CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PPGIO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM INSTRUMENTAÇÃO E ÓPTICA APLICADA

Universidade Federal Fluminense

SENSOR DE CURVATURA, VAZÃO E ANEMÔMETRO A FIBRA ÓTICA BASEADO EM INTERFERÊNCIA MULTIMODAL

Jesse Werner Costa

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Ótica Aplicada - PPGIO, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Instrumentação e Ótica Aplicada.

Orientadora: Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi
Coorientador: Marcos Antônio Ruggieri Franco

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

SENSOR DE CURVATURA, VAZÃO E ANEMÔMETRO A FIBRA ÓTICA BASEADO EM INTERFERÊNCIA MULTIMODAL

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em setembro de 2019, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Instrumentação e Ótica Aplicada.

Jesse Werner Costa

Banca Examinadora:

Professora Dra. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi (IME) (orientadora)

Professora Dra. Maria Aparecida Gonçalves Martinez (CEFET/RJ)

Professor Dr. Hypolito José Kalinowski (UFF)

Professor Dr. Marcelo Martins Werneck (UFRJ)

Professor Dr. Luiz Carlos Guedes Valente (Ouro Negro Ltda.)

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C837 Costa, Jesse Werner
Sensor de curvatura, vazão e anemômetro a fibra ótica baseado em interferência multimodal / Jesse Werner Costa. – 2019.
104f. il. (algumas color.) + anexos , grafs. ; enc.

Tese (Doutorado). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.
Bibliografia : f. 104-113.
Orientadora : Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi
Coorientador: Marcos Antônio Ruggieri Franco

1. Fibras ópticas. 2. Fibras óticas – Testes. I. Giraldi, Maria Thereza Miranda Rocco (Orient.) II. Franco, Marcos Antônio Ruggieri (Co-orient.). III. Título.

CDD 621.3692

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

AGRADECIMENTOS

À Deus por tudo.

À minha família pelo incentivo, apoio e compreensão.

À minha orientadora Profa. Dra. Maria Thereza, pela confiança, paciência (mesmo com quem enfrentava muitos desafios novos), disponibilidade, compreensão e amizade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Marcos Franco pela gentileza de ceder espaço nos servidores do LEC no IEAv-CTA em São José dos Campos para uso dos *software*s de simulação, pela boa vontade em muitas conversas e trocas de informações que tivemos e ter me recebido com muita dedicação por ocasião de minha visita ao LEC em 2016.

À Profa. Dra. Maria Aparecida Martinez do CEFET-RJ, pela amizade desde os tempos de professores no curso de graduação em Engenharia no DEPEL, pelo incentivo e orientação ao longo de minha pesquisa e pelos conhecimentos ministrados na disciplina de Elementos de Óptica Integrada e Fotônica.

À Profa. Dra. Anna Barros pelo apoio e orientação desde o início de meu projeto de fazer o doutorado no CEFET-RJ, pelos trabalhos que fizemos juntos e sua amizade.

Ao Prof. Dr. Cristiano M. B. Cordeiro, pela pronta colaboração em ceder espaço no Instituto de Física "Gleb Wataghin" da UNICAMP, para meu trabalho, pelas discussões sobre os trabalhos e o uso do túnel de vento da Engenharia Mecânica.

Ao Msc. Hugo Eugênio de Freitas pela amizade e colaboração nos trabalhos realizados na UNICAMP.

Ao Prof. Marcelo Martins Werneck e Msc. Ariadny da Silva Arcas, da UFRJ, pela pronta colaboração na deposição de películas de ouro nas pontas dos sensores.

Ao Eng. Renato Trevisano Bellini do CEFET-RJ, pela amizade e boas discussões.

Ao Msc. Valdir Serrão do IEAv-CTA, pela colaboração nas simulações do sensor.

Ao Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Costa e à Profa. Dra. Cindy Fernandes da UFPA-PA, pela gentileza de ceder espaço no servidor para uso de *software* de simulação e boa vontade em muitas trocas de informações que tivemos.

Ao amigo Alberto R. da Cruz do LABFOT/IME, pela amizade e apoio ao trabalho.

Aos amigos da Escola Naval, em particular ao Comte. Amaral e ao CT Gabriel Torreão, pelo apoio e colaboração.

Aos meus amigos e colegas de trabalho do LAFOT e do LAFEA pelo coleguismo e amizade sempre demonstrados e apoio na execução deste trabalho.

RESUMO

O crescimento das aplicações de sensores óticos nas últimas décadas corrobora a importância do estudo de dispositivos baseados em fibras óticas sensíveis a diversas variáveis físicas como curvatura, vazão, vibração e temperatura, entre outras. Neste trabalho são abordados sensores de curvatura que utilizam o princípio de interferência multimodal numa configuração que emprega um segmento de fibra multimodo (*Multimode*) conectado entre duas fibras monomodo (*Single-mode*), conhecida como estrutura SMS. Os dispositivos SMS possuem vantagem de simplicidade de construção e baixo custo, comparados a outros dispositivos sensores a fibra ótica.

A energia luminosa propagada pelos modos guiados do segmento multimodo apresenta interferências construtivas e destrutivas ao longo do sentido de propagação, formando um padrão de interferências que possui sensibilidade com relação às variáveis físicas mencionadas. A leitura da potência de saída é realizada levando em conta o efeito de reimagem, onde o perfil de entrada da MMF é praticamente replicado a uma determinada distância e comprimento de onda.

Análises numérica e experimental do comportamento dos sensores demostram que a potência de saída em função do raio de curvatura apresenta alternações de inclinação que podem dificultar seu emprego em aplicações para grandes faixas de curvatura. Essa questão levou à proposta de sensoriamento por variação do arqueamento do sensor em torno de um suporte de perfil circular (raio de curvatura fixo).

São apresentadas análises conceitual e experimental de sensores de curvatura, interrogados na transmissão e na reflexão, utilizando raio de curvatura variável e fixo, com aplicações em sensoriamento de fluido em movimento, como sensor de vazão ou anemômetro, e arqueamento mecânico. Testes em bancada ótica e em túnel de vento foram realizados para comprovar a viabilidade e eficiência do dispositivo como sensor, revelando bom desempenho. Nos experimentos fica evidente a existência de correlação entre a potência de saída do sensor e a variável controlada, tanto para raio de curvatura variável quanto fixo. No caso dos sensores que empregam raio de curvatura fixo, são discutidas as influências do raio de curvatura do suporte e das características físicas da fibra multimodo (diâmetro e comprimento), uma vez que determinam o deslocamento máximo da ponta do sensor e quantidade de arqueamento da fibra no suporte.

Experimentos em túnel de vento com o sensor de vazão livre, sem apoio em suporte, com velocidades de até 12,25 m/s (44,1 km/h), resultaram em sensibilidade da ordem de 2,03 dB/(m/s) para potência refletida com resolução de $4{,}93 \times 10^{-3}$ m/s e sensibilidades de 381,33 pm/(m/s) para o deslocamento do pico espectral, com resolução de 23×10^{-3} m/s. Testes efetuados em bancada ótica com deslocamento da ponta do sensor, usando apoio em suporte de 85 mm de raio de curvatura, resultaram em sensibilidade de -7,06 dB/mm e resolução de $0{,}14 \times 10^{-3}$ mm.

Palavras-chave: Sensor a fibra ótica SMS; interferência multimodal (MMI); sensor de curvatura; sensor de vazão; anemômetro.

ABSTRACT

Fiber optical sensors have been used for a large area of applications, which includes monitoring physical variables as bending, flow rate, vibration and temperature, among others. In this work the basic device is a small simple arrangement composed of a single-mode fiber connected to a multimode fiber segment and this one to another single-mode fiber, in a structure that is called SMS. This type of device has the advantage of being simple and low-cost, compared to others optical fiber sensors.

Inside of the multimode segment the light beams in the guided modes interfere with each other in what is called multimodal interference (MMI). The length of the multimode segment is just the necessary to get the light out using the self-image principle, where the constructive interferences of the light waves among the several guided modes lead to a copy of the input light signal.

The aim of this work is to develop theoretical analysis, numeric simulations and experimental tests of fiber optics SMS bend sensors using multimodal interference in both transmission and reflection modes, with applications as flow rate sensor, anemometer and mechanical bend sensor in general. Issues about alternating slope behavior of the sensor output power response to bending, which is fully demonstrated, led to a solution which is the use of a circular support with fixed curvature radius, where the sensor bends forming an arc along the support edge. Experimental tests were accomplished using optical bench work and wind tunnel in order to verify the practical feasibility and efficiency of the devices as optical sensors, in both free and fixed curvature radius, which revealed good correlation between output power and the controlled variable.

Sensitivities of 2,03 dB/(m/s) of reflected power with resolution of 4,93x10^{-3} m/s *and 381,33 pm/(m/s) of spectral peak displacement with resolution of 23x10*$^{-3}$ *m/s are reported (free sensor, without fixed radius support, inside the wind tunnel). Sensitivity of -7,06 dB/mm with resolution of 0,14x10*$^{-3}$ m/s *using displacement of the sensor tip, on the optical work bench, is reported using an 85 mm curvature radius circular support.*

Keywords*: SMS optical fiber sensor; multimode interference (MMI); bend sensor; flow rate sensor; anemometer.*

Lista de Figuras

Figura 1: Exemplos de efeitos de modulação usados em sensores a fibra ótica 18

Figura 2: Classificação dos tipos de sensores de acordo com o modo como o parâmetro físico age na fibra 18

Figura 3: Sistema básico de sensoriamento por fibra ótica.....19

Figura 4: Uma classificação dos principais tipos de sensores pontuais e multipontuais.....20

Figura 5: Princípio de operação da FBG.....20

Figura 6: Princípio de operação da LPG.....21

Figura 7: Princípio de operação do interferômetro de Fabry-Perot.....22

Figura 8: Sensores tipo Fabry-Perot (a) formado com adição de componentes refletores e (b) formado pela adição de cavidade a ar (fibra oca, *hollow core*, por exemplo).....22

Figura 9: Tipos de construção de interferômetros Mach-Zehnder empregando (a) LPGs, (b) desalinhamento do núcleo, (c) segmento de fibra multimodo, (d) redução do raio do núcleo da fibra e (e) afunilamento da fibra (*taper*).....23

Figura 10: Interferômetro de Michelson, (a) princípio de funcionamento e (b) exemplo de construção empregando *taper* em fibra.....24

Figura 11: Uso de sensores a fibra ótica em produção de petróleo.....29

Figura 12: Uso de sensores a fibra ótica em sensoriamento corrente elétrica em uma subestação.....30

Figura 13: Submarino nuclear norte-americano classe Virgínia: (a) Detalhe de um conjunto de hidrofones e (b) Localização dos 6 hidrofones (3 de cada lado do casco) 31

Figura 14: Instalação de sensores a fibra ótica em avião.....31

Figura 15: Crescimento do mercado de sensores a fibra óptica: (a) receitas globais com previsão até 2022 e (b) Mercado global de sensores pontuais e distribuídos até 2026.....32

Figura 16: (a) previsão do comportamento do mercado de sensores distribuídos a fibra ótica na indústria, por região global, no período 2016-2028 e (b)

Previsão do comportamento do mercado de sensores a fibra ótica distribuídos, por submercado, para o Brasil no período 2015-2026, incluindo AGR (Annual Growth Rate – taxa de crescimento anual).....33

Figura 17: (a) Estrutura SMS e (b) exemplos de diagrama de perfil de propagação do campo no plano x versus z (acima) e gráfico de transmissão ao longo do eixo de propagação 36

Figura 18: (a) Estrutura SMS cilíndrica (fibra ótica) e (b) exemplos de diagrama de perfil de propagação do campo no plano x versus z (acima) e gráfico de transmissão ao longo do eixo de propagação.....37

Figura 19: (a) Estrutura SMS; (b) dados das fibras: Corning SMF-28 e MMF Thorlabs AFS105/125Y e (c) coeficientes de eficiência de acoplamento de potência 41

Figura 20: Característica de transmissão da potência ao longo do eixo de propagação da MMF, levando em conta as interferências construtivas e destrutivas dos feixes propagados nos 9 primeiros modos guiados 43

Figura 21: Resultado da Equação 20 obtida com os dados da MMF da Figura 19 46

Figura 22: (a) Localização da distância da primeira reimagem para a MMF da Figura 19 em 1,55 µm (ponto B) e o valor obtido experimentalmente (ponto A); (b) Espectro obtido no experimento revelando a localização da reimagem em 1,54 µm 47

Figura 23: (a) Aumento das perdas de potência na transmissão devido à curvatura, por irradiação do campo evanescente. Em (b) a imagem mostra a propagação da luz em fibra monomodo reta. Em (c) a imagem mostra o equivalente reto da fibra curvada, com o aumento do campo evanescente no lado externo da curvatura. A escala à direita relaciona as cores com a intensidade luminosa.....49

Figura 24: Distribuição do campo **E** em função do raio normalizado **r/a** (sendo **a** o raio do núcleo da fibra) para o modo HE_{11} (LP_{01}) em uma fibra multimodo. **Rc** representa o raio de curvatura.....50

Figura 25: Perfil transversal e índice efetivo para a propagação dos 5 primeiros modos de uma MMF na condição reta, à esquerda, e curvada com Rc = 500 mm.....51

Figura 26: (a) Eficiência de acoplamento por modo, para fibras MMF de diferentes diâmetros e (b) Simulação do perfil de variação de potência transmitida, para sensores SMS empregando as fibras do item (a), no mesmo comprimento de onda.....53

Figura 27: Detalhe da resposta ao raio de curvatura para a fibra *no-core* de 125 µm

de diâmetro da Figura 26 (b). As linhas tracejadas ajudam a ilustrar o fato de que dependendo da faixa de curvatura da aplicação, o dispositivo pode ser usado como sensor linear ou ser inviável para sensoriamento de curvatura.....54

Figura 28: Sensor de vazão por variação do arco com raio de curvatura fixo: (a) seleção do valor do raio de curvatura fixo e (b) montagem em suporte de perfil circular.....55

Figura 29: (a) Detalhe da adição de um bloco ao sensor para casos em que a rigidez da fibra for elevada para o fluxo. A inclusão do bloco aumenta a sensibilidade do conjunto. (b) O sensor pode ser deslocado para a parte mais interna do tubo.....57

Figura 30: Sensoriamento de curvatura com interrogação na reflexão da luz: (a) sensor por reflexão e (b) diagrama das conexões para verificação experimental.....59

Figura 31: (a) Diagrama da montagem do experimento no túnel de vento; (b) foto do experimento no túnel de vento e (c) detalhe do sensor montado no tubo de acrílico dentro da câmara de testes (a elipse mostra a posição do sensor dentro do tubo) 60

Figura 32: (a) Experimento de Reynolds; (b) Transição do fluxo externo laminar de perfil uniforme, para o fluxo laminar no interior do tubo, mostrando a Região Hidrodinâmica de Entrada com comprimento Lh; (c) Perfil da velocidade de escoamento na Região Hidrodinâmica Plenamente Desenvolvida (parabólica no caso do escoamento laminar) 62

Figura 33: Conjunto de espectros obtidos experimentando o sensor em diferentes valores de pressão/velocidade do ar. Os picos P1 e P2 e o vale V1 foram escolhidos para ilustrar as principais propriedades do sensor.....64

Figura 34: Deslocamento dos pontos selecionados P1, P2 e V1.....67

Figura 35: (a) Deslocamento do comprimento de onda do pico P1 em função da pressão dinâmica com o ajuste polinomial de segunda ordem; (b) Deslocamento espectral do pico P1 em função da velocidade do ar e vazão com ajuste linear.....68

Figura 36: (a) potência de saída no comprimento de onda de referência em função da pressão dinâmica com ajuste polinomial de segunda ordem e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão com ajuste linear.....69

Figura 37: (a) potência de saída para o vale V1 em função da pressão dinâmica com ajuste polinomial de segunda ordem e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão com ajuste linear.....70

Figura 38: (a) potência de saída para a combinação P2 e V1 em função da pressão

dinâmica com ajuste polinomial de segunda ordem e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão com ajuste linear.....71

Figura 39: (a) Peças se deslocam em torno de um eixo comum. (b) O ressalto na peça da direita pode deslocar a ponta de um sensor SMS, que se acomoda em uma ranhura à medida que arqueia.....73

Figura 40: (a) Diagrama da configuração experimental para teste do sensor em modo transmissão e (b) Espectro com o sensor na posição vertical sem curvatura.....74

Figura 41: Diagrama do experimento realizado para medir os efeitos da curvatura em um sensor SMS.....75

Figura 42: Resultado do experimento descrito na Figura 41. Entre as linhas verticais está a faixa de valores selecionada para escolha do raio de curvatura do suporte circular a ser empregado no teste do sensor.....76

Figura 43: Sensor a fibra ótica SMS por transmissão: (a) detalhe da peça de suporte do sensor com perfil circular e raio de curvatura de 500 mm, disponível para teste; (b) diagrama do apoio do sensor na peça de suporte, de modo a acompanhar a curvatura quando fletido.....77

Figura 44: Arco descrito pelo sensor no suporte de raio fixo: (a) sensor reto na posição vertical e (b) sensor arqueando à medida que a ponta da fibra se desloca, empurrada pelo microposicionador.....77

Figura 45: Variáveis escolhidas na análise da curva envolvente produzida pelo deslocamento da ponta da fibra.....78

Figura 46: Deslocamento da ponta do sensor igual a 2,5 mm empregando programação em *software* matemático comercial (Matlab). O arco correspondente, que acompanha o disco suporte tem comprimento de 29,2 mm.....79

Figura 47: Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.....80

Figura 48: (a) Intensidade da potência transmitida para λ = 1570,5 nm em função do deslocamento da ponta do sensor e (b) sensibilidade do sensor em relação ao deslocamento da ponta.....80

Figura 49: Potência transmitida em função do comprimento de arco, calculada com a expressão matemática da curva envolvente do círculo.....81

Figura 50: Sensor a fibra ótica SMS por reflexão: Diagrama da configuração experimental para teste do sensor em bancada ótica.....82

Figura 51: Sensor a fibra ótica SMS por reflexão: (a) diagrama da peça de suporte do sensor com perfil circular e (b) diagrama do apoio do sensor na peça de

suporte, de modo a acompanhar a curvatura quando fletido.....83

Figura 52: Experimento com deslocamento do sensor: (a) a parte superior do microposicionador desloca a ponta do sensor e (b) detalhe do contato com o sensor.....83

Figura 53: Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.....85

Figura 54: Intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral 85

Figura 55: Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.....86

Figura 56: Intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral 86

Figura 57: Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.....87

Figura 58: Intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral 87

Figura 59: Potência total nos espectros em função do deslocamento da ponta do sensor, para o sensor do teste B.....89

Figura 60: Diagrama da configuração experimental para teste do sensor.....91

Figura 61: Sensor de vazão a fibra ótica SMS por transmissão, empregando suporte com perfil circular e raio de curvatura Rc = 300 mm: (a) vista em perspectiva; (b) vista lateral; (c) foto do sensor apoiado no suporte e (d) foto da montagem do sensor no tubo de acrílico dentro da câmara de testes do túnel de vento.....92

Figura 62: Conjunto de espectros obtidos com variação da velocidade do ar.....93

Figura 63: (a) potência de saída no comprimento de onda dos picos espectrais 1540 nm e 1600 nm em função da pressão dinâmica e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão..... 94

Figura 64: Sensibilidades apresentadas pelo sensor nos comprimentos de onda selecionados.....94

Figura 65: (a) Estrutura cantilever submetida a esforço uniformemente distribuído e (b) sensor em configuração cantilever sob ação do vento.....117

Figura 66: Deslocamento da ponta do sensor em função da pressão dinâmica.....120

Figura 67: Deslocamento da ponta do sensor proporcional à pressão diferencial....120

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros do segmento MMF da Figura 19.....42

Tabela 2: Valores calculados e experimentais dos comprimentos de onda das interferências de pares de modos m e n 66

Tabela 3: Testes do sensor de curvatura por raio fixo. O comprimento L reportado corresponde ao valor experimental.....84

Tabela 4: Deslocamento da ponta do sensor livre no túnel de vento (Capítulo 3).....119

Lista de Símbolos e Acrônimos

β	Constante de propagação longitudinal
η	Coeficiente de acoplamento de potência
ν	Número de modo
AGR	Annual Growth Rate
BP	Beam Prop
C	Curvatura
c_ν	Coeficiente de acoplamento do campo
FBG	Fiber Bragg Grating
BPM	Beam Propagation Method
FWHM	Full Width at Half Maximun
HWHM	Half Width at Half Maximun
IoT	Internet of Things
LPG	Long Period Grating
MMF	Multimode Fiber
MMI	Multimode Interference
n	Índice de refração
n_{eff}	Índice de refração efetivo
OPD	Optical Path Difference
OSA	Optical Spectrum Analyzer
PCF	Photonic Crystal Fiber
Q	Vazão
Rc	Raio de curvatura
Re	Número de Reynolds
SNSMS	SMF-*No-core*-SMF-MMF-SMF
SMF	Single-mode fiber
SMS	SMF-MMF-SMF
Z_{Reimg}	Distância para ocorrência da reimagem

SUMÁRIO

1 Introdução..... 16

1.1 Sensores a fibra ótica..... 16

1.2 Sensor de curvatura SMS empregando interferência multimodal..... 25

1.3 Objetivos..... 27

1.4 Motivação..... 28

1.5 Organização do texto..... 34

2 Sensoriamento de curvatura por interferência multimodal..... 35

2.1 Interferência multimodal em estruturas SMS..... 35

2.1.1 Eficiência de acoplamento entre modos na junção SMF-MMF..... 37

2.1.2 Formação de Reimagem..... 43

2.2 Sensoriamento de curvatura por interferência multimodal..... 47

2.2.1 Efeitos da curvatura em sensores SMS..... 48

2.2.2 Sensor de curvatura com raio de curvatura variável e fixo..... 54

3 Sensor de vazão/anemômetro baseado em estrutura SMS, interrogado na reflexão..... 58

3.1 Sensoriamento de vazão por curvatura: configuração experimental. 58

3.2 Resultados e discussões..... 64

3.2.1 Interrogação espectral..... 67

3.2.2 Interrogação em amplitude com comprimento de onda fixo..... 69

3.2.3 Interrogação em amplitude em múltiplos comprimentos de onda..... 70

4 Sensor de curvatura com raio fixo baseado em estrutura SMS... 72

4.1 Sensor de curvatura SMS com raio fixo, interrogado na transmissão 73

4.1.1 Configuração experimental..... 73

4.1.2 Resultados e discussões..... 79

4.2 Sensor de curvatura SMS com raio fixo, interrogado na reflexão..... 81

4.2.1 Configuração experimental..... 82

4.2.2 Resultados e discussões..... 85

5 Sensor de vazão baseado em estrutura SMS com raio fixo, interrogado na reflexão..... 90

5.1 Configuração experimental..... 90

5.2 Resultados e discussões..... 92

5.3 Análise de sensibilidade..... 94

6 Conclusões e perspectivas..... 96

6.1 Sugestões de trabalhos futuros..... 101

6.2 Artigos associados à pesquisa..... 103

Referências..... 104

Anexo A – Modelagem pelo método de propagação do feixe utilizando o s*oftware* BeamProp..... 114

Anexo B – Escala de Ventos de Beaufort..... 116

Anexo C – Sensor de Vazão/Anemômetro Interrogado na Reflexão: Análise por deslocamento da ponta do sensor 117

1 Introdução

1.1 – Sensores a fibra ótica

Com o desenvolvimento de fibras óticas de baixas perdas na transmissão de dados (aproximadamente de 0,2 dB/km para λ = 1,55 μm), baixa dispersão e baixo custo, intensificou-se mundialmente o emprego de linhas de transmissão por fibras óticas para fins de telecomunicações. Atualmente as fibras são empregadas em grande escala em redes internacionais e locais de comunicações de dados de banda larga e em grande velocidade, notadamente na internet e redes industriais. Em paralelo com o desenvolvimento das linhas de transmissão óticas e da indústria de dispositivos optoeletrônicos (discos compactos-CDs, DVDs *Blue-Ray*, impressoras, apontadores a laser e *scanners* de códigos de barra), as fibras óticas tornaram-se objeto de pesquisas no campo de sensores, mostrando desde o início possuir um grande potencial de aplicações em diversas áreas (1).

Existem muitas vantagens dos sensores a fibra em relação aos sensores convencionais e pode-se citar o fato de serem compactos, leves, imunes à interferência eletromagnética (viabilizando aplicações em áreas de intenso campo eletromagnético, como linhas de alta tensão, subestações, máquinas de grande porte e o interior de máquinas de ressonância magnética), resistentes à radiação, resistentes à temperaturas extremas (como altas temperaturas e criogenia), possuem alta sensibilidade, banda larga, alta resistência à reação com o meio externo (permitindo aplicações em diversos tipos de meios corrosivos, de elevada umidade ou imersas em líquido), podem ser acoplados a aplicações de fibras óticas já existentes e (dispensando infraestrutura adicional) e serem passivos, ou seja, independentes de fonte de energia elétrica externa (1-3).

Sensores a pura fibra são construídos sem partes móveis e contatos elétricos possuindo segurança intrínseca. Dessa forma, viabilizam, a baixo custo, aplicações em áreas de risco de explosão devido à presença de atmosfera inflamável, como as áreas classificadas em instalações de petróleo e gás. Permitem também acesso a locais de difícil acesso, como em dutos de longo alcance em instalações industriais de produção de óleo

e gás (3), ou mesmo dentro de turbinas de avião para transmitir a radiação a um pirômetro colocado do lado de fora do reator (4).

Como desvantagens podemos citar o fato de que os métodos de detecção são complexos e apesar de os custos terem caído muito nos últimos anos, os sistemas a fibra ótica ainda são caros em comparação com outros métodos. Embora tenham se popularizado ao longo do tempo, as técnicas ainda não são familiares para o usuário final. Além disso, os procedimentos de instalação são muito precisos e os sistemas de medição ainda são de desenvolvimento complexo (5).

O crescimento das aplicações de sensores óticos nas últimas décadas acentua a importância do estudo de dispositivos baseados em fibras óticas sensíveis a diversas variáveis físicas, como curvatura, temperatura, vazão, pressão, tensão, pH, nível e várias outras. Dessa forma, diversas técnicas de sensoriamento empregando fibras óticas foram desenvolvidas, tais como, redes de Bragg e interferômetros a fibra ótica, como os interferômetros de Fabry-Perot, de Mach-Zehnder e de Michelson, entre outros (1-3). Vem crescendo também em importância os dispositivos sensores a fibras óticas que empregam microestruturas, inclusive com inserção de líquidos e nanopartículas (6).

Devido à grande simplicidade de construção e desempenho comprovado, destacam-se aqui as que utilizam o princípio de interferência multimodal (MMI) em configurações que empregam segmentos alternados de fibras monomodo (SMF) e multimodo (MMF), resultando em estruturas SMS (SMF-MMF-SMF) e outros tipos de estrutura (7).

O princípio de operação de um sensor a fibra ótica é que o elemento sensor deve modular parâmetros do sinal ótico como intensidade, comprimento de onda, frequência, fase, polarização e banda, provocando mudanças nas características do sinal ótico recebido em um detector (1). As características da luz guiada, que forem modificadas, devem ser correlacionadas com os parâmetros de interesse (temperatura, curvatura, pressão, entre outros). A Figura 1 ilustra este conceito. A modulação em banda refere-se à alteração da largura de banda, geralmente medida em FWHM (Full Width at Half Maximun – largura completa à meia altura) ou HWHM (Half Width at Half Maximun – meia largura à meia altura).

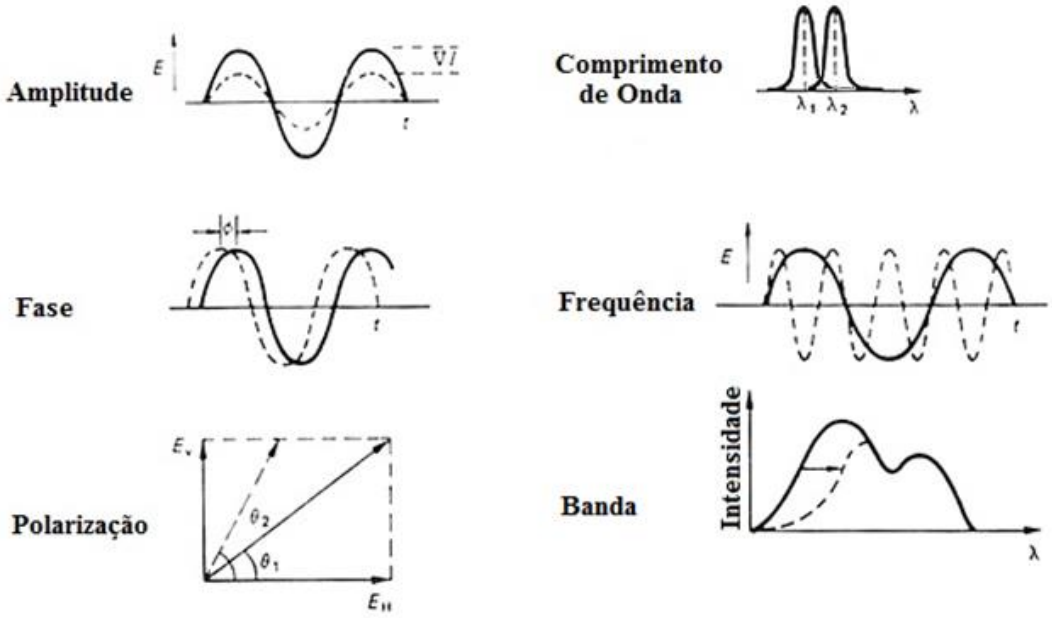


Figura 1 – Exemplos de efeitos de modulação usados em sensores a fibra ótica.

Fonte: (1) adaptado pelo autor deste trabalho.

Os sensores a fibra ótica podem ser classificados como intrínsecos ou extrínsecos dependendo da forma como a modulação da luz ocorre. Se o efeito físico em estudo age diretamente sobre a fibra, alterando o sinal ótico, então a própria fibra é o transdutor e o sensor é do tipo intrínseco. Se a luz na fibra sofre modulação através de um transdutor fora da fibra, então o sensor é do tipo extrínseco. Existe ainda a possibilidade de ocorrer um efeito combinado e neste caso o sensor é denominado híbrido. A Figura 2 ilustra este modo de classificação.

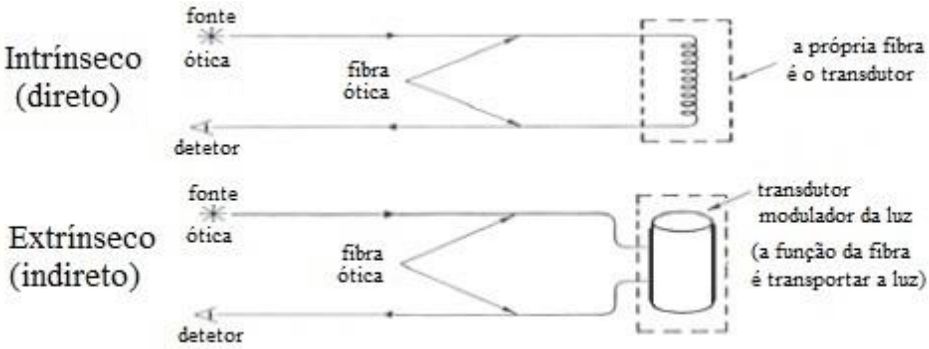


Figura 2 – Classificação dos tipos de sensores de acordo com o modo como o parâmetro físico age na fibra.

Fonte: (1) adaptado pelo autor deste trabalho.

Várias técnicas de sensoriamento a fibra ótica já foram propostas e desenvolvidas, sendo que alguns tipos já foram comercializados. Apesar das vantagens deste tipo de sensor, é preciso bom desempenho, facilidade de manutenção e baixo custo, para tornar viável sua aplicação em grande escala. Um dos obstáculos é que é necessário ter disponibilidade do sistema completo com fontes de luz, conectores, acopladores, detectores e eletrônica de detecção associada, incluindo ferramentas de *software*. Assim, um dos modos de tornar mais viável o uso de sensores a fibra ótica em substituição aos sensores industriais tradicionais, é empregar sensores embarcados em sistemas de comunicação por fibra ótica. A Figura 3 mostra um diagrama de blocos para um sistema básico de sensoriamento por fibra ótica.

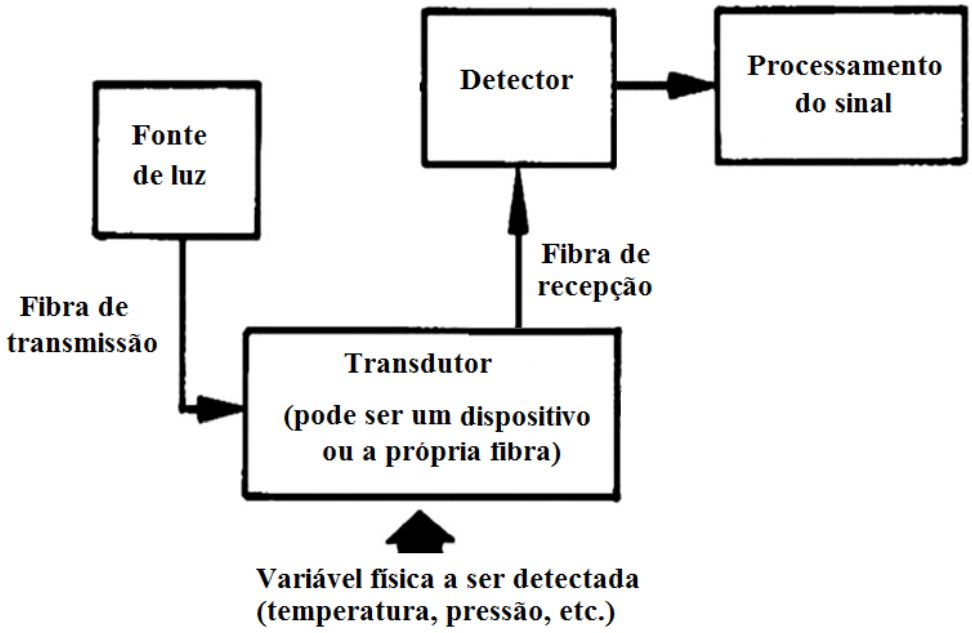


Figura 3 – Sistema básico de sensoriamento por fibra ótica.

Fonte: (1) adaptado pelo autor deste trabalho.

