CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

# ANÁLISE DE UM SENSOR MODALMÉTRICO EM CONFIGURAÇÃO DE FONTE DUPLA

Eduardo Rezende Ferreira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Drª Maria Aparecida G. Martinez

Rio de Janeiro
Abril de 2021

ANÁLISE DE UM SENSOR MODALMÉTRICO EM CONFIGURAÇÃO DE FONTE DUPLA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Eduardo Rezende Ferreira

Banca Examinadora:

_____

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

_____

Dra. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi (IME)

_____

Dra. Carolina Vannier dos Santos Borges (CEFET/RJ)

_____

Dra. Aline Gesualdi Manhães (CEFET/RJ)

Rio de Janeiro
Abril de 2021

Ficha catalográfica a ser elaborada pela biblioteca do CEFET/RJ

## RESUMO

### Análise de um sensor modalmétrico em fonte dupla

Neste trabalho é investigado o impacto na sensibilidade de um sensor de índice de refração com base na interferência multimodal em uma estrutura SMS em fibra ótica, quando configurado em fonte ótica dupla formada por uma fonte banda larga em torno da banda C, e um laser de diodo com emissão na banda S. O laser de diodo amplia a faixa espectral utilizável para interrogação do sensor, permitindo a avaliação de um maior número de vales do espectro transmitido, quando comparado com a configuração mais usual que utiliza somente uma fonte de banda larga. O aparato experimental foi montado para analisar a configuração de fonte ótica dupla em um sensor modalmétrico. Os resultados experimentais são apresentados e comparados para dois grupos de experimentos na mesma topologia, porém com variação nos valores das correntes de polarização das fontes luminosas utilizadas. A sensibilidade do sensor SMS em cada grupo experimental é obtida através da aplicação de regressão linear nas faixas de índice de refração para cada vale do espectro transmitido. Os resultados obtidos no segundo grupo experimental, com a corrente no LD configurada para 80mA, nos vales localizados nos comprimentos de onda de 1492 nm, 1509 nm e 156 3nm para as faixas de índice de refração de 1,34 a 1,37 e comprimentos de onda de 1466 nm e 1492 nm nas faixas de índice de refração de 1,37 a 1,40, não foram conclusivos devido ao desvio padrão maior do que 10% em relação a sensibilidade. Com base nos resultados experimentais, é possível concluir que a configuração em fonte ótica dupla causou um impacto mais significante na sensibilidade final do sensor SMS nos vales localizados nos comprimentos de onda de 1443 nm, 1509 nm, 1555 nm e 1563 nm para a faixa de índice de refração de 1,37 a 1,40.



Palavras-chave: sensor ótico; interferência multimodal; sensor de índice de refração.

## ABSTRACT

### Analysis an modalmetric sensor in doble optical source

This work investigates the impact on the sensitivity of a refraction index sensor based on multimodal interference in an SMS structure in fiber optics, when configured in a dual optical source formed by a broadband source around the C band, and a diode laser with emission in the S band. The diode laser expands a spectral range usable for interrogating the sensor, allowing the evaluation of a larger number of valleys of the transmitted spectrum, when compared to the most usual configuration that uses only one broadband source. The experimental apparatus was assembled to analyze the configuration of dual optical source in a modalmetric sensor. The experimental results are presented and compared for two groups of experiments in the same topology, but with variation in the values of polarization currents of the light sources used. The sensitivity of the SMS sensor in each experimental group is obtained by applying linear regression in the refraction index ranges for each valley of the transmitted spectrum. The results obtained in the second experimental group, with the current in LD configured to 80mA, in the valleys located at wavelengths of 1492 nm, 1509 nm and 1563 nm for the refraction index ranges of 1.34 to 1.37 and wavelengths of 1466 nm and 1492 nm in the refraction index ranges of 1.37 to 1.40, were not conclusive due to the standard deviation greater than 10% in relation to sensitivity. Based on the experimental results, it is possible to conclude that the dual optical source configuration caused a more significant impact on the final sensitivity of the SMS sensor in the valleys located at the wavelengths of 1443 nm, 1509 nm, 1555 nm and 1563 nm for the refraction index range of 1.37 to 1.40.



Keywords: Optical sensor; multimodal interference; refractive index sensor.

# SUMÁRIO


| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Introdução** | **7** |
| 1.1 | Objetivo | 13 |
| 1.2 | Motivação | 14 |
| 1.3 | Organização da dissertação | 17 |
| **2** | **Fundamentação Teórica** | **19** |
| 2.1 | Princípio da interferência multimodal em dispositivos SMS | 19 |
| 2.1.1 | Ponto de reimagem | 23 |
| 2.1.2 | Modelagem matemática e computacional da eficiência de acoplamento | 26 |
| 2.2 | Considerações | 34 |
| **3** | **Caracterização dos componentes do aparato experimental** | **34** |
| 3.1 | Fonte ótica | 35 |
| 3.2 | Caracterização do filtro WDM | 41 |
| 3.3 | Caracterização do sensor SMS | 44 |
| 3.4 | Analisador de espectro ótico e medidor de potência ótica | 46 |
| **4** | **Análise de um sensor modalmétrico em configuração de fonte dupla** | **48** |
| 4.1 | Descrição do aparato experimental | 48 |
| 4.2 | Resultados experimentais | 51 |
| 4.2.1 | Primeiro conjunto de medidas | **51** |
| 4.2.2 | Segundo conjunto de medidas | **60** |
| 4.2.3 | Considerações finais | 69 |
| **5** | **Conclusão e trabalhos futuros** | **73** |

# 1 – INTRODUÇÃO

Os dispositivos a fibra ótica passaram a despertar grande interesse a partir de 1970, devido ao desenvolvimento de técnicas de medição ótica e a fabricação de fibras óticas com baixas perdas (KAPRON,1970). A partir desta inovação, as fibras começaram a ser largamente utilizadas e se tornaram um meio de transmissão dominante em comunicações de elevadas taxas de dados e em longas distâncias (AGRAWAL, 2002).

Com o emprego das fibras óticas passou a se observar o potencial desta tecnologia em aplicações na área de sensoriamento e instrumentação ótica, e os primeiros estudos explorando a utilização das fibras óticas como dispositivos de sensoriamento e medição de grandezas físicas foram publicados (BATTLE,1970) (MORITA,1974) (GOTTLIEB,1980). Os sensores a fibra ótica são capazes de medir variações de intensidade ótica, temperatura, pressão, deformações mecânicas, índice de refração e outros parâmetros (METHA, 2003). De modo geral, a operação está relacionada com a influência destes parâmetros físicos, de forma direta ou indireta, na propagação da luz na fibra ótica (SCHENATO,2017) (DOMINGUES,2017). Os sensores a fibra ótica trouxeram um grande avanço para a área de sensoriamento, uma vez que estes tipos de transdutores apresentam vantagens como: dimensões reduzidas, capacidade de multiplexação, capacidade de enviar e receber sinais óticos em grandes distâncias, elevada precisão, resistência a corrosão, permitem sensoriamento distribuído, baixo custo de produção (quando produzidos em larga escala), não possuem o risco de gerar centelha elétrica e possuem imunidade à interferência eletromagnética (YU,2002) (RAJAN, 2015).

Devido à constante inovação tecnológica na área de sensores baseados em fibra ótica, que é impulsionada pela necessidade do mercado global de informações reais e precisas para o controle de um processo, se faz necessário o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento de elevada sensibilidade e de baixo custo. Sendo assim, os sensores óticos se destacam pelo potencial de aplicação em diferentes problemas que permeiam várias áreas da engenharia. Por exemplo, os sensores a fibra ótica podem fornecer

monitoramento em tempo real e esta tecnologia de sensoriamento já é utilizada para o monitoramento estrutural de pontes e barragens (LÓPEZ, 2017). Nas asas de aviões e em turbinas eólicas, os sensores em fibra ótica são utilizados na análise de estresses estruturais (NICOLAS, 2016). Além de substituírem os tradicionais sensores elétricos em poços de petróleo ou em outras aplicações onde uma centelha elétrica poderia causar explosões (MORIKAWA, 2008). Na área médica, podem ser utilizados no diagnóstico de doenças e em exames de endoscopia (LUCESOLI, 2008). A figura 1.1 apresenta gráfico em barras da quantidade de trabalhos submetidos a conferência internacional de sensores a fibra ótica (Internacional OFS Conference) entre os anos de 1983 e 2012, em linhas a quantidade de publicações submetidas a conferência desde a sua primeira edição (OFS1 – 1983) até a vigésima segunda edição (OFS22 – 2012) (FERDINAND,2014).

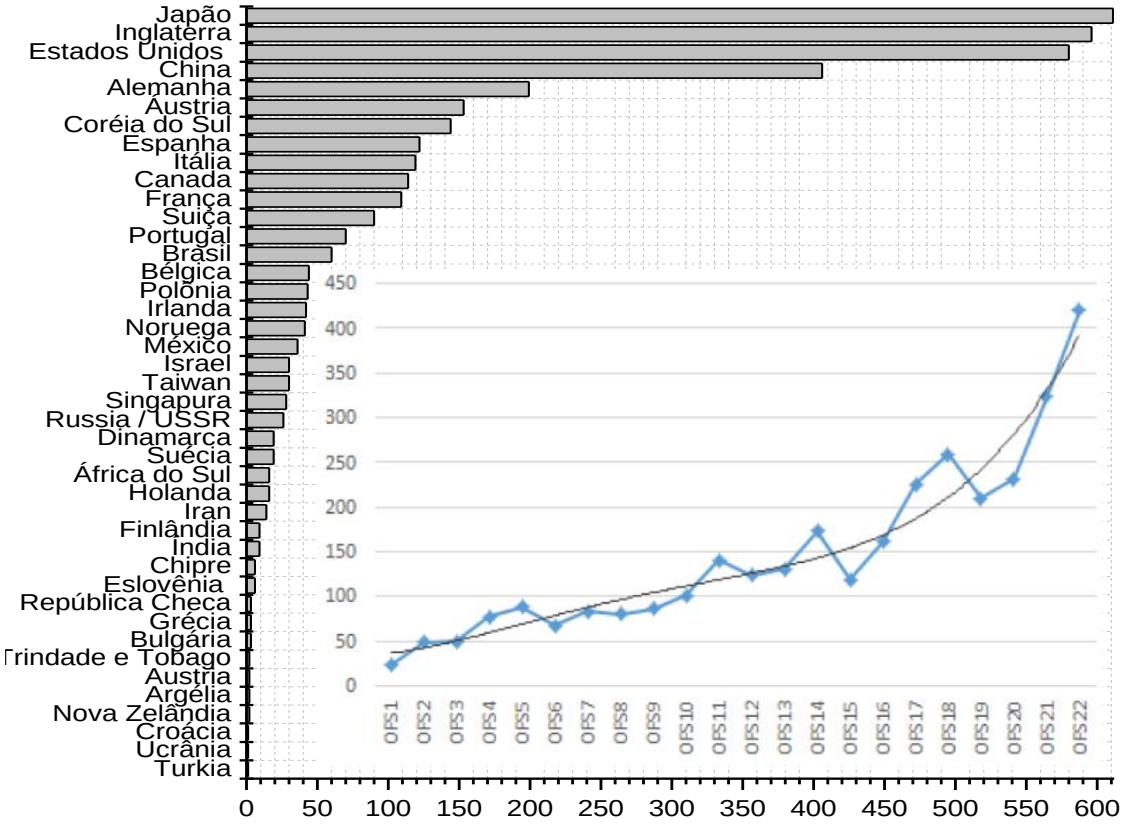



Figura 1.1: O gráfico em barras apresenta o número de trabalhos submetidos a conferência internacional de sensores a fibra óticas entre os anos de 1983 até o ano de 2012. O gráfico

em linhas apresenta um crescimento exponencial na quantidade de publicações em sensores a fibra ótica nesta conferência.

Fonte: (FERDINAND,2014), adaptado pelo autor deste trabalho.

Um sensor baseado em fibra ótica tem seu princípio de funcionamento definido pela modulação dos parâmetros da luz (comprimento de onda, intensidade, fase, polarização espalhamento) pelo mensurando, que provoca alterações nas características do sinal ótico na saída do sensor (RAJAN, 2015). O sinal ótico modulado deve ser relacionado aos parâmetros de medição, como temperatura, pressão, deformações mecânicas, índice de refração, entre outros parâmetros (ZHANG, 2013) (RAJAN, 2015) (MATIAS,2017).

Os sensores a fibra ótica podem ser classificados pelo tipo de transdutor utilizado, podendo ser extrínseco ou intrínseco à fibra ótica. Um sensor pode ser definido como extrínseco quando a luz sofre modulação por um transdutor externo à fibra ótica e intrínseco quando o parâmetro que se deseja mensurar age diretamente sobre à fibra ótica. Na figura 1.2 é apresentada a forma de classificação dos sensores a fibra ótica (YU,2002) (MATIAS,2017).

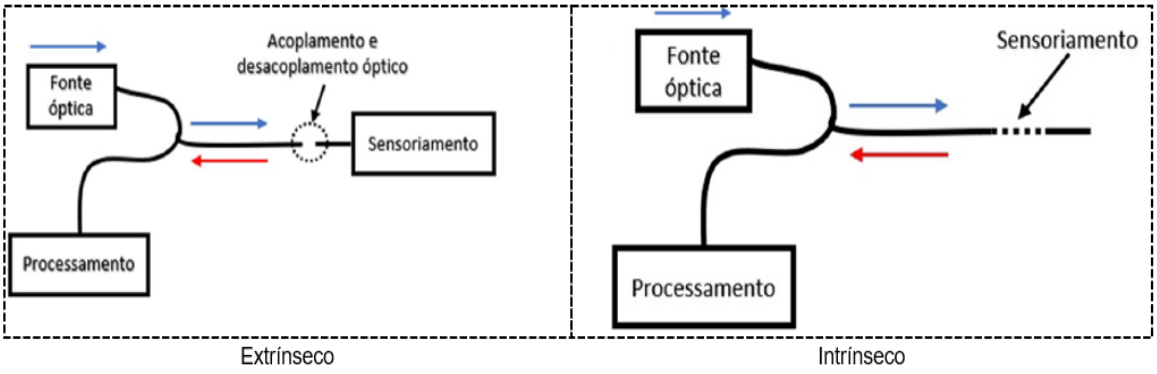



Figura 1.2: Classificação de sensores a fibra ótica de acordo com o transdutor utilizado.

Outra forma de classificação dos sensores a fibra ótica é pela topologia utilizada, podendo ser classificados como pontuais, multiponto (quase-distribuído) e distribuídos. A topologia é classificada como pontual quando o transdutor está localizado em um determinado ponto da fibra ótica. A topologia multiponto apresenta sensoriamento em

vários pontos da fibra. Nos distribuídos praticamente toda ou parte da extensão da fibra ótica é utilizada como elemento de sensoriamento (YU,2002) (COSTA, 2019).

O sensoriamento através de um sensor a fibra ótica pode ser implementado através de diferentes técnicas, como interferômetros de Fabry-Perot, Mach-Zehnder, Michelson, grades de Bragg e outras técnicas de sensoriamento (MATIAS,2017). Entre as técnicas de sensoriamento, uma técnica que se tornou foco de muitos estudos é a que utiliza os princípios da interferência multimodal (MMI), em destaque as configurações formadas por uma seção de fibra de guia multimodo (MMF) entre duas fibras de guias monomodo (SMF) e desta forma obtendo a configuração SMS (SMF-MMF-SMF). Na figura 1.3, as principais técnicas de sensoriamento classificados de acordo com a topologia de aplicação (MOHAMED, 2004) (RAJAN, 2015).

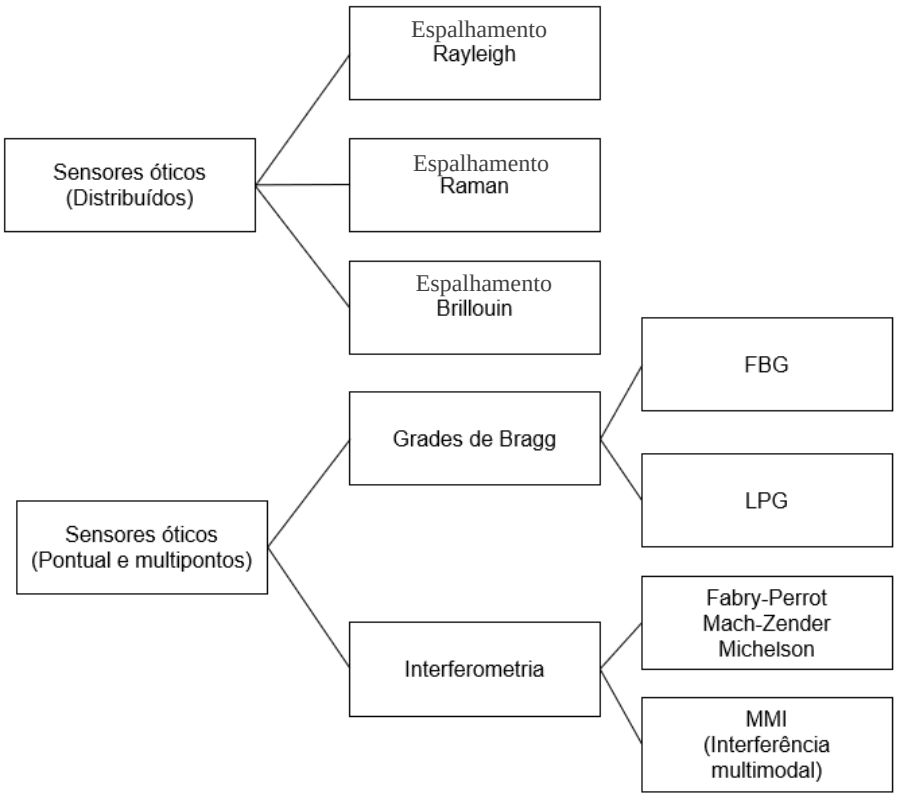



Figura 1.3: Classificação de sensores a fibra ótica de acordo com a topologia e técnica de sensoriamento.

Fonte: (FERDINAND,2014), adaptado pelo autor deste trabalho.

