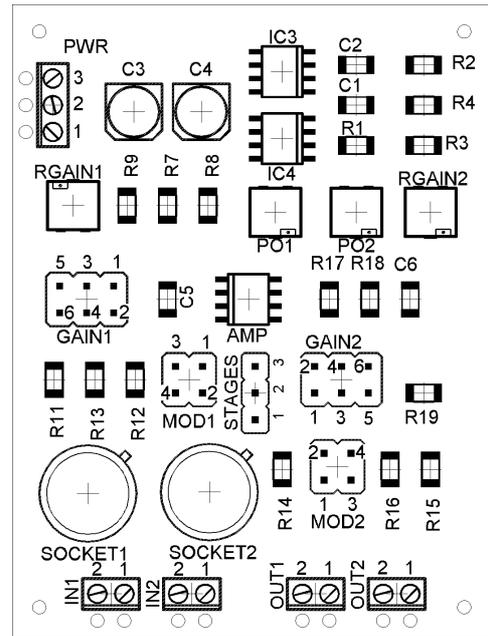
Application Note

Multifunctional 2-Channel Amplifier Board

Starting

The index “x” in names relates to the channel number, for positions and pin numbers please refer to the picture on the right.

- Choose operation modes and configuration by setting jumpers MODx and STAGES; refer to Appendix A, tables 2 and 3.
- Set required gains with jumpers GAINx and/or potentiometers RGAINx; again refer to Appendix A, table 4.
- Connect arbitrary voltmeter(s) to screw terminals OUTx. Right pin (#1) is the output, left pin (#2) equals to GND.
- Connect the power supply to screw terminal PWR. For dual power supply use top terminal (#3) for negative, middle (#2) for GND and bottom terminal (#1) for positive voltage. A single supply must be connected with positive pole to bottom pin (#1) and supply GND to top pin (#3), middle pin is left open. **Note:** In case of single supply there is a floating virtual ground on the middle terminal to which the inputs and outputs relate and which must not be connected to power supply GND.



- Adjust offsets for all channels. To do this shorten inputs for voltage amplifiers and leave inputs open (or insert photodiodes and darken them to compensate dark currents as well) for transimpedance stages. Now adjust the output voltages to 1mV or less by potentiometers POx.
- Connect photodiode(s) to either terminal INx or SOCKETx. The right pins (#1) of screw terminals INx are the inputs, the left pins (#2) equal to GND. If using the sockets the upper pinhole is the input and must be plugged with one photodiode pin in any case. Other pinholes are grounded and may be used as required. Polarity of the photodiodes within sockets depends only on desired output voltage polarity.

Application Note

Multifunctional 2-Channel Amplifier Board

Examples

Problem:

- Compare photocurrents of two different photodiodes of types TW30SX and TW30DZ to show effect of higher visible blindness. This task requires two identical channels. The predicted photocurrents under sun radiation are $2.2 \mu\text{A}$ / $1.6 \mu\text{A}$. The output voltage shall be $1 \dots 2 \text{ V}$ giving a suitable gain of $1 \text{ V}/\mu\text{A} = 10^6 \text{ V/A}$.

Solution:

- ✓ set jumper STAGES to position 1-2 (two channel mode), set MOD1 and MOD2 to position 1-2 (transimpedance amplifier)
- ✓ set GAIN1 and GAIN2 to position 2-4 (transimpedance gain 10^6 V/A)
- ✓ connect and turn on power supply
- ✓ insert photodiodes, darken them, compensate offsets (and dark currents) by adjusting PO1 and PO2
- ✓ illuminate photodiodes with visible and ultraviolet light, compare voltages on terminals OUT1 and OUT2

Problem:

- Convert a photocurrent of 1 nA to a voltage of 2.0 Volts . This requires a total gain of $2 \text{ V/nA} = 2 \cdot 10^9 \text{ V/A}$, which can be provided by two amplifier stages. The first stage converts the current to a voltage of 10 mV with a gain 10^7 V/A , which is then boosted to 0.2 V by the second voltage amplifier stage with a gain of 20 V/V . This voltage can be displayed easily by a standard digital panel voltmeter.
- Hint: You can replace the gain jumpers of stage 1 by a multi stage switch to obtain fast and easy range adjustment. The second contact layer of this switch may be used for decimal point shifting on the panel voltmeter.

