

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA  
ÓPTICA AFUNILADA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL**

**CLENILSON RODRIGUES DA SILVEIRA**

**TD 02 / 2015**

**UFPA / ITEC / PPGEE**  
**Campus Universitário do Guamá**  
**Belém-Pará-Brasil**  
**2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA  
ÓPTICA AFUNILADA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL**

**CLENILSON RODRIGUES DA SILVEIRA**

**TD 02 / 2015**

**UFPA / ITEC / PPGEE**  
**Campus Universitário do Guamá**  
**Belém-Pará-Brasil**  
**2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CLENILSON RODRIGUES DA SILVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA  
ÓPTICA AFUNILADA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL**

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações

**UFPA / ITEC / PPGEE**  
**Campus Universitário do Guamá**  
**Belém-Pará-Brasil**

**2015**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Silveira, Clenilson Rodrigues da

Desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica afunilada para monitoramento ambiental / Clenilson Rodrigues da Silveira. - 2015.

Orientador: João Crisóstomo Weyl  
Albuquerque Costa;

Coorientadora: Maria Thereza Miranda Rocco  
Giraldi.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2015.

1. Detectores de fibras óticas. 2. Fibras  
óticas. 3. Dispositivos optoeletrônicos. 4.  
Monitorização ambiental -. I. Título.

CDD 22. ed. 681.25

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

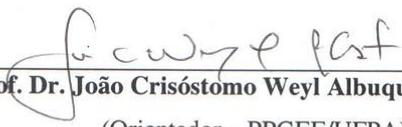
**“DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA  
AFUNILADA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL”**

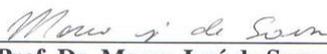
**AUTOR: CLENILSON RODRIGUES DA SILVEIRA**

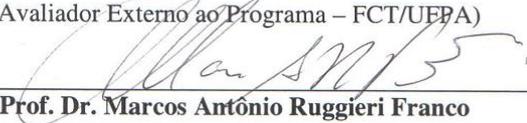
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

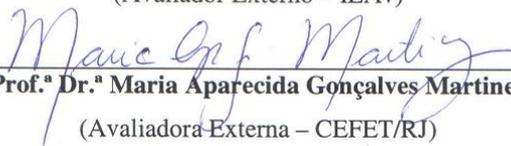
APROVADA EM: 06/02/2015

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa**  
(Orientador – PPGE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marco José de Sousa**  
(Avaliador Externo ao Programa – FCT/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marcos Antônio Ruggieri Franco**  
(Avaliador Externo – IEAv)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria Aparecida Gonçalves Martinez**  
(Avaliadora Externa – CEFET/RJ)

\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria José Pontes**  
(Avaliadora Externa – UFES)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Dr.ª Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi**  
(Avaliadora Externa – IME)

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Pedro Alberto da Silva Jorge**  
(Avaliador Externo – UNIPORTO)

**VISTO:**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

*“Os nossos conhecimentos são a reunião do raciocínio  
e experiência de numerosas mentes”.*

Ralph Waldo Emerson

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, pelo amor incondicional, apoio e incentivo para realizar essa importante e longa jornada.

Aos meus irmãos e sobrinhos, pelo amor e compreensão de minha ausência em diversos momentos.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa e Profa. Dra. Maria Tereza M. R. Giraldi, pela orientação, confiança, paciência, conselhos e palavras motivadoras nos momentos difíceis e por todo o apoio e suporte oferecido para que a elaboração dessa tese fosse possível.

Ao Prof. Dr. Marcos Franco, por gentilmente se oferecer para ministrar-me um curso intensivo do software BeamPROP, pelas sugestões, discussões e valiosas contribuições para esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Marco Sousa por sempre se mostrar disponível para oferecer ajuda e sugestões concernentes a esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Andrés Pablo L. Barbero, pela boa acolhida no Laboratório de Comunicações Ópticas (LACOP) na UFF, o qual coordena, para realizar medidas experimentais.

Ao Dr. Pedro Jorge, pela orientação do meu trabalho durante meu estágio de doutorado sanduíche no INESC Porto, em Portugal.

Aos pesquisadores do INESC Porto que muito me ajudaram no aprendizado e realização de experimentos em laboratório.

Aos integrantes do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA), pelo companheirismo e por de certa forma contribuir para a elaboração desse trabalho.

À secretária do LEA, Liane Barbosa, pelo competente e dedicado apoio logístico.

Ao CNPq e à CAPES, pelo apoio financeiro.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xv
<b>RESUMO</b> .....	xvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. <b>SENSORES BASEADOS EM INTERFERÔMETROS A FIBRA ÓPTICA</b> .....	2
1.1.1. Interferômetro de Fabry-Perot.....	3
1.1.2. Interferômetro de Mach-Zehnder .....	5
1.1.3. Interferômetro de Michelson .....	8
1.2. OBJETIVOS .....	9
1.3. MOTIVAÇÃO .....	10
1.4. CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	11
1.5. ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	11
<b>2. TEORIA E MODELAGEM DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA MONOMODO PADRÃO COM AFUNILAMENTO</b> .....	13
2.1. MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DE FEIXE COM DIFERENÇAS FINITAS (FD-BPM, FINITE DIFFERENCE BEAM PROPAGATION METHOD).....	14
2.1.1. BPM Paraxial e Escalar .....	14
2.1.2. Solução Numérica e Condições de Contorno .....	17
2.2. INTERFERÔMETROS DE MACH-ZEHNDER E MICHELSON BASEADOS EM FIBRA MONOMODO PADRÃO COM AFUNILAMENTO .....	19
<b>3. RESULTADOS NUMÉRICOS</b> .....	31
3.1. INTENSIFICAÇÃO DA SENSIBILIDADE AO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DE INTERFERÔMETROS EM FIBRA AFUNILADA ATRAVÉS DA CURVATURA .....	31
3.2. SENSOR DE CURVATURA DE FIBRA MONOMODO PADRÃO COM AFUNILAMENTO MONITORADO NA TRANSMISSÃO.....	41
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	49
4.1. INCLINÔMETRO ÓPTICO COM INTERROGAÇÃO ELÉTRICA ATRAVÉS DE REDES DE BRAGG EM FIBRA E TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS .....	49
4.2. SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO BASEADO EM INTERFERÔMETRO EM FIBRA AFUNILADA CURVADA .....	59
4.3. ANÁLISE DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON EM FIBRA AFUNILADA COMO SENSOR DE TEMPERATURA .....	68
4.4. ANÁLISE DE SMF AFUNILADA COMO SENSOR DE CURVATURA MONITORADA NA TRANSMISSÃO .....	71

4.5.	ANÁLISE DE SENSOR HÍBRIDO DE INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E FABRY-PEROT EM FIBRA AFUNILADA .....	75
4.5.1.	Análise de Sensor Híbrido como Inclinômetro Óptico .....	77
4.5.2.	Análise de Sensor Híbrido como Sensor de Temperatura.....	78
4.5.3.	Análise de Sensor Híbrido como Sensor de Índice de Refração .....	78
4.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	82
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>83</b>
5.1.	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	86
5.2.	LISTA DE ARTIGOS PUBLICADOS E ACEITOS.....	87
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ilustração do princípio do interferômetro de Fabry-Perot.....	3
Figura 1.2 - (a) Sensor I FP extrínseco feito pela formação de uma cavidade de ar externa (b) sensor I FP intrínseco formado por dois componentes refletores, $R_1$ e $R_2$ ao longo da fibra.....	4
Figura 1.3 – Configuração básica de um IMZ.....	5
Figura 1.4 - Configurações de vários tipos de IMZs, usando (a) um par de LPGs, (b) desalinhamento do núcleo, (c) colapso de lacuna de ar em fibra de cristal fotônico, (d) segmento de fibra multimodo, (e) SMF de pequeno núcleo, e (f) afunilamento em fibra.....	6
Figura 1.5 – Configuração básica de um interferômetro de Michelson.....	8
Figura 1.6 - Configuração básica de um interferômetro de Michelson em linha.....	9
Figura 2.1 - Configuração de um interferômetro de Mach-Zehnder em fibra óptica através de dois afunilamentos concatenados.....	20
Figura 2.2 - Esquemático do Interferômetro de Michelson em linha.....	20
Figura 2.3 - Foto do afunilamento abrupto de 3 dB. Retirado de [32].....	21
Figura 2.4 - Esquema do modelo do interferômetro de Mach-Zehnder em linha usado nas simulações.....	22
Figura 2.5 - Espectros de Interferômetro de Mach-Zehnder baseado em fibra monomodo padrão com afunilamento, para $L = 24$ mm. (a) obtido experimentalmente em [32], (b) obtido de simulações numéricas desse trabalho baseadas no FD-BPM com modelagem em 3D.....	23
Figura 2.6 - Espectros de IMZFA baseados em fibra monomodo padrão com afunilamento, para $L = 36$ mm. (a) obtido experimentalmente em [32], (b) obtido de simulações numéricas desse trabalho baseadas no FD-BPM na configuração 2D com simetria radial.....	24
Figura 2.7 - Foto do afunilamento obtida da máquina de emenda por fusão de fibra.....	25
Figura 2.8 - Esquema representativo do afunilamento e de seus parâmetros usados nas simulações.....	25
Figura 2.9 - Modo fundamental após propagar-se pela fibra padrão afunilada.....	26
Figura 2.10 - Perfil do modo fundamental em 3D após propagar pela fibra afunilada.....	27
Figura 2.11 - Potência normalizada durante propagação ao longo de $L_1$ (comprimento da SMF antes do afunilamento) e da região do afunilamento. (a) modo fundamental e modos da casca (b) modo fundamental (c) modos da casca.....	28
Figura 2.12 - Espectros simulados para valores de comprimento do IMZFA de $L = 20$ mm, $L = 50$ mm e $L = 80$ mm.....	30
Figura 3.1 - Representação esquemática do modelo do interferômetro de Mach-Zehnder em fibra afunilada usado nas simulações.....	32
Figura 3.2 – Espectros para o caso do IMZFA não curvado para os valores diferentes de índice de refração de 1,33, 1,34 e 1,35.....	34
Figura 3.3 - Média dos desvios em comprimento de onda para o IMZFA não curvado.....	34
Figura 3.4 - Perfil de índice de refração equivalente para a fibra reta (linha cheia) e fibra curvada (linha tracejada).....	36
Figura 3.5 - Espectros para IMZF curvado com $R_c = 20$ mm relativos aos valores de IR de 1,33 a 1,37, com passos de 0,01.....	36

Figura 3.6 - Espectros para IMZF curvado com $R_c = 12$ mm relativos aos valores de IR de 1,33 a 1,37, com passos de 0,01. ....	37
Figura 3.7 - Espectros para IMZF curvado com $R_c = 10$ mm relativos aos valores de IR de 1,33 a 1,41, com passos de 0,01. ....	37
Figura 3.8 - Deslocamento médio de comprimento de onda para IMZF não curvado e curvado com raios de curvatura de 20, 12, 11, 10, 9, 8 e 5mm. ....	38
Figura 3.9 - Sensibilidade média em função do raio de curvatura para faixa de IR de 1,33 a 1,34. ....	39
Figura 3.10 - Sensibilidade média em função do raio de curvatura para faixa de IR de 1,40 a 1,41. ....	40
Figura 3.11 - Sensibilidade média em função do raio de curvatura para a inteira faixa de IR analisada, de 1,33 a 1,41. ....	40
Figura 3.12 - Ilustração de um aparato experimental de um sensor de curvatura monitorado na transmissão. ....	42
Figura 3.13 - Ilustração do sensor de curvatura baseado em SMF com afunilamento. Os parâmetros são a seção curvada, $L_{bent}$ , o diâmetro mínimo da cintura do afunilamento, $D_w$ , o comprimento do afunilamento, $L_t$ , e o diâmetro original da casca de 125 $\mu$ m. ....	43
Figura 3.14 - Perfil do campo transversal na saída do dispositivo. (a) perfil do campo modal para fibra reta (0 grau) e (b) para fibra inclinada em 45 graus. ....	45
Figura 3.15 - Transmissão de sinal óptico no comprimento de onda de 1550 nm no sensor de curvatura em SMF com afunilamento para $L_{bent} = 7,5$ mm, $D_w = 80$ $\mu$ m e $L_t = 450$ $\mu$ m. ....	46
Figura 3.16 - Transmissão obtida por simulação em função do ângulo de inclinação do sensor de curvatura baseado em SMF com afunilamento, para $D_w = 80$ $\mu$ m, $L_t = 450$ $\mu$ m e $L_{bent} = 7,5$ mm. ....	47
Figura 3.17 - Transmissão simulada para sensor de curvatura com afunilamento, para $D_w = 30$ $\mu$ m, $L_t = 1200$ $\mu$ m e $L_{bent} = 7,5$ mm, em função do ângulo de inclinação. ....	48
Figura 4.1 - (a) Foto do aparato usado para variar o ângulo do eixo da fibra afunilada que está inserida dentro de dois tubos de alumínio que estão separados por uma seção que contém o afunilamento. (b) zoom que permite visualizar com mais detalhes a seção de fibra com afunilamento que está entre os dois tubos de alumínio e a escala graduada do ângulo a ser variado. A distância entre os tubos capilares é de $\sim 7,5$ mm. ....	50
Figura 4.2 - Espectro do inclinômetro óptico baseado em fibra com afunilamento com uma cavidade de 21 cm (obtida a zero grau). ....	51
Figura 4.3 - Visibilidade de franja em função do ângulo de inclinação de 0 a 15 graus. ....	52
Figura 4.4 - Desvio de comprimento de onda em função da variação do ângulo de inclinação de 0 a 15 graus. ....	52
Figura 4.5 - Aparato experimental do sistema de interrogação elétrica usado para analisar o inclinômetro óptico. ....	53
Figura 4.6 - Posição ótima de dois pontos do espectro óptico, representada por linhas verticais, calculada através do método dos mínimos quadrados, com passos de 0,2 graus, para obter-se a resposta sensora baseada na razão de potências entre esses dois pontos do espectro. ....	55
Figura 4.7 - Resposta normalizada do inclinômetro óptico em função da variação angular entre 3,2 e 6 graus calculada pela razão de potências entre os dois pontos espectrais otimizados. ....	56
Figura 4.8 - Alguns espectros com as posições espectrais ótimas, representadas por linhas verticais, calculadas pelo método dos mínimos quadrados para estimar a resposta do inclinômetro óptico baseada na razão de potências para a faixa angular entre 10 e 14 graus, com passos de 0,2 graus. ....	57
Figura 4.9 - Resposta normalizada do inclinômetro óptico estimada de acordo com a escolha dos dois pontos do espectro feita pelo método dos mínimos quadrados e usando a razão de potências entre eles. ....	58
Figura 4.10 - Resposta normalizada do inclinômetro óptico através do sistema de interrogação elétrica para ângulo de inclinação de 3,5 a 5,5 graus. ....	59

Figura 4.11 - Foto do afunilamento após fabricação na máquina de emenda com vista dos eixos x e y. ....	60
Figura 4.12 - Foto do aparato experimental do sensor de IR analisado em função da curvatura. ....	61
Figura 4.13 - Diagrama esquemático do aparato experimental. ....	62
Figura 4.14 - Espectros para valores de IR de 1,333 e 1,344 com o sensor não curvado. ....	62
Figura 4.15 - Espectros para valores de IR de 1.333 e 1.344 e um raio de curvatura de 11,6 mm (99 graus). ....	63
Figura 4.16 - Espectros para valores de IR = 1,4 e 1,405 para IMFAC não curvado. ....	64
Figura 4.17 - Espectros para valores de IR = 1,4 e 1,405 para IMFAC com $R_c = 17,4$ mm (66 graus). ....	64
Figura 4.18 - Média dos desvios de comprimento de onda em função de IR para três valores de ângulos: 0, 21 e 99 graus (raios de curvatura infinito, 54,6 mm e 11,6 mm, respectivamente). ....	65
Figura 4.19 - Sensibilidade do IMFAC à variação de IR para faixa de 1,333 a 1,35 em função do ângulo de inclinação. ....	66
Figura 4.20 - Sensibilidade média do IMFAC para valores de IR de 1,397 a 1.405. ....	66
Figura 4.21 - Ilustração do aparato utilizado para efetuar medidas de temperatura no IMFA. ....	69
Figura 4. 22 - Espectro óptico das franjas do IMFA à temperatura ambiente ( $\sim 25$ °C). ....	70
Figura 4. 23 - Espectro óptico das franjas do Interferômetro referentes aos valores de temperatura de 24,7 °C; 31,9 °C; 35,3 °C; 39,3 °C; 43,5 °C; 46,9 °C; 52,7 °C; 56,8 °C; 61,2 °C e 64 °C. À medida que o valor da temperatura aumenta há um deslocamento dos pontos de mínimo dos vales das franjas no sentido crescente de comprimento de onda. ....	70
Figura 4. 24 - Comprimento de onda em função da temperatura para o IMFA valores de temperatura de 24,7 °C; 31,9 °C; 35,3 °C; 39,3 °C; 43,5 °C; 46,9 °C; 52,7 °C; 56,8 °C; 61,2 °C e 64 °C. ....	71
Figura 4.25 - Representação esquemática do aparato experimental para medidas do sensor de inclinação em SMF afunilada. ....	72
Figura 4.26 - Foto do afunilamento obtida da máquina de emenda usada na fabricação do afunilamento. O comprimento do afunilamento de 450 $\mu\text{m}$ e diâmetros da casca com seu valor original (125 $\mu\text{m}$ ) e cintura do afunilamento (80 $\mu\text{m}$ ) são destacados. ....	72
Figura 4.27- Ilustração do sensor de curvatura baseado em SMF com afunilamento. Os parâmetros são a seção curvada, $L_{\text{bent}}$ , o diâmetro mínimo da cintura do taper, $D_w$ , o comprimento do afunilamento, $L_t$ , e o diâmetro original da casca de 125 $\mu\text{m}$ . ....	73
Figura 4. 28 - Potência média transmitida em função da variação de inclinação, para $D_w = 80$ $\mu\text{m}$ , $L_t = 450$ $\mu\text{m}$ e $L_{\text{bent}} = 7.5$ mm. Curvas experimentais e simuladas são representadas por círculos sólidos e abertos, respectivamente. ....	73
Figura 4.29 - Configuração do sensor baseado em um interferômetro com afunilamento acoplado a outro interferômetro com uma cavidade de ar (IMFA-AR). ....	76
Figura 4.30 - Espectro de franjas do Interferômetro IMFA-AR para ângulo de inclinação zero no espaço livre. ....	76
Figura 4. 31 - Resposta do IMFA-AR em termo de desvio de comprimento de onda para a faixa angular de 0 a 12 graus , com passos de 1 grau. ....	77
Figura 4. 32 - Resposta do IMFA-AR em termos de variação de comprimento de onda de vales de franjas espectrais em função da temperatura para 89,5 a 136 graus celsius na faixa de 1536 a 1544 nm. ....	78
Figura 4. 33 - Desvio de comprimento de onda em função do índice de refração para valores de IR de 1,3420; 1.3460; 1,3500; 1,3540; 1,3580; 1,3610; 1,3650. ....	79
Figura 4.34 - Espectro da transformada de Fourier referente às duas cavidades do interferômetro híbrido. ....	80

Figura 4.35 – Intensidade normalizada de Fourier referente aos interferômetros de Michelson e de Fabry-Perot em função dos valores de IR de 1,336, 1,339, 1,342, 1, 35, 1,354, 1,361, 1,37..... 80

Figura 4.36 – Intensidade normalizada de Fourier referente ao interferômetros de Michelson em função dos valores de IR de 1,336, 1,339, 1,342, 1, 35, 1,354, 1,361, 1,37..... 81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros da fibra SMF 28 da empresa Corning.....	25
Tabela 2.2 - Índice de refração efetivo dos 20 primeiros modos $LP_{0m}$ .....	27
Tabela 2.3 - Distribuição de energia dos modos fundamental e dos 12 primeiros modos $LP_{0m}$ da casca.....	29
Tabela 3.1 - Parâmetros da SMF-28 usados nas simulações.....	33
Tabela 3.2 - Valores de sensibilidade em nm / RIU para faixas de IR de 1,33 a 1,41 com passos de 0,01.....	39
Tabela 3.3 - Valores de sensibilidade média dentro de toda a faixa de IR analisada de 1,33 a 1,41.....	40
Tabela 3.4 - Parâmetros da SMF-28 usados nas simulações.....	44
Tabela 4.1 - Sensibilidade de alguns sensores de índice de refração baseados em fibra óptica.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS

ASE	<i>Amplified spontaneous emission</i>
BBS	<i>Broadband source</i>
BPM	<i>Beam Propagation Method</i>
FBG	<i>Fiber Bragg grating</i>
FD-BPM	<i>Finite Difference Beam Propagation Method</i>
FSR	<i>Free spectral range</i>
IFP	Interferômetro de Fabry-Perot
IM	Interferômetro de Michelson
IMFA	Interferômetro de Michelson em fibra afunilada
IMFA-AR	Interferômetro de Michelson com cavidade de ar
IMZ	Interferômetro de Mach-Zehnder
IMZFA	Interferômetro de Mach-Zehnder em fibra afunilada
IR	Índice de refração
LPG	<i>Long period grating</i>
MMF	<i>Multimode fiber</i>
OC	<i>Optical circulator</i>
OPD	<i>Optical path difference</i>
OSA	<i>Optical spectrum analyzer</i>
PCF	<i>Photonic crystal fiber</i>
PZT	<i>Piezoelectric transducer</i>
RIU	<i>Refractive index unity</i>
SMF	<i>Singlemode fiber</i>
TBC	<i>Transparent boundary condition</i>
WGM	<i>Whispering gallery mode</i>

## RESUMO

O monitoramento de parâmetros ambientais é importante na preservação do meio ambiente. O desenvolvimento de sistemas tecnologicamente avançados para a medição de parâmetros físicos pode permitir a detecção antecipada de fatores nocivos ao meio ambiente. Por exemplo, sistemas de medição de índice de refração e temperatura permitem detectar poluição térmica e química na água de rios. Medição de curvatura ou inclinação é importante na previsão de fenômenos naturais que possam causar danos ao ser humano, tais como deslizamentos de encostas e sismos. Essa tese investiga sensores baseados em fibra óptica afunilada para monitoramento de parâmetros ambientais. A tecnologia investigada é baseada em fibra óptica monomodo padrão com seção afunilada que faz uso do campo evanescente para detectar alterações no ambiente externo, tais como índice de refração, temperatura e curvatura. Esse tipo de dispositivo é analisado através de simulações numéricas e medidas experimentais. A modelagem numérica é feita através do método de propagação de feixe por diferenças finitas (FD-BPM, *finite difference beam propagation method*). É comprovado numérica e experimentalmente que o interferômetro de Michelson em fibra óptica afunilada submetida à curvatura apresenta uma intensificação na sensibilidade à variação de índice de refração em comparação com o dispositivo não curvado. Medidas experimentais indicam que esse tipo de dispositivo tem também grande potencial como sensor de temperatura. Resultados numéricos, baseados no FD-BPM, indicam que é possível otimizar os parâmetros do afunilamento na fibra óptica para melhorar sua sensibilidade à curvatura em termos de potência transmitida.

**Palavras-chave:** Fibra óptica afunilada, Sensor óptico, Monitoramento ambiental, Método de propagação de feixe por diferenças finitas, Índice de refração, Temperatura, Curvatura.

## ABSTRACT

*The monitoring of environmental parameters is important in preserving the environment. The development of technologically advanced systems for measuring physical parameters allows the early detection of harmful environmental factors. For example, refractive index and temperature measurement systems can detect thermal and chemical pollution in rivers water. Curvature or tilt measurement is important in predicting natural phenomena that may cause damage to human beings, such as landslides and earthquakes. This thesis investigates sensors based on tapered optical fiber for monitoring environmental parameters. The investigated technology is based on standard single-mode optical fiber with tapered section that makes use of the evanescent field to detect changes in the external environment, such as refractive index, temperature and curvature. This type of device is analyzed through numerical simulations and experimental measurements. The numerical modeling is performed using finite difference beam propagation method (FD-BPM). It is numerically and experimentally demonstrated that once tapered optical fiber Michelson interferometer is subjected to bending the sensitivity to refractive index change is enhanced in comparison with the not bent device. Experimental measurements indicate that this type of device has great potential as a temperature sensor. Numerical results, based on FD-BPM, indicate that it is possible to optimize the taper parameters in optical fiber to improve its sensitivity to bending in terms of transmitted power.*

***Keywords: Tapered optical fiber, Optical sensor, Environmental monitoring, Finite difference beam propagation method, Refractive index, Temperature, Bending.***

# 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se presenciado uma revolução nas indústrias de optoelectrônica e comunicações a fibra óptica. As fibras ópticas com suas características especiais de guiamento de luz tem provido maior desempenho e confiabilidade às comunicações [1 - 3]. Em paralelo a esse desenvolvimento, a fibra óptica tem sido objeto de intensa investigação e progresso no campo dos sensores. Sensores baseados em fibra óptica oferecem numerosas vantagens em relação aos seus homólogos convencionais. As vantagens dos sensores a fibra óptica em relação aos transdutores elétricos são a imunidade inerente à interferência eletromagnética, maior sensibilidade, pequeno tamanho, baixa perda de propagação, segurança em ambientes perigosos e explosivos, sensoriamento remoto, sensoriamento simultâneo, etc. [1, 2]. Além do mais, as habilidades para sensoriamento inerentes às fibras tem sido intensificadas pela utilização de tecnologias inovadoras tais como redes de Bragg, interferômetros a fibra óptica, uso de efeitos não lineares tais como espalhamento Brillouin estimulado e espalhamento Raman estimulado, ressonância de superfície plasmônica, fibras microestruturadas, nano-fios, acopladores com fibras especiais, etc [4 - 9].

Alguns sensores a fibra óptica são usados para monitorar deformação em tempo real de aeronaves, barcos, pontes e construções [10]. Tem havido diversas pesquisas utilizando fibras ópticas como sensores de temperatura, deformação mecânica, rotação, deslocamento, índice de refração, polarização, ultrassom e assim por diante [11 - 18].

O desenvolvimento de materiais inteligentes amigáveis ao tecido humano tem atraído grande interesse na investigação de sistemas baseados em fibra óptica para monitoramento da saúde humana [1].

O estudo de sensores em fibras ópticas teve início há algumas décadas. Há quase cinquenta anos atrás, surgiu pela primeira vez a ideia de que fibras ópticas poderiam ser usadas como dispositivos sensores [19]. Em meados dos anos 1960 foi patenteado um sensor denominado Fotonic, o qual era baseado em feixes de fibras bifurcadas, sendo que metade do feixe era usada para iluminar uma superfície e a outra metade recebia o sinal refletido por essa superfície. Após uma calibração adequada, foi possível através do sinal recebido obter uma indicação precisa da extremidade e da superfície refletora. Dessa forma, criou-se um sensor de vibração sem contato. Desde então, várias ideias e propostas tem sido desenvolvidas para vários mensurandos e aplicações. Até agora, alguns tipos de sensores em fibra tem sido

comercializados, mas por outro lado, apenas um número limitado de técnicas e aplicações tem sido comercializado com sucesso. Embora as fibras ópticas apresentem inúmeras vantagens, já descritas, os sensores baseados em fibra precisam competir com outras tecnologias já bastante maduras tais como os sensores eletrônicos. A fim de convencer o mercado já acostumado a utilizar as técnicas de sensoriamento tradicionais, a superioridade dos sensores baseados em fibra óptica sobre os sensores convencionais precisa ser claramente demonstrada. Os sensores a fibra óptica precisam ter bom desempenho associado a um preço razoável. Esses sensores necessitam também estar disponíveis na forma de sistemas completos, inclusive com eletrônica de detecção e processamento de sinais já embarcada. Apesar de todas essas dificuldades, considerável esforço tem sido feito para estudar e desenvolver sensores em fibra óptica e alguns estão atingindo a maturidade [20].

A seção a seguir apresenta uma sucinta revisão bibliográfica a respeito do estado da arte de sensores interferométricos em fibra óptica usados neste trabalho. Serão discutidos os princípios envolvidos em alguns dispositivos sensores baseados em fibra óptica, sendo feitas breves considerações a respeito de sensores baseados em interferometria.

### **1.1. Sensores Baseados em Interferômetros a Fibra Óptica**

Um interferômetro baseado em fibra óptica usa a interferência entre dois ou mais feixes que se propagam por caminhos ópticos diferentes em uma fibra ou duas fibras diferentes. Assim, esses dispositivos requerem componentes tanto para dividir o feixe como para recombiná-lo novamente [1, 9]. Evidentemente, um dos caminhos ópticos precisa ser arranjado de tal forma que seja afetado pela perturbação externa. Os interferômetros permitem determinar o mensurando quantitativamente através de detecção de variações em comprimento de onda, fase, intensidade, frequência, largura de banda e assim por diante [1, 3]. A tendência atual para interferômetros baseados em fibra óptica é miniaturizá-los para a escala microscópica. Assim, componentes ópticos tradicionais tais como divisores de feixe, combinadores, e lentes objetivas tem sido rapidamente substituídos por dispositivos a fibra de pequenas dimensões que permitem os sensores operarem na escala das fibras ópticas. Intensas pesquisas estão voltadas para a implementação de interferômetros a fibra óptica comumente denominados “em linha”, os quais possuem dois caminhos ópticos em uma única linha física. Os

interferômetros em linha oferecem diversas vantagens como facilidade de alinhamento, alta eficiência de acoplamento e alta estabilidade [1].

Existem quatro tipos representativos de interferômetros em fibra óptica, os quais são chamados de interferômetros de: Fabry-Perot, Mach-Zehnder, Michelson e Sagnac. As subseções a seguir irão descrever sucintamente os princípios de operação bem como algumas características dos três primeiros interferômetros citados, para aplicações em sensores, por terem sido usados neste trabalho.

### 1.1.1. Interferômetro de Fabry-Perot

Um interferômetro de Fabry-Perot (IFP) é geralmente composto de duas superfícies refletoras separadas por uma determinada distância. A interferência ocorre devido às múltiplas superposições de feixes refletidos em superfícies paralelas [21]. A Figura 1.1 ilustra o princípio do IFP. A luz entra no interferômetro e sofre múltiplas reflexões internas.

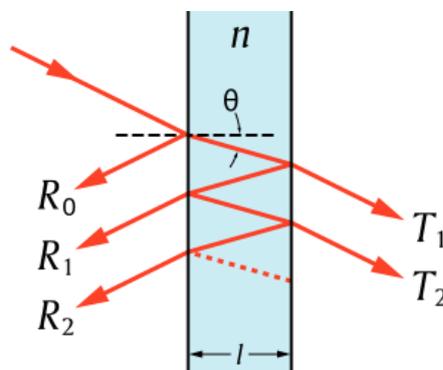


Figura 1.1 - Ilustração do princípio do interferômetro de Fabry-Perot.

Sensores de Fabry-Perot podem ser do tipo extrínseco, no qual usam reflexões de uma cavidade externa [10]. A Figura 1.2 (a) mostra um sensor de IFP extrínseco. Sensores de IFP também podem ser do tipo intrínseco onde os refletores são formados dentro da própria fibra, conforme mostrado na Fig. 1.2 (b). A cavidade ressonante formada em sensores de IFP intrínsecos pode ser obtida por vários métodos tais como redes de Bragg em fibra (FBGs, *Fiber Bragg gratings*), e deposição de filmes finos [22 - 25].

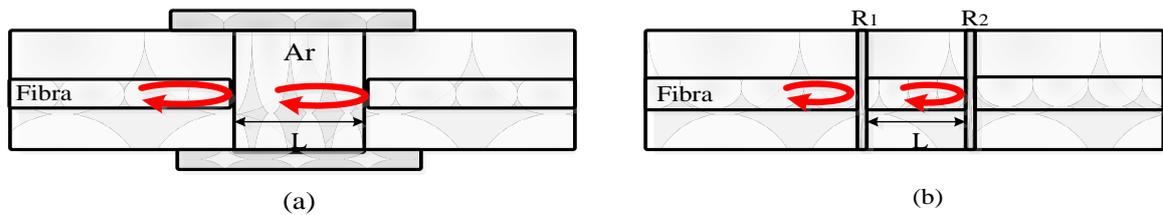


Figura 1. 2 - (a) Sensor I FP extrínseco feito pela formação de uma cavidade de ar externa (b) sensor I FP intrínseco formado por dois componentes refletivos,  $R_1$  e  $R_2$  ao longo da fibra.

O espectro de transmissão ou reflexão de um sensor IFP pode ser descrito como uma modulação de intensidade do espectro da luz de entrada dependente do comprimento de onda, o qual é principalmente causado pela diferença de fase entre dois feixes transmitidos ou refletidos. Os picos de máximos e mínimos do espectro modulado significam que ambos os feixes em um determinado comprimento de onda, estão em fase e fora de fase, respectivamente. A diferença de fase do IFP é dada por [1]:

$$\delta_{IFP} = \frac{4\pi n L}{\lambda} \quad (1.1)$$

Onde  $\lambda$  representa o comprimento de onda da luz incidente,  $n$  é o índice de refração do material da cavidade e  $L$  é o comprimento físico da cavidade. Quando ocorre uma perturbação no sensor, a diferença de fase é influenciada pela variação na diferença do caminho óptico (OPD, *optical path difference*) do interferômetro. Por exemplo, quando se aplica deformação longitudinal no sensor de IFP, alterações na OPD e/ou no índice de refração do material da cavidade resultará em variação de fase. A deformação aplicada pode ser medida quantitativamente através de medidas do deslocamento do comprimento de onda do IFP. A faixa espectral livre (FSR, *free spectral range*), que é o espaçamento entre picos de interferência adjacentes no espectro, é também influenciada pela variação da OPD. Quanto menor a OPD maior a FSR. Embora uma maior FSR ofereça uma faixa dinâmica mais larga ao sensor, ao mesmo tempo, oferece uma pobre resolução devido aos sinais se tornarem pouco acentuados [26]. Portanto, dependendo da aplicação, é importante projetar a OPD do IFP para satisfazer tanto a faixa dinâmica como a resolução.

### 1.1.2. Interferômetro de Mach-Zehnder

Interferômetros de Mach-Zehnder (IMZs) tem sido comumente usados em diversas aplicações de sensoriamento devido às suas configurações flexíveis. IMZs mais antigos tinham dois braços independentes, um de referência e o outro usado para sensoriar o mensurando, conforme mostrado na Fig. 1.3. A luz incidente é dividida em duas partes iguais, uma para cada braço, através de um acoplador de 3 dB em fibra, e então recombinada por outro acoplador de 3 dB em fibra. A luz recombinada apresenta padrões de interferência de acordo com a OPD entre os dois braços. Em aplicações de sensoriamento, o braço de referência é mantido isolado do ambiente externo enquanto o braço sensor é exposto às variações do ambiente a ser mensurado. Dessa forma, a variação no braço sensor induzida por parâmetros externos tais como temperatura, deformação mecânica, e índice de refração altera a OPD do IMZ, a qual pode ser analisada pela variação no sinal de interferência [1].