Sob o ponto de vista da extensão da aplicação, pode-se classificar os sensores em pontuais, multiponto (quase-distribuído) e distribuídos. O pontual é localizado em um determinado ponto da fibra ótica. O multiponto é semelhante ao anterior, sendo que existem vários pontos de sensoriamento na mesma fibra. Os distribuídos são aqueles em que a fibra toda ou grande parte dela funciona como sensor. As técnicas empregadas nos sensores distribuídos são basicamente o espalhamento Rayleigh, espalhamento Raman e espalhamento Brillouin (1).

Pode-se dividir os principais sensores pontuais e multipontuais em dois grandes grupos, os sensores por redes de Bragg em fibra e os sensores por interferometria. A Figura 4 ilustra este tipo de classificação, onde a interferência do tipo multimodal (MMI) é colocada propositalmente em evidência por ser objeto deste trabalho.

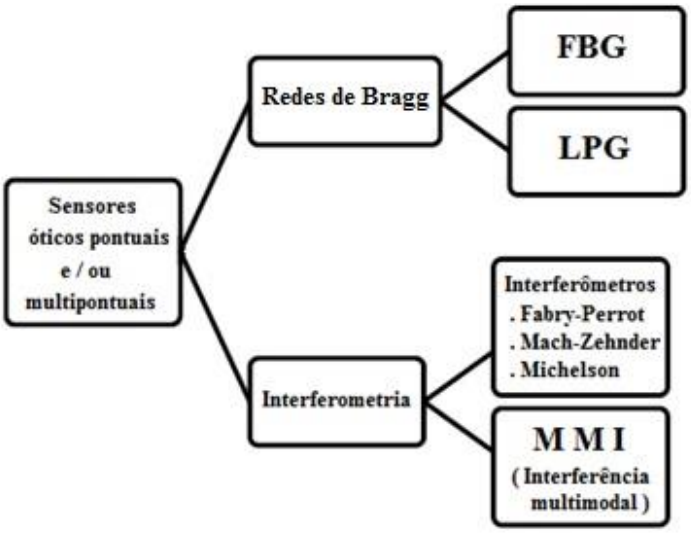


Figura 4 – Uma classificação dos principais tipos de sensores pontuais e multipontuais.

Os sensores óticos por rede de Bragg em fibra, FBG ou *Fiber Bragg Grating* (2), são produzidos por alterações periódicas do índice de refração no núcleo da fibra ótica. A figura 5 ilustra o princípio de operação da FBG.

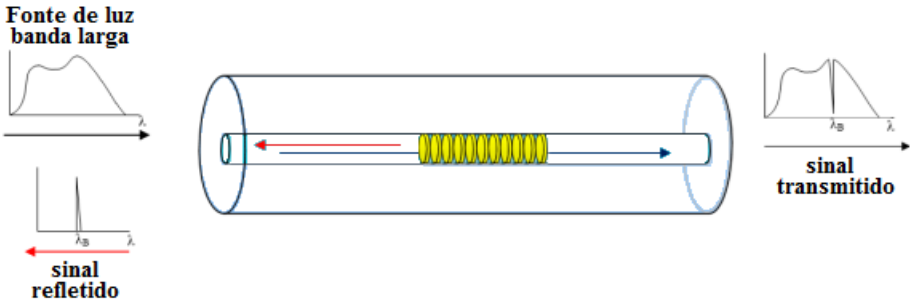


Figura 5 – Princípio de operação da FBG.

Fonte: (2) adaptado pelo autor deste trabalho.

A rede de Bragg consiste de alterações periódicas do índice de refração no núcleo de uma fibra monomodo, funcionando como um filtro que seleciona um comprimento de onda. Um sinal ótico banda larga injetado na fibra será transmitido através da rede de

Bragg com exceção de um pico de reflexão num comprimento de onda conhecido como comprimento de onda de Bragg, que é função do período de modulação espacial do índice de refração. O sensoriamento é realizado com base no fato de que variações ambientais como temperatura, por exemplo, alteram o índice de refração da fibra gerando alteração no comprimento de onda de Bragg.

Os sensores óticos tipo rede de Bragg de Longo Período, LPG ou *Long Period Grating*, também possuem uma estrutura de rede na fibra ótica. Neste caso o índice de refração do núcleo da fibra é modulado por longos espaçamentos. Com isso a largura espectral da ressonância é maior. A figura 6 ilustra o princípio de operação desta rede.

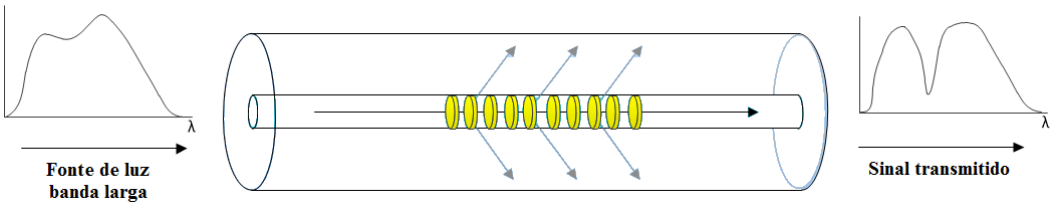


Figura 6 - Princípio de operação da LPG.

Fonte: (2) adaptado pelo autor deste trabalho.

Os sensores do tipo interferométricos são baseados na interferência entre dois ou mais feixes de luz que se propagam por caminhos diferentes e interagem a certa distância. Nesse caso, o parâmetro fundamental para o comportamento desses sensores é a diferença de fase entre os feixes. Para produzir este tipo de interferência, o feixe original é dividido e após os feixes resultantes da divisão percorrerem uma determinada distância, são recombinados. Ao longo dos caminhos dos feixes é possível que fatores externos produzam perturbações que alteram a fase do sinal e assim venham a influenciar no modo como recombinam. Dessa forma, os interferômetros possibilitam detectar variações externas a partir da observação da variação de parâmetros como intensidade, comprimento de onda, fase, frequência e banda. Os três principais tipos de interferômetros são: Fabry-Perot, Mach-Zehnder e Michelson (8).

O interferômetro do tipo Fabry-Perot utiliza dois espelhos planos semitransparentes separados por certa distância, paralelos entre si. As múltiplas superposições dos feixes refletidos, ou também dos transmitidos, produzem os padrões de interferência (8). A Figura 7 ilustra este tipo de interferômetro.

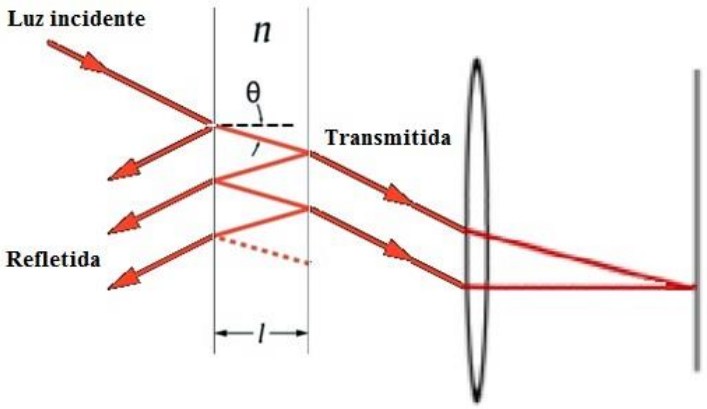
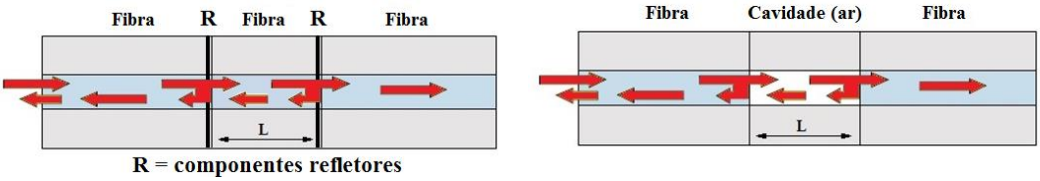


Figura 7 – Princípio de operação do interferômetro de Fabry-Perot.

Fonte: (8) adaptado pelo autor deste trabalho.

Os sensores de Fabry-Perot em fibra ótica do tipo intrínsecos podem ser obtidos usando-se redes de Bragg em fibra, entre outros vários métodos. Os do tipo extrínsecos podem ser confeccionados empregando-se uma cavidade. A Figura 8 ilustra este princípio. Uma perturbação externa pode influenciar a diferença de fase através da variação na diferença do caminho ótico (OPD, *optical path difference*). Um exemplo de perturbação no caminho ótico do interferômetro seria a deformação causada por tensão na fibra.



(a) (b)

Figura 8 – Sensores tipo Fabry-Perot (a) formado com adição de componentes refletores e (b) formado pela adição de cavidade a ar (fibra oca, *hollow core*, por exemplo).

Fonte: (8) adaptado pelo autor deste trabalho.

Nos sensores do tipo Mach-Zehnder a luz é dividida em duas partes e, posteriormente recombinada, apresentando padrões de interferência de acordo com a diferença entre os caminhos óticos. No início esse dispositivo apresentava braços independentes como caminhos óticos. Atualmente é muito mais frequente o uso do interferômetro em linha (8). A Figura 9 mostra alguns métodos de construção de interferômetros Mach-Zehnder em linha usados em fibra ótica.

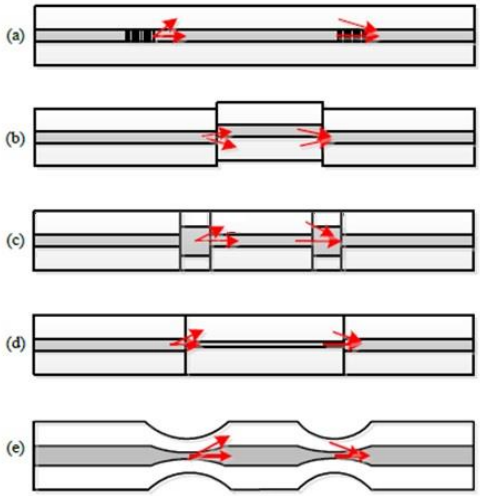


Figura 9 – Tipos de construção de interferômetros Mach-Zehnder empregando (a) LPGs, (b) desalinhamento do núcleo, (c) segmento de fibra multimodo, (d) redução do raio do núcleo da fibra e (e) afunilamento da fibra (*taper*).

Fonte: (8) adaptado pelo autor deste trabalho.

No primeiro caso (a), uma parte da energia propagada no modo fundamental de uma fibra monomodo é acoplada aos modos da casca por meio de uma LPG. Após uma determinada distância os modos da casca são reacoplados ao modo do núcleo. Como o índice de refração efetivo da casca é menor do que o do núcleo, os feixes divididos e recombinados trafegam com velocidades diferentes e geram um padrão de interferência.

No segundo caso (b), os caminhos óticos diferentes são produzidos pelo desalinhamento dos núcleos, permitindo, assim, acoplamento do modo fundamental da fibra monomodo, com os modos da casca. O ajuste do desalinhamento, ou *offset*, permite o controle da perda de inserção e do acoplamento aos modos da casca.

No terceiro caso (c), pequenos segmentos de fibra multimodo são usados para desacoplar e reacoplar os modos. No primeiro, o modo fundamental da fibra monomodo é acoplado a diversos modos da fibra multimodo e, ao conectar com outro segmento monomodo, proporciona a propagação de parte da energia por meio dos modos da casca. O segundo segmento multimodo permite reacoplar os modos da casca com o modo do segmento monomodo novamente.

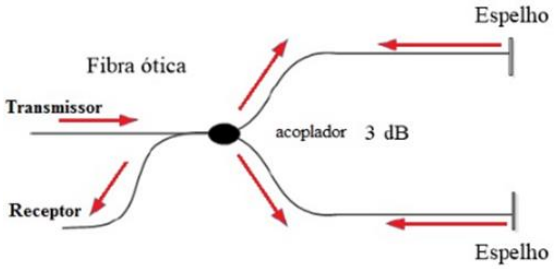
No quarto caso (d), uma fibra de pequeno núcleo é inserida entre duas fibras monomodo padrão. Devido à diferença entre os diâmetros, parte da energia da primeira fibra monomodo é acoplada aos modos da casca do segmento de pequeno núcleo. Após

certa distância percorrida, a fibra de pequeno núcleo é conectada à monomodo padrão, realizando, assim, o reacoplamento dos modos da casca com a monomodo padrão.

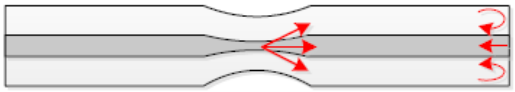
No quinto caso (e), o afunilamento (*taper*) da fibra realizado em duas seções permite, no primeiro *taper*, o acoplamento do modo fundamental da monomodo padrão aos modos da casca e finalmente o reacoplamento dos modos da casca ao modo fundamental da monomodo padrão, no segundo *taper*. Além destes métodos citados existem outros, cujo efeito final é equivalente.

Perturbações capazes de provocar variações na propagação da luz nos diferentes modos, podem produzir alteração do caminho ótico equivalente nos modos de ambos os braços, núcleo e casca, e, consequentemente, no padrão obtido na recombinação.

O interferômetro do tipo Michelson é similar ao Mach-Zehnder, pois o feixe é dividido em duas partes para que cada uma possa se propagar por um braço diferente. Mas no interferômetro de Michelson, cada feixe é refletido e reacoplado de volta ao outro, provocando interferência mútua ao se encontrarem. Geralmente um braço é usado como referência, mantido isolado das perturbações do meio externo, enquanto o outro é submetido às perturbações, para que a diferença de caminho ótico obtida através da perturbação externa seja usada como forma de sensoriamento (8). A Figura 10 (a) ilustra este princípio e em (b) mostra-se um exemplo de método de construção do interferômetro de Michelson em linha.



(a)



(b)

Figura 10 – Interferômetro de Michelson, (a) princípio de funcionamento e (b) exemplo de construção empregando *taper* em fibra.

Fonte: (8) adaptado pelo autor deste trabalho.

Em estudos mais recentes, fibras óticas do tipo Fibras de Cristais Fotônicos (PCF – *Photonic Crystal Fiber*), microestruturadas e por *bandgap*, têm sido exploradas como sensores óticos com resultados promissores (9).

1.2 – Sensor de curvatura SMS empregando interferência multimodal

Este trabalho está focado no funcionamento de dispositivos sensores a fibra ótica que operam com interferência multimodal (MMI), devido a diversas vantagens apresentadas em estudos recentes (10,11). Os dispositivos que empregam MMI apresentam estruturas simples e relativamente baratas, com potencial de alta sensibilidade para diversos parâmetros ambientais que são objetos de sensoriamento. O dispositivo básico é formado pela alternância de segmentos de fibra ótica monomodo (SMF – Single Mode Fiber) e multimodo (MMF – Multimode Fiber) e a configuração mais simples é a SMS (Single mode – Multimode - Single mode), onde um segmento de fibra multimodo é inserido entre duas fibras monomodo, formando um "sanduíche" S-M-S.

No acoplamento da fibra monomodo com a multimodo, a energia propagada em um único modo na SMF excita vários dos diversos modos da fibra MMF. A propagação da luz por meio de vários modos simultâneos provoca interferência intermodal que se apresenta na forma de interferências construtivas e destrutivas que se alternam ao longo da direção de propagação. Os padrões de interferência formados possibilitam uma ampla gama de sensoriamento de variáveis do meio externo, uma vez que vários fatores físicos podem afetar a propagação da luz em cada um dos modos ao longo da seção multimodo. Após determinada distância, o segmento multimodo é acoplado de volta à uma fibra monomodo, onde parte da energia propagada ao longo da fibra multimodo excita o único modo da fibra SMF (10,11).

A propagação da luz na seção MMF com sucessivas interferências construtivas e destrutivas apresenta uma propriedade importante que é a ocorrência da replicação do perfil de campo da entrada na MMF a uma determinada distância e que se repete periodicamente. Esta repetição do padrão de entrada é conhecida como **reimagem** (*self-image*). O estudo dos sensores neste trabalho emprega o princípio da reimagem para

obtenção do perfil de campo na SMF de saída. Neste caso o comprimento da seção MMF é calculado para permitir que o segmento SMF de saída fique localizado na posição da reimagem, permitindo a propagação da luz na SMF com maior intensidade luminosa possível.

Diversos sensores de curvatura, temperatura e vazão empregando o princípio de MMI em estruturas SMS têm sido propostos. Os fundamentos dos efeitos da curvatura na propagação da luz em fibras SMF e nos vários modos das fibras MMF, incluindo o cálculo de perdas na casca e por radiação, foram descritos em diversas publicações (12-16), incluindo as perdas por deformação do campo. Esses fundamentos são empregados para o estudo das estruturas SMS com objetivo de sensoriamento, em separado ou em conjunto, de variáveis afins, como vibração (17), pressão ou tensão (*strain*) (18).

Uma forma comum de sensoriamento de temperatura é expor o meio externo de uma fibra multimodo do tipo “sem núcleo” (*no-core*) a variações de temperatura que provocam mudanças no índice de refração deste meio. Desse modo, a característica de propagação na fibra MMF varia devido a mudanças no perfil de propagação do campo evanescente e no acoplamento da fibra com o meio externo (19-24). O controle da variação de temperatura geralmente ocorre através de um líquido em que a fibra está imersa (20,21). Em (22), a fibra MMF *no-core* é substituída por um líquido que possui propriedades de propagação multimodo, que é bem mais sensível à temperatura do que a fibra comum.

O mesmo princípio é empregado para sensores de índice de refração. A variável em foco deixa de ser a temperatura e passa a ser o índice de refração do meio externo. No caso de a temperatura permanecer constante, a variação do índice de refração se deve a outros fatores, como mudanças químicas no meio, entre outros (25-32). Em (29) um segmento afunilado (*taper*) compõe o sensor para melhorar a sensibilidade e em (32 e 33) o efeito é buscado acrescentando um *gap*, ou seja, um pequeno segmento oco, entre o primeiro segmento SMF e o segmento MMF e em (34) o sensor é baseado em MMI na banda de terahertz.

Sensoriamento simultâneo de temperatura e índice de refração é apresentado em (35,36) por meio de uma estrutura híbrida SNSMS, onde o segmento N correspondente é do tipo *no-core* (formando uma seção SNS) e M corresponde a um segmento MMF comum (formando uma seção SMS). Em (37) é realizado sensoriamento simultâneo de

curvatura e temperatura em estrutura SMS empregando fibra ótica tipo *no-core*. Sensoriamento de nível de líquido é apresentado em (38), usando MMI empregando fibra ótica MMF do tipo *no-core* e FBG no segmento SMF de saída.

O sensoriamento de vazão por fibras óticas pode ser realizado empregando-se diversos métodos. Podem ser destacados: propriedades de variação de perdas na estrutura do elemento sensor da fibra por meio da variação da curvatura provocada em um elemento cantilever móvel com deslocamento da fibra em relação a um receptor fixo ou não (39-46) ou segmento de fibra posicionada em laço ao longo do fluxo, incluindo arrasto por meio de um peso (47,48). Outros métodos ainda são observados, como ação da vazão por pressão em uma fibra com afunilamento ou *taper* (49); turbulência do fluido provocando ondas de som atuando em dispositivo FBG(50); FBG com arrasto, pressão ou cantilever (51-53); ação da vazão em uma FBG ou LPG (51-57); contagem de pulsos de luz que passam por uma turbina acionada pelo fluxo (58,59); uma cavidade Fabry-Perot é usada em (60); um anemômetro a fibra ótica com compensação de temperatura usando um interferômetro Fabry-Perot é descrito em (61); em (62) uma estrutura SMS é usada com a seção MMF livre para contar ondas; um sensor por reflexão da luz de um diodo LED detectada por um fotodiodo é descrito em (63); detecção de frequência de modulação da intensidade da luz provocada por ação de vórtices é descrita em (64) e detecção de vibração provocada por efeito de forças de Coriolis em (65).

1.3 – Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver sensores de curvatura a fibra ótica que operam por interferometria multimodal (MMI) baseados em estrutura SMS, empregados como sensor de vazão e anemômetro, por meio do desenvolvimento de base conceitual, modelagem numérica e testes experimentais. Dentro deste escopo, são propostos sensores de vazão, de construção relativamente simples, empregando as características do comportamento MMI quando submetido à variação de curvatura e arqueamento com raio de curvatura fixo. Os experimentos são desenvolvidos em bancada ótica nos laboratórios do IME e da UNICAMP, além do uso de túnel de vento para testes

experimentais dos sensores SMS como sensor de vazão, em laboratório da UNICAMP.

Como objetivos específicos, o trabalho caracteriza conceitualmente e experimentalmente, o comportamento de estruturas SMS em função da variação de curvatura da fibra e variação do comprimento de arco, para raio de curvatura fixo, proporcionada por deslocamento da ponta do sensor e por variação de velocidade de um meio fluido em que o sensor a fibra se encontra imerso; realizar modelagem numérica das estruturas abordadas com simulação de propagação do feixe em *software* empregando o método de diferenças finitas; desenvolver *software* para análise de eficiência de acoplamento de potência e de coeficiente de acoplamento de campo entre o modo fundamental do segmento monomodo e os diversos modos de propagação do segmento multimodo; desenvolver *software* para análise de potência e do campo transmitidos ao longo do eixo de propagação, com número variado de modos de propagação, em uma fibra ótica multimodo, excitada pelo único modo guiado de uma fibra monomodo, computando as interferências construtivas e destrutivas que caracterizam a interferência multimodal em fibras multimodo.

A modelagem numérica implementada com simulação em computador empregando o *software* BeamProp (Synopsys) é realizada no LEC, laboratório de computação eletromagnética do IEAv, Instituto de Estudos Avançados. Programas desenvolvidos para análise de eficiência de acoplamento da potência, de coeficiente de acoplamento do campo e de características de propagação da fibra; e da análise de propagação com determinação da potência e do campo transmitido são desenvolvidos em MatLab (Mathworks Inc.) para proporcionar maior possibilidade de uso acadêmico, devido à grande popularidade desta ferramenta nos meios acadêmicos.

1.4 – Motivação

A motivação deste trabalho baseia-se no fato de ser cada vez mais intenso o crescimento de aplicações de sensores óticos no cenário mundial, em diversos campos da atividade humana (1-3). Em aplicações nas áreas de petróleo e gás, produtos químicos em geral e transporte de material inflamável, os sensores a fibra apresentam a vantagem de

serem incorporados às diretrizes de segurança intrínseca a baixo custo, quando comparados aos sensores convencionais elétricos hoje empregados. Essa característica é vital para a segurança de processos industriais envolvendo produção, transporte e armazenagem dos mencionados produtos (50). Por serem resistentes a temperaturas extremas, alta pressão e corrosão, os sensores a fibra ótica são muito empregados em medida de temperatura e pressão em poços de petróleo, onde sensores comuns não poderiam ser utilizados. (4,66-68). A Figura 11 mostra uma aplicação de sensores a fibra ótica em SAGD – *Steam Assisted Gravity Drainage* (drenagem por gravidade assistida a vapor).

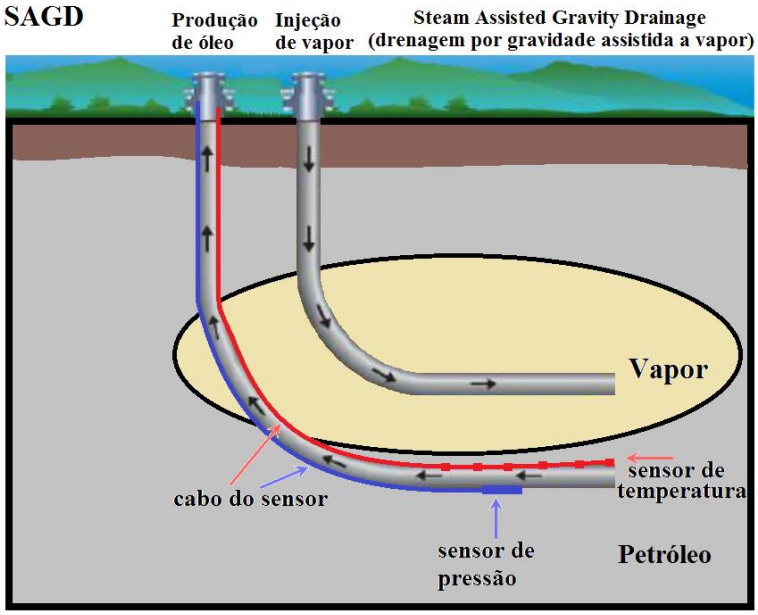


Figura 11 – Uso de sensores a fibra ótica em produção de petróleo.

Fonte: (67) adaptado pelo autor deste trabalho.

Na área de geração e transmissão de energia elétrica, como outro exemplo, existem máquinas, subestações e linhas de transmissão operando com potências muito elevadas (frequentemente quilowatts ou megawatts), exigindo o emprego de alta tensão (dezenas ou centenas de quilovolts) e correntes elétricas da ordem de milhares de ampères. Nestes casos, a imunidade à interferência eletromagnética é fundamental para realizar comunicações e sensoriamento com segurança e confiabilidade (1-3,69). A Figura 12 mostra um exemplo de sensoriamento de corrente elétrica empregando sensor a fibra ótica em uma subestação.

Figura 12 – Uso de sensores a fibra ótica em sensoriamento de corrente elétrica em uma subestação.

Fonte (69) adaptado pelo autor deste trabalho.

Na área militar também é crescente a aplicação de sensores a fibra ótica. Como exemplo, os submarinos nucleares norte-americanos da classe Virgínia empregam sensores a fibra ótica em conjuntos de hidrofones colocados na lateral do casco. Os hidrofones foram desenvolvidos pela empresa Northrop Grumman Corp. e operam por pressão diferencial em sensores a fibra ótica (70). A Figura 13 mostra imagens do submarino e do conjunto de hidrofones. Em paralelo, foi desenvolvido um sistema de vigilância antiespionagem e antiterrorismo, empregando sensores acústicos a fibra ótica, posicionado na entrada de portos com objetivo de estabelecer um perímetro de monitoração do porto, acoplado a um sistema de controle de vigilância em terra, com capacidade de detecção de possíveis atividades de invasão, como entrada de mergulhadores e veículos submarinos estranhos.

(a) (b)

Figura 13 – Submarino nuclear norte-americano classe Virgínia: (a) Detalhe de um conjunto de hidrofones e (b) Localização dos 6 hidrofones (3 de cada lado do casco).

Fonte: (70)

Na área aeroespacial existem várias aplicações de sensores a fibra ótica, como sensores de temperatura, de tensão e também giroscópios óticos. Como exemplo, sensores de rotação foram instalados em unidades da família de foguetes norte-americanos Delta Rocket. Sensores elétricos e óticos para medida de temperatura e tensão foram incorporados à superfície do tanque de hidrogênio de unidades do projeto Delta Clipper, da força aérea norte-americana. Os sensores elétricos não sobreviveram aos testes, mas todos os sensores a fibra ótica funcionaram e passaram a ser empregados nos testes posteriores (71). A Figura 14 mostra o uso de sensores óticos distribuídos empregados para monitorar corrosão e deformação da asa e das juntas, em um avião.

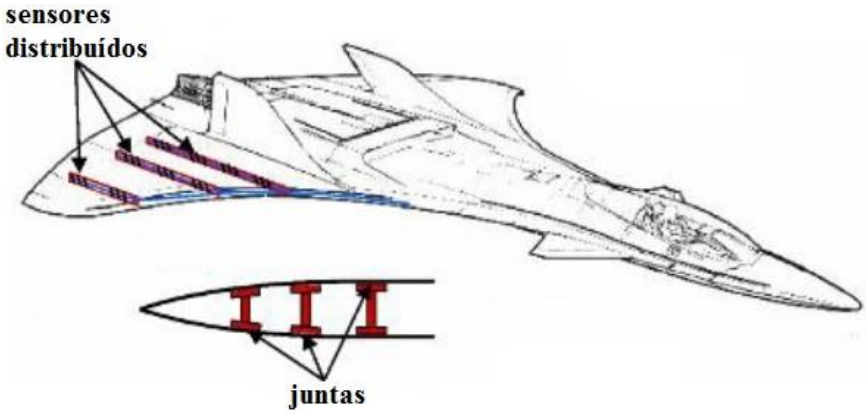
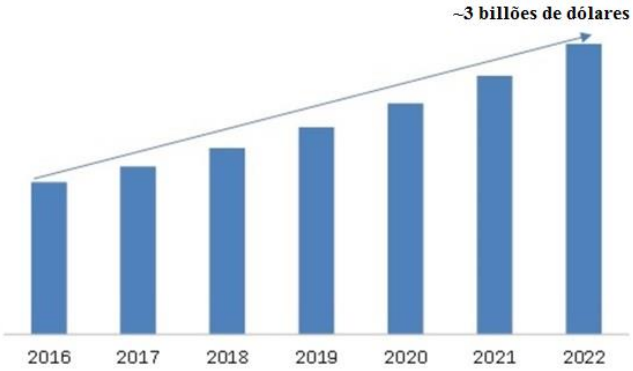


Figura 14 – Instalação de sensores a fibra ótica em avião.

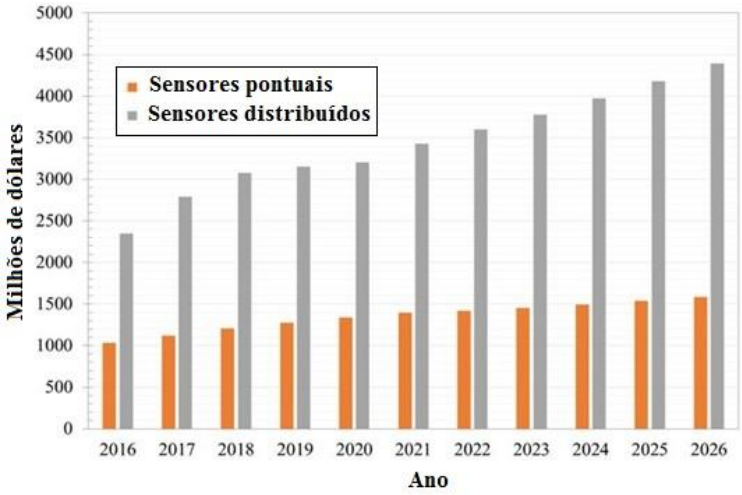
Fonte: (71)

A integridade estrutural dos tanques de combustível dos ônibus espaciais também foi monitorada por sensores a fibra ótica instalados na superfície dos tanques para mapear as tensões. Os sensores óticos são ainda utilizados em veículos lançadores de naves espaciais, em missões de naves para a lua, em todos os veículos lançados para Marte e também são usados em satélites para posicionamento e rastreamento (71).

Veículos de mídia especializados em análise de mercado mostram o crescente aumento dos investimentos em sensores a fibra ótica, além de realizarem projeções para o futuro. A Figura 15 apresenta em (a) a previsão do crescimento dos investimentos globais na área de sensores a fibra ótica e em (b) o mercado global de sensores pontuais e distribuídos com previsão de crescimento até 2026.



(a)



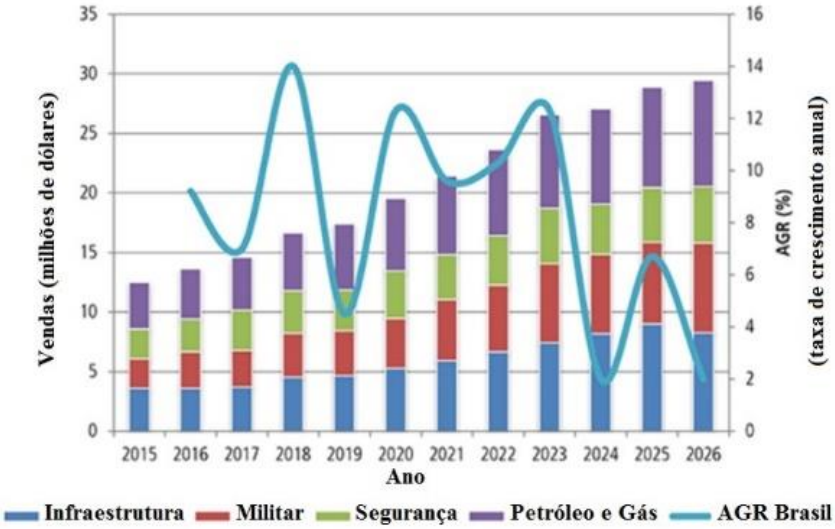
(b)

Figura 15 - Crescimento do mercado de sensores a fibra óptica: (a) receitas globais com previsão até 2022 e (b) Mercado global de sensores pontuais e distribuídos até 2026.

Fonte: (a) (72) e (b) (73).

A Figura 16 apresenta em (a) projeções para negócios no mercado de sensores distribuídos a fibra ótica na indústria, por região do mundo, até 2028 e em (b) a previsão do comportamento do mercado de sensores a fibra ótica distribuídos para o Brasil, por submercados, no período 2015-2026. Os dados foram divulgados por relatórios de empresas especializadas em análise de negócios.

(a)



(b)

Figura 16 – (a) previsão do comportamento do mercado de sensores distribuídos a fibra ótica na indústria, por região global, no período 2016-2028 e (b) previsão do comportamento do mercado de sensores a fibra ótica distribuídos, por submercado, para o Brasil no período 2015-2026, incluindo AGR (*Annual Growth Rate* – taxa de crescimento anual).

Fonte: (a) (74) e (b) (75).

Na área de tecnologias em internet das coisas (IoT-Internet Of Things) os sensores a fibra ótica são muito promissores (76). A arquitetura da tecnologia da internet das coisas possui no plano dos objetos físicos, a camada de Percepção ou Deteção, onde estão os elementos sensores e atuadores. Neste nível está a aquisição dos dados do mundo real.

1.5 – Organização do texto

No capítulo 2 é apresentada a base conceitual do sensoriamento de curvatura empregando interferência multimodal em estrutura SMS. O estudo da eficiência do acoplamento SMF-MMF e das características de propagação da luz na fibra multimodo são realizados empregando ferramentas analíticas e numéricas, assim como o estudo da formação da reimagem. As simulações são feitas com rotinas escritas para o *software* Matlab (MathWorks) e com o *software* comercial BeamPROP (Synopsys). Efeitos da curvatura em sensores SMS são estudados e comprovados experimentalmente e com simulações numéricas. Questões envolvendo o efeito da curvatura nos sensores levam à proposta de experimentos com emprego de raio de curvatura variável e fixo.

No capítulo 3 é apresentado um sensor de curvatura SMS como sensor de vazão/anemômetro interrogado na reflexão. Testes experimentais são realizados em túnel de vento. Diferentes técnicas de análise são apresentadas, incluindo o deslocamento do pico espectral e análise de potência de saída.

No capítulo 4 são apresentados sensores de arqueamento SMS, com emprego de raio de curvatura fixo, interrogados na transmissão e na reflexão. Os resultados dos testes experimentais realizados em bancada ótica são apresentados e discutidos.

