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

TÍTULO DO TRABALHO

Sensor Óptico de Curvatura Baseado em Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo Aplicado para Medição de Escoamento

NOME DO AUTOR

Victor Henrique Rodrigues Cardoso

DM 24/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

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

NOME DO AUTOR

Victor Henrique Rodrigues Cardoso

TÍTULO DO TRABALHO

Sensor Óptico de Curvatura Baseado em Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo Aplicado para Medição de Escoamento

DM 24/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

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

NOME DO AUTOR

Victor Henrique Rodrigues Cardoso

TÍTULO DO TRABALHO

Sensor Óptico de Curvatura Baseado em Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo Aplicado para Medição de Escoamento

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, ênfase em Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696s Rodrigue Cardoso, Victor Henrique
Sensor Óptico de Curvatura Baseado em Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo Aplicado para Medição de Escoamento / Victor Henrique Rodrigue Cardoso. — 2019.
54 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
Coorientação: Profª. Dra. Cindy Stella Fernandes
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Sensor Óptico de Curvatura. 2. Sensor Óptico de Escoamento. 3. SMSMS. 4. Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo. I. Título.

CDD 621.3

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

SENSOR ÓPTICO DE CURVATURA BASEADO EM TÉCNICA DE DESCASAMENTO DE DIÂMETRO DE NÚCLEO APLICADO PARA MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO

AUTOR: VICTOR HENRIQUE RODRIGUES CARDOSO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 02/09/2019

BANCA EXAMINADORA:

.....

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa (ORIENTADOR - UFPA)

.....

Profa. Dra. Cindy Stella Fernandes (CO-ORIENTADORA - UNIFESSPA)

.....

Prof. Dr.Marcos Benedito Caldas Costa (AVALIADOR INTERNO - PPGEE/UFPA)

.....

Profa. Dra. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi (AVALIADOR EXTERNO - IME)

.....

Prof. Dr. Marcelo Oliveira e Silva (AVALIADOR EXTERNO - PPGEM/UFPA)

VISTO:

.....

Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes

COORDENADORA DO PPGEE/ITEC/UFPA

Dedico esta dissertação à Deus e

à minha família, pois sem seus incentivos

eu não conseguiria chegar onde cheguei.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo fôlego de vida e pela saúde que tem me dado e porque ele é aquele a quem tudo devo.

À minha família que guiaram meus passos, compartilharam dos meus ideais e os alimentaram incentivando-os a prosseguir nesta jornada.

Ao professor Dr. João Weyl, pela oportunidade oferecida à mim, pela orientação durante a elaboração da dissertação, pela amizade, pelo profissionalismo, pela compreensão, dedicação e paciência, que fez deste trabalho uma realidade. À professora Dra. Cindy Stella Fernandes, pelas co-orientações relacionadas ao trabalho. À Profa. Dra. Maria Thereza M. R. Giraldi, pelas orientações que me passou e por sempre se mostrar disponível para oferecer ajuda e sugestões concernentes a esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcelo por deixar a disposição o Laboratório de Vapor da UFPA para que os testes fossem realizados e pelo auxilio na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos Luany e Perdigão da Engenharia Mecânica pelo apoio operacional na realização dos testes no Laboratório de Vapor.

Aos meus amigos do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado pelo companheirismo e por contribuírem direta ou indiretamente com a elaboração deste trabalho.

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

Ao CNPq e à CAPES, pelo apoio financeiro.

E à todos aqueles que não foram mencionados aqui mas que em algum momento estiveram comigo nesta caminhada.

"Agradeça os desafios. Obstáculos e dificuldades fazem parte da vida.
Desafios são importantes para o nosso crescimento pessoal em todas as áreas da vida.
Estimulam o cérebro, pois temos que buscar novos caminhos.
sem desafios não haveria evolução."

-Autor desconhecido.

"Não perca a motivação só porque as coisas não
estão correndo como o previsto. Adversidade gera
sabedoria e é isso que levará você ao sucesso."

-Autor desconhecido.

Resumo

Essa dissertação tem como objetivo o estudo da propagação de potência óptica na estrutura baseada em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, Monomodo-Multimodo-Monomodo-Multimodo-Monomodo (SMSMS - *Singlemode-Multimode-Singlemode-Multimode-Singlemode*) com curvatura visando aplicação como alternativa de baixo custo, fácil fabricação e aceitável sensibilidade para medição de escoamento em tubulações. As duas seções multimodo presentes no sensor atuam como acoplador e reacoplador de modos de núcleo e casca, e a seção monomodo ao meio age como elemento de sensoriamento. A estrutura foi analisada por meio de medidas experimentais e simulações numéricas. Foram feitas análises experimentais para medição de curvatura e para medição de escoamento. A estrutura enquanto esticada apresenta um padrão de interferência e quando é curvada outros padrões são gerados. A modelagem numérica foi feita utilizando o método de propagação de feixe por diferenças finitas por meio do uso do *software* BeamProp 9.0 da empresa RSoft^{TM}. Resultados demonstram que aplicabilidade como sensores de curvatura e medição de escoamento é viável.

PALAVRAS-CHAVES: Sensor óptico de curvatura, Sensor óptico de escoamento, SMSMS, Técnica de descasamento de diâmetro de núcleo.

Abstract

This work aims to study the propagation of optical power in the structure based on core diameter mismatch technique (CDM), Singlemode-Multimode-Singlemode-Multimode-Singlemode (SMSMS), with curvature aiming at application as the low cost alternative, easy fabrication and acceptable sensitivity for flow measurement in pipes. The two multimode sections present in the sensor act as a coupler and re-coupler of core and cladding modes, and the singlemode section, in the middle, acts as a sensing element. The structure was analyzed by experimental measurements and numerical simulations. Experimental analyzes were performed for curvature and flow measurement. The structure while stretched presents an interference pattern and when it is bent other patterns are generated. Numerical simulation was performed using the finite difference beam propagation method using software BeamProp 9.0 from the company RSoft ^{TM}. Results demonstrate that applicability as curvature sensors and flow measurement is possible.

KEYWORDS: Optical curvature sensor, Optical flow sensor, SMSMS, Core Diameter Mismatch Technique.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 Contexto do Trabalho 17

1.2 Objetivos 19

1.3 Trabalhos Relacionados 19

1.4 Contribuições 21

1.5 Estrutura do Trabalho 21

2 PRINCIPIO DE SENSORIAMENTO BASEADO EM INTERFEROMETRIA 22

2.1 Introdução ao capítulo 22

2.2 Interferômetro de Mach-Zehnder 23

2.2.1 Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo 24

2.3 Interferência Modal 26

2.3.1 Ponto de Reimagem 27

3 *SETUP EXPERIMENTAL E NUMÉRICO* 29

3.1 *Setup* Numérico 29

3.2 *Setup* Experimental para Análise de Curvatura 31

3.3 *Setup* Experimental para Análise de Escoamento 33

4 RESULTADOS 36

4.1 Introdução 36

4.2 Sensor SMSMS submetido à Curvatura 36

4.3 Sensor SMSMS submetido ao escoamento monofásico 40

4.4 Sensor SMSMS submetido ao escoamento bifásico 41

4.5 Simulação numérica de sensor de curvatura SMSMS baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo monitorado na transmissão 43

5 CONCLUSÕES 47

5.1 Proposta de trabalhos futuros 48

Publicações Oriundas da Pesquisa **50**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **51**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração básica de um Interferômetro de Mach-Zehnder. 23
Figura 2 – Esquemático do sensor proposto baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo. 24
Figura 3 – Interferômetro multimodal formado pela emenda de uma seção MMF entre duas SMFs (SMS) 26
Figura 4 – Esquemático representativo do sensor SMSMS utilizado na simulação numérica. 30
Figura 5 – Processo de construção do sensor SMSMS etapa por etapa. 31
Figura 6 – Esquema ilustrativo do *setup* experimental para análise de curvatura no sensor SMSMS.(a) Equipamentos utilizados para análise de curvatura. (b) Deslocamento do eixo utilizado para gerar curvatura na estrutura. 32
Figura 7 – Setup experimental utilizado para análise de vazão em escoamento monofásico e bifásico. (I) Local que o sensor SMSMS está instalado. (II) Rotâmetro utilizado para monitorar o escoamento. 34
Figura 8 – Esquema ilustrativo do *setup* e demonstração do mecanismo de operação do sensor de curvatura SMSMS para medição de fluxo de água. 34
Figura 9 – Resultados do experimento de resposta à curvatura. (a) Espectro de transmissão da estrutura SMSMS com comprimento MMF de 3 mm. (b) Variação do comprimento de onda em função da mudança de curvatura. 37
Figura 10 – Resultados do experimento de resposta à curvatura. (a) Espectro de transmissão da estrutura SMSMS com comprimento MMF de 4 mm. (b) Variação do comprimento de onda em função da mudança de curvatura. 38
Figura 11 – Resultados do experimento de resposta à curvatura. (a) Espectro de transmissão da estrutura SMSMS com comprimento MMF de 5 mm. (b) Variação do comprimento de onda em função da mudança de curvatura. 39
Figura 12 – Resultados experimentais para comprimento de onda de 1550 nm com comprimento das seções MMF de 3 mm, 4 mm e 5mm. 40
Figura 13 – Potência Óptica em função do fluxo para os dois sensores SMSMS. 41
Figura 14 – Potência Óptica em função do Fluxo comparando o comportamento do sensor SMSMS ao escoamento monofásico e bifásico 42

Figura 15 – Curvas experimentais e simuladas comparadas do sensor de curvatura SMSMS com comprimento MMF de 4 mm 43
Figura 16 – Energia por comprimento da estrutura de fibra SMSMS com comprimento de MMF de 50 μm. (a) 44
Figura 17 – Energia por comprimento da estrutura de fibra SMSMS com comprimento de MMF de 62.5 μm 44
Figura 18 – Energia por comprimento da estrutura de fibra SMSMS com comprimento de MMF de 105 μm 45
Figura 19 – Potência Óptica em função da variação da curvatura no sensor SMSMS com $94,5$ μm e 93.45 μm de diâmetro do núcleo MMF. 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros das fibras SMF-28 (Corning) e MMF - FG105-LCA (Thorlabs) . 29
Tabela 2 – Características de três sensores SMSMS submetidos a testes de curvatura. . 38
Tabela 3 – Características de dois sensores SMSMS submetidos ao escoamento monofásico. 41
Tabela 4 – Características do sensor SMSMS submetido ao escoamento monofásico e bifásico) 42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPM	Beam Propagation Method
CDM	Core Diameter Mismatch
FBG	Fiber Bragg Grating
FD-BPM	Finite Difference Beam Propagation Method
FPI	Fabry-Perot Interferometer
FSR	Free Spectral Range
LPG	Long Period Grating
MI	Michelson Interferometer
MMF	Multimode Fiber
MMI	Multimode Interference
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
OSA	Optical Spectre Analyzer
SHM	Structural Health Monitoring
SLED	Superluminescent LED
SMF	Singlemode Fiber
SMS	Singlemode-Multimode-Singlemode
SMSMS	Singlemode-Multimode-Singlemode-Singlemode-Multimode
TBC	Transparent Boundary Condition

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Trabalho

A utilização de sensores baseados em fibra óptica tem despertado grande interesse em diversos campos de aplicação prática para detecção de parâmetros físicos e mecânicos, como por exemplo, temperatura (1), vibração (2), deslocamento (3) e curvatura (4), devido as suas vantagens em comparação aos sensores convencionais. Os sensores ópticos são capazes de operar em ambientes adversos, resistentes à temperatura, corrosão e pressão, além de serem leves, compactos, inertes, intrinsecamente imunes à interferência eletromagnética, duráveis e não necessitam de uma fonte de energia elétrica externa (5) (6). Os sensores ópticos também podem ser imersos em materiais químicos, como concreto, compósitos, petróleo, óleo, entre outros.

Diversos dispositivos e técnicas estão sendo desenvolvidas para sensoriamento óptico, tais como os sensores baseados em grades de Bragg em fibra (FBG - *Fiber Bragg Gratings*) e interferômetros a fibra óptica, como interferômetro de Fabry-Perót, interferômetro de Mach-Zehnder, interferômetro de Michelson, entre outros (7, 8, 9). Os sensores ópticos baseados em FBG tem motivado a produção de muitas pesquisas nos últimos anos. A característica de sensibilidade intrínseca dos sensores FBGs os torna candidatos comumente utilizados em diversas aplicações, como industrias, aviação, estruturais e ambientais. Sensores baseados em FBGs são sensores que detectam modificações no comprimento da estrutura originadas por efeitos de deformação, curvatura ou tensão, ou por meio da temperatura (dilatação térmica e efeito termo-óptico)(10, 11, 12). Assim, um conjunto de parâmetros podem ser medidos, tais como tensão (13, 14), deslocamento (15), temperatura (14), umidade (16), vazão (17, 18) e radiação (19). As FBGs possuem pequenos elementos intrínsecos que são inscritos utilizando lasers UV de alta potência, de forma periódica, em um curto segmento da fibra óptica (10, 11, 12). Estes elementos atuam como um espelho seletivo de comprimento de onda (λ) ou um filtro de reflexão altamente seletivo em comprimento de onda, o que eleva o seu custo de produção (13). Com isso, surge a necessidade de se realizar estudos para o desenvolvimento de novas técnicas e dispositivos que possuam baixo custo e alta sensibilidade (20, 21).

Sensores Ópticos baseado em Interferômetros de Mach-Zehnder (MZI) tem atraído grande interesse de pesquisa devido à sua estrutura compacta, possuir uma fácil fabricação e

por apresentar um baixo custo de produção. Estas estruturas são formadas pela introdução de um acoplador e reacoplador de modos do núcleo e da casca (22, 23). Isto permite o medição de inúmeros parâmetros como índice de refração, temperatura, curvatura, vibração etc. Entre os parâmetros físicos já mencionados, a curvatura é um importante parâmetro onde a medição da mesma é significativa em várias aplicações, como em monitoramento de saúde estrutural na Engenharia Civil e também existe monitoramento em aplicações industriais, medicina, robótica etc. Realizar o monitoramento nestes tipos de aplicações são extremamente importantes pois elas podem sofrer danos estruturais devido a degradação estrutural, intempéries ambientais e a aplicação inadequada de cargas, o que pode ocasionar em graves acidentes com impactos sócio econômicos e por em risco a segurança.