Solution:

- ✓ set jumper STAGES to position 2-3 (two channel mode)
- ✓ set MOD1 to position 1-2 (transimpedance amplifier) and GAIN1 to position 1-3 giving 10^7 V/A in the first stage
- ✓ open MOD2 (voltage amplifier, pre-gain 2) and set GAIN2 to position 1-3 (giving overall voltage amplification of 200 in stage two)
- ✓ connect and turn on power supply
- ✓ insert photodiode into SOCKET1 and darken it; first compensate offset of first stage by adjusting PO1 until voltage on OUT1 is below 1 mV ; then compensate offset of second stage by adjusting PO2 until voltage on OUT2 is below 1 mV
- ✓ illuminate photodiode and measure voltage on terminal OUT1

Application Note

Multifunctional 2-Channel Amplifier Board

Appendix A

Table 1: pin, terminal and other assignments

	Pin 1	Pin 2	Pin 3
PWR	+8 V ... +24 V	GND	-8 V ... -24 V
IN1	input terminal channel 1	GND	
SOCKET1	input socket channel 1	GND	GND
OUT1	output terminal channel 1	GND	
PO1	offset compensation channel 1		
IN2	input terminal channel 2	GND	
SOCKET2	input socket channel 2	GND	GND
OUT2	output terminal channel 2	GND	
PO2	offset compensation channel 2		

Table 2: channel configuration

STAGES	Function
1-2	two independent amplifier channels
2-3	single two-stage amplifier; note: channel two must be configured as voltage amplifier by setting MOD2 in any position but 1-2

Table 3: amplifier mode

MODx	Function
1-2	transimpedance amplifier
1-3	voltage amplifier pre-gain 10
3-4	voltage amplifier pre-gain 5
Open	voltage amplifier pre-gain 2

Table 4: gain factor setting

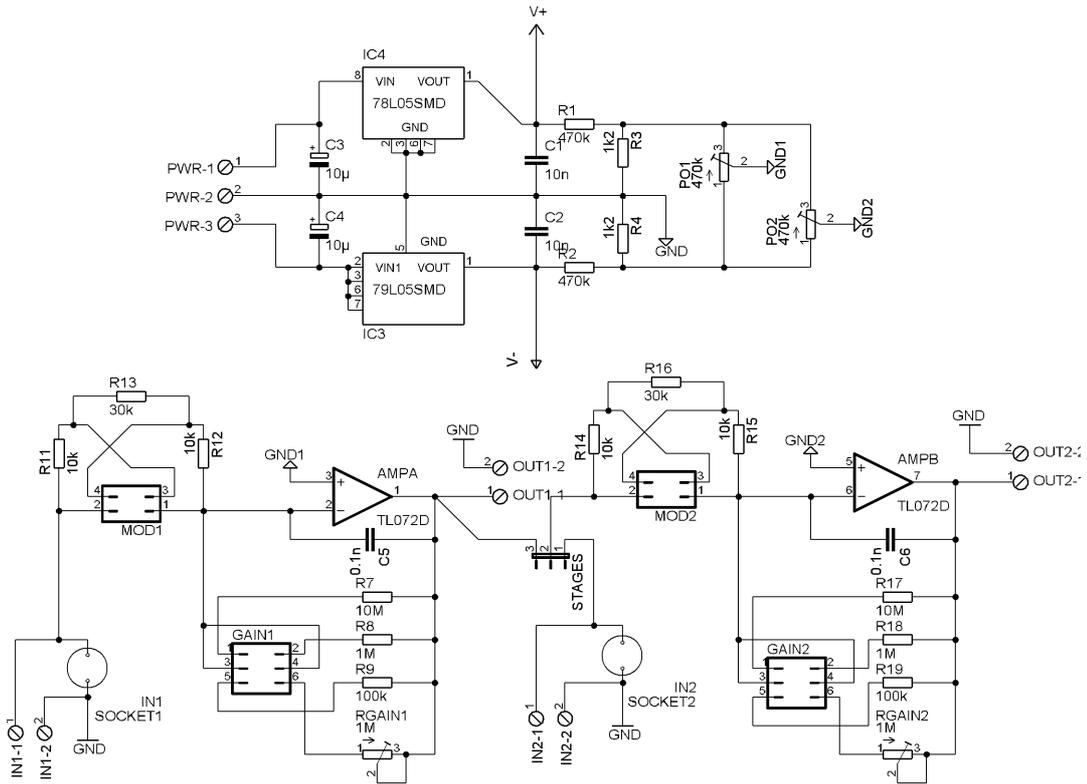
GAINx	transimpedance gain [V/A]	voltage gain (multiply by voltage pre-gain to get total voltage gain) [V/V]
1-3	10^7	100
2-4	10^6	10
3-5	10^5	1
4-6	adjustable by potentiometer RGAINx in range $10^4 \dots 10^6$	0.1...10