Os sensores a fibra ótica possuem um grande potencial para serem largamente utilizados, pois são leves, possuem alta sensibilidade, capacidade de multiplexação, entre outras vantagens (GAO, 2018). As vantagens são inúmeras quando comparados com os tradicionais sensores que utilizam eletricidade e circuitos eletrônicos, como imunidade a interferência eletromagnética (EMI), resistência à umidade e corrosão química, fácil distribuição no ponto de sensoriamento e capacidade de operação remota (YU,2002). Apesar das vantagens em relação ao seu equivalente que utiliza eletricidade, os sensores a fibra ótica possuem algumas limitações e desvantagens, como o elevado custo inicial para instalação e a elevada complexidade de um sistema de sensoriamento a fibra ótica, como pode ser observado em sua estrutura básica na figura 1.4 (OVSENÍK, 2005) (SOCORRO, 2013).

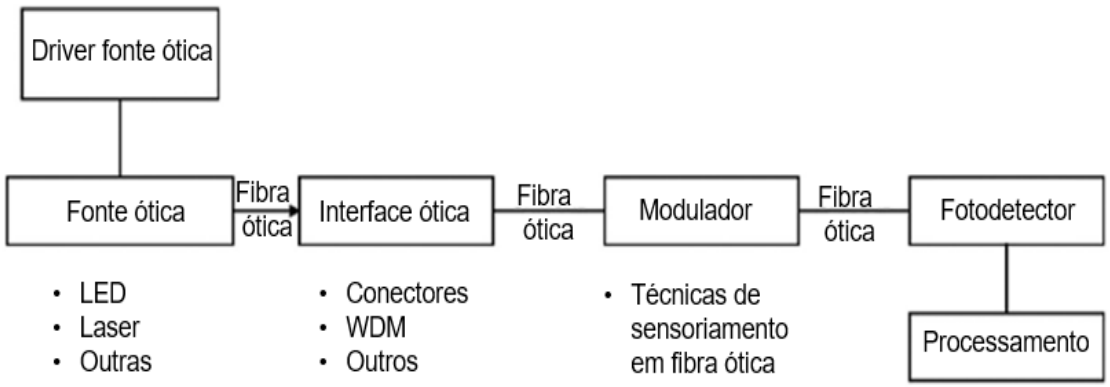



Figura 1.4: Estrutura básica de um sensor ótico.
Fonte: (FERDINAND,2014), adaptado pelo autor deste trabalho.

Os sensores que utilizam interferometria são baseados em dois ou mais feixes luminosos que possuem propagação por diferentes caminhos, ocorrendo uma interação entre os modos ao longo do eixo de propagação (MATIAS,2017). Tendo em vista o princípio de funcionamento, é possível observar que a diferença de fase entre os sinais é determinante na combinação dos sinais, gerando um padrão interferométrico na saída do

sensor (RAJAN, 2015). Ao longo do caminho de propagação, perturbações externas podem alterar a diferença de fase entre os feixes luminosos e alterar o padrão interferométrico na saída do sensor (LEE, 2012). Nos últimos anos, os interferômetros óticos foram desenvolvidos em diversas configurações. Entre os principais interferômetros, podemos citar os que se baseiam na interferência entre os caminhos para o feixe luminoso (Fabry-Perot, Mach Zehnder e Michelson) e os que se baseiam na interferência entre os caminhos dos modos de propagação (interferômetros modais) (LEE, 2012) (COSTA, 2019).

O foco deste trabalho é a aplicação de um sensor que opera com os princípios de interferência multimodal (MMI) em configuração de fonte ótica dupla, para se avaliar o impacto deste tipo de configuração na sensibilidade do sensor. A escolha de um dispositivo que utiliza MMI ocorreu devido às diversas vantagens deste tipo de sensor ótico, além de possuir baixo custo e uma relativa simplicidade em sua fabricação e aplicação. A configuração mais simples de um dispositivo básico que utiliza MMI, é formado pela inserção de uma seção de fibra multimodo (MMF-multimode fiber) entre duas fibras do tipo monomodo (SMF-singlemode fiber) e obtendo a configuração final denominada SMS (singlemode-multimode-singlemode).

O feixe de luz que se propaga na SMF apresenta apenas o modo fundamental de propagação. Quando o feixe luminoso é lançado da SMF para a MMF através do acoplamento entre as fibras, múltiplos modos de propagação são excitados na MMF e ao longo do eixo de propagação da MMF ocorre interferências entre os modos de propagação (MOHAMMED,2004) (GONG, 2011) (KUMAR, 2019). A distribuição espacial vai se alterando, de concentrada no eixo a mais espalhada na seção reta (GONG, 2011) (PACHON,2013). No acoplamento de saída da MMF com SMF os múltiplos modos de propagação da MMF excitam o modo fundamental da SMF de saída (KUMAR, 2019).

Um importante fenômeno ocorre como consequência da interferência multimodal. Em um comprimento específico, L, ao longo do eixo de propagação da MMF ocorre quase a repetição do perfil de campo de entrada, praticamente com a mesma intensidade. Este ponto na MMF onde ocorre a repetição com quase a mesma intensidade do sinal de entrada da SMF é denominado ponto de reimagem. A seção de MMF utilizada é calculada

de forma que permita a ocorrência do fenômeno de reimagem no final da seção de MMF e assim garantindo um maior acoplamento de potência com a SMF (MOHAMMED,2004) (OKAMOTO,2006) (MORSHED,2011).

Os dispositivos de sensoriamento que utilizam os princípios da MMI, em configuração SMS podem ser aplicados como sensores de curvatura (COSTA, 2019), temperatura (ZHANG,2018), vazão (COSTA, 2019), pressão (PÉREZ, 2011), vibração (GAO, 2018), índice de refração (ZHANG, 2013) e medição de outras grandezas (CORREIA, 2018).

A aplicação de sensores na configuração SMS para medição de índice de refração é realizada através da exposição da seção de MMF ao meio externo. A interação com o meio externo apresenta uma maior eficiência quando a seção de MMF utilizada é do tipo *no-core* (sem núcleo) (ZHANG,2013). Na configuração SMS utilizando uma MMF *no-core* o meio externo passa a ter a função de casca e à medida que o índice de refração do meio externo se aproximar do índice de refração da seção de MMF *no-core*, maior é a interação do campo que sai da fibra com o meio externo (campo evanescente) (KUMAR, 2019). A variação do índice de refração do meio externo pode ocorrer por variações químicas ou por variação na temperatura do líquido ao qual o sensor é exposto e automaticamente alterando seu índice de refração (PACHON,2013) (COSTA, 2019).

### 1.1 – Objetivo

Na caracterização de sensores a fibra ótica, usualmente, utiliza-se uma configuração padrão de fonte ótica única do tipo banda larga. Nesta dissertação, investigaremos o impacto na sensibilidade de um sensor de índice de refração na configuração SMS quando submetido a uma fonte banda larga em torno da banda C, e um laser de diodo com emissão na banda S. O sinal das fontes passa por um acoplador WDM-mux e posteriormente pelo sensor SMS, onde a seção multimodo é exposta a 17 soluções com diferentes concentrações de etileno glicol e água destilada e o sensor é interrogado por um Analisador de Espectro Ótico. Os experimentos foram desenvolvidos em bancada ótica nos laboratórios LAFOT (laboratório de fotônica CEFET-RJ) e

LABFOT (laboratório de fotônica do IME), além de utilizar o refratômetro do LIF (laboratório de instrumentação e fotônica da UFRJ) para verificar o índice de refração das soluções utilizadas.

## 1.2 – Motivação

Esta dissertação é motivada pelo fato de os sensores a fibra ótica apresentarem uma posição de destaque no cenário mundial devido a versatilidade desta tecnologia e a possibilidade de serem aplicados em diversas áreas. Na construção civil, os sensores a fibra ótica são utilizados para o monitoramento estrutural em tempo real. Por possuírem dimensões reduzidas, os sensores a fibra ótica são incorporados em elementos estruturais (lajes, vigas, pilares) para monitorar em tempo real as ações de cargas e tensões estruturais (LOUPOS,2017) (FERNANDES,2016). A figura 1.5 apresenta a aplicação de sensores a fibra ótica em uma estrutura de concreto armado para o monitoramento em tempo real das ações de cargas que podem gerar cisalhamento e momento fletor.

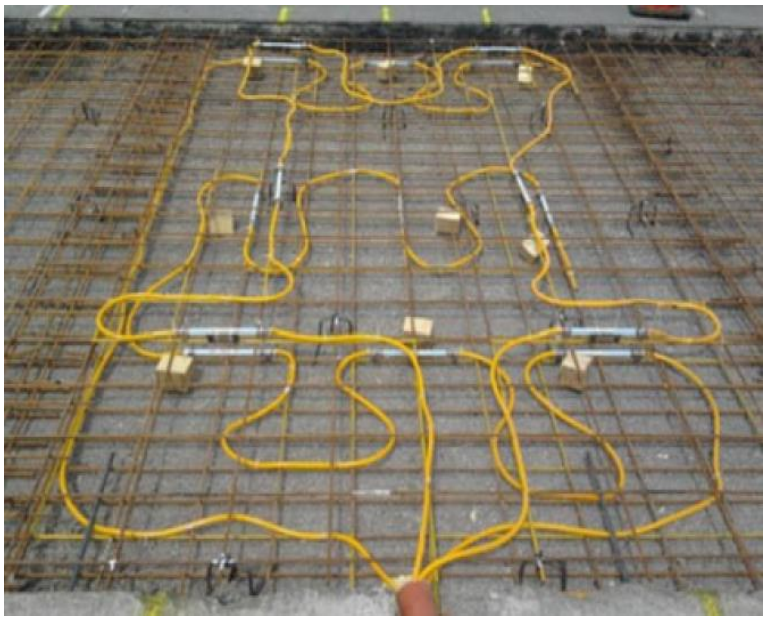


Figura 1.5: Sensor a fibra ótica distribuído em uma estrutura de concreto armado para o monitoramento em tempo real de cargas e tensões mecânicas.

Fonte: (LOUPOS,2017).

Na área de exploração de petróleo, a utilização de sensores a fibra ótica têm sido aceita como uma promissora alternativa para o monitoramento de equipamentos e estruturas. O interesse nos sensores a fibra ótica ocorre devido ao fato destes sensores apresentarem resistência a corrosão, elevadas pressões, temperatura e o fato destes sensores não utilizarem eletricidade, é de suma importância quando aplicados em áreas classificadas, onde existe o risco de explosão devido a presença de fluídos inflamáveis proveniente da exploração petrolífera (CAMERINI,2012) (SANTIAGO,2017). Os sensores óticos podem ser classificados como intrinsecamente seguros para instalações onde a instrumentação eletrônica deve ser utilizada com cautela para eliminar riscos de explosão. A figura 1.6 apresenta sensores óticos para medição de deformações axiais e torcionais, instalados diretamente na capa de um duto riser, que é um elemento imprescindível na produção offshore flutuante.

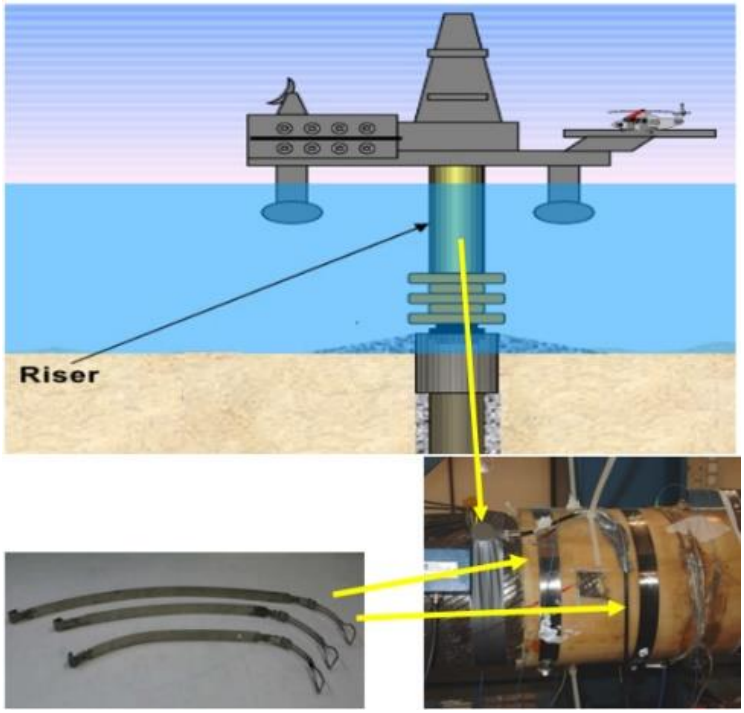



Figura 1.6: Sensor a fibra ótica instalado na estrutura de um riser utilizado na produção offshore flutuante.

Fonte: (CAMERINI,2012), adaptado pelo autor deste trabalho.

Os equipamentos utilizados na área de transmissão de energia elétrica operam em potência elevada, onde é utilizado alta tensão e as correntes elétricas são muito elevadas. O uso de sensores a fibra ótica se torna uma opção mais segura e confiável, pois as fibras óticas não conduzem eletricidade, são imunes a interferência eletromagnética e podem ser utilizadas para medição de grandezas elétricas em tempo real (DIAS,2018) (HAQUE,2015). A figura 1.7 apresenta o exemplo da utilização de um sensor a fibra ótica para medição de temperatura no enrolamento de um transformador de energia elétrica. Os parâmetros obtidos na medição em tempo real nos enrolamentos do transformador podem ser utilizados na detecção de mau funcionamento do sistema de resfriamento, acompanhamento de atividades de manutenção e desta forma garantindo um funcionamento com um menor risco de acidentes.

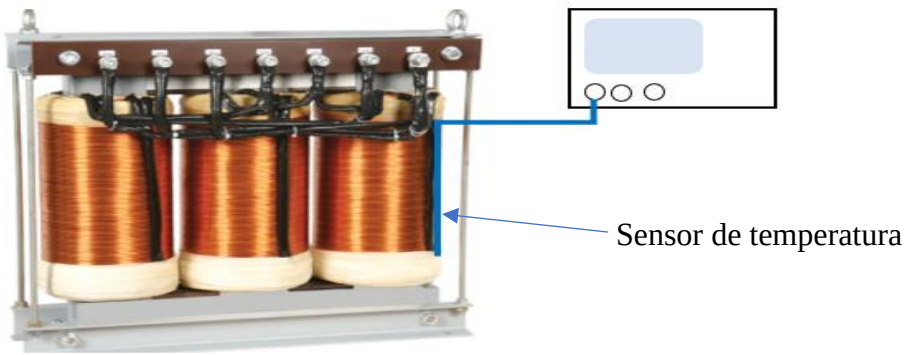



Figura 1.7: Exemplo da utilização de um sensor a fibra ótica para medição de temperatura no enrolamento de um transformador de energia elétrica.
Fonte: (DIAS,2018), adaptado pelo autor deste trabalho.

O mercado global de sensores e detectores fotônicos alcançou um grande investimento nos anos de 2015 e 2016. Para o ano de 2021, é esperado uma taxa de crescimento de 15,7% nos investimentos de melhorias e novas tecnologias de sensores e detectores fotônicos. A figura 1.8 apresenta os investimentos globais na área de sensores

óticos e dispositivos fotônicos e a previsão de crescimento nos investimentos em 2021 (BCCRESEARCH,2017).

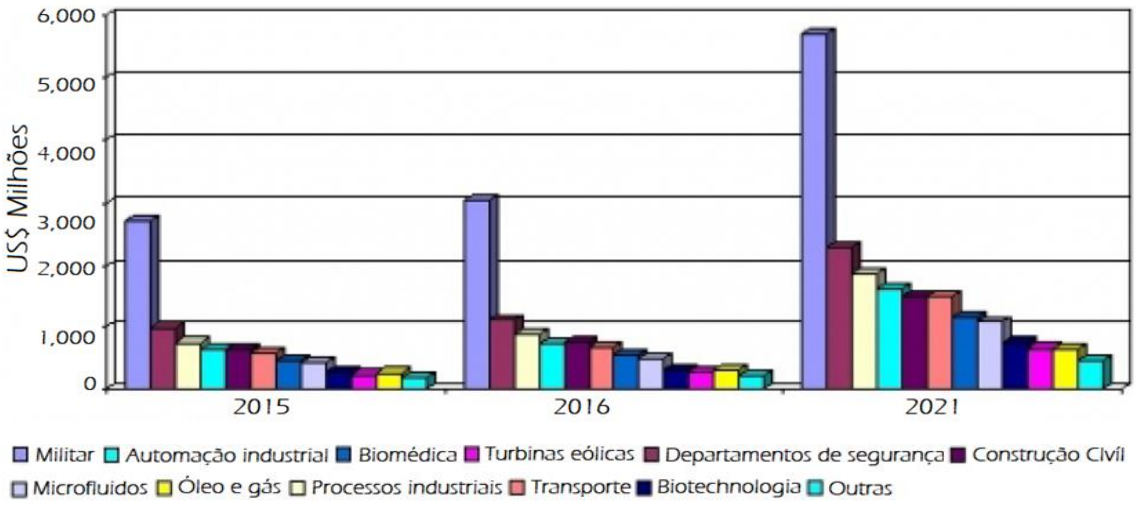



Figura 1.8: O gráfico em barras apresenta os investimentos na área de sensores e detectores fotônicos e uma projeção de investimentos na área.
Fonte: (BCCRESEARCH,2017), adaptado pelo autor deste trabalho.

Devido a constante inovação tecnológica na área de sensores baseados em fibra ótica, que é impulsionada pela necessidade do mercado global de informações reais e precisas para o controle de um processo, se faz necessário o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento de elevada sensibilidade e de baixo custo.

### 1.3 Organização da dissertação

No capítulo 2 é apresentado a fundamentação teórica e os conceitos de um dispositivo por interferência multimodal do tipo SMS para medição de índice de refração. O dispositivo em configuração SMS é modelado matematicamente, a eficiência de acoplamento entre as fibras SMF-MMF e a formação do ponto de reimagem são apresentados para os comprimentos de onda em torno da banda C e S. As simulações são

realizadas com utilização de códigos desenvolvidos em MatLab e devidamente modificados para aplicação neste trabalho.

No capítulo 3 é apresentado o aparato experimental utilizado nos testes realizados em bancada de instrumentação ótica. Os dispositivos óticos utilizados nos experimentos são devidamente caracterizados.