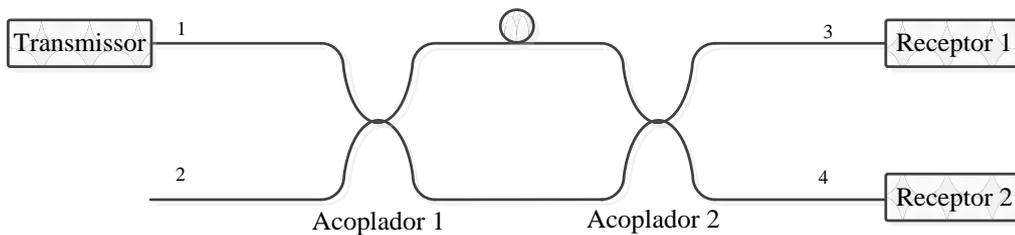


Figura 1.3 – Configuração básica de um IMZ.

O esquema de usar dois braços separados nos IMZs tem sido rapidamente substituído pelo esquema do interferômetro em linha desde o advento das LPGs. A Figura 1.4 mostra diversos métodos de construção de IMZs em linha numa fibra óptica. Na Figura 1.4 (a) nota-se que uma fração do modo fundamental do núcleo de uma fibra monomodo padrão (SMF, *singlemode fiber*) é acoplado aos modos da casca da mesma fibra por uma rede de período longo (LPG, *Long period grating*), e após determinada distância, é reacoplado novamente ao modo do núcleo por outra LPG.

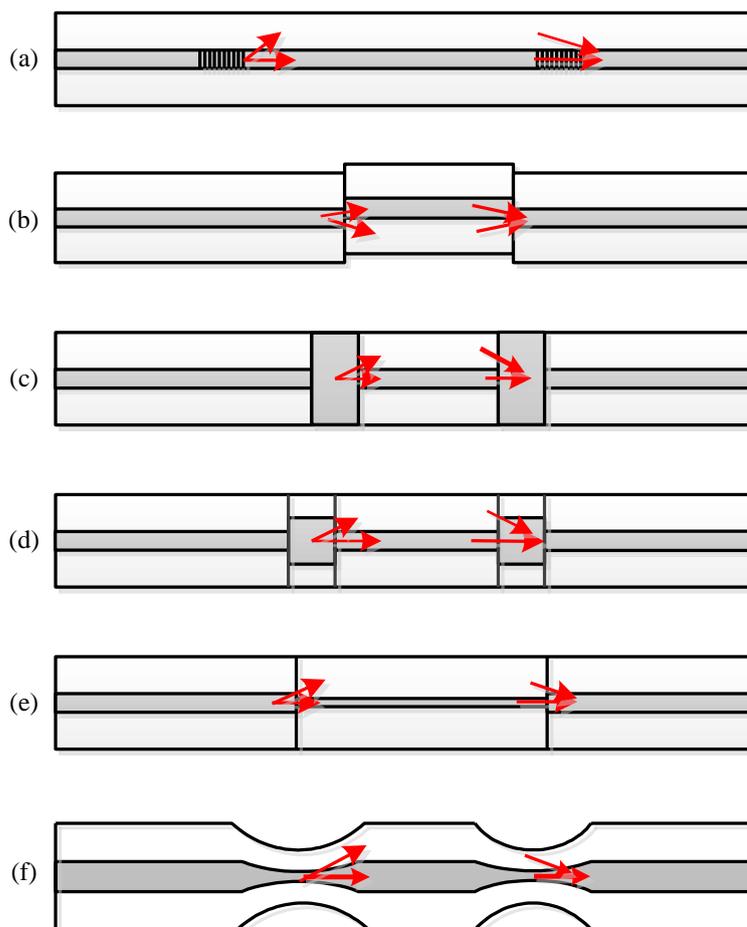


Figura 1.4 - Configurações de vários tipos de IMZs, usando (a) um par de LPGs, (b) desalinhamento do núcleo, (c) colapso de lacuna de ar em fibra de cristal fotônico, (d) segmento de fibra multimodo, (e) SMF de pequeno núcleo, e (f) afunilamento em fibra.

O feixe combinado e o feixe desacoplado no núcleo interferem, o que resulta em um compacto e muito eficaz IMZ. Nesse tipo de IMZ em linha, ambos os braços apresentam os mesmos comprimentos físicos, mas apresentam comprimentos de caminhos ópticos diferentes devido à dispersão modal; o índice de refração efetivo dos modos da casca é menor que o do modo do núcleo.

Outra forma de dividir o sinal óptico entre o núcleo e a casca de uma fibra é emendar duas fibras com um minúsculo desalinhamento (*offset*) lateral, como mostrado na Fig. 1.4 (b). Devido ao *offset*, uma parte do modo do núcleo é acoplada a diversos modos da casca sem ser fortemente afetado pelo comprimento de onda. Mesmo com fibra de cristal fotônico (PCF, *photonic crystal fiber*), um IMZ pode ser formado por simplesmente emendar um pedaço de PCF entre fibras monomodo padrão, com um pequeno desvio intencional [27]. O método *offset* é eficiente em custo e rapidez em comparação com o método que utiliza um par de

LPGs. Também, é possível usar qualquer comprimento de onda para operação. O número de modos de casca envolvidos e a perda de inserção podem ser controlados pelo ajuste da quantidade de *offset* [27].

Colapsar lacunas de ar de uma PCF é outra forma de construir um IMZ em linha. É de fácil construção e não precisa de nenhum complicado processo de alinhamento ou clivagem. Nessa abordagem, o modo do núcleo em uma PCF é expandido para a região de lacuna de ar colapsada, tal que parte dele pode ser acoplado aos modos da casca da PCF, conforme mostrado na Fig. 1.4 (c). Porém, neste caso, foi observado acoplamento para diversos modos da casca e controlar o número de modos envolvidos não foi muito simples [27]. Além disso, a perda de inserção foi bastante elevada em comparação com o método *offset*. A combinação do método de LPG e o método de colapso na PCF, permite a redução da perda de inserção para cerca de  $\sim 3$ dB [28]. Esses sensores de IMZ em linha baseados em PCF tem diversas vantagens incluindo operação em altas temperaturas e baixa sensibilidade cruzada devido a não utilização de núcleo dopado quando comparado a fibras monomodo convencionais.

A maioria dos IMZs em linha é baseada na interferência multimodal. A parte da casca de uma SMF é um guia multimodo, tal que, o número de modos envolvidos no IMZ, é em geral mais que um. Excepcionalmente, o par de LPGs usa somente um modo da casca na maioria dos casos [29]. Tal interferência multimodal afeta o desempenho do sensor porque cada modo tem uma sensibilidade diferente às variações externas. Portanto, é necessário minimizar o número de modos de casca envolvidos na fabricação do sensor e também a análise precisa ser feita considerando a interferência multimodo de forma cuidadosa [1]. Outra técnica para implementar um IMZ consiste em utilizar fibras com núcleos de diferentes diâmetros, como mostrado nas Figs. 1.4 (d,e) [30, 31].

A Figura 1.4 (d) mostra um método no qual um pequeno pedaço de fibra multimodo (MMF) é emendado por fusão em uma SMF em dois pontos distintos ao longo da SMF. Neste caso, a luz que se propaga no núcleo da SMF é espalhada na região da MMF e então acoplada ao núcleo e à casca da próxima SMF [30]. A Figura 1.4 (e) mostra outro método, no qual uma fibra de pequeno núcleo é inserida entre duas SMFs convencionais. Na fibra de pequeno núcleo, o sinal óptico é guiado não apenas como modo do núcleo mas também como modo da casca [31].

Um IMZ em linha eficaz pode ser formado por afunilar uma fibra em dois pontos, conforme mostrado na Fig. 1.4 (f) [32, 33]. Devido ao afunilamento, o diâmetro do modo do núcleo é aumentado, tal que, uma parte do modo fundamental pode ser acoplado a modos de casca [1].

Este é um método eficaz e relativamente simples, mas é mecanicamente frágil principalmente na região afunilada.

### 1.1.3. Interferômetro de Michelson

Sensores de fibra óptica baseados no interferômetro de Michelson (IM) são bastante similares aos IMZs. Assim como os IMZs, o sinal óptico na entrada do dispositivo é dividido entre dois braços, através de um acoplador de 3 dB em fibra, porém cada feixe é refletido na extremidade de cada braço, e então recombinado pelo mesmo acoplador, conforme mostrado na Fig. 1.5 [34 - 37]. Um IM corresponde, em termos de configuração, à metade de um IMZ. A principal diferença de um IM, em relação ao IMZ, é a existência de refletores. Assim, o método de fabricação e o princípio de operação de um IM são praticamente os mesmos de um IMZ [1].

O princípio básico de um IM consiste em que a luz refletida recombinada apresenta padrões de interferência de acordo com a OPD entre os dois braços. Um braço é usado como referência e, portanto, mantido isolado do ambiente externo, enquanto o outro braço é exposto às variações do ambiente a ser mensurado. Dessa forma, a variação do sinal no braço sensor, induzida por parâmetros externos, altera a OPD, causando variação no sinal de interferência [1].

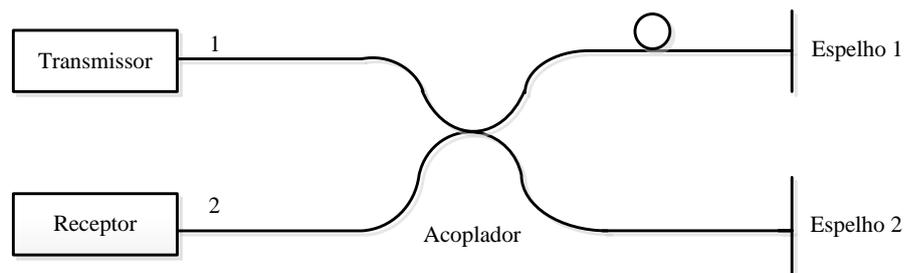


Figura 1.5 – Configuração básica de um interferômetro de Michelson.

Visto que o IM opera na reflexão, seu tamanho equivale à metade de um IMZ. Por isso, IMs são mais compactos e de mais fácil instalação que os IMZs. Uma configuração em linha por meio de fibra óptica pode ser implementada através da técnica de afunilamento em fibra com a extremidade clivada, conforme mostrado na Fig. 1.6.

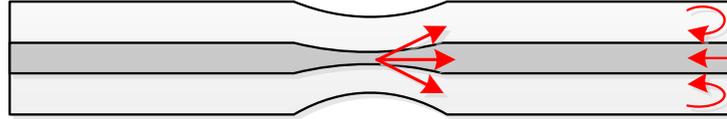


Figura 1.6 - Configuração básica de um interferômetro de Michelson em linha.

Nessa configuração, o modo do núcleo é acoplado aos modos da casca, os quais são refletidos na extremidade clivada da fibra por meio da lei de Snell [1, 38].

## 1.2. Objetivos

Esse trabalho visa investigar sensores baseados em fibra óptica para monitoramento de parâmetros ambientais. A tecnologia investigada é baseada em fibra monomodo padrão (SMF, *singlemode fiber*) com seção afunilada que faz uso do campo evanescente para detectar alterações no ambiente externo. Esse tipo de dispositivo foi analisado através de simulações numéricas e medidas experimentais em quatro tipos de configuração. A primeira abordagem consiste em um interferômetro de Mach-Zehnder baseado em SMF com dois afunilamentos concatenados, tendo o revestimento entre os afunilamentos retirado. Essa configuração é analisada numericamente como sensor de índice de refração, sendo sua sensibilidade avaliada em função da curvatura imposta à seção entre os afunilamentos. A segunda abordagem refere-se a um interferômetro de Michelson construído com uma SMF e um afunilamento, com a seção de fibra após o afunilamento tendo seu revestimento retirado e sua extremidade clivada, a qual age como espelho. Este dispositivo é analisado experimentalmente como sensor de inclinação, temperatura e de índice de refração. A sensibilidade desse dispositivo ao índice de refração é computada quando submetido à curvatura e comparada com o dispositivo não curvado. A terceira configuração baseia-se em uma SMF com um afunilamento, sendo que nesse caso, após o afunilamento, o revestimento é mantido e é feita análise da sensibilidade à curvatura em função da perda de potência. Essa estrutura é investigada numericamente e experimentalmente. A quarta abordagem consiste num interferômetro híbrido, Michelson e Fabry-Perot, baseado em SMF afunilada unida a uma fibra multimodo que contém uma cavidade de ar. Essa estrutura é avaliada experimentalmente.

### **1.3. Motivação**

A motivação desse trabalho advém do fato de que atualmente, o monitoramento de parâmetros ambientais é cada vez mais importante na preservação do meio ambiente. Assim, o desenvolvimento de sistemas tecnologicamente avançados para a medição de parâmetros físicos, tais como, fluxo de água, índice de refração, temperatura, salinidade, turbidez ou outros, pode permitir a detecção antecipada de fatores nocivos ao ambiente, como por exemplo, poluição térmica e de elementos químicos na água [3, 39-42]. Medição de curvatura ou inclinação é importante na previsão de fenômenos naturais que possam causar danos ao ser humano, tais como deslizamentos de encostas [43]. Existe até mesmo o potencial para emprego de inclinômetros na previsão de atividades vulcânicas e sismos [44].

Este trabalho foi inserido em dois projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de sensores em fibra óptica para monitoramento ambiental. Estes projetos tiveram a parceria de instituições brasileiras, tais como, Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto Militar de Engenharia (IME), Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), e a instituição portuguesa Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto). Um dos projetos foi “Estudo e desenvolvimento de sensores ópticos para a monitorização remota de parâmetros ambientais”, e teve auxílio financeiro da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. O objetivo deste projeto envolvia a formação de recursos humanos na tecnologia de sensoriamento utilizando fibras ópticas e o incremento da colaboração científica e tecnológica na área de sensoriamento remoto para a monitoração de parâmetros do ambiente principalmente de parâmetros químicos. Este projeto financiou o estágio de doutoramento no INESC Porto, desenvolvido ao longo desta tese. Durante este estágio de doutoramento foi realizada pesquisa através de medidas experimentais de sensores baseados em fibra óptica afunilada, cujos resultados foram publicados em conferências nacionais e internacionais. Outro projeto correlato motivador desta tese foi “Monitorização remota de parâmetros ambientais através de sensores de fibra óptica”, o qual recebeu auxílio financeiro do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

## **1.4. Contribuições da Tese**

As principais contribuições dessa tese foram:

- Modelagem, através do método de propagação de feixe com diferenças finitas (FD-BPM), de sensor de índice de refração baseado em interferômetro de Mach-Zehnder em fibra monomodo com afunilamento associado à curvatura.
- Modelagem, por meio de FD-BPM, de sensor de curvatura baseado em fibra monomodo padrão com afunilamento e monitorada na transmissão.
- Montagem e caracterização de sensor de índice de refração baseado em interferômetro de Michelson em fibra monomodo padrão afunilada e curvada.
- Montagem e caracterização de sensores de inclinação, de índice de refração e de temperatura baseados em interferômetro de Michelson em fibra monomodo padrão afunilada.
- Montagem e caracterização de sensores de inclinação, de índice de refração e de temperatura através de interferômetro híbrido de Michelson com Fabry-Perot baseado em fibra afunilada e com cavidade de ar em sua extremidade.
- Publicação e aceitação de artigos em revistas internacionais e conferências nacionais e internacionais.

## **1.5. Organização da Tese**

Este documento está organizado da seguinte maneira:

O capítulo 2 trata da teoria e modelagem dos sensores em fibra óptica com afunilamento. Os resultados de simulações computacionais se encontram no capítulo 3. No capítulo 4 são

apresentados os resultados referentes às medidas experimentais realizadas. O capítulo 5 aborda as conclusões desse trabalho e propostas para pesquisas futuras.

## 2. TEORIA E MODELAGEM DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA MONOMODO PADRÃO COM AFUNILAMENTO

Este capítulo trata da modelagem utilizada para analisar e projetar sensores baseados em SMF com trecho afinado. Será descrita a modelagem utilizada para esses tipos de dispositivos como sensores de parâmetros ambientais com análise na variação no padrão de interferência de um sinal interferométrico ou na transmissão.

Neste trabalho é feita investigação de dispositivos baseados em SMF afinada. São analisados basicamente quatro tipos de abordagens de sensores empregando SMF com afinamentos: 1) interferômetro de Mach-Zehnder em fibra afinada (IMZFA) que utiliza dois afinamentos concatenados no mesmo dispositivo, no qual o trecho entre os dois afinamentos tem seu revestimento retirado e o sinal interferométrico é monitorado na saída, após o segundo afinamento; 2) interferômetro de Michelson em fibra afinada (IMFA) que contém apenas um afinamento e tem seu revestimento retirado a partir do afinamento até a extremidade da fibra, a qual é clivada para refletir parte da luz (~4%) por reflexão de Fresnel, nesse caso, o sinal interferométrico é analisado na reflexão; 3) dispositivo em SMF com um único afinamento que tem seu revestimento retirado ao redor de uma pequena seção ao redor do afinamento, sendo mantido o revestimento no restante da fibra, e sua resposta é monitorada na transmissão; e 4) interferômetro híbrido baseado em um IMFA seguido de uma cavidade de ar feita numa fibra multimodo.

Utilizou-se para modelagem desses dispositivos, o software comercial BeamPROP 9.0 da Rsoft™, o qual é baseado no método de propagação de feixe com diferenças finitas (FD-BPM, *Finite Difference Beam Propagation Method*). Na seção 2.1 serão abordados algumas características do FD-BPM e do software BeamPROP. Na seção 2.2 serão discutidos aspectos referentes à modelagem utilizada no afinamento em SMF, bem como aspectos teóricos dos interferômetros IMZFA e IMFA. Será mostrado que a modelagem do IMFA pode ser feita usando a abordagem do IMZFA para suprir a limitação do FD-BPM em simular sinais refletidos. É demonstrado, via simulações com FD-BPM, o acoplamento que ocorre entre os diversos modos do sinal óptico ao passar por um afinamento em uma SMF. A modelagem da configuração não-interferométrica, que é analisada na transmissão como sensor de

curvatura, será abordada com detalhes no próximo capítulo. O interferômetro híbrido de Michelson e Fabry-Perot é analisado apenas experimentalmente no capítulo 4.

## **2.1. Método de Propagação de Feixe com Diferenças Finitas (FD-BPM, *Finite Difference Beam Propagation Method*)**

Neste trabalho utilizou-se o software BeamPROP 9.0 da RSoft™ que provê um pacote geral de simulação para calcular a propagação de ondas de luz em guias de onda com geometrias hbitrárias [45]. Esse software utiliza o método numérico de propagação de feixe com diferenças finitas (FD-BPM, *finite difference beam propagation method*). Esta técnica é uma variação do BPM convencional que usa métodos de diferenças finitas para resolver a bem conhecida aproximação parabólica ou paraxial da equação de Helmholtz [46, 47]. Em adição, utiliza-se no software condições de contorno transparentes (TBC, *transparent boundary conditions*) [48].

O BPM tradicional apresenta como limitação física importante sua condição de paraxialidade na direção de propagação primária, a qual advém da aproximação parabólica à equação de Helmholtz [49, 50]. Outra limitação chave do BPM consiste em que ele não simula reflexões visto que a equação de onda em uma direção, no qual ele é baseado, não admite ondas se propagando nas direções positiva e negativa ao mesmo tempo. Esta limitação do BPM para análise de reflexões do sinal impõe uma dificuldade para modelar um dos tipos de sensores considerados nesse trabalho, o IMFA. Este dispositivo, assim como o interferômetro de Michelson tradicional, tem o sinal refletido em sua extremidade, monitorado. Mais adiante será mostrado como pode ser realizada a modelagem desse tipo de interferômetro através do BPM.

### **2.1.1. BPM Paraxial e Escalar**

O BPM é essencialmente um método particular para aproximar a equação exata da onda para ondas monocromáticas e resolver as equações resultantes numericamente. Nessa seção será abordada a aproximação básica que formula o problema sob restrições de campo escalar e

paraxialidade (isto é, propagação restrita a uma estreita faixa de ângulos). A suposição de campo escalar permite que a equação de onda seja escrita na forma da bem conhecida equação de Helmholtz para ondas monocromáticas [46, 47]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2(x, y, z)\phi = 0 \quad (2.1)$$

Aqui o campo elétrico escalar é escrito como  $E(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t}$  e a notação  $k(x, y, z) = k_0 n(x, y, z)$  é descrita como sendo o número de onda espacialmente dependente, com  $k_0 = 2\pi/\lambda$  sendo o número de onda no espaço livre. A geometria do problema é definida inteiramente pela distribuição do índice de refração  $n(x, y, z)$ .

Com exceção da suposição escalar, a equação acima é exata. Considerando que em problemas típicos de onda guiada a variação mais rápida no campo  $\phi$  é a variação devido à propagação ao longo do eixo de guiamento, e considerando que o eixo é predominantemente ao longo da direção  $z$  é útil fatorar essa rápida variação para introduzir um assim chamado campo com variação lenta  $u$  [46, 47]:

$$\phi(x, y, z) = u(x, y, z)e^{i\bar{k}z} \quad (2.2)$$

Onde  $\bar{k}$  é um número constante a ser escolhido para representar a variação média do campo  $\phi$  e é referido como número de onda de referência. Introduzindo a expressão (2.2) dentro da equação de Helmholtz expressa em (2.1) conduz à seguinte equação para o campo lentamente variante [46, 47]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2i\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0 \quad (2.3)$$

A equação (2.3) é completamente equivalente à equação exata de Helmholtz, com a exceção de que é expressa em termos de  $u$ . Assumindo que a variação de  $u$  em relação a  $z$  é lenta, o primeiro termo de (2.3) pode ser desprezado em relação ao segundo. Esta é a aproximação da envoltória com variação lenta e nesse contexto é também referida como aproximação paraxial ou parabólica. Com estas suposições e algum reajuste, a equação (2.3) reduz-se a [46, 47]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2\bar{k}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u \right) \quad (2.4)$$

Esta é a equação BPM básica em três dimensões (3D). A simplificação para duas dimensões é obtida por omitir qualquer dependência sobre  $y$ .

Esta aproximação oferece vantagens e também limitações. Vamos considerar algumas vantagens dessa simplificação. Primeiro, a eliminação do termo com variação rápida de fase permite que o campo lentamente variante seja representado numericamente sobre uma grade longitudinal (isto é, ao longo de  $z$ ) que pode ser muito maior que o comprimento de onda para muitos problemas, contribuindo em parte para a eficiência da técnica [46]. Segundo, a eliminação do termo da derivada segunda em  $z$  reduz o problema de valor de contorno de segunda ordem, requerendo iteração ou análise de autovalor, para um problema de valor inicial de primeira ordem que pode ser resolvido por simples integração da equação (2.4) ao longo da direção de propagação  $z$ . Este aspecto é um fator que determina a eficiência do BPM, implicando em uma redução no tempo de simulação de no mínimo da ordem do número de pontos da grade longitudinal comparada à solução numérica completa da equação de Helmholtz [46].

Obviamente, os benefícios oriundos da aproximação do BPM tem seu preço. A aproximação de envoltória de variação lenta limita a consideração aos campos que se propagam primariamente na direção de propagação  $z$  (paraxialidade), e também, coloca restrições sobre o contraste do índice de refração (de forma mais precisa, a taxa de variação do índice de refração com o eixo  $z$ ) [46].

Um segundo ponto a ser levado em conta é que a eliminação da segunda derivada de  $u$  na aproximação elimina a possibilidade para soluções de onda propagando-se na direção oposta devido a reflexões. Dessa forma, não é possível modelar reflexões usando o BPM puro [46].

A escolha do BPM para modelar os dispositivos estudados nesse trabalho foi motivada pela simplificação que essa técnica oferece por considerar a envoltória do campo e não suas oscilações rápidas, permitindo assim, utilizar comprimento longitudinal da grade numérica com valor acima do comprimento de onda. Visto que os dispositivos investigados nessa tese apresentam dimensões longitudinais de até dezenas de milhares de vezes maior que o comprimento de onda, a simplificação oferecida pelo BPM é importante para economizar tempo de simulação computacional.

A próxima seção abordará o método numérico empregado para implementar o BPM utilizado nesse trabalho, bem como as condições de contorno empregadas.

### 2.1.2. Solução Numérica e Condições de Contorno

A equação (2.4) é uma equação parcial parabólica que pode ser integrada progressivamente em  $z$  por um número de técnicas numéricas padrão. Inicialmente era empregada em BPM a técnica split-step Fourier [46, 51]. Posteriormente foi demonstrado que o método implícito de diferenças finitas, conhecido como esquema de Crank-Nicholson, era superior [47, 52, 53]. Para aplicações em óptica integrada, esta aproximação e suas derivadas tem se tornado o padrão, e por isso será discutido de forma concisa. Este método costuma ser chamado na literatura de FD-BPM (*finite difference-beam propagation method*) [47, 52, 53].

Na aproximação de diferenças finitas, o campo no plano transversal ( $xy$ ) é representado somente em pontos discretos sobre uma grade, e em pontos planos discretos ao longo do eixo longitudinal ou de propagação ( $z$ ). Dado o campo discretizado em um plano  $z$  é necessário determinar o campo no próximo plano  $z$  através de equações numéricas. Esta etapa em cada passo de propagação é então repetida para determinar o campo através da estrutura completa. Por simplicidade, esta aproximação será ilustrada para um campo escalar em 2D ( $xy$ ).

Suponhamos que  $u_i^n$  represente o campo no ponto  $i$  da grade transversal e no plano longitudinal  $n$ , e assumamos que os pontos da grade e planos são igualmente espaçados por  $\Delta x$  e  $\Delta z$ , respectivamente. No método de Crank-Nicholson a equação (2.4) é representada no plano médio entre o plano conhecido  $n$  e o plano desconhecido  $n+1$ , conforme a expressão [47]:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{i}{2\bar{k}} \left( \frac{\delta^2}{\Delta x^2} + \left( k(x_i, z_{n+1/2})^2 - \bar{k}^2 \right) \right) \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{2} \quad (2.5)$$

Onde  $\delta^2$  representa o operador padrão diferença de segunda ordem,  $\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i)$ , e  $z_{n+1/2} \equiv z_n + \Delta z/2$ . A equação (2.5) pode ser rearranjada na forma de uma equação matricial

tridiagonal padrão para o campo desconhecido  $u_i^{n+1}$  em termos das quantidades conhecidas, resultando em [47]:

$$a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i \quad (2.6)$$

Os coeficientes da equação acima são dados por [47]:

$$\begin{aligned} a_i &= c_i = -\rho A_i^{n+1/2}, \\ b_i &= 2(1 + \rho A_i^{n+1/2}) - h B_i^{n+1/2}, \\ d_i &= [2(1 - \rho A_i^{n+1/2}) + h B_i^{n+1/2}] u_i^n + \rho A_i^{n+1/2} (u_{i-1}^n + u_{i+1}^n) \end{aligned}$$

onde  $A = i/2 \bar{k}$ ,  $B = i(k^2 - \bar{k})/2 \bar{k}$ ,  $h = \Delta z$  e  $\rho = \Delta z / \Delta x^2$ .

A natureza tridiagonal da equação (2.6) permite rápida solução nas operações de ordem N, onde N é o número de pontos da grade em  $x$ .

Visto que o campo pode ser apenas representado sobre um domínio computacional finito, quando a equação (2.6) é aplicada nos pontos de fronteira  $i = 1$  e  $N$ , faz-se referência à quantidades desconhecidas fora do domínio. Para esses pontos, a equação (2.6) precisa ser substituída por condições de contorno apropriadas as quais completam o sistema de equações. A escolha apropriada dessas condições é crítica, pois uma escolha não adequada pode conduzir a reflexão artificial de luz incidente na fronteira (por exemplo radiação) de volta para o domínio computacional. Por exemplo, simplesmente exigir que o campo desapareça na fronteira não é suficiente visto que isso é equivalente a colocar paredes perfeitamente refletoras na borda do domínio. Diversos trabalhos introduziram material absorvedor artificial próximo à borda do domínio. No entanto, ajustar os parâmetros do absorvedor para minimizar reflexão é trabalhoso, e reflexões artificiais persistem em muitos casos visto que a interface entre o espaço do problema e o absorvedor irá também ser parcialmente refletivo. Uma condição de contorno comumente usada é a chamada condição de contorno transparente (TBC, *transparent boundary condition*) [48]. Essa aproximação assume que o campo próximo à fronteira comporta-se como uma onda plana saindo, com características (amplitude, direção) que são dinamicamente determinadas por algum algoritmo heurístico. Assumindo que o campo na fronteira é uma onda plana permite que o campo no ponto da fronteira seja relacionado ao ponto interior adjacente, dessa forma completando o conjunto de equações

[48]. O TBC é em geral muito eficiente em permitir radiação escapar livremente do domínio computacional, entretanto existem problemas para os quais ele não apresenta bom desempenho, especialmente em simulações de propagação de ondas de ângulo largo [54]. Visando lidar com esses problemas diversas outras condições de contorno tem sido exploradas [54 - 56]. Neste trabalho, as simulações numéricas utilizaram o TBC como condição de contorno.

## **2.2. Interferômetros de Mach-Zehnder e Michelson Baseados em Fibra Monomodo Padrão com Afunilamento**

Fibras ópticas com afunilamento são usados há bastante tempo em importantes dispositivos tais como acopladores de potência, controladores de polarização, multiplexadores insere/deriva e sensores [57, 58]. Nos últimos anos, afunilamento em fibras tem sido explorados em aplicações de sensores. O processo de fabricação do afunilamento em fibra consiste em reduzir o diâmetro da fibra através do aquecimento da mesma enquanto suas extremidades são puxadas [59]. Existem alguns métodos para fabricar afunilamento em fibras ópticas tais como chama [60], feixe de laser CO<sub>2</sub> [61], corrosão química por meio de ácido fluorídrico [62], micro forno e arco eletrônico formado entre um par de eletrodos de uma máquina de emenda por fusão [63].

Um Interferômetro de Mach-Zehnder em linha pode ser formado por afunilar uma fibra em dois pontos, conforme é mostrado na figura 2.1. Considerando-se os dois afunilamentos idênticos, a diferença de fase entre o modo fundamental e os modos da casca após o segundo afunilamento pode ser expresso por [64]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n_{nm}L}{\lambda} \quad (2.7)$$

onde  $\Delta n_{nm}$  é a diferença do índice de refração efetivo entre o modo do núcleo e os modos da casca e  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz no vácuo.

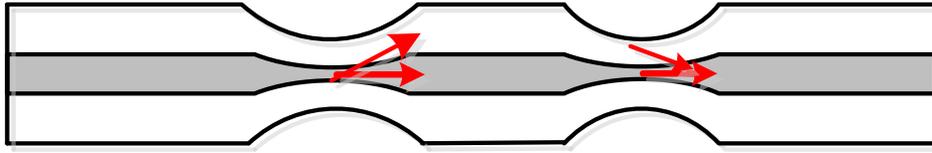


Figura 2.1 - Configuração de um interferômetro de Mach-Zehnder em fibra óptica através de dois afunilamentos concatenados.

O interferômetro de Michelson pode ser baseado em uma SMF que utiliza um afunilamento numa pequena região da mesma e com a ponta clivada. Esse dispositivo foi reportado pela primeira vez como fluxômetro por O. Frazão et al [65]. Desde então, o interferômetro de Michelson em fibra afunilada (IMFA) tem sido estudado intensamente como sensor para medir parâmetros físicos tais como índice de refração e curvatura [32, 59, 66]. O IMFA consiste de uma seção de fibra entre um afunilamento provocado numa pequena região da fibra e sua extremidade clivada. O afunilamento acopla uma fração da luz contida no núcleo para os modos existentes na casca os quais propagam-se na cavidade até sua extremidade. Esses modos são então refletidos pela ponta clivada do interferômetro que age como um espelho (4% de coeficiente de reflexão) devido à reflexão de Fresnell na interface vidro-ar. A figura 2.2 mostra a representação esquemática desse dispositivo.

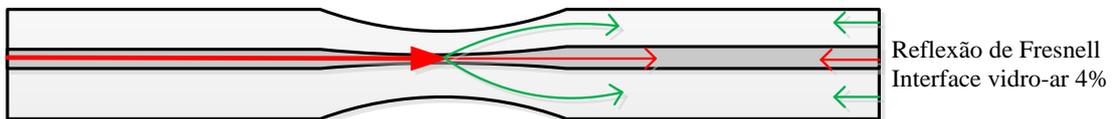


Figura 2.2 - Esquemático do Interferômetro de Michelson em linha.

No IMFA, a luz propaga-se através do mesmo comprimento do interferômetro e do afunilamento por duas vezes. Por isso, a diferença de fase entre os modos da casca  $LP_{nm}$  e o modo do núcleo  $LP_{01}$  pode ser expresso por [64]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta n_{nm}L}{\lambda} \quad (2.8)$$

Assim, o padrão de interferência para um interferômetro de Michelson de comprimento de cavidade igual a  $L$  é o mesmo que a de um interferômetro de Mach-Zehnder com comprimento de cavidade  $2L$ .

Através do software baseado no FD-BPM, foi feita a modelagem do IMZFA, que como foi visto pode também ser aplicado ao IMFA. Foram realizadas simulações numéricas para mostrar o processo de acoplamento entre modos da casca e o modo fundamental quando se propagam por um afunilamento numa SMF.

A fim de validar o método de modelagem utilizado no software, para esses dispositivos interferométricos baseados em fibra com afunilamento, foram realizadas simulações baseadas em resultados experimentais publicados em [32]. Neste artigo, os autores fabricaram um IMZFA baseado SMF com dois afunilamentos concatenados. A Figura 2.3 mostra uma foto de um dos afunilamentos retirada do referido artigo. O comprimento do afunilamento é de  $707 \mu\text{m}$  e seu diâmetro mínimo tem  $40 \mu\text{m}$ . Baseado nessa foto e nos parâmetros do afunilamento informados no artigo, foi modelado o IMZFA mencionado no artigo.