Application Note

Multifunctional 2-Channel Amplifier Board

Appendix B

Schematic:



PDA10CS Operating Manual - Switchable Gain, Amplified InGaAs Detector

Description:

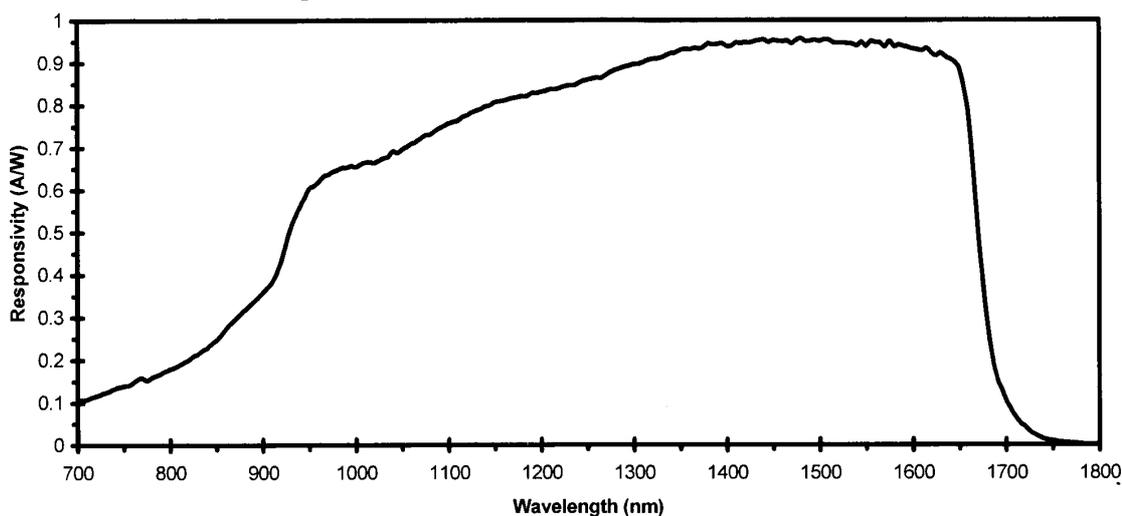
The PDA10CS is an amplified, switchable-gain, InGaAs detector designed for detection of light signals over 700 – 1800nm wavelength range. An eight-position rotary switch allows the user to vary the gain in 10 dB steps. A buffered output drives 50Ω load impedances up to 5 volt. The PDA10CS housing includes a removable threaded coupler (SM1T1) and retainer ring (SM1RR) that is compatible with any number of Thorlabs 1" threaded accessories. This allows convenient mounting of external optics, light filters, apertures, as well as providing an easy mounting mechanism using the Thorlabs cage assembly accessories.

The PDA10CS has two #8-32 tapped mounting holes with a 0.25" mounting depth and includes a 120VAC power AC/DC supply. The PDA10CS-EC has two M4 tapped mounting holes and includes a 230VAC AC/DC power supply.

Specifications:

General Specifications			
Detector:	InGaAs PIN	Gain Switch:	8-Pos Rotary
Active Area:	Ø1mm (0.8mm ²)	On / Off Switch:	Slide
Surface Depth:	0.07" (1.9mm)	Output:	BNC
Wavelength Range:	700-1800nm	Optical Head Size:	2.76" x 2.08" x 0.83" 70.1 x 52.8 x 21.1mm
Peak Wavelength (λ_p):	1550nm	Weight ³ :	0.15 / 2.1lbs
Peak Response:	0.95 A/W @ λ_p	Accessories:	SM1T1, SM1RR
Output Voltage ¹ (50Ω):	0-5V	AC Power Supply:	AC-DC Converter
(Hi-Z):	0-10V	Power Supply	31W
Output Impedance:	50Ω	Input Power ⁴ :	100-120VAC, 50-60Hz (220-240VAC -EC)
Max Output Current:	100mA	Storage Temp:	-55 to 125 °C
Load Impedance:	50Ω – Hi-Z	Operating Temp:	0 to 40 °C
Gain Adj. Range:	70dB		
Gain Steps:	8x 10dB steps		