No capítulo 4 são apresentados os experimentos realizados para a análise de um sensor modalmétricos em configuração de fonte dupla. Os testes experimentais são realizados em diferentes configurações nas fontes de banda larga e no laser diodo. Os resultados obtidos são comparados e os efeitos da configuração em fonte dupla são avaliados a partir da sensibilidade obtida em cada conjunto experimental.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, realizado o comparativo entre os resultados obtidos para cada configuração experimental e os trabalhos futuros são sugeridos.

# 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a base conceitual dos dispositivos que utilizam estrutura de sensoriamento na configuração SMS (singlemode-multimode-singlemode), os fundamentos da interferência multimodal (MMI – Multi Modal Interference), o princípio do fenômeno de reimagem e a aplicação de estruturas de sensoriamento SMS para medição de índice de refração.

## 2.1 – Princípios da interferência multimodal em dispositivos SMS

Os interferômetros modalmétricos são dispositivos óticos baseados em interferência multimodal (MMI), ou seja, na interferência entre os modos de propagação (SOLDANO,1995). Em uma distância específica no eixo de propagação na MMF ocorre praticamente a replicação do perfil de campo de entrada, representado por um ponto de interferência construtiva máxima, sendo este denominado como ponto de reimagem (MOHAMED,2004) (OKAMOTO,2006).

O fenômeno da reimagem foi observado pela primeira vez em 1836 (TALBOT, 1836), no entanto, a possibilidade de se obter reimagem em um guia de onda planar foi demonstrado somente em meados dos anos 70 (ULRICH, 1975). A partir de meados dos anos 90 os primeiros dispositivos com base em interferência multimodal começaram a ser apresentados para guias de ondas planares (SOLDANO,1995). Os dispositivos são formados basicamente pela junção de guias de onda monomodo e multimodo. Em configuração básica, uma seção de guia de onda do tipo multimodo é conectada em seus extremos a dois guias de onda do tipo monomodo. O feixe luminoso proveniente do guia de onda monomodo apresenta apenas o modo fundamental de propagação, quando o feixe é lançado no guia de onda multimodo múltiplos modos de propagação são excitados, os múltiplos modos de propagação se interferem mutuamente ao longo do eixo de propagação até a interface com o guia monomodo de saída, onde apenas o modo fundamental é excitado novamente (SOLDANO,1995). Na figura 2.1 é apresentada a

configuração básica construtiva de um dispositivo multimodal para um guia de onda planar. O dispositivo é formado basicamente por um substrato de silício (Si), uma camada de óxido de silício ($SiO_2$) e oxido de alumínio ($Al_2O_3$) nos guias de onda (SOLDANO,1995).

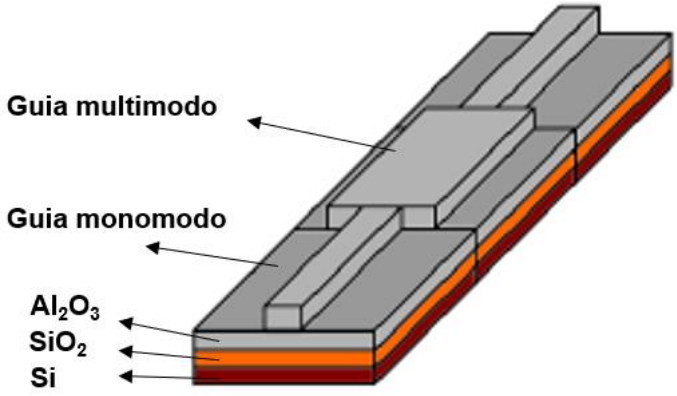



Figura 2.1: Dispositivo com base em interferência multimodal em guias de onda planares. Fonte: (PACHON,2013) adaptado pelo autor deste trabalho.

O padrão proveniente da interferência entre os modos possui dependência dos parâmetros que influenciam na propagação, como o tipo de guia de onda, os índices de refração, comprimento de onda de operação e o comprimento da seção multimodo (OKAMOTO, 2006).

O fenômeno da reimagem é uma consequência da MMI, onde interferências destrutivas e construtivas entre os múltiplos modos de propagação ocorrem ao longo do eixo de propagação da seção MMF e em uma determinada distância ocorre a reprodução do campo de entrada na seção multimodo (SOLDANO,1995) (ULRICH, 1975). Na figura 2.2a é apresentado seção longitudinal de um dispositivo por interferência multimodal em configuração SMS, em destaque alguns dos parâmetros utilizados para calcular o ponto de reimagem como, largura (w), comprimento (L) e índice de refração efetivo ($n_{eff}$) da seção multimodo, também apresenta o campo de entrada proveniente do guia monomodo e ($n_0$) índice de refração do meio externo. A figura 2.2b apresenta o perfil de propagação do campo, onde os pontos em preto representam as interferências destrutivas e os pontos

em branco as interferências construtivas ao longo do eixo de propagação z (OKAMOTO, 2006).

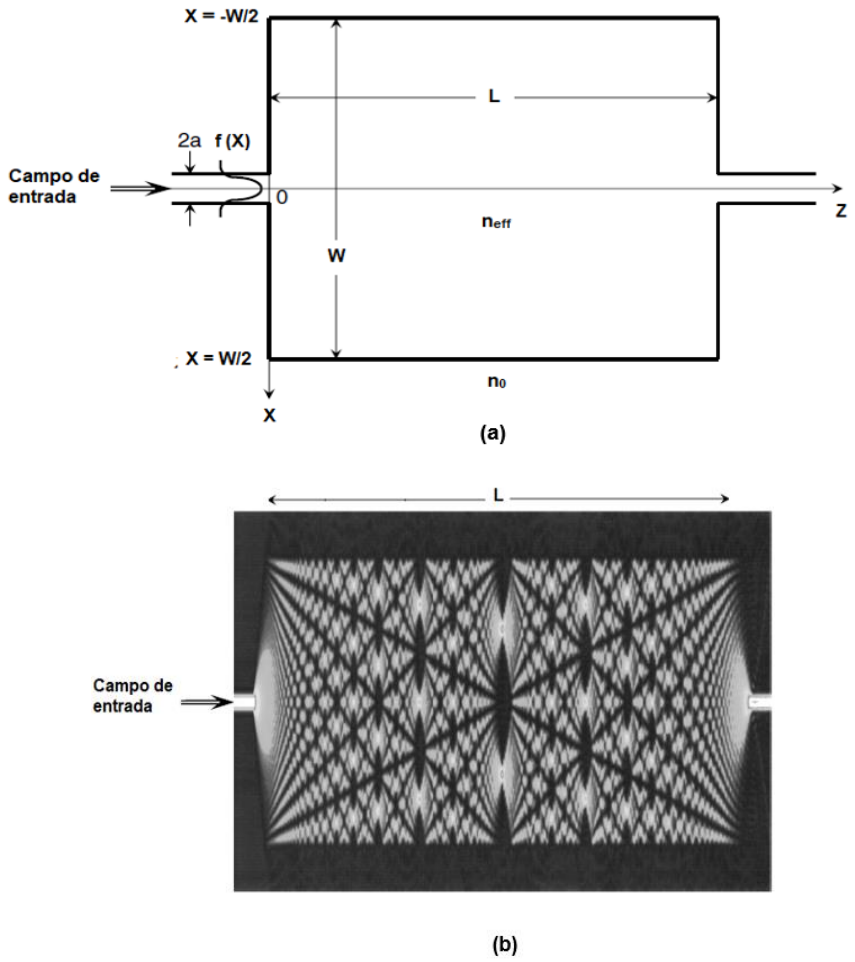



Figura 2.2: (a) Dispositivo por MMI na configuração SMS em guias onda planares. (b) Perfil de propagação ao longo do comprimento L da seção multimodo, com os pontos de interferência destrutiva em preto e pontos de interferência construtiva em branco.
Fonte: (OKAMOTO, 2006) adaptado pelo autor deste trabalho.

Os dispositivos baseados em MMI receberam grande atenção nos últimos anos e os princípios destes dispositivos incialmente estudados em guias planares foram aplicados em fibra ótica (PACHON,2013). Uma grande quantidade de dispositivos de sensoriamento foram apresentados em fibra ótica operando com base no princípio da reimagem. Destacando-se as aplicações dos sensores a fibra ótica em estrutura SMS como

sensores de vibração (GAO,2018), temperatura (ZHANG,2013), tensão mecânica (SUN,2018), curvatura (GONG, 2011) e índice de refração (ZIYANG, 2016). O sensor a fibra ótica do tipo SMS se destaca por apresentar baixo custo de fabricação, simplicidade em sua montagem, que utiliza basicamente um equipamento para realizar a fusão das fibras através de arco voltaico e ferramentas de clivagem de fibra ótica (CHEN, 2013) (VILLATORO, 2006). O fenômeno da interferência multimodal em uma fibra ótica segue os mesmos princípios apresentados para um guia planar, ocorrendo a excitação de múltiplos modos de propagação quando a luz é lançada da SMF para MMF e os campos eletromagnéticos dos modos sofrem interferências construtivas e destrutivas na seção de MMF (MOHAMED, 2004) (MEHTA,2003) (SALDANO,1995). Na Figura 2.3 é apresentado a configuração de uma estrutura SMS em fibra ótica, exemplo de perfil de propagação do campo e transmissão ao longo do eixo z de propagação (LOPEZ, 2013). Ao se analisar o perfil de propagação em conjunto com o gráfico de transmissão, é possível observar que a primeira seta da esquerda para direita apresenta um ponto de interferência construtiva entre os modos de propagação na distância L≈15 mm com uma queda de potência de aproximadamente 50% em relação a potência de entrada, o segundo ponto apresenta uma interferência destrutiva em L≈30 mm com uma queda de potência de 100%, o terceiro ponto apresenta uma interferência construtiva em L≈45 mm com uma queda de potência de aproximadamente 50% e no quarto ponto é observado em L≈60 mm a ocorrência de uma interferência construtiva com uma reprodução de aproximadamente 98% da potência do sinal original de entrada na MMF. Para o caso de uma fibra no-core com núcleo com diâmetro de 125μm e índice de refração 1,4440 para um comprimento de onda de 1550 nm, o ponto de reimagem ocorreu em aproximadamente 60mm da seção de MMF (LOPEZ, 2013).

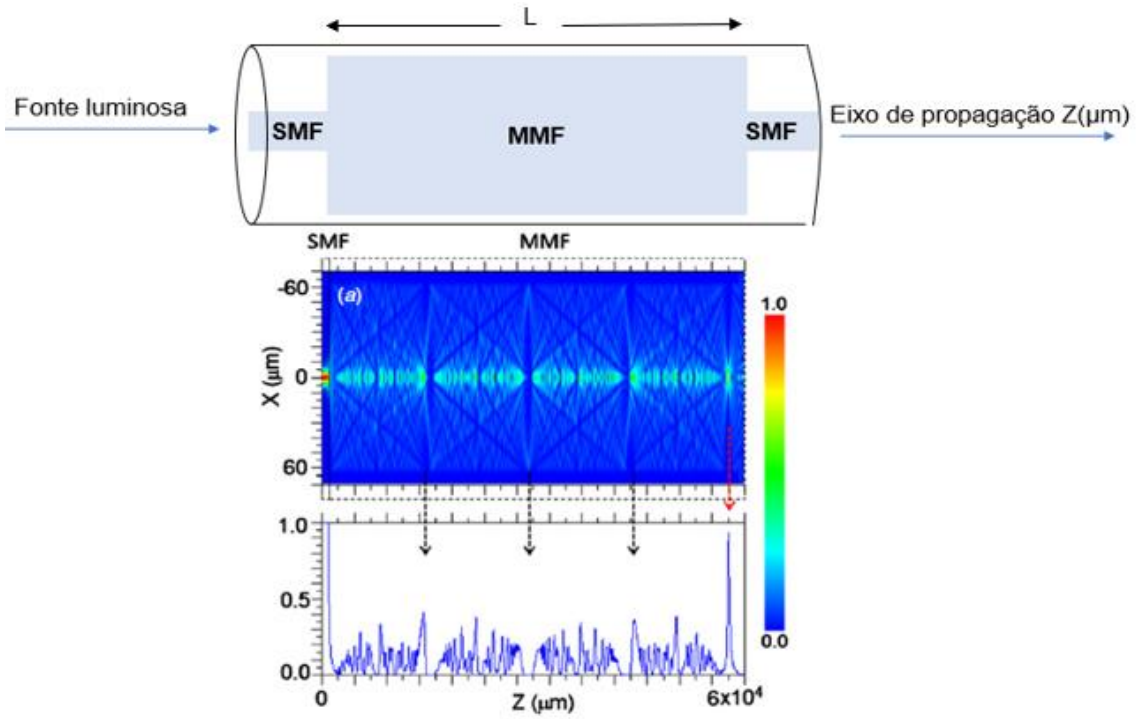



Figura 2.3: Na parte superior uma estrutura SMS em fibra ótica, na parte central o perfil de propagação do campo ao longo da seção de MMF e gráfico de transmissão. As setas representam as interferências entre os modos de propagação e destaco em vermelho o ponto de reimagem ocorrendo em L≈60mm.
Fonte: (LOPEZ, 2013) adaptado pelo autor deste trabalho.

### 2.1.1 – Ponto de Reimagem

O modo fundamental proveniente da SMF excita os múltiplos modos na seção de MMF (HATTA, 2009). Para um comprimento de onda em particular, se a maioria dos modos estiverem em fase, ocorre uma interferência construtiva na saída da SMF e uma maior intensidade (pico) no espectro em transmissão do sinal é observado. De forma similar, uma redução na intensidade do sinal (vale) é observada quando os modos não estão em fase, resultando em uma interferência destrutiva (MOHAMMED,2004). Os pontos de interferência (picos e vales) em uma estrutura de sensoriamento SMS depende do comprimento da seção de MMF e do comprimento de onda lançado na fibra

(COSTA,2019). O ponto de reimagem pode ser observado no quarto ponto da esquerda para direita, no caso apresentado a figura 2.3 (LOPEZ, 2013). A reimagem pode ser definida como uma consequência da interferência multimodal, a qual um perfil de campo de entrada é praticamente reproduzido através de interferência construtiva máxima entre os modos de propagação em um intervalo periódico ao longo da direção de propagação da MMF (KUMAR, 2019).

Dos vários modos excitados na entrada da MMF, normalmente dois modos consecutivos são mais excitados, possuindo uma maior eficiência de acoplamento (figura 2.5), consequentemente transportando uma parcela maior de potência luminosa e, apresentando as constantes de propagação $\beta_m \; e \; \beta_{m+1}$. A reimagem vai ocorrer a uma distância de propagação $L_p$, com a seguinte relação (MORSHED,2011) (PACHON,2013):

$$(\beta_m - \beta_{m+1})L_p = 2p\pi, \tag{2.9}$$

onde p é um número inteiro.

As amplitudes dos modos podem se somar, dependendo da diferença de fase entre os modos acoplados de maior eficiência e todos os outros, e como resposta ocorre um aumento na intensidade do sinal (interferência construtiva). As amplitudes dos modos também podem se subtrair, interferindo negativamente e reduzindo a intensidade (interferência destrutiva) (GONG, 2011). O ponto de reimagem depende da diferença de fase entre os modos acoplados. Em uma fibra do tipo índice degrau, os modos excitados são os linearmente polarizados e para estes modos é possível realizar a aproximação (MORSHED,2011) (FERNANDES,2016):

$$\beta_m \approx \frac{\pi\lambda}{8a^2 n_{núcleo}}(-2m^2 + m), \tag{2.10}$$

onde $\lambda$ é o comprimento de onda, $a$ é o raio do núcleo da MMF, $n_{núcleo}$ é o índice de refração no núcleo da MMF. Desta forma, a diferença de fase entre os modos é definida por (MOHAMMED,2004) (HATTA, 2009) (GONG, 2011) (COSTA,2019):

$$\beta_m - \beta_{m+1} = \frac{\pi\lambda}{8a^2 n_{núcleo}}(4m+1). \quad (2.11)$$

Aplicando a equação 2.11 na equação 2.9, temos:

$$L_p = \frac{16a^2 n_{núcleo} p}{(4m+1)\lambda}, \quad (2.12)$$

onde $\beta_m - \beta_{m+1}$ é a diferença de fase entre as constantes de propagação, $p$ é um número inteiro ($p$ = 1, 2, 3, ...) e $L_p$ é a distância onde é formada a reimagem. Para $p = 1\ e\ m = 0$, a distância $L_P$ é dada por (MORSHED,2011) (FERNANDES,2016):

$$L_p = \frac{16a^2 n_{núcleo}}{\lambda} \quad (2.13)$$

A estrutura de sensoriamento SMS utilizada neste trabalho é formada por duas fibras SMF do tipo (Corning SMF-28) e uma seção de MMF do tipo no-core (FG125LA). Na tabela 2.1 é apresentado especificações técnicas das fibras que formam a estrutura SMS utilizada neste presente trabalho.

Tabela 2.1: Especificações técnica dos dois tipos de fibras óticas utilizadas na montagem da estrutura de sensoriamento em configuração SMS (CORNING,2014) (THORLABS, 2017).

| | **TIPO DE FIBRA ÓTICA** | |
|---|---|---|
| **PARÂMETROS** | SMF (Corning SMF-28) | MMF (FG125LA) |
| Índice de refração núcleo | 1,4492 | 1,444 |
| Índice de refração casca | 1,4402 | Não possui casca |
| Raio do núcleo | 4,1µm | 62,5µm |
| Raio da casca | 62,5µm | Não possui casca |

Com as especificações técnicas apresentadas na tabela 2.1 e com as especificações técnicas das fontes óticas utilizadas, é possível aplicar os dados numéricos da seção de MMF na equação 2.13 e obter como resultado a distância de formação da reimagem para o tipo de sensor SMS proposto para os dois comprimentos de onda de emissão (1477 nm e 1550 nm) utilizados neste trabalho.

$$L_{p(1550)} = \frac{16\times(62{,}5\mu m)^2\times 1{,}444}{1{,}55\mu m} = 5{,}82cm \tag{2.14}$$

$$L_{p(1477)} = \frac{16\times(62{,}5\mu m)^2\times 1{,}444}{1{,}480\mu m} = 6{,}10cm \tag{2.15}$$

onde $L_{P(1550)}$ é a distância de reimagem para o comprimento de onda de 1550 nm da fonte banda larga e $L_{P(1477)}$ é a distância de reimagem para o comprimento de onda de 1447 nm emitido pelo laser diodo.