No capítulo 5 é apresentado um sensor de vazão SMS com arqueamento empregando raio de curvatura fixo, interrogado na reflexão. Testes experimentais são realizados em túnel de vento e os resultados são apresentados e discutidos.

Nas Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho incluindo os resultados obtidos nos testes experimentais e numéricos, com análise comparativa de desempenho. Trabalhos posteriores com base nos resultados apresentados são sugeridos. As publicações obtidas com este trabalho são listadas.

2 – Sensoriamento de Curvatura por Interferência Multimodal

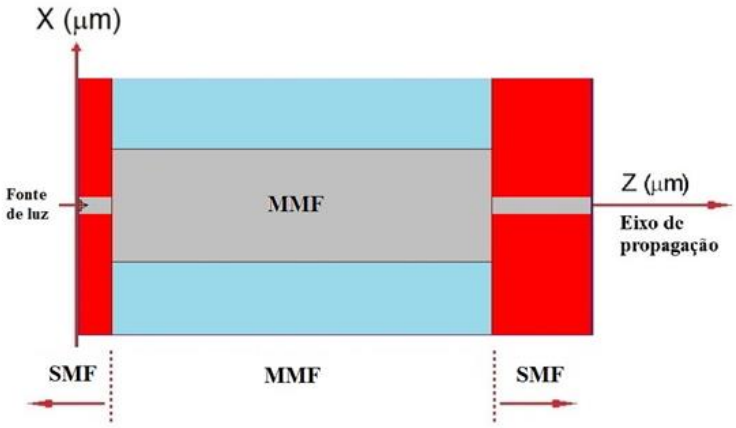
Neste capítulo é descrita a base conceitual dos dispositivos SMS, os fundamentos da interferência multimodal (MMI – *Multi Modal Interference*), o princípio da reimagem e os efeitos da curvatura em sensores SMS. O cálculo da eficiência do acoplamento da potência e dos coeficientes de acoplamento do campo, no acoplamento do único modo guiado da fibra monomodo com os vários modos da fibra multimodo, é apresentado, bem como a transmissão dos campos eletromagnéticos ao longo do eixo de propagação. São apresentados os efeitos da curvatura na interferência multimodal e como afetam a resposta do sensor, produzindo alternância de aumento e diminuição da potência de saída. Para evitar inversões de inclinação que se apresentam em determinadas faixas da resposta à curvatura é sugerido o uso de curvatura por arqueamento com raio de curvatura fixo.

2.1 – Interferência multimodal em estruturas SMS

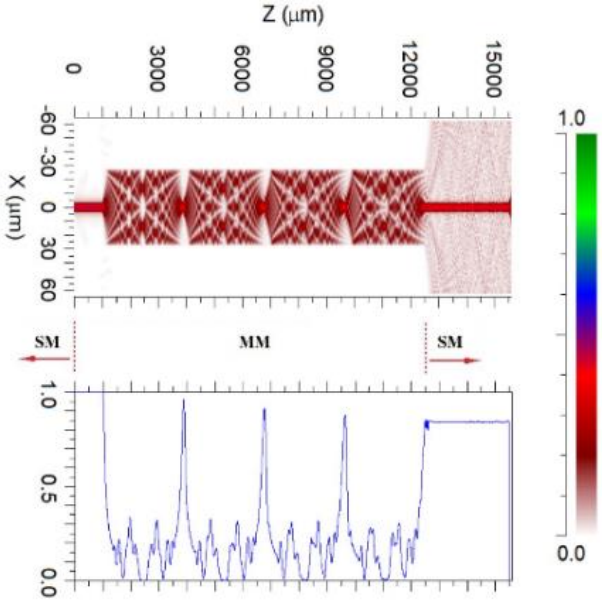
O fenômeno da interferência multimodal e a formação de reimagens são conhecidos desde o início da década de 90 (77) e têm sido bastante explorados na confecção de dispositivos sensores empregando guias planares (78) e fibras óticas, além de serem empregados em muitos outros dispositivos, como moduladores (79), filtros (80) e divisores de sinal (77). O lançamento de luz em um guia de onda multimodo faz com que a energia da fonte excite vários dos muitos modos de propagação. Ao longo da direção de propagação os campos eletromagnéticos nos diversos modos se interferem mutuamente em sequências de contribuições construtivas e destrutivas formando um padrão de interferência que depende dos diversos fatores que influenciam a propagação da luz no guia, como a geometria do guia de onda, os índices de refração do núcleo e da casca, as dimensões de ambos e o comprimento de onda utilizado (10,11,79,81,82).

Inicialmente, foram utilizados guias de onda planares com estrutura básica constituída por três segmentos, sendo o primeiro um guia monomodo utilizado como lançador de luz para o guia multimodo e outro guia monomodo para recuperar a luz ao final do segmento multimodo. Esta configuração recebe a denominação de estrutura SMS

(Single Mode - Multimode - Single Mode). A Figura 17 mostra em (a) uma estrutura SMS plana e em (b) exemplos de diagrama de perfil de propagação do campo e transmissão ao longo do eixo de propagação.



(a)

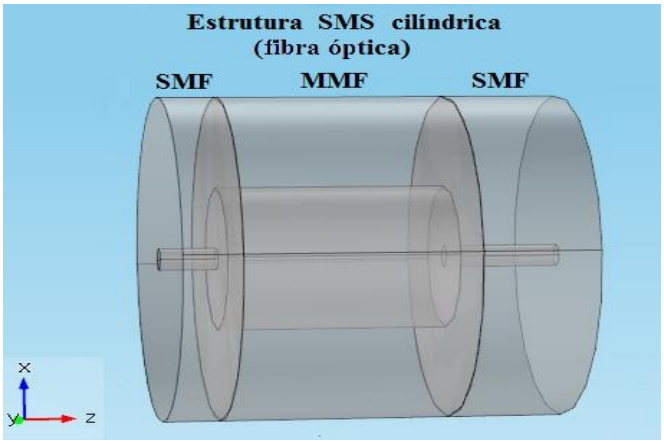


(b)

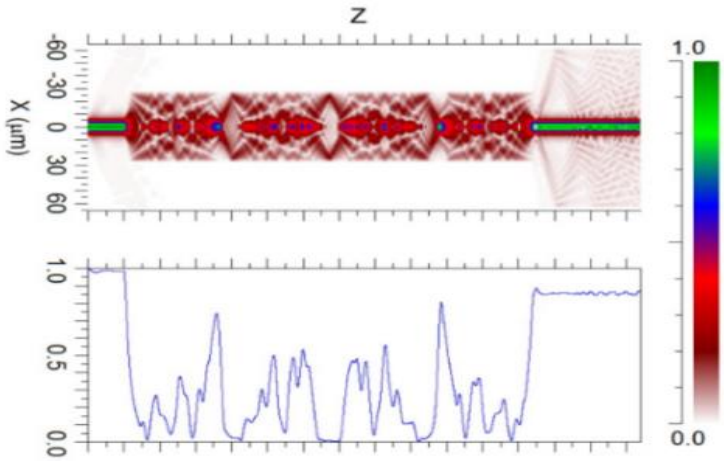
Figura 17 – (a) Estrutura SMS e (b) exemplos de diagrama de perfil de propagação do campo no plano x versus z (acima) e gráfico de transmissão ao longo do eixo de propagação.

O princípio da interferência multimodo foi estendido para as fibras óticas numa estrutura SMS semelhante, mas com geometria cilíndrica (81). O dispositivo básico é formado pela alternância de segmentos de fibra ótica monomodo (SMF – Single Mode Fiber) e multimodo (MMF – Multimode Fiber). A Figura 18 mostra em (a) uma estrutura

SMS implementada em fibra ótica e em (b) exemplos de diagrama de perfil de propagação do campo e transmissão ao longo do eixo de propagação.



(a)



(b)

Figura 18 - (a) Estrutura SMS cilíndrica (fibra ótica) e (b) exemplos de diagrama de perfil de propagação do campo no plano x versus z (acima) e gráfico de transmissão ao longo do eixo de propagação.

2.1.1 – Eficiência de acoplamento entre modos na junção SMF-MMF

Nesta seção serão determinados quais modos do segmento de fibra ótica MMF são excitados pela luz lançada pelo segmento SMF, no ponto de conexão, ou seja, usando o segmento SMF como fonte de luz (81-83). O método empregado é a determinação da

eficiência de acoplamento do modo fundamental da SMF com os modos de propagação da MMF.

Usando a aproximação de modos linearmente polarizados (LP) para uma fibra monomodo de índice degrau, o campo radial de entrada proveniente da SMF pode ser aproximado por um feixe gaussiano dado por (82)

$$\overrightarrow{E_s}(r,z) = e^{-\left(\frac{r}{\bar{\omega}}\right)^2} . e^{-j\beta_0 z}\hat{x} \tag{1}$$

onde **r** é a coordenada radial da fibra, **z** é a coordenada longitudinal (direção da propagação guiada), $\hat{\boldsymbol{x}}$ é a direção radial na fibra, $\boldsymbol{\beta_0}$ é a constante de propagação longitudinal para o modo guiado LP_{01} da SMF e $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ é o raio do feixe gaussiano que possui a parte significativa da energia ou *spot size*, calculado à meia largura na meia altura (HWHM - *Half Width at Half Maximun*). Este valor pode ser determinado empiricamente (82) usando-se a expressão

$$\bar{\omega} = \frac{a_0}{\sqrt{ln\,2}}\,(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6}) \tag{2}$$

onde $\mathbf{a_0}$ é o raio do núcleo da SMF e **V** é a frequência normalizada, que é dada por (82).

$$V = \frac{2\pi a_0}{\lambda}\sqrt{n_{cr}^2 - n_{cl}^2} \tag{3}$$

onde $\boldsymbol{\lambda}$ é o comprimento de onda, e $\mathbf{n_{cr}}$ e $\mathbf{n_{cl}}$ são os índices de refração do núcleo e da casca da SMF, respectivamente.

O campo descrito pela Equação 1 excita um determinado número de modos guiados na MMF, onde a distribuição do campo em qualquer ponto dentro da MMF pode ser descrita como uma expansão em série do tipo (82)

$$\vec{E}(r,\theta,z) = \sum_{\mu=-M}^{M}\sum_{\nu=1}^{N}\vec{\psi}_{\nu,\mu}\,(r,\theta,z) \tag{4}$$

onde **μ** e **ν** são os índices para as componentes azimutal e radial, respectivamente, e **2M+1 e N** representam os números totais de modos azimutais e radiais. $\vec{\boldsymbol{\psi}}_{\boldsymbol{\upsilon},\boldsymbol{\mu}}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{z})$ representa o vetor complexo do campo nos modos guiados. As expressões que descrevem a distribuição do campo no núcleo e na casca do segmento MMF são obtidas usando as

mesmas aproximações de modos linearmente polarizados efetuadas para a Equação 1. Levando em conta que a representação do campo de entrada, da SMF, não possui componentes azimutais, a distribuição de campo dentro da MMF também estará desprovida de componentes azimutais, ou seja, a representação das componentes do campo na MMF será uma soma de componentes radiais ($LP_{0,\nu}$), obtidas por solução das equações diferenciais de Bessel (82)

$$\vec{E}(r,z) = \begin{Bmatrix} \sum_{\nu=1}^{N} c_\nu J_0\left(u_\nu \frac{r}{a}\right) e^{-j\beta_\nu z}\hat{x} & r \leq a \\ \sum_{\nu=1}^{N} d_\nu K_0\left(w_\nu \frac{r}{a}\right) e^{-j\beta_\nu z}\hat{x} & r > a \end{Bmatrix} \tag{5}$$

onde $\mathbf{J_0}$ é a função de Bessel de primeiro tipo e $\mathbf{K_0}$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo. Os símbolos $\mathbf{c_\nu}$ e $\mathbf{d_\nu}$ são as constantes de excitação dos campos no núcleo e na casca, respectivamente, e possuem a seguinte relação entre eles (82)

$$d_\nu = \frac{J_0(u_\nu)}{K_0(w_\nu)} . c_\nu \tag{6}$$

$\boldsymbol{\beta_\nu}$ é a constante de propagação longitudinal para um determinado modo, $\boldsymbol{a}$ é o raio do núcleo da MMF e $\boldsymbol{u_\nu}$ e $\boldsymbol{w_\nu}$ são a constante de propagação transversa normalizada para o núcleo e o parâmetro de decaimento na casca, respectivamente, que são definidos por (82)

$$u_\nu = a\sqrt{k_0^2 n_{cr}^2 - \beta_\nu^2} \qquad \text{e} \qquad w_\nu = a\sqrt{\beta_\nu^2 - k_0^2 n_{cl}^2} \tag{7}$$

onde $\mathbf{k_0}$ é o número de onda no espaço livre.

Na posição z = 0, a expressão que descreve o campo na MMF representa a projeção do campo de entrada (da SMF) num conjunto de componentes de campos transversos dos modos guiados. Neste ponto

$$\overline{E_s}(r,0) = e^{-\left(\frac{r}{\bar{\omega}}\right)^2}\hat{x} \qquad \text{e}$$

$$\bar{E}(r,0) = \begin{Bmatrix} \sum_{\nu=1}^{N} c_\nu . J_0\left(u_\nu \frac{r}{a}\right) \hat{x} & r \leq a \\ \sum_{\nu=1}^{N} d_\nu . K_0\left(w_\nu \frac{r}{a}\right) \hat{x} & r > a \end{Bmatrix} \tag{8}$$

Uma figura de mérito conhecida como coeficiente de acoplamento da potência é muito útil, pois permite determinar a eficiência do acoplamento do modo fundamental da

SMF com cada modo guiado da MMF. A expressão que permite o cálculo destes coeficientes é determinada por meio de integrais de correlação entre os campos Es e E, em z = 0 (82)

$$\eta_\nu = \frac{\left|\int_0^\infty E_s(r)E(r)rdr\right|^2}{\int_0^\infty |E_s(r)|^2 rdr \int_0^\infty |E(r)|^2 rdr} \tag{9}$$

Como o campo de entrada, da SMF, é lançado através de um diâmetro usualmente muito menor do que o da MMF, está sendo desprezada a expressão do campo na casca da MMF no numerador da Equação 9, que passa a refletir a correlação entre os campos dos núcleos. Uma vez obtida a expressão dos coeficientes de acoplamento para a potência, pode-se determinar os coeficientes de acoplamento dos campos através da relação

$$c_\nu = \sqrt{\eta_\nu} \tag{10}$$

Substituindo as expressões dos campos na Equação 9 obtém-se

$$\eta_\nu = \frac{\left|\int_0^\infty e^{-\frac{r^2}{\varpi^2}}.J_0(\frac{u_\nu r}{a})rdr\right|^2}{\int_0^\infty e^{-\frac{2r^2}{\varpi^2}}rdr\left[\int_0^a J_0(\frac{u_\nu r}{a})^2 rdr+\left(\frac{J_0(u_\nu)}{K_0(w_\nu)}\right)^2\int_a^\infty K_0(\frac{w_\nu r}{a})^2 rdr\right]} \tag{11}$$

Usando soluções analíticas, propriedades das transformadas de Hankel e formulações assintóticas das raízes da função de Bessel de ordem zero (18), é possível obter (82)

$$\eta_\nu = \frac{2\left(\frac{\omega}{a}\right)^2 .e^{-\left(\frac{\omega}{a}\right)^2.\frac{{u_\nu}^2}{2}}}{J_1^2(u_\nu)+\left(\frac{{K_1}^2(w_\nu)}{{K_0}^2(w_\nu)}\right).J_0^2(u_\nu)} \tag{12}$$

onde os parâmetros normalizados $\boldsymbol{u_\nu}$ e $\boldsymbol{w_\nu}$ são dados por (82)

$$u_\nu = \left(2\nu - \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{2} \qquad \text{e} \qquad w_\nu = \sqrt{V_{MMF}^2 - \left(\left(2\nu - \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{2}\right)^2} \tag{13}$$

sendo

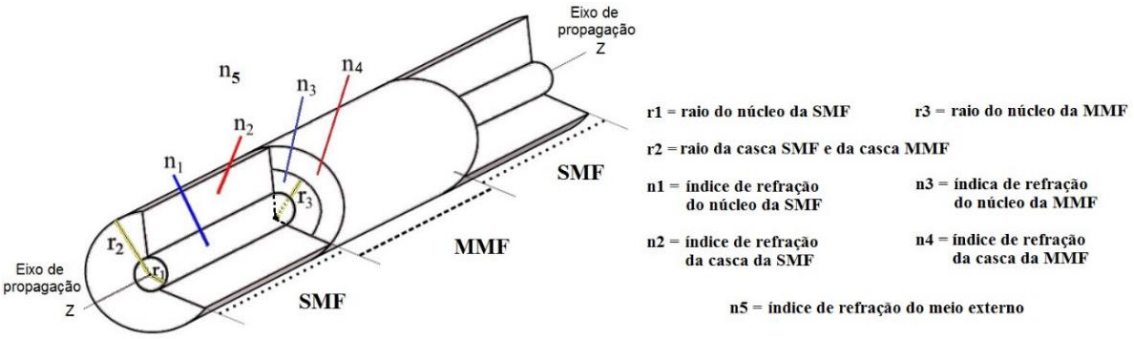
$$V_{MMF}^2 = u_\nu^2 + w_\nu^2 \tag{14}$$

a frequência normalizada da MMF. Logo, $\mathbf{V_{MMF}}$ é dada por

$$V_{MMF} = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_{crMMF}^2 - n_{clMMF}^2} \qquad (15)$$

onde $\mathbf{n_{crMMF}}$ e $\mathbf{n_{clMMF}}$ são os índices de refração do núcleo e da casca da MMF, respectivamente.

A partir da estrutura SMS mostrada na Figura 19 (a) e com os dados apresentados na Figura 19 (b), em λ = 1,55 µm, foram calculados os coeficientes de eficiência de acoplamento em potência entre a SMF e a MMF e os coeficientes de acoplamento para o campo em cada um dos modos guiados da MMF, empregando as Equações 12 e 10, por meio de um programa com código escrito no *software* Matlab. A Figura 19 (c) mostra a distribuição por modos, dos coeficientes de eficiência de acoplamento de potência. Com o mesmo programa foram também calculados os parâmetros do sistema apresentados na Tabela 1.



(a)

SMF

$\mathbf{n_{cr}}$ = n_1 = 1.4492

$\mathbf{n_{cl}}$ = n_2 = 1.444024

$\boldsymbol{a_0}$ = r_1 = 4.1 µm

$\mathbf{r_2}$ = 62.5 µm

MMF

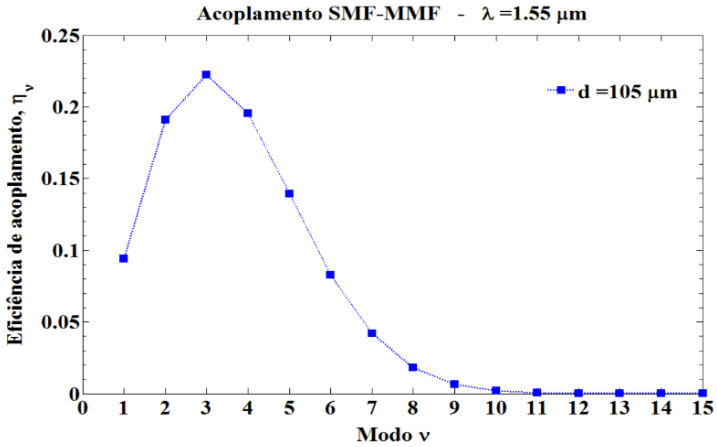
$\mathbf{n_{cr}}$ = n_3 = 1.4446

$\mathbf{n_{cl}}$ = n_4 = 1.4271

$\boldsymbol{a}$ = $\mathbf{r_3}$ = 52.5 µm (d = 105 µm)

$\mathbf{r_2}$ = 62.5 µm (d = 125 µm)

(b)



(c)

Figura 19 – (a) Estrutura SMS; (b) dados das fibras: Corning SMF-28 e MMF Thorlabs AFS105/125Y (c) coeficientes de eficiência de acoplamento de potência.

Fonte: (a) (7) adaptado pelo autor deste trabalho, (b) dados dos fabricantes das fibras.

Tabela 1 – Parâmetros do segmento MMF da Figura 19

nº do modo ν	**Eficiência de acoplamento de potência - η_ν**	**Coeficiente de acoplamento do campo - c_ν**	**Constante de propagação longitudinal - β**	**Índice de refração efetivo η_{eff}**
1	9,4%	0,307	5,855757 e+6	1,444558
2	19,1%	0,437	5,854992 e+6	1,444369
3	22,2%	0,472	5,853616 e+6	1,444029
4	19,6%	0,442	5,851628 e+6	1,443539
5	13,9%	0,373	5,849026 e+6	1,442897
6	8,3%	0,288	5,845811 e+6	1,442104
7	4,2%	0,204	5,841982 e+6	1,441159
8	1,8%	0,134	5,837536 e+6	1,440063
9	0,7%	0,081	5,832473 e+6	1,438814

Embora a fibra multimodo do exemplo possua muitos modos de propagação, observando a Figura 19 (c), fica evidente que apenas uns poucos de modos da MMF são significantemente excitados e também que não são igualmente excitados. Pode-se considerar que apenas os 9 primeiros modos são excitados com percentual significante de energia transferida, sendo que a maior parcela de potência transferida da SMF vai para o campo no terceiro modo da MMF, que recebe 22,2% da potência luminosa. O coeficiente de excitação do campo também é maior no terceiro modo. Cerca de 61% da potência luminosa é transportada nos modos 2, 3 e 4.

Outro programa com código escrito usando o *software* Matlab foi desenvolvido para estudar a propagação da luz na MMF, calculando a transmissão de potência ao longo do eixo de propagação escolhendo-se o número de modos e levando em conta o coeficiente de acoplamento para cada modo. A Figura 20 mostra a característica de transmissão para os resultados mostrados na Figura 19 e na Tabela 1.

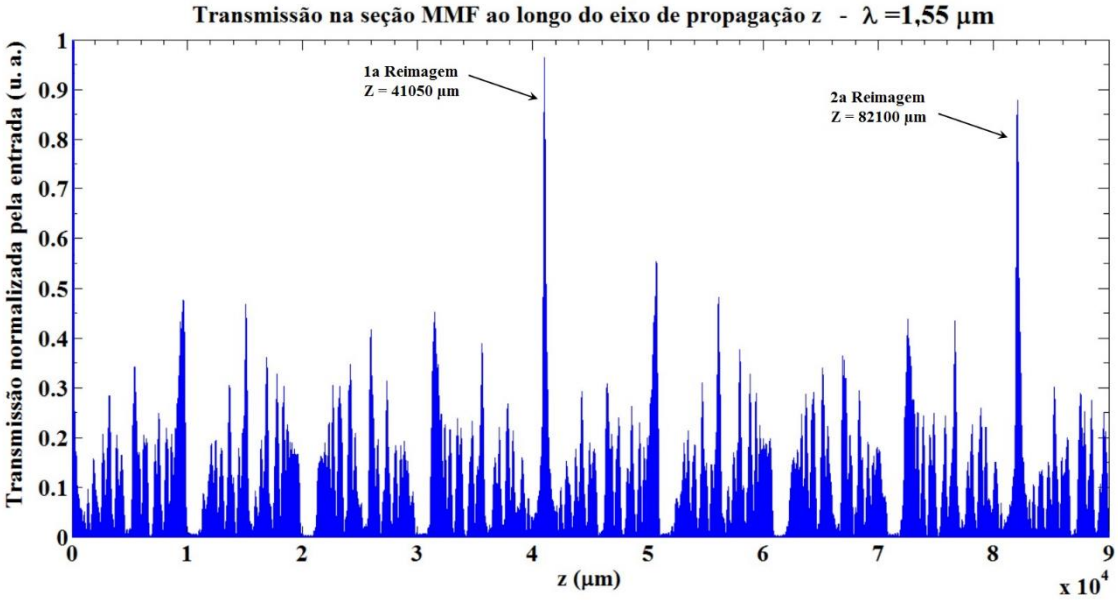


Figura 20 – Característica de transmissão da potência ao longo do eixo de propagação da MMF, levando em conta as interferências construtivas e destrutivas dos feixes propagados nos 9 primeiros modos guiados.

2.1.2 – Formação de Reimagem

Observando a Figura 20, pode-se perceber que a propagação da luz nos modos guiados da seção MMF, proporcionando sucessivas interferências construtivas e destrutivas ao longo da propagação, apresenta uma propriedade importante que é praticamente a reprodução do perfil do campo de entrada na MMF a uma determinada distância. Este ponto de máxima interferência construtiva é conhecido como **reimagem** (*self-image*). A primeira reimagem, neste caso, ocorre em z = 41.050 µm, a partir da origem. Pode-se observar que a segunda reimagem está em z = 82.100 µm (com intensidade um pouco menor), duas vezes o ponto de ocorrência da primeira. As demais ocorrências seguem esta regra.

O estudo dos sensores neste trabalho emprega o princípio da reimagem para obtenção do perfil de campo de saída da MMF. Neste caso o comprimento da seção MMF é calculado para permitir que o segmento SMF de saída fique localizado na posição da reimagem, permitindo a propagação da luz na SMF de saída com maior intensidade

luminosa. É possível obter o sinal luminoso de saída em qualquer outro ponto como em (7), onde a MMF possui comprimento de poucos milímetros, mas a reimagem é o ponto de maior potência, permitindo melhor leitura.

O cálculo da posição da reimagem foi desenvolvido com sucesso para guias planares por Soldano (78) e posteriormente o conceito foi estendido aos guias de onda cilíndricos por outros autores, como em (81) e (82). A diferença de fase entre dois modos **m** e **n** após uma determinada distância de propagação, no comprimento de onda **λ**, pode ser expressa por (82-84)

$$\Delta\emptyset_{mn} = (\beta_m - \beta_n).z = \frac{\lambda(u_m^2 - u_n^2)}{4\pi a^2 n_{cr}}.z \qquad (16)$$

onde $\boldsymbol{\beta_m}$ e $\boldsymbol{\beta_n}$ são as constantes de propagação longitudinal para os modos **m** e **n**, **z** é a distância de propagação, $\mathbf{u_m = \pi(m - 1/4)}$ e $\mathbf{u_n = \pi(n - 1/4)}$ (conforme a Equação 13), $\boldsymbol{a}$ é o raio do núcleo da MMF e $\mathbf{n_{cr}}$ é o índice de refração do núcleo da MMF. Dependendo da relação entre as fases dos campos nos dois modos, as amplitudes podem se somar, aumentando a intensidade do sinal (interferências construtivas) ou podem se subtrair, reduzindo a intensidade do sinal (interferências destrutivas). Nos casos extremos quando a diferença de fase é igual a **Nπ**, sendo **N** um número inteiro, a interferência é totalmente construtiva quando **N** é par (fase zero). Neste caso as amplitudes são somadas nos seus valores máximos de campo (dobrando se forem iguais). Por outro lado, a interferência é totalmente destrutiva quando **N** é ímpar (fase de 180 graus), quando as amplitudes se cancelam nos seus valores máximos de campo (se anulando se forem iguais).

Desenvolvendo a Equação 16 para **Δϕ = Nπ**, o comprimento de onda para interferência construtiva (quando **N** é par) e destrutiva (quando **N** é ímpar) pode ser expresso por:

$$\lambda = \frac{8a^2 n_{cr} N}{(m-n)[2(m+n)-1]z} \qquad (m > n) \qquad (17)$$

ou, para λ definido, a distância onde ocorrem as interferências construtivas e destrutivas:

$$z = \frac{8a^2 n_{cr} N}{(m-n)[2(m+n)-1]\lambda} \qquad (18)$$

Trocando **N** por **2N'** (sempre par), os valores **N'** = 1, 2, 3 . . . passam a representar apenas as interferências construtivas (o mesmo ocorre para as interferências destrutivas se trocarmos **N** por **2N'-1**, sendo neste caso sempre ímpar) e em seguida o raio $\boldsymbol{a}$ pelo diâmetro **d**:

$$z = \frac{16a^2 n_{cr} N'}{(m-n)[2(m+n)-1]\lambda} = \frac{N'}{(m-n)[2(m+n)-1]} \cdot \frac{4n_{cr}d^2}{\lambda} \qquad (19)$$

A distância representada pelo segundo fator na última parte da Equação 19, que chamaremos Z_R, possui valor definido uma vez escolhido o comprimento de onda de trabalho e a MMF a ser utilizada no sensor. Para quaisquer pares de modos **m** e **n**, Z_R será multiplicada por frações onde o numerador é definido por **N'** e o denominador é definido por **m** e **n**. Para os dois primeiros modos (m=2 e n=1), por exemplo, a fração será **N'/5**. Logo, Z_R está dividida em cinco partes e cada uma corresponde a um plano transversal ao sentido de propagação, onde ocorre interferência construtiva total entre os modos, para cada valor de **N'** (1 a 5). Para o caso de **N'** = 5, 10, 15, 20 . . . o plano transversal de interferência construtiva total ocorre em múltiplos inteiros de Z_R. Para os modos 3 e 2, outro exemplo, a fração será **N'/9** e Z_R está dividida em nove partes na Equação 19. Da mesma forma, para cada valor de **N'** ocorrerá interferência construtiva total entre os modos, como antes. Mas as distâncias onde ocorrem não coincidem com as do par 1 e 2, exceto em **N'** = 9, 18, 27, 36, . . . onde o plano transversal de interferência máxima também ocorre nos múltiplos inteiros de Z_R. Estendendo para todos os pares de modos, as únicas distâncias onde todos os modos se interferem construtivamente de forma total será sempre nos múltiplos de Z_R. Assim, esta condição periódica, ao longo da direção de propagação, onde ocorre uma concentração do campo devido a interferências construtivas totais entre todos os modos guiados, produz o efeito de reimagem, onde o campo na entrada da MMF é praticamente reproduzido a uma distância específica, para um determinado comprimento de onda. A primeira reimagem está localizada à distância da entrada de luz da MMF igual a:

$$Z_{reimg} = Z_R = \frac{8n_{cr}k_0a^2}{\pi} = \frac{4n_{cr}d^2}{\lambda} \qquad (20)$$

onde $\mathbf{k_0}$ é o número de onda no espaço livre. Logo, a segunda reimagem ocorre a uma

distância igual a duas vezes a descrita na Equação 20 e assim por diante. Para os dados da MMF da Figura 19, a primeira reimagem ocorre em aproximadamente 41.101,2 µm, para o comprimento de onda de 1,55 µm. O valor encontrado usando as equações de propagação empregadas no programa escrito em Matlab, que calcula a característica de transmissão da potência ao longo do eixo de propagação da MMF, levando em conta as interferências construtivas e destrutivas dos feixes propagados nos 9 primeiros modos guiados (mostradas na Figura 20) resultam em:

Z_{reimg} = 41.050,0 µm.

A comparação com o valor calculado pela fórmula revela uma diferença menor que 0,12%.

Podemos verificar pela Equação 20, que para uma determinada MMF, a relação entre a distância da reimagem e o comprimento de onda (e vice-versa) será uma hipérbole, uma vez que o índice de refração do núcleo e seu diâmetro estarão determinados. A Figura 21 mostra um trecho do gráfico correspondente, com os dados da MMF da Figura 19.

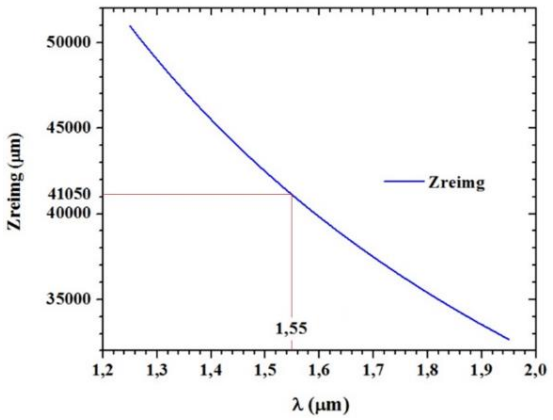
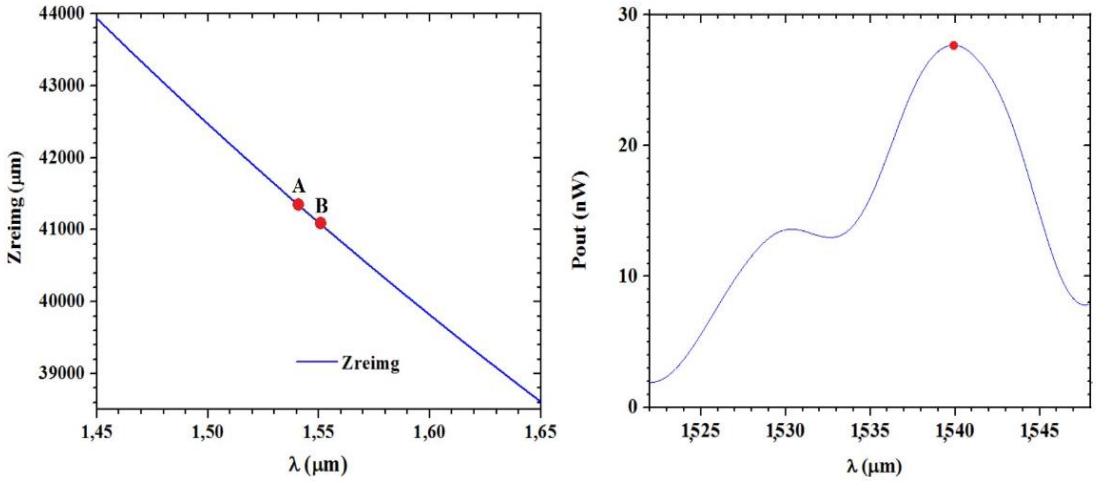


Figura 21 – Resultado da Equação 20 obtida com os dados da MMF da Figura 19.

Um experimento realizado com uma fibra Thorlabs AFS105/125Y (que será descrito no Capítulo 3) clivada de modo a ter caminho percorrido pela luz equivalente a 41,10 mm no comprimento de onda 1,55 µm, deveria corresponder ao ponto **B** na Figura 22 (a). O espectro obtido no experimento está mostrado na Figura 22 (b), onde o ponto vermelho destaca o pico espectral experimental em 1,54 µm, correspondendo ao valor máximo de interferência construtiva entre os modos guiados. Usando este valor na Equação 20, concluímos que o comprimento correspondente à reimagem experimental

possui valor de 41,37 mm, destacado pelo ponto **A** na Figura 22 (a). A diferença (menor que 0,65%) provavelmente se deve a imprecisões na fabricação do sensor, particularmente nos processos de clivagem e emenda da MMF.