Muitos sensores de curvatura baseados em fibra óptica são propostas até hoje, as técnicas amplamente conhecidas são as Grades de Longo Período (LPG) (24), FBGs (25), *core-offset fiber*(26), estruturas SMS (27), entre outros. Sensores de curvatura baseados em estruturas SMS oferecem vantagens como baixo custo e fácil fabricação se comparados com dispositivos existentes para medição de curvatura. Aplicações mais simples podem ser mais interessantes para uso em larga escala, sendo uma dessas aplicações a medição de vazão de líquido e gás em um tubo, usualmente chamado de fluxo bifásico. Muito comum em aplicações industriais, como por exemplo, o transporte de petróleo da indústria em dutos, o seu monitoramento preciso é muito importante pois possui grande impacto econômico e na eficiência da produção (17)(28). Além de aplicações industriais, o fluxo bifásico é presente também no transporte de água em sistemas de abastecimento domésticos, que é fornecido por uma companhia de saneamento para um determinado consumidor. A presença de ar neste tipo de aplicação pode impactar diretamente no valor pago pelo consumidor visto que muitos medidores convencionais não conseguem realizar a diferenciação de líquido e gás.

O escoamento bifásico pode ser definido como fluxo simultâneo de dois tipos diferentes de fluidos em uma tubulação que não se misturam. Por exemplo, casos comuns deste tipo de escoamento é o que possui água e gás. Estes podem ocorrer por determinação de projeto ou por acidente (29, 30). A relação entre líquido e gás é um fenômeno tanto que complexo devido as suas características. Para este tipo de escoamento existem padrões de regime que dependem da velocidade das fases, propriedades do fluidos e da orientação na tubulação. A partir disso é possível classificar os regimes com orientação horizontal como: estratificado, borbulhado, em blocos e anular (31).

Os medidores convencionais de água são comumente conhecidos como Hidrômetros. Esse equipamento é responsável por medir e indicar o volume de água que o atravessa, em m^3. O seu princípio é baseado na medição de da vazão. Eles podem ainda ser classificados em velocimétrico e volumétrico. Por medirem vazão, estes não são capazes de distinguir água e ar. O monitoramento em tempo real de parâmetros de fluxo, seja líquido e/ou gás, é muito importante no controle industrial, na produção e na distribuição de água em grandes cidades. Os medidores convencionais baseados em sensor de rotor mecânico são frequentemente aplicados, seu princípio de medição é simples e a técnica bem amadurecida, porém apresenta erro de medição elevado, principalmente se for levado em consideração o fluxo bifásico, pois a presença de ar diminui a precisão de medição, com os desvios podendo chegar até os 11,41% nos medidores convencionais (32)(31). Para o monitoramento de escoamento, tem sido proposto a aplicação de sensores baseados FBG (17). Devido ao seu alto custo de produção, este trabalho tem como motivação a busca por estruturas que possuam custo de produção mais econômicas e de fácil fabricação, que possibilitem maior precisão de medição para monitoramento de escoamento.

1.2 Objetivos

- Desenvolver métodos e dispositivos para sensoriamento baseado em fibra óptica para monitoramento de curvatura e utilizar o principio da curvatura para medir e/ou identificar fluxo de líquido e gás, que sejam fáceis de se fabricar, possuam um baixo custo de produção e alta sensibilidade.

- Avaliar o comportamento eletromagnético das estruturas desenvolvidas neste trabalho por meio de simulação numérica do dispositivo a ser desenvolvido.

- Aplicar o dispositivo sensor para monitorar os parâmetros físicos que são de interesse neste trabalho.

1.3 Trabalhos Relacionados

Pesquisas recentes tem se concentrado no desenvolvimento de novas técnicas e de novos dispositivos que apresentem, além das vantagens tradicionais de uma fibra óptica, uma fácil fabricação, que fosse robusto, possuísse um baixo custo e com boa sensibilidade.

Em (27) são propostas estruturas baseadas em técnica de desamento de diâmetro de núcleo e são investigadas experimentalmente para análise de curvatura e vibração. São sugeridas duas configurações, uma formada por emenda de um seção MMF entre duas seções SMFs (SMS) e a outra estrutura é formada pela emenda de uma seção SMF entre duas seções MMFs, onde cada MMF é emendada à uma SMF de entrada e saída (SMSMS). Para análise de curvatura é utilizada a estrutura SMS, onde padrões de interferência destrutiva são gerados quando o sensor é curvado, variando apenas a atenuação do sinal sem variação no comprimento de onda. A estrutura SMSMS é utilizada para monitorar vibrações com frequências muito baixas, como 0,1 Hz.

Em (17) é apresentado um sensor baseado em FBG para caracterização de fluxo monofásico e fluxo bifásico. O sensor consiste em uma FBG posicionada transversalmente ao fluxo e fixada na parede da tubulação.A pressão hidrodinâmica aplicada pela fluxo líquido e/ou ar para a fibra óptica induz deformação que é detectada pela FBG. Dado que a pressão aplicada está diretamente relacionada ao fluxo de massa, é possível estabelecer uma relação usando o deslocamento do comprimento de onda de ressonância de grade para determinar a massa flui quando a velocidade do escoamento é bem conhecida.

Em (23) é proposto uma configuração de um sensor simples para medição simultânea de índice de refração e temperatura baseada em interferência modal. O sensor é formado por emenda de uma seção SMF entre duas seções MMFs e essas são emendas cada uma à uma seção SMF de entrada e saída. A análise dos parâmetros mencionados é feito por meio da variação do comprimento de onda conforme os parâmetros são alterados.

Em (22) os autores realizam uma análise experimental de um sensor de índice de refração baseado em interferômetro de Mach-Zehnder formado por uma seção SMF emendada entre duas seções curtas de MMF, onde uma parte da luz é acoplada e reacoplada. Para esta análise existe a variação de comprimento de onda conforme mudança no índice de refração.

Em (33) os autores desenvolveram um sensor de duplo parâmetro, temperatura e índice de refração, baseado em uma estrutura de fibra MMF-MMF-MMF e demonstraram experimentalmente. O princípio de operação deste sensor depende dos efeitos de uma série de sobreposição de sinal de interferência, que inclui interferência entre núcleos e cascas.

Em (34) é relatado um sensor simples para medição de alta temperatura com alta sensibilidade. A configuração proposta é formada pela de emenda de uma seção de SMF com duas

seções MMFs. Devido ao descasamento de núcleo causado pela emenda de SMF com MMF uma parte da luz será acoplada para a casca da SMF através da MMF.

Em (35) é proposto um sensor para medição simultânea de curvatura e temperatura baseado em um interferômetro de Mach-Zehnder em linha. O sensor é formado pela estrutura *Singlemode-Multimode-Dispersion Compensation Fiber-Multimode-Singlemode*. A faixa de curvatura medida foi de *mm* e temperatura foi de 20^oC a 150^oC. O sensor apresenta como vantagens fácil fabricação, baixo custo, alta visibilidade da franja de 24dB e alta sensibilidade, o que mostra uma boa perspectiva de aplicação em parâmetros duplos de detecção de curvatura e temperatura.

1.4 Contribuições

As principais contribuições dessa dissertação foram: Montagem e caracterização experimental de sensor de curvatura e de escoamento baseado em um interferômetro *in-line* de Mach-Zehnder, que utiliza a técnica de descasamento de diâmetro de núcleo na fibra óptica, formado pela emenda de uma seção SMF entre duas seções MMFs, emendados à uma SMF de entrada e outra de saída.

1.5 Estrutura do Trabalho

Para melhor descrição, o restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: O Capítulo 2 - discute aspectos relevantes sobre os sensores ópticos em fibra baseados em interferometria utilizando a técnica de descasamento de diâmetro de núcleo. O Capítulo 3 apresenta o *setup* experimental para o sensor submetido a curvatura e escoamento, e numérico do sensor SMSMS utilizando *software* BeamProp 9.0 da empresa RSoft. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos experimental e numericamente. Por fim, o Capítulo 5 aborda as conclusões deste trabalho e tópicos para trabalhos futuros.

2 PRINCIPIO DE SENSORIAMENTO BASEADO EM INTERFEROMETRIA

2.1 Introdução ao capítulo

Neste capítulo serão abordados os principais aspectos relacionados aos sensores ópticos baseados em interferometria. A interferometria parte do principio da divisão de um feixe em dois ou mais feixes que propagam-se por diferentes caminhos, sendo que um desses caminhos deve ser exposto à perturbação externa que deseja-se analisar e então os feixes devem ser reagrupados (8). Estes dispositivos permitem que seja feita a análise por meio de detecção de variação de comprimento de onda, potência, intensidade, entre outros (8, 9). Os interferômetros ópticos podem ser classificados em quatro tipos: Fabry-Perot, Mach-Zehnder e Michelson (8).

Os sensores interferométricos baseados em Fabry-Perot (FPI - *Fabry-Perot Interferometer*)geralmente composto de duas superfícies refletoras separadas por uma determinada distância. A interferência ocorre devido às múltiplas superposições de feixes refletidos em superfícies paralelas(36). Os FPIs podem ser classificados em duas categorias: 1- extrínsecos (por exemplo, um espaço de ar entre duas faces finais de fibras clivadas), usam reflexões de uma cavidade externa. 2- intrínsecos (uma seção de fibra entre dois espelho dielétricos), onde os reflectores são formados dentro da própria fibra (37, 38, 39),

Um Interferômetro de Michelson (MI - Michelson Interferometer) é similar, em termos de configuração, à metade de um interferômetro de Mach-Zehnder. A principal diferença entre ambos é a presença de duas superfícies refletoras. O sinal oriundo da fonte óptica é dividido em dois feixes por um acoplador de 3 dB e cada feixe é refletido na ponta de cada braço. Esses feixes são refletidos e recombinados pelo mesmo acoplador (40, 41).

Neste trabalho foi realizada a investigação experimental e numérica um sensor baseado em Interferômetro de Mach-Zehnder utilizando técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, os quais serão apresentados de forma sucinta nas seções a seguir.

2.2 Interferômetro de Mach-Zehnder

Os sensores interferométricos de fibra óptica baseados em interferômetros foram desenvolvidos para várias medições físicas e químicas (42). Os sensores baseados no interferômetro de Mach-Zehnder (MZI - *Mach Zehnder Interferometer*) são usados em diversas aplicações por serem mais fáceis e mais simples de planejar, fabricar e medir (sem necessidade de um laser de alta resolução para o analisador de espectro óptico de alta resolução), além de serem capazes de oferecer uma alta sensibilidade (43, 44). O princípio básico de operação de um MZI baseia-se na divisão de uma luz incidente em duas partes iguais, como pode ser observado na Figura 1

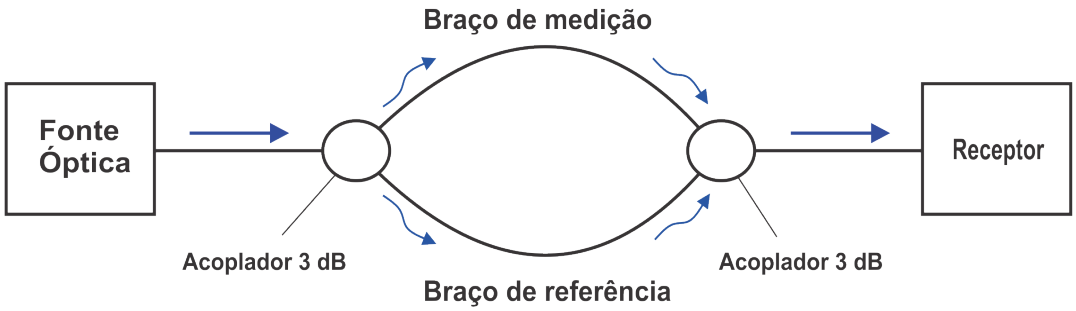

Figura 1 – Configuração básica de um Interferômetro de Mach-Zehnder.

A estrutura MZI consiste de um guia de onda de entrada e um guia de ondas de saída divisor. A luz que incide no MZI é divida (junção Y esquerda), por meio de um acoplador de 3 dB, em partes iguais para um braço de medição e a outra parte para o braço de referência, e posteriormente os feixes que caminham por estes trechos são recombinados (junção Y direita). O braço de medição é exposto à variações do ambiente enquanto que o braço de referência é mantido isolado do ambiente externo. A diferença entre as distâncias percorridas por cada feixe cria uma diferença de fase entre eles (45). A combinação de detecção interferométrica e comprimentos de interação relativamente longos dão origem à um sensor potencialmente muito sensível, que pode ser usado para monitorar vários tipos de processos superficiais que resultam em mudanças no perfil do índice de refração (46). Com o advento das LPGs, a configuração de dois braços independentes de um MZI tem sido substituída pelo esquema do interferômetro em linha (ou *in-line*). Neste trabalho é utilizado um interferômetro de Mach Zehnder em linha e que

será melhor abordado na próxima seção.

2.2.1 Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo

Recente estruturas baseadas em técnica de descasamento de diâmetro (CDM - *Core Diameter Mismatch*) tem sido amplamente estudadas e aplicadas para medição de diversos parâmetros físicos e mecânicos, como por exemplo, a estrutura SMS (27, 47). O sensor SMS é formado pela emenda de uma curta seção de MMF entre duas seções SMFs. Por possuírem diâmetros diferentes, ocorre o acoplamento de modo para transferir potência óptica entre o núcleo e os modos de alta ordem da casca através dessas seções (27).

Neste trabalho é apresentado uma estrutura similar à SMS, o dispositivo sensor é um simples interferômetro de Mach-Zehnder baseado na interferência entre modos do núcleo e da casca. O sensor proposto consiste na emenda por fusão de um seção SMF entre duas seções MMF, de comprimento L_{MMF}, e cada seção MMF emendada por fusão à uma SMF de entrada e saída. Essa estrutura é chamada de SMSMS (*Singlemode-Multimode-Singlemode-Multimode-Singlemode*) e pode ser observada na Figura 2 (23, 33, 34).