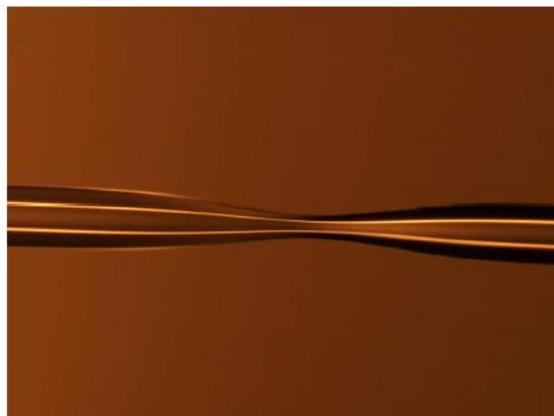


Figura 2.3 - Foto do afunilamento abrupto de 3 dB. Retirado de [32].

Foram realizadas simulações, para obter a resposta espectral do interferômetro para dois valores de comprimento do interferômetro,  $L = 24 \text{ mm}$  e  $L = 36 \text{ mm}$ , e foram comparadas aos espectros obtidos experimentalmente para esses mesmos valores de  $L$ . A faixa espectral analisada foi a mesma usada nos experimentos:  $1530 \text{ nm}$  a  $1600 \text{ nm}$ .

A representação esquemática do esquema utilizado para modelar o IMZFA é exibido na figura 2.4. Os dois afunilamentos concatenados foram configurados de forma idêntica com comprimento igual a  $L_t = 707 \mu\text{m}$ , perfil de variação quadrático e diâmetro mínimo  $D_w = 40 \mu\text{m}$ . O comprimento do interferômetro, ou seja, o comprimento entre os dois afunilamentos é representado por  $L$ . Os termos  $L_1$  e  $L_2$ , referem-se aos comprimentos da SMF fora da zona de interferência, ou seja, antes do primeiro e após o segundo afunilamento, respectivamente. Nas simulações  $L_1 = L_2 = 100 \mu\text{m}$ . A modelagem foi feita em 2D com simetria radial utilizando tamanho de malha uniforme com passos de  $0.02 \mu\text{m}$  para o eixo transversal e de  $0.2$  para o eixo longitudinal ou de propagação.

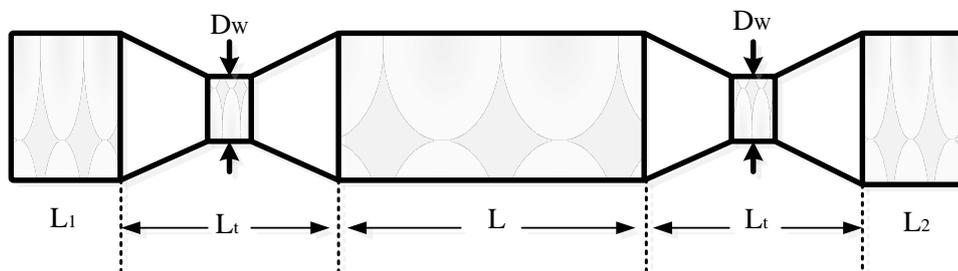
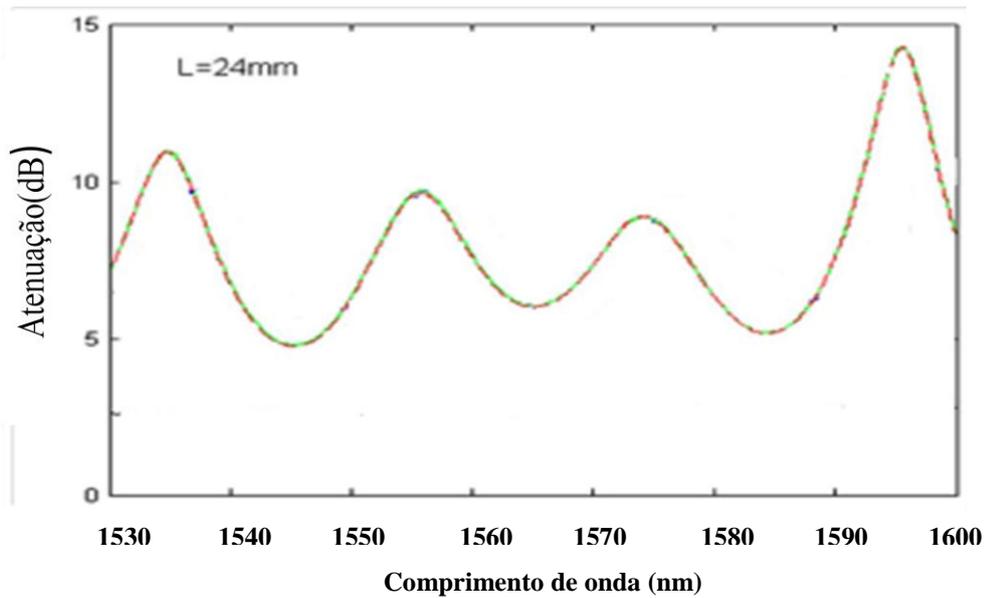


Figura 2.4 - Esquema do modelo do interferômetro de Mach-Zehnder em linha usado nas simulações.

Na Fig.2.5 (a) é mostrado o espectro obtido das medidas experimentais de [32] e na Fig. 2.5 (b) é apresentado o espectro obtido através de simulações numéricas usando o FD-BPM com modelagem do dispositivo em 3D. Nessa modelagem, o tamanho das células da grade de simulação na direção transversal foi configurado para ser não-uniforme, tendo valor máximo de  $1 \mu\text{m}$  e valor mínimo de  $0,01 \mu\text{m}$  nas interfaces da estrutura. O comprimento de passo no eixo de propagação foi de  $0,1 \mu\text{m}$  nas regiões de afunilamento e de  $5 \mu\text{m}$  nas demais seções do dispositivo. A Figura 2.6 mostra os espectros ópticos do mesmo interferômetro, mas com valor de  $L = 36 \text{mm}$ . A parte (a) da figura exhibe o espectro obtido experimentalmente de [32] e a parte (b) mostra o espectro obtido através de simulações usando o FD-BPM, mas desta vez, com modelagem do dispositivo em 2D com simetria radial. Nesse caso, o tamanho de malha foi uniforme com passos de  $0.02 \mu\text{m}$  para o eixo transversal e de  $0.2$  para o eixo longitudinal ou de propagação. Conforme pode ser observado nas Figs. 2.5 e 2.6, os espectros simulados nesse trabalho apresentam as características básicas similares aos obtidos experimentalmente em [32]. As diferenças observadas entre as curvas devem-se provavelmente ao fato de não se

ter informação completa a respeito de todos os parâmetros do afunilamento para usar na modelagem. Além disso, não é possível reproduzir, através do software, o formato exato do afunilamento real. No software, considerou-se que o perfil e dimensões do afunilamento são simétricos, o que muito provavelmente não corresponda à realidade. No entanto, com base nos resultados simulados, e comparando-os com os resultados experimentais publicados, acredita-se que a modelagem do dispositivo, tanto na configuração 2D como em 3D e utilizando os tamanhos de células da grade de simulação mencionados, apresenta uma confiabilidade razoável.



(a)

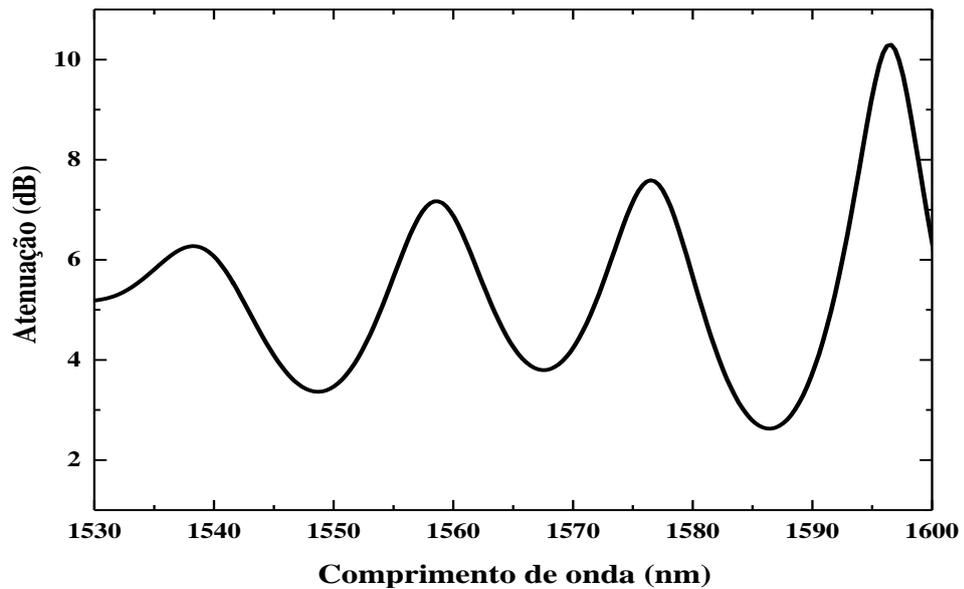
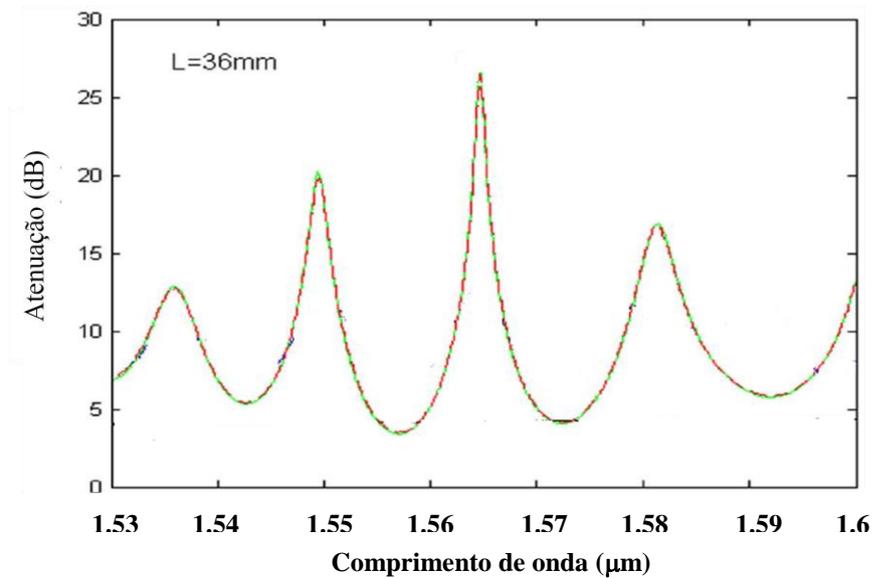
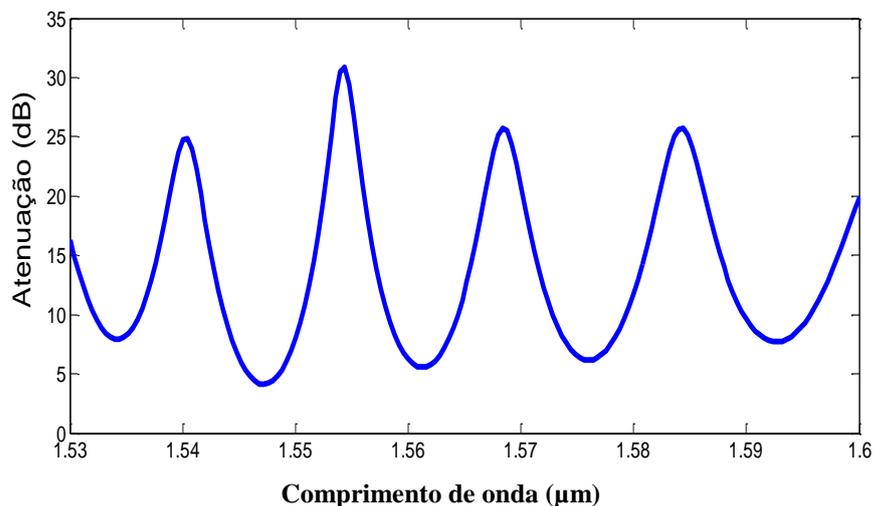


Figura 2.5 - Espectros de Interferômetro de Mach-Zehnder baseado em fibra monomodo padrão com afunilamento, para  $L = 24\text{mm}$ . (a) obtido experimentalmente em [32], (b) obtido de simulações numéricas desse trabalho baseadas no FD-BPM com modelagem em 3D.



(a)



(b)

Figura 2.6 - Espectros de IMZFA baseados em fibra monomodo padrão com afunilamento, para  $L = 36\text{mm}$ . (a) obtido experimentalmente em [32], (b) obtido de simulações numéricas desse trabalho baseadas no FD-BPM na configuração 2D com simetria radial.

Após a validação do modelo, partiu-se para a modelagem do afunilamento que será utilizado em grande parte das simulações numéricas desse trabalho. Os parâmetros do afunilamento a ser modelado foi baseado em um afunilamento fabricado no Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto) na cidade do Porto em Portugal. O INESC Porto fabrica seus afunilamentos através de máquina de emenda por fusão que contém um programa embutido para fabricação dos mesmos. A Figura 2.7 mostra a foto de um afunilamento, tirada através da máquina de emenda.

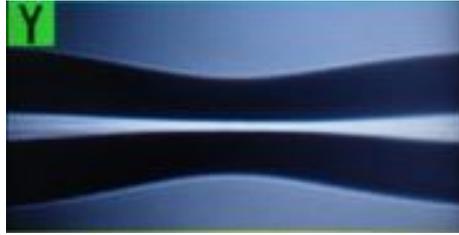


Figura 2.7 - Foto do afinilamento obtida da máquina de emenda por fusão de fibra.

A representação esquemática do afinilamento modelado é mostrada Fig. 2.8. O afinilamento foi dividido em três regiões: 1) seção de afinilamento em que os diâmetros da casca e do núcleo decrescem linearmente dos seus valores originais, 125  $\mu\text{m}$  e 8,2  $\mu\text{m}$ , respectivamente; até atingir um valor mínimo de 80  $\mu\text{m}$  na casca; 2) região em que o diâmetro mínimo permanece constante e tem cerca de 50  $\mu\text{m}$  de comprimento e 3) região em que os diâmetros da casca e núcleo voltam a crescer de forma linear até atingir os valores anteriores. O comprimento da SMF antes e após o afinilamento,  $L_1$  e  $L_2$ , respectivamente, é configurado em 200  $\mu\text{m}$ .

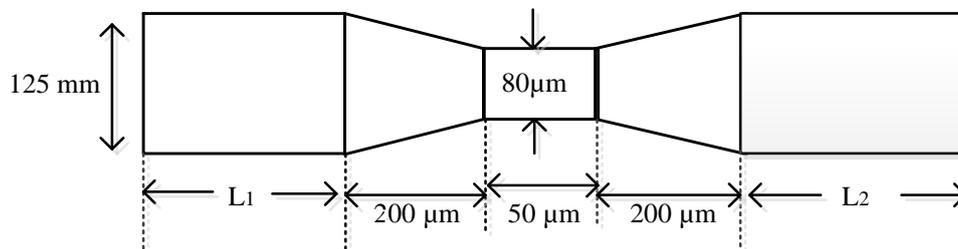


Figura 2.8 - Esquema representativo do afinilamento e de seus parâmetros usados nas simulações.

Os parâmetros da fibra utilizada nas simulações, tais como diâmetros e índice de refração (IR), são mostrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Parâmetros da fibra SMF 28 da empresa Corning.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Diâmetro do núcleo	8,2 $\mu\text{m}$	IR do núcleo	1,45522
Diâmetro da casca	125 $\mu\text{m}$	IR da casca	1,45
Diâmetro da região de simulação	140 $\mu\text{m}$	IR do ambiente	1,0

Com base no modelo descrito, simulou-se através do FD-BPM na configuração 2D com simetria radial, o comportamento modal do afunilamento. Foi simulada a propagação do modo fundamental utilizando-se o modelo representado na Fig. 2.8. O comprimento total de propagação é igual a 850  $\mu\text{m}$ , relativo ao comprimento das seções antes e após o afunilamento, ambas iguais a 200 $\mu\text{m}$ , somados ao comprimento total da região do afunilamento (450 $\mu\text{m}$ ). Observou-se então, o perfil transversal do campo óptico na extremidade do dispositivo, conforme mostrado na Fig. 2.9. A Figura 2.10 mostra o perfil transversal do campo óptico em 3D. Nota-se através do perfil do modo fundamental na extremidade do dispositivo que o campo tem simetria radial. Isto indica que o campo óptico na extremidade do dispositivo é uma combinação linear entre o modo fundamental e os modos  $\text{LP}_{0m}$ , ou seja, os modos radiais da casca.

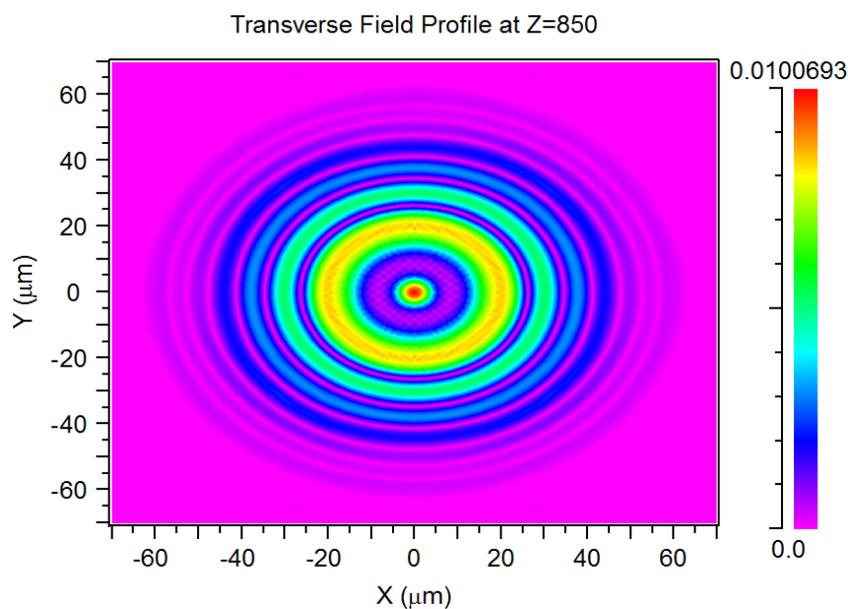


Figura 2.9 - Modo fundamental após propagar-se pela fibra padrão afunilada.

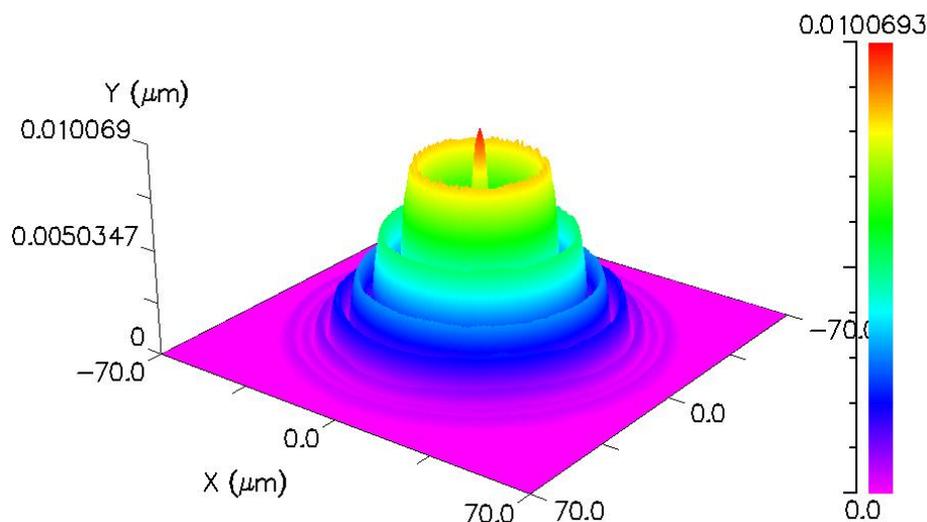


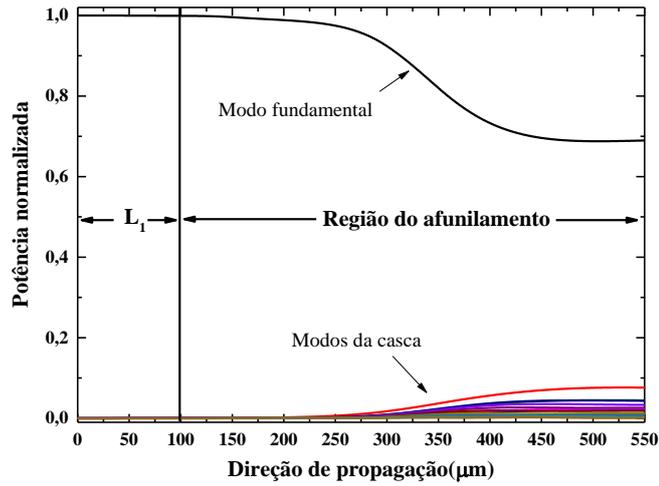
Figura 2.10 - Perfil do modo fundamental em 3D após propagar pela fibra afunilada.

Os valores de índice de refração efetivo do modo fundamental e dos 20 primeiros modos  $LP_{0m}$  da casca foram calculados e são mostrados na Tabela 2.2.

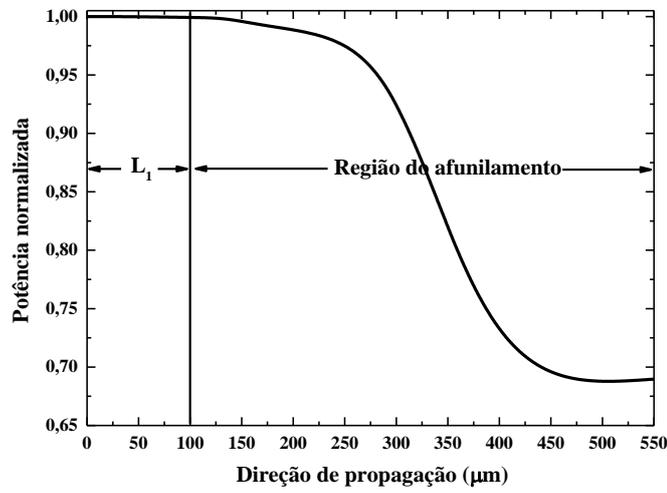
Tabela 2.2 - Índice de refração efetivo dos 20 primeiros modos  $LP_{0m}$ .

Modo	IR efetivo	Modo	IR efetivo
$LP_{01}$	1,4522	$LP_{011}$	1,4440
$LP_{02}$	1,4497	$LP_{012}$	1,4428
$LP_{03}$	1,4496	$LP_{013}$	1,4415
$LP_{04}$	1,4493	$LP_{014}$	1,4402
$LP_{05}$	1,4488	$LP_{015}$	1,4387
$LP_{06}$	1,4483	$LP_{016}$	1,4371
$LP_{07}$	1,4477	$LP_{017}$	1,4354
$LP_{08}$	1,4469	$LP_{018}$	1,4336
$LP_{09}$	1,4461	$LP_{019}$	1,4316
$LP_{010}$	1,4451	$LP_{020}$	1,4296

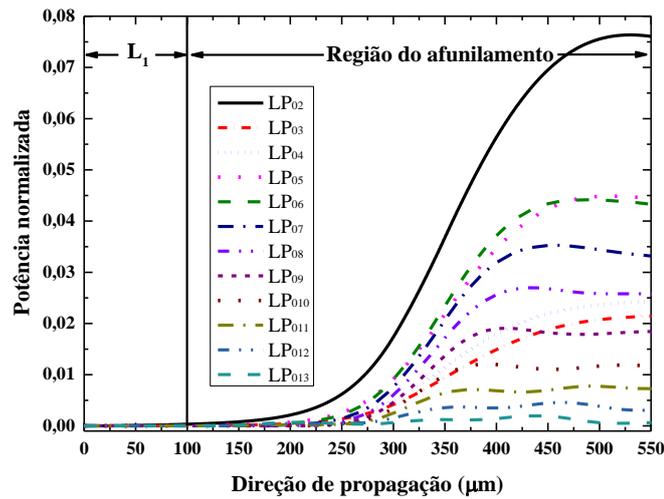
Foram realizadas simulações a fim de analisar o acoplamento dos modos  $LP_{0m}$  do dispositivo, na região do afunilamento utilizando o modelo representado na figura 2.8. O comprimento da seção da fibra antes do afunilamento,  $L_1$ , foi configurado para  $100 \mu\text{m}$  e  $L_2 = 0$ , ou seja, registrou-se o valor do campo na saída da região afunilada. Percebe-se através da Fig. 2.11 que, a partir da região do afunilamento, o modo fundamental começa a perder energia, a qual é acoplada para modos da casca.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.11 - Potência normalizada durante propagação ao longo de  $L_1$  (comprimento da SMF antes do afunilamento) e da região do afunilamento. (a) modo fundamental e modos da casca (b) modo fundamental (c) modos da casca.

A tabela 2.3 mostra a porcentagem de energia de cada modo na saída do afunilamento para diversos comprimentos de onda. O modo fundamental apresenta atenuação que varia de 1,5 dB a 1,8 dB dentro da faixa espectral de 1530 nm a 1600 nm. O modo fundamental e os primeiros 11 modos LP<sub>0m</sub>, ou seja, até o modo LP<sub>012</sub>, concentram cerca de 99,8% da energia na saída do afunilamento. Portanto, o acoplamento do modo fundamental se dá basicamente com os modos LP<sub>02</sub> até o LP<sub>012</sub>.

Tabela 2. 3 - Distribuição de energia dos modos fundamental e dos 12 primeiros modos LP<sub>0m</sub> da casca.

Modo	1530 nm	1540 nm	1550 nm	1560 nm	1570 nm	1580 nm	1590 nm	1600 nm
LP <sub>01</sub>	70%	69,5%	69%	68,5	68%	67,5%	66,9%	66,4%
LP <sub>02</sub>	6,9%	7,2%	7,6%	7,9%	8,3%	8,6%	9,1	9,5%
LP <sub>03</sub>	2,0%	2,05%	2,15%	2,25%	2,36%	2,5%	2,6%	2,7%
LP <sub>04</sub>	2,2%	2,3%	2,4%	2,5%	2,6%	2,7%	2,8%	2,94%
LP <sub>05</sub>	4,2%	4,3%	4,4%	4,6%	4,7%	4,8%	4,9%	5,0%
LP <sub>06</sub>	4,2%	4,3%	4,3%	4,3%	4,4%	4,4%	4,4%	4,5%
LP <sub>07</sub>	3,4%	3,4%	3,3%	3,2%	3,2%	3,1%	3,1%	3,0%
LP <sub>08</sub>	2,7%	2,7%	2,6%	2,5%	2,4%	2,3%	2,2%	2,2%
LP <sub>09</sub>	1,9%	1,9%	1,8%	1,8%	1,8%	1,7%	1,7%	1,6%
LP <sub>010</sub>	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%
LP <sub>011</sub>	0,76%	0,75%	0,74%	0,72%	0,71%	0,7%	0,68%	0,67/%
LP <sub>012</sub>	0,34%	0,33%	0,31%	0,3%	0,28%	0,26%	0,25%	0,23%
LP <sub>013</sub>	0,08%	0,07%	0,065%	0,055%	0,05%	0,045%	0,04%	0,035%

O acoplamento entre o modo fundamental e os modos LP<sub>0m</sub> geram picos e vales de interferência à medida que o acoplamento entre os modos fundamental e da casca apresentam interferência construtiva e destrutiva. A distância entre dois picos de atenuação,  $\Delta\lambda_m$ , em uma franja interferométrica pode ser obtida aproximadamente por [32]:

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m - \lambda_{m-1} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff} L} \quad (2.9)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal óptico,  $\Delta n_{eff}$  é a diferença entre os índices efetivos do modo fundamental e da casca e L é o comprimento da cavidade interferométrica.

Como é indicado pela equação (2.9), à medida que o valor de L aumenta, o valor do período das franjas de interferência diminui, gerando assim um número cada vez maior de vales e picos. Isto pode ser observado na Fig. 2.12, que mostra franjas de interferência obtidas por simulação, para valores de L de um IMZFA iguais a 20mm, 50mm e 80mm.

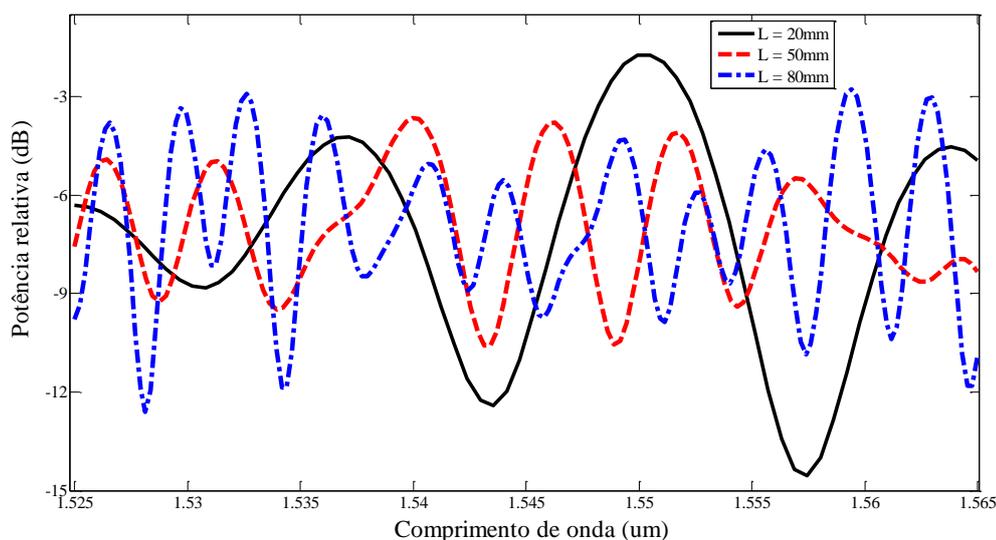


Figura 2.12 - Espectros simulados para valores de comprimento do IMZFA de  $L = 20$  mm,  $L = 50$  mm e  $L = 80$  mm.

Essas curvas mostradas na figura 2.12 também servem para validar o modelo numérico usado nesse trabalho, pois demonstra a concordância da equação (2.9) em relação à distância entre dois picos ou vales em função do comprimento da cavidade,  $L$ . Conforme a equação (2.9) expressa, a separação entre dois picos ou dois vales é inversamente proporcional à  $L$ . Observa-se que o valor da distância entre dois picos em torno do comprimento de onda de 1550 nm para  $L = 20$  mm é de cerca de 13,2 nm. Quando o valor de  $L$  aumenta para 50 mm, o que representa um aumento de 2,5 vezes, a separação entre picos diminui para cerca de 5,6 nm, um valor de cerca de 2,4 vezes menor. Um aumento no comprimento de  $L$  em quatro vezes, de 20 mm para 80 mm, altera a distância entre picos de 13,2 nm para 3,3 nm, representando uma redução de 4 vezes. Portanto, esses resultados são compatíveis com os previstos pela equação (2.9).

O próximo capítulo apresentará resultados obtidos de simulações numéricas referentes aos dispositivos SMF com afunilamento e sua resposta sensora à variação de índice de refração e curvatura.

### **3. RESULTADOS NUMÉRICOS**

Este capítulo apresenta os resultados numéricos obtidos da utilização da modelagem, apresentada no capítulo 2, que utiliza como base o FD-BPM via software BeamPROP 9.0 da RSoft™. É apresentada a análise numérica de dispositivos que usam SMF com trecho afunilado trabalhando como sensores de índice de refração (IR) e curvatura. Serão apresentados nesse capítulo resultados numéricos de dois tipos de abordagem de sensores: sensor interferométrico de IR baseado em interferômetro de Mach-Zehnder em fibra afunilada (IMZFA) associado com curvatura para intensificar sua resposta sensora. Conforme mostrado no capítulo anterior, a resposta de modulação de fase do sinal óptico em um IMZFA é semelhante a de um interferômetro de Michelson em fibra afunilada (IMFA) quando este contém metade do comprimento da cavidade interferométrica de um IMZFA. Portanto, os resultados da modelagem apresentados nesse capítulo para o IMZFA podem também ser considerados para um IMFA, desde que se leve em conta a relação entre seus comprimentos de cavidade interferométrica. Serão também discutidos resultados de simulações de sensor de curvatura utilizando um afunilamento numa SMF com sua resposta à variação de curvatura sendo analisada em termos de potência transmitida.

#### **3.1. Intensificação da Sensibilidade ao Índice de Refração de Interferômetros em Fibra Afunilada Através da Curvatura**

O desenvolvimento de sensores de IR é uma importante área de interesse, visto que podem ser usados na detecção e diagnóstico em áreas como alimentos líquidos, controle de qualidade da água, saúde, segurança e monitoramento ambiental [67].

Muitos trabalhos mostram que o uso de fibras com afunilamentos abruptos apresentam na sua maioria pouca sensibilidade às variações de IR na faixa próxima à da água destilada (1.333 a 1.41) [32, 68]. Entretanto, alguns trabalhos demonstraram que a utilização de algumas técnicas permitem intensificar a sensibilidade desses dispositivos ao IR, entre eles, a combinação de afunilamento com (LPGs) [69], uso de afunilamentos com diâmetro de cintura muito fina, na casa dos poucos micrômetros [59] e utilização de curvatura em fibras especiais

que apresentam altas perdas por curvatura [67]. Foi reportado em [70], um sensor de IR baseado em SMF, cuja casca foi corroída por ácido fluorídrico, de forma a fazer o diâmetro da casca decrescer continuamente até atingir um valor bem próximo ao do núcleo da fibra. Este dispositivo é então submetido à curvatura para que haja acoplamento dos modos sussurrantes de galeria (WGM, *whispering gallery mode*) com o modo do núcleo. Em [71] foi investigado numérica e experimentalmente um interferômetro baseado em microfibra que utiliza um afunilamento de cerca de 16,9 mm de comprimento e 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro na cintura.

Nesta seção, será discutida a intensificação da sensibilidade à variação de índice de refração de interferômetros em fibra SMF através de curvatura.

Serão apresentados resultados numéricos para sensor de IR usando SMFs contendo dois afunilamentos separados por 40 mm, isto é, um interferômetro de Mach-Zehnder em fibra (IMZFA). Conforme mostrado no capítulo 2, este IMZFA com comprimento de cavidade igual a 40 mm é equivalente a um interferômetro de Michelson em fibra (IMFA) com cavidade de 20 mm. Portanto, os resultados podem ser atribuídos de forma intercambiável para ambas as configurações (IMZFA ou IMFA), com seus comprimentos de cavidade equivalentes.