(a) (b)

Figura 22 – (a) Localização da distância da primeira reimagem para a MMF da Figura 19 em 1,55 µm (ponto B) e o valor obtido experimentalmente (ponto A); (b) Espectro obtido no experimento revelando a localização da reimagem em 1,54 µm.

2.2 – Sensoriamento de curvatura por interferência multimodal

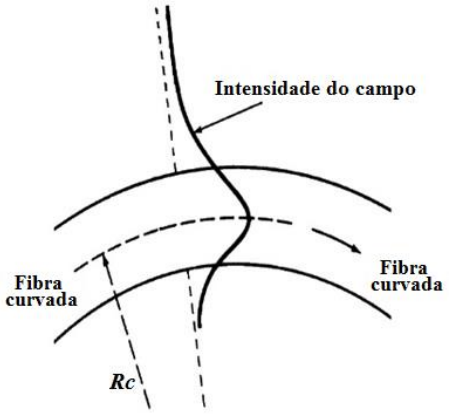
Nesta seção, será discutida a base conceitual da variação das propriedades de propagação dos dispositivos SMS em função da variação da curvatura. A deformação do campo com a curvatura, a excitação dos modos guiados da MMF, no acoplamento SMF-MMF, com intensidades desiguais de potência luminosa e a influência da curvatura no índice de refração efetivo dos modos e na relação de fases entre modos, são fatores que produzem forte influência no comportamento da interferência multimodal quando o sensor é curvado.

2.2.1 – Efeitos da curvatura em sensores SMS

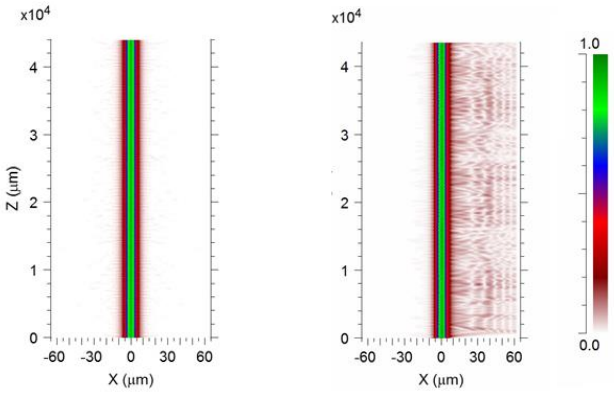
Diversos estudos foram desenvolvidos para descrever os efeitos da curvatura de uma fibra ótica na transmissão da potência luminosa. Consideram-se neste estudo as perdas provocadas por curvaturas do tipo macrocurvaturas, ou seja, quando o raio da fibra é muito menor do que o raio de curvatura. É comum fazer referência tanto à variação das propriedades da fibra com o raio de curvatura (**Rc**) quanto com a curvatura (**C**) propriamente dita, uma vez que as grandezas se relacionam na forma

$$\boldsymbol{C} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_c}} \tag{21}$$

Marcuse em (14) estende seu cálculo de atenuação por curvatura em guias planos, para fibras cilíndricas. O princípio básico a ser considerado na atenuação da potência transmitida quando uma fibra é curvada é que, com o aumento da curvatura, o campo no interior do núcleo perde energia para a casca no lado externo da curvatura, aumentando o campo evanescente. Consequentemente, as perdas por irradiação do campo evanescente se elevam com o aumento da curvatura. A Figura 23 ilustra este princípio: em 23 (a) encontra-se uma ilustração do aumento do campo evanescente com a curvatura, em 23 (b) a simulação da propagação da luz em fibra monomodo reta e em 23 (c) a simulação da fibra curvada com apresentação da fuga de energia com a curvatura, usando transformação de coordenadas de modo a obter uma equivalência reta para a fibra curvada, usando mapeamento conformal. Essa técnica usa uma transformação da expressão que descreve a distribuição espacial do índice de refração da fibra, por modo, recalculando este valor para cada ponto no espaço interior, levando em conta o efeito provocado pela curvatura (15).



(a)



(b) (c)

Figura 23 – (a) Aumento das perdas de potência na transmissão devido à curvatura, por irradiação do campo evanescente. Em (b) a imagem mostra a propagação da luz em fibra monomodo reta. Em (c) a imagem mostra o equivalente reto da fibra curvada, com o aumento do campo evanescente no lado externo da curvatura. A escala à direita relaciona as cores com a intensidade luminosa.

Fonte: (a) (84) adaptado pelo autor deste trabalho.

A expressão empregada para o cálculo do mapeamento conformal é dada por:

$$n' = \approx n\left(1 + \frac{x}{R_c}\right),$$ onde **Rc** é o raio de curvatura equivalente (15). (22)

Além do efeito previsto de aumento das perdas com a curvatura para fibras monomodo, Marcuse em (12) demonstra que em fibras que suportam muitos modos, os campos nos modos de menor ordem podem ser substancialmente deformados pela curvatura, influenciando bastante as perdas em cada modo. A distribuição do campo para

um determinado modo não apenas se afasta do eixo de propagação, no sentido da parte externa da curva, como também é estreitada substancialmente, permitindo a redução das perdas para uma faixa de aumento da curvatura. Dessa forma, ao contrário da expectativa inicial de que a atenuação sempre se eleva com o aumento da curvatura (e redução do raio de curvatura) é possível que em determinados intervalos as perdas venham a reduzir. A Figura 24 mostra o efeito descrito em (12).

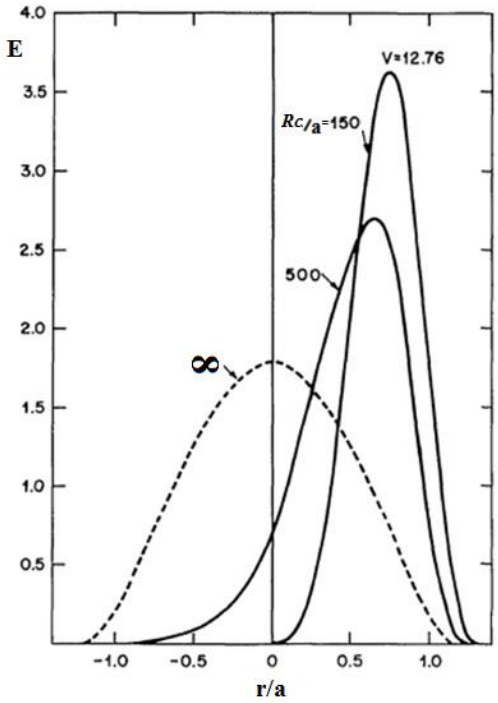


Figura 24 – Distribuição do campo **E** em função do raio normalizado **r/a** (sendo **a** o raio do núcleo da fibra) para o modo HE_{11} (LP_{01}) em uma fibra multimodo. **Rc** representa o raio de curvatura.

Fonte: (12) Adaptado pelo autor deste trabalho.

Como foi discutido no item 2.1.1, no acoplamento da fibra monomodo com a multimodo, a potência luminosa entregue à MMF pela SMF não excita significantemente todos os modos guiados da MMF e os modos excitados não são excitados igualmente. Logo, os diferentes modos carregam diferentes quantidades de energia. A maior parte da energia está concentrada nos modos de menor ordem, que são mais internos do que os de maior ordem. Quando a fibra é curvada, no início da curvatura (maiores raios de curvatura) os modos internos influenciam menos as perdas na potência transmitida e os mais externos influenciam mais. À medida que a curvatura aumenta, a deformação do

campo aumenta e também os modos mais internos passam a ter mais influência, podendo, em uma faixa de aumento da curvatura, provocar redução na atenuação e, consequentemente, a potência transmitida pode aumentar. Em grandes curvaturas os modos internos estão fortemente comprometidos com a atenuação da potência transmitida. Embora, de uma forma geral, a potência transmitida diminua com a curvatura, em determinadas faixas é possível observar o comportamento inverso. A Figura 25 permite comparar, para os primeiros 5 modos, a propagação na MMF sem curvatura, com a propagação correspondente com efeito da curvatura para um raio de curvatura de 500 mm. O desvio do campo para o lado externo da curvatura é muito mais pronunciado para os primeiros modos.

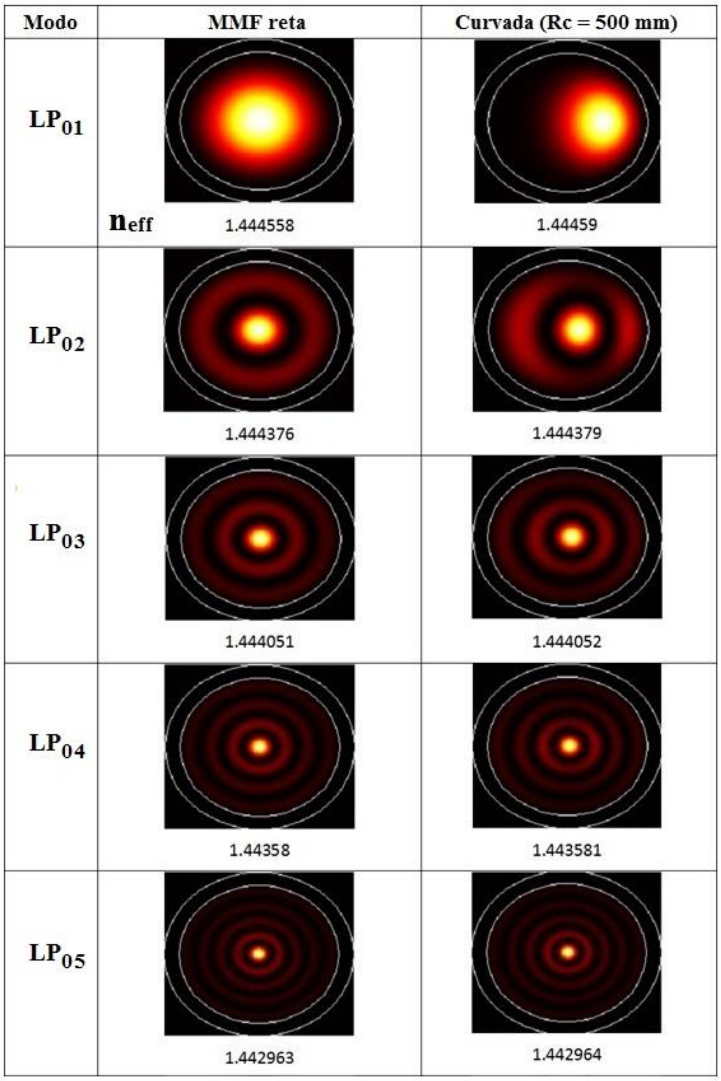
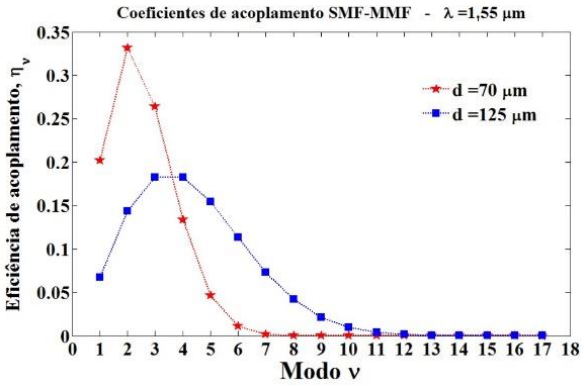


Figura 25 – Perfil transversal e índice efetivo para a propagação dos 5 primeiros modos de uma MMF na condição reta, à esquerda, e curvada com Rc = 500 mm.

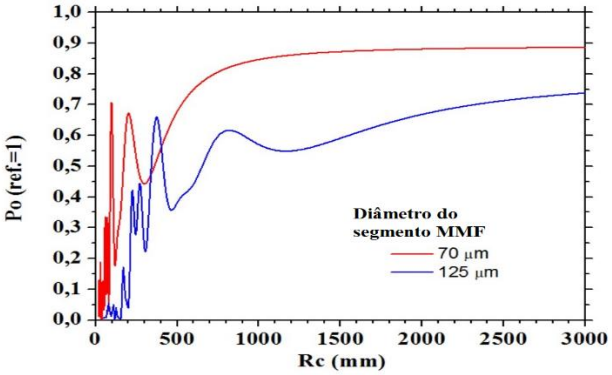
É importante observar que os modos não são afetados igualmente pela curvatura, além de carregarem diferentes quantidades de energia. Com o aumento da curvatura, os índices de refração efetivos aumentam, mas são influenciados diferentemente em cada modo, sendo que os de menor ordem são mais impactados. Consequentemente, a relação de fase entre os modos também é afetada de maneira diferente, pois depende diretamente de como cada modo contribui. Os padrões de interferência multimodo, que dependem da superposição dos modos, não são afetados de maneira uniforme e nem linear, pois não se pode esperar que as amplitudes e fases se combinem da mesma forma entre os diversos modos, à medida que a curvatura aumenta. O compromisso entre a deformação do campo, a energia diferente que cada modo carrega e a maneira diferente que a curvatura afeta o índice de refração efetivo de cada modo, tornam mais complexo o comportamento da potência transmitida em função da curvatura. Logo, não se pode esperar que as perdas por curvatura sempre aumentem continuamente (e a potência transmitida diminua) com a elevação da curvatura (e diminuição do raio de curvatura). Ou seja, deve-se esperar que o comportamento da fibra em relação à curvatura possa apresentar faixas de variação do raio de curvatura com alternância entre aumento e diminuição de perdas.

Análises numéricas de estruturas SMS com fibras MMF de diferentes diâmetros foram realizadas, mostrando o comportamento da potência transmitida em função da variação do raio de curvatura para diferentes composições modais. Os modelos desenvolvidos usam segmento MMF com fibra do tipo *no-core* com diâmetros de 125 µm (fibra usada nos experimentos a serem descritos no capítulo 4) e 70 µm (fibra usada no experimento a ser descrito no capítulo 5).

A Figura 26 mostra em (a) a eficiência de acoplamento por modo, para os dois tipos de MMF. Os resultados foram obtidos com rotina desenvolvida em Matlab, empregando a Equação 12. Como é de se esperar, a fibra de menor diâmetro suporta menor número de modos guiados. O item (b) mostra o perfil de potência transmitida em função do raio de curvatura, para sensores SMS empregando as mesmas fibras do item (a), no mesmo comprimento de onda. Os resultados foram obtidos com simulações realizadas empregando o *software* comercial Beam Prop.



(a)



(b)

Figura 26 – (a) Eficiência de acoplamento por modo, para fibras MMF de diferentes diâmetros e (b) Simulação do perfil de variação de potência transmitida, para sensores SMS empregando as fibras do item (a), no mesmo comprimento de onda.

Na fibra multimodo de diâmetro 70 µm apenas 6 modos são excitados com percentual de eficiência de acoplamento significante. O segundo modo carrega quase 35% da energia fornecida pelo único modo guiado da SMF. Os 3 primeiros modos são responsáveis por cerca de 80% da energia total. Praticamente 11 modos são excitados com percentual de eficiência de acoplamento significante na MMF de diâmetro 125 µm e, a título de comparação, os três primeiros modos carregam apenas cerca de 30% da energia total. Modos de menor ordem são mais internos e carregam maior quantidade de energia, enquanto que os modos de maior ordem são mais externos, mas carregam menos energia. Quando um sensor SMS começa a ser curvado, correspondendo a grandes valores de raio de curvatura, os modos de maior ordem apresentam maior perda, ao contrário dos de menor ordem. A MMF de 125 µm de diâmetro apresenta maior redução da potência transmitida, enquanto que a de menor diâmetro praticamente não é afetada. Ou seja, nesta

faixa de variação de raio de curvatura a MMF de 125 µm apresenta mais sensibilidade à curvatura. Somente para curvaturas acentuadas, ou seja, pequenos valores de raio de curvatura, a MMF de 70 µm passa a ser muito sensível à curvatura.

2.2.2 – Sensor de curvatura com raio de curvatura variável e fixo

Em aplicações como sensor de curvatura, dependendo da faixa de resposta do sensor SMS, é possível empregar o dispositivo como sensor linear, mas também é possível que a faixa de variação do raio de curvatura inviabilize o uso do dispositivo como sensor, se ocorrer trechos de alternância da inclinação. Outra questão é que em muitas aplicações é necessário saber, a partir do ponto de operação, se a variável monitorada está crescendo ou decrescendo. No caso de vazão, por exemplo, se está aumentando ou diminuindo. A Figura 27 mostra um trecho da resposta ao raio de curvatura para a fibra *no-core* de 125 µm de diâmetro da Figura 26 (b), com dois exemplos de escolha de faixas de variação do raio de curvatura.

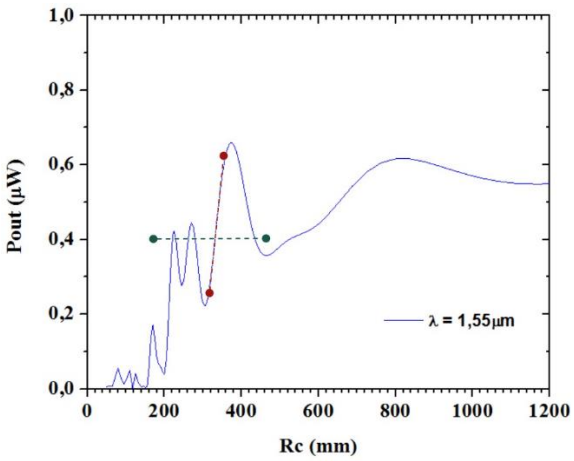
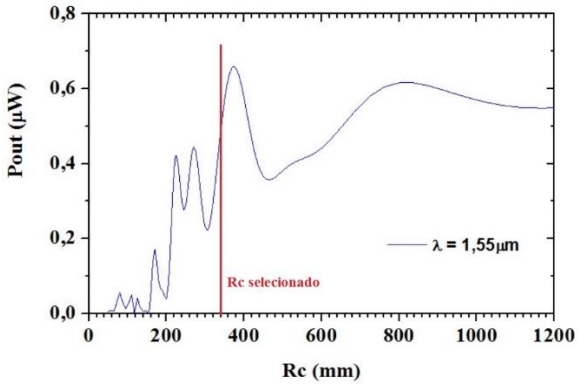


Figura 27 – Detalhe da resposta ao raio de curvatura para a fibra *no-core* de 125 µm de diâmetro da Figura 26 (b). As linhas tracejadas ajudam a ilustrar o fato de que dependendo da faixa de curvatura da aplicação, o dispositivo pode ser usado como sensor linear ou ser inviável para sensoriamento de curvatura.

Uma possibilidade para evitar as inversões de inclinação no uso do sensor é restringir a curvatura empregando um suporte de perfil circular onde o sensor pode arquear por ação do agente físico mantendo o raio de curvatura fixo. Assim, um valor de raio de curvatura deve ser escolhido para operação do dispositivo como sensor de arqueamento. Nessa situação o segmento MMF será suscetível às mesmas características em termos de aumento da perda de energia do núcleo para o campo evanescente e consequente irradiação do campo. Os efeitos da interferência multimodal nesse caso ocorrem por variação do arco descrito pela parte do sensor que se acomoda à curvatura do suporte com raio fixo. As características do sensor passam a depender da escolha do raio de curvatura.

A Figura 28 (a) mostra uma simulação de potência transmitida em um sensor SMS, em função do raio de curvatura. Foi empregado na simulação, o software comercial Beam Prop (Synopsys) para modelagem da estrutura ótica e simulação numérica da propagação do feixe. A linha vertical mostra um exemplo de escolha de valor para o raio de curvatura fixo. A Figura 28 (b) mostra o diagrama básico de um sensor de vazão com variação do comprimento do arco, devido ao sensor estar sendo acomodado no suporte, em função de sua exposição ao fluxo no interior de um tubo.



(a)

(b)

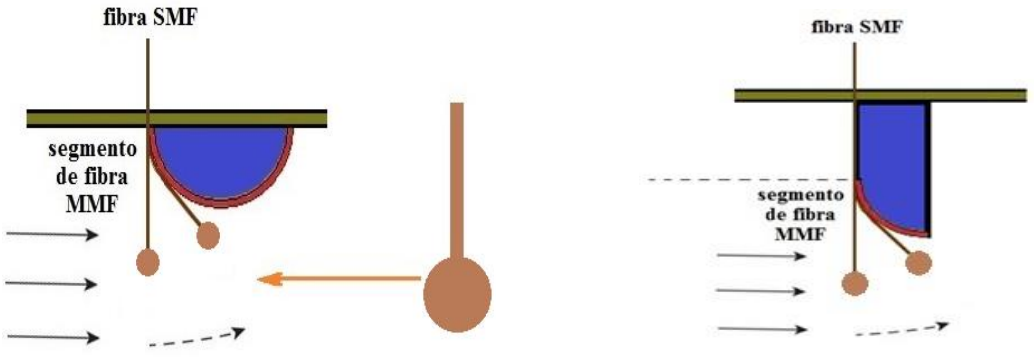
Figura 28 – Sensor de vazão por variação do arco com raio de curvatura fixo: (a) seleção do valor do raio de curvatura fixo e (b) montagem em suporte de perfil circular.

O suporte de perfil circular deve ser composto de um disco de pequena espessura, o bastante para acomodar o sensor em uma ranhura para evitar que o dispositivo se desloque lateralmente devido ao movimento do fluido, de forma a manter deslocamento apenas longitudinal e evitar flexão em direção ortogonal ao escoamento. No caso de fluxo de grande velocidade, de fluido muito viscoso ou com partículas em suspensão, é recomendável usar uma camada de proteção mecânica para o sensor. Como a fibra é composta de sílica, uma opção seria usar um revestimento plástico ou emborrachado, flexível o suficiente para não influenciar o movimento do sensor, mas que possua mesma constante fotoelástica da fibra.

O conjunto do sensor mais o suporte é muito pouco intrusivo e não deve apresentar perda de carga significativa para tubulações usadas em aplicações industriais. Levando em consideração que a espessura da fibra a ser utilizada está na ordem de uma centena de µm e que o disco de suporte ao arqueamento deverá ter espessura apenas um pouco maior, pode-se considerar que para tubulações de diâmetro interno pelo menos dez vezes maior que a espessura do suporte, a perda de carga pode ser considerada desprezível. A possível presença de vórtices produzidos pelo conjunto é pouco significante em comparação com os tradicionais sensores mecânicos de vazão.

Nas aplicações em que a rigidez da fibra se apresenta muito elevada em relação ao fluxo a ser medido ou fluxo em velocidade muito baixa, como em dosagem de líquido e injeção química, a sensibilidade do sensor pode ser aumentada adicionando-se um obstáculo, como uma pequena esfera ou um anteparo plano, na ponta do sensor para aumentar a flexibilidade do conjunto. Como a deflexão da ponta do sensor aumenta com a área do obstáculo, o mesmo pode ser usado para controlar a sensibilidade final. No caso velocidades muito elevadas este recurso pode acrescentar uma componente de vibração e acentuar a presença de vórtices.

Para compensar o perfil assimétrico de escoamento em função do raio do tubo, é possível deslocar o sensor para a parte mais interna da tubulação, no centro por exemplo, estendendo o suporte. A Figura 29 ilustra estes conceitos.



(a) (b)

Figura 29 – (a) Detalhe da adição de um bloco ao sensor para casos em que a rigidez da fibra for elevada para o fluxo. A inclusão do bloco aumenta a sensibilidade do conjunto. (b) O sensor pode ser deslocado para a parte mais interna do tubo.

3 – Sensor de Vazão/Anemômetro Baseado em Estrutura SMS, Interrogado na Reflexão

Neste capítulo é descrito um dispositivo SMS como **sensor de vazão livre**, ou seja, um sensor de vazão / anemômetro por reflexão, sendo livre para curvar sob efeito do arrasto de um meio fluido apresentando curvatura variável. A resposta do sensor está relacionada com a velocidade do fluido, podendo o dispositivo ser empregado como anemômetro quando exposto ao ar livre ou como sensor de vazão quando montado dentro de uma tubulação para escoamento de gases ou líquidos. O comportamento do sensor em função da velocidade/vazão do fluido é avaliado por análise espectral empregando uma variedade de métodos como deslocamento espectral de um pico selecionado, intensidade da potência luminosa refletida em um determinado comprimento de onda ou em picos e vales selecionados. Testes realizados em túnel de vento são detalhados e seus resultados apresentados e discutidos.

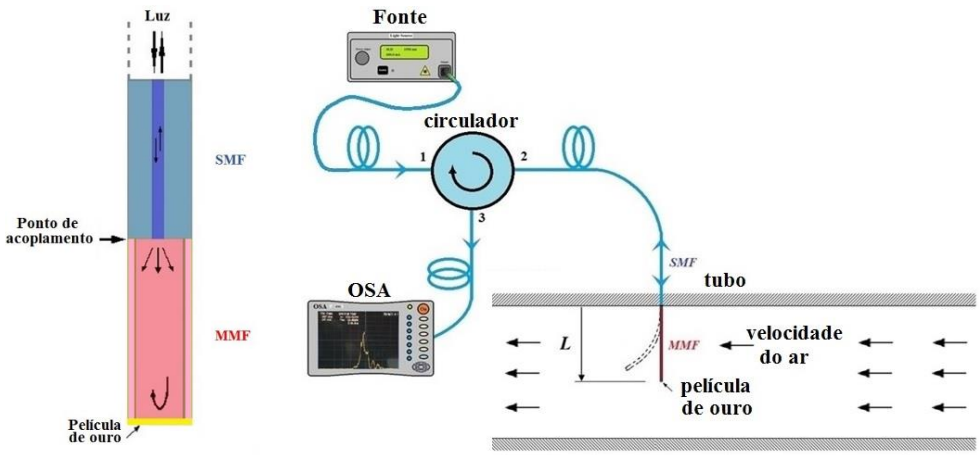
3.1 – Sensoriamento de vazão por curvatura: configuração experimental

A estrutura SMS proposta como sensor por reflexão é composta basicamente de uma fibra SMF usada simultaneamente como entrada e saída do sinal luminoso, acoplada a um segmento de fibra MMF revestido por uma película de ouro na face da extremidade exposta ao fluxo, atuando como espelho para a luz propagada ao longo do sensor. O segmento MMF possui comprimento correspondente à metade do comprimento da reimagem, considerando que por operar por reflexão, a luz será propagada na metade do comprimento da reimagem na ida e metade na volta, após ser refletida na película de ouro. A curvatura do sensor devido à variação da velocidade do ar resulta em mudanças no padrão de interferência multimodal. A Figura 30 (a) mostra os detalhes do sensor por reflexão.

O sinal de luz da fonte é transferido para o sensor através de um circulador. A fibra SMS é conectada à face não recoberta pela película metálica onde o sinal de luz é recebido de volta por reflexão na outra ponta da MMF. O dispositivo é adaptado à

tubulação onde escoa o fluido a ser monitorado, de modo a ficar suspenso para ser arrastado livremente pelo escoamento, numa configuração usualmente denominada cantilever. A fibra monomodo empregada na confecção do sensor é a fibra padrão Corning SMF-28 e para a multimodo foi empregada uma fibra Thorlabs AFS105/125Y.

O comportamento do sensor foi demonstrado num experimento realizado com a colaboração do Instituto de Física Gleb Wataghin e da Faculdade de Engenharia Mecânica, da UNICAMP, onde um túnel de vento subsônico foi empregado para submeter o sensor a um fluxo de ar com velocidade controlada. O diagrama com a configuração experimental empregada encontra-se ilustrado na Figura 30 (b).

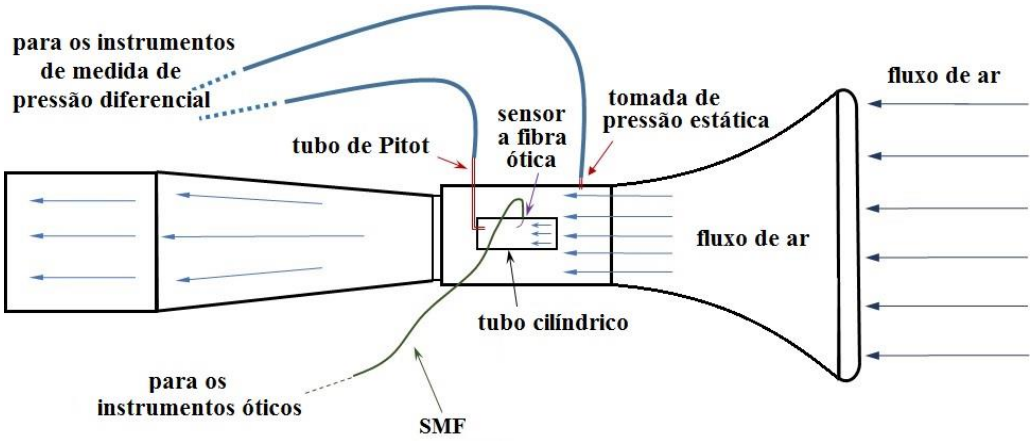


(a) (b)

Figura 30 – Sensoriamento de curvatura com interrogação na reflexão da luz: (a) sensor por reflexão e (b) diagrama das conexões para verificação experimental.

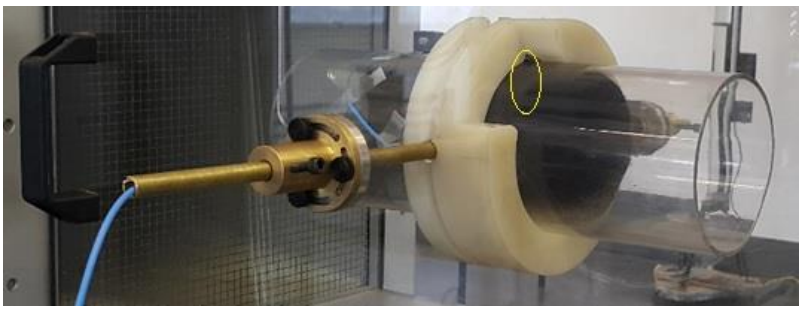
Como fonte de luz banda larga foi empregado o equipamento Thorlabs Fiber Coupled SLD 1550 nm com banda de 1450 a 1650 nm. A luz guiada até o sensor através de um circulador é refletida e interrogada por um analisador de espectro ótico para uso em campo modelo OSA JDSU com resolução potência de 0,01 dB e banda de 1250 a 1650 nm com resolução de 8,77 pm.

O túnel de vento empregado é o equipamento TecQuipment AF100 Subsonic Wind Tunnel, que possui um motor para aspirar o ar e fazer o fluxo deslocar-se na forma de uma corrente laminar pela câmara de testes, com perfil uniforme de velocidade. A Figura 31 (a) mostra o diagrama da configuração experimental, 31 (b) mostra a foto do experimento e 31 (c) detalhe da montagem do tubo de acrílico com o sensor, dentro da câmara de testes.



(a)

(b)



(c)

Figura 31: (a) Diagrama da montagem do experimento no túnel de vento; (b) foto do experimento no túnel de vento e (c) detalhe do sensor montado no tubo de acrílico dentro da câmara de testes (a elipse mostra a posição do sensor dentro do tubo).

O sensor foi montado dentro de um tubo de acrílico transparente com diâmetro interno de 94 mm e comprimento de 300 mm. O posicionamento do sensor dentro de um tubo tem como objetivo, além de permitir a realização dos testes de sensoriamento de vazão, garantir que na região do sensor a circulação do fluido ocorra livre de turbulências produzidas pelas ferragens empregadas para fixação do tubo/sensor dentro da câmara de testes. A câmara possui uma tomada de pressão estática e um tubo de *pitot* para permitir tomada da pressão de estagnação, possibilitando assim a medida da velocidade do ar por pressão dinâmica em modo diferencial, indicada por uma coluna de água graduada em unidade de milímetro. O tubo de *pitot* foi posicionado de modo a medir a velocidade do ar na altura da ponta do sensor. A expressão da velocidade do ar **V**, em m/s, produzida pelo túnel de vento pode ser derivada a partir da equação de Bernoulli, na forma (85):

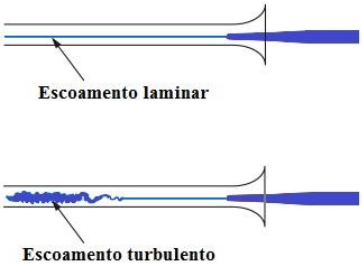
$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P g}{\rho_a}} \tag{23}$$

sendo

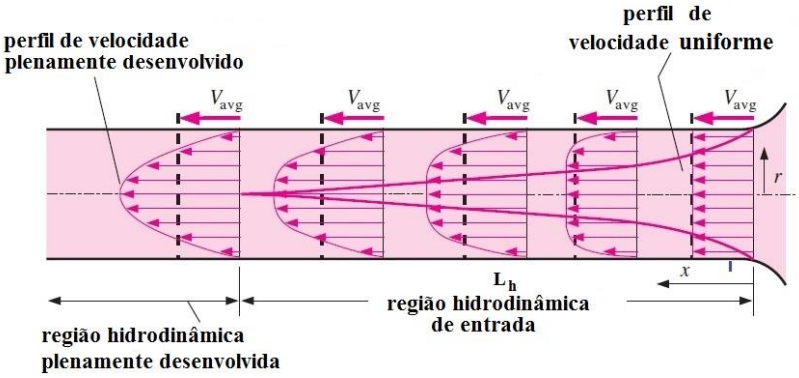
$$\rho_a = \frac{100\, P_a}{R\, T_a} \tag{24}$$

onde **ΔP** é a pressão dinâmica obtida pela diferença de altura da coluna do líquido (neste caso, mmH_2O), **g** é a aceleração da gravidade, $\boldsymbol{\rho_a}$ é a densidade local do ar em kg/m^3, $\mathbf{T_a}$ é a temperatura ambiente em K, $\mathbf{P_a}$ é a pressão atmosférica ambiente em mbar e **R** é a constante dos gases (287 m^2/s^2K).

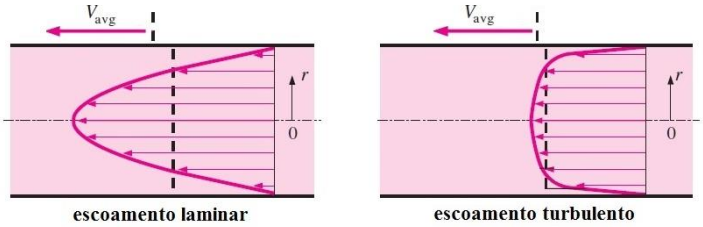
O estudo do escoamento interno num tubo cilíndrico (86) mostra que quando um fluido em escoamento laminar com velocidade de perfil uniforme, como a corrente de ar produzida pelo túnel de vento na câmara de testes, entra em uma tubulação, o perfil de escoamento ao longo do tubo experimenta uma transição do regime laminar de entrada para o regime permanente. A região de transição possui comprimento $\mathbf{L_h}$ e é denominada Região Hidrodinâmica de Entrada, onde o perfil definitivo da velocidade está em desenvolvimento. A partir desse ponto é iniciada a Região Hidrodinâmica Plenamente Desenvolvida, onde o fluído assume seu perfil definitivo. Um escoamento laminar, por exemplo, passa a ter um perfil parabólico com velocidade média $\mathbf{V_{avg}}$. A Figura 32 ilustra este comportamento.