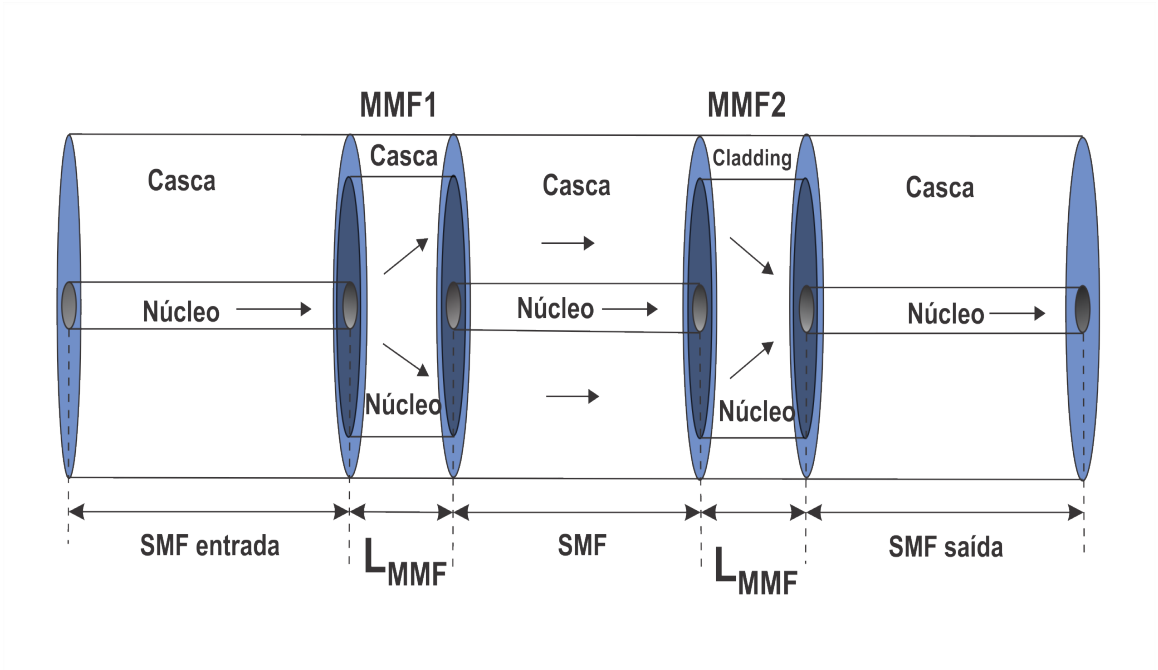

Figura 2 – Esquemático do sensor proposto baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo.

A seção SMF ao meio atua como elemento de sensoriamento devido aos modos que se propagam na casca. Padrões de interferência gerados devido ao descasamento de núcleo confirmam a excitação dos modos da casca e a análise dos padrões de interferência de vários

interferômetros com diferentes comprimentos mostram que, embora vários modos da casca da fibra SMF tenham sido excitados, normalmente um modo da casca de alta ordem era dominante e interfere principalmente no modo do núcleo (34). As duas seções MMFs atuam como acoplador e reacoplador de luz devido ao CDM. É injetada luz de uma fonte banda larga na seção SMF de entrada. Uma parte da luz espalha no núcleo da primeira seção MMF e modos de alta ordem são excitados devido ao descasamento. Quando a luz é acoplada da MMF1 para a SMF ao meio, modos de baixa ordem são excitados na casca (33). Os modos da casca são reacoplados para o modo fundamental da seção SMF de saída por meio da segunda seção MMF (23). Os modos da casca que são reacoplados para o núcleo da SMF de saída por meio da MMF2, misturam-se com o modo do núcleo original e interferem entre si devido à diferença de fase acumulada.

A diferença de fase entre os modos do núcleo e da casca podem ser escritos como:

$$\Phi^k = (\beta_{nucleo} - \beta_{casca})L = \frac{2\pi\Delta n^k_{eff}L}{\lambda} \tag{2.1}$$

onde β_{nucleo} e β_{casca} são as constantes de propagação longitudinais dos modos guiados no núcleo e na casca, respectivamente, λ é o comprimento de onda da luz injetada na SMF de entrada, L é o comprimento da SMF ao meio que atua como elemento de sensoriamento e Δn^k_{eff} é a diferença entre o índice do refração efetivo entre os modos guiados do núcleo e o modo n-ésimo da casca (23, 22, 33, 34).

Quando Φ na Equação 2.1 é igual à $(2m+1)\pi$, isto é, quando o sinal de interferência atinge o mínimo, o comprimento de onda deslocado pode ser mostrado, de acordo com:

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n^k_{eff}L}{2m+1},\ para\ m = 1,2,3... \tag{2.2}$$

A partir da Equação 2.1, a separação do comprimento de onda entre 2 mínimos de interferência, chamado de faixa espectral livre (FSR- *Free Spectral Range*) pode ser aproximada por:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n^m_{eff}L} \tag{2.3}$$

Isso significa que o FSR aumentará à medida que o comprimento (L) da SMF que atua como elemento sensor diminui, ou seja, trabalham de forma inversamente proporcional. Isso significa que pode-se selecionar um comprimento de SMF específico, proporcionando

um espectro de interferência personalizável e consequentemente, um desempenho de detecção controlável (22).

2.3 Interferência Modal

A interferência multimodal inicialmente, foi desenvolvida para estruturas com guias de onda planas. A interferência multimodal (MMI - *Multimode Interference*) envolvendo mais que dois modos tem sido investigada de forma abrangente, juntamente com o ponto de reimagem do campo de entrada da luz. Ambos são bem conhecidos e amplamente empregados no desenvolvimento de divisores de feixe, combinadores e multiplexadores, tanto para sensores ópticos quanto para comunicações ópticas de forma geral (48, 49, 50, 51, 52). O interesse neste tipo de estrutura é devido as suas vantagens de alta sensibilidade, fácil fabricação, baixo custo, capacidade de medição multiparamétrica etc (53). Comumente, estes dispositivo apresentam sua configuração baseada na emenda de uma seção MMF entre duas SMF (SMS), conforme é mostrado na Figura 3 (48, 54).

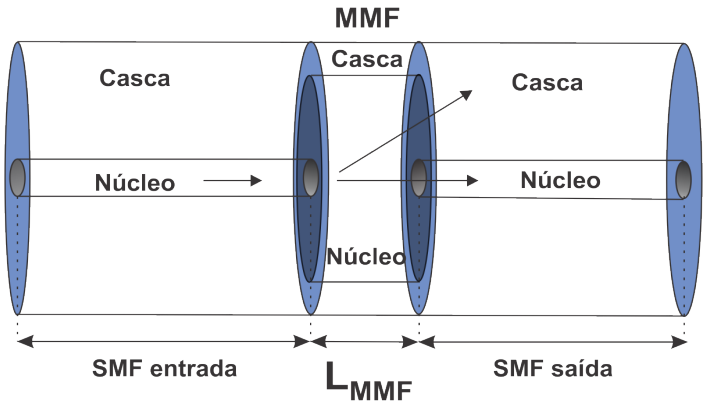

Figura 3 – Interferômetro multimodal formado pela emenda de uma seção MMF entre duas SMFs (SMS)

O grande descasamento de diâmetro de núcleo devido a emenda de uma seção SMF com uma seção MMF faz com que a MMF atue como um mecanismo de acoplamento núcleo-casca. Quando a luz que se propaga ao longo da SMF de entrada encontra a região da MMF, modos de alta ordem são excitados, de modo que a interferência entre diferentes modos ocorre enquanto o feixe de luz se propaga ao logo da MMF. A luz é acoplada na SMF de saída. Devido a excitação

dos modos de alta ordem da MMF, a potência óptica acoplada à SMF dependerá das amplitudes e fases do vários modos da MMF (52, 55, 56).A perda de transmissão de uma estrutura SMS é dada por (57):

$$P_{saida}(L) = 10log(\left|\sum_{n=1}^{N} \eta_n^2 \exp(j\beta_n L)\right|^2) \tag{2.4}$$

onde L é o comprimento da seção MMF, η_n e β_n são o coeficiente de excitação e constante de propagação, respectivamente, ae N é o número total de modos guiados na MMF. Assim, propagação da luz para diferentes distâncias (L) correspondem a diferentes perfis de campo. Como resultado, a eficiência de acoplamento entre o campo da seção MMF e o campo de entrada do modo fundamental da SMF de entrada dependerá do comprimento da MMF (52). Portanto, o comprimento da MMF define as características do dispositivo baseado em interferência multimodal (48).

Estruturas que baseadas em interferência multimodal fazem uso da característica de guias onda multimodais, ou seja, possuem vários modos que reproduzem uma imagem por conta das interferências construtivas e destrutivas, por isso, em determinados pontos dos guias multimodais surgirão o ponto de reimagem (58). A luz é injetada na seção multimodo por meio da seção monomodo, e assim, a potência é transferida para diferentes modos suportado, ou seja, quando a seção multimodo é excitada, observam-se os efeitos que envolvem a relação do modo de entrada da seção monomodo com os modos dos campos da seção multimodo e em seguida observa-se a interferência entre ambos (59).

2.3.1 Ponto de Reimagem

A interferência multimodal apresenta como principal característica a formação do ponto de reimagem e é amplamente estudada à algum tempo (60). Segundo Soldano (49), o princípio de reimagem pode ser definido como: Uma propriedade de guias de onda multimodo, através da qual um perfil de campo de entrada é produzido em imagens individuais ou múltiplas em intervalos periódicos ao longo da direção de propagação do guia. Assim, ponto de Reimagem é onde a interferência construtiva entre os modos é máxima, que é característica da interferência multimodal (MMI - *Multimode Interference*) (61).

Após a excitação de um guia multimodo, os vários modos são excitados com constantes de propagação, β_m e β_{m+1}, e assim, o ponto de reimagem surge à uma distância de propagação

L_p, onde (48):

$$(\beta_m - \beta_{m+1})L_p = 2p\pi,\ para\ p = 1,2,3... \tag{2.5}$$

com p sendo um número inteiro

A localização do ponto de reimagem depende da eficiência de acoplamento entre o modo da seção SMF e os modos na(s) seção(ões) MMF(s) (48, 49, 60). A origem do ponto de reimagem depende da diferença de fase entre o modo acoplado com maior eficiência, e de todos os outros modos da MMF (62, 63). Para excitações simétricas em guias em fibra de índice degrau, os modos excitados são os modos linearmente polarizados LP_{0n} (63).Para estes modos, podemos obter a aproximação por meio de (48):

$$\beta_m \approx \frac{\pi\lambda}{8n_{nucleo}a^2}(-2m^2 + m) \tag{2.6}$$

onde n_{nucleo} é o índice de refração do núcleo da seção MMF, a é o raio do núcleo da MMF e λ é o comprimento de onda empregado. Sendo assim, $(\beta_m - \beta_{m+1})$ é definido como,

$$(\beta_m - \beta_{m+1}) = \frac{\pi\lambda}{8n_{nucleo}a^2}(4m + 1) \tag{2.7}$$

Reorganizando a Equação 2.5 e assumindo que $p = 1$ e $m = 0$, o comprimento L_p característico é definido como:

$$L_p = \frac{16n_{nucleo}a^2}{\lambda} \tag{2.8}$$

Para obter o ponto de reimagem, L_p para as dimensões utilizadas neste trabalho podemos utilizar a Equação 2.8:

$$L_p = \frac{16 * 1.457 * (52.5)^2}{1.55} \cong 4.1cm \tag{2.9}$$

3 *SETUP EXPERIMENTAL E NUMÉRICO*

3.1 *Setup* Numérico

O *software* comercial utilizado neste trabalho foi o BeamPROP 9.0 da empresa RSoft ^{TM}. Este é composto por um pacote geral de simulações ao qual são utilizados para calcular a propagação de luz em guias de onda de geometria arbitrária (64). O método numérico utilizado por este *software* é o de propagação de feixe com diferenças finitas (FD-BPM, *finite difference beam propagation method*). Este método é utilizado como alternativa para resolver a aproximação parabólica ou paraxial da equação de Helmhtz (65, 66).

O sensor SMSMS de curvatura investigado nesta seção por método de simulação computacional é baseado em monitorar a curvatura em função da potência óptica transmitida. O funcionamento deste sensor baseia-se na variação da curvatura na fibra e com isso, a potência óptica de saída é atenuada. A modelagem numérica é feita para uma estrutura SMSMS com sua configuração de acordo com a Figura 4, com o objetivo de efetuar a análise do acoplamento do modo fundamental que perde energia desde a primeira seção MMF. Os parâmetros das fibras utilizadas tanto nas simulações quanto no procedimentos experimentas são mostrados na Tabela 1. O *software* BeamPROP da empresa RSoft foi escolhido pois por meio deste é possível efetuar o monitoramento da curvatura em função da potência transmitida do sinal óptico com o intuito de analisar se para faixas de curvaturas muito pequenas é possível realizar interrogação analisando apenas a perda de potência óptica.

Tabela 1 – Parâmetros das fibras SMF-28 (Corning) e MMF - FG105-LCA (Thorlabs)

SMF-28 Corning			
Diâmetro	Valor	Índice de Refração	Valor
Núcleo	8.2 μm	Núcleo	1.45522
Casca	125 μm	Casca	1.45
MMF (FG105-LCA- Thorlabs)			
Diâmetro	Valor	Índice de Refração	Valor
Núcleo	50/62.5/105 μm	Núcleo	1.457
Casca	125 μm	Casca	1.45

Verificou-se numericamente e experimentalmente que variações de curvatura na estrutura causam mudanças no resultados de saída do sensor SMSMS. As simulações foram realizadas utilizando o Beam Propagation Method (BPM), através do *software* BeamPROP da empresa

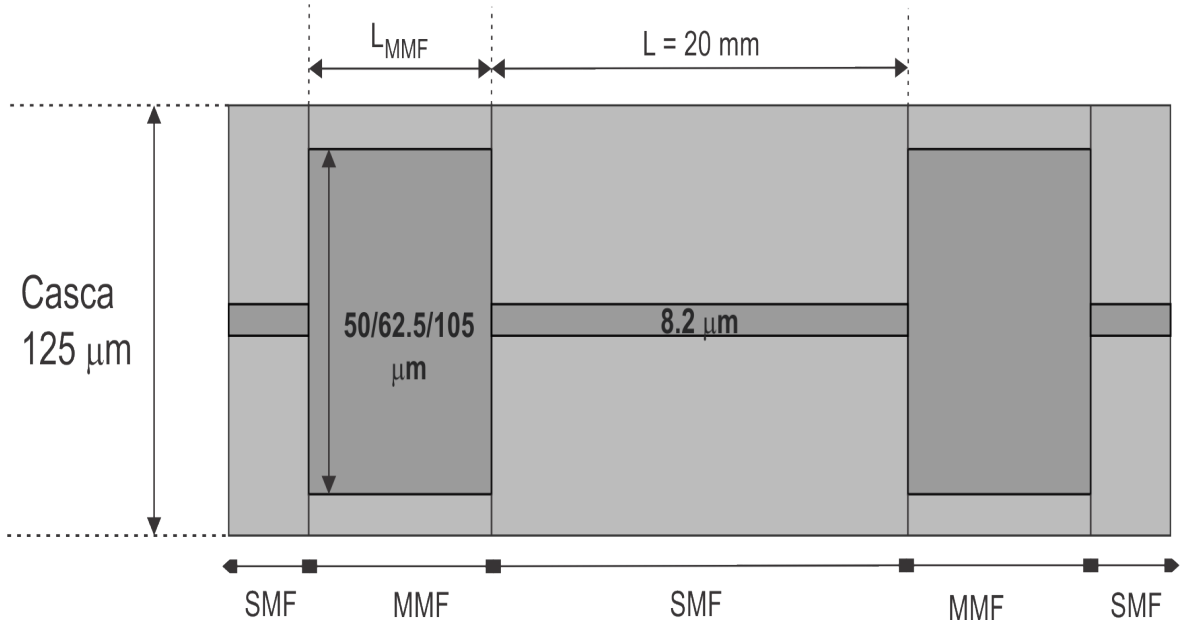

Figura 4 – Esquemático representativo do sensor SMSMS utilizado na simulação numérica.