Nas simulações numéricas relacionadas ao IMZFA, os parâmetros do afunilamento foram baseados nas características comuns aos afunilamentos fabricados no INESC Porto, parceiro desse trabalho na investigação experimental. Levou-se em conta que os dois afunilamentos são idênticos e apresentam um comprimento total de 450  $\mu\text{m}$  e diâmetro mínimo da cintura com valor de 80  $\mu\text{m}$ . A representação esquemática do modelo utilizado nas simulações pode ser visualizado na figura 3.1. O objetivo das simulações foi analisar a sensibilidade do IMZFA à variações de índice de refração externo quando o dispositivo é curvado.

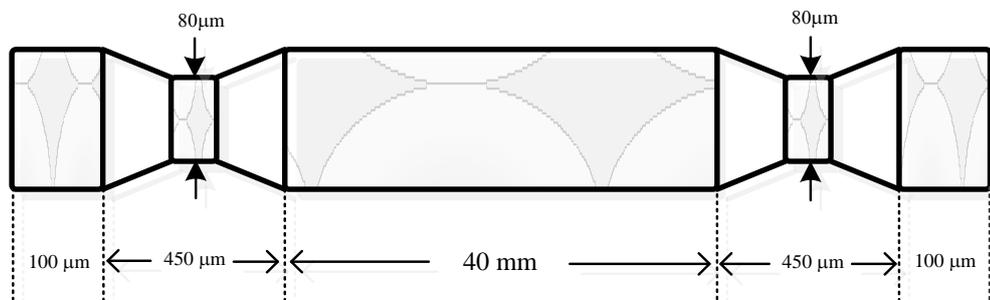


Figura 3.1 - Representação esquemática do modelo do interferômetro de Mach-Zehnder em fibra afunilada usado nas simulações.

O afunilamento foi modelado da mesma forma como mencionado no capítulo 2, ou seja, foi dividido em três partes: um cone de 200  $\mu\text{m}$  de comprimento com diâmetro decrescendo linearmente de 125  $\mu\text{m}$  até atingir o valor mínimo da cintura do afunilamento que é de 80  $\mu\text{m}$ , uma seção reta de 50  $\mu\text{m}$  de comprimento mantendo o diâmetro mínimo da cintura e após, um cone com o mesmo comprimento do primeiro crescendo linearmente até atingir o diâmetro original de 125  $\mu\text{m}$ .

Os parâmetros de simulação usados foram os mesmos mencionados no capítulo anterior e que foram utilizados para validar o modelo: foi feita a modelagem em 3D, o domínio de simulação transversal foi de 140  $\mu\text{m}$ . Utilizou-se tamanho das células da grade de simulação variável e não uniforme, sendo a largura máxima da grade na direção transversal igual a 1  $\mu\text{m}$  e o valor mínimo igual a 0.01  $\mu\text{m}$  nas regiões mais abruptas da estrutura. O comprimento do passo da grade no eixo de propagação ( $z$ ) variou de 0,1  $\mu\text{m}$  nas regiões do afunilamento e 5  $\mu\text{m}$  nas demais partes do dispositivo. Os parâmetros utilizados para modelar a fibra foram baseados na SMF-28 e são exibidos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros da SMF-28 usados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Diâmetro do núcleo	8,2 $\mu\text{m}$
IR do núcleo	1,45522
Diâmetro da casca	125 $\mu\text{m}$
IR da casca	1,45
Diâmetro total do domínio numérico	140 $\mu\text{m}$

Foi feita análise da sensibilidade do IMZFA à variação de IR, quando esta varia de 1,33 a 1,41. Iniciou-se a análise para o caso não curvado. Em geral, sensores interferométricos são analisados tomando-se um pico ou um vale de interferência que apresente alta visibilidade de franja e então computa-se seu deslocamento em comprimento de onda como função do parâmetro físico analisado. Isto restringe o uso do sensor a uma região muito restrita do espectro. Na figura 3.2, são mostrados os espectros referentes aos índices de refração de 1,33, 1,34 e 1,35. Optou-se por não mostrar todos os espectros relativos a todos os valores de IR estudados, para facilitar a visualização do comportamento das franjas em função da variação de IR. Nota-se que a sensibilidade em termos de desvios de comprimento de onda varia de

acordo com a região espectral. A fim de se fazer uma análise da sensibilidade menos dependente da faixa espectral, computou-se o desvio em comprimento de onda de cada pico e vale de interferência como função do índice de refração e calculou-se a média dos módulos desses desvios.

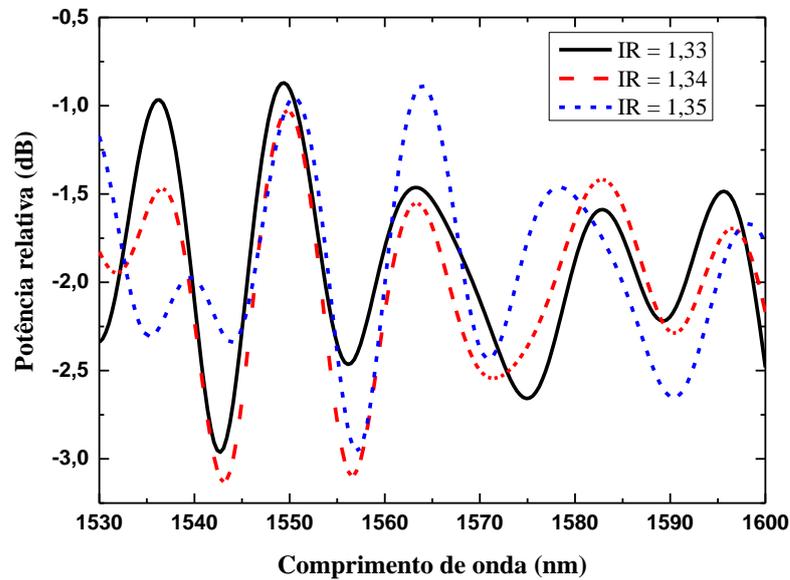


Figura 3.2 – Espectros para o caso do IMZFA não curvado para os valores diferentes de índice de refração de 1,33, 1,34 e 1,35.

Usando essa metodologia, construiu-se o gráfico com os valores da média dos módulos dos deslocamentos de comprimento de onda como função do índice de refração para o sensor não curvado, o qual pode ser visto na figura 3.3.

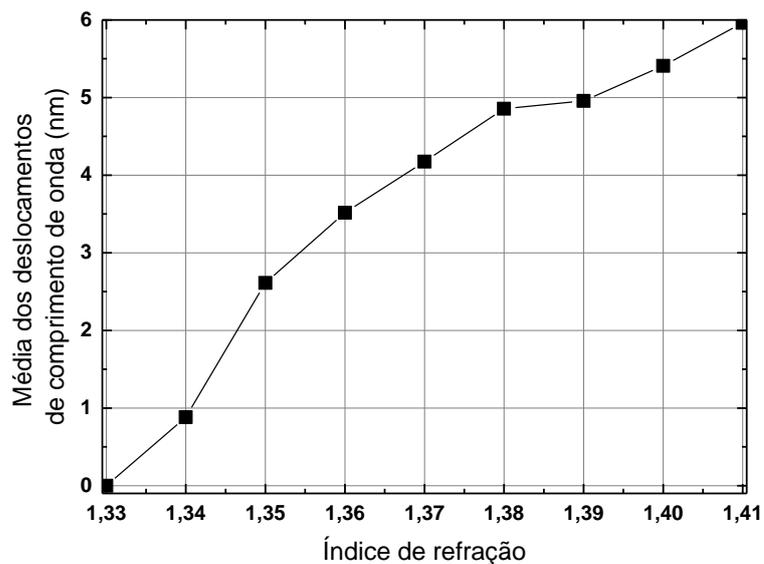


Figura 3.3 - Média dos desvios em comprimento de onda para o IMZFA não curvado.

Percebe-se na figura 3.3 que o IMZFA não curvado apresenta pouca sensibilidade à variação de índice de refração. Isso é bem evidente também pela visualização dos espectros na figura 3.2. A resposta sensora é de cerca de 74,5 nm / RIU (*refractive index unity*, unidade de índice de refração) dentro de toda a faixa de IR analisada (1,33 a 1,41). A sensibilidade relacionada aos valores mais altos de IR é também muito baixa. De fato, a sensibilidade decresce à medida que os valores de IR são mais altos, ocorrendo uma espécie de saturação na resposta sensora na faixa de IR mais alta. A sensibilidade para IR entre 1,40 e 1,41 apresenta cerca de 55 nm/RIU.

Após estudar a resposta para o caso não curvado, decidiu-se analisar o efeito da curvatura sobre a sensibilidade do IMZF à variação de IR. Assim, foram realizadas simulações variando-se o raio de curvatura ( $R_c$ ) do sensor.

A simulação da curvatura da fibra óptica foi realizada através da técnica de mapeamento conforme [72], disponibilizada no software. Esta técnica consiste de uma transformação na qual a fibra curvada é representada por uma fibra reta equivalente com a distribuição do índice de refração modificada,  $n_{eq}(x,y)$  [72].

$$n_{eq}(x, y) \approx n(x, y) \left( 1 + \frac{x}{R} \right) \quad (3.1)$$

onde,  $n(x,y)$  é o índice de refração no eixo transversal ( $x$  e  $y$ ) da fibra reta,  $x$  é considerado como o eixo no qual a curvatura ocorre e  $R_c$  é o raio de curvatura. Este método tem provado ser preciso quando a largura do dispositivo é muito menor que o raio de curvatura [72], que é o caso neste trabalho. Certamente, a equação 3.1 é uma aproximação válida dentro de determinados valores de raio de curvatura. Quando os raios de curvatura apresentam valores mínimos, abaixo de determinado limite, a própria geometria da fibra pode ser afetada fazendo com que os resultados obtidos apresentem alguma divergência entre simulações e experimentos. O perfil do índice de refração equivalente relacionado à fibra reta e curvada é ilustrado na figura 3.4.

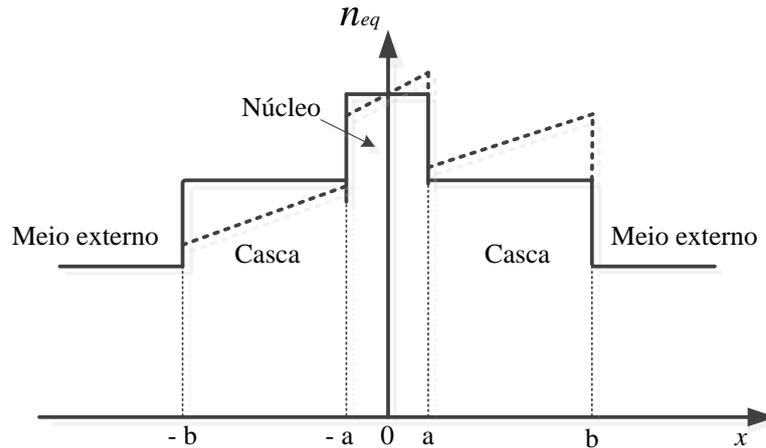


Figura 3.4 - Perfil de índice de refração equivalente para a fibra reta (linha cheia) e fibra curvada (linha tracejada).

Analisou-se a resposta do dispositivo em termos de deslocamento em comprimento de onda para os raios de curvatura de 20, 12, 11, 10, 9, 8 e 5 mm e comparou-se com o caso não curvado. O desvio em comprimento de onda como função do IR, para o sensor com curvatura foi analisado da mesma forma que para o caso não curvado. Como mencionado anteriormente, computou-se os picos e vales de interferência e o desvio em comprimento de onda dos mesmos foi calculado e tirou-se uma média desses desvios. Os espectros referentes aos raios de curvatura de 20, 12 e 10 mm podem ser visualizados nas figuras de 3.5 a 3.7.

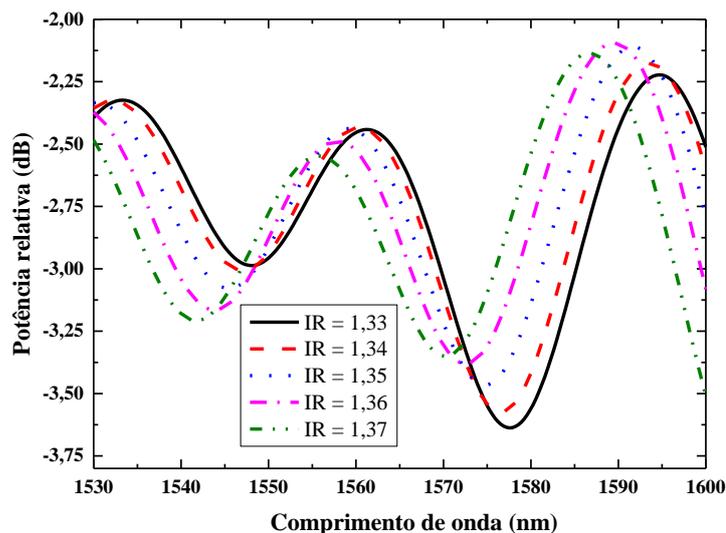


Figura 3. 5 - Espectros para IMZF curvado com  $R_c = 20$  mm relativos aos valores de IR de 1,33 a 1,37, com passos de 0,01.

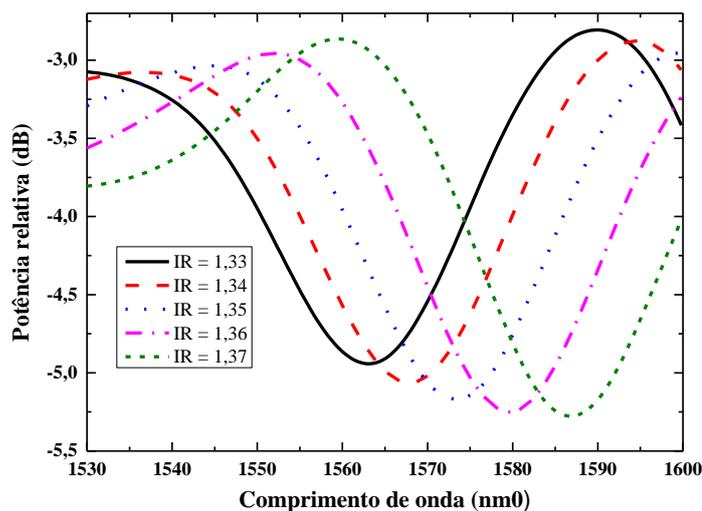


Figura 3.6 - Espectros para IMZF curvado com  $R_c = 12$  mm relativos aos valores de IR de 1,33 a 1,37, com passos de 0,01.

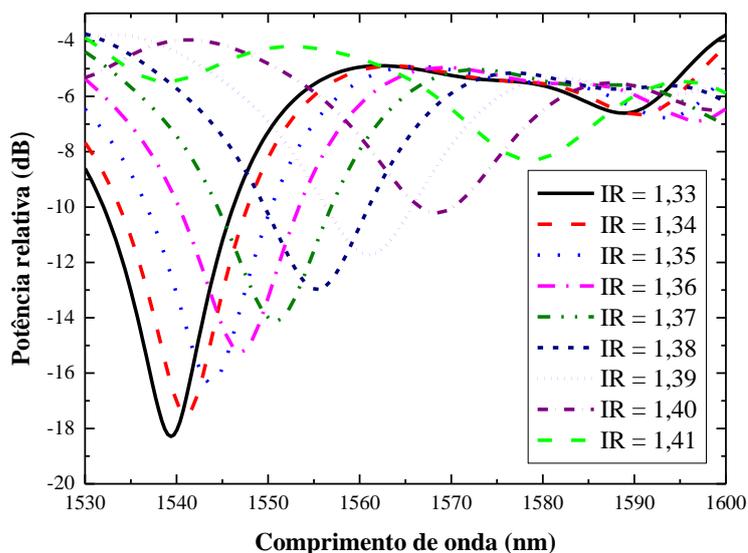


Figura 3.7 - Espectros para IMZF curvado com  $R_c = 10$  mm relativos aos valores de IR de 1,33 a 1,41, com passos de 0,01.

Os espectros exibidos nas figuras de 3.5 a 3.7 mostram que a cada raio de curvatura as franjas espectrais mudam tanto em termos de período como em termos de franjas de visibilidade. Os raios de curvatura de menor valor tendem a apresentar maior visibilidade de franjas com variação de potência mais abrupta, ou seja, os picos e vales são mais agudos. Para espectros que apresentaram vários valores de picos e vales, foi considerado o desvio de cada pico e vale e então calculada uma média desses desvios para cada valor de IR. Alguns espectros apresentaram apenas um pico em toda a faixa espectral analisada e o desvio desse pico em

função de IR é que foi computado. A figura 3.8 apresenta os gráficos com as médias dos desvios em comprimento de onda para os raios de curvatura supramencionados, incluindo o caso sem curvatura.

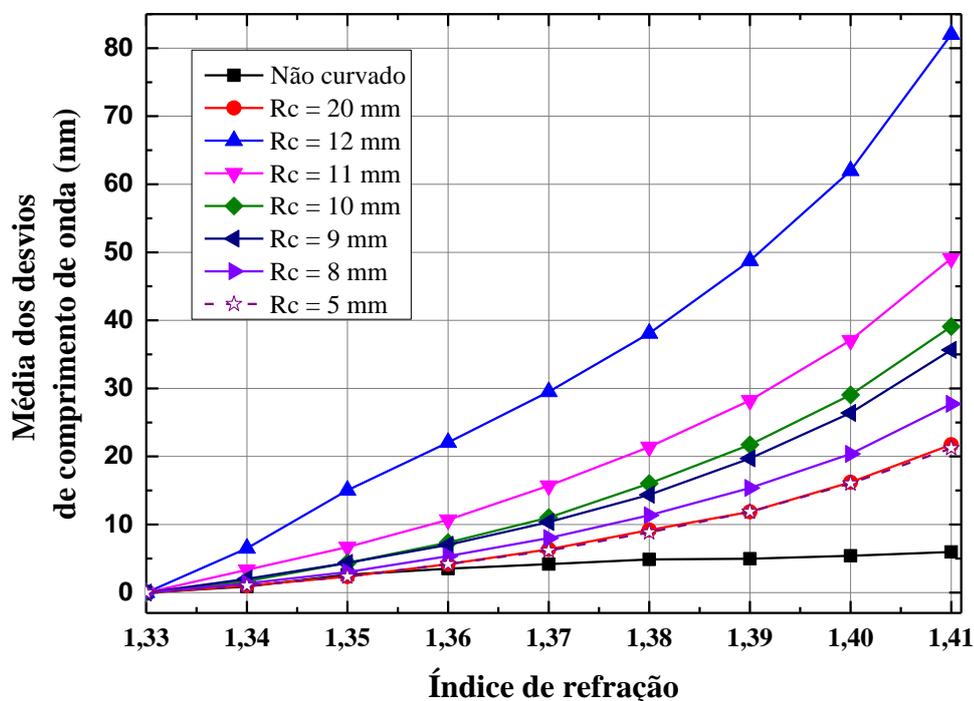


Figura 3. 8 – Deslocamento médio de comprimento de onda para IMZF não curvado e curvado com raios de curvatura de 20, 12, 11, 10, 9, 8 e 5mm.

Os resultados da figura 3.8 mostram que a sensibilidade do IMZFA curvado com quaisquer dos raios de curvatura analisados é sempre maior que para o sensor sem curvatura. No entanto, percebe-se que a sensibilidade não apresenta um aumento sempre crescente à medida que se curva o sensor. O raio de curvatura que apresenta maior desvio de comprimento de onda é o de 12 mm. A tabela 3.2 resume os resultados em termos de sensibilidade em nm por unidade de índice de refração (nm/RIU, nm/*refractive index unity*) para cada valor de raio de curvatura e para cada intervalo de IR considerado com passos de 0,01.

Tabela 3.2 - Valores de sensibilidade em nm / RIU para faixas de IR de 1,33 a 1,41 com passos de 0,01.

Raio de curvatura	Não curvado	20 mm	12 mm	11 mm	10 mm	9 mm	8 mm	5 mm
<b>IR de 1,33 –1,34</b>	88,3	100,2	650	334	167	200,4	133,6	100,2
<b>IR de 1,34 –1,35</b>	172,9	133,6	854	334	267,2	233,8	167	133,8
<b>IR de 1,35 –1,36</b>	90,5	183,7	700	400,8	300,6	267,2	233,8	183,5
<b>IR de 1,36 –1,37</b>	65,8	217,1	746	501	367,4	334	267,2	200,5
<b>IR de 1,37 –1,38</b>	68,1	283,9	858	567,8	501	400,8	334	267,1
<b>IR de 1,38 –1,39</b>	10,1	267,2	1068	684,7	567,8	534,4	400,8	300,6
<b>IR de 1,39 –1,40</b>	45,1	434,2	1324	885,1	734,8	668	501	417,5
<b>IR de 1,40 –1,41</b>	55,4	551,1	2000	1201,4	1002	927,6	734,8	517,8

Os valores de sensibilidade para os intervalos de IR logo no início da faixa de IR, de 1,33 a 1,34, e no final da faixa de IR, de 1,40 a 1,41 podem ser visualizados nas figuras 3.9 e 3.10. Pode-se perceber a natureza oscilatória da resposta sensora à medida que se altera o raio de curvatura. Em todas as faixas de IR, dentro dos valores de raio de curvatura considerados, a sensibilidade máxima é atingida para o raio de curvatura de 12 mm e a partir desse valor a sensibilidade apresenta um decréscimo. O maior valor de sensibilidade é atingido entre os valores de IR de 1,40 a 1,41 com raio de curvatura de 12 mm com valor de 2000 nm/RIU.

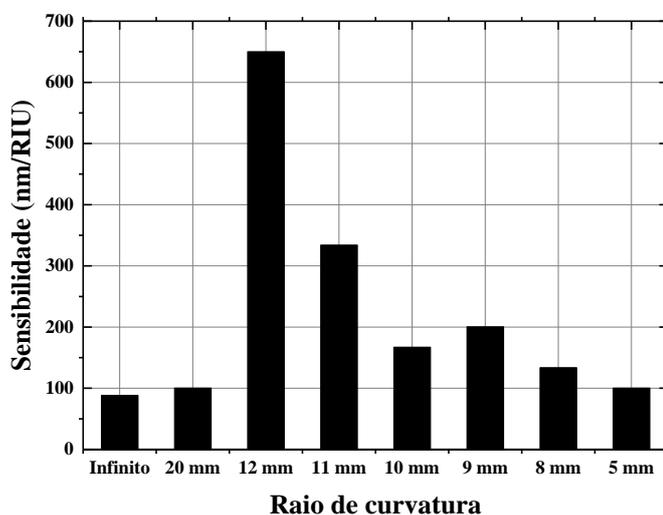


Figura 3.9 - Sensibilidade média em função do raio de curvatura para faixa de IR de 1,33 a 1,34.

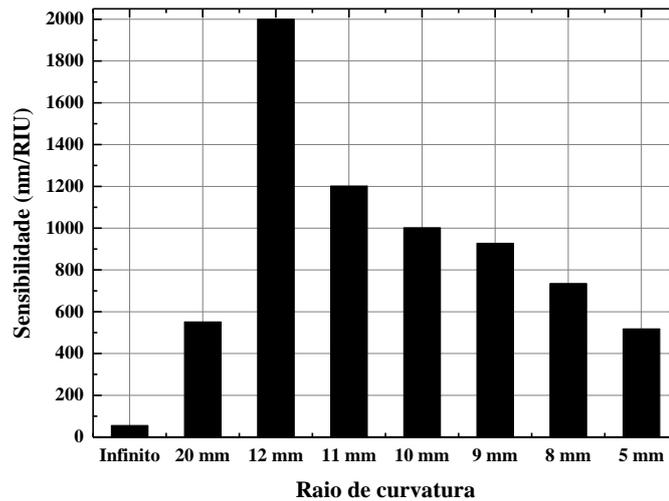


Figura 3.10 - Sensibilidade média em função do raio de curvatura para faixa de IR de 1,40 a 1,41.

A tabela 3.3 apresenta o valor médio da sensibilidade dentro de toda a faixa de IR analisada, obtida para cada valor de raio de curvatura. Conforme pode ser notado, o raio de curvatura de 12 mm apresenta a maior sensibilidade, atingindo um desvio de comprimento de onda de cerca de 1025 nm/RIU dentro da inteira faixa de IR analisada. A figura 3.11 exibe a sensibilidade média em função do raio de curvatura.

Tabela 3. 3 - Valores de sensibilidade média dentro de toda a faixa de IR analisada de 1,33 a 1,41.

Rc	Não curvado	20 mm	12 mm	11 mm	10 mm	9 mm	8 mm	5 mm
nm / RIU	74,5	271,4	1025	613,6	488,8	445,8	346,5	265,1

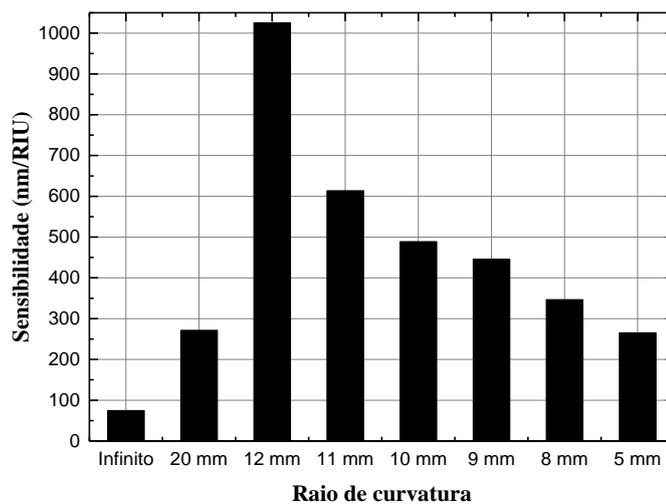


Figura 3.11 - Sensibilidade média em função do raio de curvatura para a inteira faixa de IR analisada, de 1,33 a 1,41.

De acordo com os resultados numéricos apresentados nessa seção, o IMZFA com as dimensões de afunilamento de cerca de 450  $\mu\text{m}$  de comprimento total e 80  $\mu\text{m}$  de largura da cintura apresenta uma pobre resposta sensora à variação de IR, dentro da faixa entre 1,33 a 1,41. No entanto, as simulações mostraram o potencial de se intensificar grandemente a sensibilidade do sensor através da aplicação de curvatura. A sensibilidade em função do raio de curvatura apresenta resposta oscilatória. Uma possível explicação para isso é que, à medida que a cavidade é curvada, grande parte da energia do modo do núcleo é acoplada a modos radiais da casca de mais alta ordem, dessa forma contribuindo para aumentar a sensibilidade ao índice de refração do meio externo. Entretanto, o posterior aumento na curvatura faz com que o nível de energia refletido desses modos decresçam e a maior parte dela seja perdida, e assim, não reacoplada de volta ao modo fundamental. Esse processo deve se repetir para outros modos de alta ordem à medida que a aplicação de curvatura continua, fazendo com que a resposta em função da curvatura seja oscilatória.

Os resultados apresentados mostram que é possível sintonizar a resposta sensora em determinado intervalo de IR pela alteração do raio de curvatura. Uma importante contribuição desse trabalho é intensificar a sensibilidade ao IR numa faixa próxima à da água destilada. Conforme já ressaltado no início dessa seção, a sensibilidade ao IR dentro da faixa próxima a da água destilada geralmente é pobre usando a configuração tradicional de SMF com afunilamento abrupto sem o emprego da curvatura.

O próximo capítulo apresentará resultados obtidos de investigação experimental da aplicação de curvatura em interferômetro baseado em SMF com afunilamento para intensificar a resposta sensora à variação de índice de refração e pode-se-á então comparar os resultados experimentais com os obtidos por simulação tratados aqui nessa seção. A próxima seção tratará da modelagem e resultados de simulação para sensor de curvatura baseado em SMF com afunilamento monitorado na transmissão.

### **3.2. Sensor de Curvatura de Fibra Monomodo Padrão com Afunilamento Monitorado na Transmissão**

Sensores de curvatura ou inclinômetros tem importantes aplicações em muitas áreas da engenharia tais como civil e aeronáutica [73], e na previsão e monitoramento de fenômenos

naturais, tais como, deslizamentos de encostas, atividades vulcânicas e terremotos [43, 44]. Em anos recentes, intensa investigação tem sido feita no campo de sensores de curvatura baseados em fibra óptica. A literatura científica relata várias abordagens desse tipo de sensores em fibra óptica, como por exemplo, uso de redes de Bragg em fibra (FBGs, *fiber Bragg gratings*) em diversas configurações [74, 75] e o uso de afunilamentos empregados sozinhos ou em associação com outras tecnologias como FBGs e redes de período longo (LPGs, *long period gratings*) [76 - 78].

O sensor de curvatura analisado nessa seção através de simulações computacionais, é baseado no monitoramento da curvatura em função da potência transmitida de um sinal óptico banda larga. As simulações tentam representar o aparato ilustrado na figura 3.12. Esse aparato foi usado para analisar experimentalmente o sensor de curvatura em questão e os resultados experimentais são apresentados no próximo capítulo. O princípio de funcionamento desse sensor de curvatura consiste na injeção de um sinal banda larga na entrada de uma SMF por meio de uma fonte óptica de banda larga (BBS), com largura espectral de 100 nm, centrado na faixa de comprimento de onda de 1570 nm. A fibra é curvada em diversos raios de curvatura e o sinal na saída da fibra é injetado em um fotodiodo que faz a conversão opto-elétrica do sinal e a potência elétrica após o fotodiodo é computada para cada valor de raio de curvatura.

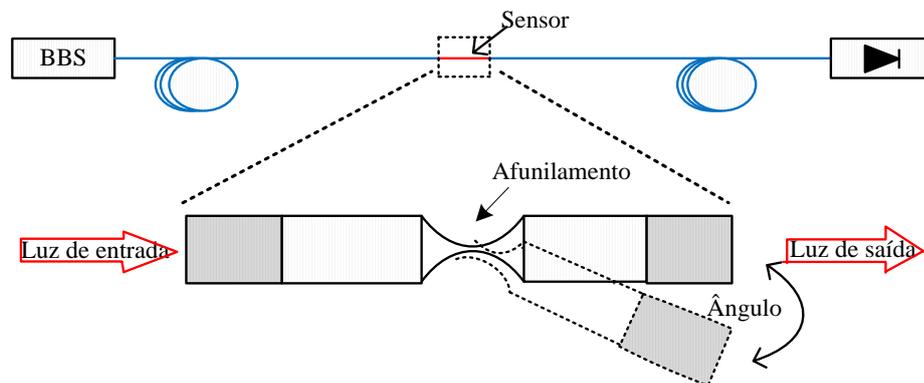


Figura 3.12 - Ilustração de um aparato experimental de um sensor de curvatura monitorado na transmissão.

A fim de se modelar esse tipo de abordagem de sensor de curvatura, utilizou-se o software BeamPROP com modelagem em 3D, usando o método implícito de diferenças finitas. Condições transparentes de contorno foram usadas para evitar reflexões espúrias das bordas da janela computacional.

Foi utilizada uma grade de simulação não uniforme refinando a malha nas regiões com variações geométricas mais abruptas. Os valores máximos e mínimos do tamanho da grade no eixo transversal foram  $1\mu\text{m}$  e  $0,01\mu\text{m}$ , respectivamente. Da mesma forma, o comprimento da grade no eixo de propagação,  $z$ , foi  $0,5\mu\text{m}$  nas regiões do afinilamento e  $1,5\mu\text{m}$  nas demais partes do dispositivo.

Os parâmetros usados nas simulações para representar o sensor de curvatura baseado em fibra com afinilamento monitorado na transmissão são mostrados na figura 3.13 e foram baseados em um afinilamento que foi fabricado com uma máquina de emenda por fusão do INESC-Porto e usado em nos experimentos apresentados nesta tese. A modelagem do afinilamento é semelhante a que foi utilizada e descrita na seção anterior.

Os principais parâmetros deste afinilamento são: o menor diâmetro da cintura,  $D_w = 80\mu\text{m}$ , e o comprimento total do afinilamento,  $L_t = 450\mu\text{m}$ . O parâmetro  $L_{\text{bent}}$  representa o comprimento da seção curvada e abrange uma seção da fibra antes do afinilamento, a região do afinilamento e outra região após o afinilamento, sendo que o afinilamento fica posicionado bem no meio de  $L_{\text{bent}}$ , conforme indicado na figura 3.13. O comprimento total do afinilamento é representado por  $L_t$ .

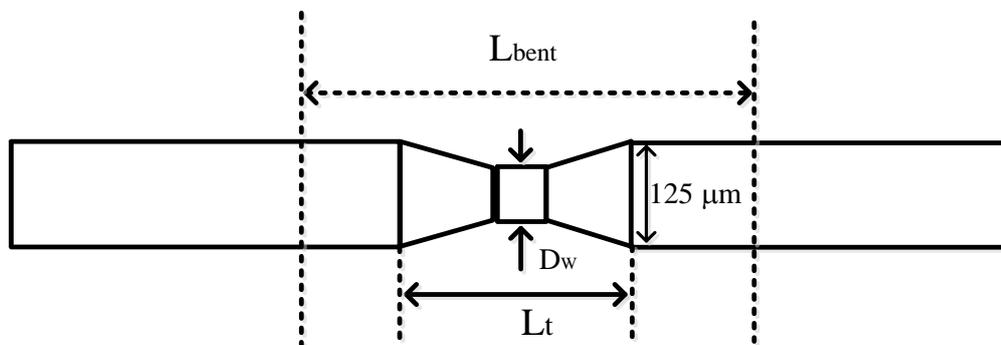


Figura 3.13 - Ilustração do sensor de curvatura baseado em SMF com afinilamento. Os parâmetros são a seção curvada,  $L_{\text{bent}}$ , o diâmetro mínimo da cintura do afinilamento,  $D_w$ , o comprimento do afinilamento,  $L_t$ , e o diâmetro original da casca de  $125\mu\text{m}$ .

Os parâmetros da fibra são referentes à SMF-28 e são mostrados na tabela 3.4 junto com alguns parâmetros da janela de simulação.

Tabela 3. 4 - Parâmetros da SMF-28 usados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Diâmetro do núcleo	8,2 $\mu\text{m}$
IR do núcleo	1,45522
Diâmetro da casca	125 $\mu\text{m}$
IR da casca	1,45
IR do meio externo	1,0
Diâmetro total do domínio numérico	145 $\mu\text{m}$

A modelagem utilizada para simular a curvatura na fibra é a mesma apresentada na seção anterior deste capítulo.