(a)



(b)



(c)

Figura 32 – (a) Experimento de Reynolds; (b) Transição do fluxo externo laminar de perfil uniforme, para o fluxo laminar no interior do tubo, mostrando a Região Hidrodinâmica de Entrada com comprimento $\mathbf{L_h}$; (c) Perfil da velocidade de escoamento na Região Hidrodinâmica Plenamente Desenvolvida (parabólica no caso do escoamento laminar).

Fonte: (86) adaptado pelo autor deste trabalho.

No regime plenamente desenvolvido, o escoamento interno pode ser laminar ou turbulento conforme a relação entre as forças inerciais e viscosas. Esta relação é chamada Número de Reynolds **Re** e é determinada por (86):

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \tag{25}$$

onde **ρ** é a densidade do fluido, **V** é a sua velocidade, **D** é o diâmetro do tubo e **μ** é a viscosidade dinâmica do fluido, todos com unidades no Sistema Internacional. O regime de escoamento é considerado turbulento quando este número está acima de 4000. Considerando a velocidade limite usada no experimento igual a 12,25 m/s, o diâmetro do tubo de acrílico 94 mm, a densidade do ar 1,225 kg/m^3 e a sua viscosidade dinâmica 1,79x10^{-5} kg/ms, o número de Reynolds calculado é de cerca de 78804, caracterizando escoamento turbulento. Neste caso, o comprimento da Região Hidrodinâmica de Entrada **L_h**, é calculado por (86):

$$L_h = 4{,}4.D.R_e^{\frac{1}{6}} \tag{26}$$

Aplicando os valores empregados neste trabalho encontramos um comprimento **L_h** de cerca de 32 m. O tubo de acrílico empregado no experimento possui comprimento de 0,03 m e o sensor está localizado na metade do tubo, o que significa estar muito no início da Região Hidrodinâmica de Entrada. Logo, podemos considerar o escoamento no ponto onde está localizado o sensor como sendo aproximadamente laminar, com perfil uniforme, como gerado pelo túnel de vento. Dessa forma, podemos assumir que a vazão pode ser calculada simplesmente multiplicando a velocidade do ar pela área da seção reta do tubo (85):

$$Q = V.A = V.\pi.r^2 = \frac{V.\pi.D^2}{4} \tag{27}$$

A coluna de água que indica a pressão diferencial é graduada em unidades de milímetro de água, o que leva a uma incerteza de 0,5 mm. Usando as equações 23 e 24 podemos fazer a correspondência da faixa de variação de pressão, de 0 a 9 mm de água, com a correspondente faixa de velocidade do ar, de 0 a 12,25 m/s (44,10 km/h). Empregando a Equação 27 obtemos a faixa correspondente de vazão, de 0 a 0,085 m^3/s ou 5101 ℓ/min. Usando a escala de ventos produzida pelo meteorologista anglo-irlandês Francis Beaufort, fornecida no anexo B, empregada internacionalmente e pela Marinha do Brasil, o limite superior de velocidade neste experimento está na faixa de vento Muito

Fresco (entre vento Fresco e vento Forte), caracterizado pelos seguintes efeitos em terra: assobios na fiação aérea, movem-se os maiores galhos das árvores e o guarda-chuva é usado com dificuldade.

3.2 – Resultados e discussões

O ajuste da velocidade do ar usando a escala de pressão diferencial fornecida pela coluna de água em unidades de milímetro, de zero a 9 mmH_2O, permitiu a obtenção de um conjunto de espectros correspondentes à variação gradual do vento produzido. A Figura 33 mostra os espectros óticos obtidos no experimento. Diversos picos e vales formados por efeito de interferência multimodal são observados, sendo que P1, P2 e V1 foram escolhidos para ilustrar as principais propriedades do sensor.

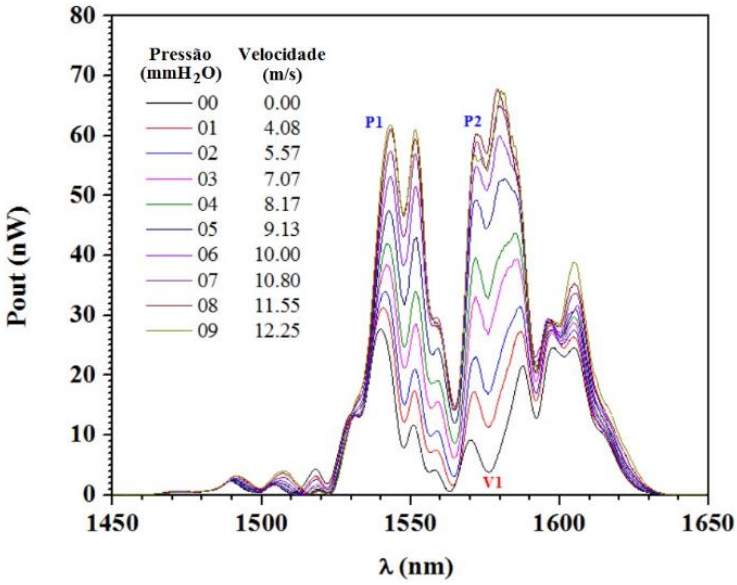


Figura 33 – Conjunto de espectros obtidos experimentando o sensor em diferentes valores de pressão/velocidade do ar. Os picos P1 e P2 e o vale V1 foram escolhidos para ilustrar as principais propriedades do sensor.

A Equação 17, reproduzida aqui por comodidade, permite calcular o valor do comprimento de onda onde ocorre interferências máximas construtivas (para **N** par, ou seja, diferença de fase múltipla de 2π) e destrutivas (para **N** ímpar, ou seja, diferença de

fase múltipla de π) entre campos de pares de modos guiados no segmento multimodo do sensor. A divisão da expressão em três fatores permite observar mais facilmente a influência das características do sensor (comprimento e parâmetros da fibra) e da seleção de pares de modos para análise.

$$\lambda = \frac{8a^2 n_{cr}\, N}{(m-n)[2(m+n)-1]\mathrm{z}} = N \,.\, \frac{1}{(m-n)[2(m+n)-1]} \,.\, \frac{8a^2 n_{cr}}{z}$$

Uma vez escolhida a fibra MMF e seu comprimento, o terceiro fator representa um valor fixo de comprimento de onda. A seleção de um par de modos **m** e **n** determina que fração deste comprimento de onda será usado como unidade de espaçamento **Δλcalc** para interferências máximas entre os dois modos, que corresponde ao valor da equação para **N = 1** (intervalo de comprimento de onda entre franjas de interferência de modos LP_{0m} e LP_{0n}). Para os demais valores de **N** = 2, 3, 4 . . . ocorrem alternadamente interferências máximas construtivas e destrutivas, posicionadas ao longo do eixo horizontal do espectro (**λ**).

A Tabela 2 mostra os valores experimentais dos comprimentos de onda **λexp** dos pontos selecionados usando o espectro da potência refletida pelo sensor sem apresentar curvatura, ou seja, velocidade do ar igual a zero, juntamente com os valores calculados, **λcalc**, usando a Equação 17. Na coluna **λcalc** são considerados os efeitos das interferências entre diferentes pares de modos (**m**,**n**) e calculados os comprimentos de onda correspondentes para o vale e os picos selecionados, com boa concordância com os valores experimentais. Tomando o par de modos 9,3 por exemplo, após 274 ocorrências do intervalo de interferências máximas **Δλcalc**, ocorre uma interferência construtiva máxima entre o par de modos 9 e 3, no comprimento de onda **λcalc** = 1539,56 nm. Além deste par, o par 9,2 é o único a produzir interferência construtiva máxima próxima do valor experimental **λexp** = 1593,93 nm. Podem ocorrer outras interferências entre pares de modos nas proximidades do valor experimental (construtivas e destrutivas), mas as únicas calculadas com interferências construtivas máximas são entre os pares de modo 9,2 e 9,3. Assim sendo, os cálculos realizados com a Equação 17 mostram que estes pares dominam a presença do pico experimental de potência refletida P1. A mesma ponderação pode ser estendida aos demais pontos selecionados P2 e V1.

Tabela 2 - Valores calculados e experimentais dos comprimentos de onda das interferências de pares de modos m e n.

Pico/ Vale	m,n	N	Δλcalc (nm)	λcalc (nm)	λexp (nm)
P1	9,2	292	5,27483	1540,25	1539,93
	9,3	274	5,61884	1539,56	
P2	7,3	154	10,20263	1571,21	1570,25
	9,1	308	5,10132	1571,21	
V1	5,3	61	25,84667	1576,65	1576,23
	9,1	309	5,10132	1576,31	
Valores experimentais :	**$z = Z_{reimg}$**	**$n_{núcleo}$**	**raio**		
	41,08 mm	1,4446	52,5 µm		

Conforme pode ser visto na Tabela 2, o pico P1 é dominado pelas interferências construtivas entre os pares de modo (LP_{09} e LP_{02}) e (LP_{09} e LP_{03}), P2 é dominado pelas interferências construtivas entre os pares de modo (LP_{07} e LP_{03}) e (LP_{09} e LP_{01}) e V1 é dominado pelas interferências destrutivas entre os pares de modo (LP_{05} e LP_{03}) e (LP_{09} e LP_{01}). Consequentemente, a maior diferença na potência de saída, entre os picos P1 e P2, está na diferença de energia transferida da fibra SMF para o segmento MMF e refletido de volta para a fibra SMF, pela interferência construtiva entre os pares de modos (9-2 e 9-3) e (7-3 e 9-1). Para o comprimento de onda **λcalc** do pico P1, os pares de modos 9-2 e 9-3 respondem por cerca de 42,46% da energia propagada na SMF, acoplada aos modos guiados da MMF, de acordo com a Equação 12. Para o comprimento de onda **λcalc** do pico P2, os pares de modos 7-3 e 9-1 respondem por cerca de 36,69% da energia propagada na SMF, acoplada aos modos guiados da MMF. Pode-se observar que, para a fibra não curvada, o pico P1 possui maior potência que o pico P2, como esperado. No vale V1 os pares de modos dominantes são 5-3 e 9-1 e possuem 46,55% da energia acoplada neste comprimento de onda, mas a interferência é destrutiva. Existem outras contribuições de pares de modos, além dos citados, mas são contribuições menores.

A Figura 34 mostra o deslocamento do comprimento de onda para os três pontos selecionados. As linhas nos gráficos são usadas apenas para representar a tendência geral do deslocamento em função da velocidade do ar. Uma discussão mais detalhada sobre a sensibilidade do sensor será feita mais adiante nesta seção.

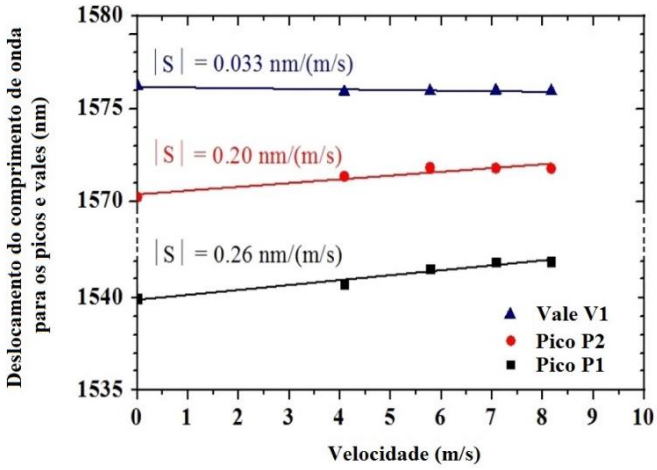
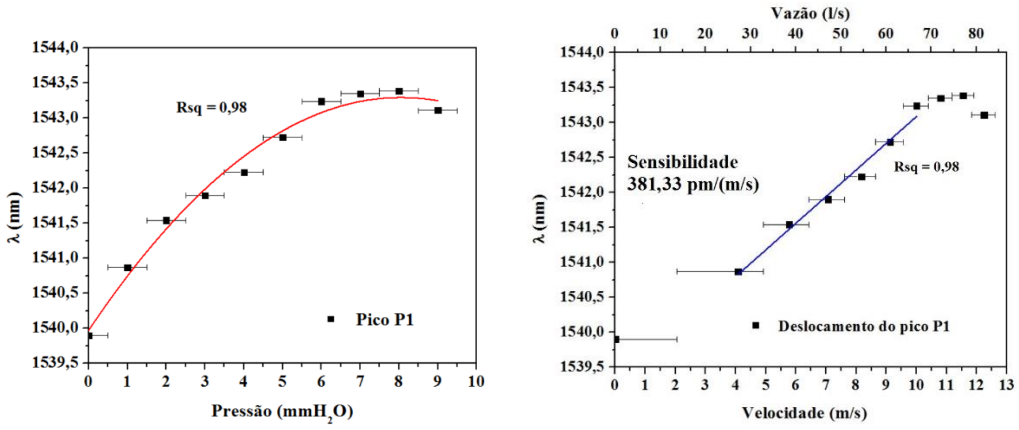


Figura 34 – Deslocamento dos pontos selecionados V1, P2 e P1.

O vale V1, dominado pela interferência entre os pares 5-3 e 9-1, permanece quase constante. Em comparação com os demais, V1 possui composição modal dominante mais interna ou paraxial, ou seja, modos de menor ordem (1,3,5 e 9). Os modos de menor ordem são mais focados dentro de uma área menor próxima ao centro da fibra e, consequentemente, são menos afetados por curvaturas menores, que é o caso em questão. Os modos de menor ordem são menos afetados por pequenas curvaturas, mas muito sensíveis para curvaturas muito pronunciadas. Picos e vales pouco sensíveis à curvatura podem ser utilizados para monitorar simultaneamente outros parâmetros físicos, como temperatura, por exemplo. Os pares de modos que, comparativamente, possuem maior ordem, como em P1 (2,3,9 e 9), são mais afetados pela curvatura neste trabalho, possuindo maior sensibilidade. Os pares de modo em P2 (1,3,7 e 9) apresentam efeitos intermediários no que diz respeito ao deslocamento do pico.

3.2.1 – Interrogação espectral

A Figura 35 (a) mostra o deslocamento do comprimento de onda para o pico P1 como função da pressão dinâmica. A Figura 35 (b) mostra o deslocamento do comprimento de onda do pico P1 em função da velocidade do ar (escala inferior) e da vazão correspondente (escala superior). A conversão foi realizada empregando as Equações 23, 24 e 27.



(a) (b)

Figura 35 – (a) Deslocamento do comprimento de onda do pico P1 em função da pressão dinâmica com o ajuste polinomial de segunda ordem; (b) Deslocamento espectral do pico P1 em função da velocidade do ar e vazão com ajuste linear.

O experimento com o sensor sem fluxo de ar, ou seja, velocidade zero, resulta em pressão dinâmica zero. Aumentando o fluxo de ar para o primeiro marco da escala de pressão do instrumento disponível no túnel de vento temos o valor 1 mmH_2O, que corresponde à velocidade de 4,08 m/s. Consequentemente, o experimento não proporcionou informações equivalentes de medida para velocidades muito pequenas. Como consequência, os resultados mostrados na Figura 35 não possuem significado para deslocamento do pico em função da velocidade, ou vazão, para valores de velocidade abaixo de 4 m/s. Consideração semelhante deve ser feita para a região de altas velocidades, maiores que 10 m/s, devido à saturação observada no deslocamento do sensor devido ao arrasto do fluido e seguida inversão do sentido, ou seja, a potência passa a reduzir com a velocidade, conforme previsto na discussão sobre o comportamento da interferência multimodal em função da curvatura, apresentada no item 2.2.1. A sensibilidade apresentada pelo sensor nesta faixa é de 381,33 pm/(m/s), com resolução de 23 x 10^{-3} m/s e faixa de até 10 m/s.

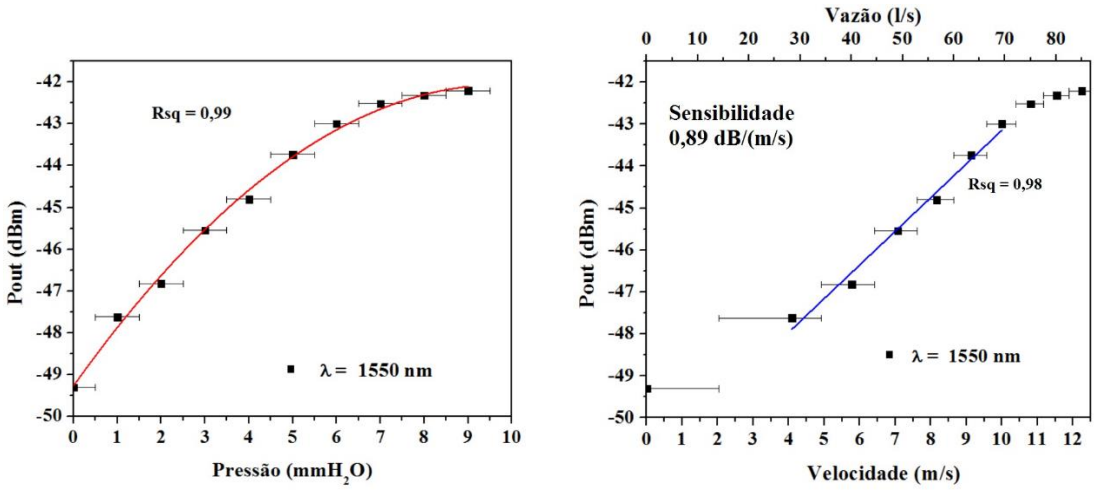
Para fins de comparação, em (87) é reportado um sensor de vazão empregando rede de Bragg, em tubulação de 40 mm de diâmetro. Convertendo os valores da vazão para velocidade, a sensibilidade reportada corresponde a 317,85 pm/(m/s), a resolução é 37,50x10^{-3} m/s com faixa de 0 a 4,09 m/s. Em (61) é reportado um anemômetro a fibra ótica com compensação de temperatura, empregando um interferômetro Fabry-Perot, que apresenta sensibilidade de 275 pm/(m/s) para uma faixa de 0 a 4 m/s. Finalmente, em (55)

é reportado um sensor de vazão mássica para gás hélio, empregando rede de Bragg, que apresenta uma sensibilidade de 29 pm/(g/s), resolução de 0,2 g/s e faixa de 0 a 5 g/s. Os valores correspondentes de vazão mássica de ar no experimento realizado neste trabalho são: sensibilidade de 44,65 pm/(g/s), resolução de 0,2 g/s e faixa de 0 a 85,41 g/s.

3.2.2 – Interrogação em amplitude com comprimento de onda fixo

Além do método de análise por deslocamento de pico, foram utilizados outros métodos de análise para descrever o comportamento do sensor. O monitoramento das intensidades da potência de saída em função da pressão, velocidade e vazão foram realizados usando os espectros refletidos para um determinado comprimento de onda fixo, para o vale V1 e para uma combinação das potências de saída do pico P2 e do vale V1.

Usando a Equação 20 e os dados experimentais da Figura 19 (b), o comprimento de onda na reimagem é λ = 1550 nm, usado como referência para a potência de saída. A Figura 36 (a) mostra a potência de saída no comprimento de onda de referência em função da pressão dinâmica. A Figura 36 (b) mostra a potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão correspondente, convertida pelas Equações 23, 24 e 27.



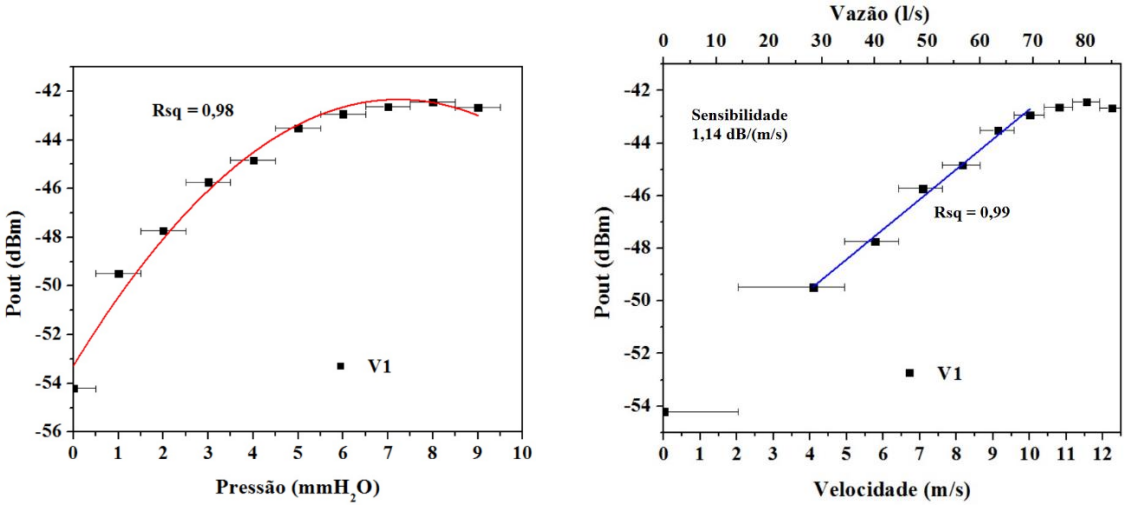
(a) (b)

Figura 36 – (a) potência de saída no comprimento de onda de referência em função da pressão dinâmica com ajuste polinomial de segunda ordem e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão com ajuste linear.

Pelo método de análise por monitoração do deslocamento espectral do pico, o sensor apresenta sensibilidade de 0,89 dB/(m/s) com resolução de $10{,}20 \times 10^{-3}$ m/s.

3.2.3 – Interrogação em amplitude em múltiplos comprimentos de onda

A Figura 37 (a) mostra os resultados obtidos monitorando a potência de saída para o vale V1 em função da pressão dinâmica. A Figura 37 (b) mostra a potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão correspondente, convertidos pelas Equações 23, 24 e 27.

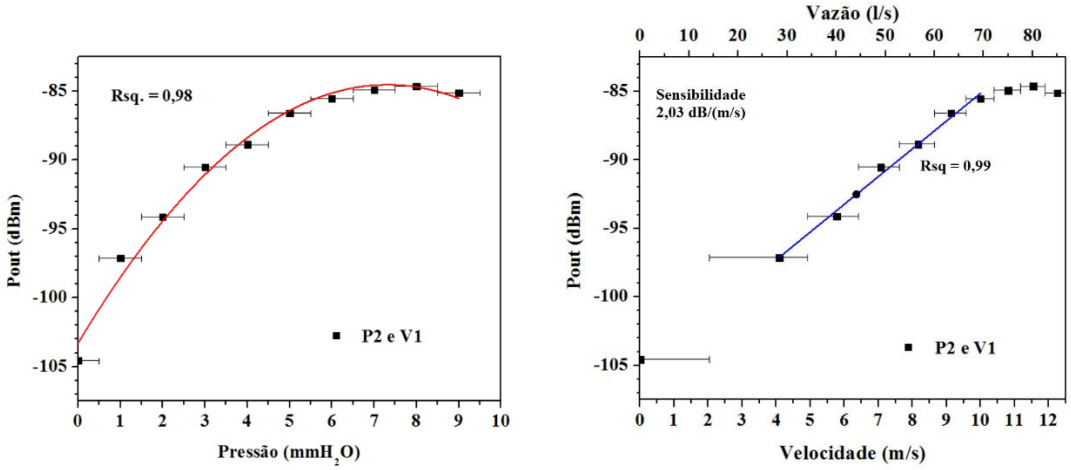


(a) (b)

Figura 37 – (a) potência de saída para o vale V1 em função da pressão dinâmica com ajuste polinomial de segunda ordem e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão com ajuste linear.

Pelo método de análise por monitoração do vale V1, o sensor apresenta sensibilidade de 1,14 dB/(m/s) com resolução de $8{,}77 \times 10^{-3}$ m/s.

É possível atingir valores maiores de sensibilidade se pudermos monitorar simultaneamente uma combinação do pico P2 com o vale V1, realizando a soma de suas potências em dBm. A Figura 38 (a) mostra, para a combinação de P2 e V1, a potência de saída em função da pressão dinâmica. A Figura 38 (b) mostra a potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão correspondente, convertidos pelas Equações 23, 24 e 27.



(a) (b)

Figura 38 (a) potência de saída para a combinação P2 e V1 em função da pressão dinâmica com ajuste polinomial de segunda ordem e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão com ajuste linear.

Pelo método de análise por monitoração simultânea do pico P2 e do vale V1, o sensor apresenta sensibilidade de 2,03 dB/(m/s) com resolução de $4{,}93 \times 10^{-3}$ m/s. Em comparação com os outros métodos de análise por interrogação da potência refletida, o método de combinação do pico P2 com o vale V1 fornece melhor resolução e maior sensibilidade, cerca de duas vezes e meia a que foi obtida usando comprimento de onda fixo e aproximadamente o dobro da obtida pelo monitoramento do vale V1. Por outro lado, esta vantagem ocorre às custas de um método de interrogação mais complexo.

A exemplo do que foi sugerido para os sensores por raio de curvatura fixo, no item 2.2.2, para aplicações com velocidade do fluxo muito baixa, como em dosagem de líquido e injeção química, a sensibilidade do sensor pode ser aumentada adicionando-se um obstáculo, como uma pequena esfera ou um anteparo plano, na ponta do sensor. Como a deflexão da ponta do sensor aumenta com a área do obstáculo, este pode ser usado para controlar a sensibilidade final. No caso velocidades muito elevadas este recurso pode acrescentar uma componente de vibração e acentuar a presença de vórtices.

O sensor nesta configuração cantilever livre, sem apoio em suporte, apresenta considerável fragilidade, sendo indicado o emprego de proteção mecânica quando o fluido apresenta velocidades altas. Em compensação, como a espessura da fibra está na ordem de uma centena de µm, o sensor é muito pouco intrusivo e não deve apresentar perda de carga significativa para tubulações usadas em aplicações industriais.

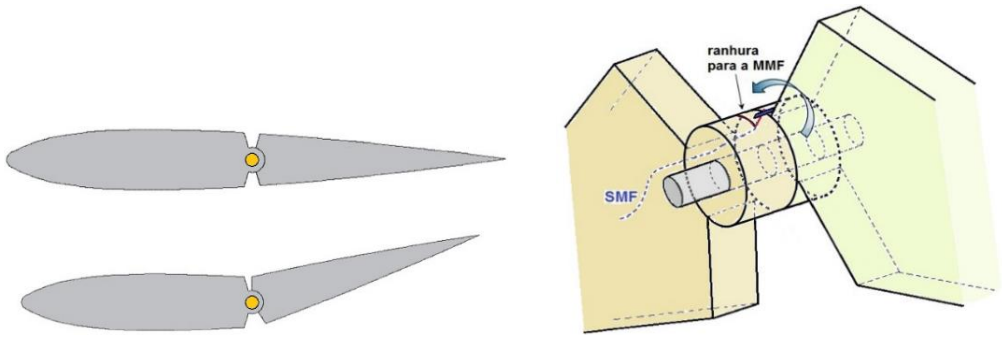
4 – Sensor de Curvatura com Raio Fixo baseado em Estrutura SMS

Neste capítulo são descritos sensores de curvatura por transmissão e por reflexão usando raio de curvatura com valor fixo, de modo a evitar as mudanças de inclinação na resposta do sensor para determinadas faixas de variação do raio de curvatura, conforme descrito no Capítulo 2, Item 2.2. Outro fator importante no emprego de raio fixo é que em muitas aplicações é preciso saber, a partir do ponto onde se está operando, se a resposta do sensor é de aumento ou redução da variável monitorada. No caso de monitoramento de movimento mecânico é preciso saber, a partir do ponto de operação, qual o sentido do deslocamento, como subida ou descida, por exemplo, no caso de rampas. A escolha do raio de curvatura fixo influi nas características do sensor.

No sensoriamento de curvatura com raio de curvatura fixo, as variações dos efeitos de interferência multimodal são produzidas pela variação do arco na curvatura escolhida. Para esta finalidade empregamos um suporte de perfil circular com raio de curvatura previamente selecionado, onde o sensor irá arquear pela aplicação da força produzida por um agente mecânico, como em deslocamentos produzido por rotação de peças mecânicas em equipamentos industriais ou em rampas em indústrias, navios e caminhões, entre outras. A Figura 39 mostra um exemplo onde o movimento de peças em torno de um eixo pode deslocar a ponta de um sensor de curvatura SMS interrogado na reflexão. Neste exemplo uma estrutura aerodinâmica móvel se desloca produzindo o efeito conhecido como asa variável. A ranhura onde o sensor se acomoda à medida que arqueia com o movimento pode estar localizada em uma das peças ou mesmo no eixo.

Inicialmente analisaremos o comportamento do sensor no modo transmissão e em seguida no modo reflexão empregando uma película de ouro depositada na ponta do sensor, funcionando como espelho. Testes experimentais em bancada ótica são utilizados para constatar o comportamento dos sensores devido ao arqueamento no suporte circular. Os experimentos são detalhados e seus resultados apresentados e discutidos.

Nos experimentos descritos neste capítulo, a fibra monomodo empregada para confecção dos sensores foi a fibra padrão Corning SMF-28 e para a seção multimodo foi empregada uma fibra *no-core* (basicamente um cilindro de sílica) de 125 µm de diâmetro.



(a) (b)

Figura 39 – (a) Peças se deslocam em torno de um eixo comum. (b) O ressalto na peça da direita pode deslocar a ponta de um sensor SMS, que se acomoda em uma ranhura à medida que arqueia.

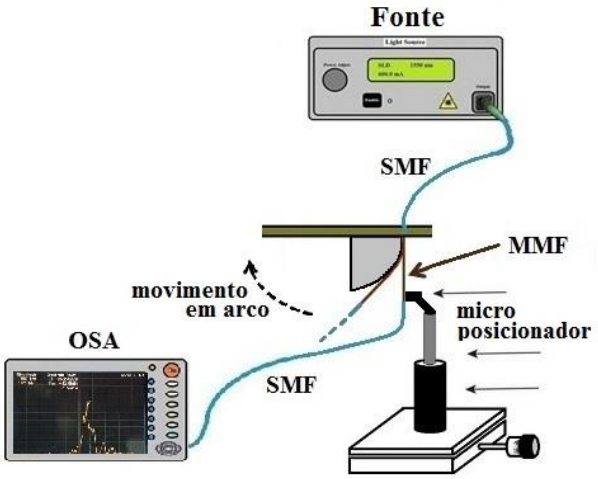
4.1 – Sensor de curvatura SMS com raio fixo, interrogado na transmissão

A estrutura SMS proposta como sensor interrogado na transmissão é composta basicamente de um segmento de fibra multimodo acoplada nas extremidades a duas fibras monomodo. Uma fonte de luz alimenta uma das fibras SMF e a luz propagada excita os modos guiados da MMF no ponto de acoplamento. No final do segmento MMF a luz é acoplada à outra fibra SMF, sendo então guiada a um analisador de espectro ótico (OSA), onde é registrada a potência transmitida. O comprimento em que ocorre a formação da reimagem no segmento MMF para λ = 1550 nm é calculado usando a Equação 20 e corresponde ao valor Z_{Reimg} = 58,23 mm.

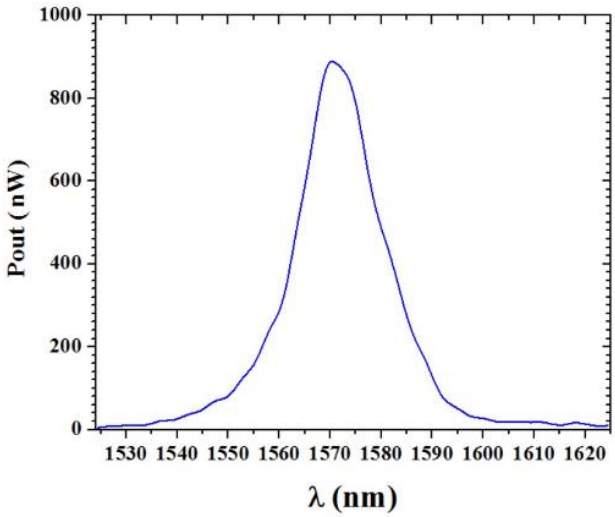
4.1.1 Configuração experimental

A Figura 40 (a) mostra o diagrama da configuração experimental para teste do sensor. Como fonte de luz banda larga foi empregado o equipamento Thorlabs Fiber Coupled SLD 1550 nm com banda de 1450 a 1650 nm. A potência luminosa de saída foi interrogada por um analisador de espectro ótico comercial Anritsu MS9710B com

resolução de potência de 0,001 dB e banda de 1250 a 1650 nm com resolução de 70 pm. Um microposicionador foi empregado para deslocar a ponta do sensor, a partir da posição reta vertical, em intervalos de 10 µm.



(a)



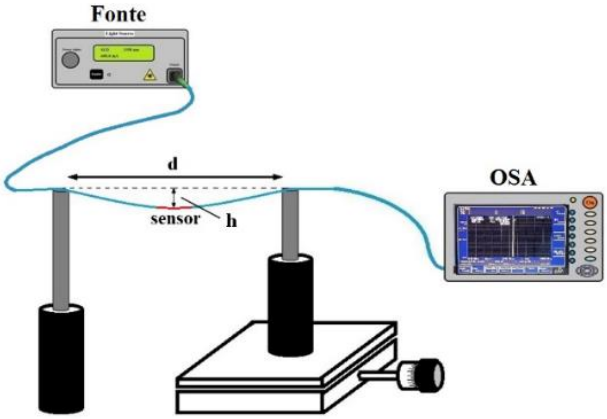
(b)

Figura 40 – (a) Diagrama da configuração experimental para teste do sensor em modo transmissão e (b) Espectro com o sensor na posição vertical sem curvatura.

A Figura 40 (b) mostra o espectro obtido com o sensor na posição vertical reta, ou seja, sem apresentar curvatura. O pico espectral ocorre em λ = 1570,5 nm, revelando um comprimento equivalente de reimagem no segmento MMF correspondendo a 57,46 mm. O desvio em relação ao valor planejado de 58,23 mm deve-se a pequenas alterações de ordem prática no experimento, especialmente na fabricação do sensor, como imprecisões

nos pontos de clivagem da seção MMF. A diferença entre os valores teórico e experimental é menor que 1,4%.

Um experimento foi realizado para medir a potência transmitida através do sensor em função do raio de curvatura de modo a constatar o efeito da inversão de inclinação no perfil de transmissão. A Figura 41 mostra o diagrama do experimento.