### 2.1.2 – Modelagem matemática e computacional da eficiência de acoplamento

O desenvolvimento de um modelo computacional é essencial analisar a diferença de comportamento do modelo matemático e dos resultados experimentais realizados em bancada. O modelo computacional proposto utiliza a aproximação de modos linearmente polarizados para determinar a posição de reimagem e o espectro transmitido na MMF. Tendo em vista que o presente trabalho utiliza duas fontes óticas em dois diferentes comprimentos de onda (1477 nm e 1550 nm), a modelagem será realizada para cada fonte ótica separadamente e os resultados apresentados.

O campo radial de entrada proveniente da SMF é aproximado de um feixe gaussiano (HATTA, 2009) (KUMAR, 2019) (COSTA,2019):

$$\overrightarrow{E_s}(r,z) = e^{-\left(\frac{r}{\bar{\omega}}\right)^2}.e^{-j\beta_0 z}\hat{x} \quad , \tag{2.16}$$

onde $\beta_0$ é a constante de propagação longitudinal do modo $LP_{01}$ da SMF, $r$ é a coordenada radial da fibra, $z$ a coordenada longitudinal e $\bar{\omega}$ o raio do feixe gaussiano que pode ser determinado por (MOHAMMED,2004) (PACHON,2013) (COSTA,2019):

$$\bar{\omega} = \frac{a_0}{\sqrt{ln2}}(0{,}65 + 1{,}619V^{-1{,}5} + 2{,}879V^{-6}), \tag{2.17}$$

onde $a_0$ é o raio do núcleo da SMF e $V$ é a frequência normalizada que é dada por $V = (2\pi a_0/\lambda)\sqrt{n_{núcleo}^2 - n_{casca}^2}$ (PACHON,2013) (COSTA,2019). Onde $\lambda$ é o comprimento de onda, $n_{núcleo}$ é o índice de refração no núcleo e $n_{casca}$ é o índice de refração na casca da SMF.

O campo de entrada na SMF representado pela equação 2.16 excita alguns dos múltiplos modos guiados na MMF e a distribuição de campo em qualquer ponto do eixo de propagação da MMF pode ser descrito como (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019):

$$\vec{E}(r,\theta,z) = \sum_{\mu=-M}^{M}\sum_{v=1}^{N}\vec{\psi}_{v,\mu}(r,\theta,z) \tag{2.18}$$

onde μ e $v$ indicam os índices para os componentes modais azimutal e radial, respectivamente. O vetor complexo do campo nos modos guiados é representado por $\vec{\psi}_{v,\mu}(r,\theta,z)$. Através da aplicação do método de separação de variáveis e desenvolvimento das equações de Maxwell no interior da MMF para modos linearmente polarizados, o vetor complexo do campo nos modos guiados é dado por (MOHAMMED,2004):

$$\vec{\psi}_{v,\mu}(r,\theta,z) = \begin{cases} C_{v,\mu}\, J_\mu\left(u_{v,\mu}\frac{r}{a}\right)\cos(\mu\theta)\, e^{-i\beta_{v,\mu}z}\hat{x} & r \le a \\ d_{v,\mu}\, K_\mu\left(w_{v,\mu}\frac{r}{a}\right)\cos(\mu\theta)\, e^{-i\beta_{v,\mu}z}\hat{x} & r > a \end{cases}, \tag{2.19}$$

onde $C_{v,\mu}$ e $d_{v,\mu}$ são as constantes de excitação dos campos no núcleo e na casca, respectivamente. Os símbolos $u_{v,\mu}$, $w_{v,\mu}$, $\beta_{v,\mu}$ e $a$, são as constantes de propagação transversais normalizadas no núcleo da MMF, na casca, constante de propagação longitudinal para este modo de propagação e o raio da MMF utilizada. As constantes de propagação transversais normalizadas para o núcleo $(u_{v,\mu})$ e casca $(w_{v,\mu})$, são definidas por (MOHAMMED,2004):

$$u_{v,\mu} = a\sqrt{{k_0}^2 n_{núcleo}^2 - \beta_{v,\mu}^2} \tag{2.20}$$

$$w_{v,\mu} = a\sqrt{\beta_{v,\mu}^2 - {k_0}^2 n_{casca}^2} \tag{2.21}$$

onde $k_0$ é o número de onda no espaço livre.

As constantes de excitação no núcleo e na casca $(C_{v,\mu}\ e\ d_{v,\mu})$ podem ser obtidas através da relação (MOHAMMED,2004):

$$d_{v,\mu} = \frac{J_\mu(u_{v,\mu})}{K_\mu(w_{v,\mu})}\ C_{v,\mu} \quad . \tag{2.21}$$

A relação 2.19 pode ser aplicada na equação 2.18 para se obter as componentes modais radial e azimutal na MMF. Na posição z = 0 do eixo de propagação da MMF, a projeção campo de entrada proveniente da SMF definido na equação 2.16 passa a ser expresso por $\overrightarrow{E_s}(r,0) = e^{-\left(\frac{r}{\bar{\omega}}\right)^2}\hat{x}$. A representação do campo de entrada proveniente da SMF não possui componentes azimutais e desta forma, a distribuição de campo dentro da MMF também não irá possuir componentes azimutais, resultando em $\mu = 0$. A representação das componentes do campo na MMF passa a ser o somatório das componentes radiais $(LP_{0,v})$, resultantes da solução das equações de Bessel. Desta forma, os modos excitados na MMF possuem somente componentes radiais em z = 0 (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019):

$$\overrightarrow{E_s}(r,0) = \begin{cases} \sum_{v=1}^{N} C_{v,0}\, J_0\left(u_{v,0}\,\frac{r}{a}\right)\hat{x} & r \le a \\ \sum_{v=1}^{N} d_{v,0}\, K_0\left(w_{v,0}\,\frac{r}{a}\right)\hat{x} & r > a \end{cases} \tag{2.22}$$

O cálculo do coeficiente de excitação de campo será realizado através do coeficiente de acoplamento da potência $(\eta_v)$. O coeficiente de acoplamento de potência permite determinar a eficiência de acoplamento do modo fundamental da SMF com cada modo guiado da MMF. Pode ser determinado através de integrais de correlação entre os campos $E_S$ e $E_v$ (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019).

$$\eta_v = \frac{\left|\int_0^{\infty} E_S(r)E_v(r)rdr\right|^2}{\int_0^{\infty}|E_S(r)|^2 r\, dr \int_0^{\infty}|E_v(r)|^2 rdr} \tag{2.23}$$

onde $E_v$ representa o campo de distribuição do $v^{th}$ modo guiado radial.

O campo de entrada da SMF é lançado através de um diâmetro muito menor que o da MMF, podendo ser desprezada a equação de campo na casca da MMF no numerador da equação 2.23, apresentando somente a relação entre os campos do núcleo da SMF e MMF. Sendo assim, os coeficientes de acoplamento dos campos podem ser obtidos através da relação $C_v = \sqrt{\eta_v}$, aplicando esta relação na equação 2.23 (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019):

$$\eta_v = \frac{\left|\int_0^{\infty} e^{-\frac{r^2}{\bar{\omega}^2}} J_0\left(\frac{u_v r}{a}\right)rdr\right|^2}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{2r^2}{\bar{\omega}^2}} rdr\left[\int_0^{a} J_0\left(\frac{u_v r}{a}\right)^2 rdr + \left(\frac{J_0(u_v)}{K_0(w_v)}\right)^2 \int_a^{\infty} K_0\left(\frac{w_v r}{a}\right)^2 rdr\right]} \quad . \tag{2.24}$$

Através de soluções analíticas, propriedades das transformadas de Hankel e formulação das raízes da função de Bessel de ordem zero, a equação é reduzida para (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019):

$$\eta_v = \frac{2\left(\frac{\omega}{a}\right)^2 e^{-\left(\frac{\omega}{a}\right)^2 \frac{u_v{}^2}{2}}}{J_1^2(u_v)+\left(\frac{K_1^2(w_v)}{K_0^2(w_v)}\right)J_0^2(u_v)} \tag{2.25}$$

As componentes normalizadas $u_v \, e \, w_v$ são obtidas através de (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019):

$$u_v = \left(2v - \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{2} \tag{2.26}$$

$$w_v = \sqrt{V_{MMF}^2 - \left(\left(2v - \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{2}\right)^2} \tag{2.27}$$

onde $V_{MMF}$ é a frequência normalizada da MMF, definida por $V_{MMF}^2 = u_v{}^2 + w_v{}^2$. A frequência normalizada da MMF é definida por (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019):

$$V_{MMF} = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_{núcleo}{}^2 + n_{casca}{}^2} \tag{2.28}$$

O programa utilizado para estudar a propagação do feixe luminoso ao longo da MMF foi desenvolvido originalmente através do software MatLab para o estudo e desenvolvimento de um sensor de curvatura em diferentes configurações na seção de MMF (COSTA,2019). O software foi adaptado pelo autor deste trabalho para o estudo do impacto na sensibilidade da estrutura de sensoriamento ao se utilizar configuração em fonte ótica dupla nos comprimentos de onda de 1470 nm e 1550 nm. A simulação é realizada com base nos dados técnicos dos dois tipos de fibra ótica empregadas na montagem do dispositivo por MMI em configuração SMS para o comprimento de onda de 1550nm e para o comprimento de onda de 1470 nm. Desta forma, é simulado uma estrutura SMS (MMF = 61,5 mm) conectada a uma fonte ótica de banda larga (1550 nm) e um laser de bombeio (1470 nm).

Com base nos dados técnicos das fibras utilizadas na montagem da estrutura SMS (tabela 1.1), foi calculado a eficiência de acoplamento de potência entre a SMF e a MMF, para cada modo guiado e o cálculo é realizado através do software MatLab, aplicando a equação 2.25. A figura 2.5 apresenta a eficiência de acoplamento de cada um dos modos, para os comprimentos de onda da fonte banda larga (1550 nm) e do laser de bombeio (1470 nm). Com os resultados apresentados na figura 2.5 e com a relação $C_v = \sqrt{\eta_v}$ , é calculado o coeficiente de acoplamento para cada um dos modos e os resultados são apresentados na tabela 2.2.

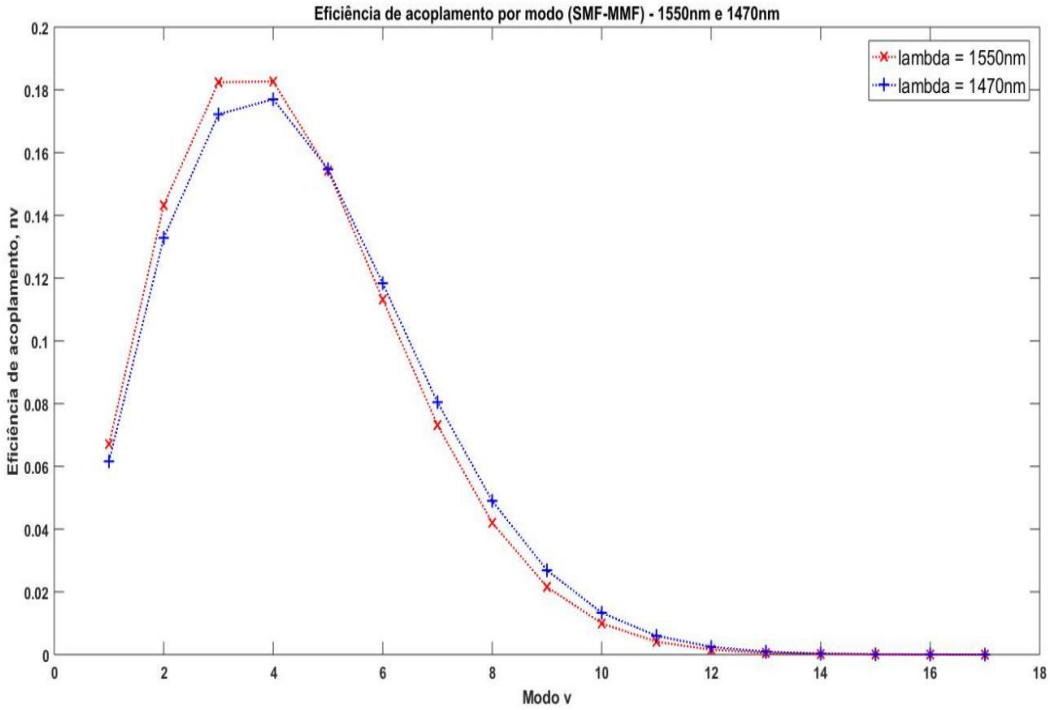



Figura 2.5: Eficiência de acoplamento de potência para cada modo guiado.

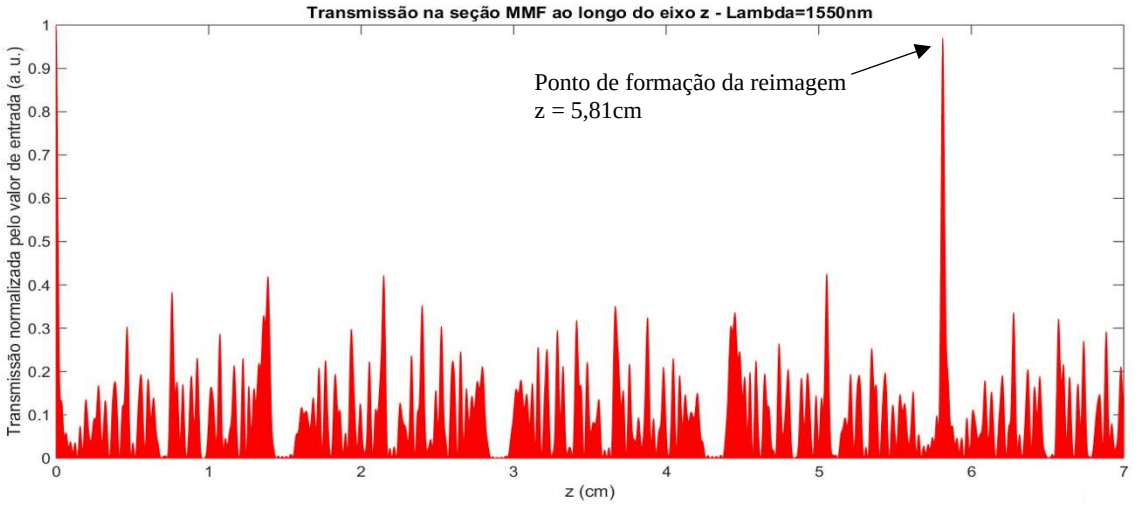
Tabela 2.1: Resultados obtidos para eficiência de acoplamento de potência e coeficiente de acoplamento de campo.

| | **SLD (λ = 1550 nm)** | | **LD (λ = 1470 nm)** | |
|---|---|---|---|---|
| **modo $v$** | $\eta_v$ | $C_v$ | $\eta_v$ | $C_v$ |
| 1 | 6,71% | 0,259 | 6,16% | 0,248 |
| 2 | 14,32% | 0,378 | 13,28% | 0,364 |
| 3 | 18,24% | 0,427 | 17,02% | 0,413 |
| 4 | 18,27% | 0,427 | 17,77% | 0,422 |
| 5 | 15,43% | 0,393 | 15,47% | 0,393 |
| 6 | 11,32% | 0,336 | 11,84% | 0,344 |
| 7 | 7,32% | 0,270 | 8,05% | 0,284 |
| 8 | 4,20% | 0,205 | 4,90% | 0,221 |
| 9 | 2,16% | 0,147 | 2,69% | 0,164 |
| 10 | 0,99% | 0,100 | 1,33% | 0,115 |

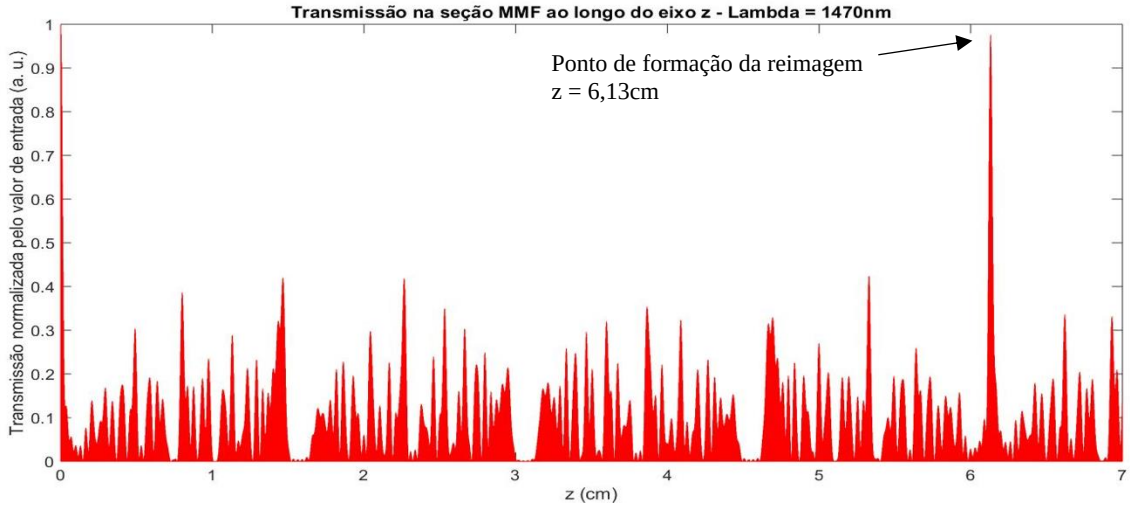
Com os resultados apresentados na figura 2.5 e tabela 2.1, é possível observar que os modos de ordem 2 a 6 apresentam maior coeficiente de excitação maior do que 10% para os comprimentos de onda de 1550 mm e 1470 nm. Além disso, o coeficiente de excitação em 1550 nm, é ligeiramente superior do que em 1470 nm para os modos de ordem 1 a 4 e este comportamento se inverte para os modos de ordem maior do que 4.