Rsoft^{TM} em conjunto com a técnica de mapeamento conformal (67), que consistes em uma transformação coordenada em que uma fibra curvada é representada em uma linha reta, descrito por:

$$neq(x,y) = n(x,y)(1 + \frac{x}{R_{eff}}) \tag{3.1}$$

onde $neq(x,y)$ é o índice de refração equivalente, $n(x,y)$ é o índice de refração da fibra esticada, R_{eff} é o raio de curvatura equivalente e x é o eixo perpendicular no qual a curvatura ocorre. Um modelo 3D-BPM foi usado com uma abordagem implícita de diferenças finitas. É necessário considerar que analisar entradas numericamente por aproximações é fundamental para adquirir melhores resultados como condições de contorno. O valor máximo e mínimo da malha foi de 1 μm e 0.01 μm, respectivamente, e o valor do comprimento de onda utilizado foi 1550nm para se aproximar do experimento. Condições de contorno transparentes foram incluídas numericamente para evitar a reflexão da malha computacional limites, a qual admite que o campo próximo ao contorno, apresente comportamento de uma onda plana saindo. Suas características de amplitude e direção são definidas de forma dinâmica por meio de algoritmo heurístico.

3.2 *Setup* Experimental para Análise de Curvatura

O dispositivo sensor proposto utilizado nessa análise baseou-se na estrutura SMS e em um interferômetro de Mach Zehnder em linha, ambos já mostrado na seção 2.3 e 2.2, respectivamente. Esta estrutura é composta pela emenda de uma seção SMF padrão (SMF-28 from Corning, Inc.) entre duas seções MMFs índice degrau (FG105-LCA from Thorlabs, Inc.), com comprimentos de 3, 4 e 5 mm das seções MMFs e 20 mm da seção SMF ao meio. Os comprimentos das seções MMFs foram escolhidos pois para estes não há presença do Ponto de Reimagem. As fibras utilizadas possuem diâmetro núcleo/casca para SMF e MMF de aproximadamente 8.2/125 μm e 105/125 μm, respectivamente. A fusão da fibra é feita utilizando a técnica de descarga de arco elétrico utilizando uma máquina de emenda por fusão (FSM-40S da empresa Fujikura) e seu processo de emenda pode ser observado na Figura 5.

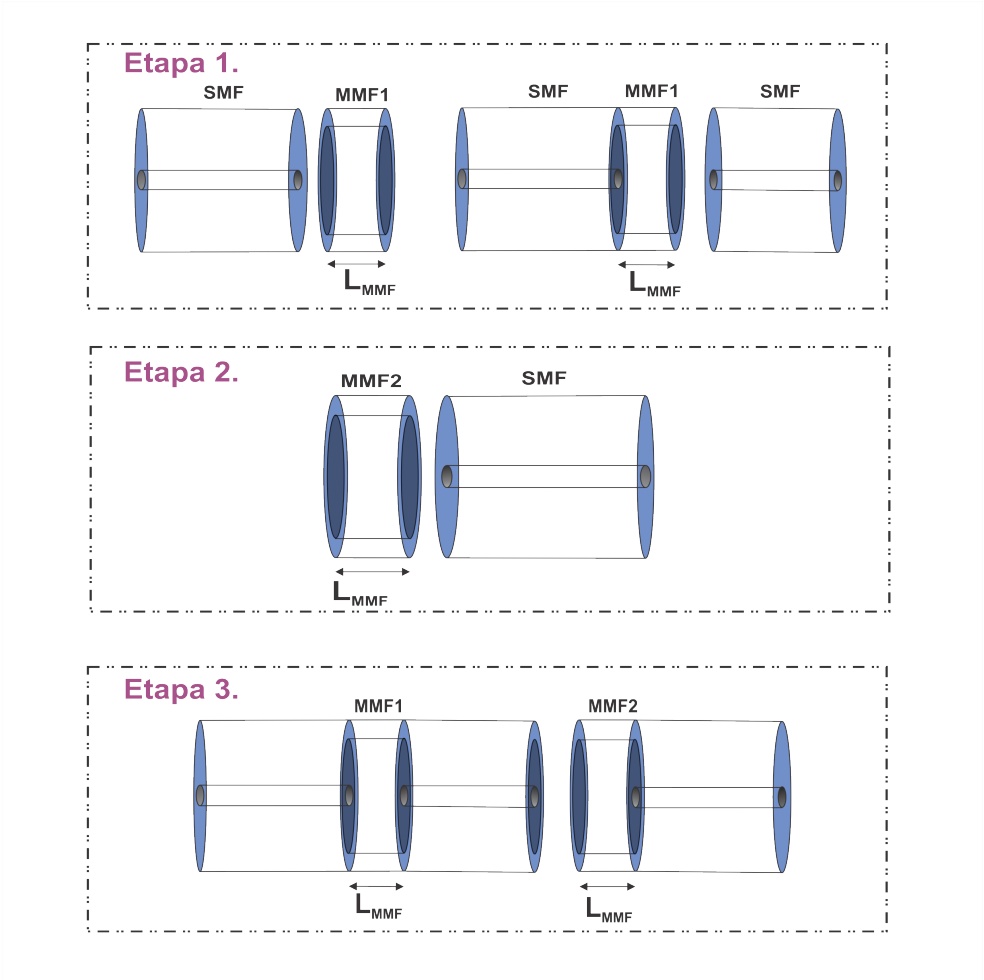

Figura 5 – Processo de construção do sensor SMSMS etapa por etapa.

A construção deste sensor é divida em três principais etapas. Primeiramente, é feita a emenda da MMF com uma seção SMF, em seguida a MMF é clivada com o comprimento

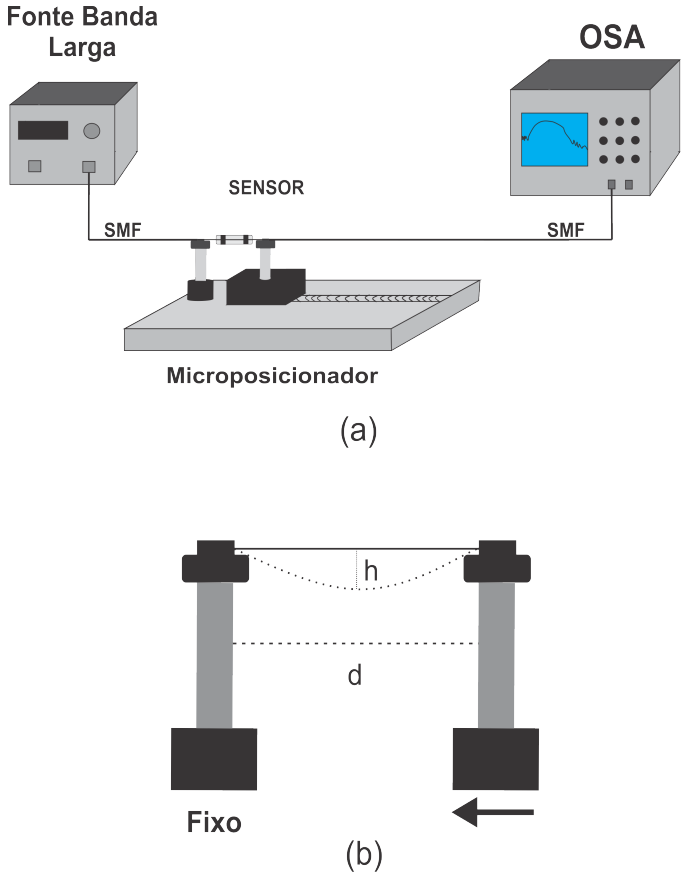

Figura 6 – Esquema ilustrativo do *setup* experimental para análise de curvatura no sensor SMSMS.(a) Equipamentos utilizados para análise de curvatura. (b) Deslocamento do eixo utilizado para gerar curvatura na estrutura.

L_{MMF}, o qual é medido a olho nu utilizando uma régua. Após a clivagem é feita a emenda das partes que já foram emendadas anteriormente com um pedaço de SMF, repetindo então o processo de clivagem. Na segunda etapa, é repetido o processo de emenda de uma MMF com uma seção SMF. A terceira etapa é a emenda das duas partes que foram produzidas nas duas etapas anteriores.

Para realizar a caracterização dos sensores de curvatura foi utilizado como base um *setup* experimental montado no Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado da Universidade Federal do Pará, como mostra a Figura 6. Foram utilizados um *Superluminescent Diode* (SLED) como fonte banda larga e um Analisador de Espectro Óptico (OSA - *Optical Spectre Analyzer*), como é mostrado na Figura 6(a). As medidas de curvatura foram obtidas fixando as duas extremidades do sensor em dois blocos, sendo um deles fixo e outro móvel, à uma distância d um do outro com a finalidade de deixar o sensor inicialmente esticado, conforme Figura 6 (b). O bloco móvel foi colocado sobre um micro posicionador (*Linear Translation Stage*) de forma que a distância seja reduzida de acordo com o deslocamentos graduais do micro posicionado, e assim, induzir

uma curvatura no sensor.

A luz foi inserida na estrutura SMSMS por meio da fonte SLED e o espectro de transmissão foi gravado por um OSA com uma resolução de 1,0 nm. As duas seções MMFs atuam como acopladores e reacopladores da luz devido ao descasamento de diâmetro de núcleo. Parte da luz se espalha no núcleo da primeira MMF e modos de alta ordem são excitados. Quando a luz é acoplada de MMF1 para a SMF ao meio, modos de baixa ordem da casca são excitados. Os modos da casca são re-acoplados ao modo fundamental da SMF de saída por meio da segunda MMF (23, 33).

As medições foram realizadas com uma faixa de deslocamento de 0 a 2000 μm e com incremento de 50 μm no microcontrolador. Como pode ser observado na Figura 6(b), a distância d é reduzida de acordo com o incremento e com isso é gerada uma curvatura na fibra. Sabe-se que a curvatura é calculada pelo inverso do raio de curvatura e é dada por.

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2h}{h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \tag{3.2}$$

Onde d = L0 − ΔL, L_0 é a distância inicial (75 mm) entre os dois blocos, ΔL é a variação da distância e h é a profundidade da curvatura. Uma aproximação da Equação 3.2 é usada neste trabalho, pois as etapas de deslocamento são da ordem de alguns micrômetros, 50 μm, portanto sua medição é difícil. A curvatura em função de $L0$ e d é alcançado como segue:

$$C = \frac{1}{R} \approx \frac{4}{L_0^2}\left(L_0^2 - d^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.3}$$

Foi feito um incremento de 50 um no microposicionador para obtenção da curvatura e foram usados 3 comprimentos das seções MMFs: 3mm, 4mm e 5mm. A finalidade desse esquema foi monitorar o espectro de transmissão do sensor para diferentes valores de curvatura.

3.3 *Setup* Experimental para Análise de Escoamento

O experimento para análise de escoamento foi feito utilizando o *setup* de análise de escoamentos bifásicos, presente no Laboratório de Vapor da Universidade Federal do Pará. A experiência foi realizada com o intuito de garantir o escoamento contínuo de água e ar, este *setup* experimental é mostrado na Figura 7. Foi aplicada uma variação na faixa de 0 a 1,8 m^3/h,

com passos de 0,3 m^3/h, pois neste intervalo o escoamento encontra-se em estado laminar. O escoamento foi monitorado utilizando um rotâmetro, que é um medidor de vazão por área variável, nos quais um flutuador varia sua posição verticalmente em um tubo cônico de maneira proporcional a vazão do fluido. O sensor SMSMS foi inserido transversalmente ao tubo de 1 polegada, fixado nas paredes da tubulação e além disso, o sensor foi inserido em um tubo capilar para promover resistência do sensor à massa do fluído.

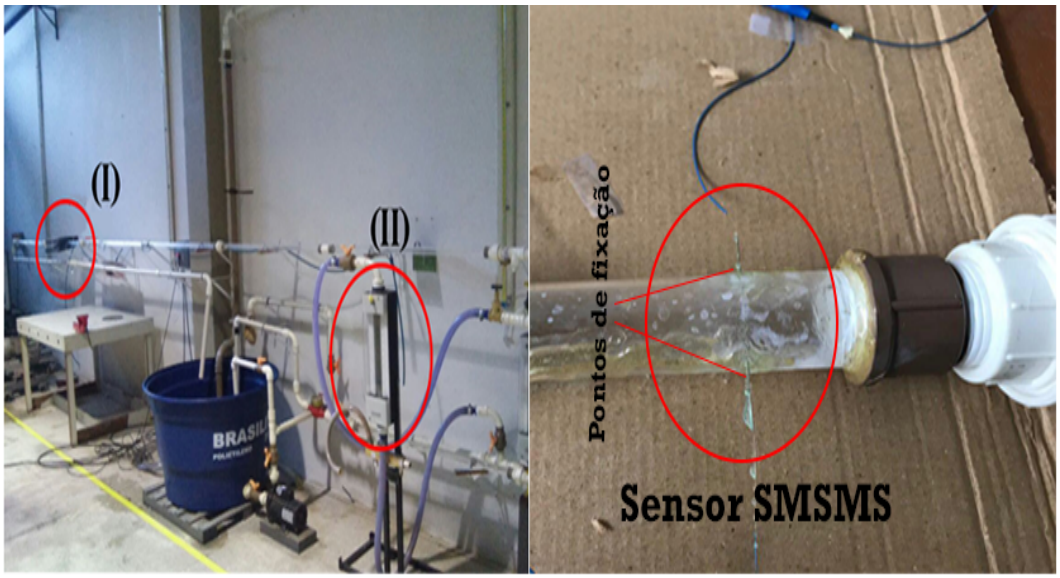

Figura 7 – Setup experimental utilizado para análise de vazão em escoamento monofásico e bifásico. (I) Local que o sensor SMSMS está instalado. (II) Rotâmetro utilizado para monitorar o escoamento.