(a)

Figura 41 – Diagrama do experimento realizado para medir os efeitos da curvatura no sensor SMS.

O sensor foi colocado entre dois postes, na posição central, sendo a curvatura dada por (88)

$$C = \frac{1}{R_c} = \frac{2h}{h^2 + \left(d/_2\right)^2} \tag{28}$$

$$d = L_0 - \Delta L \tag{29}$$

onde **h** é a profundidade da curvatura, $\mathbf{L_0}$ é a distância inicial entre os postes e **ΔL** é a variação da distância. Para valores muito pequenos de **h**, que torna difícil a medição, a Equação 28 pode ser aproximada por (7)

$$C = \frac{1}{R_c} \cong \frac{4}{L_0}\left(L_0^2 - d^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{30}$$

Um microposicionador permitiu a variação do deslocamento **ΔL** em passos com resolução de 10 µm. Os resultados experimentais mostrados na Figura 42 revelam o efeito

esperado de variação da inclinação na curva de intensidade de potência transmitida em função de uma extensa faixa de variação do raio de curvatura, Rc. A escolha do valor do raio de curvatura do suporte de perfil circular para as medidas de sensoriamento de curvatura foi efetuada considerando a faixa de valores de Rc que se encontra entre as linhas verticais mostradas na Figura 42.

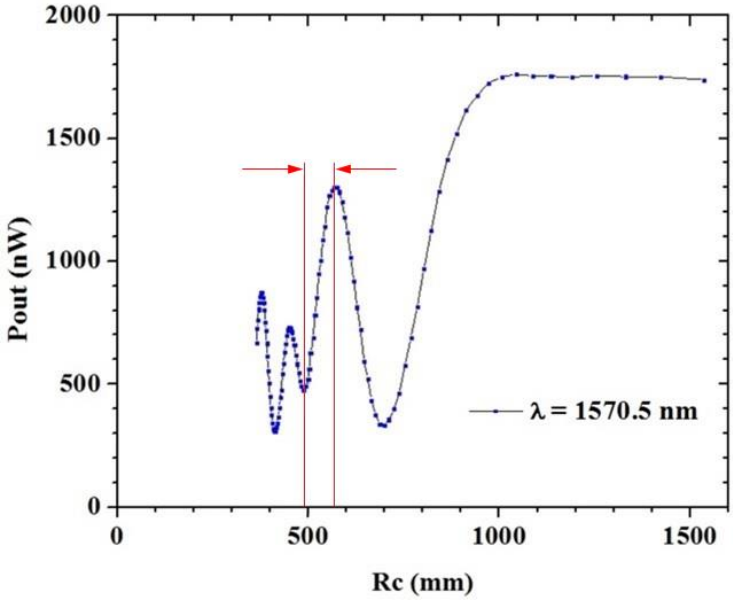
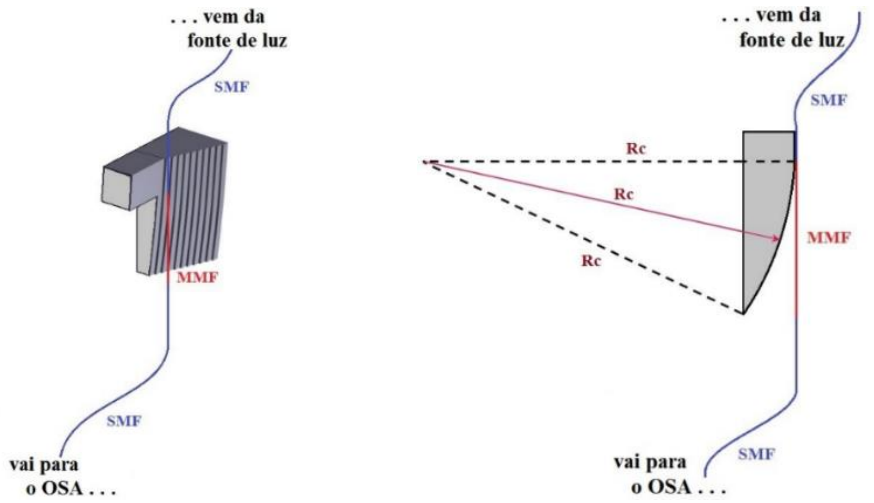


Figura 42 – Resultado do experimento descrito na Figura 41. Entre as linhas verticais está a faixa de valores selecionada para escolha do raio de curvatura do suporte circular a ser empregado no teste do sensor.

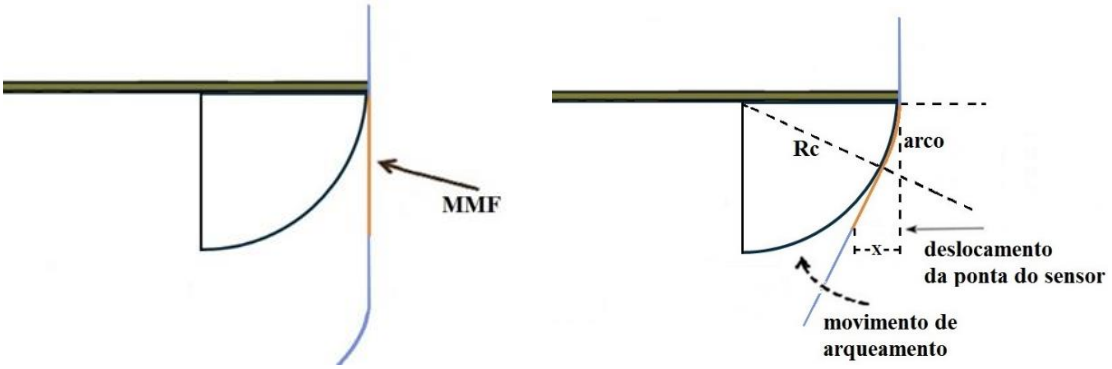
Como suporte circular foi empregada uma peça de resina confeccionada em impressora 3D, com raio de curvatura de Rc = 500 mm. A Figura 43 (a) mostra o aspecto da peça de suporte fabricada. Os degraus da peça permitem variações de 1 mm no raio de curvatura. O diagrama na Figura 43 (b) ilustra a forma de apoio do sensor no suporte com raio de curvatura fixo.



(a) (b)

Figura 43 – Sensor a fibra ótica SMS por transmissão: (a) detalhe da peça de suporte do sensor com perfil circular e raio de curvatura de 500 mm, disponível para teste; (b) diagrama do apoio do sensor na peça de suporte, de modo a acompanhar a curvatura quando fletido.

A Figura 44 mostra a formação do arco acompanhando a curvatura circular do suporte devido ao movimento do microposicionador.



(a) (b)

Figura 44 – Arco descrito pelo sensor no suporte de raio fixo: (a) sensor reto na posição vertical e (b) sensor arqueando à medida que a ponta da fibra se desloca, empurrada pelo microposicionador.

A relação entre o deslocamento da ponta do segmento MMF e o arco descrito no suporte circular, à medida que arqueia em função do deslocamento, pode ser determinada matematicamente, devido ao fato de que, durante o experimento, a fibra SMF de saída foi

mantida esticada. Nessa condição, o percurso percorrido pela ponta da fibra é um segmento de uma curva matematicamente descrita como *envolvente do círculo*, frequentemente descrita em livros que estudam parametrização de curvas (89). A envolvente do círculo é a curva descrita pela ponta da linha de um carretel quando enrolamos ou desenrolamos o carretel com a linha sempre esticada. Podemos equacionar esta curva expressando o deslocamento da ponta do sensor $\boldsymbol{x}$, em função do valor do comprimento do sensor $\mathbf{L_R}$, do raio de curvatura **Rc** e do arco $\boldsymbol{a}$ descrito pela seção do sensor que se encontra arqueada no suporte devido ao deslocamento da ponta. A Figura 45 mostra a geometria do problema.

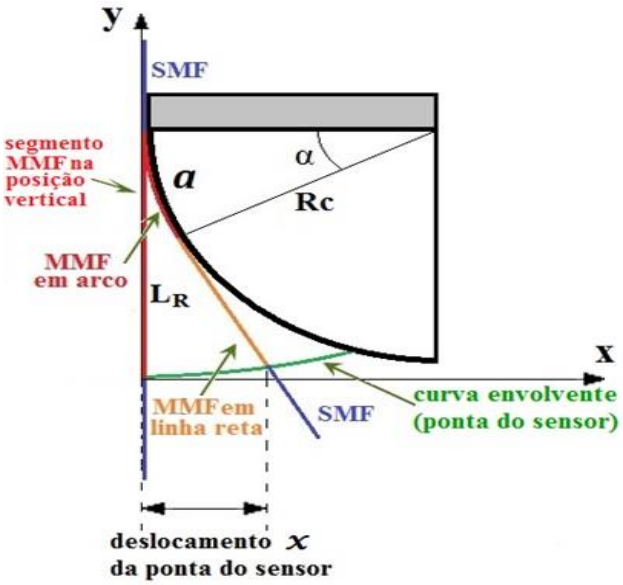


Figura 45 – Variáveis escolhidas na análise da curva envolvente produzida pelo deslocamento da ponta da fibra.

O comportamento do deslocamento da ponta do sensor em função dos parâmetros escolhidos é descrito pela expressão abaixo, onde os ângulos estão em radianos:

$$x = R_C.\left(1 - \cos\frac{a}{R_c}\right) + (L_R - a).\sin\frac{a}{R_c} \qquad (31)$$

Como não é possível explicitar o arco como função do deslocamento da ponta do sensor, foi desenvolvido um programa empregando *software* matemático comercial (Matlab) para gerar valores relacionando o arco com o deslocamento da ponta do sensor,

de modo a corresponder os valores de deslocamento usados no experimento com os valores de arco equivalentes. A Figura 46 mostra o resultado dos cálculos para os dados do experimento realizado, considerando um deslocamento de 2,5 mm na ponta do sensor como exemplo. O comprimento de arco correspondente é de 29,2 mm, ou seja, o segmento MMF arqueia 29,2 mm no suporte circular com raio de 500 mm quando a ponta do sensor desloca 2,5 mm.

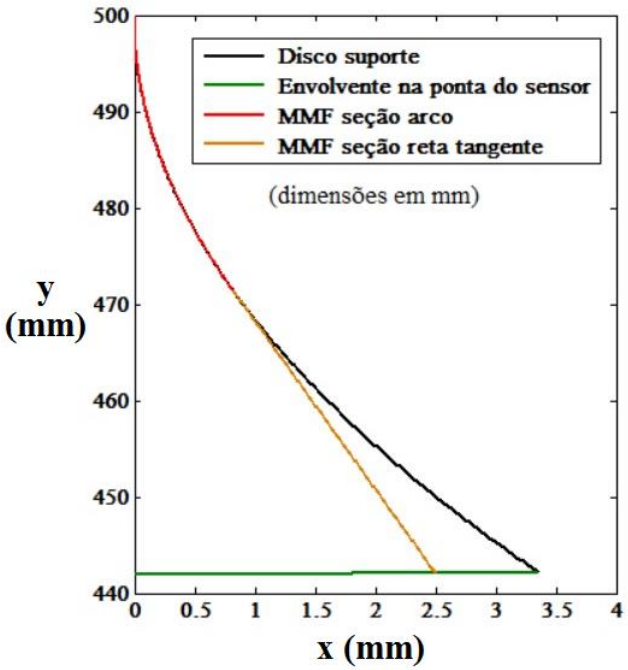


Figura 46 – Deslocamento da ponta do sensor igual a 2,5 mm empregando programação em *software* matemático comercial (Matlab). O arco correspondente, que acompanha o disco suporte, tem comprimento de 29,2 mm.

4.1.2 – Resultados e discussões

A Figura 47 mostra os resultados obtidos no experimento descrito na Figura 40 (a). Os espectros óticos representam valores de deslocamento da ponta do sensor, correspondentes a valores de arqueamento conforme a Equação 31. No experimento, o deslocamento máximo realizado na ponta do sensor é de 1,04 mm. O pico espectral com o sensor na posição vertical, sem curvatura, é de 1570,5 nm.

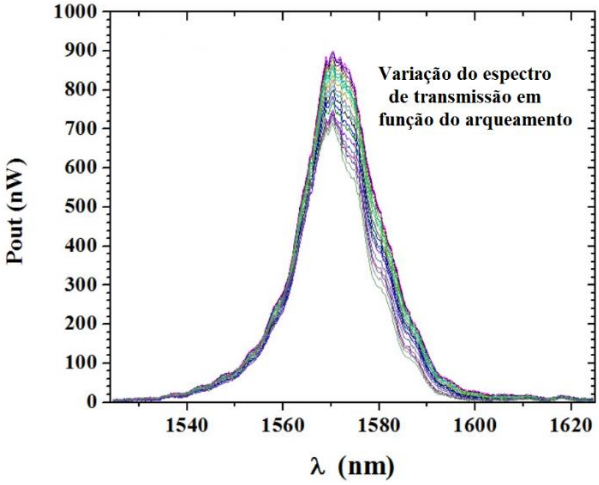
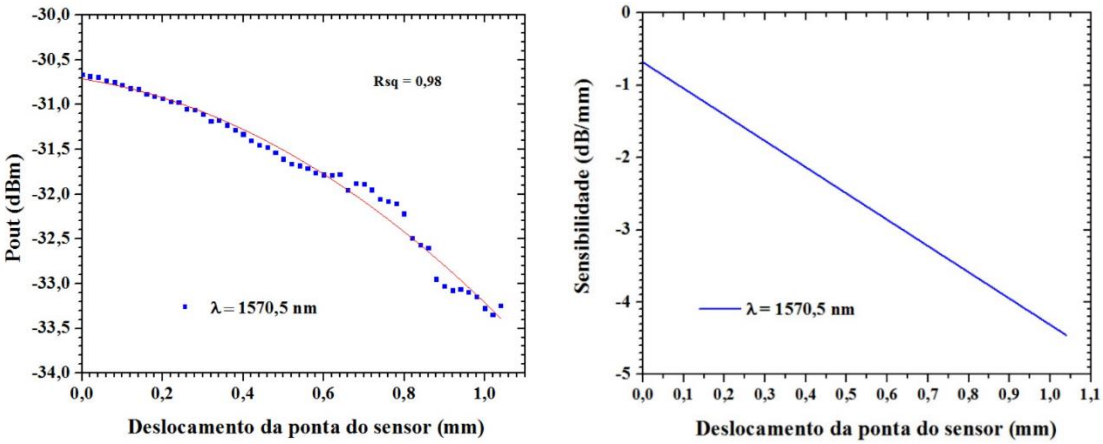


Figura 47 – Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.

A Figura 48 (a) mostra a intensidade da potência transmitida em função do deslocamento da ponta do sensor e (b) a sensibilidade do sensor em relação ao deslocamento da ponta.



(a) (b)

Figura 48 – (a) Intensidade da potência transmitida para λ = 1570,5 nm em função do deslocamento da ponta do sensor e (b) sensibilidade do sensor em relação ao deslocamento da ponta.

A Figura 49 mostra a intensidade da potência transmitida em função do comprimento de arco, calculado com a expressão matemática da curva envolvente do círculo.

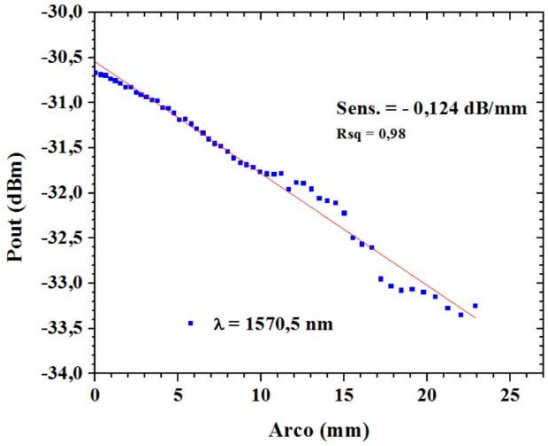


Figura 49 – Potência transmitida em função do comprimento de arco, calculada com a expressão matemática da curva envolvente do círculo.

A sensibilidade do sensor para a potência transmitida em função do deslocamento da ponta possui valor absoluto mínimo de 0,68 dB/mm, valor máximo de 4,46 dB/mm e médio de 2,57 dB/mm com resolução $0{,}39 \times 10^{-3}$ mm. Em função do arco percorrido pelo sensor no suporte de perfil circular, a sensibilidade em valor absoluto é de 0,124 dB/mm com resolução de $8{,}10 \times 10^{-3}$ mm.

Por ter imunidade à interferência eletromagnética, sensores SMS por transmissão podem ser empregados para monitorar a respiração de pacientes submetidos a exames de ressonância magnética. Uma possibilidade é embutir o sensor em uma cinta elástica, com o segmento MMF formando uma ondulação. Dessa forma o sensor irá expandir e retrair com a inspiração e expiração. Existem mantas poliméricas apoiadas em esferas que podem ser usadas com sensores SMS arqueando na curvatura das esferas, operando dessa forma como sensor de curvatura com raio fixo.

4.2 – Sensor de curvatura SMS com raio fixo, interrogado na reflexão

A estrutura SMS proposta como sensor interrogado na reflexão é composta basicamente de um segmento de fibra multimodo acoplada em uma extremidade a uma fibra monomodo, sendo a outra extremidade recoberta por uma película de ouro, atuando como espelho para a luz propagada, conforme descrito no Capítulo 3, item 3.1, e ilustrado

na Figura 30 (a). Por meio de um circulador, uma fonte banda larga alimenta a fibra monomodo e a luz propagada excita os modos guiados da MMF no ponto de acoplamento. No final do segmento MMF a luz é refletida e acoplada novamente à fibra monomodo, sendo então guiada, por intermédio do circulador, a um analisador de espectro ótico (OSA), onde é registrada a potência refletida.

4.2.1 – Configuração experimental

A Figura 50 mostra o diagrama da configuração experimental para teste. Como fonte de luz banda larga foi empregado o equipamento Thorlabs Fiber Coupled SLD 1550 nm com banda de 1450 a 1650 nm. A potência luminosa de saída foi interrogada por um analisador de espectro ótico comercial Anritsu MS9710B com resolução de potência igual a 0,001 dB e banda de 1250 a 1650 nm com resolução de 70 pm. Um microposicionador foi empregado para deslocar a ponta do sensor, a partir da posição reta vertical, em intervalos de 10 µm.

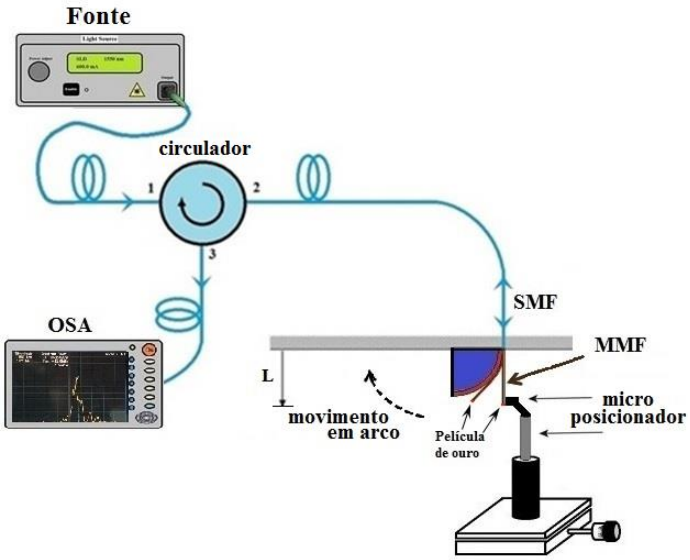
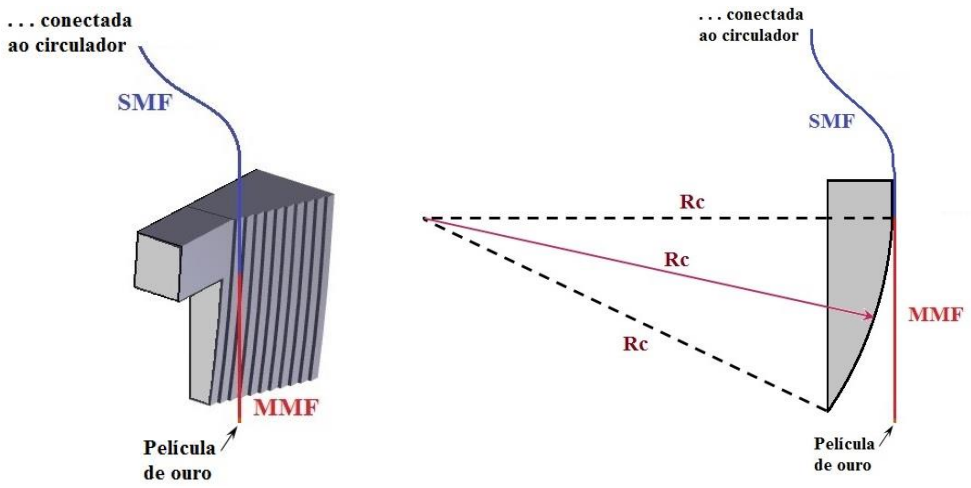


Figura 50 – Sensor a fibra ótica SMS por reflexão: Diagrama da configuração experimental para teste do sensor em bancada ótica.

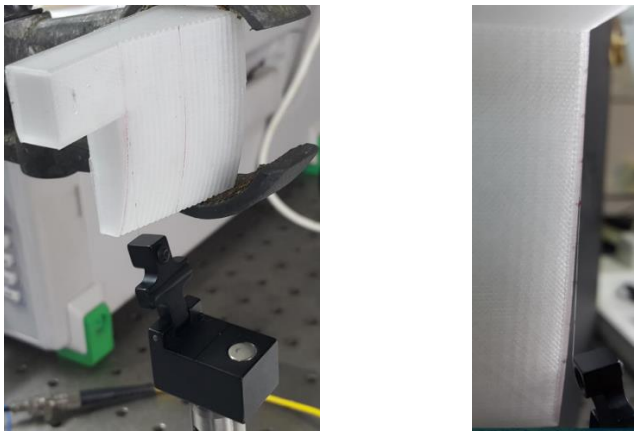
Como suporte circular foram empregadas peças de resina confeccionadas em impressora 3D, com raios de curvatura 1500 e 85 mm. A Figura 51 (a) mostra o aspecto da peça de suporte fabricada e (b) o diagrama ilustrando a forma de apoio do sensor com raio de curvatura Rc fixo.



(a) (b)

Figura 51 – Sensor a fibra ótica SMS por reflexão: (a) diagrama da peça de suporte do sensor com perfil circular e (b) diagrama do apoio do sensor na peça de suporte, de modo a acompanhar a curvatura quando fletido.

Na Figura 52, as imagens (a) e (b) mostram detalhes do suporte com perfil circular e da parte superior do microposicionador empregado para deslocar a ponta do sensor.



(a) (b)

Figura 52 – Experimento com deslocamento do sensor: (a) a parte superior do microposicionador desloca a ponta do sensor e (b) detalhe do contato com o sensor.

A relação entre o deslocamento da ponta do segmento MMF e o arco descrito pelo sensor no suporte circular à medida que arqueia em função do deslocamento deve ser determinada levando em consideração a leve curvatura que a parte não apoiada no suporte circular realiza, por efeito da flexibilidade do material da fibra, uma vez que neste caso a fibra não estará sempre esticada e, assim, a matemática da curva envolvente do círculo não pode ser empregada, como foi no caso do sensor interrogado na transmissão.

Foram realizados três experimentos empregando a configuração ilustrada na Figura 50. No primeiro empregou-se raio de curvatura de 1500 mm, com o comprimento do sensor dimensionado para a primeira reimagem. Dessa forma, o segmento MMF possui comprimento correspondente à metade do comprimento da reimagem, considerando que por operar por reflexão, a luz será propagada na metade do comprimento da reimagem na ida e metade na volta, após ser refletida na película de ouro. Com o objetivo de verificar a sensibilidade do sensor para o caso de uma excursão maior de arqueamento, no segundo experimento foi empregado um sensor de comprimento dimensionado para a segunda reimagem, ou seja, o dobro do comprimento do primeiro sensor. Dessa forma, o segmento MMF possui comprimento igual ao comprimento da reimagem considerando que por operar por reflexão, a luz será propagada no comprimento da reimagem na ida e igualmente na volta, após ser refletida na película de ouro. No terceiro, o comprimento do sensor foi dimensionado para a primeira reimagem e o raio de curvatura foi reduzido, 85 mm, de modo a testar a sensibilidade do sensor para arqueamento em curvaturas bem maiores. A Tabela 3 resume as características dos três testes.

Tabela 3 – Testes do sensor de curvatura por raio fixo. O comprimento **L** reportado corresponde ao valor experimental.

Seção MMF (ϕ = 125 μm)	Comprimento	L (mm)	Raio de Curvatura do suporte (mm)	Deslocamento máx. da ponta do sensor (mm)
Teste A	1ª Reimagem	29,5	1500	0,54
Teste B	2ª Reimagem	58,7	1500	1,16
Teste C	1ª Reimagem	29,5	85	2,16

4.2.2 – Resultados e discussões

A Figura 53 mostra os resultados obtidos no experimento descrito na Figura 50 com os dados do Teste A, mostrados na Tabela 3. Os espectros óticos representam valores de deslocamento da ponta do sensor. O pico espectral com o sensor na posição vertical, sem curvatura, é de 1591 nm.

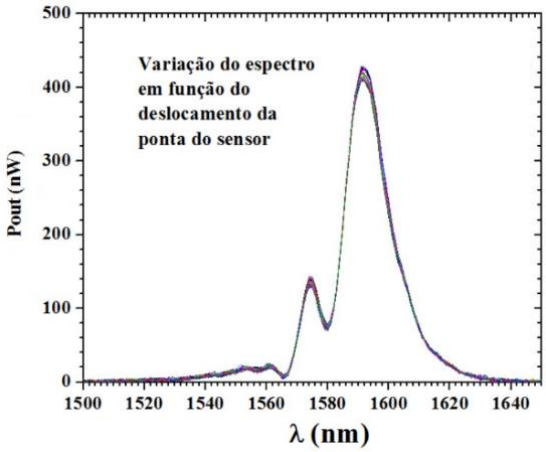


Figura 53 – Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.

A Figura 54 mostra a intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor no comprimento de onda do pico espectral. O ajuste linear está indicado pela linha contínua. O resultado mostra que existe uma relação entre a potência refletida e o arqueamento do sensor, quando o raio de curvatura possui valor fixo.

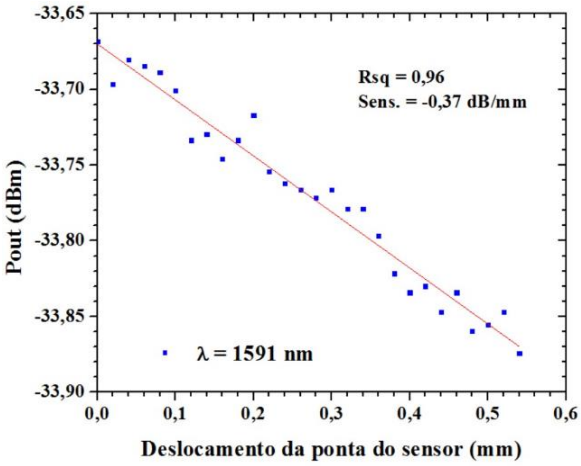


Figura 54 – Intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral.

A Figura 55 mostra os resultados obtidos no experimento descrito na Figura 50 com os dados do Teste B, mostrados na Tabela 3. Os espectros representam valores de deslocamento da ponta do sensor. O pico espectral com o sensor na posição vertical sem curvatura é de 1564 nm.

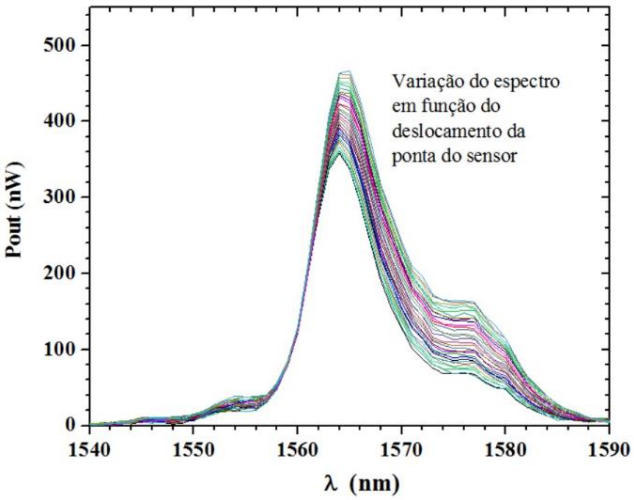


Figura 55 – Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.

A Figura 56 mostra a intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral. O ajuste linear está indicado pela linha contínua. O resultado mostra que existe uma relação entre a potência refletida e o arqueamento do sensor, quando o raio de curvatura possui valor fixo.

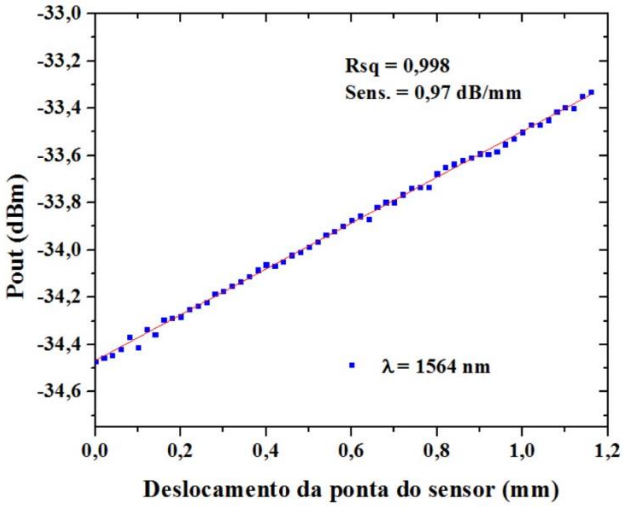


Figura 56 – Intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral.

A Figura 57 mostra os resultados obtidos no experimento descrito na Figura 50 com os dados do Teste C, mostrados na Tabela 3. Os espectros representam valores de deslocamento da ponta do sensor. O pico espectral com o sensor na posição vertical sem curvatura é de 1594 nm.

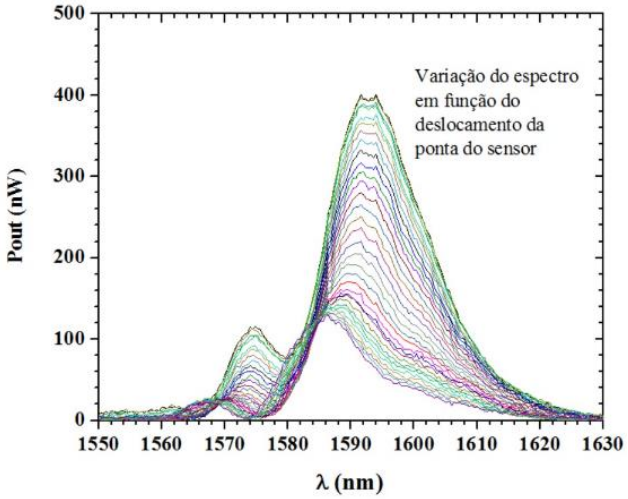


Figura 57 – Conjunto de espectros obtidos com o deslocamento da ponta do sensor em passos de 10 µm.

A Figura 58 mostra a intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral. O ajuste linear está indicado pela linha contínua. O resultado mostra que existe uma relação entre a potência refletida e o arqueamento do sensor, quando o raio de curvatura possui valor fixo.

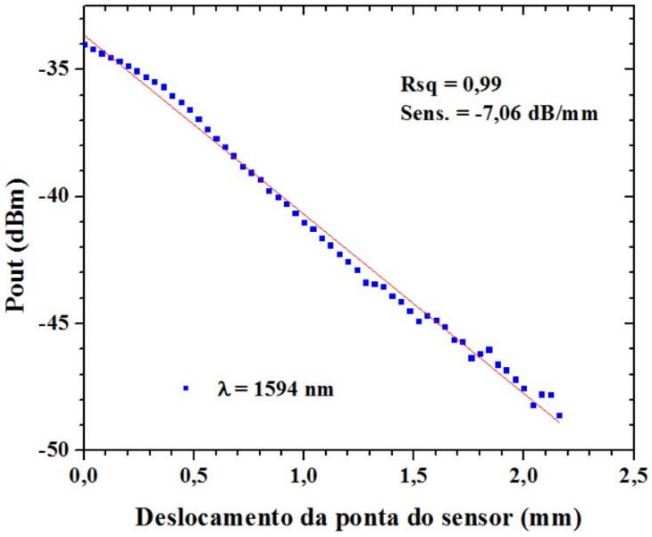


Figura 58 – Intensidade da potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor para o comprimento de onda do pico espectral.

Nos testes experimentais com raio fixo, a escolha do raio é importante para definir as características do sensor. Nos três testes a variação da potência refletida, em função do deslocamento da ponta do sensor, foi ajustada por função linear com bom coeficiente de correlação, mostrando a tendência linear dos dados. Como a potência refletida apresenta variação de inclinação quando o sensor é curvado com raio de curvatura variável, conforme descrito no Capítulo 2, é possível ocorrer variação positiva ou negativa da potência em função do arqueamento do sensor no suporte de perfil circular, dependendo do raio fixo utilizado.

Nos testes A e B o mesmo raio de curvatura foi empregado, 1500 mm, para dois sensores distintos, sendo que o sensor utilizado no teste A possui o comprimento da seção MMF na primeira reimagem (29,5 mm) e o sensor do teste B possui comprimento na segunda reimagem (58,7 mm). No caso do teste B a faixa de operação para o deslocamento da ponta do sensor é de 1,16 mm e para o sensor do teste A o deslocamento é de apenas 0,54 mm. O sensor do teste B apresentou sensibilidade de 0,97 dB/mm com resolução de $1{,}00 \times 10^{-3}$ mm, enquanto que o sensor do teste A apresentou sensibilidade de -0,37 dB/mm com resolução de $2{,}70 \times 10^{-3}$ mm. O uso da segunda reimagem proporcionou maior faixa de excursão, maior sensibilidade e melhor resolução.

No teste C o sensor possui comprimento da seção MMF na primeira reimagem (29,5 mm) e foi testado em um suporte de raio de curvatura fixo de 85 mm, resultando em uma faixa de excursão de 2,16 mm para o deslocamento da ponta do sensor e valor de sensibilidade de -7,06 dB/mm com resolução de $0{,}14 \times 10^{-3}$ mm. Este último teste apresentou melhor a resolução e os maiores valores de faixa de excursão e sensibilidade.