Figure 1 – PDA10CS Spectral Responsivity



Performance Specifications			
0dB Setting		40dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	1.51 x 10 ³ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	1.51 x 10 ⁵ V/A ±2%
(50Ω):	0.75 x 10 ³ V/A ±2%	(50Ω):	0.75 x 10 ⁵ V/A ±2%
Bandwidth:	17MHz	Bandwidth:	320kHz
Noise (RMS):	600μV	Noise (RMS):	300μV
NEP (@ λ _p):	6 x 10 ⁻¹¹ W/√Hz	NEP (@ λ _p):	1.4 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	5mV (10mV max)	Offset:	10mV (20mV max)
10dB Setting		50dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ³ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ⁵ V/A ±2%
(50Ω):	2.38 x 10 ³ V/A ±2%	(50Ω):	2.38 x 10 ⁵ V/A ±2%
Bandwidth:	8.5MHz	Bandwidth:	90kHz
Noise (RMS):	320μV	Noise (RMS):	475μV
NEP (@ λ _p):	1 x 10 ⁻¹¹ W/√Hz	NEP (@ λ _p):	1.5 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	6mV (12mV max)	Offset:	15mV (40mV max)
20dB Setting		60dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	1.5 x 10 ⁴ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	1.5 x 10 ⁶ V/A ±5%
(50Ω):	0.75 x 10 ⁴ V/A ±2%	(50Ω):	0.75 x 10 ⁶ V/A ±5%
Bandwidth:	1.9MHz	Bandwidth:	33kHz
Noise (RMS):	310μV	Noise (RMS):	850μV
NEP (@ λ _p):	3 x 10 ⁻¹² W/√Hz	NEP (@ λ _p):	1.5 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	6mV (15mV max)	Offset:	20mV (75mV max)
30dB Setting		70dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ⁴ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ⁶ V/A ±5%
(50Ω):	2.38 x 10 ⁴ V/A ±2%	(50Ω):	2.38 x 10 ⁶ V/A ±5%
Bandwidth:	775kHz	Bandwidth:	12 kHz
Noise (RMS):	300μV	Noise (RMS):	1.5mV
NEP (@ λ _p):	1.25 x 10 ⁻¹² W/√Hz	NEP (@ λ _p):	2 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	8mV (15mV max)	Offset:	40mV (200mV max)

- Note 1: The PDA10CS has a 50Ω series terminator resistor (i.e. in series with amplifier output). This forms a voltage divider with any load impedance (e.g. 50Ω load divides signal in half).
- 2: All measurements performed with a 50Ω load unless stated otherwise.
- 3: Detector Package / Power Supply.
- 4: Although the power supply is rated for 31W the PDA10CS actual usage is <5W over the full operating range.

Setup

- Unpack the optical head, install a Thorlabs TR-series ½" diameter post into one of the #8-32 (M4 on -EC version) tapped holes, located on the bottom and side of the head, and mount into a PH-series post holder.
- Connect the power supply 3-pin plug into the power receptacle on the PDA10CS.
- Plug the power supply into a 50-60Hz, 100-120VAC outlet (220-240VAC for -EC version).
- Attach a 50Ω coax cable (i.e. RG-58U) to the output of the PDA. When running cable lengths longer than 12" we recommend terminating the opposite end of the coax with a 50Ω resistor (Thorlabs p/n T4119) for maximum performance. Connect the remaining end to a measurement device such as an oscilloscope or high speed DAQ card. **Caution:** Many high speed oscilloscopes have input impedances of 50Ω. In this case, do not install a 50Ω terminator. The combined loads will equal 25Ω which could allow ~135mA of output current. This will damage the output driver of the PDA10CS.
- Power the PDA10CS on using the power switch located on the top side of the unit.
- Install any desired filters, optics, adapters, or fiber adapters to the input aperture. **Caution:** The PDA10CS was designed to allow maximum accessibility to the photodetector by having the front surface of the diode flush with the outside of the PDA housing. When using fiber adapters, make sure that the fiber ferrule does not crash into the detector. Failure to do so may cause damage to the diode and / or the fiber. An easy way to accomplish this is to install a SM1RR retaining ring (included with the PDA10CS) inside the 1" threaded coupler *before* installing the fiber adapter.
- Apply a light source to the detector. Adjust the gain to the desired setting.