No aparato experimental, a variação da curvatura é controlada e registrada como uma variação angular. O ângulo de inclinação em graus é computado em relação ao eixo longitudinal da fibra reta no ponto médio do comprimento da seção curvada  $L_{bent}$ . Por outro lado, o software utilizado permite configurar o raio de curvatura do dispositivo e faz-se necessário associar os valores de ângulos em graus aos valores de raio de curvatura usando a seguinte expressão obtida da geometria [79]:

$$R = \frac{360L_{bent}}{2\pi\theta} \quad (3.2)$$

onde,  $R$  é o raio de curvatura,  $L_{bent}$ , é o comprimento da seção a ser curvada e  $\theta$  é o ângulo de inclinação relativo ao ponto médio de  $L_{bent}$ .

A fim de analisar o comportamento do sinal transmitido como função da curvatura, foi gerado o perfil transversal do campo na saída do dispositivo. Pode ser notado na figura 3.14(a) que no caso do dispositivo reto, o perfil transversal do campo na saída é axialmente simétrico, o que indica que o principal acoplamento do modo fundamental devido ao afunilamento ocorre com os modos radiais  $LP_{0m}$ . Conforme a curvatura é intensificada, o perfil do campo na saída do dispositivo é mais assimétrico, indicando que o acoplamento acontece principalmente com os modos azimutais  $LP_{1m}$ , conforme pode ser visto na figura 3.14 (b) [58]. Na condição de pequenos ângulos de curvatura, após o afunilamento, a energia

dos modos radiais é acoplada de volta ao modo fundamental  $LP_{01}$  e uma pequena quantidade de energia é perdida. Conforme o ângulo aumenta, a maior parte da energia é transferida aos modos de mais alta ordem na região do afunilamento, e após o afunilamento, essa energia não é transferida de volta ao modo fundamental e portanto é perdida. Em consequência disso, muito mais energia é perdida conforme o ângulo de inclinação aumenta.

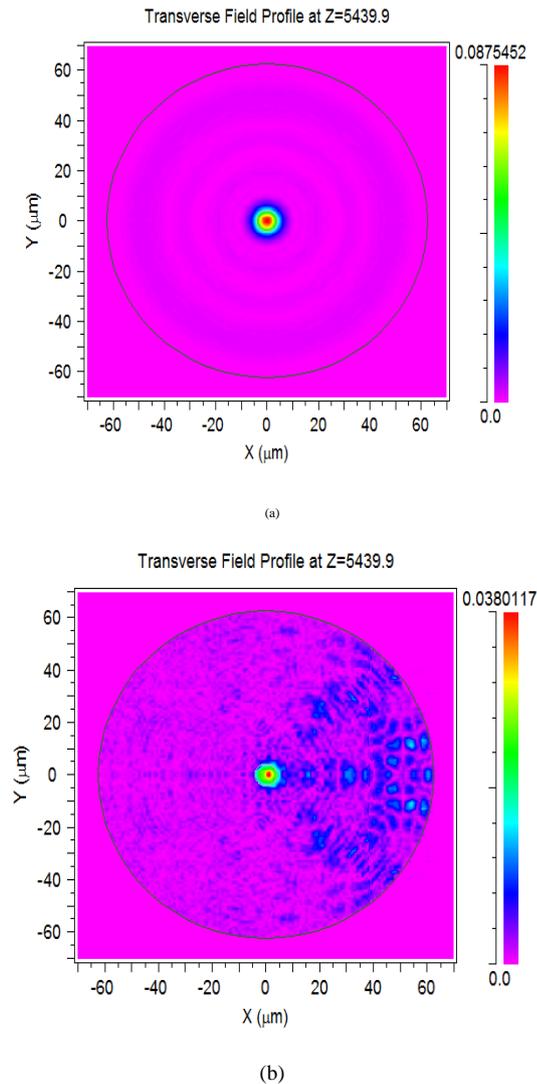


Figura 3.14 - Perfil do campo transversal na saída do dispositivo. (a) perfil do campo modal para fibra reta (0 grau) e (b) para fibra inclinada em 45 graus.

A luz transmitida foi monitorada na saída do dispositivo para cada comprimento de onda e ângulo de inclinação analisados. A transmissão de uma luz monocromática apresenta um comportamento oscilatório devido à perturbação introduzida pela região do afunilamento [58, 80]. Este comportamento pode ser notado na figura 3.15 que apresenta a transmissão em

1550 nm como função da variação angular de 0 a 45 graus para  $L_{\text{bent}} = 7,5$  mm,  $D_w = 80$   $\mu\text{m}$  e  $L_t = 450$   $\mu\text{m}$ .

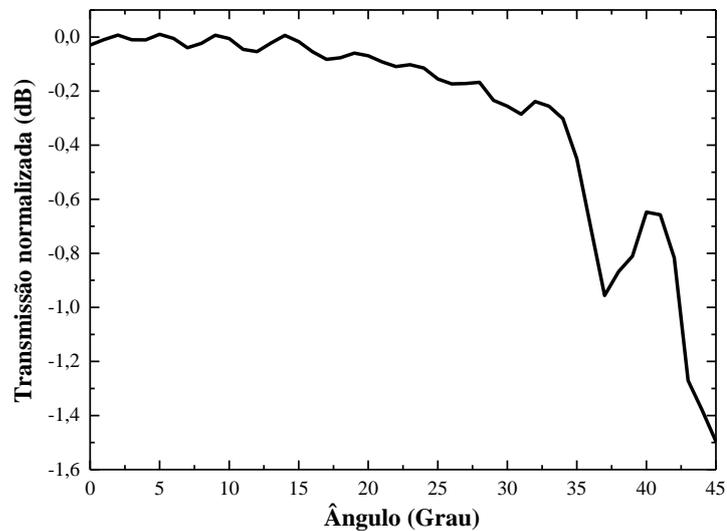


Figura 3.15 - Transmissão de sinal óptico no comprimento de onda de 1550 nm no sensor de curvatura em SMF com afunilamento para  $L_{\text{bent}} = 7,5$  mm,  $D_w = 80$   $\mu\text{m}$  e  $L_t = 450$   $\mu\text{m}$ .

Pode ser notado que a perda de potência é maior conforme a curvatura aumenta e apresenta comportamento oscilatório com vales de atenuação acentuados nos ângulos de inclinação mais elevados. Entretanto, o modelo numérico proposto nesse trabalho visa reproduzir a transmissão de um sinal banda larga através de uma fibra com afunilamento e sua detecção por um fotodiodo, obtendo-se na saída o valor médio da potência total do sinal banda larga. Assim, esse modelo pode ser usado como ferramenta útil para analisar a resposta do dispositivo à variação angular em termos da potência média transmitida.

Visando analisar numericamente essa configuração sensora, foi simulado o lançamento de 12 comprimentos de onda dentro de uma faixa espectral de 100 nm (com passos iguais entre 1520 e 1620 nm) na estrutura e então calculou-se o valor médio de potência na saída do dispositivo. A figura 3.16 mostra o gráfico com os resultados de simulação do valor médio de potência desses 12 comprimentos de onda transmitido em função do ângulo de inclinação de 0 a 70 graus. Nota-se que a potência transmitida apresenta um decaimento não linear como função do ângulo de inclinação. O dispositivo é pouco sensível nos valores baixos de ângulo e torna-se bem mais sensível a ângulos de inclinação mais elevados. Isto significa que para se obter uma sensibilidade mais alta é possível usar um valor maior de inclinação inicial para intensificar a sensibilidade, mas neste caso a faixa dinâmica é mais curta. Porém, não é

possível dobrar indefinidamente o dispositivo, pois existe um limite no qual o dispositivo pode ser dobrado sem quebrar.

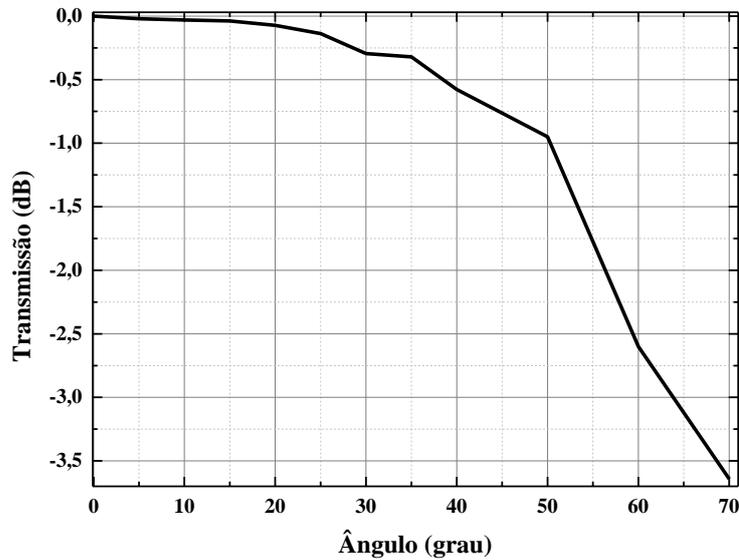


Figura 3.16 - Transmissão obtida por simulação em função do ângulo de inclinação do sensor de curvatura baseado em SMF com afunilamento, para  $D_w = 80 \mu\text{m}$ ,  $L_t = 450 \mu\text{m}$  e  $L_{\text{bent}} = 7,5 \text{ mm}$ .

Utilizou-se o modelo baseado no FD-BPM para analisar a sensibilidade quando se varia os parâmetros do afunilamento. As simulações foram realizadas com os valores de comprimento e largura do afunilamento alterados, mantendo-se o valor do comprimento da seção curvada,  $L_{\text{bent}} = 7,5 \text{ mm}$ . O valor do comprimento total do afunilamento,  $L_t$ , foi alterado de  $450 \mu\text{m}$  para  $1200 \mu\text{m}$  e a largura da cintura do afunilamento,  $D_w$ , foi modificado de  $80 \mu\text{m}$  para  $30 \mu\text{m}$ . Os valores de ângulos de inclinação analisados foram de 0 a 45 graus, não utilizou-se uma faixa angular tão grande como no caso anterior, de 0 a 70 graus, para ser mais realístico com o fato das novas dimensões do afunilamento tornarem o dispositivo mais frágil e sujeito à quebra em inclinações maiores.

A resposta do sensor relacionada aos novos parâmetros do afunilamento, em termos de potência média de todos os 12 comprimentos de onda transmitidos, é mostrada na figura 3.17. Nota-se que a sensibilidade foi muito maior e numa faixa dinâmica angular menor. Comparando-se os resultados, para o sensor com afunilamento modificado, a sensibilidade na faixa angular entre 35 e 45 graus é de cerca de  $0,7 \text{ dB/grau}$ . Enquanto que para a mesma faixa angular, de 10 graus, para o sensor anterior, mas numa região angular mais alta, de 60 a 70 graus, a sensibilidade foi de  $0,1 \text{ dB/grau}$ . A sensibilidade do sensor de curvatura baseado em

fibra com afunilamento com os parâmetros modificados é cerca de 7 vezes maior, com a vantagem disto ocorrer numa região angular mais baixa.

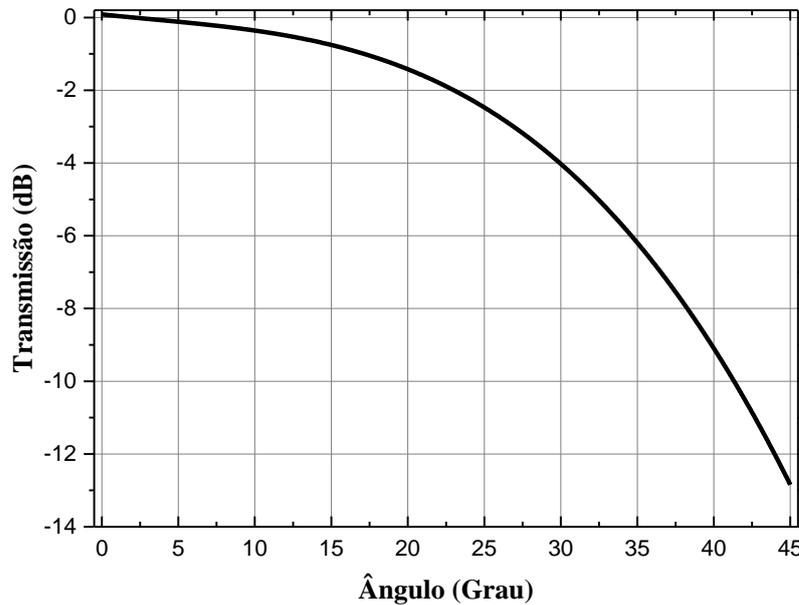


Figura 3.17 - Transmissão simulada para sensor de curvatura com afunilamento, para  $D_w = 30 \mu\text{m}$ ,  $L_t = 1200 \mu\text{m}$  e  $L_{\text{bent}} = 7,5 \text{ mm}$ , em função do ângulo de inclinação.

Os resultados simulados indicam que esta configuração de sensor de curvatura utilizando uma SMF com um afunilamento sendo monitorada na transmissão tem grande potencial. O próximo capítulo apresentará também os resultados experimentais utilizando essa abordagem e deixará mais claro o potencial desse tipo de sensor. O próximo capítulo mostrará os resultados obtidos em medidas experimentais e também outras configurações que utilizam SMF com afunilamento para serem aplicados como sensores de temperatura e inclinação.

## **4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Este capítulo trata de resultados obtidos através de medidas experimentais usando dispositivos com afunilamento (IMFA) em fibras monomodo padrão atuando como sensores de índice de refração (IR), curvatura e temperatura.

A seção 4.1 aborda o IMFA sendo testado como inclinômetro. É discutida uma técnica de interrogação elétrica para esse dispositivo através de transdutores piezoelétricos e FBGs que utiliza a razão de potências entre dois pontos do espectro óptico para fornecer a resposta do dispositivo à variação do ângulo de inclinação.

Na seção 4.2, são mostrados resultados de análise da sensibilidade do IMFA à variação de IR em função da curvatura aplicada ao mesmo. É feita uma comparação da resposta do sensor para a fibra reta e para a fibra curvada em diversos raios de curvatura.

A resposta do IMFA à variação de temperatura é discutida na seção 4.3.

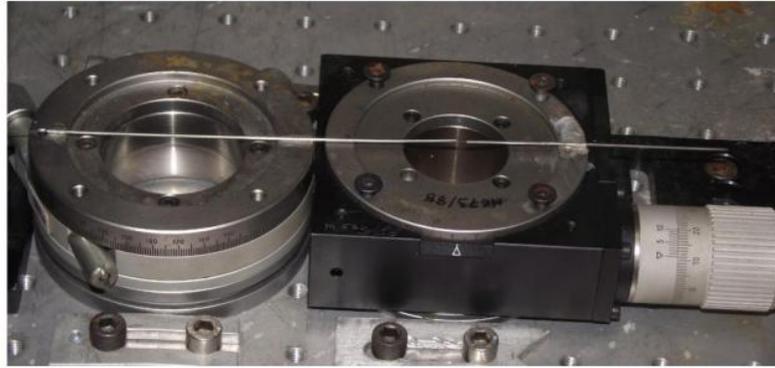
A seção 4.4 apresenta resultados de medidas relacionadas ao dispositivo de SMF com afunilamento sendo analisado como sensor de curvatura. A sensibilidade é avaliada na potência medida na saída de um fotodiodo.

A seção 4.5 trata de medidas experimentais feitas no IMFA com uma bolha de ar adicionada em sua extremidade, resultando num interferômetro híbrido de Michelson e Fabry-Perot.

### **4.1. Inclinômetro Óptico com Interrogação Elétrica Através de Redes de Bragg em Fibra e Transdutores Piezoelétricos**

Foi realizada a caracterização de um inclinômetro óptico baseado em IMFA. Foi utilizado uma SMF com afunilamento cujo comprimento da cavidade foi de cerca de 21 cm de comprimento. A fibra afunilada foi colocada dentro de dois capilares de alumínio separados entre si na região que contém o afunilamento. A distância entre os tubos capilares é de cerca de 7,5 mm e o afunilamento é posicionado à meia distância entre os dois tubos

capilares. O primeiro capilar foi colado numa base fixa e o outro capilar foi fixado numa extremidade de um disco metálico que possui um mecanismo de giro que permite variar a inclinação angular. A figura 4.1 exibe uma foto desse aparato.



(a)



(b)

Figura 4.1 - (a) Foto do aparato usado para variar o ângulo do eixo da fibra afunilada que está inserida dentro de dois tubos de alumínio que estão separados por uma seção que contém o afunilamento. (b) zoom que permite visualizar com mais detalhes a seção de fibra com afunilamento que está entre os dois tubos de alumínio e a escala graduada do ângulo a ser variado. A distância entre os tubos capilares é de  $\sim 7,5$  mm.

A variação angular pode ser visualizada através de uma escala localizada no disco com resolução de 1 grau, conforme mostrado na foto exibida na figura 4.1(b). Medidas com maior resolução também foram possíveis através de um transdutor com display digital que permite visualização com resolução de centésimos de grau. Dessa forma, o ângulo de inclinação do interferômetro foi variado, partindo de 0 até 15 graus, com passos de 1 grau. A

cada ângulo, o espectro obtido através do OSA foi gravado para posterior análise. A figura 4.2 apresenta o espectro do sinal recebido do interferômetro com ângulo de zero grau.

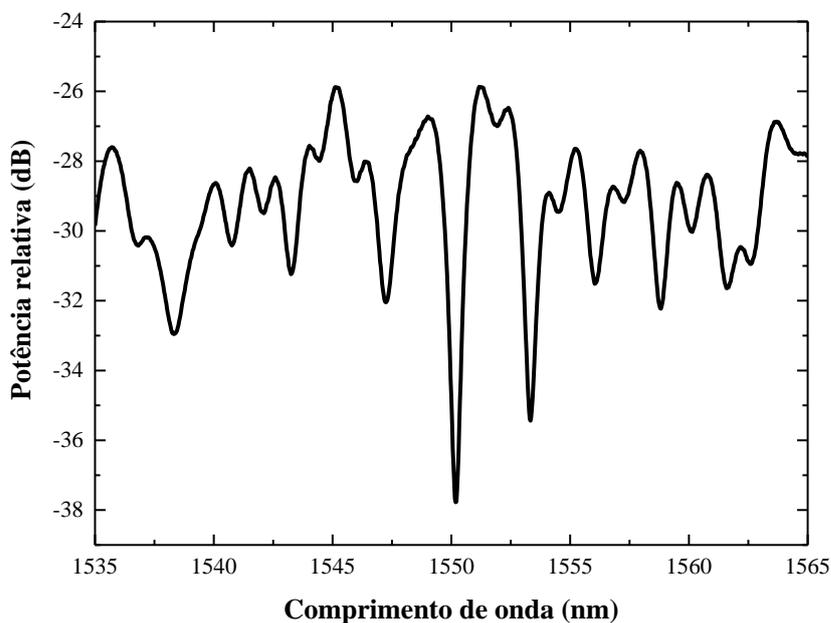


Figura 4.2 - Espectro do inclinômetro óptico baseado em fibra com afunilamento com uma cavidade de 21 cm (obtida a zero grau).

A análise do inclinômetro óptico foi realizada usando os dados obtidos do OSA para observar o comportamento das franjas de interferência com a variação do ângulo de inclinação. A resposta do sensor foi então analisada em termos de visibilidade de franja e variação da posição espectral de um vale de interferência. A visibilidade de franjas refere-se ao contraste entre um pico e um vale de uma franja de interferência. A franja de interferência escolhida para se fazer a análise do sensor foi aquela que apresentou maior visibilidade, a qual está localizada na faixa espectral em torno de 1550 nm, conforme pode ser visto na figura 4.2. A visibilidade de franja pode ser calculada usando a seguinte expressão  $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ , onde  $I_{\max}$  e  $I_{\min}$  são os máximos e mínimos de intensidade óptica de uma franja interferométrica, respectivamente. Os resultados obtidos para a visibilidade na faixa angular estudada podem ser visualizados na figura 4.3.

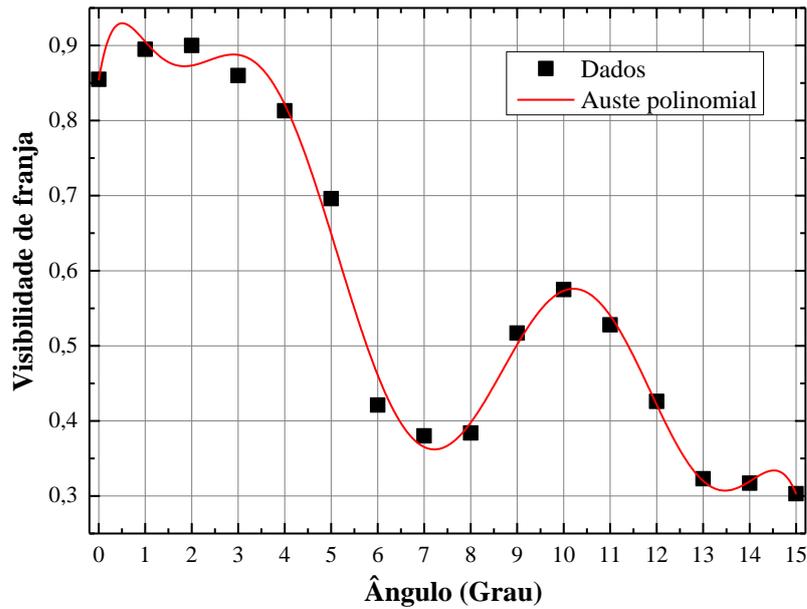


Figura 4.3 - Visibilidade de franja em função do ângulo de inclinação de 0 a 15 graus.

Foi também monitorada a posição espectral do pico interferométrico em função do ângulo de inclinação. A figura 4.4 mostra o gráfico de deslocamento em comprimento de onda do pico de atenuação próximo a 1550 nm.

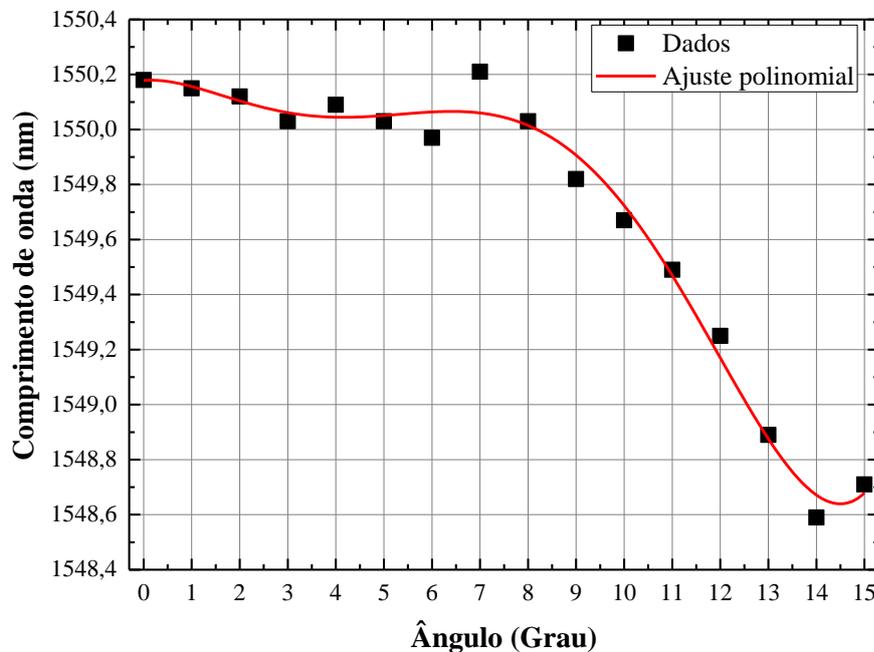


Figura 4.4 - Desvio de comprimento de onda em função da variação do ângulo de inclinação de 0 a 15 graus.

Os resultados mostram que a faixa angular com maior variação de visibilidade de franja está na faixa de variação angular entre 3 e 6 graus. Observa-se também na Fig. 4.4 que a faixa angular entre 7 e 14 graus apresentou boa sensibilidade em termos de deslocamento de comprimento de onda. Visando analisar a resposta sensora do dispositivo, decidiu-se utilizar um esquema de interrogação elétrica previamente publicada por pesquisadores do INESC Porto [81]. A configuração do esquema de interrogação é mostrada na Fig.4.5.

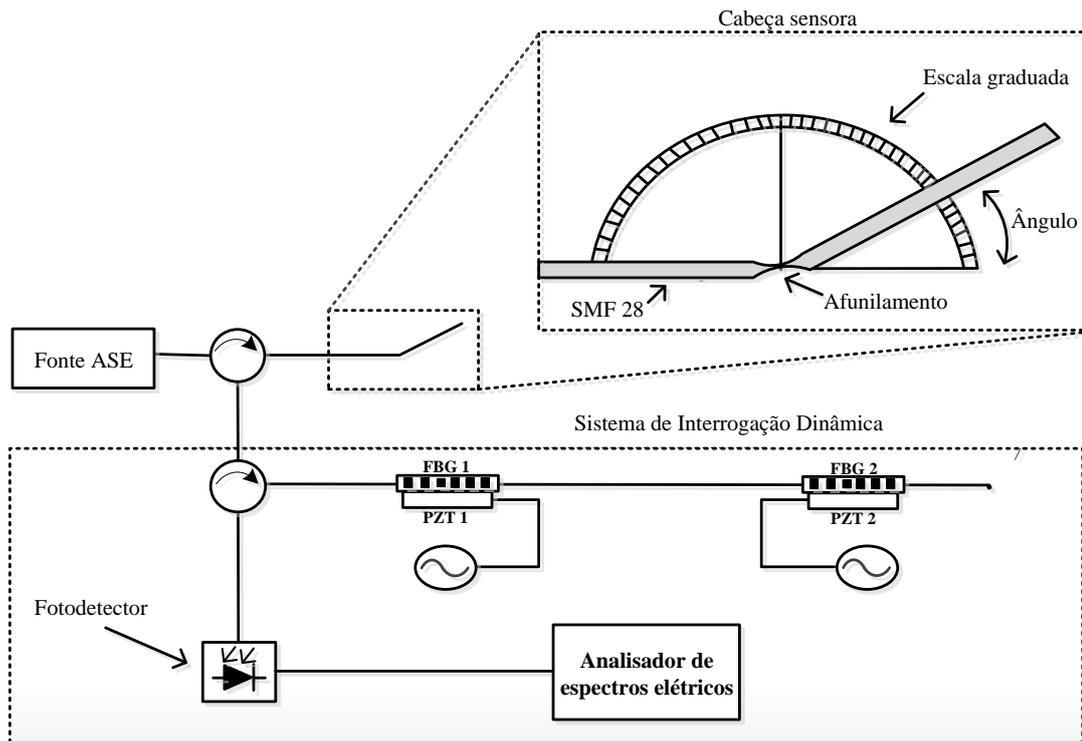


Figura 4. 5 - Aparato experimental do sistema de interrogação elétrica usado para analisar o inclinômetro óptico.

Uma fonte banda larga é usada para iluminar a cabeça sensora. A luz é refletida de volta na extremidade clivada do interferômetro e é injetada novamente no circulator óptico em direção às duas FBGs que estão colocadas sobre transdutores piezoelétricos (PZTs). Esses PZTs são excitados por dois geradores de função independentes em diferentes frequências, modulando dessa forma a resposta das FBGs em torno de seus picos de comprimento de onda. Os sinais ópticos são então refletidos pelas FBGs moduladas e são injetados num fotodiodo para detecção e conversão em um sinal elétrico. O sinal elétrico detectado pode ser visualizado por meio de um analisador de espectro elétrico, onde os sinais provenientes de cada FBG podem ser identificado pelos seus valores de amplitude correspondentes a cada uma das frequências de modulação. Assim, a resposta normalizada do sensor pode ser obtida através do cálculo

$V = (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2)$ , onde  $V_1$  e  $V_2$  são as amplitudes correspondentes a cada uma das frequências modulantes.

Para que a resposta do interrogador elétrico seja satisfatória é necessário que se faça uma escolha apropriada dos pontos espectrais de operação das duas FBGs interrogadoras. No caso em questão, é preciso que a posição espectral das FBGs permita uma resposta às variações angulares com sensibilidade e linearidade tão altas quanto possíveis. A fim de analisar a resposta do inclinômetro e escolher as melhores posições espectrais para as FBGs, foram feitas novas medidas com variação angular com passos mais curtos, de 0,2 graus, nas faixas angulares que demonstraram ser mais sensíveis em termos de variação de visibilidade de franjas e deslocamento em comprimento de onda. De posse dos novos espectros medidos em função do ângulo de inclinação, a estimativa da posição espectral ótima para as duas FBGs foi feita através de um código desenvolvido no Matlab® para efetuar o método dos mínimos quadrados nos dados experimentais. Esse código faz a varredura de todos os espectros obtidos do OSA referentes a cada valor de ângulo de inclinação, em toda a faixa espectral utilizada. É feito então, em cada ponto do espectro, o cálculo da variação de potência em função do ângulo de inclinação, bem como o ajuste linear dessa variação de potência. A seguir é feito um cálculo do coeficiente angular e do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de cada ajuste linear obtido ao longo do espectro. As faixas de comprimento de onda apresentando maior sensibilidade em consonância com um valor de  $R^2 \geq 0,9$ , foram consideradas apropriadas para a localização espectral dos picos de reflexão das FBGs a serem usadas na interrogação elétrica. Os resultados indicaram que as melhores posições espectrais para a operação das duas FBGs, na faixa angular de 3 a 6 graus, estavam em torno de 1549,2 e 1550,3 nm, com valores de  $R^2 = 0,994$  e  $0,982$ , respectivamente. De posse desses valores ótimos de comprimentos de onda, a seguinte operação foi calculada para obter a resposta do sensor,  $R_n$ :

$$R_n = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (4.1)$$

onde  $I_1$  e  $I_2$  são as intensidades ópticas nos dois pontos do espectro referentes às FBG<sub>1</sub> e FBG<sub>2</sub>, respectivamente. A Figura 4.6 mostra alguns dos espectros obtidos que permitem visualizar o comportamento da franja investigada em função da variação angular entre 3,2

e 6 graus. São também mostradas as posições espectrais otimizadas das FBGs sinalizadas por linhas verticais,

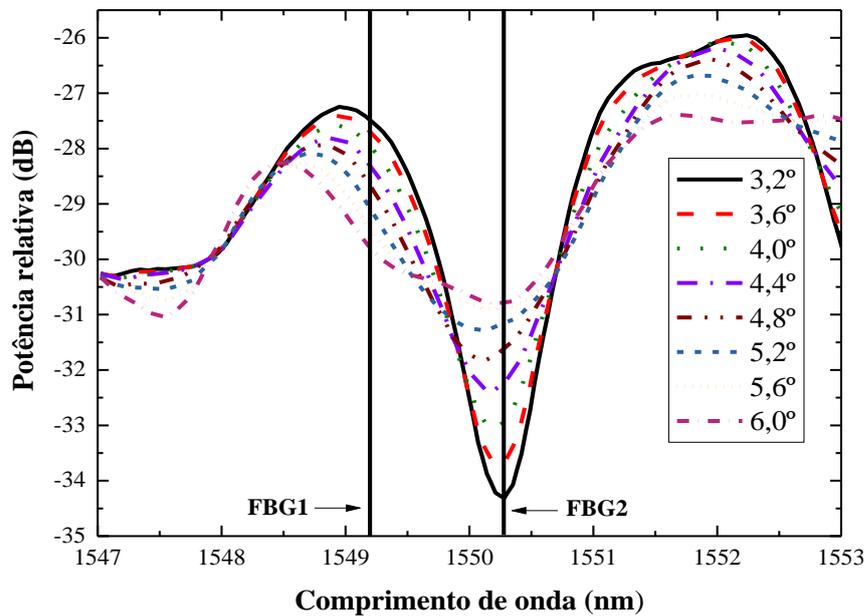


Figura 4. 6 - Posição ótima de dois pontos do espectro óptico, representada por linhas verticais, calculada através do método dos mínimos quadrados, com passos de 0,2 graus, para obter-se a resposta sensora baseada na razão de potências entre esses dois pontos do espectro.

Seguindo essa análise para a seleção das FBGs, a equação (4.1) foi usada, considerando-se as posições espectrais otimizadas para estimar a resposta do sensor. Conforme pode ser visto na figura 4.7, o inclinômetro óptico apresenta uma sensibilidade de 0,21/grau com uma boa resposta linear ( $R^2 = 0,9933$ ) dentro da faixa de 3,2 a 6 graus.

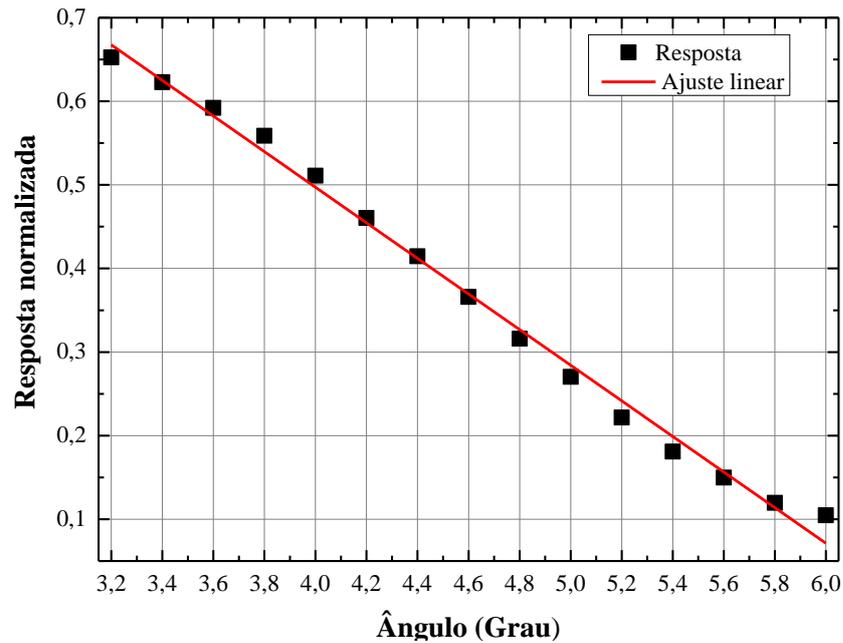


Figura 4. 7 - Resposta normalizada do inclinômetro óptico em função da variação angular entre 3,2 e 6 graus calculada pela razão de potências entre os dois pontos espectrais otimizados.