No teste B o sensor utilizado apresenta espectro com composição menos complexa do que o sensor utilizado nos testes A e C, que apresenta maior número de picos e vales. Uma análise de potência total para a variação do espectro em função do deslocamento da ponta do sensor foi empregada para o sensor do teste B, indicando um aumento de sensibilidade empregando esta metodologia. A Figura 59 mostra a distribuição da potência total dos espectros em função do deslocamento da ponta do sensor. Para a mesma faixa de deslocamento, a sensibilidade aumenta de 0,97 dB/mm para 1,68 dB/mm e a resolução melhora, de $2{,}70 \times 10^{-3}$ mm para $0{,}60 \times 10^{-3}$ mm.

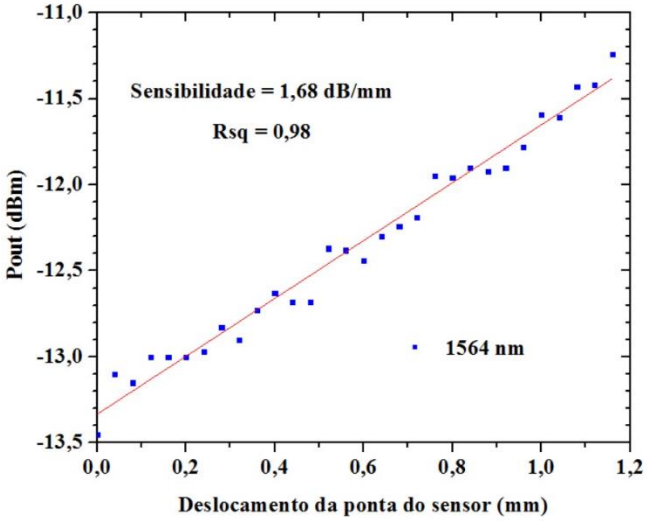


Figura 59 – Potência total nos espectros em função do deslocamento da ponta do sensor, para o sensor do teste B.

5 – Sensor de Vazão baseado em Estrutura SMS com Raio Fixo, Interrogado na Reflexão

Neste capítulo é descrito um sensor de vazão interrogado na reflexão usando raio de curvatura com valor fixo, de modo a evitar as mudanças de inclinação na resposta do sensor em determinadas faixas de variação do raio de curvatura, conforme descrito no Capítulo 2, Item 2.2.

As variações dos efeitos de interferência multimodal são produzidas pela variação do arco na curvatura escolhida. Para esta finalidade é empregado um suporte de perfil circular com raio de curvatura previamente selecionado, onde o sensor irá arquear arrastado pelo fluido em movimento. Dessa forma o dispositivo pode ser usado como sensor de vazão para escoamento de líquidos ou gases em uma tubulação. Testes experimentais em túnel de vento são utilizados para constatar o comportamento do sensor devido ao arqueamento no suporte circular. O experimento é detalhado e seus resultados apresentados e discutidos.

5.1 Configuração experimental

A estrutura SMS proposta como sensor por reflexão é composta basicamente de uma fibra SMF usada simultaneamente como entrada e saída do sinal luminoso, acoplada a um segmento de fibra MMF revestido por uma película de ouro na face da extremidade exposta ao fluxo, atuando como espelho para a luz propagada ao longo do sensor, conforme descrito no Capítulo 3, item 3.1, e detalhado na Figura 30 (a). Para os testes experimentais realizados, foram utilizados os mesmos equipamentos e mesma metodologia empregados no experimento de teste do sensor de vazão livre, realizado em túnel de vento e descrito no Capítulo 3, item 3.1, com exceção de que neste teste foi empregado um suporte de perfil circular (raio de curvatura fixo) para o arqueamento do sensor em função da velocidade do ar. Assim, o sensor é adaptado à tubulação onde escoa o fluido a ser monitorado, de modo a ficar suspenso para ser arrastado pelo escoamento e arquear sobre o suporte de perfil circular. O diagrama da configuração experimental está mostrado na Figura 60.

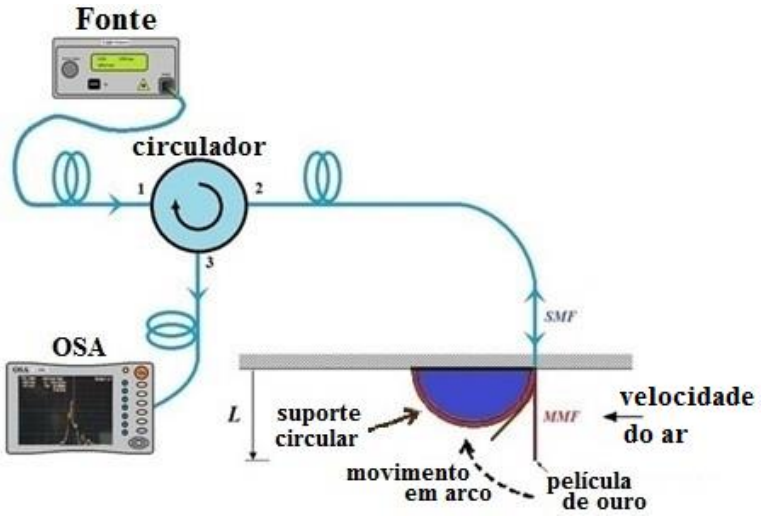


Figura 60 – Diagrama da configuração experimental para teste do sensor.

A fibra monomodo empregada na confecção do sensor é a fibra padrão Corning SMF-28 e para a multimodo foi empregada a fibra *no-core* (basicamente uma barra de sílica) com diâmetro de 70 µm. O comprimento da reimagem no segmento MMF calculado em λ = 1550 nm com a Equação 20, corresponde a Z_{Reimg} = 18,26 mm.

O sensor foi confeccionado para operar na segunda reimagem e, portanto, o segmento MMF do sensor possui comprimento igual ao da reimagem, considerando que por operar por reflexão, a luz será propagada na metade do comprimento total na ida e metade na volta, após ser refletida na película de ouro. Como suporte circular foi empregada uma peça de resina confeccionada em impressora 3D, com raio de curvatura Rc = 300 mm, permitindo deslocamento máximo da ponta do sensor, igual a 0,56 mm. A Figura 61 (a) mostra o aspecto em perspectiva da peça de suporte fabricada, (b) o diagrama ilustrando a forma de apoio do sensor com raio de curvatura Rc fixo, (c) foto do sensor apoiado no suporte e (d) foto da montagem do sensor no tubo de acrílico dentro da câmara de testes do túnel de vento. Diferentemente do que ocorreu no experimento no túnel de vento com o sensor livre, descrito no Capítulo 3, neste o sensor apresenta um limite de deslocamento devido à presença do suporte. Este detalhe limita a velocidade superior do teste, que está condicionada ao arqueamento completo do sensor no suporte, promovendo, assim, uma saturação nas medidas. Dessa forma, a escolha do valor do raio de curvatura tem grande impacto na excursão do sensor. Se por um lado, a limitação da excursão do sensor pode ser uma desvantagem, por outro lado, atua como proteção, impedindo que o sensor quebre facilmente devido à velocidade excessiva do fluido.

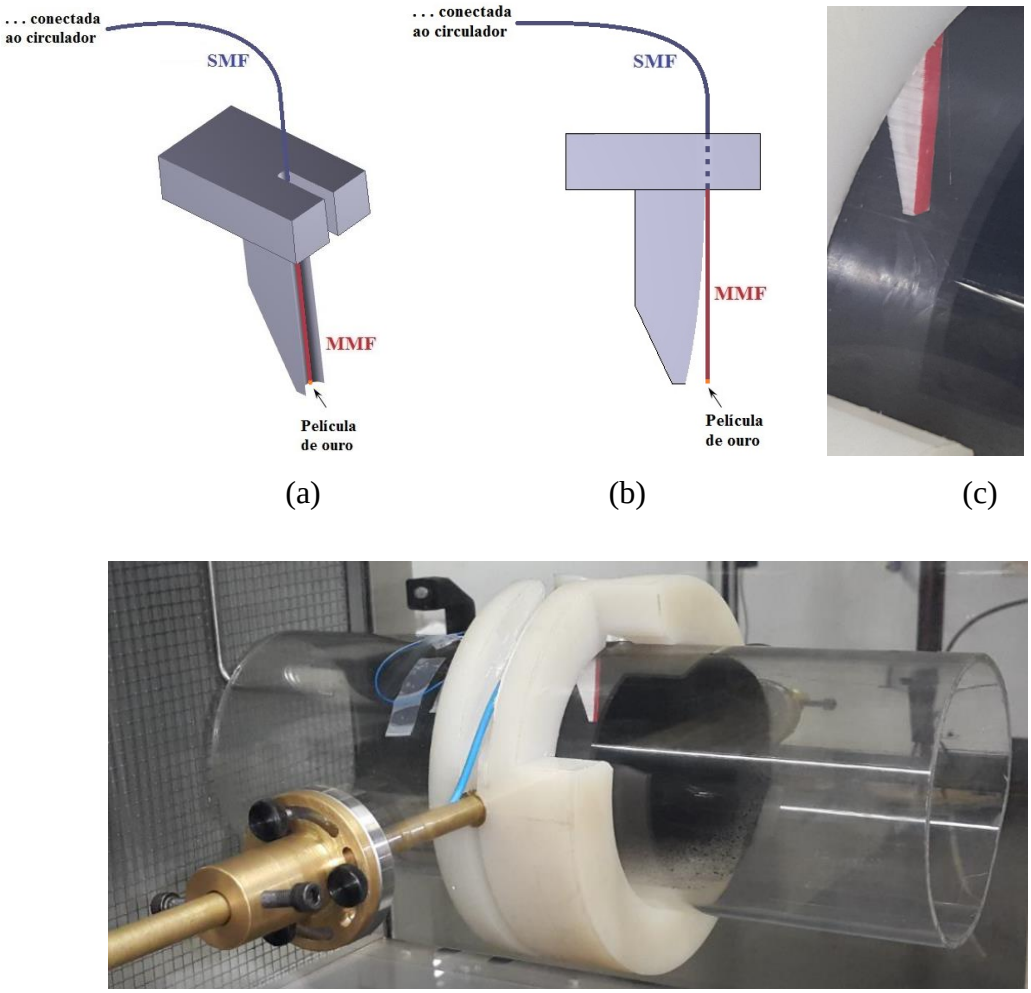


Figura 61 – Sensor de vazão a fibra ótica SMS por transmissão, empregando suporte com perfil circular e raio de curvatura Rc = 300 mm: (a) vista em perspectiva; (b) vista lateral; (c) foto do sensor apoiado no suporte e (d) foto da montagem do sensor no tubo de acrílico dentro da câmara de testes do túnel de vento.

5.2 – Resultados e discussões

A Figura 62 mostra os resultados obtidos no experimento descrito na Figura 60. Os espectros óticos representam valores da pressão diferencial medida em coluna de água, mostrados com os valores de velocidade do ar correspondentes. O experimento com o sensor sem fluxo de ar, ou seja, velocidade zero, resulta em pressão dinâmica zero.

Aumentando o fluxo de ar para o primeiro marco da escala de pressão do instrumento disponível no túnel de vento temos o valor 1 mmH_2O, que corresponde à velocidade de 4,08 m/s. Consequentemente, o experimento não proporcionou informações de medida para velocidades muito pequenas. Logo, os resultados mostrados não possuem significado para monitoração da potência refletida em função da velocidade, ou vazão, para valores de velocidade muito abaixo de 4 m/s. O limite superior de 13,54 m/s foi determinado pelo completo arqueamento do sensor no suporte de perfil circular.

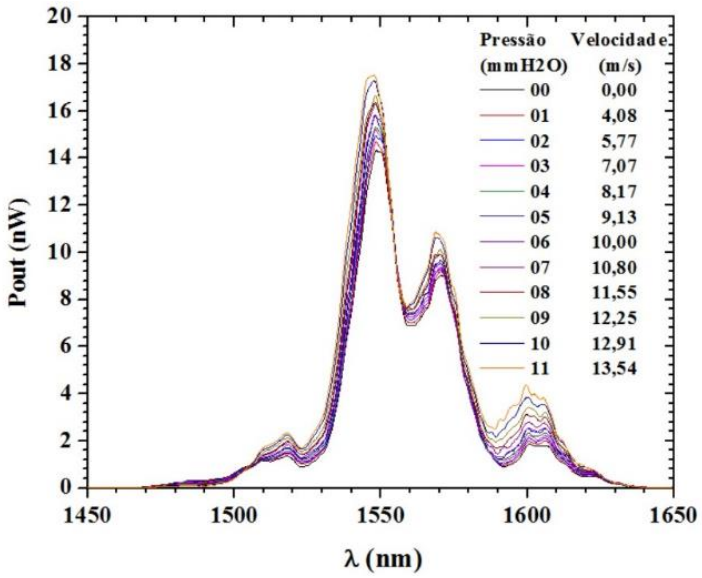
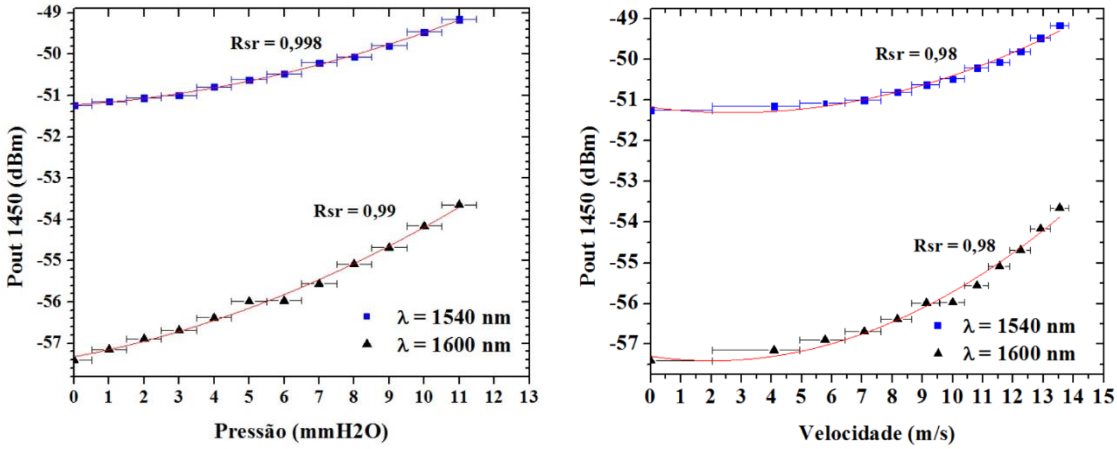


Figura 62 – Conjunto de espectros obtidos com variação da velocidade do ar.

A Figura 63 (a) mostra a potência de saída em função da pressão dinâmica monitorada, no comprimento de onda dos picos espectrais selecionados, localizados em 1540 nm, onde encontra-se o maior pico de resposta do sensor, e 1600 nm, onde foi obtida a maior sensibilidade. Ajustes polinomiais de segunda ordem são mostrados pelas linhas contínuas. A Figura 63 (b) mostra a potência de saída em função da velocidade do ar convertida pelas Equações 23, 24 e 27 e da vazão correspondente, para os mesmos picos espectrais, com ajustes polinomiais de segunda ordem mostrados pelas linhas contínuas. Os gráficos mostram que existe correlação entre a potência refletida e o arqueamento do sensor, quando o raio de curvatura possui valor fixo.



(a) (b)

Figura 63 – (a) potência de saída no comprimento de onda dos picos espectrais 1540 nm e 1600 nm em função da pressão dinâmica e (b) potência de saída em função da velocidade do ar e da vazão.

5.3 Análise de sensibilidade

A Figura 64 mostra os gráficos de sensibilidade do sensor para os picos espectrais selecionados, nos comprimentos de onda de 1540 nm e 1600 nm.

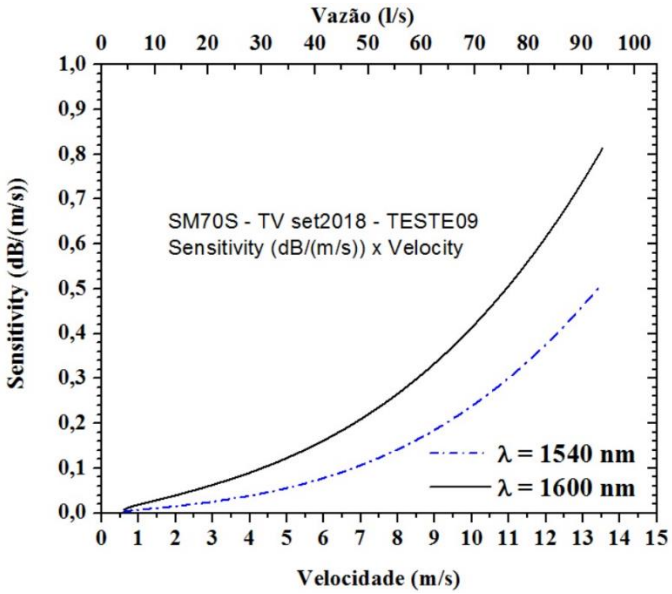


Figura 64 – Sensibilidades apresentadas pelo sensor nos comprimentos de onda selecionados.

Para a sensibilidade monitorada no comprimento de onda de 1540 nm, foi encontrado no limite inferior de 4 m/s um valor de 0,003 dB/(m/s), no limite superior de 13,54 m/s um valor máximo de 0,51 dB/(m/s) e em toda a faixa de medida, um valor médio de 0,23 dB/(m/s), com resolução de $43{,}48 \times 10^{-3}$ m/s. Para a sensibilidade monitorada no comprimento de onda de 1600 nm, foi encontrado no limite inferior de 4 m/s um valor de 0,008 dB/(m/s), no limite superior de 13,54 m/s um valor máximo de 0,81 dB/(m/s) e em toda a faixa de medida, um valor médio de 0,39 dB/(m/s), com resolução de $25{,}64 \times 10^{-3}$ m/s. Como o segmento MMF do sensor experimentado possui diâmetro de 70 µm e é arqueado pelo vento em um suporte de 300 mm de raio de curvatura, é esperada baixa sensibilidade, em comparação com sensores que empregam MMF com núcleo de diâmetro de 105 ou 125 µm. A MMF de menor diâmetro possui um número menor de modos guiados excitados com eficiência significante de acoplamento de potência e os modos excitados são de menor ordem, ou seja, mais internos. O suporte de raio 300 mm não permite arqueamento acentuado e, assim, os modos mais internos (menor ordem) pouco influem na sensibilidade do sensor. Outra decorrência deste comportamento é que o sensor apresenta baixa sensibilidade em velocidades baixas, onde o arqueamento ainda é pouco pronunciado.

6 – Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho foram propostos sensores de curvatura com aplicação como sensor de vazão/anemômetro com base na interferência multimodal empregando estrutura SMS. O dispositivo pesquisado (sensor SMS todo em fibra) apresenta vantagem de ser simples, de fabricação fácil e de baixo custo.

A análise conceitual revelou que no acoplamento da fibra monomodo de entrada com o segmento de fibra multimodo, a energia transferida não contempla significantemente todos os modos da MMF e não é distribuída uniformemente entre os modos acoplados, sendo que a maior parte da energia transmitida para o segmento MMF é transportada pelos modos de ordem mais baixa.

A análise da propagação nos modos da MMF leva à conclusão de que é formada uma reimagem em determinado comprimento de onda e distância do ponto de acoplamento. Existem *softwares* comerciais para realizar simulação numérica do acoplamento SMF-MMF, da propagação do campo e do perfil da potência ao longo do eixo de propagação, mas são muito dispendiosos. Rotinas em Matlab foram escritas para realizar este tipo de análise a baixo custo, visto que essa ferramenta matemática é bastante difundida no meio acadêmico.

Ao todo, três rotinas foram desenvolvidas em Matlab:

1) Cálculo da eficiência do acoplamento na conexão SMF-MMF. O programa apresenta a distribuição percentual de potência transferida, por modo guiado, revelando quais foram os modos excitados e a eficiência do acoplamento por modo. Permite também o cálculo de parâmetros significativos na propagação nos modos guiados, por modo, como o coeficiente de acoplamento do campo, a constante de propagação longitudinal e o índice efetivo.

2) Cálculo da potência e do campo ao longo do eixo de propagação na MMF levando em consideração o número de modos guiados selecionados. O programa mostra a potência ao longo do eixo de propagação, revelando a formação da reimagem. A localização da reimagem foi obtida com grande concordância com a expressão analítica.

3) Determinação do arco descrito pela parte do sensor que fica curvada sobre o suporte, devido ao deslocamento da ponta, para o caso do sensor de curvatura por transmissão apoiado em um suporte de perfil circular (raio fixo).

O estudo das propriedades da interferência multimodal quando o segmento multimodo é submetido à curvatura, mostra que, ao contrário do que se pode esperar, a potência de saída não diminui continuamente com o aumento da curvatura. Nas fibras multimodo o campo nos modos de menor ordem se desloca no sentido oposto ao centro de curvatura, mas sua distribuição passa a ser mais estreita à medida que a curvatura aumenta. Este efeito pode provocar um aumento de potência de saída com o aumento da curvatura, em determinadas faixas de variação, devido à redução das perdas por curvatura. Como possuem distribuição de potência mais interna, os modos de menor ordem contribuem menos com as perdas no início da curvatura. É particularmente importante neste efeito, o fato de que os modos de menor ordem transportam a maior parte da energia acoplada. Embora o índice efetivo em cada modo aumente com a curvatura, o aumento não é igual, pois os modos de menor ordem sofrem variação maior no índice efetivo. Dessa forma as relações de fase não são igualmente afetadas entre os diversos modos. Logo, as interferências construtivas e destrutivas entre os modos produzem efeitos mais complexos do que uma simples superposição de curvatura por modo. Assim, não se pode esperar comportamento contínuo de redução da potência transmitida, em função do aumento contínuo da curvatura. Testes experimentais e simulação numérica comprovam este efeito.

O desempenho da estrutura SMS como sensor de curvatura pode ser insatisfatório caso o sensor esteja submetido a uma ampla faixa de variação de curvatura ou opere nos pontos de inversão, uma vez que a relação entre a potência de saída e a curvatura apresenta sucessivas inversões de inclinação. Outra questão a ser considerada é que em muitas aplicações é preciso saber, a partir do ponto de operação, se a grandeza monitorada aumenta ou diminui com a curvatura, e isso depende da localização do ponto de operação. Para reduzir a possibilidade de operação nestas faixas de inversão, é proposto o sensoriamento por arqueamento do sensor em um suporte de perfil circular, de modo a arquear com raio de curvatura fixo. Os efeitos de interferência multimodal ocorrem por arqueamento e as características do sensor dependem das dimensões do sensor e da escolha do raio de curvatura a ser empregado.

Outro aspecto importante para os testes experimentais é que a fabricação de sensores pelo método manual impõe limites à reprodução das características, sendo difícil fabricar dois sensores que possuam composição modal idêntica, ainda que com mesmas dimensões nominais. Os processos de clivagem manual e as técnicas usadas para realizar emendas não garantem a fabricação de dois sensores com características iguais. Isto pode ser minimizado com o uso de ferramentas automatizadas.

No capítulo 3 é reportado o experimento de um **sensor de vazão livre**, onde um sensor SMS com MMF de diâmetros 105/125 µm foi testado em um túnel de vento, interrogado na reflexão, sendo livre para curvar por ação do escoamento do vento, alterando os padrões de interferência como mostram os espectros obtidos. Este mesmo sensor, se instalado para flexionar livremente com o vento, pode ser empregado como anemômetro. Uma faixa dinâmica de 4 a 10 m/s foi considerada, por imprecisão dos instrumentos do túnel de vento em baixa velocidade e por saturação da resposta do sensor no limite superior. Como o fluxo é aproximadamente laminar, com perfil uniforme de velocidade, foi possível relacionar a velocidade medida com a vazão no tubo onde estava alojado o sensor. O método de análise por deslocamento do pico espectral revelou um valor de sensibilidade de 381,33 pm/(m/s) com resolução de 23,00 x 10^{-3} m/s. A potência de saída em comprimento de onda fixo de 1550 nm, revelou sensibilidade de 0,89 dB/(m/s) com resolução de 10,20 x 10^{-3} m/s. O monitoramento de um vale (V1) no comprimento de onda igual a 1576 nm, revelou sensibilidade de 1,14 dB/(m/s) com resolução reportada de 8,77 x 10^{-3} m/s. Caso a monitoração da potência de saída seja realizada numa combinação de soma de potência em dB, de um pico (P2) com um vale (V1), a sensibilidade é de 2,03 dB/(m/s) com resolução de 4,93 x 10^{-3} m/s. Esta alternativa permite obter maior sensibilidade e melhor resolução, mas exige uma técnica de interrogação mais complexa. Em todos os métodos de análise, os gráficos de deslocamento do pico espectral e de potência de saída revelam tendência à inversão de inclinação da resposta, no final da faixa de velocidades, como é de se esperar para curvatura com raio variável. O sensor, quando comparado com outros reportados na literatura, apresentou vantagens em faixa, sensibilidade e resolução.

No capítulo 4, onde um experimento em **transmissão por raio fixo** foi realizado, um sensor SMS com segmento MMF de comprimento 57,46 mm e diâmetro de 125 µm foi interrogado em potência, sendo empregado um suporte de perfil circular com raio de

curvatura fixo de 500 mm. O experimento foi realizado em bancada ótica com deslocamento da ponta do sensor por um microposicionador. Em faixa de 0 a 1,04 mm de deslocamento da ponta do sensor (0 a 23 mm de arqueamento), o sensor apresenta sensibilidade de -0,124 dB/mm de arqueamento com resolução de 8,10 x 10^{-3} m/s. Reportando a potência como função do deslocamento da ponta do sensor, a sensibilidade média é -2,57 dB/mm com resolução de 0,39 x 10^{-3} mm.

No capítulo 4, outro experimento é apresentado, agora na **reflexão com raio fixo**. Neste caso, foram empregados sensores usando segmento MMF com diâmetro de 125 µm (*no-core*) e interrogado em potência. Três testes foram realizados. No primeiro teste (**Teste A**) o comprimento do sensor foi estabelecido na primeira reimagem, usando um suporte de perfil circular com raio de curvatura fixo de 1500 mm. Para uma faixa de 0 a 0,54 mm de deslocamento da ponta do sensor, a resposta foi aproximadamente linear, apresentando uma sensibilidade de -0,37 dB/mm de deslocamento da ponta do sensor, com resolução de 2,70 x 10^{-3} mm.

No segundo teste (**Teste B**) o comprimento do sensor foi estabelecido na segunda reimagem (o dobro do comprimento do sensor do primeiro teste), com objetivo de permitir maior excursão da ponta do sensor e arqueamento no suporte. O mesmo suporte de 1500 mm de raio de curvatura foi empregado. A resposta foi aproximadamente linear, apresentando sensibilidade de 0,97 dB/mm em uma faixa de 0 a 1,16 mm de deslocamento da ponta do sensor com resolução de 1,00 x 10^{-3} mm.

No terceiro teste (**Teste C**) o comprimento do sensor foi estabelecido na primeira reimagem com suporte de 85 mm de raio de curvatura. O objetivo foi permitir maior excursão da ponta do sensor e arqueamento no suporte. A resposta foi aproximadamente linear, apresentando sensibilidade de -7,06 dB/mm em uma faixa de 0 a 2,16 mm de deslocamento da ponta do sensor, com resolução de 0,14 x 10^{-3} mm.

No capítulo 5, no experimento com **sensor de vazão com raio fixo**, um sensor SMS com o segmento MMF com diâmetro de 70 µm e comprimento na segunda reimagem foi testado em um túnel de vento, interrogado na reflexão. O experimento empregou um suporte de perfil circular com raio de curvatura de 300 mm, sendo o arqueamento no suporte por ação do escoamento do ar. Uma faixa dinâmica de 4 a 13,54 m/s foi considerada, por imprecisão dos instrumentos do túnel de vento em baixa velocidade. A monitoração da potência de saída empregando comprimentos de onda fixos

com valores de 1540 e 1600 nm, revelou sensibilidades de 0,23 e 0,39 dB/(m/s), e resoluções de 43,48 x 10^{-3} m/s e 25,64 x 10^{-3} m/s, respectivamente.

O experimento com o **sensor de vazão livre**, apresentou saturação nas medidas a partir de 10 m/s. O experimento com o **sensor de vazão com raio fixo**, também realizado no túnel de vento, com uso de suporte com raio de curvatura fixo de 300 mm, apresentou maior faixa, até 13,45 m/s, embora tenha apresentado menor sensibilidade. O compromisso entre faixa e sensibilidade depende das dimensões do sensor e do raio de curvatura escolhido para o suporte de raio fixo. Neste caso, dois fatores aumentam a excursão da ponta do sensor, o comprimento do segmento MMF e o valor do raio de curvatura fixo. Sensores maiores, na segunda reimagem por exemplo, arqueando em suportes com raios de curvatura menores possuem capacidade maior de excursão, apresentando maior faixa de medida e maior sensibilidade.

Em fibras MMF de menor diâmetro, como a de 70 µm empregada no experimento com o **sensor de vazão com raio fixo**, poucos modos são excitados e a energia é transportada por poucos modos de baixa ordem. Neste caso a sensibilidade é muito baixa no início da curvatura como acontece com o experimento de raio fixo de 300 mm, uma vez que a excursão do sensor é limitada pelo suporte e a sensibilidade é baixa.

No experimento em **reflexão por raio fixo**, o maior comprimento do sensor no **Teste B** (segunda reimagem e raio de curvatura fixo de 1500 mm), em comparação com o **Teste A** (primeira reimagem e raio de curvatura fixo de 1500 mm) permitiu maior faixa de variação no deslocamento da ponta do sensor e também maior sensibilidade. No **Teste C** (primeira reimagem, raio de curvatura fixo de 85 mm) a combinação escolhida permitiu maior excursão no deslocamento da ponta do sensor e a maior sensibilidade.

No experimento por **transmissão com raio fixo**, com interrogação na transmissão (primeira reimagem e raio de 500 mm), a excursão da ponta do sensor é bem maior do que o permitido com raio de 1500 mm usado no **Teste A** e de mesma ordem de grandeza do **Teste B**. A sensibilidade resultante foi maior do que as obtidas nos **Testes A e B**. Os testes realizados empregando raio de curvatura fixo apresentaram maior tendência à linearidade na resposta em comparação com o teste do sensor livre, no primeiro experimento.

O sensor atuando livre é frágil e pode ser arrastado pela corrente do fluído, a menos que se seja empregada alguma forma de proteção. Com o uso do suporte com raio

fixo, a excursão do sensor é limitada pelo completo arqueamento no suporte, impondo um limite superior de velocidade, mas que atua como proteção para o sensor. Em ambos os casos, quando o sensor é usado para sensoriamento de vazão em tubulações, a perda de carga é desprezível se comparada com os sensores mecânicos tradicionais.

Em todos os experimentos fica evidente a existência de correlação entre a potência de saída do sensor e a variável controlada, tanto para raio de curvatura variável quanto para raio de curvatura fixo.

6.1 – Sugestões de trabalhos futuros

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

Realizar estudo mais detalhado da influência dos modos individualmente e combinados, no comportamento dos sensores em função da variação da curvatura, de modo a justificar analiticamente as inversões de inclinação na resposta à curvatura.

Estudar o efeito da variação do arco na interferência multimodal, onde o sensor por raio de curvatura fixo se acomoda quando arrastado pelo fluido ou outro agente mecânico. Os estudos de sensores de curvatura geralmente fazem referência apenas à resposta do dispositivo em função da variação do raio de curvatura.

Estudar a variação de sensibilidade, faixa de operação e resolução dos sensores de curvatura por raio fixo, em função de vários parâmetros como o diâmetro da fibra MMF, seu comprimento e o raio de curvatura fixo selecionado. Os resultados dos experimentos realizados neste trabalho evidenciam a influência destes fatores nas características finais dos sensores.

Estudar o comportamento dos sensores de curvatura interrogados na reflexão e empregados como sensor de vazão em túnel de vento, para baixas velocidades do deslocamento do ar. O equipamento utilizado permite leitura de pressão em coluna de água usando unidades de milímetro. A primeira marcação corresponde a uma velocidade do vento de 4,08 m/s, não havendo possibilidade de controle de velocidade para pequenos

valores. Existem várias aplicações importantes para vazão em baixa velocidade como em dosagem de líquidos e injeção química, por exemplo.

Estudar possíveis aplicações para o sensor SMS de curvatura por transmissão, como em monitoramento respiratório onde o sensor pode ser embutido em um tecido elástico, permitindo o aumento e diminuição da curvatura durante a inspiração e expiração. A disposição do segmento MMF poderia ter forma ondulada, permitindo aumentar e reduzir a extensão do sensor devido aos movimentos da respiração. O tecido pode ter a forma de uma cinta a ser vestida pela pessoa a ser monitorada. O mesmo conceito é aplicável para estruturas onde o sensor pode ser embutido em uma manta ou placa, para aplicação em superfícies ou linhas de sensoriamento. Como a fibra ótica é imune a interferência eletromagnética, é possível usar este tipo de sensor para monitorar pessoas em exame no interior de aparelhos de ressonância magnética.

Estudar a influência da variação do arco por raio de curvatura fixo nas características de sensoriamento, em outras estruturas como SMSMS, SMS com *taper* e outras.

Estudar métodos de fabricação de sensores com finalidade de diminuir as variações das características na reprodução de sensores pelo método manual. As características dos sensores que operam por interferência multimodal são muito sensíveis a diferentes composições modais, o que ocorre quando os sensores são reproduzidos por fabricação manual.

Estudar influências da vibração, temperatura e pressão, entre outras, nas características dos sensores de arqueamento por raio de curvatura fixo. O emprego de sensor por raio fixo pode ocorrer em situações de tais influências, e o impacto destas variáveis na resposta final do sensor poderia ser avaliado em análise numérica e testes experimentais.

Fazer caracterização dos sensores SMS para uso como dispositivos sensores práticos para aplicações industriais, realizando testes de repetitividade, histerese, exatidão, entre outros.

6.2 – Artigos Associados à Pesquisa

1 – Jesse W. Costa, Marcos A.R. Franco, Valdir A. Serrão, Cristiano M.B. Cordeiro, Maria T.R. Giraldi, **Macrobending SMS fiber-optic anemometer and flow sensor**, Optical Fiber Technology, v. 52, 1068-5200, Julho, 2019.

2 – Jesse Werner Costa, Marcos Antônio Ruggieri Franco and Maria Thereza Rocco Giraldi, **Macrobending SMS fiber-optic arc sensor using fixed curvature radius**, Aceito e apresentado no Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors 2019 - LAWOFS 2019.

3 – Jesse Werner Costa, Marcos Antônio Ruggieri Franco and Maria Thereza Rocco Giraldi, **Macrobending SMS fiber-optic flow sensor using fixed curvature radius.** A ser submetido ao IEEE Sensors Journal.