Operation

Thorlabs PDA series are ideal for measuring both pulsed and CW light sources. The PDA10CS includes a reverse-biased PIN photo diode, mated to a switchable gain transimpedance amplifier, and packaged in a rugged housing. The thin profile housing allows the PDA10CS to fit into small spaces. All controls and connections are orthogonal to the light path providing easier access and minimizing the light path footprint.

Output

The maximum output of the PDA10CS is 10 volts for high impedance loads (i.e. $R_{LOAD} \geq 5k\Omega$) and 5 volts for 50Ω loads. Adjust the gain so that the measured signal level out of the PDA10CS is below 10 volts (5 volts with a 50Ω load) to avoid saturation. If necessary, use external neutral density filters to reduce the input light level. The BNC output signal is buffered with an amplifier capable of driving 50Ω loads. A 50Ω series resistor is included on the output to impedance match a 50Ω coax cables. For best performance, Thorlabs recommends operating the PDA10CS with a 50Ω terminating load located at the end of the coax cable. While this is not necessary, it eliminates ringing and distortion due to impedance mismatches.

Gain Adjustment

The PDA10CS includes a low noise, low offset, high gain transimpedance amplifier that allows gain adjustment over a 70dB range. The gain is adjusted by rotating the gain control knob, located on the top side of the unit. There are 8 gain positions incremented in 10dB steps. It is important to note that the bandwidth will decrease as the gain increases. See the specifications above to choose the best gain vs. bandwidth for a given input signal.

Light to Voltage Conversion

The Spectral Responsivity, $\mathfrak{R}(\lambda)$, can be obtained from Figure 1 to estimate the amount of output voltage to expect. The light to voltage conversion can be estimated by factoring the wavelength-dependent responsivity of the InGaAs detector with the transimpedance gain as shown below:

$$\text{E.g. 1 – Output [V/W]} = \text{transimpedance gain [V/A]} \times \mathfrak{R}(\lambda) \text{ [A/W]}$$

For low terminating resistors, $>5k\Omega$ or 1% error, an additional factor needs to be included in the above formula. As described above the output includes a 50Ω series resistor (R_S). The output load creates a voltage divider with the 50Ω series resistor as follows:

$$\text{E.g. 2 – Scale Factor} = R_{LOAD} / (R_{LOAD} + R_S)$$

Where R_{LOAD} is the terminating resistor and $R_S = 50\Omega$. For a standard 50Ω terminator, the gain will be scaled by $\frac{1}{2}$ as shown below:

$$\text{Scale Factor} = 50\Omega / (50\Omega + 50\Omega) = 0.5$$

$$\text{E.g. 3 – Output [V/W]} = \text{transimpedance gain [V/A]} \times \mathfrak{R}(\lambda) \text{ [A/W]} \times \text{Scale Factor}$$

Maintaining the PDA10CS

There are no serviceable parts in the PDA10CS optical head or power supply. The housing may be cleaned by wiping with a soft damp cloth. The window of the detector should only be cleaned using isopropyl alcohol and optical grade wipes. If you suspect a problem with your PDA10CS please call Thorlabs and technical support will be happy to assist you.

Contact

Americas
Thorlabs Inc.
435 Route 206 North
Newton NJ 07860
USA
Ph: (973) 579-7227
Fax: (973) 300-3600
www.thorlabs.com
Email: techsupport@thorlabs.com

Europe
Thorlabs GmbH
Gaußstr. 11
85757 Karlstfeld
Germany
Ph: +49 (0) 8131-59-56-0
Fax: +49 (0) 8131-59-56-99
www.thorlabs.com
Email: Europe@thorlabs.com

UK and Ireland
Thorlabs, LTD.
1 Saint Thomas Place, Ely
Cambridgeshire CB7 4EX
Great Britain
Ph: +44 (0) 1353-654440
Fax: +44 (0) 1353-654444
www.thorlabs.com
Email: sales.uk@thorlabs.com