A transmissão de potência ao longo do eixo de propagação é calculada através do software MatLab, tomando como base a equação (2.18), que representa a distribuição de campo em qualquer ponto da seção MMF, onde o campo de entrada proveniente da SMF é representado por feixe gaussiano, como descrito na equação (2.16). As expressões que descrevem a distribuição de campo no núcleo e na casca do segmento de MMF são obtidas através da aproximação de modos linearmente polarizados. A equação do campo de entrada proveniente da SMF não possui componentes azimutais, desta forma, a distribuição de campo dentro da seção MMF também será desprovida de componentes azimutais e a representação das componentes do campo na MMF será obtido através do somatório de componentes radiais ($LP_{0,V}$), que é obtido através da solução das equações de Bessel (MOHAMMED,2004) (COSTA,2019). A transmissão de potência ao longo do eixo de propagação da MMF é simulada para os dois comprimentos de onda aplicados (1470 nm e 1550 nm), levando em consideração os dez primeiros modos guiados. Nas figuras 2.6a e 2.6b, são apresentados os resultados de transmissão de potência ao longo do eixo de propagação para os comprimentos de onda de 1550 nm e 1470 nm. Na figura

2.6a, a formação do ponto de reimagem apresenta uma reprodução de aproximadamente 97% da potência do sinal original na entrada na MMF, ocorrendo na distância de 5,81cm da MMF, apresentando uma diferença de 1% do calculado através da equação 2.14. A figura 2.6b apresenta no ponto de reimagem a reprodução de aproximadamente 97% do sinal original, ocorrendo a uma distância de 6,13cm da MMF e apresenta uma diferença de 3% do calculado através da equação 2.15.




(a)




(b)

Figura 2.6: Transmissão de potência ao longo de eixo de propagação z da MMF, nos 10 primeiros modos guiados, para os comprimentos: (a) 1550 nm e (b)1470 nm.

## 2.2 – Considerações

Neste capítulo, a modelagem de um sensor modalmétrico em configuração SMS em fibra ótica é apresentada para dois comprimentos de onda de emissão (1477 nm e 1550 nm). O ponto de reimagem, eficiência de acoplamento de cada um dos modos e o coeficiente de acoplamento, são calculados separadamente para cada comprimento de onda de emissão. No caso de emissão dos dois comprimentos de onda ao mesmo tempo, o formalismo aqui apresentado deve ser adaptado. No próximo capítulo, são apresentados e caracterizados os componentes utilizados na montagem do aparato experimental de um sensor de índice de refração em configuração SMS, com uma seção de MMF de aproximadamente 58mm e utilizando configuração de fonte ótica dupla.

# 3– CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO APARATO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito a caracterização de cada componente empregado na montagem do aparato experimental de um sensor de índice de refração baseada em interferência multimodal, o qual é alimentado por duas fontes luminosas. A configuração dos dispositivos utilizados no aparato experimental é apresentada na figura 3.1. O sinal proveniente das fontes luminosas (uma banda larga e um laser de bombeio) são combinados em um acoplador WDM, alimentam o sensor modalmétrico, e a resposta do sensor é monitorada em um analisador de espectro ótico (OSA). Na caracterização do laser diodo foi utilizado um OSA e um medidor de potência ótica para gerar a curva característica e com base nos resultados obter sua corrente de limiar, largura de linha, potência de pico e calcular a relação de potência fornecida por unidade de corrente. Nos demais componentes do circuito ótico (SLD e WDM) foi utilizado um OSA para analisar o comportamento do comprimento de onda de maior potência, largura de banda à meia altura (FWHM), perda por inserção e a potência média.

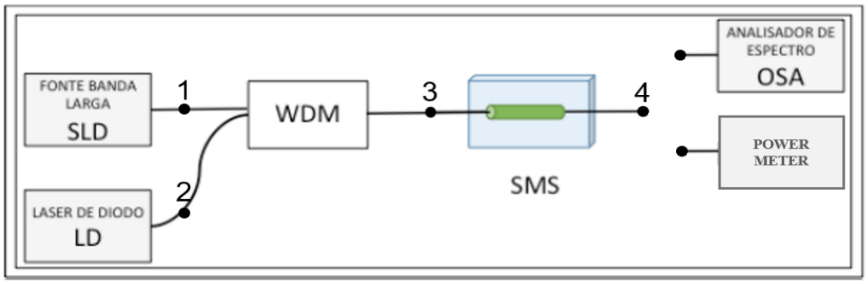



Figura 3.1: Configuração do aparato experimental com marcação dos pontos a serem caracterizados no circuito ótico.

### 3.1 –Fonte ótica

A fonte banda larga (Thorlabs S5FC1005S) se constitui em um diodo emissor de luz superluminescente (SLD) e que apresenta faixa de operação na banda convencional C (C-Band). Os valores típicos operacionais da fonte são: potência média de 3,42 mW, largura espectral de 50 nm, operação na faixa de comprimento de onda de 1530 nm à 1570 nm para uma corrente de 600 mA (THORLABS, 2017).

Na caracterização da fonte SLD foi analisado o comprimento de onda de maior potência à medida que a corrente na fonte SLD é aumentada de forma crescente em 50 mA a cada 10 minutos, com a corrente inicial de 50 mA e corrente final de 600 mA. O monitoramento e aquisição do espectro luminoso é realizado por um analisador de espectro ótico (JDSU MTS6000) conectado diretamente na saída da fonte banda larga (ponto 1 na figura 3.1). A figura 3.2a apresenta o comprimento de onda de maior potencial à medida que a corrente de polarização é variada, e na figura 3.2b é apresentado o espectro do sinal proveniente da fonte SLD para as correntes de 400 e 600 mA. É possível observar na figura 3.2a, que os comprimentos de onda de maior potência se deslocam para os comprimentos de onda mais curtos, a cada acréscimo na corrente elétrica, até saturar com uma potência de -17 dBm em 1558 nm. A saturação ocorre na faixa de comprimento de onda de 1558nm para as faixas de corrente de 400 a 600 mA. Na região de saturação, a fonte SLD apresenta uma menor flutuação na intensidade do sinal ótico em 1558 nm.

A partir do pico máximo de potência nos espectros apresentados na figura 3.2b é possível determinar graficamente o ponto de meia potência (-3 dB) e largura de banda da

fonte (FWHM – Full Widht at Half Maximum). Na corrente de 400 mA, com uma temperatura na fonte de 20ºC a atenuação de -3dB ocorreu na faixa de comprimento de 1538 a 1581 nm e assim apresentando um valor de FWHM de aproximadamente 43 nm. Em 600mA (20ºC) o ponto de meia potência ocorreu para as faixas de comprimento de onda 1543 a 1595 nm e o valor de FWHM é de aproximadamente 52 nm.

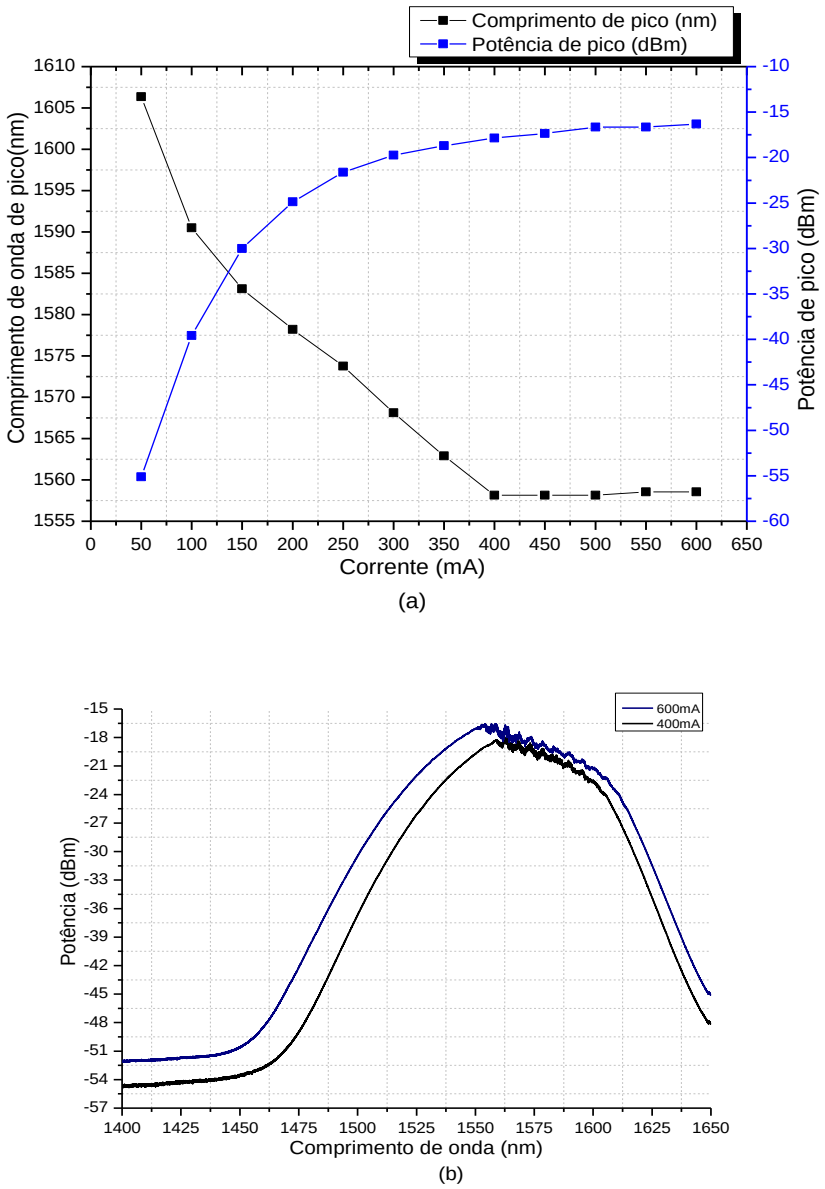



Figura 3.2: (a) curva característica da fonte SLD com um acréscimo de 50mA a cada 10 minutos e (b) espectro do sinal de saída da fonte SLD para as correntes de 400 e 600mA.

O laser de bombeio (LD-Lucent Tecnologies) tem encapsulamento do tipo butterfly e seus valores operacionais típicos são: potência média de 40 mW para corrente de limiar de 38 mA, comprimento de onda de emissão de 1477 nm, e largura de linha de próximo a 30 nm.

Uma fonte de corrente de baixo custo para a alimentação do laser de bombeio foi montada a partir de um projeto do Laboratório de Fotônica do IME. A fonte alimenta um circuito de controle de temperatura por célula de peltier e um circuito com elevado ganho de corrente para o bombeamento do laser. A fonte de corrente é constituída basicamente de um regulador de tensão LM317, um amplificador operacional LM358/NS, um transistor TIP41C, conectados através de um conector do tipo DB9 a uma placa de circuito eletrônico montada com dois soquetes ZIF de 28 pinos para acomodar o laser de bombeio em encapsulamento do tipo butterfly. O funcionamento do circuito pode ser descrito basicamente pela entrada de uma tensão de 3,16V proveniente do LM317, a tensão do circuito de realimentação chega ao LM358/NS em configuração não inversora e seu ganho máximo é calculado por $A_{vmax} = (1+(R_{14}/R_{eq15,16,17})$, apresentando $A_{vmax} \approx 6$. Após o sinal chega à base de um transistor NPN modelo TIP41C em configuração de emissor comum apresentando um ganho de corrente máximo que pode ser calculado por $A_{imax} = I_0/I_i$, $A_{imax} \approx 20$. Desta forma, funcionando como uma fonte de corrente para o LD.

A caracterização do laser de bombeio foi realizada através da aquisição de sua potência média por um medidor de potência ótica (Thorlabs PM20CH – power meter), à medida que a corrente no laser é incrementada em 0,5mA, com uma corrente inicial de 0,487mA e uma corrente final de 55,076mA. Na figura 3.3 é apresentada a curva característica do diodo laser e o método utilizado para determinar o limiar de corrente que é representado pela reta vermelha tracejada. A potência de emissão do laser aumenta a cada aumento de corrente, com uma inclinação horizontal até aproximadamente 40mA, apresentando o comportamento de um LED (emissão espontânea). No valor de corrente de aproximadamente 40,03mA é atingido o limiar do laser e a inclinação da reta sofre um aumento considerável. A determinação do limiar de corrente foi realizada ao se extrapolar a reta de maior inclinação, em seguida é observando o ponto onde toca o eixo que apresenta $I_{th} = 40,03$mA e neste ponto tem início a emissão estimulada no laser. Um outro

parâmetro técnico muito importante em um laser diodo é a quantidade de potência ótica emitida pelo dispositivo a cada unidade de corrente elétrica (W/A) injetada no semicondutor. Este tipo de parâmetro pode ser obtido através da inclinação da curva característica do dispositivo apresentado na figura 3.3 e calculado como:

$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{P(mW) - P_0(mW)}{I(mA) - I_0(mA)} \tag{3.1}$$

onde os valores obtidos são obtidos a partir da curva característica do dispositivo apresentando na figura 3.3, apresentando $\Delta P = 4{,}979mW - 1{,}175mW$ e $\Delta I = 67{,}038mA - 40{,}03mA$. Com o resultado obtido é possível concluir que o laser de bombeio utilizado no experimento fornece 0,141 (mW/mA). Os experimentos realizados ocorreram em temperatura ambiente de aproximadamente 23ºC e não foram realizados experimentos em diferentes condições de temperatura.

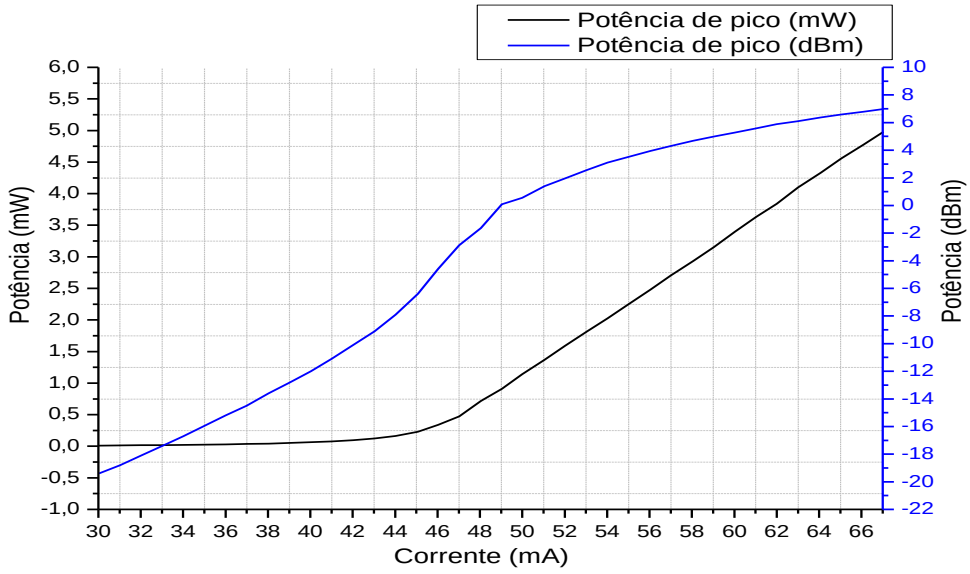



Figura 3.3: Curva característica laser de diodo a cada acréscimo de aproximadamente 0,5mA e determinação da corrente de limiar através da extrapolação da reta de maior inclinação.

Após a obtenção de sua curva característica, o dispositivo foi conectado de forma direta ao OSA e analisado sua resposta espectral. A figura 3.4, apresenta o espectro do sinal observado na saída do LD para a corrente de 50mA. Ao analisar o espectro na saída do LD para corrente de 50mA, observa-se que ocorre oscilação na amplitude, indicando a possibilidade de degradação do dispositivo. Para contornar tal situação, o espectro proveniente da fonte laser nas configurações de correntes de polarização utilizadas neste trabalho (80 e 50mA) passou por processos de suavização do sinal através de técnicas em filtragem digital e processamento de imagem, com o objetivo de obter o invólucro do sinal e permitir a observação de parâmetros como potência de pico, corrente de limiar e largura de linha do laser.

A técnica de filtragem digital de Savitzky Golay utiliza métodos de suavização de dados por aproximação polinomial através do método dos mínimos quadrados. Pode ser definido basicamente por uma janela com n amostras onde uma regressão polinomial é aplicada com o objetivo de se obter o valor suavizado à medida que a janela se desloca em cada ponto (SCHAFER, 2011). A suavização foi realizada para n = 200 e 500 amostras, para as etapas de caracterização do aparato experimental e caracterização do sensor.

O filtro da mediana (percentile ou rank-order filter) é um método de processamento digital, que funciona como um tipo de filtro de suavização aplicando uma varredura em cada ponto na imagem onde é calculado a mediana na região em torno do ponto e o valor do ponto é substituído pelo valor da mediana na região (DUIN, 1986). Para aplicação deste método de suavização foi utilizado 100 pontos no 94º percentil.

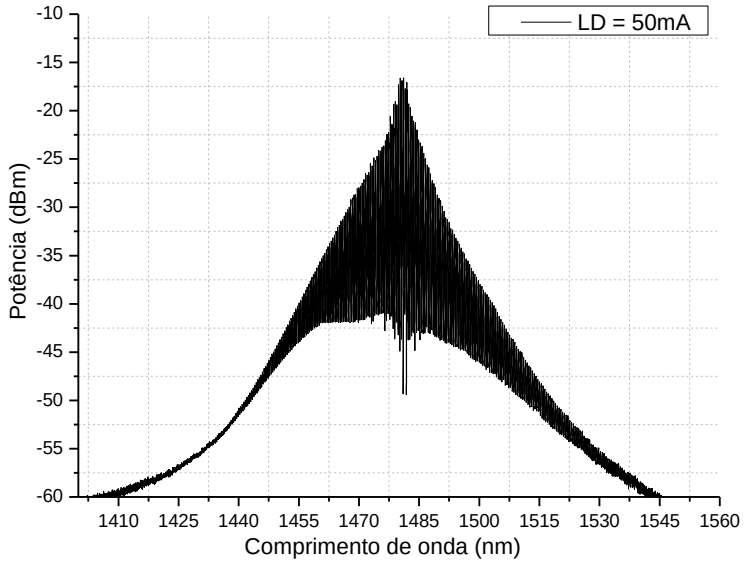



Figura 3.4: Espectro fonte LD configurada para corrente de 50mA antes de passar por processo de suavização através de filtragem digital e processamento de imagem.