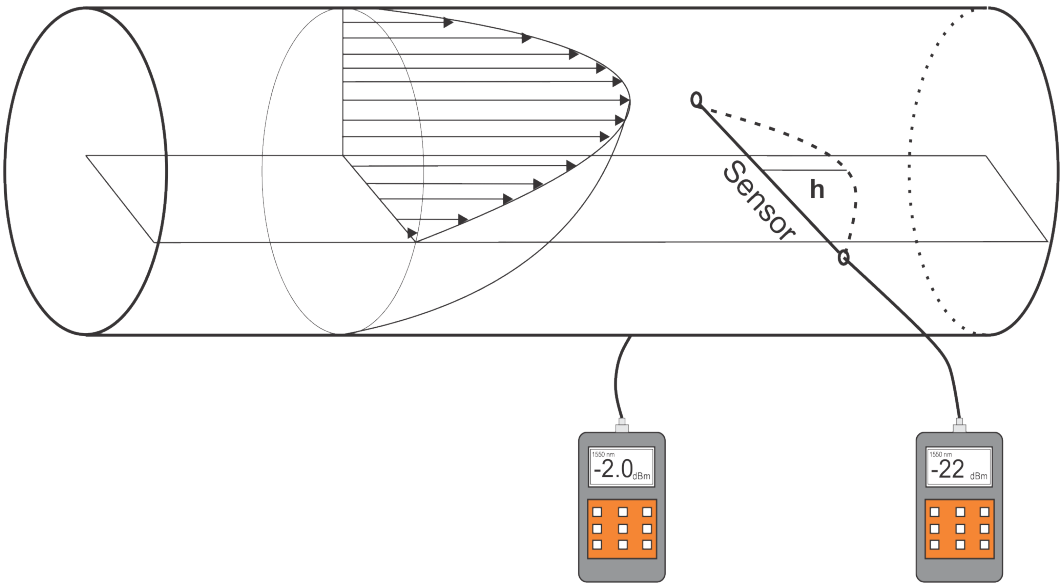

Figura 8 – Esquema ilustrativo do *setup* e demonstração do mecanismo de operação do sensor de curvatura SMSMS para medição de fluxo de água.

Como mencionado anteriormente, o sensor SMSMS foi inserido transversalmente ao tubo para que uma curvatura seja gerada a partir do arrasto da água em movimento, como pode ser observado na Figura 8. A pressão hidrodinâmica aplicada pela água no sensor induz uma curvatura (h) no sensor SMSMS. A medida que o fluxo de água aumenta, a força mecânica induzida ao longo da fibra pela água no sensor faz com que a curvatura aumente,e assim, variando a atenuação do sinal óptico. Foi utilizado uma fonte laser para injetar luz na fibra com uma potência de entrada de $-2.0\ dBm$ e o método de interrogação foi feito por meio um medidor de potência (*Power Meter*).

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados experimentais e simulados obtidos por meio de (i) experimentação feita com o dispositivo interferométrico Mach-Zehnder baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo (CDM - *Core Diameter Mismatch*) que já foram descritos em 2.2 para análise de curvatura e escoamento monofásico e bifásico, e (ii) modelagem numérica aplicada à esta mesma estrutura, atuando como sensor de curvatura.

A seção 3.2 disserta acerca da estrutura SMSMS submetida à análise de curvatura. É apresentada a investigação que foi feita com o uso de um analisador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectre Analyzer*) para auferir a resposta da estrutura à variação de curvatura, e assim, posteriormente, realizar a análise de curvatura aplicada à medição de escoamento monofásico e bifásico.

Nas seções 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados da análise da estrutura SMSMS aplicada à vazão de água em uma tubulação com escoamento monofásico e bifásico, respectivamente. Primeiramente a estrutura é submetida a vazão apenas de água, caracterizando assim um escoamento monofásico. Posteriormente é apresentado os resultados da estrutura submetida a vazão de água acrescida de ar, comumente chamado de escoamento bifásico. É aplicado o método de interrogação por meio de um *Power Meter* A sensibilidade para ambos os casos é avaliada pela variação de potência conforme o escoamento aumenta.

Na seção 4.5 serão apresentados o resultados referentes à analise da estrutura SMSMS como sensor de curvatura mediante software de simulação BeamPROP 9.0 da empresa RSoft^{TM}. A análise baseia-se no monitoramento da curvatura em função da potência transmitida de um sinal óptico, além de verificar a influência do diâmetro do núcleo de MMF no comportamento da estrutura.

4.2 Sensor SMSMS submetido à Curvatura

Após realizar o incremento de 0 μm a 2000 μm, no microposicionador, foi possível observar com os resultados que os sensores apresentaram comportamentos diferentes em termos

de faixa de operação, como pode ser visto nas Figuras 9, 10 e 11. Cada sensor apresentou uma faixa de operação de curvatura ótima. Isso pode ser explicado por causa da interação entres os modos se comportarem de formas diferentes para certas faixas de curvatura. Para certos valores de curvatura, modos de ordem superiores apresentam mais perdas em relação aos de ordem inferiores. Com isso, o sensor será limitado á operar em uma determinada faixa de curvatura a qual será garantida a a sua linearidade. Ao analisar os espectros foi possível notar ainda que com o aumento do comprimento das seções MMFs há o aumento do ruído e por isso, a análise para a estrutura SMSMS com 5 mm de comprimento da seção MMF ficou difícil. Este aumento do ruído pode ser explicado devido ao aumento da região de interferência.

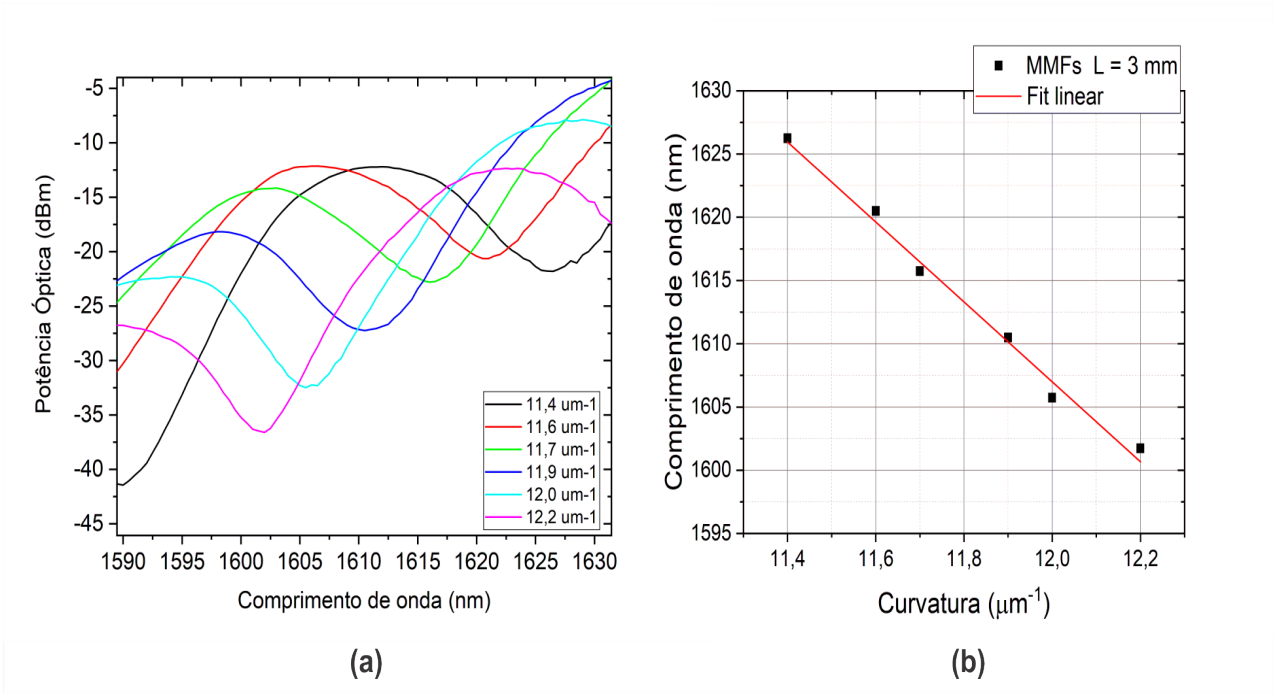

Figura 9 – Resultados do experimento de resposta à curvatura. (a) Espectro de transmissão da estrutura SMSMS com comprimento MMF de 3 mm. (b) Variação do comprimento de onda em função da mudança de curvatura.

Na Figura 9(a), é mostrada a resposta espectral do sensor do dispositivo proposto com $L_{MMF} = 3\ mm$. Para este comprimento de MMF a faixa de curvatura que possibilitou a melhor análise e sensibilidade satisfatória foi de $C = 11.4\ \mu m^{-1}$ até $C = 12.2\ \mu m^{-1}$. A partir disso foi feita a análise da variação do comprimento de onda, como pode ser observada na Figura 9(b). A sensibilidade apresentada pelo dispositivo foi de $-30.6250\ nm/\mu m^{-1}$ e um coeficiente de linearidade de $R^2 = 0.9925$.

Na Figura 10(a), é mostrada a resposta espectral do sensor do dispositivo proposto com $L_{MMF} = 4\ mm$. Para este comprimento de MMF a faixa de curvatura que possibilitou a melhor

análise e sensibilidade satisfatória foi de $C = 9.1\ \mu m^{-1}$ até $C = 10.2\ \mu m^{-1}$. o sensor também demonstrou ter uma sensibilidade satisfatória. A partir disso foi feita a análise da variação do comprimento de onda, como pode ser observada na Figura 10(b). A sensibilidade apresentada pelo dispositivo foi de $-22.4545\ nm/\mu m^{-1}$ e um coeficiente de linearidade de $R^2 = 0.9938$.

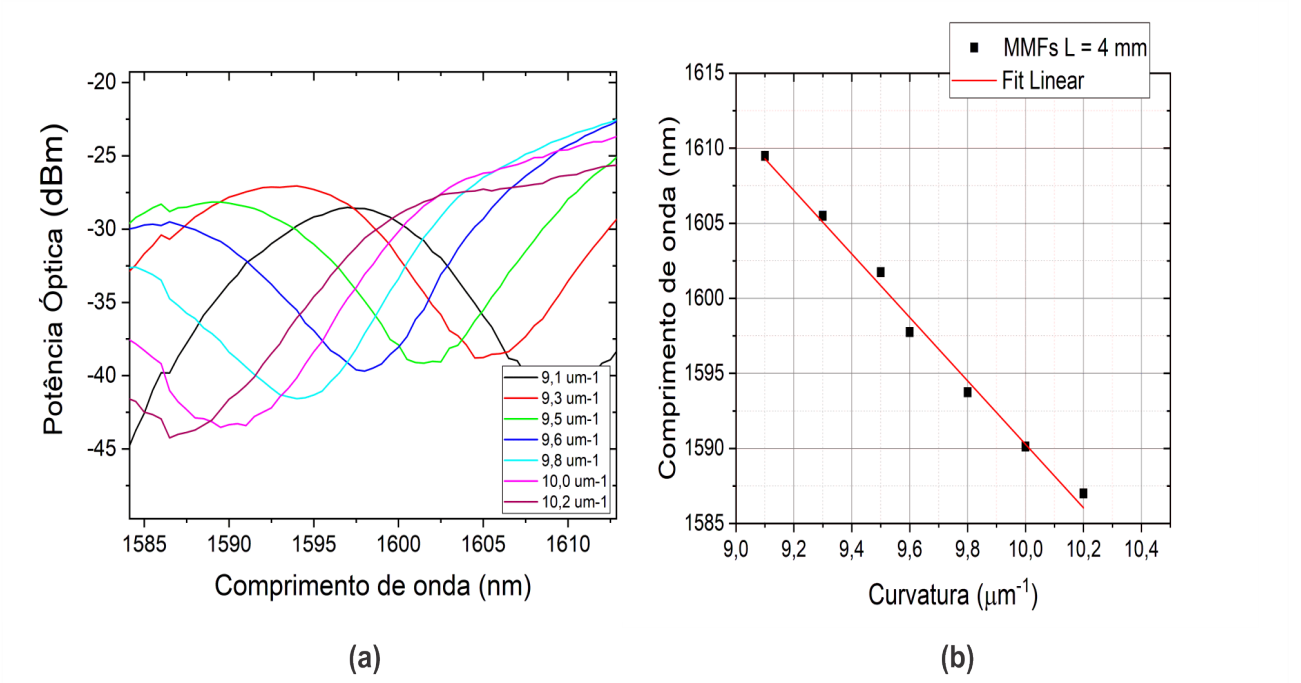

Figura 10 – Resultados do experimento de resposta à curvatura. (a) Espectro de transmissão da estrutura SMSMS com comprimento MMF de 4 mm. (b) Variação do comprimento de onda em função da mudança de curvatura.

Para o sensor com $L_{MMF} = 5\ mm$, observou-se a presença de ruído na transmissão, que pode ser explicado pelo fato de na estrutura de 5 mm estar atingindo um ponto de interferência destrutiva máxima, maior que em 3 e 4 mm. A resposta espectral desta estrutura pode ser observada na Figura 11(a). A faixa de operação escolhida para este comprimento foi de $C = 8.0\ \mu m^{-1}$ até $9.3\ \mu m^{-1}$. Para esta faixa de operação, o sensor apresentou uma sensibilidade de $-14.3269\ nm/\mu m^{-1}$ e um coeficiente de linearidade de $R^2 = 0.98733$. A variação do comprimento de onda pode ser observado na 11(b).

Tabela 2 – Características de três sensores SMSMS submetidos a testes de curvatura.