Conforme visto anteriormente, na Fig. 4.4, a faixa angular entre 7 e 14 graus apresentou boa sensibilidade em termos de deslocamento de comprimento de onda. No entanto, a análise feita com o método dos mínimos quadrados, com passos de ângulo de 0,2 graus, indicou que a faixa angular entre 10 e 14 graus era bem mais sensível e por isso deteve-se atenção nessa faixa de ângulos. Usando-se a mesma abordagem anterior, selecionou-se os pontos ótimos de comprimento de onda das duas FBGs de interrogação para melhor desempenho do sensor para a faixa de 10 a 14 graus. As posições espectrais das FBGs de acordo com maior a maior inclinação da reta de ajuste linear e com o maior coeficiente de correlação linear foram de 1549.6 nm e 1551.6 nm, com  $R^2=0.969$  e  $R^2=0.956$ , respectivamente. As posições espectrais ótimas calculadas para a escolha das FBGs para uma variação angular de 10 a 14 graus estão mostradas na figura 4.8.

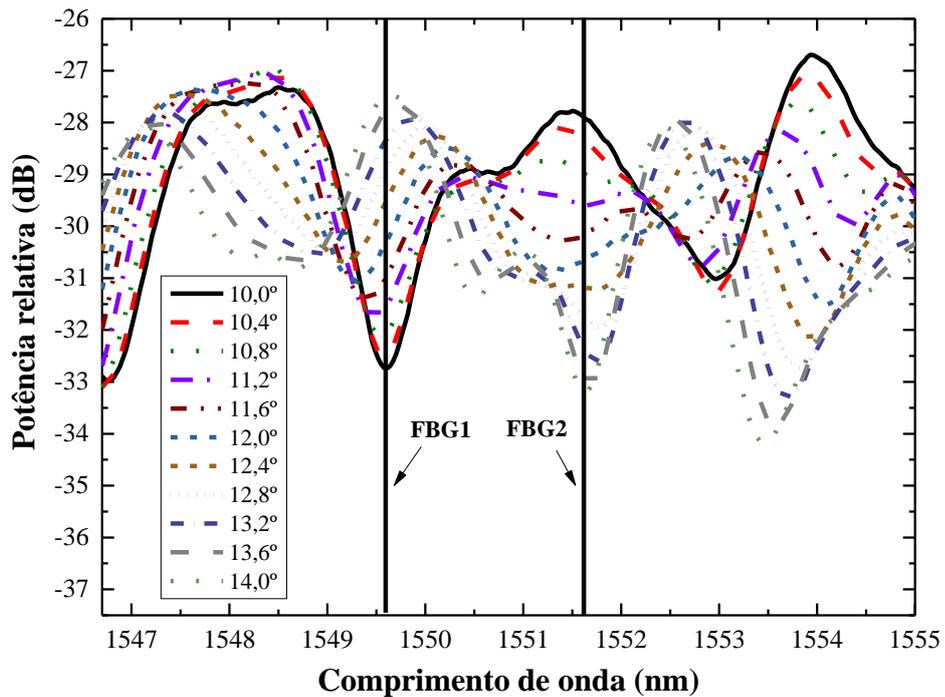


Figura 4. 8 – Alguns espectros com as posições espectrais ótimas, representadas por linhas verticais, calculadas pelo método dos mínimos quadrados para estimar a resposta do inclinômetro óptico baseada na razão de potências para a faixa angular entre 10 e 14 graus, com passos de 0,2 graus.

A resposta do sensor foi então calculada pela equação (4.1). A figura 4.9 mostra a curva da resposta sensora para variação angular de 10 a 14 graus. Conforme pode ser notado, a resposta do sensor apresenta uma sensibilidade de 0,3/grau com alto coeficiente de linearidade de  $R^2 = 0,9935$ .

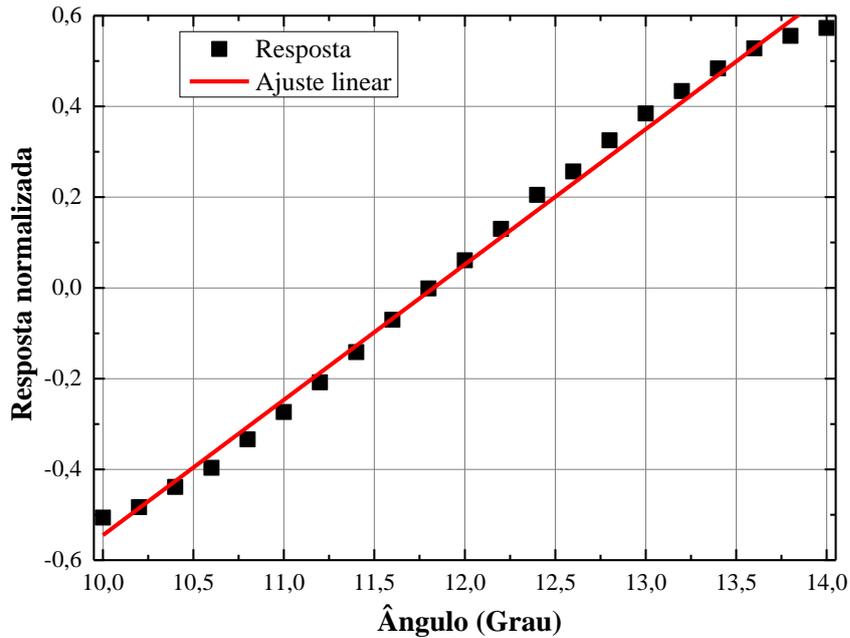


Figura 4. 9 - Resposta normalizada do inclinômetro óptico estimada de acordo com a escolha dos dois pontos do espectro feita pelo método dos mínimos quadrados e usando a razão de potências entre eles.

Após a realização dessas simulações numéricas para estimar a posição espectral ótima das duas FBGs a serem usadas no sistema de interrogação e a resposta sensora à variação angular, foram fabricadas duas FBGs com picos de comprimento de onda de 1549,5 nm e 1551,5 nm, os quais foram ligeiramente diferentes dos valores ótimos calculados que seriam de 1549,2 e 1550,3 nm. Analisou-se então a resposta do sensor para a faixa angular entre 3 e 6 graus. As frequências usadas para modular os PZTs foram 1544 e 1752 Hz. Essas frequências foram escolhidas porque apresentaram alta relação sinal-ruído. Embora os experimentos tenham sido feitos com valores de FBGs ligeiramente desviados de seus valores ótimos, os resultados obtidos foram condizentes com os resultados preditos. A figura 4.10 mostra a curva de calibração linear obtida com a interrogação elétrica. A sensibilidade alcançada foi de 0,35 / grau.

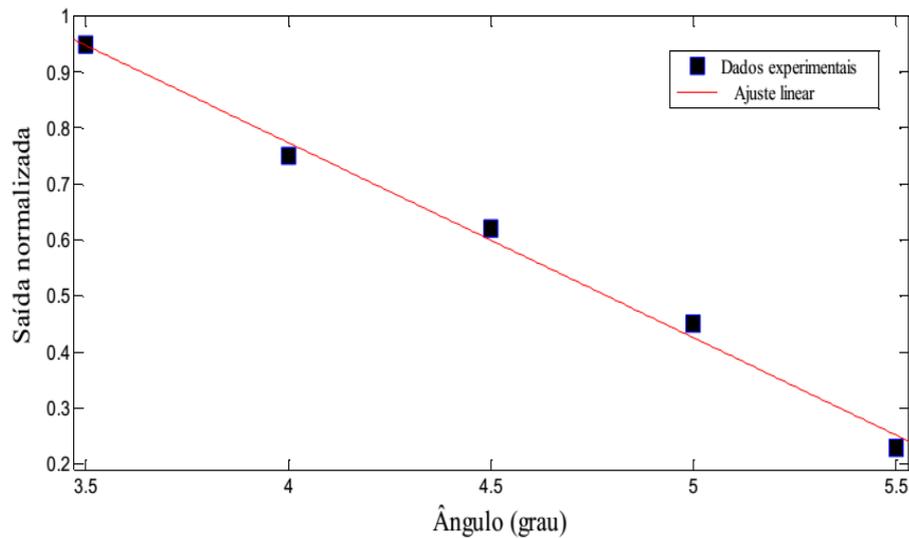


Figura 4.10 - Resposta normalizada do inclinômetro óptico através do sistema de interrogação elétrica para ângulo de inclinação de 3,5 a 5,5 graus.

Os resultados desse experimento indicam que o sistema de interrogação elétrica usando FBGs, um fotodetector e análise de frequência é uma técnica de baixo custo e eficiente para interrogação dinâmica de sensores interferométricos em campo. Obviamente, o uso desse interrogador no campo torna necessário realizar algum controle de temperatura ou o efeito da temperatura precisa ser removido por meio de algum processo de calibração. Visto que essa técnica usa a razão entre intensidade óptica entre dois pontos do espectro, ela mostra-se independente de flutuações de potência óptica. Pode-se também usar a técnica dos mínimos quadrados para selecionar dois pontos do espectro que apresentem grande sensibilidade com alta linearidade para analisar-se analiticamente a resposta do sensor usando a razão de potências entre esses dois pontos.

## 4.2. Sensor de Índice de Refração Baseado em Interferômetro em Fibra Afunilada Curvada

No capítulo anterior foram mostrados resultados de simulações numéricas envolvendo a aplicação de curvatura na fibra afunilada para intensificar a sensibilidade à variação de índice de refração. Os resultados indicaram o grande potencial de melhoria no desempenho do interferômetro de Mach-Zehnder em fibra afunilada curvada como sensor de IR quando submetido à curvatura. Notou-se que este tipo de sensor tem resposta com característica

oscilatória para os diversos valores de raio de curvatura, sendo necessário sintonizar um raio de curvatura de acordo com a faixa de índice de refração que se deseja analisar. Nesta seção, será discutida a análise desse tipo de sensor, mas na configuração de interferômetro de Michelson em fibra afunilada curvada (IMFAC) por meio de medidas experimentais. Esse dispositivo consiste no IMFA, já discutido na seção anterior, no qual tem a seção do afunilamento e proximidades curvada. O afunilamento foi construído na SMF através de um programa embutido numa máquina de emenda por fusão. A fibra com afunilamento fabricada é mostrada na figura 4.11. O comprimento e o diâmetro da cintura da região afunilada foram cerca de 430  $\mu\text{m}$  e 98  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O comprimento da cavidade, isto é, o comprimento do afunilamento até a ponta da fibra é de cerca de 20 mm.

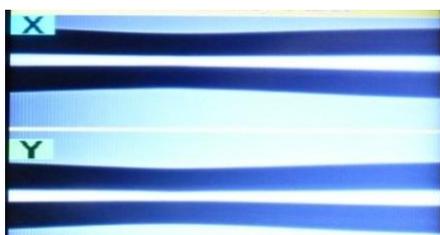


Figura 4.11 - Foto do afunilamento após fabricação na máquina de emenda com vista dos eixos x e y.

Para analisar-se a sensibilidade do IMFAC às variações de IR, utilizou-se um aparato para curvar uma seção da fibra que abranja o afunilamento e colocar essa seção em contato com líquidos de diferentes valores de IR. O mecanismo utilizado para curvar a fibra na região afunilada foi o mesmo apresentado na seção 4.1, usado para testar o inclinômetro óptico. O contato da cabeça sensora com o líquido foi feito por se colocar uma câmara bem pequena (cerca de 19 mm de diâmetro) na região interna vazada do anel cilíndrico, usado para girar o tubo capilar, logo abaixo da seção do IMFAC a ser curvada. A figura 4.12 exibe uma foto desse aparato experimental. Nesta pequena câmara foi adicionado um líquido com valor de IR diferente a cada medida. Observa-se na foto da figura 4.12 que o contato do IMFAC com o líquido é possível devido à tensão superficial do líquido nas paredes da câmara que fazem a altura do líquido aumentar e então estabelecer o contato com o IMFAC.

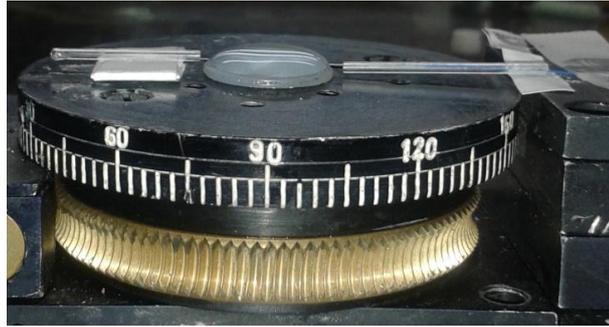


Figura 4.12 - Foto do aparato experimental do sensor de IR analisado em função da curvatura.

Quando a sensibilidade do sensor ao IR precisa ser analisada conforme é curvada, é importante relacionar o ângulo de curvatura do sensor curvado ao seu raio de curvatura. A equação (3.2) foi usada para fazer essa relação [79] e é repetida aqui:

$$R_c = \frac{360L_{bent}}{2\pi\theta} \quad (4.2)$$

onde,  $R_c$  é o raio de curvatura,  $L_{bent}$ , é comprimento da seção a ser curvada, que nesse caso é a distância entre os tubos capilares, de cerca de 20 mm, e  $\theta$  é o ângulo de inclinação em graus relacionado à metade de  $L_{bent}$ .

O aparato experimental é ilustrado na figura 4.13 e consiste de uma fonte banda larga (BBS, *broadband source*) que injeta um sinal óptico no IMFAC, através de um circulador óptico (OC, *optical circulator*). O sinal se propaga até a extremidade clivada do IMFAC e é refletido de volta da ponta clivada. Dessa forma percorre a região afunilada exposta ao líquido e a determinado raios de curvatura duas vezes. O sinal refletido é direcionado ao analisador de espectros ópticos (OSA, *optical analyzer spectrum*) por meio do circulador óptico.

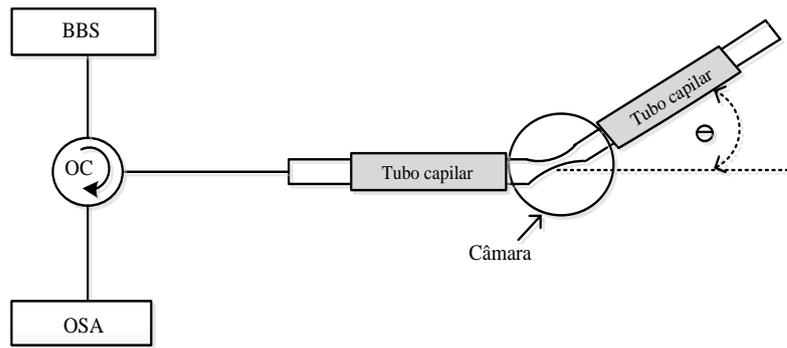


Figura 4.13 - Diagrama esquemático do aparato experimental.

A análise da sensibilidade do sensor foi realizada selecionando-se três picos do espectro gravado e calculando-se o desvio de comprimento de onda de cada um deles como uma função da variação de IR para raio de curvatura. Então, é calculada uma média dos módulos destes desvios e esses valores médios é que são levados em conta para analisar a resposta do sensor à variação de IR. Os espectros relacionados aos valores de IR de 1,333 e 1,344 para o caso não curvado podem ser observados na figura 4.14. Pode ser notado que a sensibilidade ao IR para o sensor é baixa visto que a posição dos espectros é muito similar para os dois diferentes valores de IR.

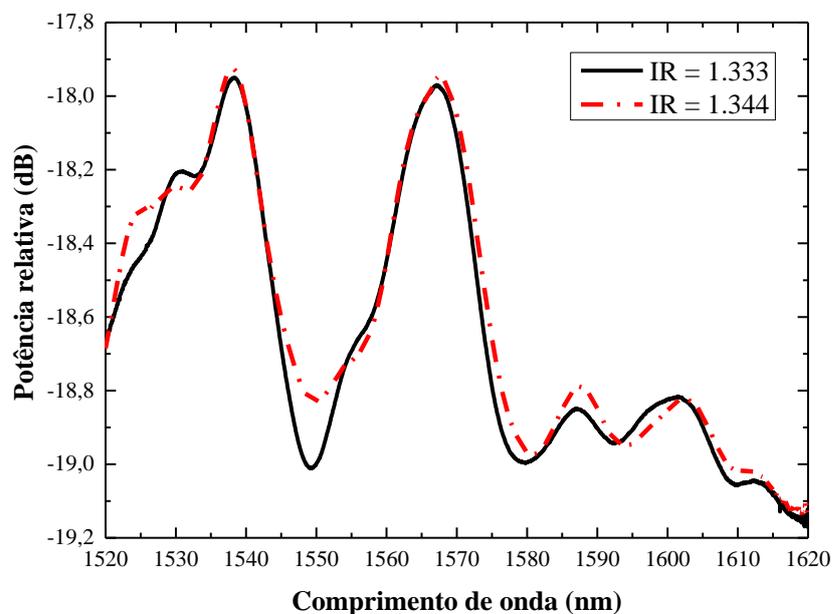


Figura 4.14 - Espectros para valores de IR de 1,333 e 1,344 com o sensor não curvado.

Os espectros referentes aos mesmos valores de IR, 1,333 e 1,344, quando são submetidos a uma curvatura de  $R_c = 11,6$  mm (99 graus), são mostrados na figura 4.15. Nota-se que, curvar o IMFA nesse valor de  $R_c$  aumentou grandemente o desvio de comprimento de onda entre os dois valores de IR, em comparação com o caso em que o IMFA não foi curvado.

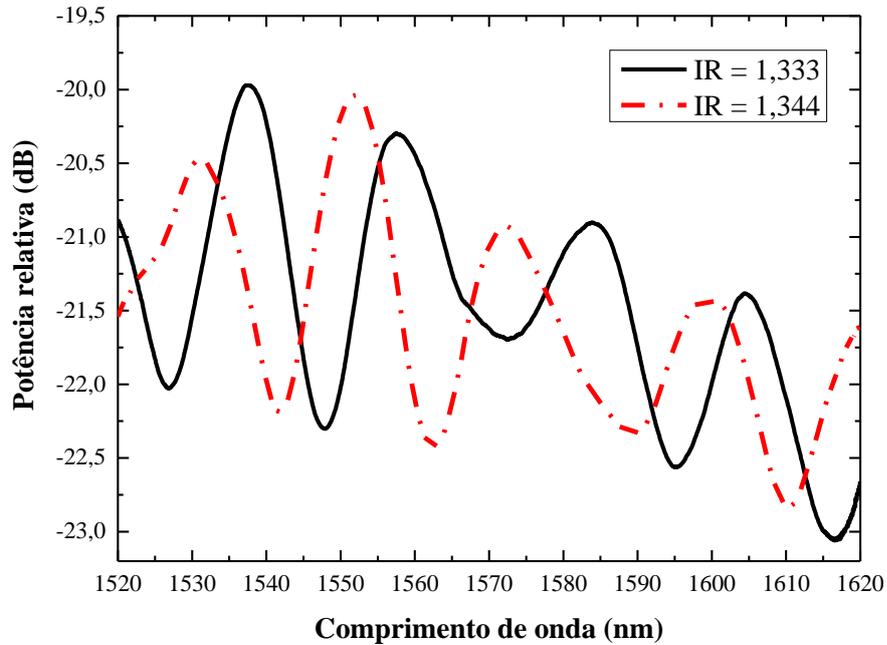


Figura 4.15 - Espectros para valores de IR de 1.333 e 1.344 e um raio de curvatura de 11,6 mm (99 graus).

As figuras 4.16 e 4.17 mostram os espectros para valores de IR iguais a 1,4 e 1,405 para o sensor não curvado e para o sensor curvado em um  $R_c = 17,4$  mm (66 graus), respectivamente. A intensificação na sensibilidade, em termos de desvio de comprimento de onda, é nítida para uma diferença de valor de IR de apenas 0,005.

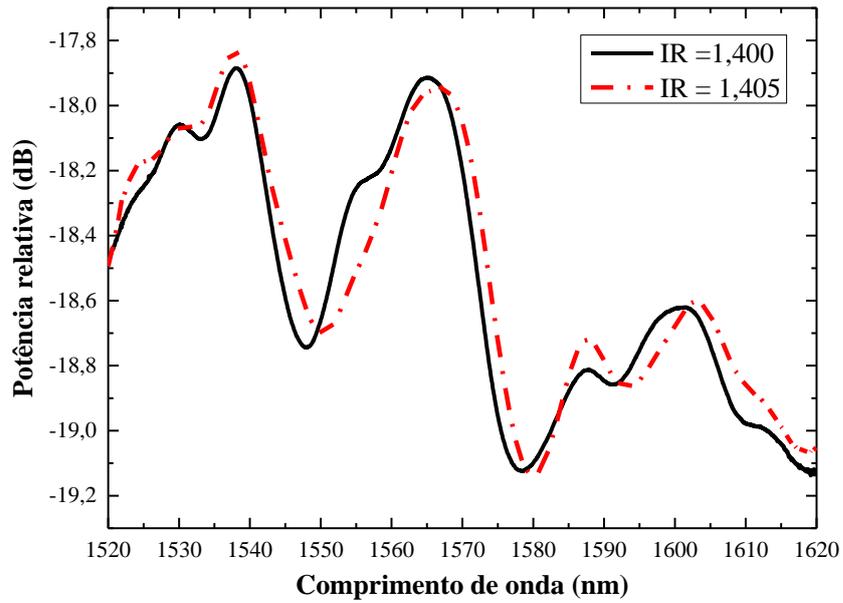


Figura 4.16 - Espectros para valores de IR = 1,4 e 1,405 para IMFAC não curvado.

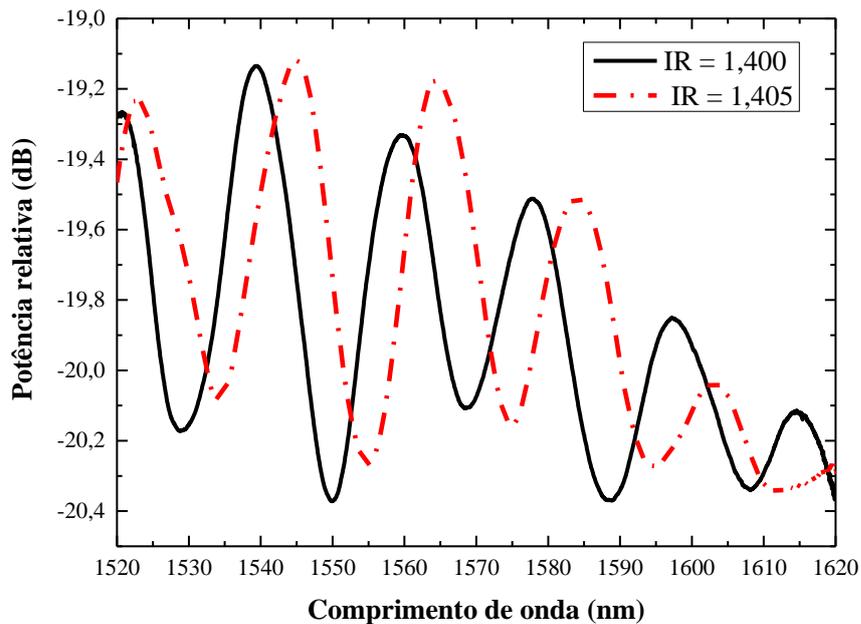


Figura 4.17 - Espectros para valores de IR = 1,4 e 1,405 para IMFAC com  $R_c = 17,4$  mm (66 graus).

A figura 4.18 exibe o desvio médio de comprimento de onda em função do índice de refração para valores de 1,333, 1,344 e 1,350, para três diferentes valores de ângulos de inclinação: 0, 21 e 99 graus. Percebe-se claramente no gráfico o efeito que submeter o sensor à curvatura tem em aumentar a sensibilidade do mesmo à variação de IR.

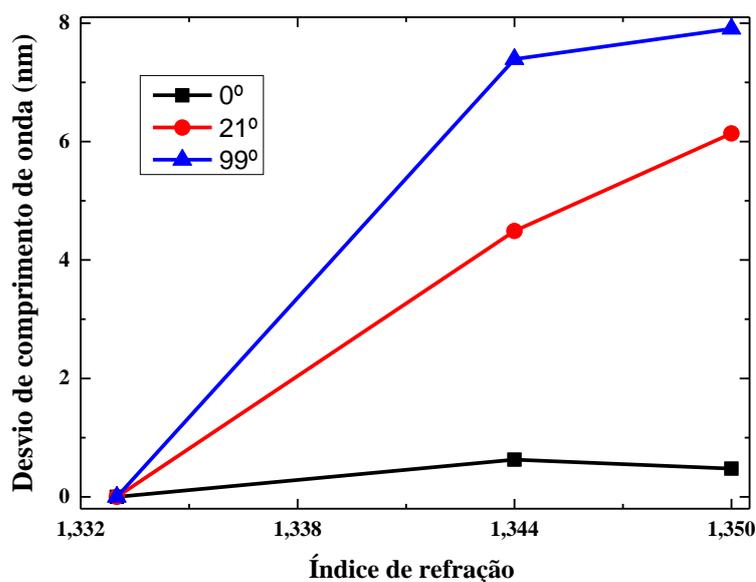


Figura 4.18 - Média dos desvios de comprimento de onda em função de IR para três valores de ângulos: 0, 21 e 99 graus (raios de curvatura infinito, 54,6 mm e 11,6 mm, respectivamente).

O deslocamento médio de comprimento de onda por unidade de índice de refração (nm/RIU - *nm/refractive index unit*) é apresentado na figura 4.19 para a faixa de IR de 1,33 a 1,350 para todos os ângulos de inclinação analisados. Para zero grau (caso não curvado), a sensibilidade é muito baixa, ~41nm/RIU. A melhor resposta é obtida para o ângulo de 99 graus ( $R_c = 11,6$  mm) com ~378,73 nm/RIU. Entretanto, uma resposta similar é também atingida em valores de ângulo muito menores com sensibilidade de 358.36 nm/RIU e 341.38 nm/RIU para ângulos de inclinação de 42 graus ( $R_c = 27,3$  mm) e 21 graus ( $R_c = 54,6$  mm), respectivamente. Conforme pode ser notado na Fig. 4.19, é possível obter uma resposta com melhor desempenho em comparação com o sensor reto mesmo em ângulos de inclinação não tão acentuados. Certamente, é desejável evitar curvar o sensor em ângulos muito elevados devido ao risco de quebrá-lo.

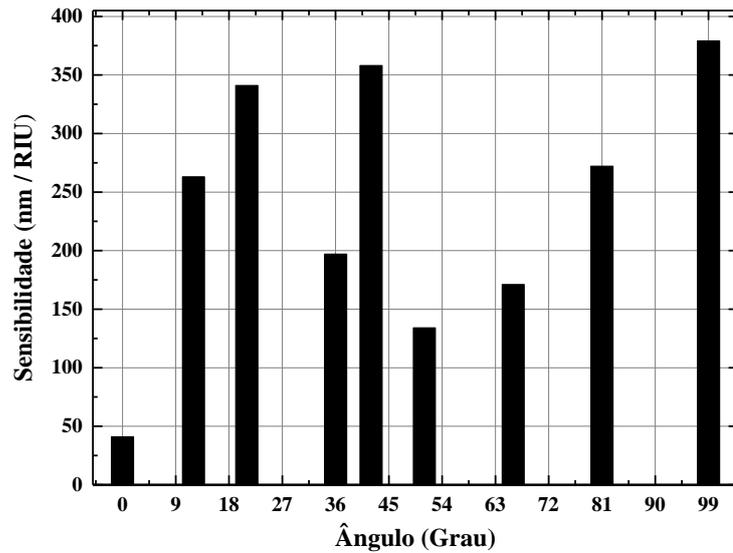


Figura 4.19 - Sensibilidade do IMFAC à variação de IR para faixa de 1,333 a 1,35 em função do ângulo de inclinação.

Quando é considerado um valor de IR próximo a 1,40 (1,397-1,405) a sensibilidade é intensificada de 134 nm/RIU para o caso não curvado para ~1,506 nm/RIU para um  $R_c = 17,4$  mm (66 graus), o que representa cerca de 11 vezes de aumento na sensibilidade comparada com o dispositivo reto. Porém, pode-se atingir uma resposta menos sensível para uma curvatura muito menor (21 graus ou  $R_c = 54,6$  mm) mas ainda assim com bom desempenho de cerca de 568.7 nm/RIU, o que representa cerca de quatro vezes de melhoria em relação ao sensor não curvado. Estes resultados são exibidos na figura 4.20.

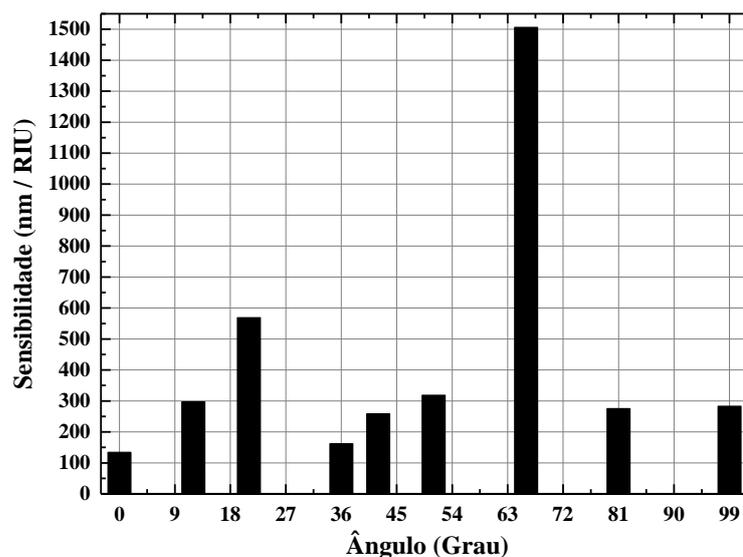


Figura 4.20 - Sensibilidade média do IMFAC para valores de IR de 1,397 a 1.405.

Os resultados apresentados nesta seção demonstraram o grande potencial do sensor IMFAC para aumentar a sensibilidade ao IR. Ficou claro que é possível escolher o raio de curvatura apropriado de acordo com a faixa de IR a ser medida. É importante ressaltar a grande melhora no desempenho da sensibilidade para valores de IR próximos aos da água destilada, o que é uma tarefa difícil para sensores baseados em SMF.

Os resultados obtidos indicaram que o desempenho de sensibilidade do IMFAC é bem melhor em relação ao uso tradicional desse dispositivo sem curvatura. O IMFAC demonstrou ser bem sensível mesmo em valores de IR próximos ao da água destilada (1,333 – 1,350). Usando o sensor reto o valor da sensibilidade nessa faixa foi de cerca de 41 nm/RIU, enquanto que para o sensor curvado em um  $R_c = 11,6$  mm a sensibilidade foi cerca de 9 vezes maior, ou seja, 378.73 nm/RIU. Nas faixas mais altas de IR, próximo de 1,40, a sensibilidade foi de 134 nm/RIU para o sensor não curvado contra 1506 nm/RIU em  $R_c = 17,4$  mm. É interessante ressaltar que a sensibilidade poderia ser ainda maior se o líquido estivesse em contato com todo o comprimento da cavidade interferométrica, ou seja, do afunilamento até a ponta clivada [82]. Devido às limitações do aparato experimental, apenas a região próxima ao afunilamento foi exposta ao líquido, ficando uma parte da cavidade do interferômetro em contato apenas com o ar. O desempenho do IMFAC como sensor de IR é comparado resumidamente, na Tabela 4.1, com alguns sensores de índice de refração (IR) interferométricos em fibra óptica reportados na literatura. Observa-se nessa tabela que o IMFAC apresenta valores de sensibilidade bem mais altos que os sensores de IR reportados em [32], [68] e [69] que utilizam técnicas baseadas em interferômetros em linha, para faixas similares de IR. A abordagem reportada em [59], que é baseada num afunilamento abrupto, apresentou uma resposta bem superior ao IMFAC. Porém, o comprimento do afunilamento ( $L_t$ ) é quase o dobro em relação ao do IMFAC e seu diâmetro de cintura do afunilamento ( $D_w$ ) é bem reduzido, tem cerca de apenas 7  $\mu\text{m}$ , o que o torna mais frágil e suscetível a quebrar. Em [67] apresenta-se a utilização de curvatura em uma fibra especial, que apresenta altas perdas por curvatura, como técnica para medir IR. Esta técnica apresentou uma sensibilidade de cerca de metade da obtida pelo IMFAC, na faixa de IR próxima ao da água destilada e um valor um pouco menor na faixa de IR próxima a 1,4. Um sensor de IR utilizando um interferômetro em microfibras associadas à curvatura é reportado em [71]. Essa microfibras utiliza um afunilamento de cerca de 16,9 mm de comprimento e 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro na cintura e apresentou resultados de sensibilidade bem elevados, pois combinou duas técnicas eficientes

no aumento da sensibilidade ao IR, um afunilamento bem longo e fino e o emprego da curvatura.

Tabela 4. 1 - Sensibilidade de alguns sensores de índice de refração baseados em fibra óptica.

Referência	Faixa de IR	Técnica	nm/RIU
Esta tese	1,3334 - 1,350	IMFA curvado	378,73
Esta tese	~ 1,41	IMFA curvado	1.506
32	1,3324 - 1,350	Interferômetro de Mach-Zehnder em linha	17,65
59	1,3333 - 1,3447	Afunilamento abrupto ( $L_t = 843 \mu\text{m}$ ; $D_w = 7 \mu\text{m}$ )	1.197
67	1,33 - 1,36	Fibra especial curvada	167
67	~1,40	Fibra especial curvada	1.154
68	1,3324 - 1,350	Interferômetro de Michelson em linha	25,6
68	1,3324 - 1,350	Desalinhamento de núcleo	32,95
69	1,3333 - 1,3528	2 LPGs	35,9
69	1,3333 - 1,3528	LPG + Afunilamento ( $L_t = 16 \text{ mm}$ e $D_w = 38,75 \mu\text{m}$ ) + LPG	184,6
71	~1,333	Microfibra curvada ( $L_t = 16.9 \text{ mm}$ e $D_w = 20 \mu\text{m}$ )	1.192,7
71	~1,43	Microfibra curvada ( $L_t = 16.9 \text{ mm}$ e $D_w = 20 \mu\text{m}$ )	11.006

O IMFAC apresentou bons resultados de sensibilidade ao IR com um diâmetro de cintura do afunilamento não tão reduzido, por volta de cerca de  $98 \mu\text{m}$ , o que o torna bem menos frágil em comparação com outras abordagens que utilizam um diâmetro de cintura na casa de uma a duas dezenas de micrômetros. Os resultados indicaram que o IMFAC mostra ser uma alternativa interessante como sensor de IR, pois sua fabricação é mais simples e mais barata em comparação com outras tecnologias e apresenta boa sensibilidade à variação de IR, mesmo em valores próximos ao da água destilada, o que é vantajoso para monitorar a qualidade da água potável.