Na figura 3.5 é apresentado o espectro da fonte LD configurado para uma corrente de polarização de aproximadamente 50 mA em temperatura ambiente (23ºC), após passar por processo de suavização do espectro pelas técnicas de Savitzky Golay e filtro da mediana. A partir do espectro é possível obter sua potência de pico que é igual a -16,877 dBm em $\lambda$=1480,767 nm. A largura de linha do espectro pode ser obtida graficamente a partir da figura 3.5. Ao tomar como referência o pico máximo de potência é possível determinar o ponto de meia potência, que ocorre entre os comprimentos de onda de 1478,34 a 1483,43 nm e a diferença entre os pontos apresenta a largura de linha do espectro que é de 5,09 nm para uma corrente de polarização de 50 mA.

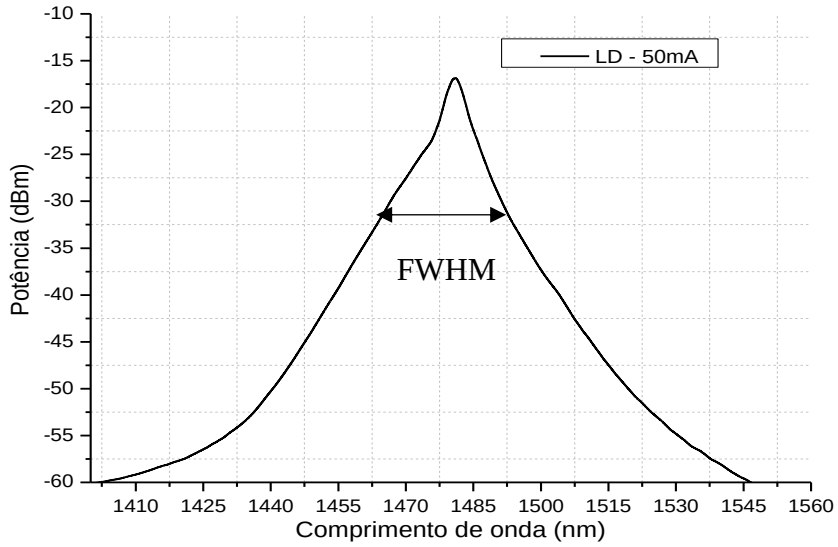



Figura 3.5: Espectro laser diodo polarizado em 50mA e determinação gráfica de sua largura de linha.

### 3.2 – Caracterização do filtro WDM

O WDM-mux (FDK-YM1045) utilizado é um dispositivo passivo, com faixa de operação na banda curta (short) (S-Band) e banda convencional (C-Band), que realiza multiplexação através da técnica de acoplamento de potência no entrelaçamento de fibras fundidas (FBT – Fused Biconic Technology), aquecidas a uma temperatura de 1500 ºC e tracionadas (YOU, 2002). A fibra ótica utilizada no dispositivo WDM é uma fibra do tipo monomodo (SMF-28) com camada dupla de acrilato (CPC6) e possui dispersão zero entre as faixas de comprimento de onda de 1301,5 à 1321 nm (CORNING, 2014). O dispositivo apresenta duas portas de entrada e uma saída em multiplexação ou uma porta de entrada e duas saídas na demultiplexação. Os comprimentos de onda de operação de referência das portas são: P1 (1480 nm), P2 (1550 nm) e P3 (1480 nm à 1550 nm). O dispositivo é utilizado como multiplexador e entre as entradas (P1↔ P3) apresenta operação na faixa de 1460 a 1490 nm e nas entradas (P2↔ P3) operação na faixa de 1530 a 1565 nm. A figura 3.6 apresenta a configuração do WDM FDK-YM1045 (FDK, 2015).

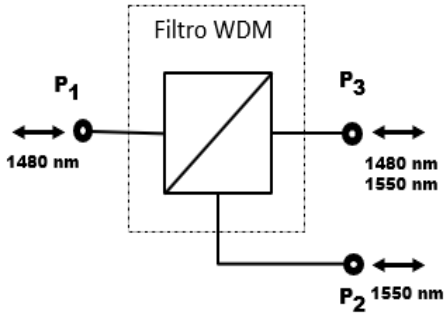



Figura 3.6: Configuração do WDM-mux (FDK-YM1045).

O dispositivo tem como parâmetro típicos operacionais diretividade de 65 dB ($P_1 \leftrightarrow P_2$), dispersão plana de 0,06 dB ($P_1 \leftrightarrow P_3$), perda de retorno de 60 dB, perda dependente de polarização de 0,02 dB, dispersão no modo de polarização de aproximadamente 0,01 ps e perda por inserção de 0,4 dB ($P_1 \leftrightarrow P_3$) e 0,3 dB ($P_2 \leftrightarrow P_3$) (FDK, 2020). Na caracterização do dispositivo WDM-mux o parâmetro técnico considerado e analisado para o tipo de aplicação é a perda por inserção entre o sinal de entrada e saída no aparato experimental. A perda por inserção (insertion loss – IL) ocorre devido à perda de potência ótica entre a entrada e saída do dispositivo (MUKHERJEE, 1992). A perda de inserção pode ser definida como $IL = -10 \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$ (SAMI, 2012).

Neste trabalho o WDM-mux é utilizado para combinar os sinais de uma fonte de banda larga com largura de banda de 145 0 nm até 1650 nm e um laser diodo com operação em torno de 1470 nm. Com o objetivo de caracterizar o dispositivo WDM (FDK-YM1045) foi conectado em $P_2$ a fonte banda larga (SLD), em $P_3$ o laser diodo (LD) e na saída P1 foi monitorado o espectro do sinal através do analisador de espectro ótico. Os espectros dos sinais para os valores de corrente injetadas no laser (50 e 80 mA) e SLD (400 mA) são apresentados na figura 3.7. Após a passagem pelo WDM, o espectro do sinal passou a apresentar operação na faixa de comprimento de onda em uma parte da banda estendida E (1360 à 1460 nm), banda curta S (1460 à 1530 nm), banda convencional C (1530 à 1565 nm) e banda longa L (1565 à 1625 nm). Outro ponto importante observado é que os resultados apresentam um vale bem definido próximo de

1500 nm, que ocorre devido a faixa de operação do WDM entre as portas ($P_1 \leftrightarrow P_3$) em torno de 1460 a 1490 nm. As perdas por inserção entre as portas ($P_1 \leftrightarrow P_3$) foi de 0,46473 dB e para as portas ($P_2 \leftrightarrow P_3$) 0,20114 dB. Os comprimentos de onda de maior potência foram 1482nm com potência de -8,0309 dBm, 1480nm com potência de -16,8631 dBm e 1558 nm com potência de -20,2061 dBm para as configurações de corrente no laser diodo em 80 mA, 50 mA e 0 mA, respectivamente.

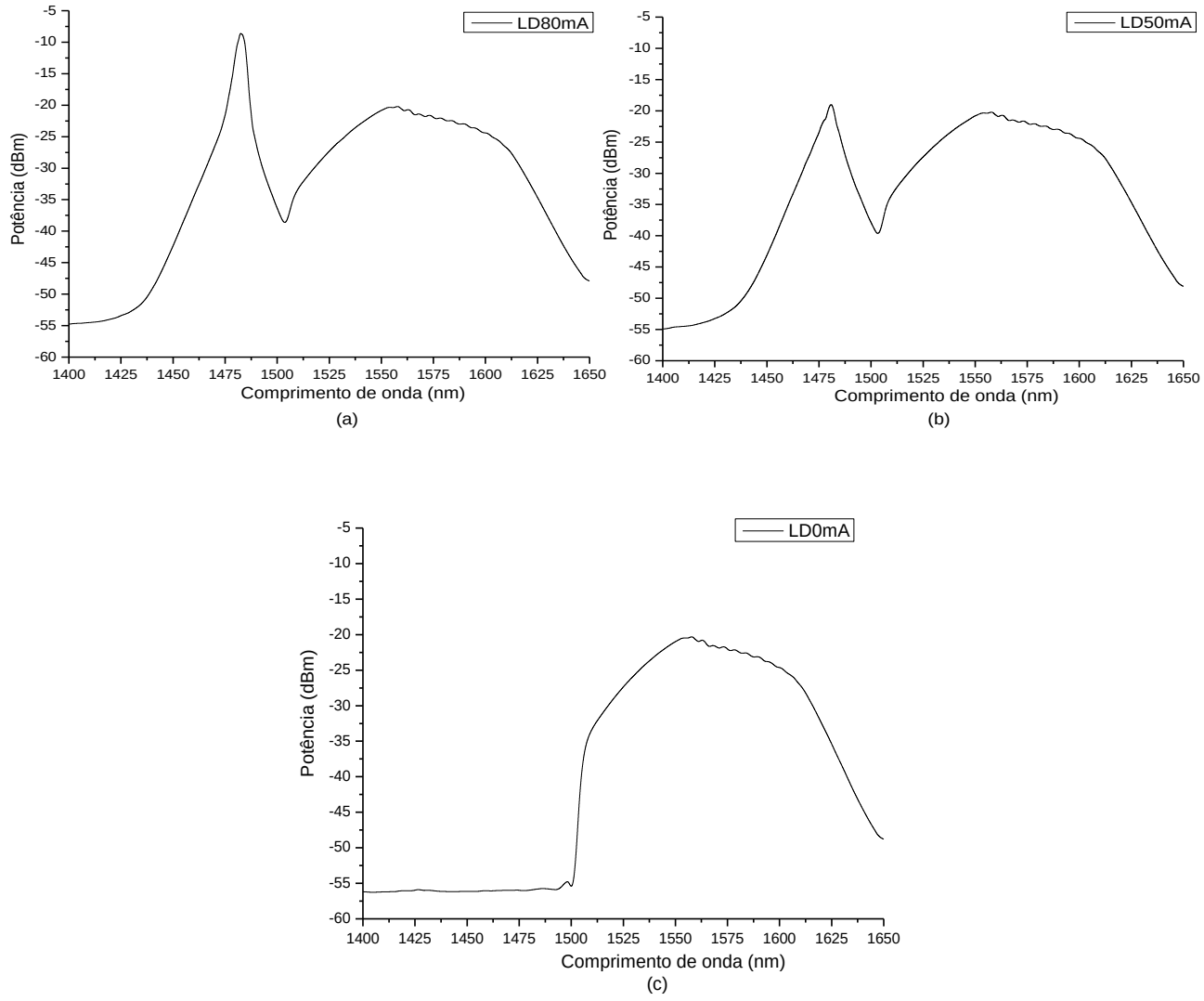



Figura 3.7: Espectro do sinal após WDM em configuração de fonte dupla, com corrente na fonte SLD fixa em 400mA e diferentes configurações de corrente no LD: (a) $I_{LD}$ =80 mA, (b) $I_{LD}$ =50 mA e (c) $I_{LD}$ =0 mA.

### 3.3 – Caracterização do Sensor SMS

A SMF acopla o sinal luminoso a MMF no-core e diversos modos de propagação são excitados. A SMF utilizada (Corning SMF-28) possui dispersão zero entre as faixas de comprimento de onda de 1301,5 à 1321 nm, com índice de refração no núcleo $n_{cr}$=1,4492, índice de refração na casca $n_{cl}$=1,44024, núcleo com raio de 4,1 μm e casca com raio de 62,5μm (CORNING,2014). Na seção multimodo é utilizado uma MMF no-core (FG125LA), que é uma fibra de sílica formada somente por núcleo com diâmetro de 125 μm, comprimento da seção de fibra com 58mm, apresenta operação para as faixas de comprimento de onda de 400 a 2400 nm e índice de $n_{no\text{-}core}$ = 1,444 para a faixa de comprimento de onda de 1550 nm (THORLABS, 2017).

Na figura 3.8 são apresentados os espectros do sinal em transmissividade na saída da estrutura SMS para a corrente na fonte banda larga (SLD) constante em 400 mA, fonte LD desligada em 3.8c, em 3.8b LD polarizado em 50 mA e 3.8a apresenta o LD polarizado em 80 mA. Após a passagem do espectro pelo sensor SMS os diversos modos de propagação provocam interferência multimodal que pode ser observada pelo padrão de interferência que apresenta pontos com padrão de interferência destrutiva (vales) e pontos com padrão de interferência construtiva (picos). Ao analisar gráfico na figura 3.8c, é possível observar que o espectro do sinal na saída da SMS em configuração simulando uma única fonte de alimentação com a corrente na fonte SLD em 400 mA e LD (0 mA), apresenta vales e picos nos comprimentos de onda de 1500 a 1650 nm. Quando a corrente no LD é configurada para a faixa de polarização em 3.8a e 3.8b o espectro do sinal passa a apresentar operação em uma parte da banda estendida E (1360 à 1460nm), banda curta S (1460 à 1530 nm), banda convencional C (1530 à 1565 nm) e banda longa L (1565 à 1625 nm).

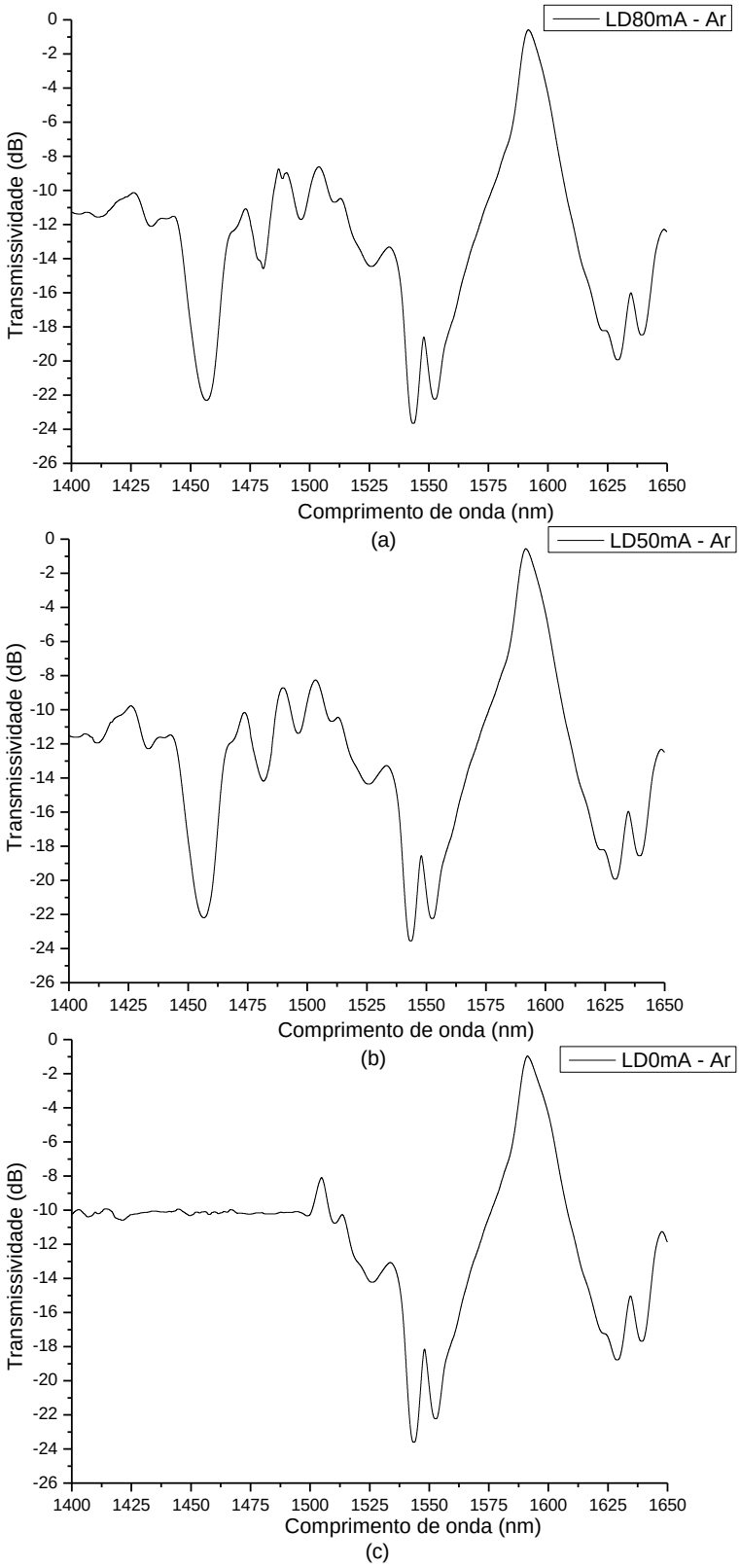



Figura 3.8: Espectro do sinal na saída do sensor SMS em configuração de fonte dupla para três valores corrente no laser (a) 80 mA, (b) 50 mA e (c) 0 mA após sensor SMS.

### 3.4 – Analisador de Espectro Ótico (OSA) e Medidor de Potência Ótica

Uma das etapas mais importantes em instrumentação ótica para se garantir a confiabilidade dos resultados obtidos na caracterização dos componentes óticos é a interrogação do sensor ótico utilizado. A caracterização de um componente ótico se faz necessário para se obter um entendimento como um todo do resultado e adquirir alguns parâmetros como as perdas por inserção em cada componente e outras informações necessárias para avaliar a resposta do sistema em cada configuração experimental. A caracterização dos componentes óticos do circuito se deu pela utilização de um Analisador de Espectro Ótico (JDSU600) e um Medidor de Potência Ótica (Thorlabs PM20CH).

O Analisador de Espectro Ótico (OSA) é um dos equipamentos de bancada mais utilizados em instrumentação ótica para a realização do processo de caracterização e interrogação de dispositivos óticos. Neste trabalho foi utilizado o Analisador de Espectro Ótico (JDSU600) disponível no laboratório LAFOT, composto por um módulo OSA-110M no MTS-6000, que é uma plataforma modular de instrumentação ótica e apresenta operação para as faixas de comprimento de onda entre 800 nm até 1650 nm, com resolução típica de 100pm, sensibilidade máxima de +23 dBm, possuindo atenuador interno (JDSU, 2020). A aquisição de dados se deu através de um computador de bancada conectado via ethernet ao OSA, configurado para uma aquisição de dados automatizada e de pré-processamento de dados experimentais que será descrito a seguir.