Características	SMSMS - 3 mm	SMSMS - 4 mm	SMSMS - 5 mm
Sensibilidade (nm/um-1)	-30.6250	-20.4545	-14.3269
Faixa de operação (um-1)	11.4 - 12.2	9.1 - 10.2	8.0 - 9.3
Linearidade	0.9925	0.9938	0.98733

Com os resultados foi possível notar que a sensibilidade é inversamente proporcional

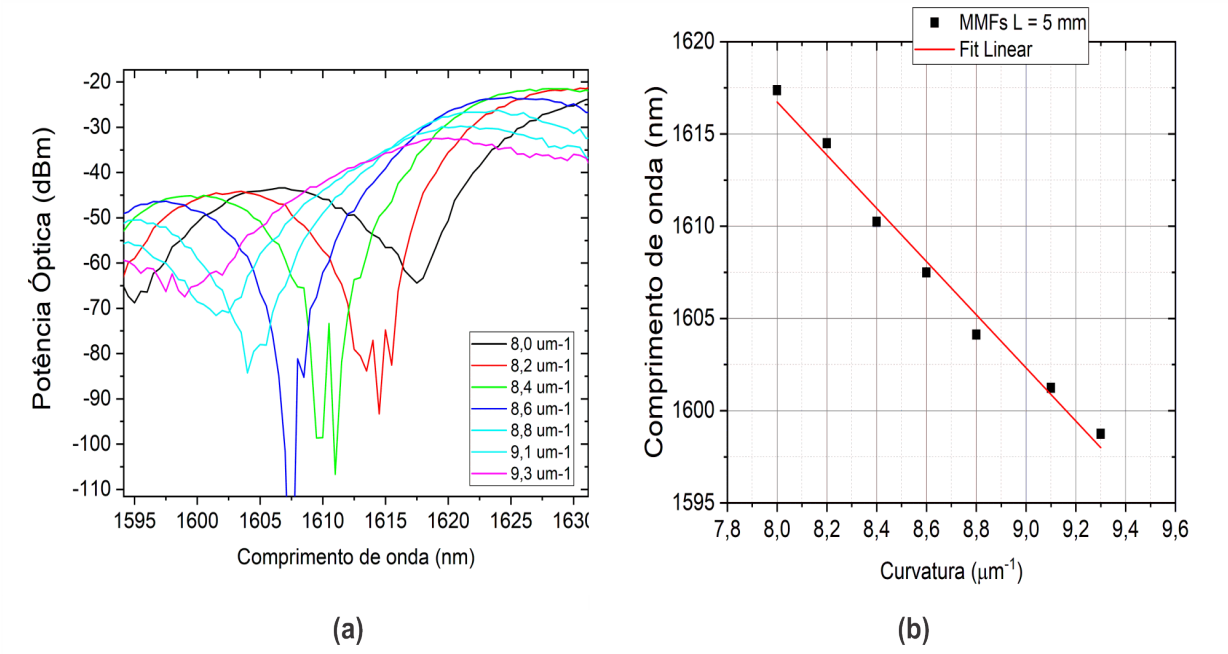

Figura 11 – Resultados do experimento de resposta à curvatura. (a) Espectro de transmissão da estrutura SMSMS com comprimento MMF de 5 mm. (b) Variação do comprimento de onda em função da mudança de curvatura.

ao comprimento das MMFs. O dispositivo que apresentou maior sensibilidade foi o que possui $L_{MMF} = 3\ mm$, demonstrou uma melhor sensibilidade de 33.21% comparados ao sensor com $L_{MMF} = 4\ mm$ e $53,22\%$ em relação ao sensor de $L_{MMF} = 5\ mm$, como pode ser observado na Tabela 2. Isso demonstra que o comprimento das seções MMFs é um parâmetro crítico nos sensores apresentados neste trabalho.

Foi realizado ainda análise de perda de potência para um comprimento de onda específico de 1550 nm, como pode ser observado na Figura 12, para a faixa de curvatura de 0.0 μm^{-1} a $5,5\ \mu m^{-1}$. Os sensores SMSMS com L_{MMF} de 3 mm, 4 mm e 5 mm serão chamados, respectivamente de SMSMS 1, SMSMS 2 e SMSMS 3. Com os resultados obtidos foi possível observar que o sensor que apresentou um melhor resultado para a faixa de curvatura escolhida foi o sensor SMSMSM 1, pois apresentou uma boa linearidade para perda de potência do sinal transmitido. A sensibilidade apresenta pelo sensor SMSMS 1 foi de $-4.9 dBm/\mu m^{-1}$ e uma linearidade $R^2 = 0.9758$. Embora o sensor SMSMS 1 não apresente uma linearidade satisfatória para a faixa de curvatura escolhida ($R^2 = 0.8341$) devido à presença de um ganho de potência, para uma faixa de curvatura menor ele apresentaria uma ótima linearidade para perda de potência do sinal transmitido, tendo uma sensibilidade de $-8.81 dBm/\mu m^{-1}$ e uma linearidade $R^2 = 0.9961$ para a faixa de curvatura de 0.0 μm^{-1} a $4,2\ \mu m^{-1}$. As perdas e os ganhos de

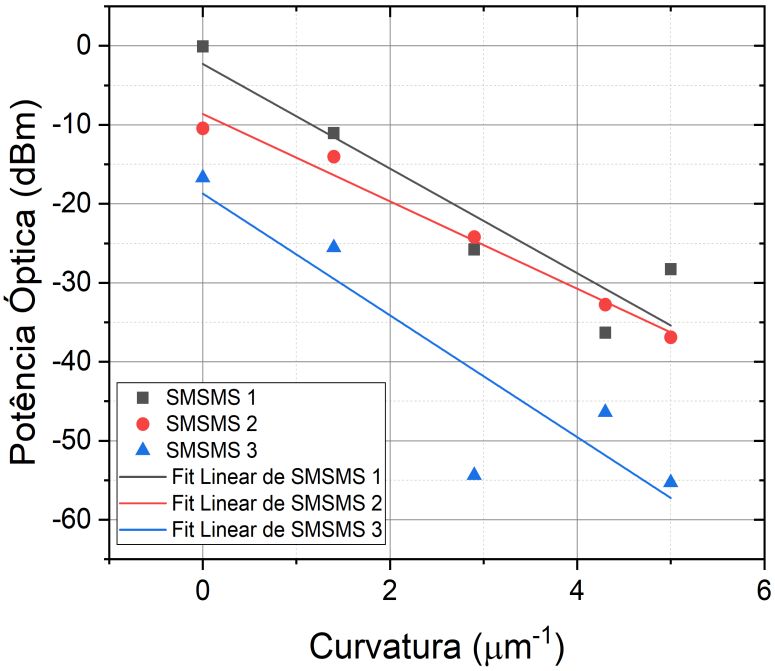

Figura 12 – Resultados experimentais para comprimento de onda de 1550 nm com comprimento das seções MMF de 3 mm, 4 mm e 5mm.

potência do sinal transmitido dependendo da faixa de curvatura podem ser explicadas devido à influência da deformação de campo quando a estrutura SMSMS é curvada, isso proporciona um diminuição das perdas de radiação dos modos de baixa ordem e aumentam as perdas em alta ordem modos (68).

4.3 Sensor SMSMS submetido ao escoamento monofásico

Primeiramente foram realizados os experimentos utilizando apenas o escoamento monofásico, ou seja, dentro da tubulação só havia a presença de água. Os testes foram realizados efetuando o aumento e a diminuição do fluxo afim de verificar sua repetitividade. Após a coleta desses dados foi realizado o cálculo estatístico das curvas para verificar a sensibilidade e linearidade. O sensor SMSMS com comprimento de MMF de 3 mm será chamado de SMSMS 1 e o sensor SMSMS comprimento de MMF de 5 mm será chamado de SMSMS 2. Como foi observado no teste experimental de curvatura, o sensor de 3 mm foi o que apresentou uma melhor sensibilidade e o de 5 mm o de menor sensibilidade, com isso foram escolhidos estes dois valores afim de comparar resultados.

Conforme os resultados da Figura 13 da faixa de fluxo de 0 até $1,8$, os sensores de-

monstraram uma sensibilidade satisfatória. O sensor SMSMS 1 apresentou sensibilidade de $\approx -0.4196\ dB.h/m^3$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0.99987$; sensor SMSMS 2, apresentou sensibilidade de $\approx -0.3277\ dB.h/m^3$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0.99912$.

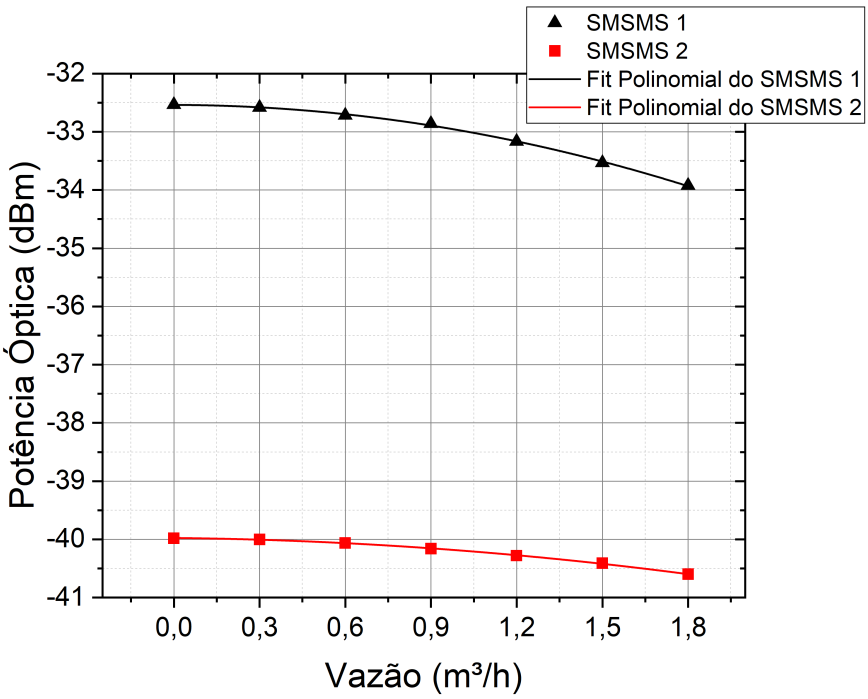

Figura 13 – Potência Óptica em função do fluxo para os dois sensores SMSMS.

Tabela 3 – Características de dois sensores SMSMS submetidos ao escoamento monofásico.

Características	SMSMS 1	SMSMS 2
Sensibilidade (dBm.h/m^3)	-0.4196	-0.3277
Coef. de determinação	0.99987	0.99912

Os resultados demonstram que o sensor SMSMS 1 apresentou uma sensibilidade ao escoamento monofásico maior que o sensor SMSMS 2 23.73% como mostrado na Tabela 3, ainda que ambos tenham apresentado um comportamento similar. Foi possível observar também que o sensor SMSMS 1 possui uma perda de potência menor que o SMSMS 2, levando em consideração a potência de entrada gerada pela fonte.

4.4 Sensor SMSMS submetido ao escoamento bifásico

O *setup* experimental utilizado para esta análise foi o mesmo da seção 4.3, porém, além do fluxo de água também foi inserido ar com os seguintes valores: 1.2 m^3/h e 2.5 m^3/h. Com

isso, para cada valor de fluxo de água medido é somado com um dos 2 valores de ar inseridos no sistema. Esta análise tem como principal objetivo observar se o sensor SMSMS consegue identificar a presença de ar dentro da tubulação. O comprimento L_{MMF} utilizado para esta análise foi de $5mm$.

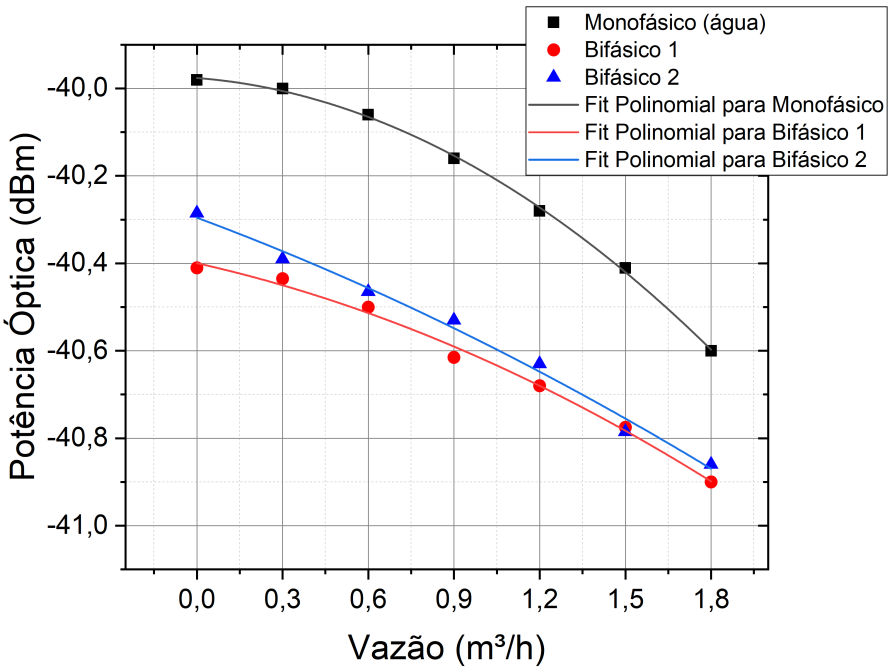

Figura 14 – Potência Óptica em função do Fluxo comparando o comportamento do sensor SMSMS ao escoamento monofásico e bifásico

A Figura 14 apresenta as curvas obtidas para análise do sensor submetido ao escoamento bifásico. Os valores de fluxo de ar 1.2 m^3/h e 2.5 m^3/h foram identificados como Bifásico 1 e Bifásico 2, respectivamente. O sensor SMSMS apresentou uma sensibilidade de -0.1453 $dBm.h/m^3$ para o sistema com inserção de ar de 1.2 m^3/h e -0.0845 $dBm.h/m^3$ para inserção de ar de 2.5 m^3/h. Com relação ao coeficiente de determinação os valores obtidos foram os seguintes: 0.9909 e 0.9875.

Tabela 4 – Características do sensor SMSMS submetido ao escoamento monofásico e bifásico)

Características	Monofásico	Bifásico 1	Bifásico 2
Sensibilidade (dBm.h/m)	-0.3277	-0.1453	-0.0845
Coef. de determinação	0.99912	0.9909	0.9875

Os resultados observados demonstraram que o sensor SMSMS apresentou uma sensibilidade menor quando é inserido ar no sistema, como pode ser visto na Tabela 4, isso pode ser

explicado devido a presença de ar formar bolhas dentro da tubulação. Com isso, o sistema é capaz de identificar a presença de ar na tubulação.

4.5 Simulação numérica de sensor de curvatura SMSMS baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo monitorado na transmissão

A figura 15 compara os resultados experimental e de simulação para o sensor com comprimento de MMF de 4 *mm*, o qual foi escolhido por apresentar uma linearidade maior para a faixa de curvatura escolhida. Utilizamos apenas 4 pontos de amostragem devido à alta fragilidade do sensor dentro da faixa de curvatura. A Figura 15 mostra que o resultado simulado tem um comportamento não linear com uma tendência de perda como o resultado da experiência.

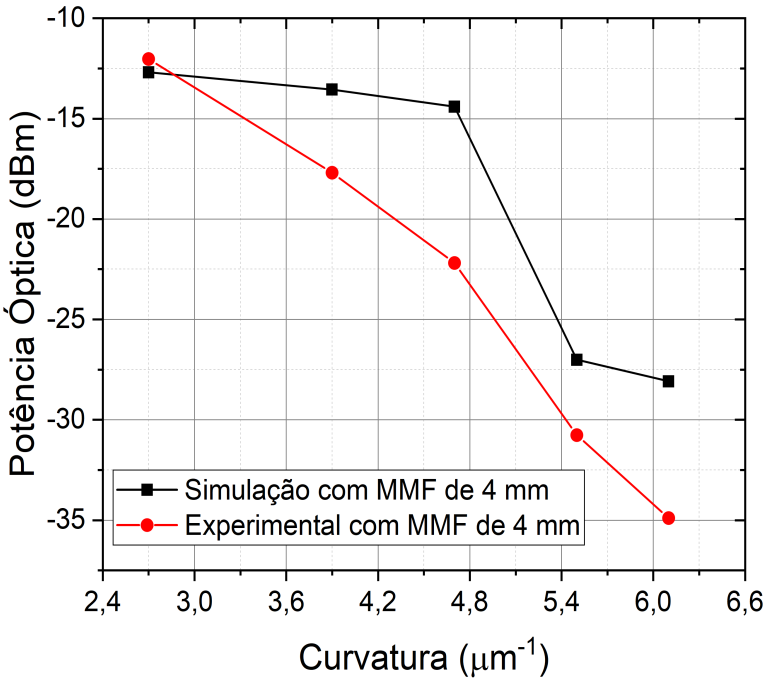

Figura 15 – Curvas experimentais e simuladas comparadas do sensor de curvatura SMSMS com comprimento MMF de 4 *mm*

.