Scandinavia
Thorlabs Sweden AB
Box 141 94
400 20 Göteborg
Sweden
Ph: +46-31-733-30-00
Fax: +46-31-703-40-45
www.thorlabs.com
Email: Scandinavia@thorlabs.com

Japan
Thorlabs Japan, Inc
5-17-1, Ohtsuka
Bunkyo-ku, Tokyo 112-0012
Japan
Ph: +81-3-5977-8401
Fax: +81-3-5977-8402
www.thorlabs.jp
Email: sales@thorlabs.jp

WEEE

As required by the WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) of the European Community and the corresponding national laws, Thorlabs offers all end users in the EC the possibility to return "end of life" units without incurring disposal charges.

This offer is valid for Thorlabs electrical and electronic equipment

- sold after August 13th 2005
- marked correspondingly with the crossed out "wheelie bin" logo (see fig. 1)
- sold to a company or institute within the EC
- currently owned by a company or institute within the EC
- still complete, not disassembled and not contaminated

As the WEEE directive applies to self contained operational electrical and electronic products, this "end of life" take back service does not refer to other Thorlabs products, such as

- pure OEM products, that means assemblies to be built into a unit by the user (e. g. OEM laser driver cards)
- components
- mechanics and optics
- left over parts of units disassembled by the user (PCB's, housings etc.).

If you wish to return a Thorlabs unit for waste recovery, please contact Thorlabs or your nearest dealer for further information.

Waste treatment on your own responsibility

If you do not return an "end of life" unit to Thorlabs, you must hand it to a company specialized in waste recovery. Do not dispose of the unit in a litter bin or at a public waste disposal site.

Ecological background

It is well known that WEEE pollutes the environment by releasing toxic products during decomposition. The aim of the European RoHS directive is to reduce the content of toxic substances in electronic products in the future. The intent of the WEEE directive is to enforce the recycling of WEEE. A controlled recycling of end of live products will thereby avoid negative impacts on the environment.

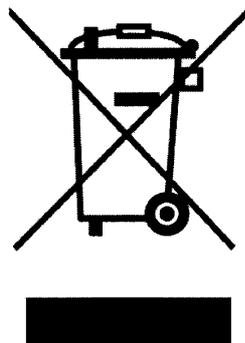
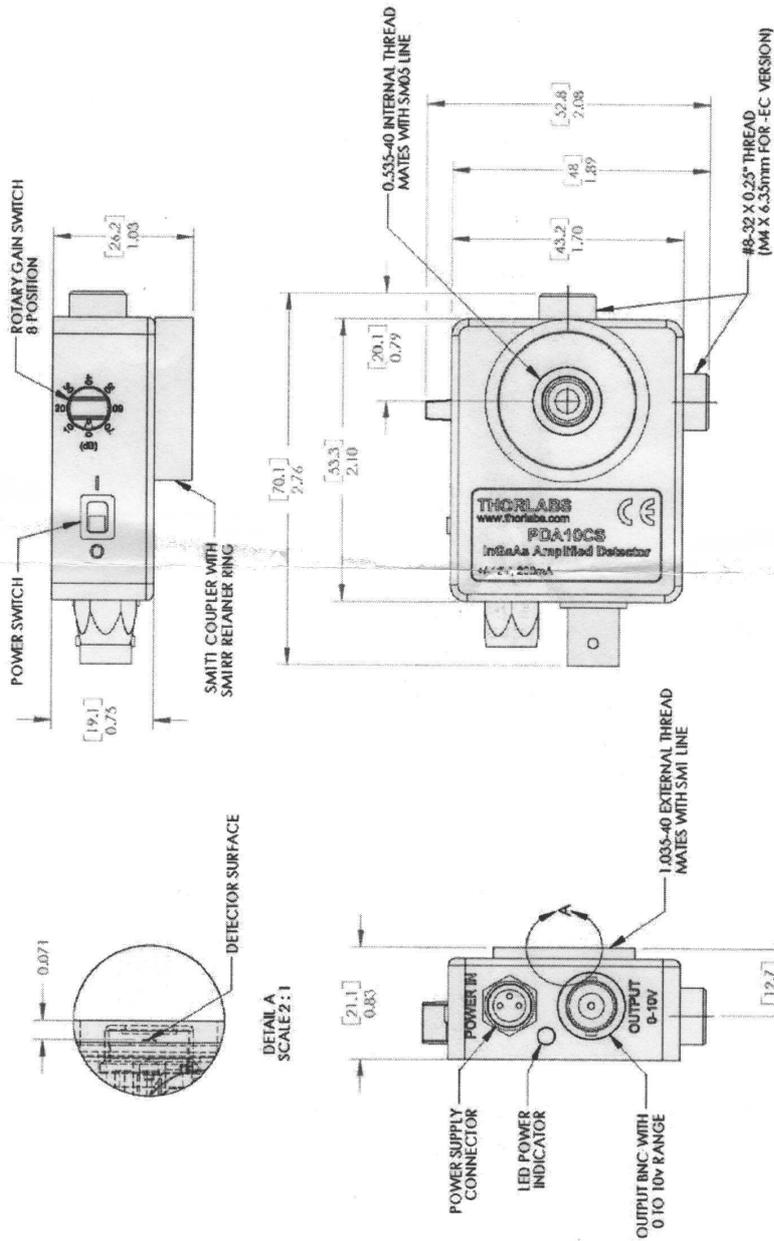