As desvantagens em se utilizar um analisador de espectro ótico é sua baixa velocidade de interrogação de aproximadamente 1 Hz, com uma resolução de aproximadamente 100 pm e o tempo gasto para aquisição e processamento de dados adquiridos (YAO, 2015). O tempo gasto no processamento de dados se dá, pois, a maioria dos analisadores de espectro ótico de bancada realizam o armazenamento dos dados no próprio dispositivo e a coleta dos dados é feita através da porta USB. Além de os arquivos gerados pelo equipamento serem em formato .txt, dificultando o processamento dos dados. Desta forma ocorrendo um gasto de tempo considerável para se obter os dados

para se iniciar a análise de resultados para muitas medidas experimentais. Neste contexto, foi desenvolvida em (SOUSA, 2019) uma plataforma para transferência de arquivos via protocolo FTP, um processamento de dados para conversão do arquivo originalmente em .txt para .cvs (formato padrão ASCII), script em Phython para permitir o pré-processamento do espectro e controle remoto através de um sistema de compartilhamento gráfico de tela (VNC – Virtual Networking Computing) que utiliza protocolo RFB (Remote Frame Buffer).

O medidor de potência ótica é um outro dispositivo amplamente utilizado em instrumentação ótica e na caracterização de componentes. Este é formado basicamente por um detector ótico de semicondutores que possui a função de converter sinal ótico em elétrico, permitindo a medição da potência ótica média em seu fotodiodo. O medidor de potência ótica (Thorlabs PM20CH) utilizado na caracterização dos componentes possui detector de InGaAs (índio-gálio-arsênio), largura espectral de 800 a 1700nm e faixa de potência de -50 dBm até 23 dBm (10 nW – 200 mW) (JDSU, 2012).

Na figura 3.9, é apresentado configuração completa montada em bancada de testes com o analisador de espectro ótico, fontes de alimentação ótica e todo o aparato experimental necessário para caracterização de cada componente a ser utilizado na estrutura de sensoriamento SMS para medição de índice de refração.

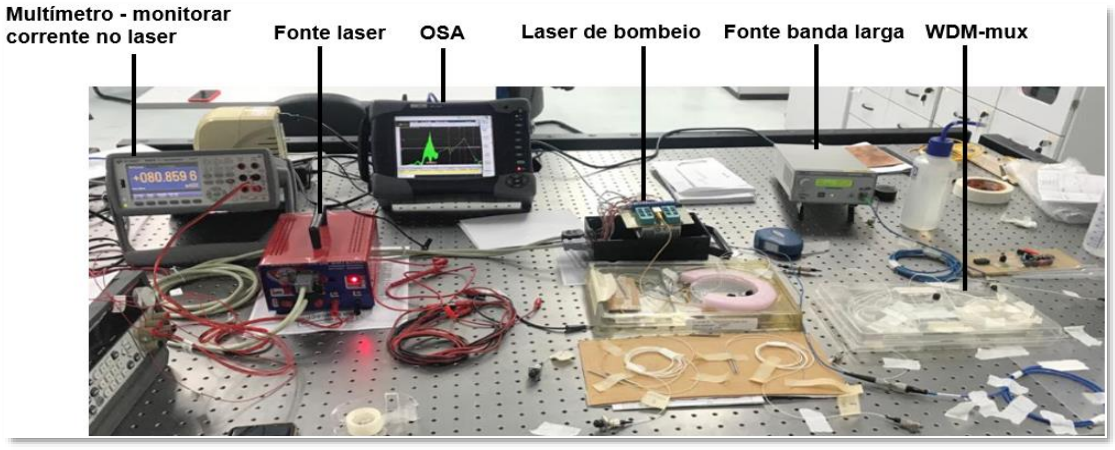



Figura 3.9: Foto dos componentes utilizados na caracterização dos dispositivos, tirada no laboratório de fotônica do CEFET-RJ.

# 4 – ANÁLISE DE UM SENSOR MODALMÉTRICO EM CONFIGURAÇÃO DE FONTE DUPLA

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais de um sensor modalmétrico para medição de índice de refração empregando uma fonte de banda larga com operação na faixa de 1514 a 1614 nm e um laser de diodo com operação na faixa de 1480 nm. Os resultados experimentais são apresentados e comparados para dois grupos de experimentos na mesma topologia, porém com variação nos valores das correntes de polarização das fontes luminosas utilizadas.

No primeiro grupo de experimentos o sensor na configuração de fonte dupla com a corrente na fonte banda larga (SLD) selecionada em 600 mA, corrente de polarização na fonte laser (LD) em 80mA é exposto a dezoito soluções com diferentes concentrações de etileno glicol e é interrogado através de um Analisador de Espectro Ótico (OSA). No segundo grupo de experimentos a topologia do experimento anterior é mantida, a corrente de polarização da fonte banda larga é alterada para 400 mA e as correntes de polarização do laser de 80 mA, 50 mA e 0 mA, foram utilizadas. A estrutura de sensoriamento SMS é exposta a nove soluções com diferentes concentrações de etileno glicol e são realizadas três aquisições do espectro no intervalo de aproximadamente 2 minutos para cada exposição. A sensibilidade do sensor para os dois grupos de experimentos é estimada monitorando-se o deslocamento do comprimento de onda de diferentes vales, em função do índice de refração das diferentes soluções e apresentado um comparativo entre as sensibilidades obtidas nos dois grupos experimentais.

## 4.1 – Descrição do aparato experimental

A fonte banda larga é um diodo superluminescente (SLD) com potência média típica de 3,42 mW, com largura espectral de 52nm para uma corrente de polarização de 600 mA. Quando a corrente na fonte SLD é alterada para 400 mA passa a apresentar uma largura espectral de 43 nm. O laser de diodo tem potência média típica de 40 mW para

$I_{th} = 40\ mA$, no comprimento de onda de emissão de 1480 nm e largura de linha de 5,1 nm. A configuração experimental empregada é ilustrada na figura 4.1.

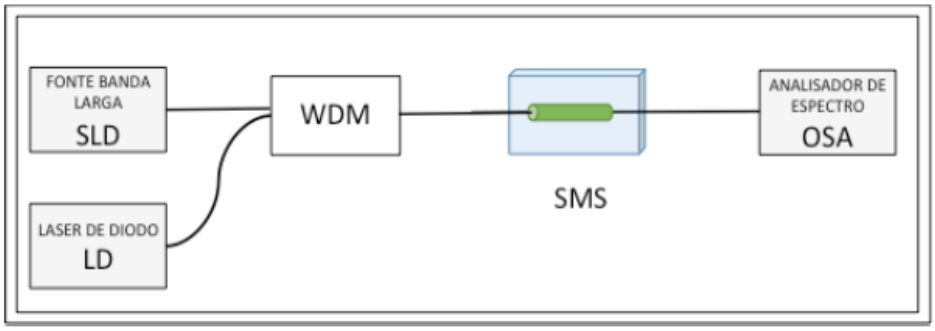



Figura 4.1: Aparato experimental utilizado na medida de índice de refração de um sensor modalmétrico em configuração de dupla fonte.

O espectro luminoso de cada uma das fontes (SLD e LD) é combinado ao passar por um WDM (FDK-YM1045) com operação na banda curta (S-Band) e banda convencional (C-Banda).

A estrutura proposta como sensor de índice de refração em transmissão é composta basicamente por uma seção de aproximadamente 58 mm de fibra multimodo no-core (FG125LA) com índice de refração no núcleo $n_{core}$ = 1,444 para a faixa de comprimento de onda de 1550nm e núcleo com raio de 62,5 μm. A fibra multimodo no-core é fundida através de um processo de fusão por arco voltaico entre duas fibras do tipo monomodo (Corning SMF-28) de índice de refração no núcleo $n_{core}$ = 1,4492, núcleo com raio de 4,1 μm, índice de refração na casca $n_{cladding}$ = 1,4402 e casca com diâmetro de 62,5 μm. A fusão da fibra do tipo multimodo no-core (FG125LA) entre duas fibras monomodo (Corning SMF-28) forma a estrutura de sensoriamento na configuração SMS (Singlemode-Multimode-no-core-Siglemode). A seção de MMF possui comprimento de aproximadamente 58 mm, operando na reimagem (Mohammed, 2004) (Bryngdahl,1975).

A estrutura de sensoriamento SMS foi montada em uma placa de acrílico transparente e o sensor foi posicionado de forma a manter uma altura de 2 mm da estrutura de acrílico, com a objetivo de facilitar a remoção das soluções líquidas a cada troca e foi assegurado o embebimento do sensor SMS pelos líquidos.

As soluções líquidas utilizadas para exposição da estrutura de sensoriamento para o primeiro grupo experimental foram preparadas em laboratório (LAFOT – CEFET-RJ), misturando-se etileno glicol e água destilada em diferentes proporções. Ao todo foram preparadas dezoito soluções com índices de refração obtidos através de um refratômetro de bancada (ABBE MOD. RTA-100) com faixa de leitura de 1,3000 até 1,7000 e precisão de índice de refração de ±0,0003. Com o objetivo de evitar a contaminação entre as soluções líquidas e afastar a possibilidade de alterações no índice de refração original, cada solução foi manuseada com uma pipeta de vidro exclusiva para cada. A tabela 4.1 apresenta o índice de refração aferido para cada solução.

Tabela 4.1: Valores obtidos na aferição de índice de refração para cada solução utilizada no primeiro experimento.

| Faixa | Solução | RI |
|---|---|---|
| A | $n_1$ | 1,3460 |
| | $n_2$ | 1,3495 |
| | $n_3$ | 1,3530 |
| | $n_4$ | 1,3600 |
| | $n_5$ | 1,3675 |
| | $n_6$ | 1,3725 |
| B | $n_7$ | 1,3775 |
| | $n_8$ | 1,3835 |
| | $n_9$ | 1,3870 |
| | $n_{10}$ | 1,3915 |
| | $n_{11}$ | 1,3950 |
| | $n_{12}$ | 1,4065 |
| C | $n_{13}$ | 1,4100 |
| | $n_{14}$ | 1,4145 |
| | $n_{15}$ | 1,4185 |
| | $n_{16}$ | 1,4330 |
| | $n_{17}$ | 1,4335 |
| | $n_{18}$ | 1,4370 |

No segundo conjunto de medidas foram selecionadas nove das dezoito soluções utilizadas no primeiro experimento. As nove soluções foram aferidas novamente, desta vez no laboratório de fotônica localizado Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), utilizando um refratômetro digital (Quimis – Q76780) com faixa de leitura de 1,3000 até 1,7000 e precisão de índice de refração de ±0,0002. Os resultados da aferição são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores obtidos na aferição de índice de refração para cada solução utilizada no segundo experimento.

| Faixa | Solução | RI |
|---|---|---|
| A | $n_1$ | 1,3457 |
| | $n_3$ | 1,3508 |
| | $n_5$ | 1,3659 |
| B | $n_7$ | 1,3749 |
| | $n_9$ | 1,3846 |
| | $n_{11}$ | 1,3942 |
| C | $n_{13}$ | 1,4077 |
| | $n_{15}$ | 1,4153 |
| | $n_{18}$ | 1,4348 |

## 4.2 – Resultados experimentais

A estrutura SMS foi coberta completamente por cada solução em temperatura ambiente de aproximadamente 24ºC. O comportamento do sensor de índice de refração em configuração de dupla fonte é avaliado pelo comportamento espectral em transmissividade, à medida que ocorre alteração no índice de refração do meio externo.

### 4.2.1 Primeiro conjunto de medidas

Para o primeiro grupo experimental a corrente de polarização da fonte SLD é configurada para 600 mA, o LD é configurado para corrente de polarização de 80 mA. Os sinais provenientes das fontes óticas são combinados em um WDM-mux. A perda de inserção no WDM é de 0,28 dB em relação ao sinal ótico da fonte SLD e 0,33 dB em relação ao sinal ótico do LD. Na figura 4.2 é apresentado o espectro do sinal após o WDM.

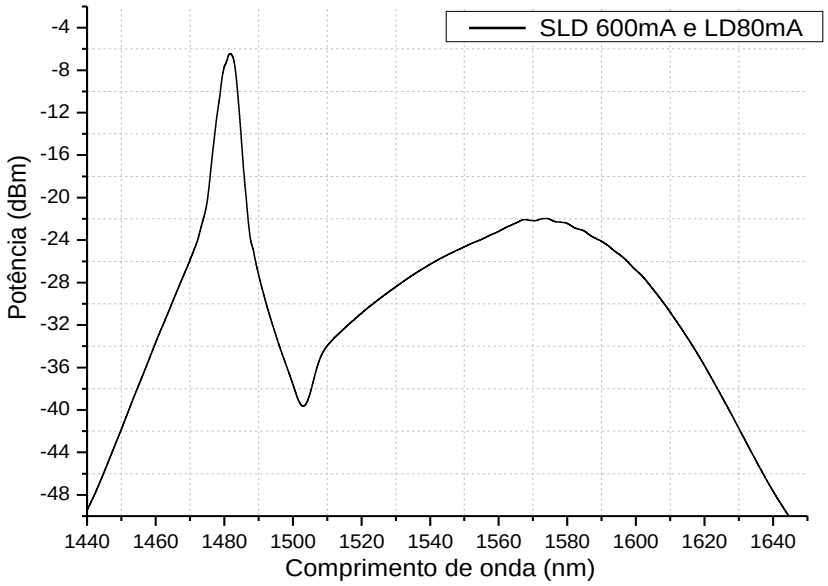



Figura 4.2: Espectro do sinal na saída do WDM-mux para o primeiro grupo experimental com fonte SLD configurada para corrente de 600 mA e LD com corrente na faixa de polarização de 80 mA.

Após passagem pelo WDM-mux o sinal luminoso passa pela estrutura de sensoriamento SMS que é coberta completamente pela solução $n_1$ em temperatura ambiente de 24 ºC e um padrão de interferência é gerado na saída do sensor ótico. No gráfico apresentando na figura 4.3, é possível observar o espectro do sinal para a solução $n_1$ após a estrutura de sensoriamento SMS. Diversos vales e picos formados por efeito de interferência multimodal são observados, sendo os vales provenientes de interferência destrutiva, os picos de interferência construtiva e o pico de máxima potência ocorrendo na faixa de comprimento de onda de 1603 nm.

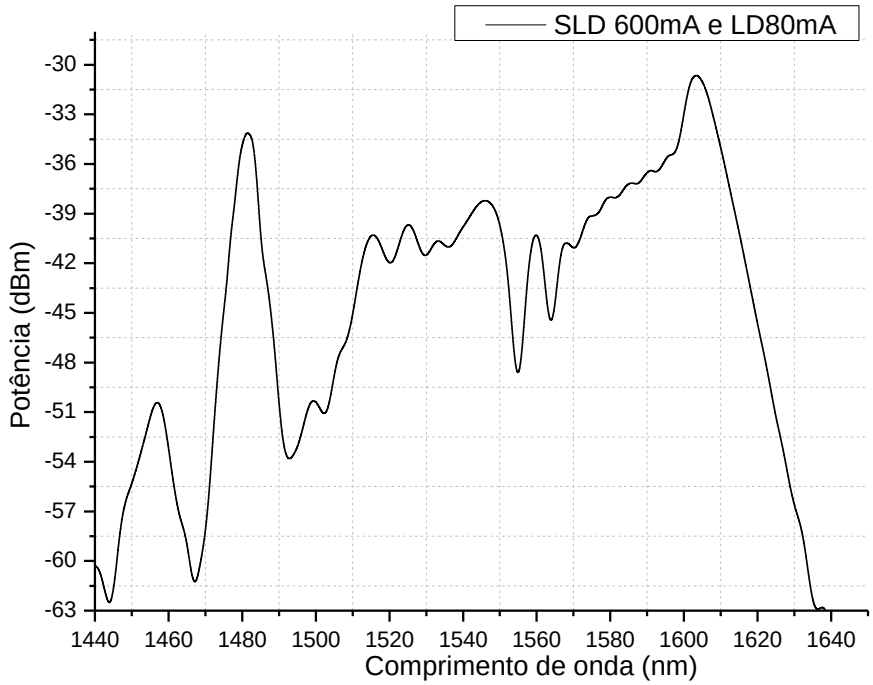



Figura 4.3: Padrão de interferência do espectro após estrutura de sensoriamento SMS com exposição a solução $n_1$ em configuração de fonte de alimentação dupla (SLD = 600 mA e LD = 80 mA).

A solução de índice de refração $n_1$ é removida, o sensor é exposto as demais soluções de índice de refração ($n_2$ a $n_{18}$) a resposta espectral de cada exposição após o sensor SMS é subtraída do espectro de entrada na saída do WDM-mux, e desta forma obtem-se a resposta em transmissividade no sensor em configuração SMS. A figura 4.4 apresenta a transmissividade do sensor SMS para as soluções de índice de refração ($n_1$, $n_2$, $n_3$, $n_{16}$, $n_{17}$ e $n_{18}$), sendo possível observar que ao se acrescentar líquidos com maior índice de refração o espectro sofre um deslocamento em direção a comprimentos de onda mais longos. Este fenômeno ocorre, pois, as condições de propagação dos campos na seção de fibra multimodo são alteradas de acordo com o índice de refração dos líquidos. A presença do líquido afeta a constante de propagação do modo e respectiva distribuição de campo do modo. A maior interação da luz que se propaga na fibra se dá para o maior índice de

refração. Este comportamento pode ser entendido pela lei de Snell, onde o ângulo crítico que é dado por $\sin^{-1}(n_{externo}/\, n_{\mathrm{no-core}})$, é proporcional ao índice de refração do meio externo ($n_{externo}$) na área de sensoriamento, onde ($n_{no\text{-}core}$ = 1,4440) é o índice de refração na fibra multimodo no-core. Quando o índice de refração da solução é menor que o da fibra no-core ($n_{externo} < n_{\mathrm{no-core}}$) a maior parte de energia do campo fica confinado na fibra ótica. Conforme ocorre aproximação do índice de refração da solução ao da fibra no-core a condição para reflexão interna total não é mais satisfeita, o campo perde energia para meio externo, ocorre aumento do campo evanescente e um maior deslocamento do espectro é observado (DONG, 2017). Uma MMF do tipo no-core com diâmetro de 125μm pode apresentar muitos modos de propagação o modo fundamental proveniente da SMF excita alguns dos múltiplos modos na seção de MMF. Os modos excitados apresentam diferentes constantes de propagação na seção de MMF (JI, 2019). Os modos (m = 3 e 4), possuem uma maior eficiência de acoplamento de potência, maior coeficiente de excitação, consequentemente apresentam uma maior parcela da potência luminosa transferida. Os modos de maior ordem são mais externos e carregam uma menor parcela de potência acoplada (COSTA, 2019). Para um comprimento de onda em particular, se a maioria dos modos estiverem em fase, ocorre uma interferência construtiva na saída da MMF e uma maior intensidade (pico) no espectro em transmissão do sinal é observado. De forma similar, uma redução na intensidade do sinal (vale) é observada quando os modos não estão em fase, resultando em uma interferência destrutiva (JUNG, 2006). A reimagem vai ocorrer em uma posição específica da seção de MMF para um comprimento de onda específico, que vai depender do comprimento de onda da fonte ótica (LI, 2013). O maior deslocamento entre os espectros ocorre para as soluções de maior índice de refração, à medida que campo evanescente aumenta, os comprimentos de onda mais próximos do comprimento de onda da fonte ótica vão apresentar um maior deslocamento e consequentemente maior sensibilidade.