A Figura 16,17 e 18 mostram a energia por comprimento das estruturas de fibra SMSMS com diâmetro das MMFs de 50μm, 62.5μm e 105μm em função da curvatura, respectivamente. (a) mostra a propagação da luz em transmissão ao longo do eixo de propagação longitudinal (z) da estrutura SMSMS. (b) mostra a potência normalizada ao longo do sensor SMSMS, que

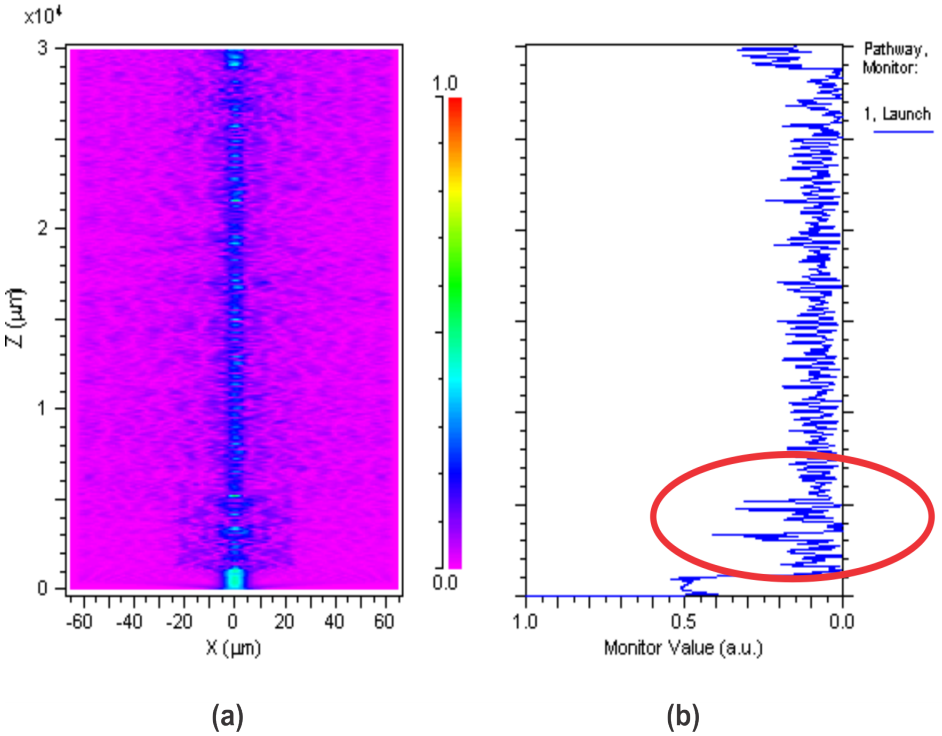

Figura 16 – Energia por comprimento da estrutura de fibra SMSMS com comprimento de MMF de 50 μm. (a)

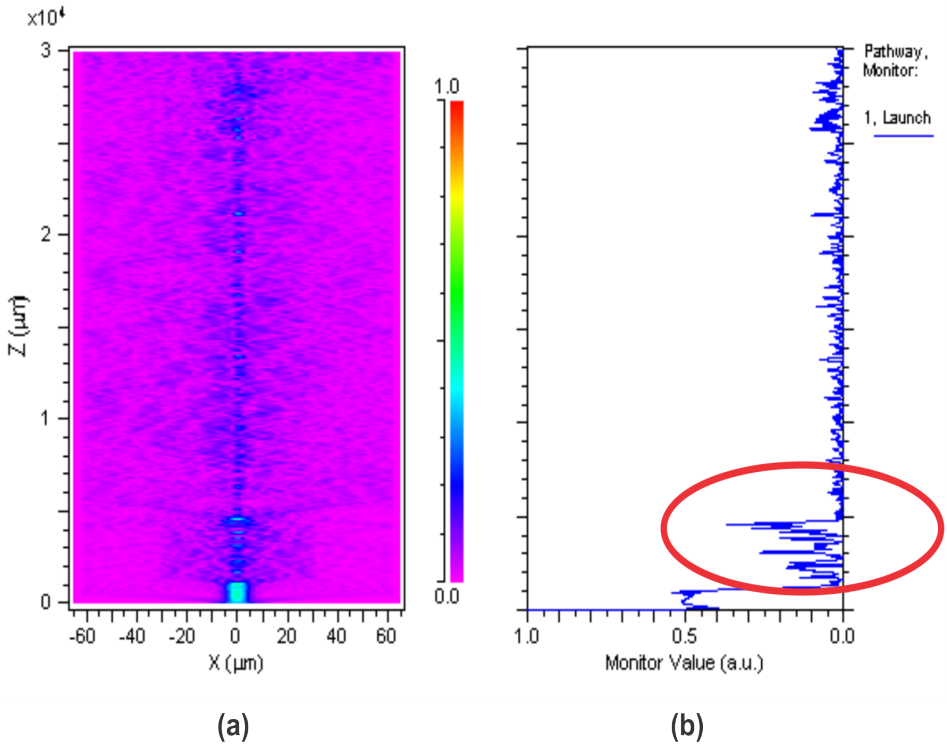

Figura 17 – Energia por comprimento da estrutura de fibra SMSMS com comprimento de MMF de 62.5 μm

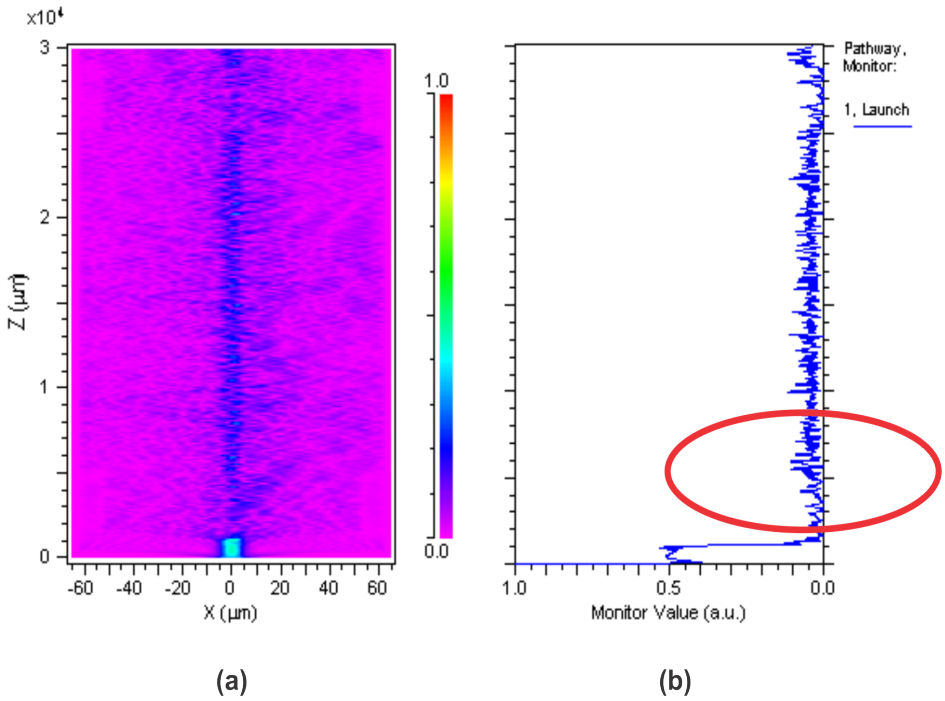

Figura 18 – Energia por comprimento da estrutura de fibra SMSMS com comprimento de MMF de 105 μm

representa a transmissão da onda na estrutura. A curvatura aplicada na estrutura SMSMS, tem uma significativa influência sobre a distribuição do modo de propagação. O modo fundamental é injetado na entrada do dispositivo e então é feita aplicação da variação de curvatura do dispositivo (69). Os resultados obtidos numericamente mostram que as estruturas para 50μm e 62.5μm não apresentaram comportamentos desejáveis. Um dos fatores é a presença de picos de energia por interferências modais construtivas no MMF1 marcadas em vermelho, como podem ser observadas na Figuras 16 e 17. Esses picos variam amplitude em função da curvatura pela mesma razão da deformação do campo. Este efeito gera uma dificuldade para adquirir resultados com uma linearidade desejável e com uma melhor precisão. Em contraste, a estrutura com diâmetro MMF de 105μm apresenta uma propagação de energia mais estável através do comprimento da fibra para análise de curvatura.

Considerando um sensor de curvatura SMSMS com 105μm de diâmetro de núcleo como a melhor opção dentro a gama de parâmetros analisados, podemos considerar a divisão de potência modal interna em ação curvatura como um dos os casos para estudar com a finalidade de adquirir um melhor desempenho no sensor. É possível mudar o número de modos excitados na entrada de um sensor baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo variando a largura da seção MMF, criando assim um nova distribuição de energia nos modos. A simulação

numérica foi realizada para melhorar o sensor de curvatura SMSMS. Neste caso, variando o diâmetro da seção MMF, pode-se fornecer diferentes energias de propagação de os modos em função da curvatura e encontrar um com bom desempenho para fundamentar o estudo deste trabalho.

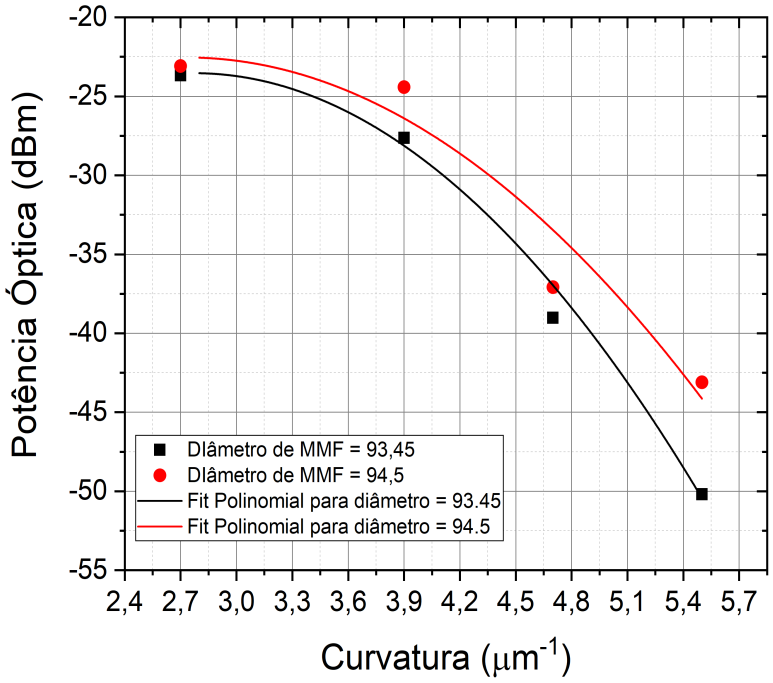

Figura 19 – Potência Óptica em função da variação da curvatura no sensor SMSMS com $94,5\ \mu m$ e $93.45\ \mu m$ de diâmetro do núcleo MMF.

A Figura 19 apresenta os resultados de duas estruturas simuladas com as secções de diâmetro central de MMF de $94.5\mu m$ (90 por cento de $105\mu m$) e $93.45\mu m$ (89 por cento de $105\mu m$). Os valores do coeficiente de determinação (R^2) são 0.96009 e 0.99831, respectivamente, enquanto que o R^2 da curva simulada na Figura 15 é 0.88709. Com os resultados, é possível observar que ajustando alguns parâmetros do sensor, é possível obter consideravelmente mais linearidade no resultado, e assim, melhorando a precisão nas medições de curvatura.

5 CONCLUSÕES

Foi proposto neste trabalho um interferômetro de Mach-Zehnder baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo (CDM - *Core Diameter Mismatch*) para medição de curvatura e escoamento, o qual foi testado experimental e numericamente. A análise de curvatura foi realizada neste dispositivo por meio de análise de variação de comprimento de onda e com a finalidade de analisar o comportamento modal da estrutura enquanto curvada, o sensor foi submetido à curvatura com um sistema composto por uma fonte banda larga SLED (*superluminescent LED*) e um analisador de espetro óptico (OSA - Optical Spectrum Analyzer). Neste foram utilizados 3 comprimentos de MMFs: 3 mm, 4 mm e 5 mm. Os experimentos mostraram que o dispositivo proposto apresentou variação em comprimento de onda, satisfatória sensibilidade e linearidade para os 3 comprimentos utilizados. O dispositivo que apresentou a melhor sensibilidade foi o sensor SMSMS com 3 mm de MMF (-30.6250 nm/um^{-1}), sendo mais sensível 33.21% que o sensor de 4 mm de MMF e 53.22% em relação ao sensor de 5 mm de MMF. O sensor que possui 5 mm de comprimento das seções MMFs demonstrou um aumento do ruído dificultando a precisão dos resultados, com isso, conclui-se que o comprimento da MMF é crítico.

As análises experimentais submetendo o sensor ao escoamento monofásico e bifásico foram realizadas utilizando como fonte um laser e interrogação por meio de um *Power Meter*, que foram escolhidos pela facilidade de transporte desses equipamentos ao local dos experimentos, e também, investigar se para a faixa de curvatura gerada na tubulação poderíamos obter apenas perda de potência. Os resultados demonstraram que é possível realizar análise de perda de potência para medição no escoamento monofásico e bifásico. O sensor apresentou uma satisfatória sensibilidade, tendo como resultado das medidas experimentais para o escoamento monofásico: sensibilidade de -0.4196 $dBm.h/m^3$ e -0.3277 $dBm.h/m^3$ para 3 *mm* e 5 *mm*, respectivamente, em escoamento monofásico. Já no escoamento bifásico utilizando um comprimento de MMF com 5 *mm* foram observados sensibilidades menores com o aumento da inserção de ar na tubulação, logo, conclui-se que ele pode ser utilizado como sensor para medição de escoamento pois a presença de ar na tubulação pode ser detectada e feita a regulação.