### 4.3. Análise do Interferômetro de Michelson em Fibra Afunilada como Sensor de Temperatura

Foram feitos testes experimentais do IMFA à variação de temperatura. A variação de temperatura provoca uma alteração no desfasamento entre o modo do núcleo e os modos da casca, visto que provoca mudanças no índice de refração e no comprimento da fibra devido ao coeficiente de dilatação linear térmica da fibra óptica [83]. Neste caso, foi fabricado um

IMFA com 13 cm de comprimento. Esse dispositivo foi analisado em relação à sua sensibilidade à temperatura. A figura 4.21 ilustra o esquema utilizado para fazer a caracterização do IMFA como sensor de temperatura. O IMFA foi colocado sobre um disco térmico no qual variou-se a temperatura entre 24,7 °C e 64 °C. Os valores de temperatura utilizados foram: 24,7 °C; 31,9 °C; 35,3 °C; 39,3 °C; 43,5 °C; 46,9 °C; 52,7 °C; 56,8 °C; 61,2 °C e 64 °C. Os valores de temperatura foram lidos por meio de um termômetro com mostrador digital.

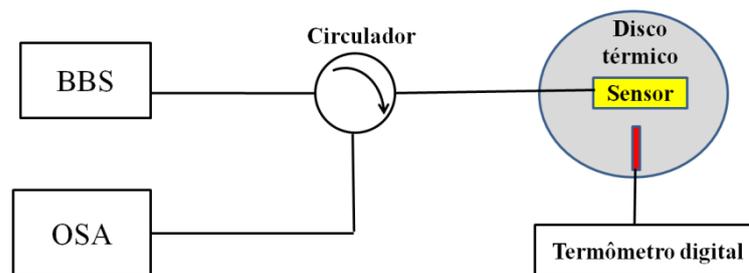


Figura 4.21 – Ilustração do aparato utilizado para efetuar medidas de temperatura no IMFA.

A Figura 4.22 apresenta as franjas espectrais do interferômetro à temperatura ambiente (~25 °C). Utilizou-se para análise da sensibilidade à temperatura, a franja espectral na faixa em torno de 1540 nm, que contém um vale mais acentuado.

Uma variação típica da diferença do índice de refração entre o núcleo e a casca,  $\Delta n$ , em função da temperatura, é de cerca de  $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  [83]. Considerando um valor típico de  $\Delta n$  para fibras monomodo padrão, de cerca de  $1,5 \times 10^{-3}$  [83] a variação de temperatura analisada nesse trabalho elevaria  $\Delta n$  em cerca de 40% do valor inicial. A dilatação térmica provocada pela variação de temperatura altera o comprimento efetivo do interferômetro, também contribuindo dessa forma para o aumento da sensibilidade do IMFA à temperatura.

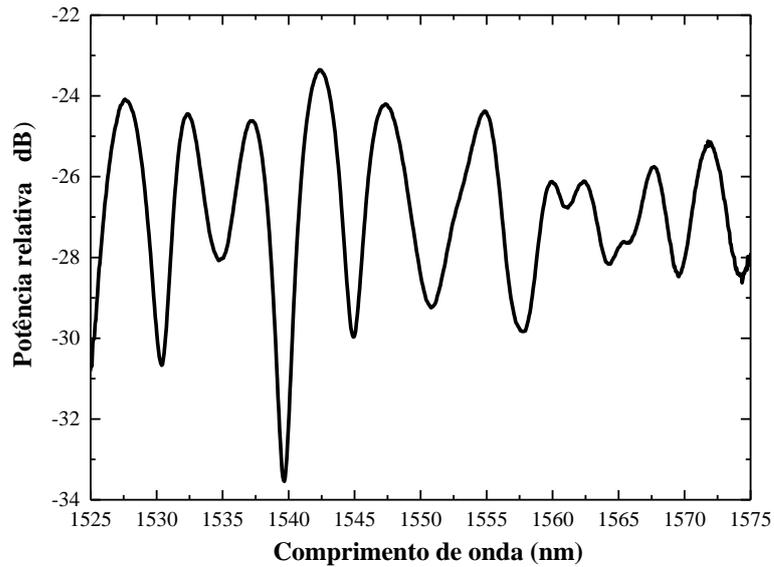


Figura 4. 22 - Espectro óptico das franjas do IMFA à temperatura ambiente (~25 °C).

A Figura 4.23 apresenta as franjas espectrais na faixa de comprimentos de onda entre 1538 nm e 1546 nm devido à elevação da temperatura. Esta figura mostra o deslocamento das franjas no sentido positivo de comprimento de onda à medida que a temperatura aumenta.

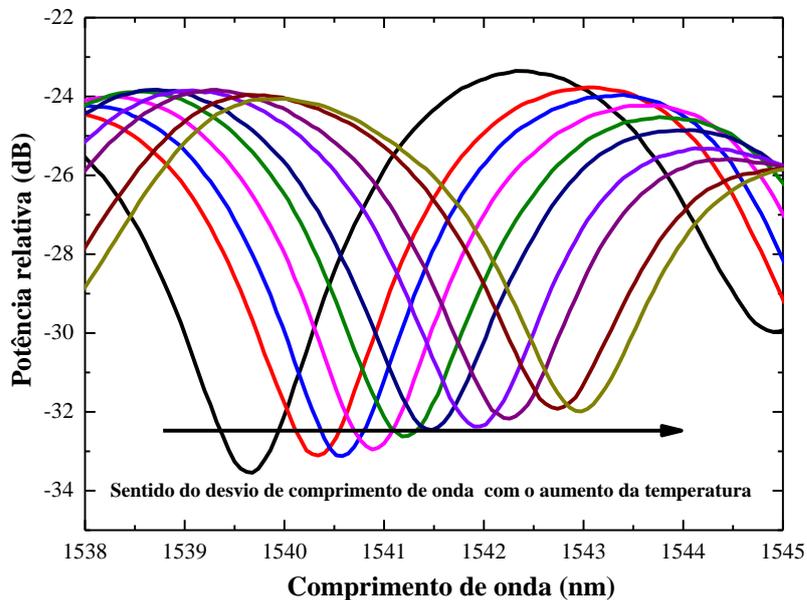


Figura 4. 23 - Espectro óptico das franjas do Interferômetro referentes aos valores de temperatura de 24,7 °C; 31,9 °C; 35,3 °C; 39,3 °C; 43,5 °C; 46,9 °C; 52,7 °C; 56,8 °C; 61,2 °C e 64 °C. À medida que o valor da temperatura aumenta há um deslocamento dos pontos de mínimo dos vales das franjas no sentido crescente de comprimento de onda.

A Figura 4.24 apresenta o gráfico dos pontos de mínimo das franjas na faixa próxima ao comprimento de onda de 1540 nm em função dos valores de temperatura.

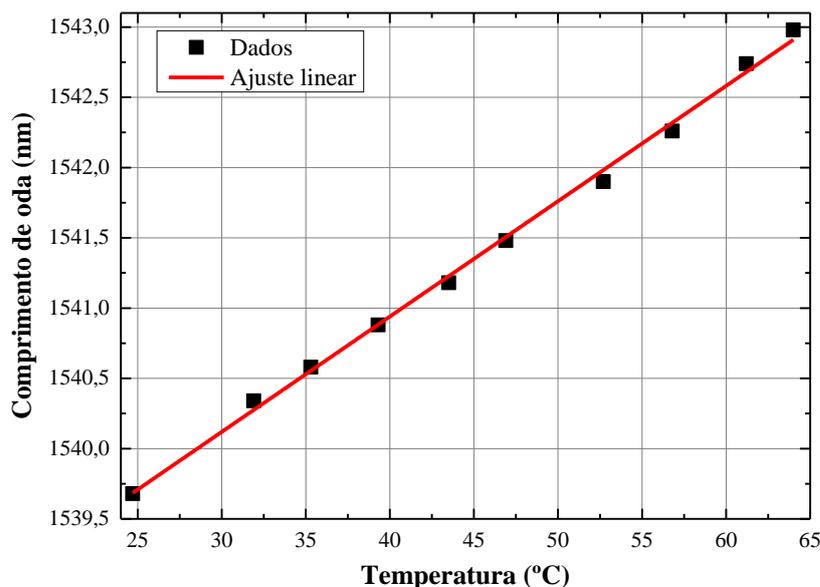


Figura 4. 24 – Comprimento de onda em função da temperatura para o IMFA valores de temperatura de 24,7 °C; 31,9 °C; 35,3 °C; 39,3 °C; 43,5 °C; 46,9 °C; 52,7 °C; 56,8 °C; 61,2 °C e 64 °C.

O comportamento do interferômetro mostra ser bem linear com coeficiente de correlação igual a 0.997. A sensibilidade do sensor na faixa de temperatura considerada é de cerca de 82 pm/°C que é cerca de oito vezes maior que o valor típico de sensibilidade das FBGs reportadas em [84] na faixa de temperatura de 25 a 95°C. Foi reportado também em [85], sensor de temperatura usando configuração de fibra monomodo-multimodo-monomodo, com a fibra multimodo sem núcleo e com 125 µm de diâmetro. Foi obtida com essa configuração uma sensibilidade de aproximadamente 13pm/°C na faixa de temperatura de 25 a 375 °C.

#### 4.4. Análise de SMF Afunilada como Sensor de Curvatura Monitorada na Transmissão

O diagrama esquemático da configuração experimental é mostrado na Fig. 4.25. Uma fonte banda larga com largura de banda de 100 nm e um comprimento de onda central em 1550 nm foi usado para injetar sinal óptico na fibra afunilada. A seção afunilada da fibra é curvada usando o mesmo aparato discutido nas seções 4.1 e 4.2.

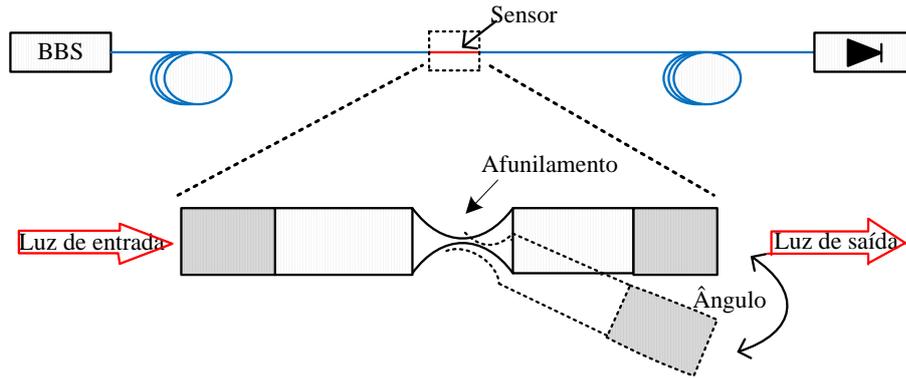


Figura 4.25 - Representação esquemática do aparato experimental para medidas do sensor de inclinação em SMF afunilada.

O afunilamento foi feito numa fibra Corning SMF-28 por alongá-la durante um arco de descarga provido pela máquina de emenda por fusão FSM-40S da Fujikura Ltd. A foto do afunilamento da fibra tirada na tela da máquina de emenda por ocasião de sua fabricação com seus parâmetros podem ser visualizados na Fig. 4.26. Conforme pode ser visto, o diâmetro da casca da fibra da SMF-28 foi reduzido de 125 a 80  $\mu\text{m}$  na cintura do afunilamento ( $D_w$ ).

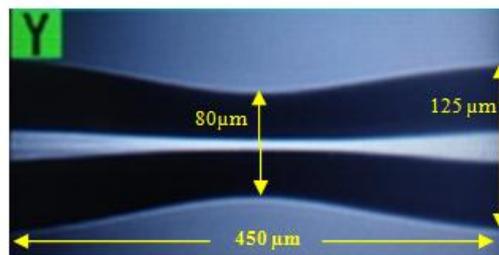


Figura 4.26 - Foto do afunilamento obtida da máquina de emenda usada na fabricação do afunilamento. O comprimento do afunilamento de 450  $\mu\text{m}$  e diâmetros da casca com seu valor original (125  $\mu\text{m}$ ) e cintura do afunilamento (80  $\mu\text{m}$ ) são destacados.

O comprimento do afunilamento é de  $\sim 450\mu\text{m}$ . O processo para curvar a fibra foi o mesmo já discutido anteriormente, ou seja, a fibra foi inserida dentro de dois tubos capilares com a seção do afunilamento entre eles e o afunilamento colocado à meia distância entre os dois tubos capilares. Ao contrário da configuração interferométrica, na qual o revestimento é retirado desde a seção afunilada até a extremidade, apenas a seção ao redor do afunilamento, e que é curvada, tem o seu revestimento retirado. O fotodetector HP8153a lightwave multimeter foi colocado na saída do sensor para medir sua resposta à curvatura em 1550 nm.

Os parâmetros do sensor são exibidos na figura 4.27.

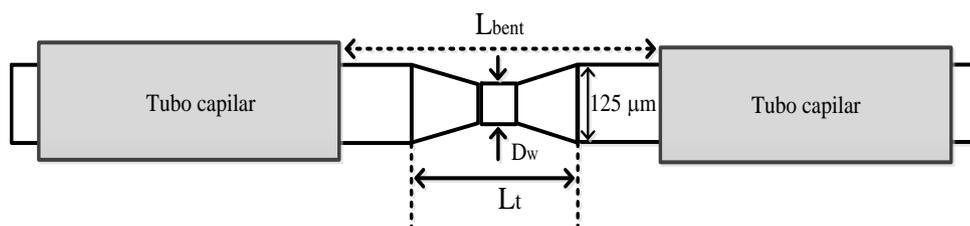


Figura 4.27- Ilustração do sensor de curvatura baseado em SMF com afunilamento. Os parâmetros são a seção curvada,  $L_{bent}$ , o diâmetro mínimo da cintura do taper,  $D_w$ , o comprimento do afunilamento,  $L_t$ , e o diâmetro original da casca de  $125 \mu\text{m}$ .

Medidas experimentais foram realizadas usando os seguintes parâmetros do dispositivo sensor:  $L_{bent} = 7.5 \text{ mm}$ ,  $D_w = 80 \mu\text{m}$  e  $L_t = 450 \mu\text{m}$ . O ângulo de inclinação foi variado de 0 a 50 graus para analisar o comportamento da potência transmitida. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados simulados obtidos do modelo numérico discutido no capítulo anterior. Os resultados experimentais em comparação com os numéricos podem ser visualizados na Fig. 4.28, a qual mostra duas curvas relacionadas aos resultados simulados (círculos abertos) e experimentais (círculos sólidos) em termos de intensidade de potência média.

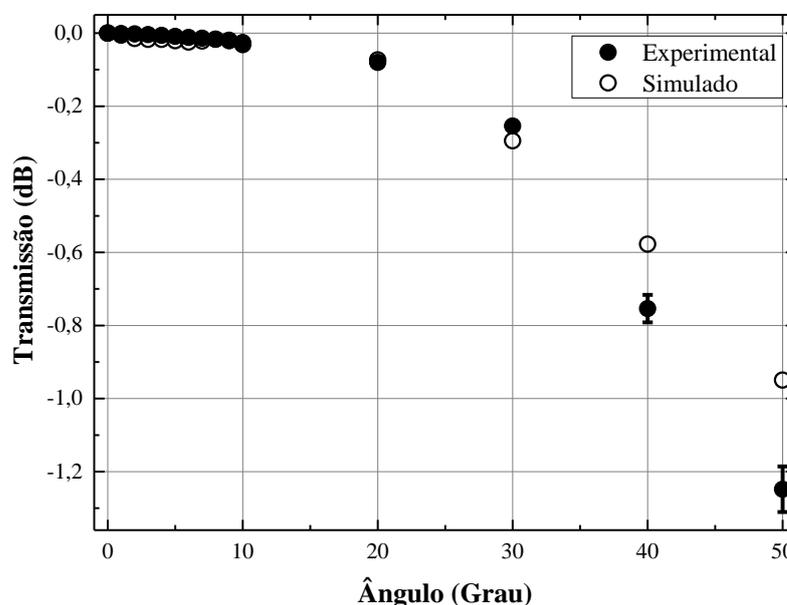


Figura 4. 28 - Potência média transmitida em função da variação de inclinação, para  $D_w = 80 \mu\text{m}$ ,  $L_t = 450 \mu\text{m}$  e  $L_{bent} = 7.5 \text{ mm}$ . Curvas experimentais e simuladas são representadas por círculos sólidos e abertos, respectivamente.

Pode ser notado que a potência transmitida apresenta um decaimento não linear em função do ângulo de inclinação conforme predito pelo modelo numérico. Percebe-se também que este dispositivo é mais sensível nas faixas angulares mais altas. Isto significa que se maior sensibilidade é necessária, pode-se usar uma inclinação inicial maior para intensificar a sensibilidade, mas neste caso a faixa dinâmica torna-se mais curta. Logicamente, existe um limite no qual este dispositivo pode ser curvado sem quebrar. Com isto em mente, decidiu-se curvar o dispositivo tanto quanto possível e analisar a máxima sensibilidade possível. Conforme pode ser visto na Fig.4.28, os resultados mostram que em valores de ângulos baixos a sensibilidade é irrisória, por exemplo, na faixa de 0 a 20 graus a sensibilidade é de aproximadamente 0,004 dB/grau com coeficiente de correlação de 0,93. De 20 graus em diante, a sensibilidade começa a aumentar de forma acentuada. Na faixa angular entre 40 e 50 graus, a sensibilidade é  $\sim 0.05$  dB / grau ( $R^2 \sim 1.0$ ). Na Fig. 4.28, pode ser visto uma concordância razoável entre os resultados experimentais e numéricos. A pequena diferença ( $< 0,4$  dB) entre elas advém de muitos fatores relacionados a aproximações usadas nas simulações, tais como, o modelo considera o perfil do afunilamento como simétrico em sua seção transversal e com variação longitudinal linear; o afunilamento real pode apresentar assimetrias em sua seção transversal e seu perfil não é perfeitamente linear. Outro importante fator é que, nessas simulações foram usados apenas 12 valores de comprimentos de onda para representar o sinal banda larga ( $\sim 100$  nm) emitido pela fonte óptica, e assim, efetuar o cálculo da potência média na saída do sensor. Nos experimentos, a potência transmitida foi obtida na saída de um fotodiodo, o qual tomou o valor médio de todo o espectro banda larga. Certamente, existem erros relacionados às curvaturas consideradas no modelo como perfeitamente circular, o que não é uma representação exata do experimento real. Alguns valores de ângulos, relacionados a alguns valores de curvatura, não foram exatamente os mesmos nos experimentos, devido à folga causada pela diferença de diâmetro entre a fibra e os tubos capilares. A equação (4.2) usada para relacionar o valor do ângulo com o raio de curvatura utiliza uma aproximação que conduz a erros. Apesar desses fatores, as simulações numéricas predisseram o comportamento básico da resposta do sensor de curvatura em uma boa concordância com os resultados experimentais. As diferenças entre os pontos simulados e experimentais são mais significativas a partir de 40 graus em diante. Essas diferenças são de cerca de 0.18 dB em 40 graus ( $\sim 4\%$ ), e de 0.3 dB ( $\sim 7\%$ ) em 50 graus. A diferença eleva-se com o aumento da faixa angular. Isto pode indicar que o modelo numérico desvia-se cada vez mais da precisão à medida que a curvatura é maior.

O sensor de curvatura proposto é de fabricação muito simples e fácil de interrogar sua

resposta. Entretanto, pode ser observado que sua sensibilidade não é tão alta. De fato, maior sensibilidade pode ser atingida a custo de curvar o sensor numa faixa angular alta, o que representa risco de quebra do dispositivo.

Certamente, muitos experimentos podem ser realizados para analisar os parâmetros ótimos que resultam em melhor resposta sensora. No entanto, é mais prático e econômico otimizar os parâmetros do sensor por simulações numéricas e então verificar os resultados via experimentos. Foi mostrado no capítulo anterior, resultados de simulações baseadas na modelagem em FD-BPM que foi usada aqui em comparação com os resultados experimentais e mostrou-se resultados de otimização do sensor alterando-se os parâmetros do afunilamento. Os resultados indicaram que para valores de  $L_{\text{bent}} = 7.5 \text{ mm}$ ,  $L_t = 1200 \text{ }\mu\text{m}$  e  $D_w = 30 \text{ }\mu\text{m}$ , a resposta do sensor foi de cerca de 14 vezes melhor em relação à configuração inicial e numa faixa angular menor.

#### **4.5. Análise de Sensor Híbrido de Interferômetro de Michelson e Fabry-Perot em Fibra Afunilada**

Foram realizadas medidas experimentais com uma configuração que combina dois interferômetros, o interferômetro de Michelson baseado em fibra com afunilamento (IMFA) seguido de uma cavidade de ar. A cavidade de ar é produzida numa fibra multimodo numa sala limpa. A fibra com a cavidade de ar foi fundida na extremidade do IMFA por meio de uma máquina de emenda de fibras, resultando num só dispositivo interferométrico, o qual denominamos de IMFA-AR. A configuração é ilustrada na Figura 4.29. Uma das vantagens dessa nova configuração é que permite uma maior flexibilidade de manuseio e instalação. Na configuração do IMFA, a extremidade deve ser colada com cola apropriada, pois em caso contrário, pode reduzir o contraste de visibilidade das franjas espectrais visto que a extremidade do mesmo faz parte da cabeça sensora. Na configuração utilizando a combinação dos dois interferômetros, a seção do dispositivo após a cavidade de ar não faz mais parte da cabeça sensora e pode ser colada, fixada, curvada, permitindo assim uma maior flexibilidade de manuseio e fixação no local em que irá atuar.



Figura 4.29 - Configuração do sensor baseado em um interferômetro com afunilamento acoplado a outro interferômetro com uma cavidade de ar (IMFA-AR).

A Figura 4.30 mostra o espectro obtido do IMFA-AR no espaço livre e sem inclinação do interferômetro híbrido, sendo que o IMFA tem comprimento de cavidade de 15 cm e a cavidade de ar tem diâmetro de cerca de 135  $\mu\text{m}$ . Esse espectro recebe influência dos dois interferômetros, o de Michelson e o de Fabry-Perot, porém não é possível discriminar com clareza um do outro porque os períodos de ambos são bem próximos um do outro.

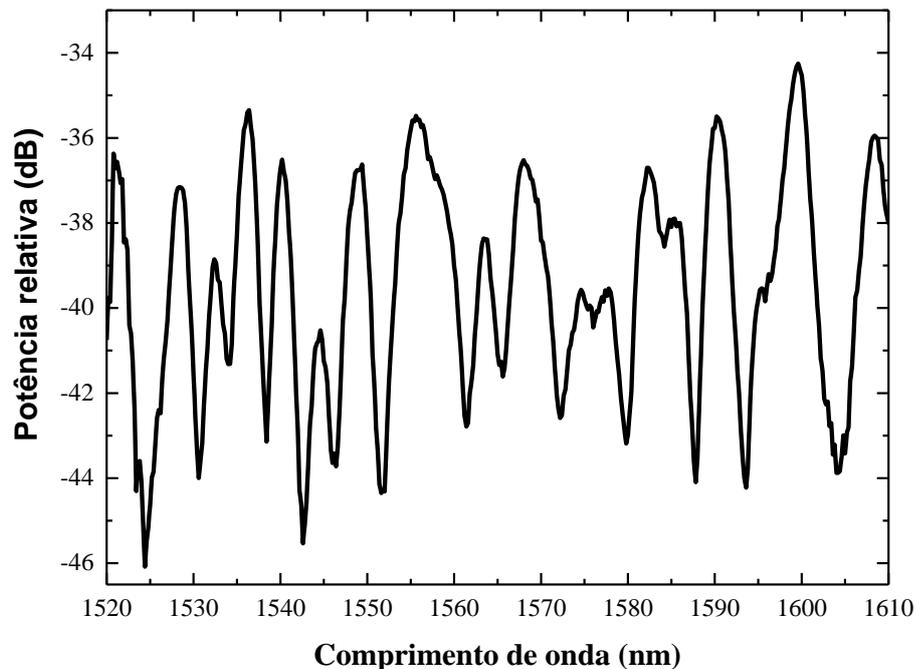


Figura 4.30 - Espectro de franjas do Interferômetro IMFA-AR para ângulo de inclinação zero no espaço livre.

Este sensor híbrido foi utilizado para se obter medidas de sensibilidade à inclinação, temperatura e índice de refração baseadas no desvio em comprimento de onda de determinado pico ou vale de franja. Certamente, é interessante que se perceba o comportamento de cada interferômetro separadamente aos parâmetros medidos. Mais adiante, nesse trabalho, será discutida a possibilidade de se usar uma técnica reportada em [86], que permite discriminar

com maior clareza a resposta sensora de cada interferômetro através da transformada de Fourier.

#### 4.5.1. Análise de Sensor Híbrido como Inclinômetro Óptico

O IMFA-AR foi utilizado como inclinômetro onde o ângulo de inclinação foi variado próximo à região afunilada usando o mesmo aparato discutido anteriormente em medidas de inclinação. Os resultados em termos de desvio em comprimento de onda, para ângulos variando de 0 a 12 graus, de um vale localizado por volta de 1589 são apresentados na figura 4.31.

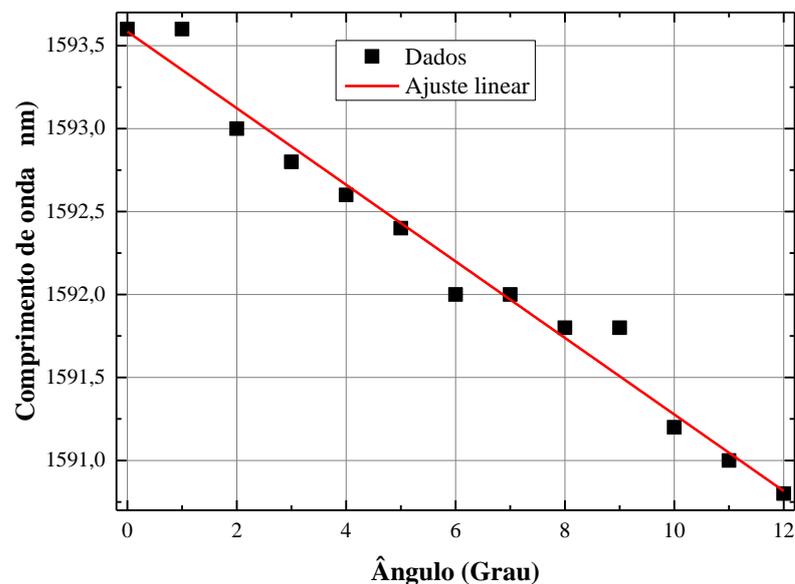


Figura 4. 31 - Resposta do IMFA-AR em termo de desvio de comprimento de onda para a faixa angular de 0 a 12 graus , com passos de 1 grau.

Essa faixa angular apresentou uma boa resposta linear com cerca de 0,23 nm/grau, com coeficiente de correlação de ~ 0,98.

### 4.5.2. Análise de Sensor Híbrido como Sensor de Temperatura

O IMFA-AR também foi testado experimentalmente como sensor de temperatura. O aparato experimental é o mesmo utilizado para medidas de temperatura para o Interferômetro IMFA. A Figura 4.32 apresenta a resposta do sensor em termos de deslocamento de comprimento de onda dos vales de franjas. Observa-se que para valores de temperatura entre 89,5 a 136 °C, a resposta do IMFA-AR apresenta uma resposta linear com sensibilidade de cerca de 89 pm/°C com  $R^2 \approx 0,97$ .

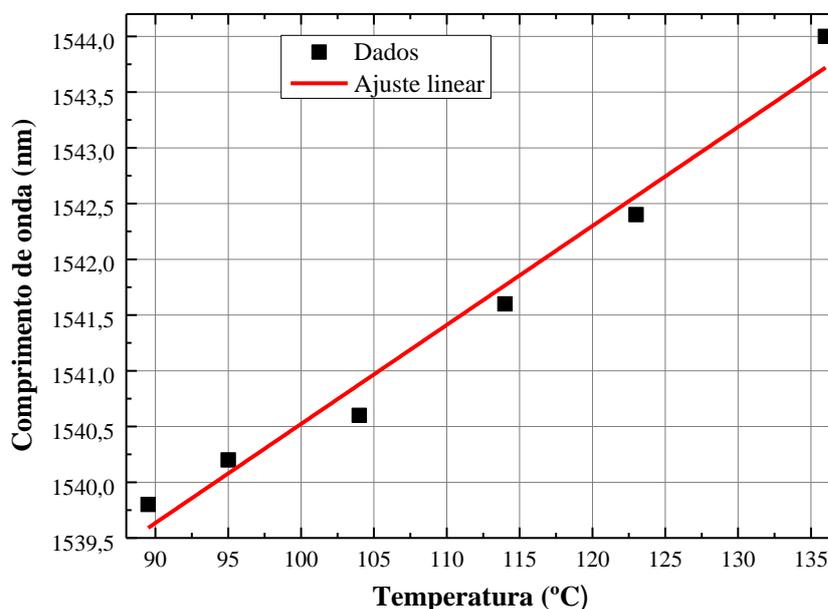


Figura 4. 32 - Resposta do IMFA-AR em termos de variação de comprimento de onda de vales de franjas espectrais em função da temperatura para 89,5 a 136 graus celsius na faixa de 1536 a 1544 nm.

### 4.5.3. Análise de Sensor Híbrido como Sensor de Índice de Refração

Foram realizadas também medidas experimentais com o IMFA-AR para verificar sua resposta como sensor de índice de refração. Os experimentos para medida de índice de refração foram realizados pela inserção do IMFA-AR em uma câmara com água destilada. Os índices de refração foram variados pela adição de ácido acético em água destilada. A determinação dos índices de refração dos líquidos foi feita através do refratômetro de Abbe.

Na faixa entre 1554 nm e 1558 nm foi encontrada uma resposta linear em termos de desvio de comprimento de onda para a faixa de valores de índices de refração de 1,3420; 1,3460; 1,3500; 1,3540; 1,3580; 1,3610; 1,3650 conforme mostrado na Figura 4.33. A sensibilidade encontrada foi de  $\sim 118$  nm/RIU, com valor de  $R^2 \approx 0,96$ .

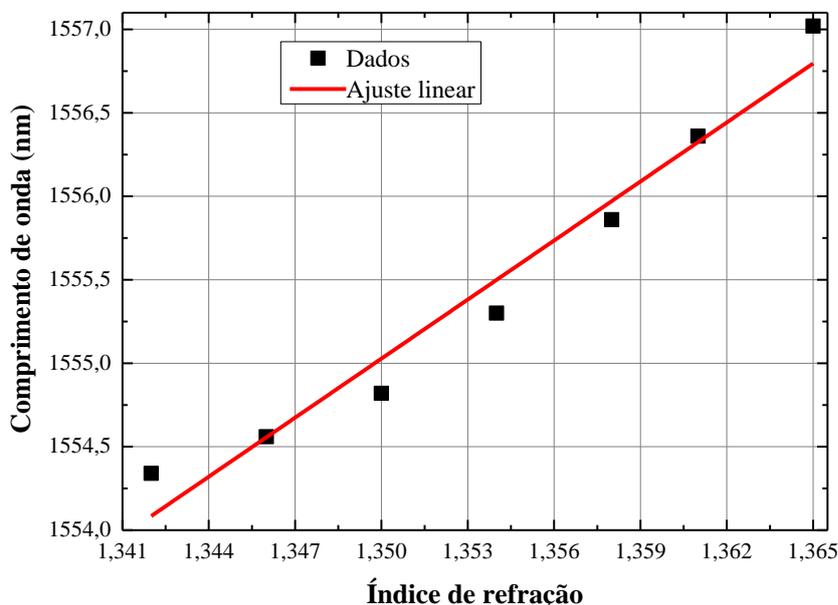


Figura 4. 33 - Desvio de comprimento de onda em função do índice de refração para valores de IR de 1,3420; 1,3460; 1,3500; 1,3540; 1,3580; 1,3610; 1,3650.

Os resultados analisados anteriormente mostraram a resposta sensora do sensor híbrido para a variação de inclinação, temperatura e índice de refração. Visto que o período de picos de franjas dos dois interferômetros é bem próximo um do outro, não é tarefa tão fácil separar a resposta sensora referente a cada interferômetro isoladamente. Por isso, ressalta-se nessa seção a possibilidade de se usar a técnica utilizada em [86], através da transformada de Fourier do espectro obtido do OSA, para discriminar a sensibilidade de cada interferômetro aos parâmetros analisados. Em [86], utilizou-se a transformada de Fourier do espectro gerado por um sensor híbrido de IFP com interferômetro multimodal, passando do domínio de comprimento de onda para frequência espacial. Através da análise dos picos da transformada de Fourier, discriminou-se a resposta à temperatura e índice de refração de cada interferômetro.

Visando mostrar a possibilidade do uso dessa técnica do sensor híbrido utilizado nesse trabalho, fez-se a transformada de Fourier na resposta do sensor híbrido nas medidas de índice de refração discutidas logo acima. A figura 4.34 apresenta a curva resultante da transformada de Fourier do sensor híbrido.

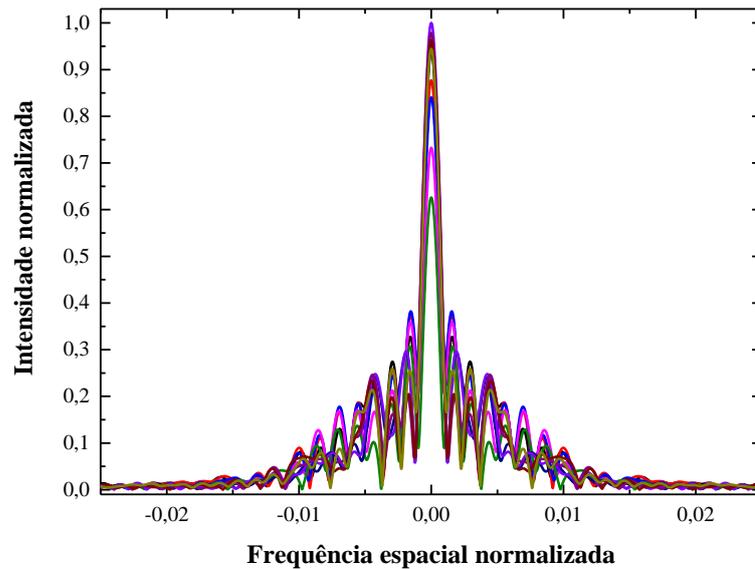


Figura 4.34 - Espectro da transformada de Fourier referente às duas cavidades do interferômetro híbrido.

O pico mais predominante é a componente dc, a qual é referente à fonte banda larga. Ao lado da componente dc existem alguns picos mais pronunciados, sendo o primeiro referente ao IFP, e o segundo ao IM, pois o período referente ao IFP é maior que o do IM. Os demais picos adjacentes são relativos aos harmônicos dos dois primeiros picos.