Figure 2. Crossed out "wheelie bin" symbol

COPYRIGHT © 2006 by THORLABS INC.



THORLABS INC. PO BOX 366
NEWTON NJ

TITLE: InGaAs AMPLIFIED DETECTOR

MATERIAL: PDA10CS

SCALE: 1:1

DWG. NO. 1-3058-E01

PART NO. PDA10CS

SIZE REV. A A

SHEET 1 OF 1

TOLERANCES	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:	NAME	DATE
ANGLES	±0.005 INCHES	EC	2/22/06
LINEAR DIMENSIONS	±0.005 INCHES	BIG APPR.	EC
THREE PLACE DECIMAL	±0.010	MFG APPR.	EC
SURFACE FINISH	32 MICRONS	PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF THORLABS, INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF THORLABS, INC. IS PROHIBITED.	
PARALLELISM	±0.002		
PERPENDICULARITY	±0.002		
CONCENTRICITY	±0.002		
SYMMETRY	±0.002		
THREAD CLASS FIT			

1 2 3 4 5

G Relação de equipamentos ópticos utilizados

- LASER sintonizável na banda “C”: LASER NEW FOCUS - TLB 3900 - Tunable DWDM laser.
- Máquina de Emenda: SUMITOMO ELECTRIC SET TYPE25 - Optical Fiber Fusion Splicer.
- Medidores de Potência #1: Optical Power Meter HPM-1 (General Photonics).
- Medidores de Potência #2: FPM-300 Power Meter (EXFO).

H Tabela de canais do laser DWDM de banda C

Canal	Lambda (nm)	Canal	Lambda (nm)
18	1563.05	41	1544.52
19	1562.23	42	1543.73
20	1561.42	43	1542.93
21	1560.60	44	1542.14
22	1559.79	45	1541.35
23	1558.98	46	1540.56
24	1558.17	47	1539.76
25	1557.36	48	1538.97
26	1556.55	49	1538.18
27	1555.75	50	1537.40
28	1554.94	51	1536.61
29	1554.13	52	1535.82
30	1553.33	53	1535.03
31	1552.52	54	1534.25
32	1551.72	55	1533.46
33	1550.92	56	1532.68
34	1550.11	57	1531.90
35	1549.31	58	1531.11
36	1548.51	59	1530.33
37	1547.71	60	1529.55
38	1546.91	61	1528.77
39	1546.12	62	1527.99
40	1545.32	63	1527.21

Tabela H.1: Canais / comprimentos de onda da grade de DWDM permitidos no LASER.

I Tabela com dados técnicos do acoplador 2x1 SM de 3 dB

-	λ	Rz. de acop.	P. d.e inserção	PDL	Diretividade
Out1 (blue)	1310 nm	50.3 %	3.08 dB	0.05 dB	≥ 55 dB
Out2	1310 nm	49.7 %	3.14 dB	0.05 dB	≥ 55 dB
Out1 (blue)	1550 nm	49.2 %	3.18 dB	0.10 dB	≥ 55 dB
Out2	1550 nm	50.8 %	3.04 dB	0.08 dB	≥ 55 dB

Tabela I.1: Dados técnicos do acoplador 2x1 SM de 3 dB.