Investigou-se a transmissão por meio de simulações numéricas baseadas na técnica FD-BPM a resposta do sensor SMSMS operando como sensor de curvatura. A análise numérica foi

realizada para observar a resposta da estrutura à perda de potência quando submetida à curvatura. Os resultados numéricos para a estrutura se aproximou dos resultados obtidos experimentalmente. As simulações numéricas indicaram que a perda de potência foi intensificada ao se curvar a região sensora. Além disso, foi realizado o estudo com a finalidade de obter uma maior linearidade desse sensor e com isso, foi possível observar que para se obter tal melhoria, o valor de diâmetro ideal seria 93.45 μm.

Sendo assim é possível concluir que o dispositivo sensor apresentado neste trabalho pode ser usado como ferramenta tanto para medição de curvatura quanto para medição de escoamento, seja monofásico ou bifásico, pois apresenta uma satisfatória sensibilidade para micro curvaturas. Os resultados mostraram que o sensor SMSMS possui vantagens comparadas com outros sensores, como por exemplo, sensores FBG, pois pode ser usado como alternativa de baixo custo, fácil fabricação e com ampla faixa de aplicabilidade.

5.1 Proposta de trabalhos futuros

A seguir, apresentam-se algumas sugestões para a continuação dessa pesquisa:

- Investigar numericamente a possibilidade de ajustes de setup considerando a variação de diâmetro e comprimento das seções MMFS da estrutura para otimização de sensibilidade do sensor;
- Avaliar testes experimentais em escoamento utilizando outros comprimentos de MMF, além de incluir métodos probabilísticos de medidas experimentais utilizando em conjunto com outra possível forma de interrogação, com isso é possível obter a maior precisão do sensor;
- Realizar testes experimentais para avaliar o comportamento do sensor para curvaturas de mm ou cm;
- Analisar a relação da influência da falta de compensação ou normalização de um sinal de referência, visto que o ambiente não é controlado e não há estabilidade do sinal da fonte ao submeter o sensor SMSMS ao escoamento;
- Investigar, por meio de setup experimental, aplicação de sensores SMSMS em escoamento com diferentes valores de viscosidade do fluido;

- Estudar a influência da temperatura no comportamento do sensor SMSMS, visto que, dependendo do ambiente em que se encontra a tubulação o liquido pode estar aquecido. Com isso é possível analisar a sensibilidade cruzada;

- Buscar outras aplicações para sensoriamento utilizando o principio de curvatura como por exemplo, sensor de amplitude de movimento, controle da expansão de caule e controle de temperatura tubular.

PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DA PESQUISA

- **Conferências nacionais:**

  1. **V. H. R. Cardoso**, L. K. D. Braga, M. T. M. R. Giraldi, C. S. Fernandes, M. O. Silva, J. C. W. A. Costa. Sensor Óptico de Vazão Baseado em Técnica de Descasamento de Diâmetro de Núcleo. In: 18ž SBMO ? SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA, 2018, Santa Rita do Sapucaí. MOMAG 2018, 2018.

- **Conferências internacionais:**

  1. Felipe Takeda, **Victor Rodrigues Cardoso**, Cindy Fernandes, Joao Weyl Costa and Maria Thereza Rocco Giraldi. Experimental and Simulated Curvature Analysis in Structure Based on Core Diameter Mismatch. In: Second Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors, 2019, Rio de Janeiro. LAWOFS 2019
  2. **V. H. R. Cardoso**; F. M. Takeda; C. S. Fernandes; M. T. R. M. Giraldi; J. C. W. A. Costa. Mach-Zehnder Interferometer Based on Core Diameter Mismatch Structures for Curvature Measurement. Aceito para apresentação oral em IMOC 2019 - International Microwave and Optoelectronics Conference.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 LI, E.; WANG, X.; ZHANG, C. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes. *Applied Physics Letters*, v. 89, n. 9, p. 091119, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.2344835>.

2 ZHANG, Z.; BAO, X. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of polarization-otdr system. *Opt. Express 16, 10240-10247l*, 2008.

3 LAGAKOS, N. et al. Multimode optical fiber displacement sensor. *Appl. Opt.*, v. 20, 1981.

4 DI, H. Sensing principle of ber-optic curvature sensor. *Optics & Laser Technology*, v. 62, p. 44–48, 2014.

5 YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. Fiber optic sensors. *CRC Press*, v. 2, 2008.

6 TAFULO, P. e. a. .intrinsic fabryperot cavity sensor based on etched multimode graded index fiber for strain and temperature measurement. *IEE Sensrs Journal*, v. 12, p. 8?12, 1 2012.

7 GOMES, G. C. *Sensores Ópticos com base em Grades de Bragg em Fibra para Monitoramento de Temperatura e Índice de Refração*. [S.l.], 2011.

8 GRATTAN, K.; MEGGITT, B. Optical fiber sensor technology: Applications and systems. *Springer*, v. 3, 1 1999.

9 LEE, B. H. a. Interferometric fiber optic sensors. *Sensors*, v. 12, p. 2467–2486, 2012.

10 TOSI, D. et al. Simple fiber bragg grating sensing systems for structural health monitoring. *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems*, 2009.

11 LAI, J. et al. Fiber bragg grating sensors-based in situ monitoring and safety assessment of loess tunnel. *Journal of Sensors*, v. 2016, 2016.

12 THEKKETHIL, S. R. et al. Experimental investigation on mass flow rate measurements using fibre bragg grating sensors. *IOPscience*, 2017.

13 KANG, L.-H.; KIM, D.-K.; HAN, J.-H. Estimation of dynamic structural displacements using fiber bragg grating strain sensors. *Journal of Sound and Vibration*, v. 305, n. 3, p. 534 – 542, 2007. ISSN 0022-460X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X07003045>.

14 GUAN, B.-O. et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber bragg grating. *Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating*, v. 12, p. 675–677, 6 2000.

15 SONG, X.; LIANG, D. Dynamic displacement prediction of beam structures using fiber bragg grating sensors. *Optik*, v. 158, p. 1410 – 1416, 2018. ISSN 0030-4026. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618300160>.

16 WANG, Y. et al. Fiber optic relative humidity sensor based on the tilted fiber bragg grating coated with graphene oxide. *Applied Physics Letters*, v. 109, n. 3, p. 031107, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4959092>.

17 BARONCINI, V. H. et al. Single- and two-phase flow characterization using optical fiber bragg gratings. *Sensors*, v. 15, p. 6549=6559, 3 2015.

18 LIU, Z. et al. Miniature fbg-based fluidic flowmeter to measure hot oil and water. *25th INternational Conference on Optical Fiber Sensors*, v. 10323, 2017.

19 KUHNHENN, J. et al. Gamma radiation tests of radiation-hardened fiber bragg grating-based sensors for radiation environments. *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, v. 64, p. 2307–2311, 8 2017.

20 TANI, Y. et al. Accuracy evaluation of a hetero-core splice ber optic sensor. *Proc. SPIE*, p. 59, 2005.

21 FANG, X.; LIAO, C. R.; WANG, D. N. Femtosecond laser fabricated ber bragg grating in microber for refractive index sensing. *Optics Letters*, v. 35, 4 2010.

22 MA, Y. et al. Machzehnder interferometer based on a sandwich fiber structure for refractive index measurement. *IEEE Sensors Journal*, v. 12, p. 2081–2085, 6 2014.

23 XIONG, R. et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on modal interference. *IEEE Sensors Journal*, v. 14, p. 2524–2528, 8 2014.

24 WANG, Y.-P.; RAO, Y.-J. A novel long period ber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultane-ously. *IEEE Sensors Journ5*, v. 5, p. 839–843, 10 2005.

25 GOUVEIA, C. et al. Temperature-independent curvature sensor using fbg cladding modes based on a core misaligned splice. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 23, p. 804–806, 6 2011.

26 SHEN, C. et al. Polarization-dependent curvature sensor based on an in-ber mach-zehnder interferometer with a difference arithmetic demodulation method. *Optics Express*, 2014.

27 AL., C. S. F. et. Curvature and vibration sensing based on core diameter mismatch structures. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 65, p. 2120=2128, 9 2016.

28 WANGA, P. et al. Simple fiber bragg grating sensing systems for structural health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 29–32, 2015.

29 ISMAIL, A. S. I. et al. Experimental investigation of oilwater two-phase flow in horizontal pipes: Pressure losses, liquid holdup and flow patterns. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 127, p. 409–420, April 2015.

30 VENZON, M. C. P. Comportamento do esoamento bifásico Água-ar em placas de orifício. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre*, 1996.

31 AMARAL, T. C. *Aferição de um hidrometro unijato classe C quando submetido a escoamento bifásico*. [S.l.], 2016.

32 WANG, P. et al. Research on a novel variable-area optical fiber gas flow sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 29–32, 11 2014.

33 SUN, J. et al. High sensitivity multimodemultimodemultimode structure ber sensor based on modal interference. *Elsevier Optics Communications*, p. 112–115, 2014.

34 NGYUEN, L. V. e. a. High temperature ber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. *Opt. Express*, v. 16, p. 11369–11375, 2008.

35 SUN, X. et al. Simultaneous curvature and temperature sensing based on a novel mach-zehnder interferometer. *Photonic Sensors*, 2019.

36 RAO, Y.-J. Recent progress in fiber-ptic extrinsic fabry-perot interferometric sensors. *Optical Fiber Technology*, v. 12, p. 227–237, 2006.

37 CHEN, K. et al. Fiber-optic fabry-perot interferometer based high sensitive cantilever microphone. *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 107–112, 6 2018.

38 LIN, C. et al. A novel fabry-perot cavity fiber sensor. *2012 International Conference on Medical Physics and Biomedical Engineering*, 2012.

39 WEI, T. et al. Miniaturized ber inline fabryperot interferometer fabricated with a femtosecond laser. *Optics Letters*, v. 33, p. 536–538, 5 2008.

40 AL, B. H. L. et. Interferometric fiber optic sensors. *Sensors*, p. 2467–2486, 2012.

41 ZHOU, J. et al. Intensity modulated refractive index sensor based on optical fiber michelson interferometer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 20, p. 315–319, 2015. ISSN 0925-4005.

42 CHOI, H. Y. et al. Miniature ber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured fabryperot interferometer. *Optics Letters*, v. 33, p. 2455–2457, 11 2008.

43 LIU, Q. et al. Highly sensitive machzehnder interferometer biosensor based on silicon nitride slot waveguide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 188, p. 681–688, 2013. ISSN 0925-4005.

44 LIU, Q. et al. Machzehnder interferometer (mzi) point-of-care system for rapid multiplexed detection of micrornas in human urine specimens. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 71, p. 365–372, 2015. ISSN 0956-5663.

45 WANG, L. et al. High sensitivity and low loss open-cavity mach-zehnder interferomter based on multimode interference coupling for refrative index measurement. *Optics and Laser Technology*, v. 109, p. 193–198, April 2019.

46 HEIDEMAN, R.; KOOYMAN, R.; GREVE, J. Performance of a highly sensitive optical waveguide mach-zehnder interferometer immunosensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 10, n. 3, p. 209–217, 1993. ISSN 0925-4005.

47 HATTA, A. M. et al. Strain sensor based on a pair of single-mode multimodesingle-mode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme. *Applied Optics*, v. 49, p. 536–541, 1 2010.

48 FERNANDES, C. S. *Desenvolvimento de Sensores Baseados em Fibra Óptica para Monitoramento de Estruturas*. [S.l.], 2016.

49 B, S. L.; M, P. E. C. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications. *Journal Lightwave Technology*, v. 13, p. 615–627, 1995.

50 A, R. B. M. et al. Design of optical polarization splitters in a single-section deeply etched mmi waveguide. *Appl. Phys.*, v. 73, p. 613–618, 2001.

51 R, P. M.; I, M. R. Design of phased-array wavelength division multiplexers using multimode interference couplers. *Appl. Opt.*, v. 36, p. 5097–5108, 1997.

52 SILVA, S. et al. Temperature and strain-independent curvature sensor based on a singlemode/multimode ber optic structure. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, v. 22, 2011.

53 GON, Y. et al. All-fiber curvature sensor based on multimode interference. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, v. 23, p. 679–681, 6 2011.

54 SILVA, S. et al. Curvature and temperature discrimination using multimode interference fiber optic structuresa proof of concept. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, v. 30, 12 2012.

55 BHATIA, N.; JOHN, J. Multimode interference devices with single-modemultimodemultimode fiber structure. *Applied Optics*, v. 53, p. 5179–5186, 8 2014.

56 Wang, R. et al. Displacement sensor based on sms fiber structure. In: *2011 Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3. ISSN 2156-8480.

57 LI, Y.; LIU, Z.; JIAN, S. Multimode interference refractive index sensor based on coreless fiber. *Photonic Sensors*, v. 4, p. 21–27, 1 2014.

58 TAKESHI, Z. Study on low-loss si waveguides and photonic integrated circuit devices using multi-mode interference waveguides for optical networks (tese). *Universidade Waseda, Japão*, 2005.

59 BLAHUT, M.; KASPRZAK, D. Multimode interference structures-properties and applications. *Optica Applicada*, XXXIV, 4 2004.

60 BRYNGDAHL, O. Image formation using self-imaging techniques. *Journal of the Optical Society of America*, v. 63, p. 416–419, 4 1973.

61 WANG, P. et al. Investigation of single-modemultimodesingle-mode and single-modetapered-multimodesingle-mode fiber structures and their application for refractive index sensing. *Journal of the Optical Society of America*, v. 28, p. 1180–1186, 5 2011.

62 PACHON, E. G. P. *Dispositivos em fibras ópticas baseadas em interferência multimodal*. [S.l.], 2013.

63 MORSHED, A. H. Self-imaging in singlemode-multimode-singlemode. *Optical Fiber Sensors. Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC) Saudi International*, p. 1–5, 4 2011.

64 GROUP, R. design. *BeamProp Manual 9.0*. [S.l.]: Ossining:[s.n.], 2013.

65 HUANG, W. P. et al. The perfectly matched layer (pml) boundary condition for the beam propagation method. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 8, p. 649–651, May 1996.

66 CHUNG, Y.; DAGLI, N. An assessment of finite difference beam propagation method. *Quantum Electron*, v. 26, p. 1335, 1990.

67 T.SCHERMER, R.; COLE, J. H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment. *IEEE Journal of Quantim Electronics*, v. 43, October 2007.

68 MARCUSE, D. Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers. *J. Opt. Soc. Am.*, v. 66, April 1976.

69 WUAB, Q. e. a. The use of a bend singlemode-multimode-singlemode (sms) fibre structure for vibration sensing. *Optics e Laser Technology*, v. 63, p. 29–33, 2014.