A figura 4.35 mostra a variação da intensidade normalizada dos picos de Fourier referentes às cavidades do IFP e IM para as faixas de índice de refração de 1,336, 1,339, 1,342, 1,35, 1,354, 1,361, 1,37.

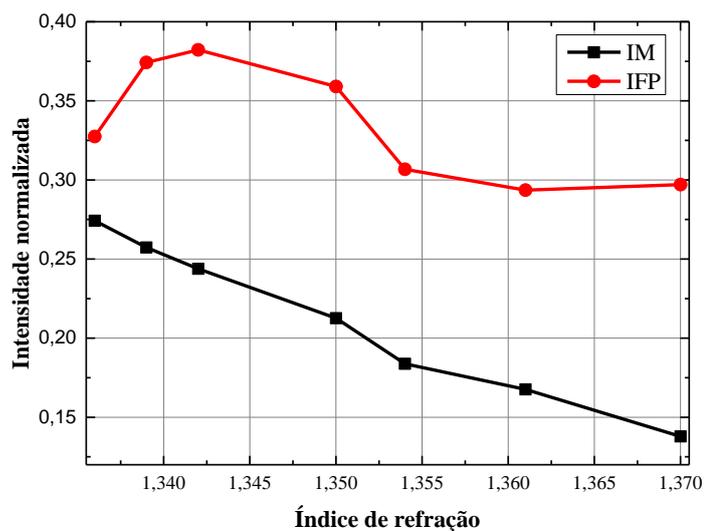


Figura 4.35 – Intensidade normalizada de Fourier referente aos interferômetros de Michelson e de Fabry-Perot em função dos valores de IR de 1,336, 1,339, 1,342, 1,35, 1,354, 1,361, 1,37.

Observa-se que as respostas do IM e do IFP, em termos de amplitude dos picos da transformada de Fourier, apresentam diferenças em função do valor de IR, dentro da faixa analisada. A intensidade dos picos de Fourier do IFP varia de forma não linear entre valores de IR entre 1,336 e 1,354 e tem resposta praticamente constante entre 1,354 e 1,37. Por outro lado, o IM tem uma resposta linear e decrescente, em termos dos picos de Fourier, dentro de toda a faixa de IR considerada, de 1,336 até 1,37. A figura 4.36 exhibe a curva da variação da intensidade normalizada do pico de Fourier referente ao IM em função de IR. A sensibilidade obtida de cerca de  $-0,04$  para cada variação de índice de refração de  $0,01$ , com  $R^2 \approx 0,98$ .

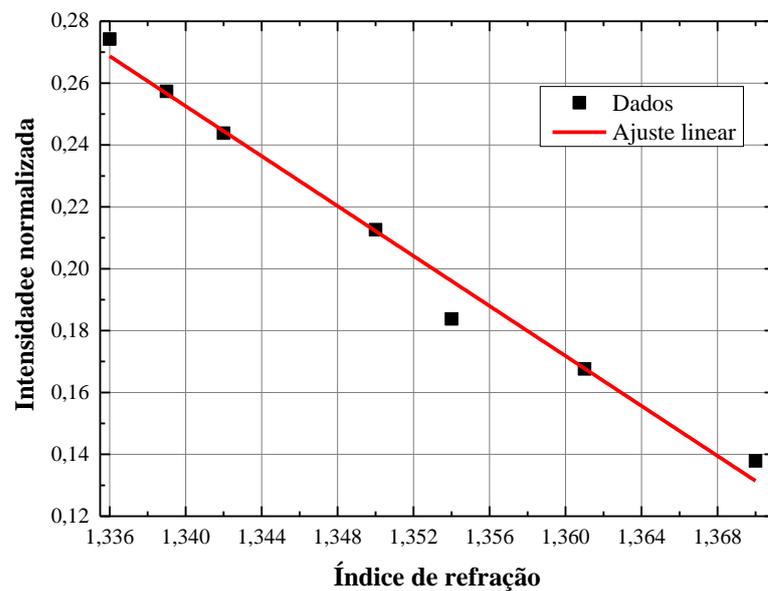


Figura 4.36 – Intensidade normalizada de Fourier referente ao interferômetros de Michelson em função dos valores de IR de 1,336, 1,339, 1,342, 1,348, 1,354, 1,361, 1,367.

Observa-se que a resposta do sensor híbrido pode ser monitorada através da técnica da transformada de Fourier e possibilita isolar a resposta sensora referente a cada interferômetro. Essa técnica permite também analisar a resposta do sensor para dois parâmetros físicos diferentes, tais como temperatura e índice de refração, e perceber como cada interferômetro se comporta a cada um deles, permitindo até mesmo avaliar a sensibilidade cruzada dos dois parâmetros e isolá-los [86].

## **4.6. Considerações Finais**

Os resultados experimentais abordados nesse capítulo bem como os obtidos através de simulações numéricas mostrados no capítulo 3 mostram o grande potencial de se usar dispositivos baseados em fibra com afunilamento para medir parâmetros como inclinação, índice de refração e temperatura. Existe uma gama de possibilidades a serem exploradas por esses dispositivos através de otimização de parâmetros do afunilamento ou associando afunilamento com outras tecnologias em fibra óptica.

O próximo capítulo apresentará as conclusões obtidas nesse trabalho e irá sugerir algumas propostas para prosseguimento de pesquisa no campo de sensores baseados nos dispositivos analisados nesse trabalho.

## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, o dispositivo baseado em SMF com seção afunilada foi testado numérica e experimentalmente como sensor de curvatura, de índice de refração e de temperatura atuando como interferômetro de Mach-Zehnder ou Michelson. Análise numérica e experimental foi realizada nesse dispositivo através do monitoramento da potência na saída do mesmo em função da variação de curvatura.

O dispositivo analisado nesse trabalho apresenta como grande vantagem ser de fabricação simples e de baixo custo, quando comparado a outras tecnologias como redes de Bragg, redes de período longo e fibras microestruturadas. Por isso, pode ser uma opção viável para medições de determinados parâmetros até certo limite. Fibra afunilada foi testada como inclinômetro em conjunto com um sistema de interrogação elétrica baseado em dois geradores de função, dois PZTs, duas FBGs, dois fotodiodos e um analisador de espectro elétrico. Esse sistema de interrogação usa a razão entre potências de dois pontos do espectro selecionados pelas duas FBGs. Os resultados apresentados indicaram que a utilização da SMF afunilada como inclinômetro em conjunto com o sistema de interrogação elétrica em questão, pode ser uma opção para medições de inclinação no campo. Visto que essa técnica usa a razão entre intensidade óptica entre dois pontos do espectro, ela mostra-se independente de flutuações de potência óptica. Pode-se também usar a técnica dos mínimos quadrados para selecionar dois pontos do espectro que apresentem grande sensibilidade com alta linearidade para analisar-se analiticamente a resposta do sensor usando a razão de potências entre esses dois pontos. Os resultados das medidas experimentais através do sistema de interrogação elétrica indicaram uma sensibilidade de 0,35 de unidade normalizada por 1 grau de ângulo de inclinação, para valores de inclinação entre 3,5 e 5,5 graus. Uma possível desvantagem desse inclinômetro é que o comprimento da seção a ser medida é bem reduzido, na ordem de 5 a 10 mm.

Analisou-se a resposta da SMF afunilada como sensor de índice de refração na configuração interferométrica. Isto foi feito através de simulações numéricas baseadas na técnica BPM com o dispositivo atuando como interferômetro de Mach-Zehnder, com dois afunilamentos

idênticos na SMF com comprimento e cintura de cerca de 450  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O espaçamento entre os afunilamentos foi em torno de 40 mm. A análise numérica foi usada para prever a resposta da estrutura à variação de índice de refração quando submetida à curvatura. Os resultados numéricos para a estrutura reta foram compatíveis com resultados experimentais reportados na literatura para dispositivos interferométricos semelhantes. A resposta sensora para o dispositivo não curvado é pobre. No entanto, as simulações numéricas indicaram que a sensibilidade à variação de índice de refração foi intensificada ao se curvar a região afunilada. Em determinados raios de curvatura, a resposta sensora assume picos de sensibilidade para determinadas faixas de índice de refração. Os resultados numéricos estimularam a realização de medidas experimentais para analisar a sensibilidade à variação de índice de refração de um interferômetro de Michelson em SMF afunilada e curvada. Então, foi montado um aparato para realizar análise experimental da intensificação da sensibilidade à alteração do índice de refração por submeter a região afunilada da SMF à curvatura. O diâmetro da cintura do afunilamento construído na SMF é bem maior que o usado nas simulações; nas simulações usou-se 80  $\mu\text{m}$ , enquanto no medido foi de cerca de 98  $\mu\text{m}$ . Ainda assim, os resultados confirmaram uma grande melhora na resposta sensora mesmo em faixas de índice de refração bem próximas à da água destilada, o que é bem interessante para monitorar qualidade de água potável. Para o dispositivo não curvado, a sensibilidade para valores de índice de refração de 1,334 a 1,35 é muito baixa,  $\sim 41\text{nm}/\text{RIU}$ . A melhor resposta é obtida para o ângulo de 99 graus (raio de curvatura de 11,6 mm) com  $\sim 378,73\text{ nm}/\text{RIU}$ , representando uma melhora de cerca de 9 vezes em relação ao caso não curvado. Existe a opção também de se utilizar uma inclinação bem menor, de 21 graus ( raio de curvatura de 54,6 mm), e obter-se uma sensibilidade de 341,38 nm/RIU, o que representa uma resposta 8 vezes melhor em relação ao caso reto. Estes resultados são bem melhores do que os obtidos nos sensores de IR, baseados em interferômetros de linha, para a mesma faixa de índice de refração reportados em [32], [68] e [69], onde os valores de sensibilidade variaram entre 17,65 a 32,95 nm/RIU. O IMFAC também teve desempenho superior em comparação com o sensor de IR, baseado em uma fibra especial curvada que apresenta alta perda por curvatura, que foi reportado em [67]. Nessa abordagem, o valor da sensibilidade obtida foi de cerca de 167 nm/RIU para a faixa próxima a 1,333, o que representa menos da metade da sensibilidade obtida com o IMFAC para a mesma faixa.

Na faixa de índice de refração entre 1,397 e 1,405, a sensibilidade variou de 134 nm/RIU para o sensor não curvado contra 1506 nm/RIU para o sensor curvado em um raio de curvatura de 17,4 mm (66 graus). Nesse caso, a resposta sensora elevou-se em torno de 11

vezes em comparação com o sensor reto. Em [67], com a utilização da técnica da aplicação de curvatura em uma fibra especial, obteve-se cerca de 1154 nm/RIU para valor de IR próximo de 1,4, o que representa um valor de sensibilidade menor, embora próximo, ao obtido com o IMFAC que foi de cerca de 1506 nm/RIU. Notou-se que o interferômetro de Michelson em fibra afinada e curvada apresenta uma resposta sintonizável. De acordo com a faixa de índice de refração é possível escolher um determinado raio de curvatura que oferece maior sensibilidade.

O interferômetro de Michelson em SMF afinada foi testado como sensor de temperatura. O IMFA foi colocado sobre um disco térmico no qual variou-se a temperatura entre 24,7 °C e 64 °C. A sensibilidade do sensor na faixa de temperatura considerada é de cerca de 82 pm/°C, que é cerca de oito vezes maior que o valor típico de sensibilidade das FBGs reportadas na literatura (cerca de 13 pm/°C).

Realizou-se análise numérica e experimental da SMF afinada atuando como sensor de curvatura, mas dessa vez, ao invés de se usar configuração interferométrica, o dispositivo foi avaliado em termos de transmissão de potência. Através do BPM, avaliou-se como a potência transmitida variou em função da curvatura aplicada na região que envolve o afinamento. As simulações indicaram uma variação decrescente quadrática da potência transmitida à medida que a curvatura na região afinada aumentava. Simulou-se também a variação de parâmetros do afinamento e comparou-se sua resposta com a obtida com o afinamento original. Notou-se que houve uma boa intensificação da sensibilidade do sensor à curvatura quando as dimensões do afinamento foram variadas de 450 µm de comprimento e 80 µm de diâmetro da cintura para valores de comprimento e diâmetro da cintura de 1200 µm e 30 µm, respectivamente. A análise experimental dessa estrutura indicou uma boa concordância com os resultados simulados.

Foram realizadas medidas experimentais com uma configuração que combina dois interferômetros, o interferômetro de Michelson baseado em fibra com afinamento seguido de uma cavidade de ar. Essa configuração permite uma maior flexibilidade no manuseio do dispositivo, uma vez que, a seção do dispositivo após a cavidade de ar não faz mais parte da cabeça sensora e pode ser colada, fixada, curvada, enfim manuseada para fixação no local em que irá atuar. Este dispositivo também torna-se interessante quando se é possível separar o desempenho de cada cavidade como sensor. Foi mostrada a possibilidade de se utilizar a técnica de transformada de Fourier dos espectros, convertendo do domínio de comprimento de

onda para o domínio de frequência espacial, e assim, monitorar a resposta sensora de cada cavidade.

Conforme foi demonstrado nessa tese, existe grande potencial de desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica afunilada para monitorar três importantes parâmetros físicos relacionados ao meio ambiente, índice de refração, temperatura e curvatura. Há um campo enorme ainda a ser explorado com os tipos de sensores tratados nessa tese, para sensoriar, além dos parâmetros analisados nessa tese, outros parâmetros físicos e químicos, tais como, tensão longitudinal, fluxo de gases e líquidos, pH, vibração, ultrassom, entre outros.

## **5.1. Propostas de Trabalhos Futuros**

Certamente, há muito ainda a ser explorado em futuros trabalhos na linha de pesquisa discutida nessa tese. Algumas sugestões para a continuação dessa pesquisa são dadas a seguir:

- Estudar a variação de sensibilidade do inclinômetro baseado em interferômetro de Michelson em fibra afunilada pela alteração dos parâmetros do afunilamento e do comprimento da seção curvada. A análise desse sensor baseado em SMF afunilada e curvada pode ser feita de forma mais aprofundada, tanto numérica quanto experimentalmente.
- Análise numérica minuciosa para avaliar o comportamento dos modos à medida que a fibra com afunilamento é curvada e seus parâmetros de afunilamento são alterados. Dessa forma, pode-se tentar prever de forma mais precisa a resposta sensora à variação de índice de refração em função da curvatura e dos parâmetros do afunilamento.
- Experimentos futuros utilizando a fibra afunilada associada à curvatura como sensor de índice de refração podem ser realizados com um aparato mais complexo que permita que o líquido fique em contato com todo o comprimento da cavidade interferométrica, ou seja, do afunilamento à ponta da fibra clivada, e não apenas com a seção próxima ao afunilamento. Dessa forma pode obter-se maior sensibilidade ao índice de refração mantendo-se as mesmas características do sensor.

- Estudar a influência que a curvatura em interferômetros de Mach-Zehnder e Michelson, baseados em fibra afunilada, pode ter na temperatura, o que permitirá analisar sensibilidade cruzada e discriminar os efeitos na temperatura e no índice de refração. Tal análise pode inclusive lançar luz acerca dessa abordagem sendo usada como sensor de temperatura.
- A configuração de fibra afunilada monitorada na transmissão pode ser testada como sensor de índice de refração monitorado na transmissão de potência. Pode-se curvar a estrutura em diversos raios de curvatura e analisar a resposta à variação de índice de refração em termos de potência transmitida. Um sensor de índice de refração de construção e funcionamento simples pode ser desenvolvido com essa abordagem.
- Existe um fértil campo de exploração do sensor híbrido de interferômetro de Michelson e Fabry-Perot baseado em SMF afunilada e com cavidade de ar em sua extremidade. Pode ser feita modelagem para analisar numericamente esse dispositivo para obter a resposta separada referente a cada cavidade bem como avaliar a sensibilidade cruzada entre o parâmetro analisado e a temperatura. Certamente, após obter-se resultados numéricos dessa estrutura, seria muito interessante tentar comprovar experimentalmente esses resultados. A utilização da técnica de transformada de Fourier para discriminar a atuação dos dois interferômetros pode ser estudada e aplicada com mais profundidade.
- Seria interessante incluir métodos probabilísticos na análise de medidas experimentais com os dispositivos discutidos nessa tese. Nesse caso, as medidas poderiam ser repetidas diversas vezes, possibilitando que figuras de mérito, tais como, média, desvio padrão e incerteza sejam obtidas.

## 5.2. Lista de Artigos Publicados e Aceitos

Os artigos publicados e aceitos com os resultados desse trabalho foram os seguintes:

- Silveira, C. R.; Costa, J. C. W. A.; Giraldi, M. T. R.; Franco, M. A. R. ; Jorge, P. A. S., López-Barbero, A. P., Germano, S. B. “ A Bent Optical Fiber Taper for Refractive Index Measurements with Tunable Sensitivity”. Microwave and Optical Technology Letters. Aceito em dezembro de 2014.

- Silveira, C. R.; Costa, J. W. A.; Giraldi, M. T. M. R.; Franco, M. A. R.; Jorge, P. A. S.; Costa, Martins, Costa, M. F. “Enhancement of refractive index sensitivity of the in-line Mach-Zehnder interferometer through bending”. In: 8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications, 2013, Porto, Portugal, p. 8785FM.
- Silveira, C. R.; Costa, J. C. W. A.; Giraldi, M. T. R.; Franco, M. A. R. ; Jorge, P. A. S. A bent in-line Mach-Zehnder interferometer sensor to increase refractive index sensitivity”, In: 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2013, Rio de Janeiro. 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC).
- Silveira, C. R.; Costa, J. C. W. A.; Carvalho, J. P.; Jorge, P. A. S.; Giraldi, M. T. M. “Sensor de temperatura baseado em fibra monomodo padrão com afunilamento”. In: MOMAG, 2012, João Pessoa, Brazil. 15º SBMO Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2012.
- Silveira, C. R.; Carvalho, J. P.; Jorge, P. A. S.; Costa, J. C. W. A.; Giraldi, M. T. R.; Santos, J. L.; Carvalho Júnior E. L.; Figueredo, D. O.; Costa, M. F.; Frazão, O. “Interferometric optical fiber inclinometer with dynamic FBG based interrogation”. In: International Conference on Applications of Optics and Photonics, 2011, Braga, Portugal, v. 8001, p. 800145-130.
- Silveira, C. R.; Jorge, P. A. S.; Costa, J. C. W. A.; Giraldi, M. T. M.; Frazão, O. “Refractometer based on a tapered single mode fiber”. In: IX Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors (SEON), 2011, Aveiro, Portugal. Proceedings of the IX Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, 2011. v. 1. p. 156-162.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Byeong Ha Lee et al. **Interferometric Fiber Optic Sensors**. *Sensors* 2012, 12, 2467-2486;doi:10.3390/s120302467.
2. S. Yin, P. B. Ruffin, F. T. S. Yu, **Fiber Optic Sensors**, 2nd Ed., Crc Press, 2008.
3. K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, **Optical Fiber Sensor Technology**, Chapman & Hall: Orange, CA, USA, 1995.
4. Y. H. Kim, M.J. Kim, B. S. Rho, M. S. Park, J. -H. Jang, B. H. Lee, **Ultra sensitive fiber-optic hydrogen sensor based on high order cladding mode**. *IEEE Sens. J.* 2011, 11, 1423-1426.
5. V. Lanticq, M. Quiertant, E. Meriliot, S. Delepine-Lesoille, **Brillouin sensing cable: Design and experimental validation**. *IEEE Sens. J.* 2008, 8, 1194-1201..
6. A.K. Sharma, R. Jha,; B.D. Gupta, **Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: A comprehensive review**. *IEEE Sens. J.* 2007, 7, 1118-1129.
7. A. Iadicicco, S. Campopiano, A. Cutolo, M. Giordano, A. Cusano, **Refractive index sensor based on microstructured fiber Bragg grating**. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2005, 17, 1250-1252.
8. L. Zhang, J. Lou, L. Tong, **Micro/nanofiber optical sensors**. *Photon. Sen.* 2011, 1, 31-42.
9. B. H. Lee et al. **Specialty fiber coupler; Fabrications and applications**. *J. Opt. Soc. Korea* 2010, 14, 326-332.
10. Y. J. Rao, **Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry Perot interferometric sensors**. *Opt. Fiber Technol.* 2006, 12, 227-237.
11. P. Prerana, R. K. Varshney, B. P. Pal, B. Nagaraju, **High sensitive fiber optic temperature sensor based on a side-polished single-mode fiber coupled to a tapered multimode overlay waveguide**. *J. Opt. Soc. Korea* 2010, 14, 337-341.
12. L. A. Ferreira, A.B.L. Ribeiro, J. L.Santos, F. Farahi, **Simultaneous measurement of displacement and temperature using a low finesse cavity and a fiber Bragg grating**. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1996, 8, 1519-1521.
13. J. Y. Cho, J. H. Lim, K. H. Lee, **Optical fiber twist sensor with two orthogonally oriented mechanically induce long-period grating sections**. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2005, 17, 453-455. *Sensors* 2012, 12 2482.
14. A. Wang et al. **Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors**. *J.*

- Lightw. Techol. 2001, 19, 1495-1501.
15. D.W. Kim, F. Shen, F., X. Chen, A. Wang, **Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a reflection-mode long-period grating and an intrinsic Fabry-Perot interferometer sensor**. Opt. Lett. 2005, 30, 3000-3002.
  16. W. S. Choi, M. S. Jo, **Accurate evaluation of polarization characteristics in the integrated optic chip for interferometric fiber optic gyroscope based on path-matched interferometry**. J. Opt. Soc. Korea 2009, 13, 439-444.
  17. P. C. Beard, F. Perennes, E. Draguioti, T. N. Mills, **Optical fiber photoacoustic-photothermal probe**. Opt. Lett. 1998, 23, 1235-1237.
  18. X. Wang, J. Xu, Y. Zhu, K. L. Cooper, A. Wang, **All-fused-silica miniature optical fiber tip pressure sensor**. Optics Letters, Vol. 31, Issue 7, pp. 885-887 (2006) <http://dx.doi.org/10.1364/OL.31.000885>.
  19. Brian Culshaw, and Alan Kersey, **Fiber-Optic Sensing : A Historical Perspective**. Journal of Lightwave Technology, Vol. 26, N° 9, May, 2008.
  20. ByoungHo Lee. **Review of the present status of optical fiber sensors**. Optical Fiber Technology 9 (2003) 57–79. doi:10.1016/S1068-5200(02)00527-8.
  21. F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, L. S. Pedrotti, **Introduction to Optics**; Pearson International: Upper Saddle River, NJ, USA, 2007.
  22. X. Wan, H. F. Taylor, **Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors**. Opt. Lett. 2002, 27, 1388-1390.
  23. Z. Wang, F. Shen, L. Song, X. Wang, A. Wang, **Multiplexed fiber Fabry-Pérot nterferometer sensors based on ultrashort Bragg gratings**. IEEE Photon. Technol. Lett. 2007, 19, 622-624.
  24. J. R. Zhao, X. G. Huang, W. X. He, J. H. Chen, **High-resolution and temperature-insensitive fiber optic refractive index sensor based on fresnel reflection modulated by Fabry-Perot interference**. J. Lightw. Techol. 2010, 28, 2799-2803.
  25. P. Morris, A. Hurrell, A. Shaw, E. Zhang, P. Beard, **A Fabry-Perot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure**. J. Acoust. Soc. Am. 2009, 125, 3611-3622.
  26. K. P. Koo, M. L. LeBlanc, T. E. Tsai, S. T. Vohra, **Fiber-chirped grating Fabry-Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges**, IEEE Photon. Technol. Lett. 1998, 10, 1006-1008.

27. H. Y. Choi, M. J. Kim, B. H. Lee, **All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber**. *Opt. Express* 2007, 15, 5711-5720.
28. H.Y. Choi, K. S. Park, B. H. Lee, **Photonic crystal fiber interferometer composed of a long period fiber grating and one point collapsing of air holes**. *Opt. Lett.* 2008, 33, 812-814.
29. Y. H. Kim, M. J. Kim, M. S. Park, J. H. Jang, K. T. Kim, B. H. Lee, **Hydrogen sensor based on a palladium-coated long-period fiber grating pair**. *J. Opt. Soc. Korea* 2008, 12, 221-225.
30. L.V. Ngyuen, D. Hwang, S. Moon, D. S. Moon, D.S., Y. J. Chung, **High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch**. *Opt. Express* 2008, 16, 11369-11375.
31. J. J. Zhu, A. P. Zhang, T. H. Xia, S. He, W. Xue, W. **Fiber-optic high-temperature sensor based on thin-core fiber modal interferometer**. *IEEE Sens. J.* 2010, 10, 1415-1418.
32. Z. Tian et al, **Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers**. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2008, 20, 626-628.
33. P. Lu, L. Men, K. Sooley, Q. Chen, **Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature**. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 94, doi:10.1063/1.3115029.
34. L.-B. Yuan, L.M. Zhou, J. S. Wu, **Fiber optic temperature sensor with duplex Michelson interferometric technique**. *Sens. Actuat. A* 2000, 86, 2-7.
35. R. Kashyap, B. Nayar, **An all single-mode fiber michelson interferometer sensor**. *J. Lightw. Techol.* 1983, LT-1, 619-624.
36. K. T. O'Mahoney, R. P. O'Byrne, S. V. Sergeryev, L. Z. Zhang, I. Bennion, **Short-scan fiber interferometer for high-resolution Bragg grating array interrogation**. *IEEE Sens. J.* 2009, 9, 1277-1281.
37. Y. Zhao, F. Ansari, **Intrinsic single-mode fiber-optic pressure sensor**. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2001, 13, 1212-1214.
38. Nannapaneni Narayana Rao, **Elements of Engineering Electromagnetics**. Sixth Edition. Pearson Prentice Hall. 2004.
39. Tamara V. Tulaikova, **New Kind of Sensors Based on Amalgamation of Fiber Optic and Seaweed to Control Pollution in a Water**, 1st Annual International IEEE-EMBS

Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine & Biology, Lyon, France - 0-7803-6603-4/00/\$10.0002000 IEEE, October 12-14,2000.

40. Yang Zhao, Yanbiao Liao, Bo Zhang and Shurong Lai, **Monitoring Technology of Salinity in Water With Optical Fiber Sensor**, Journal of Lightwave Technology, vol 21, No. 5, maio, 2003.
41. M. Campbell, **Sensor Systems for Environmental Monitoring**, Vol. 2. 1996: Springer.
42. João Miguel Dias, J.F.L., Ivan Dekeyser, **Tidal Propagation in Ria de Aveiro Lagoon**, Portugal. Physics and Chemistry of the Earth, 2000. 25.
43. Michel Moreira Morandini. **Contribuição para o desenvolvimento da metodologia de análise, gestão e controle de riscos geotécnicos para a área urbana da cidade de Ouro Preto**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto - 2011.
44. <http://moho.iag.usp.br/sismologia/tectonica.php> (Capturado em 27/12/2014 ).
45. Rsoft, BeamPROP Manual, 2013
46. R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla, and S. Helfert, **Numerical Techniques for Modeling Guided-Wave Photonic Devices**, J. Selected Topics in Quantum Electronics 6, 150 (2000).
47. R. Scarmozzino and R.M. Osgood, Jr., **Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications**, J. Opt. Soc.Amer. A 8, 724 (1991).
48. G. R. Hadley, **Transparent boundary condition for the beam propagation method**, Opt. Lett. 16, 624, (1991); G. R. Hadley, **Transparent boundary condition for the beam propagation method**, J. Quantum Electron 28, 363 (1992).
49. G. R. Hadley, **Wide-angle beam propagation using Pade approximant operators**, Optics Letters 17, 1426, (1992);
50. G. R. Hadley, **Multistep method for wide-angle beam propagation**, Optics Letters 17, 1743 (1992).
51. M. D. Feit and J. A. Fleck, **Light propagation in graded-index optical fibers**, Appl. Opt. 17, 3990 (1978).
52. D. Yevick and B. Hermansson, **Efficient beam propagation techniques**, J. Quantum Electron. 26, 109 (1990).

53. Y. Chung and N. Dagli, **An assessment of finite difference beam propagation method**, J. Quantum Electron 26, 1335 (1990).
54. W. P. Huang, C. L. Xu, W. Lui, and K. Yokoyama, **The perfectly matched layer (PML) boundary condition for the beam propagation method**, Photon. Technol. Lett. 8, 649 (1996).
55. C. Vassalo and F. Collino, **Highly efficient absorbing boundary condition for the beam propagation method**, J. Lightwave Technol.14, 1570 (1996).
56. Y. P. Chiou and H.C. Chang, **Complementary operators method as the absorbing boundary condition for the beam propagation method**, Photon. Technol. Lett. 8, 976 (1998).
57. J. D. Love, W. M. Henry, W. J. Stewart, R. J. Black, S. Lacroix, and F. Gonthier, **Tapered single-mode fibres and devices. Part 1: Adiabaticity criteria**. IEE Proc.138, 343 (1991).
58. L. C. Bobb, P. M. Shankar, and H. D. Krumboltz, **Bending Effects in Biconically Tapered Single-ModeFibers**, J. Lightwave Technol.,vol. 8, no. 7, Jul., 1990.
59. M. I. Zibaii et al. **Non-adiabatic tapered optical fiber sensor for measuring the interaction between  $\alpha$ -amino acids in aqueous carbohydrate solution**. Meas. Sci. Technol. 21 (2010) 105801 (12pp).
60. Quoc Kieu K. et al. **Biconical fiber taper sensor**. IEEE Photonics Technol. Lett. 18 2239–41, 2006.
61. G. Kakarantzas et al. **Miniature all-fiber devices based on CO<sub>2</sub> laser microstructuring of tapered fibers**, Opt. Lett. 26 1137–9. (2001).
62. Hong S. Haddock, P. M. Shankar, R. Mutharasan. **Fabrication of biconical tapered optical fibers using hydrofluoric acid**. Materials Science and Engineering B97 (2003) 87/93.
63. M. Jesús et al, **Design of humidity sensors based on tapered optical fibers**, J. Lightwave Technol.244 329–36, 2006.
64. T. Allsop, R. Reeves, D. J. Webb, I. Bennion, and R. Neal, **A high sensitivity refractometer based upon a long period grating Mach–Zehnder interferometer**, Rev. Sci. Instrum., vol. 73, no. 4, pp. 1702–1705, Apr. 2002.

65. O. Frazão, P. Caldas, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, and J. L. Santos, **Optical flowmeter using a modal interferometer based on a single non adiabatic fiber taper**, *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 14, pp. 1974-1976, Jul., 2007.
66. L. M. N. Amaral, O. Frazão, J. L. Santos and A. B. Lobo Ribeiro, **Optical inclinometer based on fibre-taper-modal Michelson**. Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2010.
67. P. Wang et al, **A Macrobending Singlemode Fiber Refractive Index Sensor for Low Refractive Index Liquids**, *Photonics Letters of Poland*, Vol. 2 (2), (2010)pp. 67-69.
68. Zhaobing Tian, and Scott S.-H. Yam, **In-Line Single-Mode Optical Fiber Interferometric Refractive Index Sensors**, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, N°. 13, July 1, 2009.
69. Jin-fei Ding et al. **Fiber-Taper Seeded Long-Period Grating Pair as a Highly Sensitive Refractive-Index Sensor**, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 17, 1247–9, 2005.
70. Liu, Guigen, Li, Kaiwei et al. **Bent optical fiber taper for refractive index detection with a high sensitivity**, *Sensors and Actuators A: Physical*. vol. 201, pp. 352-356, 2013. DOI: 10.1016/j.sna.2013.07.041.
71. Li-Peng Sun, Jie Li, Long Jin, Bai-Ou Guan. **Refractive index sensitivity enhancement by bending fiber taper modal interferometer**, *Asia Communications and Photonics Conference 2014*. vol. 2, 2014. DOI: 10.1364/ACPC.2014.ATh3A.200.
72. R. Baets and P. E. Lagasse, **Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides**, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 73, no. 2, pp. 177-182, Feb., 1983.
73. Kai Ni, Xinyong Dong, Shaoling He, Haisong Xu, **Temperature-Independent Inclination Management with Fiber Bragg Grating sensor**, *CLEO / Pacific Rim 2009*. Shanghai, China. September, 2009.
74. B.-O. Guan, H.-Y. Tam, and S.-Y. Liu, **Temperature independent fiber Bragg grating tilt sensor**, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 224–226 Jan., 2004.
75. K. Ni, X. Dong, Y. Jin, and H. Xu, **Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor**, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, no. 10, pp. 2250-2252, Oct., 2010.
76. L. M. N. Amaral, O. Frazao, J. L. Santos, and A. B. Lobo Ribeiro, **Fiber-Optic Inclinometer Based on Taper Michelson Interferometer**, *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 9, pp. 1811-1814, Sep., 2011.

77. L.-y. Shao and J. Albert, **Novel fiber optical inclinometer based on a concatenated fused taper and tilted fiber Bragg grating**, in Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), San José, CA, 2010.
78. O. Frazão, R. Falate, J. L. Fabris, J. L. Santos, L. A. Ferreira, and F. M. Araújo, **Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper**, Opt. Lett., vol. 31, pp. 2960-2962, Oct., 2006.
79. <http://www.topografiageral.com/Curso/capitulo%2008.php> (Capturado em 27/12/2014).
80. K. T. Kim, J. H. Kang, and S. Hwangbo, **In-line Variable Optical Attenuator Based on the Bending of the Tapered Single Mode Fiber**, Journal of the Optical Society of Korea, vol. 13, no. 3, pp. 349-353, Sep., 2009.
81. J. P. Carvalho et al. **Dynamic interrogation of long period gratings with modulated fibre Bragg gratings**. Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors, Proc. of SPIE Vol. 7653. 2010 SPIE.
82. Zhaobing Tian, and Scott S.-H. Yam, **Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber**, Optics Letters, Vol. 33, N° 10, pp. 1105-1107, May, 2008.
83. L. G. Cohen, and J. W. Fleming, **Effect of temperature on transmission in lightguides**, The Bell System Technical Journal, Vol. 58, N° 4, April, 1979.
84. Regina Célia da Silva Barros Allil. **Sensores a fibra óptica com tecnologia FBG para medida de temperatura e alta tensão**. Tese de doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.
85. J. G. Aguilar-Soto, J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez Mondragon, and D. A. May-Arrijoja, **Fiber optic temperature sensor based on multimode interference effects**, J. Phys.274, 012011 (2011).
86. Hae Young Choi et al. **Cross-talk free and ultra-compact fiber optic sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index**. Optics express. vol 18. pp. 141-9. 2010.