Referências

(1) KROHN, D; MacDOUGALL, T.; MENDEZ, A. **Fiber Optic Sensors – Fundamentals and Applications**. USA: SPIE PRESS; 2014. p. 21-24.

(2) SANTOS, J. L. e FARAHI, F. **Handbook of Optical Sensors**. Boca Raton, FL – EUA, Ed. CRC Press, 2015.

(3) YIN, S.; RUFFIN, P. B. e YU, F. T. S. **Fiber Optic Sensors**. 2 ed. Boca Raton, FL – EUA, Ed. CRC Press, 2008.

(4) EL-PRO-CUS. **Introduction to Fiber Optic Sensors and their Types with Applications**. Disponível em: <https://www.elprocus.com/diffrent-types-of-fiber-optic-sensors/>. Acesso em: 10 set. 2019.

(5) ADKOLI, V. A. In: ELECTRONICS FORU. **Optical Fibre Sensors Shaping The New Age of Connectivity**. Disponível em: <https://electronicsforu.com/technology-trends/tech-focus/optical-fibre-sensors-connectivity>. Acesso em: 10 set. 2019.

(6) SANTOS, A. B. **Dispositivos baseados no preenchimento de fibras de cristal fotônico por líquidos e materiais nanoestruturados**. Tese de doutoramento. São Carlos – SP: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2012.

(7) FERNANDES, C. S. **Desenvolvimento de Sensores Baseados em Fibra Óptica para Monitoramento Estrutural**. Tese de Doutoramento. Belém, PA: UFPA, 2016.

(8) LEE, B. H.; KIM, Y. H.; PARK, K. S.; EOM, J. B.; KIM, M. J.; RHO, B. S. e CHOI, H. Y. Interferometric Fiber Optic Sensors. **Sensors**, v. 12, p. 2467-2486, 2012.

(9) S. YADAV. **Sbs Based Slow-Light Generation in Photonic Crystal Fiber**. Disponível em: <http://dspace.dtu.ac.in:8080/jspui/bitstream/repository/15120/1/Thesis_Sandeep_SBS_Based_Slow_Light.pdf>. Acesso em: 10 set. 2019.

(10) WANG, Q.; FARRELL, G. E YAN, W. Investigation on Single-Mode–Multimode–Single-Mode Fiber Structure. **Journal of Lightwave Technology**, v. 26, n. 5, p. 512-519, 2008.

(11) PACHON, E. G. P. **Dispositivos em fibras ópticas baseados em interferência multimodal**. Dissertação de mestrado. Campinas, SP: Unicamp, 2013.

(12) MARCUSE, D. Field deformation and loss caused by curvature of optical fiber. **Journal of Optical Society of America**, New Jersey USA, v. 66, n. 4, p. 311-320, 1976.

(13) HEILBLUM, M.; HARRIS, J. H. Analysis of Curved Optical Waveguides by Conformal Transformation. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 11, n. 2, p. 75-83, 1975.

(14) MARCUSE, D. Curvature loss formula for optical fibers. **Journal of the Optical Society of America**, v. 66, n. 3, p. 216-220, 1976.

(15) SCHERMER, R. T.; COLE, J. Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 43, n. 10, p. 899-909, 2007.

(16) LAGASSE, P. E.; BAETS, R. Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides. **Journal of Optical Society of America**, v. 73, n. 2, p. 177-182, 1983.

(17) FERNANDES, C.S.; GIRALDY, M. T. M. R.; SOUZA, M. J.; COSTA, J. C. W. A.; GOUVEIA, C.; JORGE, P. Curvature and vibration sensing based on core diameter mismatch structures. **IEEE Transactions On Instrumentation and Measurements**, v. 65, n. 9, p. 2120-2128, 2016.

(18) SILVA, R. M.; FERREIRA, M. S.; KOBELKE, J.; SCHUSTER, K.; FRAZÃO, O. Simultaneous measurement of curvature and strain using a suspended multicore fiber. **Optics Letters, Optical Society of America**, v. 36, n. 19, p. 3939-3941, 2011.

(19) SOTO, J.G.A.; LOPEZ, J., E., A.; MONDRAGON, J., J., S.; ARRIOJA3, D., A., M. Fiber Optic Temperature Sensor Based on Multimode Interference Effects. **Journal of Physics: Conference Séries**, v. 274, n. 1, p. 1-4, 2011.

(20) HATTA, A. M.; SEMENOVA, Y.; RAJAN, G.; WANGA, P.; ZHENG, J.; FARRELL, G. Analysis of temperature dependence for a ratiometric wavelength measurement system using SMS fiber structure based edge filters. **Elsevier Optics Communications Journal**, v. 283, n. 7, p. 1291-1295, 2010.

(21) 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. 1119-1121, 2006.

(22) A.; MONDRAGON, J., J., S.; ARRIOJA, D., A., M.; FUENTES, M. A.; SEPULVEDA, J. R. G.; CISNEROS, M. T. Highly Sensitive Liquid Core Temperature Sensor Based on Multimode Interference Effects. **Sensors**, v. 15, n. 10, p. 26929-26939, 2015.

(23) HU, P.; CHEN, Z.; YANG, M.; YANG, J.; ZHONG, C. Highly sensitive liquid-sealed multimode fiber interferometric temperature sensor. **Sensors and Actuators A Physical**, v. 223, p. 114-118, 2015.

(24) SILVA, S.; PACHON, E. G. P.; FRANCO, M. A. R.; HAYASHI, J. G.; MALCATA, F. X.; FRAZÃO, O.; JORGE, P.; CORDEIRO, C. M. B. Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference. **Optical Society of America Applied Optics**, v. 51, n. 16, p. 3236-3234, 2012.

(25) WANG, Q.; FARRELL, G. All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design. **Optics Letters**, v. 31, n. 3, p. 317-319, 2006.

(26) ZHOU, X.; CHEN, K; MAO, X; PENG, W; YU, Q. A reflective fiber-optic refractive índex sensor based on multimode interference in a coreless silica fiber. **Elsevier Optics Communications**, v. 340, p. 50–55, 2015.

(27) WU, Q.; SEMENOVA, Y.; WANG, P.; FARRELL, G. High Sensitivity SMS Fiber Structure Based SensoreRefractometer – Analysis and Experiment. **Optics Express**, v. 19, n. 9, p. 7937-7944, 2011.

(28) GAO, R. X.; LIU, W. J.; WANG, Y. Y.; WANG, Q.; ZHAO, F.; QU, S.L. Design and fabrication of SMS fiber refractometer for liquid R.X. **Elsevier Sensors and Actuators A: Physical**, v. 179, p. 5-9, 2012.

(29) DING, M.; WANG, P.; WANG, J.; BRAMBILLA, G. FIB-Milled Gold-Coated Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Tip Refractometer. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 26, n. 3, p. 239-241, 2014.

(30) ZHAO Y.; B, CAI, L.; LI, X.; MENG, F.; ZHAO Z. Investigation of the high sensitivity RI sensor based on SMS fiber structure. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 205, p. 186-190, 2014.

(31) PACHON, E. G. P.; FRANCO, M. A. R.; CORDEIRO, C. M. B. Spectral bandwidth analysis of high sensitivity refractive index sensor based on multimode interference fiber device. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 22., 2012, Beijing, China. **Anais**, 2012, v. 8421, p. 1-4.

(32) HMOOD, J. K. Novel optical fiber sensor based on SGMS fiber structure for measuring refractive index of liquids and gases. **Iraqi Journal Of Applied Physics**, v. 7, n. 4, p. 17-21, 2011.

(33) BIAZOLI, C. R.; SILVA, S.; FRANCO, M. A. R.; FRAZÃO, O.; CORDEIRO, C. M. B. Multimode interference tapered fiber refractive index sensors. **Applied Optics**, v. 51, n. 24, p. 5941-5945, 2012.

(34) CRUZ, A. L. S.; MIGLIANO, A. C. C.; FRANCO, M. A. R. Refractive index sensor based on terahertz multimode interference fiber device, In: EUROPEAN WORKSHOP ON OPTICAL FIBRE SENSORS, 5., 2013, Krakow-Polônia. **Anais**, SPIE, 2013, v. 8794, p. 1-4.

(35) CHEN, Y.; WANG, Y.; CHEN, T.; YANG, W.; LIU, H.; LIU, T.; HAN, Q. A Hybrid Multimode Interference Structure-Based Refractive Index and Temperature Fiber Sensor. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 2,p. 331-335, 2016.

(36) LUO, H.; SUN, Q.; XU, Z.; LIU, D.; ZHANG, L. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using multimode microfiber-based dual Mach–Zehnder interferometer. **Optics Letters**, v. 39, n. 13, p. 4049-4052, 2014.

(37) SILVA S.; PACHON, E.; FRANCO, M. A. R.; SANTOS, P. J. J. L.; MALCATA, F. X.; CORDEIRO, C. M. B.; FRAZÃO, O. Curvature and Temperature Discrimination

Using Multimode Interference Fiber Optic Structures—A Proof of Concept, **IEEE - Journal Of Lightwave Technology**, v. 30, n. 23, p. 3569-3575, 2012.

(38) OLIVEIRA, R.; ARISTILDE, S.; OSÓRIO, J. H.; FRANCO, M. A. R.; BILRO, L.; NOGUEIRA, R. N.; CORDEIRO, C. M. B. Intensity liquid level sensor based on multimode interference and fiber Bragg grating, **Measurement Science and Technology**, v. 27, n.12, p. 1-6, 2016.

(39) BATTISTA, L.; SCIUTO, S. A.; SCORZA, A. Preliminary evaluation of a fiber-optic sensor for flow measurements in pulmonary ventilators. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MEDICAL MEASUREMENTS AND APPLICATIONS, maio 2011, Bari Italia, **Anais**, p. 29-34.

(40) SCHENA, E.; SACCOMANDI, P.; SILVESTRIA, S. A high sensitivity fiber optic macro-bend based gas flow rate transducer for low flow rates: Theory, working principle, and static calibration. **Review of Scientific Instruments**, v. 84, n. 2, p. 4301-4307, 2013.

(41) VIJAYAN, A.; THAKARE, V.; KAREKAR, R. N.; AIYER, R.C. Optical fiber-based macrobend free air flow sensor using a hinge joint: A preliminary report. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 50, n. 10, p. 2543-2546, 2008.

(42) LIEN, V.; VOLLMER, F. Microfluidic flow rate detection based on integrated optical fiber cantilever. **Lab on a Chip**, v. 7, n. 10, p. 1352-1356, 2007.

(43) PENG, W.; PICKRELL, G. R.; HUANG, Z.; XU, J.; KIM, D.W.; QI, B.; WANG, A. Self-compensating fiber optic flow sensor system and its field applications. **Optical Society of America: Applied Optics**, v. 43, n. 8, p. 1752-1760, 2004.

(44) PENG, W.; PICKRELL, G. R.; XU, J.; HUANG, Z.; KIM, D. W.; WANG, A. Novel single-phase fiber optic flow sensor system. In: OPTICAL TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL, ENVIRONMENTAL, AND BIOLOGICAL SENSING, 2003, Providence-RI, USA, **Anais**, Industrial and Highway Sensors Technology, 2004, v. 5272, p. 223-229.

(45) YUAN, J.; YANG, J.; LIU, Z. A Compact Fiber-Optic Flow Velocity Sensor Based on a Twin-Core Fiber Michelson Interferometer. **IEEE Sensors Journal**, v. 8, n. 7, p. 1114-1117, 2008.

(46) ZHAO, Y.; GU, Y.; RI-QING LV, YANG, Y. A Small Probe-Type Flowmeter Based on the Differential Fiber Bragg Grating Measurement Method. **IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 3, p. 502-507, 2017.

(47) PHILIP-CHANDY, R.; SCULLY, P. J.; MORGAN, R. The design, development and performance characteristics of a fibre optic drag-force flow sensor - DESIGN NOTE. **Measurement Science and Technology**, v. 11, n. 3, p. N31-N35, 2000.

(48) HU, R. P.; HUANG, X. G. A Simple Fiber-Optic Flowmeter Based on Bending Loss. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 12, p. 1952-1955, 2009.

(49) FRAZÃO, O.; CALDAS, P.; ARAÚJO, F.; FERREIRA, L.; SANTOS. J. L. Optical flowmeter using a modal interferometer based on a single nonadiabatic fiber taper. **Optics Letters**, v. 32, n. 14, p. 1974-1976, 2007.

(50) KERSEY, A. D. Optical fiber sensor for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry. **IEEE Transaction Electronics: Special Issue on Optical Fiber Sensors**, v. E83-C, n.3, p. 400-404, 2000.

(51) ZHAO, Y.; CHEN, K.; YANG, J. Novel target type flowmeter based on a differential fiber Bragg grating sensor. **Measurement**, v. 38, n. 3, p. 230-235, 2005.

(52) WADE, S. A.; JOLLEY, W.; FOURAS, A. Fiber Bragg grating tether used to measure drag forces in neutral buoyancy flow tank tests. **Review of Scientific Instruments**, v. 79, n. 6, p. 5102-5106, 2008.

(53) CALDAS, P.; JORGE, P. A. S.; REGO, G.; FRAZÃO, O.; SANTOS, J. L.; FERREIRA, L. A.; ARAÚJO, F. Fiber optic hot-wire flowmeter based on a metallic coated hybrid long period grating/fiber Bragg grating structure. **Applied Optics**, v. 50, n. 17, p. 2738-2743, 2011.

(54) GAO, S.; ZHANG, A. P.; TAM, H.; CHO, L. H.; LU, C. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings. **Optics Express**, v. 19, n. 11, p. 10124-10130, 2011.

(55) THEKKETHIL, S. R.; THOMAS, R. J.; NEUMANN, H; RAMALINGAM, R. Experimental investigation on mass flow rate measurements using fibre Bragg grating sensors. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 171, n. 1, p. 2-9, 2017.

(56) LIU, Z.; HTEIN, L.; CHENG, L.; MARTINA, Q.; JANSEN, R.; TAM, H. Highly sensitive miniature fluidic flowmeter based on an FBG heated by Co2+-doped fiber. **Optics Express**,v. 25, n. 4, p. 4393-4402, 2017.

(57) DUNKERS, J. P.; LENHART, J. L.; KUEH, S. R.; ZANTEN, J. H.; ADVANI, S. G.; PARNAS, R. S. Fiber optic flow and cure sensing for liquid composite molding. **Optics and Lasers in Engineering**, 35, n. 2, p. 91-104, 2001.

(58) JIANG, J.; HSU, T.; LIAO, W.; OUYANG, C. An Innovative Optical Fiber Flowmeter. **Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers**, v.30, n.2, p. 159-165, 2009.

(59) YUHUAN, D.; GUO, Y. Theoretical and Experimental Study on Wide Range Optical Fiber Turbine Flow Sensor. **Sensors**, v. 16, n. 7, p. 1-15, julho 2016.

(60) G. LIU, Q. SHENG, G. PIASSETTA, W. HOU, M. HAN, A fiber-optic water flow sensor based on laser-heated silicon Fabry-Perot cavity, In: SPIE COMMERCIAL + SCIENTIFIC SENSING AND IMAGING, 2016, Baltimore, Maryland, USA, **Anais**, Fiber Optic Sensors and Applications XIII, v. 9852, p. 1-7, 2016.

(61) G. LIU, W. HOU, W. QIAO, M. HAN, Fast-response fiber-optic anemometer with temperature self-compensation, **Optics Express**, v. 23, n. 10, p. 13562–13570, 2015.

(62) S. CHEWA, A. ZULKIFLIA, S. MASNANB, S. AKIBC, S. HARUNA, F. ADIKANA, H. AHMAD, Water wave gauge based on singlemode-multimode-singlemode fiber structure, **Optik**,v. 144, p. 232–239, 2017.

(63) J. ANG, S. IDAPALAPATI, A. ASUNDI, Flow measurements using a simple fiber optic technique. In: WORLD CONGRESS ON ADVANCES IN CIVIL,

ENVIRONMENTAL AND MATERIALS RESEARCH (ACEM' 12), 2012, Seoul-Korea, **Anais**, 2012, v. 16, p. 2285-2296.

(64) BARTON, J. S.; SAOUDI, M. A fiber optic vortex flowmeter. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 19, n. 1, p. 64-66, 1986.

(65) DAKIĆ, B. M.; BAJIC, J. S.; STUPAR, D.; SLANKAMENAC, M.; ŽIVANOV, M. B. A novel fiber-optic mass flow sensor, **Key Engineering Materials**, v. 543, p. 231–234, 2013.

(66) IB-NDT. **Manutenção Industrial-Fibra Ótica-Poços: Monitoramento de Poços Produtores de Petróleo em Tempo Real**. Disponível em: <http://ibndt.com/ver_monitoramento.asp?codigo=22>. Acesso em: 12 set. 2019.

(67) KROHN, D. **Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications**. Disponível em:<https://www.photonics.com/images/Web/Webinars/80/Fiber_Optic_Sensors_Fundamentals_and_Applications.PDF>. Acesso em: 12 set. 2019.

(68) Baldwin, C. S. Brief history of fiber optic sensing in the oil field industry. **Fiber Optic Sensors and Applications XI**, Proc. of SPIE v. 9098, p. 1-9, 2019

(69) Bohnert, K.; Gabus, P.; Kostovic, J. e Brandle H. Optical fiber sensors for the electric power industry. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 43, p. 511–526, 2005.

(70) USS MISSOURI VIRGINIA CLASS SUBMARINE COMMISSIONING COMMITTEE. **About the Virginia Class Submarines**. Disponível em: <http://www.ussmissourisubmarine.org/virginia_class.html>. Acesso em 12 set. 2019.

(71) UDD, E.; SCHEEL, I. U. Mars or bust! 40 years of fiber optic sensor development, In: Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2017, Anaheim-CA-USA. **Anais**, SPIE 10208, Fiber Optic Sensors and Applications XIV, v. 10208, n. 2, p. 1-10, 2017.

(72) MARKET RESEARCH FUTURE. **Fiber Optic Sensor Market Research Report- Forecast to 2022**. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/fiber-optic-sensor-market-2514>. Acesso em: 12 set. 2019.

(73) ALLWOOD, G,; WILD, G.; HINCKLEY, S. Fiber Bragg Grating Sensors for Mainstream Industrial Processes. **Electronics**, v. 6, n. 92, p. 1-19, 2017.

(74) VISIONGAIN. **Distributed Fibre Optic Sensing (DFOS) Market Report 2018-2028**. Disponível em: <https://www.visiongain.com/report/distributed-fibre-optic-sensing-dfos-market-report-2018-2028/>. Acesso 12 set. 2019.

(75) VISIONGAIN. **Distributed Fibre Optic Sensing (DFOS) market report 2016-2026**. Disponível em: <https://www.visiongain.com/report/distributed-fibre-optic-sensing-dfos-market-report-2016-2026/>. Acesso 12 set. 2019.

(76) ZENG, W.; GAO, H. Optic Fiber Sensing IOT Technology and Application Research. **Sensors & Transducers**, v. 180, n. 10, p. 16-21, 2014.

(77) BLAHUT, M.; KASPRZAK, D. Multimode interference structures – properties and applications. **Optica Applicata**, v. 34, n. 4, p. 573-587, 2004.

(78) SOLDANO, L. B.; PENNINGS, E. C. M. Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 13, n. 4, p. 615-627, 1995.

(79) WU, Q.; SEMENOVA, Y.; HATTA, A. M.; WANG, P.; FARRELL, G. Singlemode-multimode-singlemode fiber structures for simultaneous measurement of strain and temperature. **Microwave and Optical Technology Letters**, v.53, n. 9, p. 2181-2185, 2011.

(80) COELHO, L.; KOBELKE, J.; SCHUSTER, K.; FRAZÃO, O. Multimode interference in outer cladding large-core air-clad photonic crystal fiber. **Microwave and Optical Technology Letters**, v.54, n. 4, p. 1009-1011, 2012.

(81) HATTA, A. M. **Singlemode-Multimode-Singlemode optical fibre structures for optical sensing**. PhD Thesis. Dublin – Ireland: School of Electronic and Communications Engineering – Faculty of Engeneering – Dublin Institute of Technology, 2009.

(82) MOHAMMED, W. S.; MEHTA, A.; JOHNSON, E. G., Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 2, p. 469-477, 2004.

(83) ZHOU, X.; CHEN, K.; MAO, X.; PENG, W.; YU, Q. A reflective fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference in a coreless silica fiber. **Optics Communications**, v. 340, p. 50–55, 2015.

(84) GONG Y.; ZHAO T.; RAO Y.; WU Y. All-fiber curvature sensor based on multimode interference. **IEEE Photonics Techn. Letters**, v. 23, n. 11, p. 679–681, 2011.

(85) DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, JEARL WALKER, **Fundamentos de Física**, Vol. 2, 10a edição, Rio de Janeiro – RJ: ed. Gen LTC, 2016.

(86) YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA, **Fluid Mechanics Fundamentals and Applications**. 1st ed. New York, NY – USA: ed. Mc Graw Hill – Higher Education, 2006.

(87) ZHAO, Q.; ZHENG, H.; Lv, R.;GU, Y.;ZHAO, Y.; YANG, Y. Novel integrated optical fiber sensor for temperature, pressure and flow measurement. **Sensors and Actuators A**, v. 280, p. 68-75, 2018.

(88) CAUCHETEUR, C.; CHAH, K.; LHOMME, F.; BLONDEL, M.; MEGRET, P. Simultaneous bend and temperature sensor using tilted FBG, In: 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBRE SENSORS, 2005, Bruges, Belgium, **Anais**, 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2005, v. 5855, p. 707–711.

(89) DIOMARA, P.; MORGADO, M. C. F. **Cálculo Diferencial e Integral de Funções de Várias Variáveis**. 3. ed. Rio de Janeiro, Editora UFRJ Coleção Estudos, 2014.

(90) SYNOPSYS INC. **BeamPROP v2013.12 - User Guide**, 2013.

(91) INPE. **CPTED - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em: https://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/22557. Acesso em: 08 out. 2019.

(92) SACCOMANDI, P.; SCHENA, E. e SILVESTRI, S. A novel target-type low pressure drop bidirectional optoelectronic air flow sensor for infant artificial ventilation: Measurement principle and static calibration. **Review of Scientific Instruments**, v. 82, p. 1-9, 2011.

ANEXO A – Modelagem pelo método de propagação do feixe utilizando o *software* BeamProp

O *software* BeamProp (BP) da Synopsys, é um programa comercial que usa como técnica de modelagem o método de propagação do feixe com diferenças finitas (FD-BPM – *Finite Diferences Beam Propagation Method*) (90). O BP calcula a propagação da luz em diversos tipos de geometria, fazendo uso do método das diferenças finitas para resolver a aproximação parabólica ou paraxial da equação de Helmholtz (90).

$$\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \emptyset}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \emptyset}{\partial z^2} + k^2(x,y,z)\emptyset = 0 \qquad (32)$$

onde, $\boldsymbol{\phi}$ é uma componente do campo e **k** é o número de onda.

A condição de paraxialidade impõe uma limitação de propagação restrita a uma faixa estreita de ângulos. Como foi mostrado na seção 2.2, em uma estrutura SMS a maior parte da energia transferida do segmento monomodo para o segmento multimodo ocorre no acoplamento com os primeiros modos da MMF, que são os modos com as maiores constantes de propagação e índices efetivos, o que valida a condição de aproximação do método aplicado. A técnica BPM aproxima a equação exata de onda, com o uso da equação de Helmholtz para ondas monocromáticas, formulando o problema na forma de campo escalar, que é definido como

$$E(x,y,z,t) = \emptyset(x,y,z)e^{-i\omega t} \qquad (33)$$

onde, **ω** é a frequência angular e o número de onda é espacialmente dependente e definido por

$$k(x,y,z) = k_0.n(x,y,z) \qquad (34)$$

sendo **n**(x,y,z) o índice de refração do meio. O número de onda no espaço livre é dado por $\boldsymbol{k_0} = 2\pi/\lambda$.

Dessa forma, as propriedades geométricas do problema são definidas por $\boldsymbol{n}(x,y,z)$. Esta abordagem é particularmente importante na transformação conformal empregada para simulação de curvatura.

As simplificações adotadas por este método no programa BeamProp, permitem grande eficiência no que diz respeito ao tempo de simulação, se comparada à solução numérica completa da equação de Helmholtz. Outra vantagem é que o método usa uma envoltória de variação lenta permitindo que o campo variante seja representado numericamente sobre uma grade longitudinal, ao longo do eixo **z**, que pode ter elementos muito maiores que o comprimento de onda, o que contribui grandemente para a eficiência na simulação. Como desvantagem, o método não permite simulações com grande taxa de variação de índice de refração ao longo do eixo z (90). Os modelos analisados neste trabalho não apresentam variações acentuadas de índice de refração no eixo z e as estruturas abordadas possuem dimensões longitudinais bem maiores do que o comprimento de onda, de forma que a simplificação de considerar a envoltória da onda (e não suas oscilações rápidas) constitui uma boa aproximação.

ANEXO B – Escala de Ventos de Beaufort (91)

Escala Beaufort de Força de Vento						
Escala	Velocidade média		Velocidades limites		Nomenclatura	
	ms^{-1}	nós (knots)	ms^{-1}	nós (knots)	português	inglês
0	0	0	<1	<1	Calmaria	Calm
1	1	2	1 – 2	1 – 3	Bafagem	Light Air
2	3	5	2 – 4	4 – 6	Aragem	Light Breeze
3	5	9	4 – 6	7 – 10	Fraco	Gentle Breeze
4	7	13	6 – 9	11 – 16	Moderado	Moderate Breeze
5	10	19	9 – 11	17 – 21	Fresco	Fresh Breeze
6	12	24	11 – 14	22 – 27	Muito Fresco	Strong Breeze
7	15	30	14 – 17	28 – 33	Forte	Near Gale
8	19	37	17 – 21	34 – 40	Muito Forte	Gale
9	23	44	21 – 25	41 – 47	Duro	Severe Gale
10	27	52	25 – 29	48 – 55	Muito Duro	Storm
11	31	60	29 – 33	56 – 63	Tempestuoso	Violent Storm
12	-	-	33 +	64 +	Furacão	Hurricane

ANEXO C – Sensor de Vazão/Anemômetro Livre Interrogado na Reflexão: Análise por deslocamento da ponta do sensor

No capítulo 4 foram relatados experimentos com sensores de curvatura SMS empregando suporte de perfil circular para arqueamento por raio de curvatura fixo, interrogados na transmissão e na reflexão do sinal. No experimento o arqueamento no suporte foi obtido através do deslocamento da ponta do sensor empregando um microposicionador. É também possível descrever o experimento de sensoriamento de vazão com o sensor livre, reportado no capítulo 3, caracterizando a potência refletida em função do deslocamento da ponta do sensor.

No experimento do capítulo 3, os testes foram realizados em túnel de vento, onde o sensor por reflexão foi posicionado dentro de um tubo de acrílico numa disposição conhecida como cantilever, estando livre para curvar sob ação do vento. As análises dos resultados foram efetuadas levando em consideração o comportamento da potência refletida em função da pressão diferencial usando tubo de *Pitot*, que pode ser convertida em velocidade e vazão usando a equação de Bernoulli (85).

Estudos de estruturas em cantilever submetidas a esforços uniformemente distribuídos, como a fibra sob ação do vento, permitem calcular o deslocamento de qualquer ponto da estrutura em função do esforço aplicado, sendo de particular interesse o deslocamento da ponta da estrutura. A Figura 65 ilustra a deflexão sofrida pela estrutura em função do esforço distribuído (92).

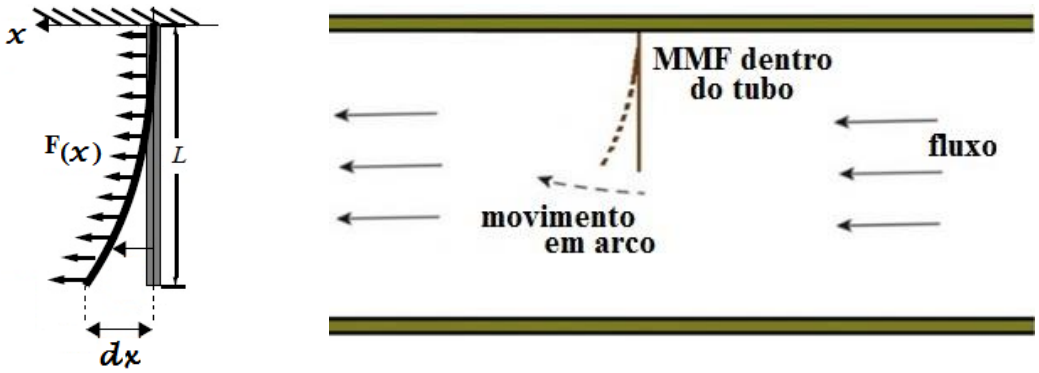


Figura 65 – (a) Estrutura cantilever submetida a esforço uniformemente distribuído e (b) sensor em configuração cantilever sob ação do vento.

A expressão para calcular o deslocamento da ponta do sensor é dada por (92):

$$dx = \frac{F_{(x)}L^4}{8EI} \tag{35}$$

onde, **F(x)** é a força por unidade de comprimento (**F/ℓ**) uniformemente distribuída, **L** é o comprimento do sensor (41,08 mm), **E** é a elasticidade do material (63 GPa para a sílica) e **I** é o segundo momento de inércia ou momento de inércia de área, uma propriedade geométrica da seção transversal de elementos estruturais. No caso de um cilindro de raio **r** (62,5 µm), **I** é dado por,

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \tag{36}$$

A força exercida pelo escoamento do ar no túnel de vento pode ser calculada usando a expressão da pressão exercida pelo vento, em uma estrutura cilíndrica, dada por (92),

$$P = \frac{k\rho V^2}{2} \tag{37}$$

onde **k** é o coeficiente de arrasto (0,82), **ρ** é a densidade do ar (1,17 kg/m^3) e **V** a velocidade do ar.

A pressão é definida matematicamente como a razão entre força e área:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{\ell d} \tag{38}$$

onde **d** é o diâmetro do sensor (125 µm).

Dessa forma, a força distribuída uniformemente na fibra pode ser expressa por

$$F_{(x)} = \frac{F}{\ell} = d.P = \frac{dk\rho V^2}{2} \tag{39}$$

Logo, o deslocamento da ponta do sensor pode ser expresso por

$$dx = \frac{k\rho d L^4 V^2}{16EI} \tag{40}$$

A Tabela 4 mostra os resultados do deslocamento da ponta do sensor empregando a Equação 40 e os dados do experimento no túnel de vento.

Tabela 4 – Deslocamento da ponta do sensor livre no túnel de vento (Capítulo 3)

P	V	Desloc x
Pressão (mmH2O)	Velocidade do ar (m/s)	Deslocamento da ponta do sensor (mm)
0	0	0,00
1	4,08	0,47
2	5,77	0,94
3	7,07	1,41
4	8,17	1,89
5	9,13	2,36
6	10	2,83
7	10,8	3,30
8	11,55	3,77
9	12,25	4,24
10	12,91	4,71
11	13,54	5,18

Como a velocidade do ar é proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial medida no túnel de vento pela coluna de água (Equação 23), na relação inversa a pressão é proporcional ao quadrado da velocidade, assim como o deslocamento da ponta de sensor, na Equação 40. Logo, a relação entre a pressão dinâmica e o deslocamento da ponta, é linear. A Figura 66 mostra esta relação.

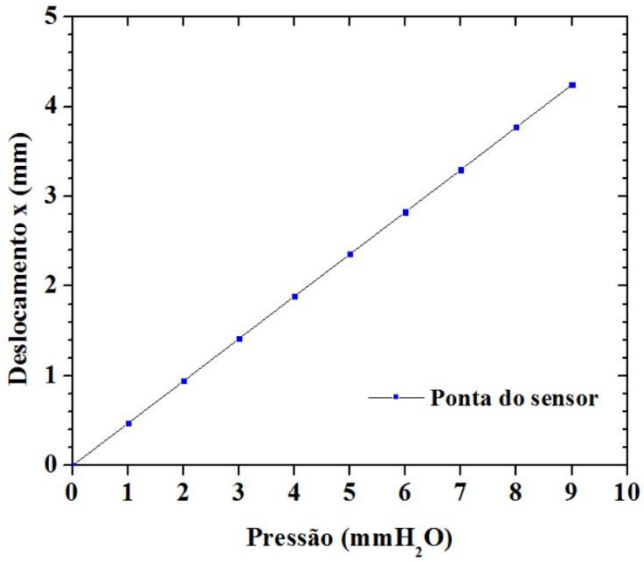


Figura 66 – Deslocamento da ponta do sensor em função da pressão dinâmica.

Consequentemente, para todas a análises realizadas no capítulo 3 onde o comportamento do sensor é descrito como função da pressão diferencial, os gráficos em função do deslocamento da ponta do sensor apresentarão relações proporcionais. A Figura 67 mostra esta propriedade.

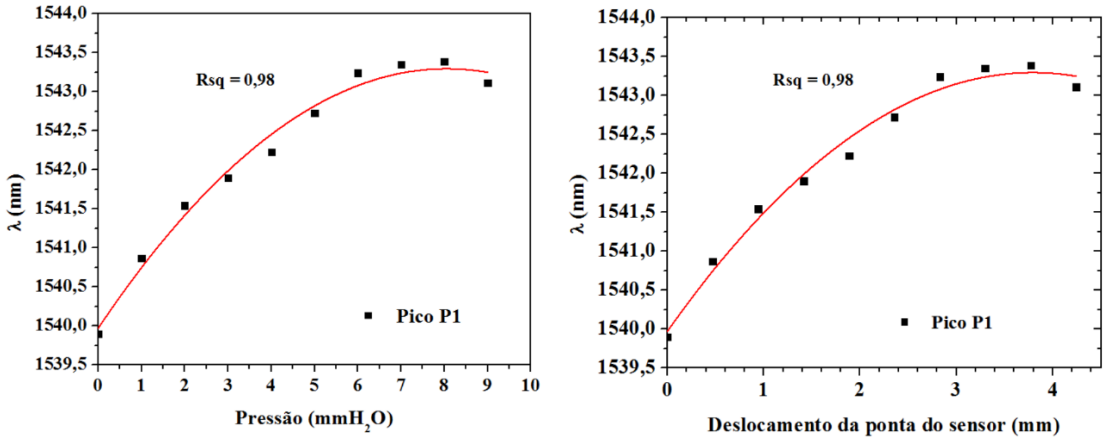


Figura 67 – O deslocamento da ponta do sensor é proporcional à pressão diferencial.

Conclusão: As análises realizadas de comportamento do sensor em função da pressão diferencial podem ser estendidas para deslocamento da ponta do sensor devido à proporcionalidade entre as grandezas.