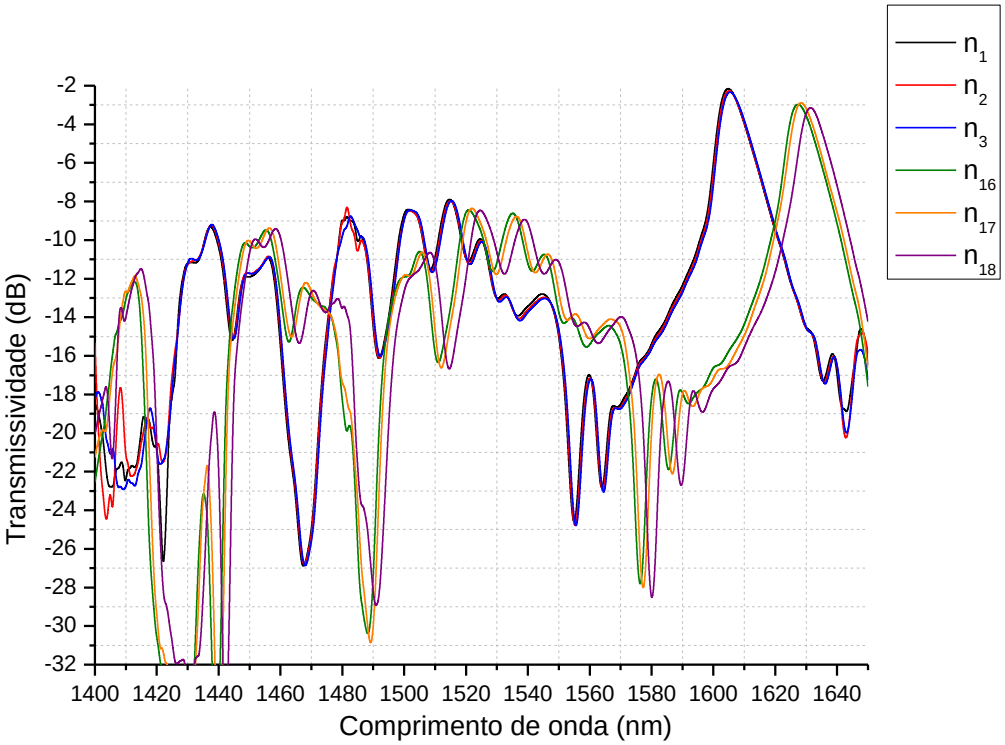



Figura 4.4: Transmissividade do sensor SMS para as três soluções com menores índices de refração ($n_1$, $n_2$ e $n_3$) e as soluções com os três maiores índices de refração ($n_{16}$, $n_{17}$ e $n_{18}$).

Para aplicação do método de avaliação dos resultados por deslocamento espectral, se faz necessário selecionar vales ou picos e realizar análise de deslocamento de forma individual de cada interferência construtiva ou destrutiva. No caso deste primeiro experimento, foram selecionados seis vales nos comprimentos de onda de 1444 nm, 1467 nm, 1491 nm, 1508 nm, 1554 nm e 1563 nm. Respectivamente enumerados, conforme apresentado na figura 4.5. A escolha de se analisar os vales se deu por possuírem suas extremidades mais bem definidas que os picos e desta forma permitindo acompanhar o deslocamento com maior precisão.

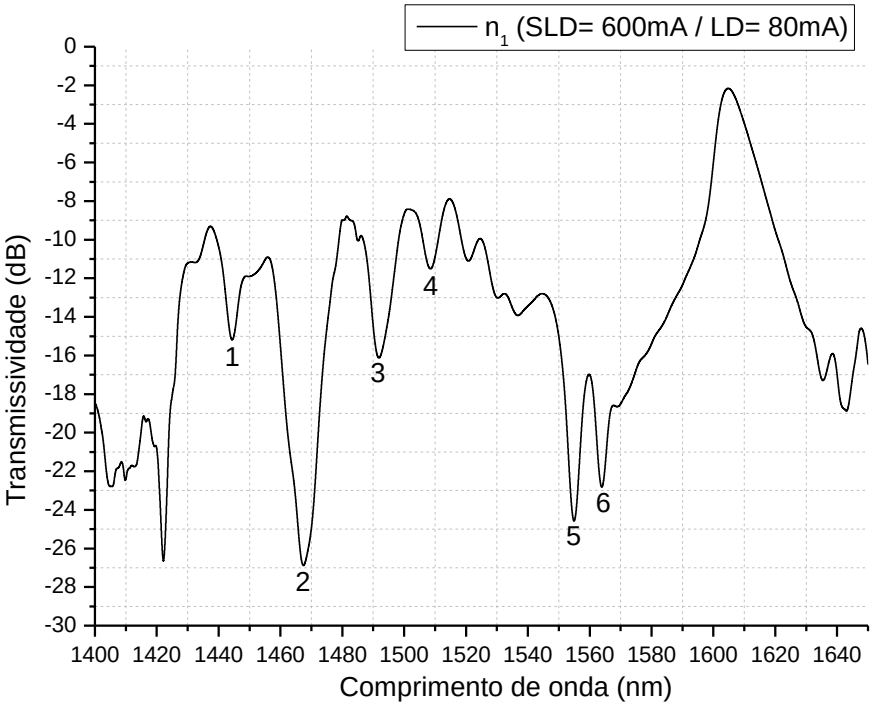



Figura 4.5: Transmissividade no sensor SMS para a solução com índice de refração $n_1$, destaca-se o conjunto de vales presentes no espectro.

A figura 4.6 apresenta a variação do comprimento de onda de cada vale analisado em função do índice de refração externo, tendo como referência a posição dos vales para o índice de refração $n_1$ = 1,3460. É possível observar que um maior deslocamento espectral ocorre quando o índice de refração externo apresenta valores próximos do valor de índice de refração da seção de fibra multimodo no-core (Gao,2010). Sendo assim, os maiores deslocamentos espectrais ocorreram nas faixas de índice de refração de $n_{12}$ = 1,4065 até $n_{18}$ = 1,4370. O deslocamento do comprimento de onda apresenta um crescimento aproximado de uma exponencial.

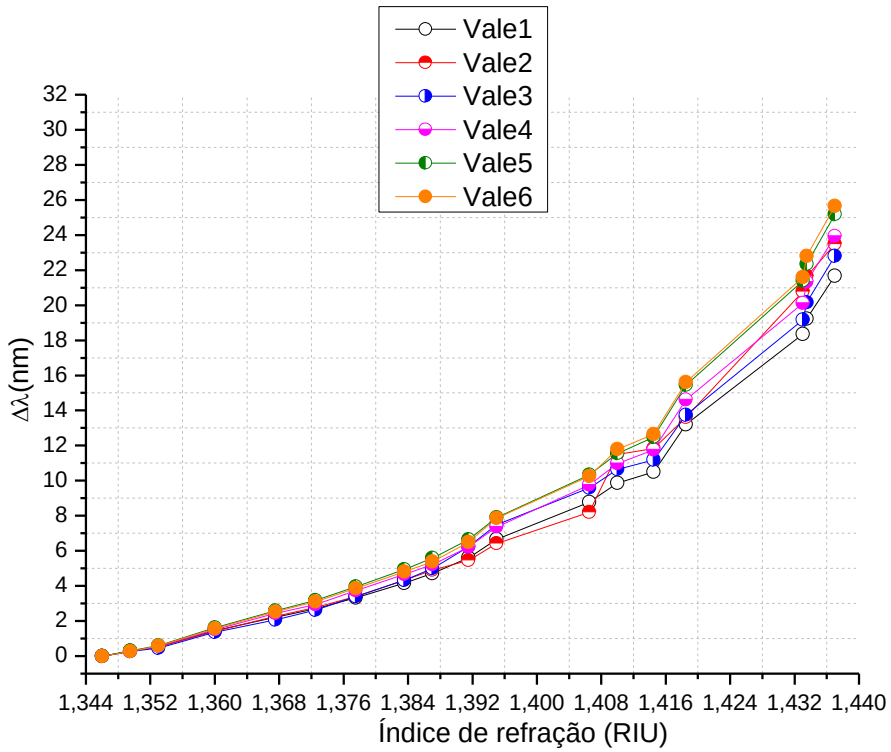



Figura 4.6: Deslocamento do comprimento de onda dos vales de 1 a 6 em função da variação de índice de refração de cada solução (n1 a n18).

Os resultados foram separados em faixas de índice de refração, sendo: faixa A ($n_1$ até $n_6$) faixa B ($n_7$ até $n_{12}$) e faixa C ($n_{13}$ até $n_{18}$). A fim de se obter a sensibilidade de cada vale, foi aplicada uma regressão linear nas faixas citadas acima para cada vale, conforme apresentado na figura 4.7.

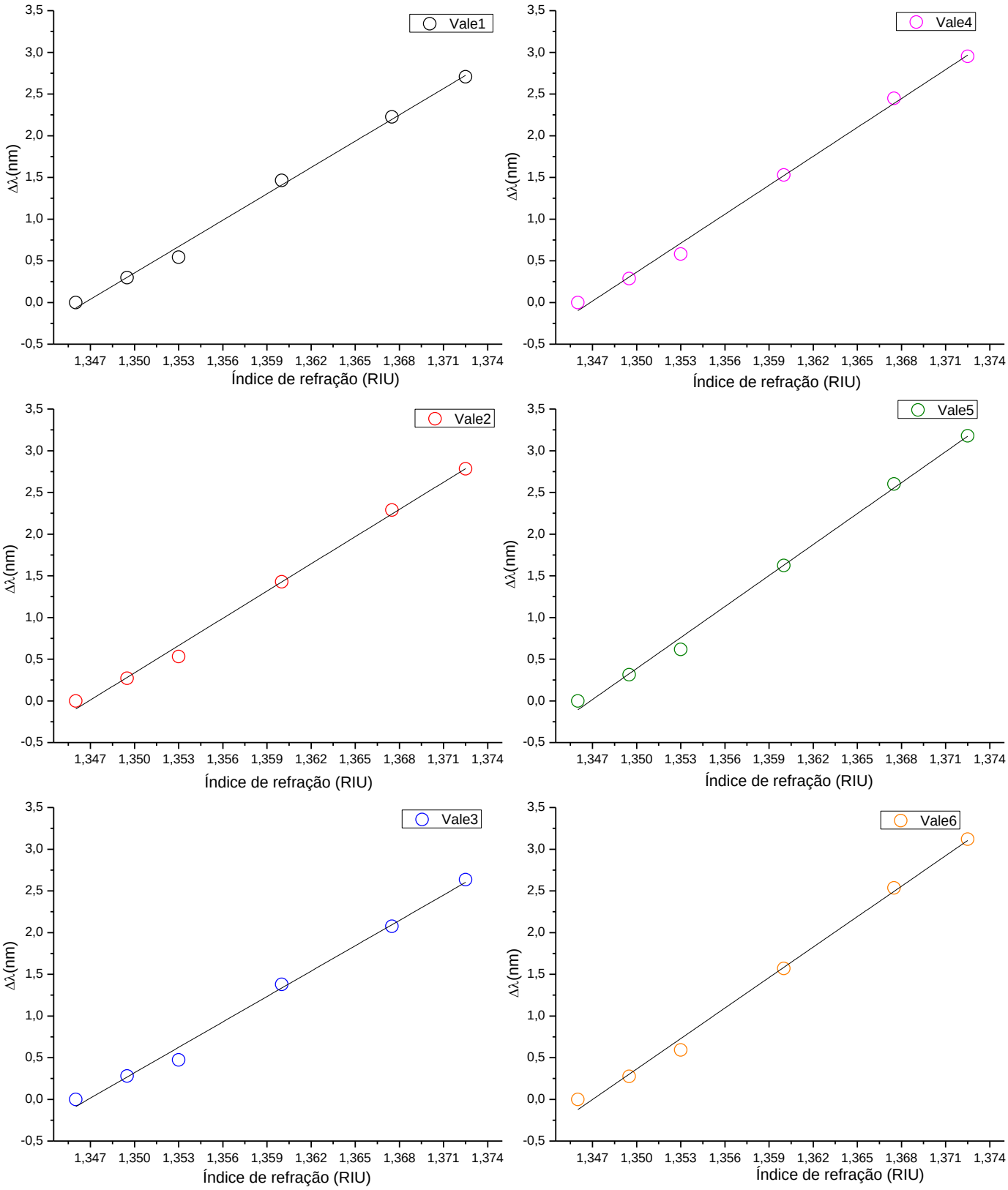



Figura 4.7: Aplicação de regressão linear para os vales de 1 a 6 para a faixa A ($n_1$ a $n_6$) de índice de refração.

As respostas de sensibilidade do sensor SMS para diferentes faixas de índice de refração são obtidas através de uma regressão linear e desta forma permitindo o cálculo de parâmetros a serem utilizados na avaliação dos resultados experimentais, tais como, desvio padrão e o coeficiente de determinação R².

O desvio padrão é definido basicamente como uma dispersão média dos pontos em torno da média amostral (Deshpande, 2016). Um baixo desvio padrão indica que a dispersão média está próxima da média ou do valor esperado (Montgomery, 2003). Para o caso deste trabalho, o desvio padrão pode ser definido como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y})^2}{n-1}} \tag{4.1}$$

onde, $y_i$ é o valor real, $\hat{y}$ é o valor esperado do modelo linear ($\hat{y} = a + bx$) e n é a quantidade de amostras.

O coeficiente de determinação R² informa a qualidade do ajuste dos dados reais ao modelo. Os valores deste coeficiente são medidos em forma percentual e por este motivo, quanto mais os resultados se aproximam de 1 (um) melhor é o ajuste ao modelo (Montgomery, 2003). O coeficiente de determinação R² pode ser definido como:

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - \hat{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \tag{4.2}$$

onde, $\bar{y}$ é o valor médio calculado através de média aritmética simples.

Os valores de sensibilidade, desvio padrão e coeficiente de determinação R² são mostrados para todas as faixas A, B e C na tabela 4.3. A sensibilidade do sensor aumenta com o índice de refração para todos os vales, como esperado. No entanto, o comportamento da sensibilidade com os vales, para as três faixas, não apresenta um padrão.

Na faixa A de índice de refração, as sensibilidades obtidas estão em torno de 105 a 122 nm/RIU, apresentam um desvio padrão em torno de 3% do valor da sensibilidade

no vale e coeficiente de determinação melhor do que 99%. A sensibilidade inicia com um padrão crescente com o número do vale. Este padrão se altera entre os vales 2 e 3, e entre os vales 5 e 6. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração estão em torno de 193 a 229 nm/RIU, apresentam um desvio padrão em torno de 5% do valor da sensibilidade no vale e coeficiente de determinação melhor do que 98%. A alteração no padrão de comportamento da sensibilidade se dá entre os vales 2, 3 e 4. A faixa C de índice de refração apresenta sensibilidades em torno de 428 a 499 nm/RIU, um desvio padrão em torno de 7% do valor da sensibilidade e coeficiente de determinação melhor do que 97%. A alteração no padrão para essa faixa se dá entre os vales 2 e 3.

Tabela 4.3: Sensibilidade, Desvio Padrão, Ajuste $R^2$ para os seis vales nas três faixas de índice de refração.

| | | **Vales** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Faixas (RI)** | **Parâmetros** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| **A ($n_1$ a $n_6$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 105,288 | 108,828 | 101,463 | 115,665 | 123,850 | 121,809 |
| | Desvio Padrão | 3,405 | 3,667 | 3,951 | 3,751 | 3,935 | 4,086 |
| | Coeficiente $R^2$ | 99,5% | 99,4% | 99,2% | 99,5% | 99,5% | 99,4% |
| **B ($n_7$ a $n_{12}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 193,433 | 167,461 | 223,632 | 213,536 | 227,294 | 229,398 |
| | Desvio Padrão | 9,737 | 6,021 | 13,276 | 11,088 | 11,588 | 13,907 |
| | Coeficiente $R^2$ | 98,7% | 99,4% | 98,3% | 98,7% | 98,7% | 98,2% |
| **C ($n_{13}$ a $n_{18}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 427,883 | 466,237 | 440,510 | 466,513 | 490,219 | 499,148 |
| | Desvio Padrão | 29,114 | 31,755 | 32,598 | 32,875 | 31,502 | 34,816 |
| | Coeficiente $R^2$ | 97,7% | 97,7% | 97,3% | 97,6% | 98,0% | 97,6% |

### 4.2.2 Segundo conjunto de medidas

Neste segundo experimento, utilizou-se a mesma topologia apresentada na figura 4.1. Porém, as medidas foram realizadas variando-se a corrente de polarização do LD para os valores de 80 mA, 50 mA e 0 mA. A corrente de polarização da fonte SLD foi

reduzida para 400 mA. Na figura 4.8 é apresentado o espectro do sinal após o WDM quando LD polarizado com uma corrente de 80 mA e corrente no SLD alterada para 400 mA.

Com o objetivo de obter uma média dos resultados experimentais, foram realizadas três medidas consecutivas no intervalo de aproximadamente de um minuto a cada remoção e inserção das soluções líquidas. Sendo assim, os resultados dos espectros apresentados foram calculados a partir de uma média aritmética entre as três medidas para cada solução.

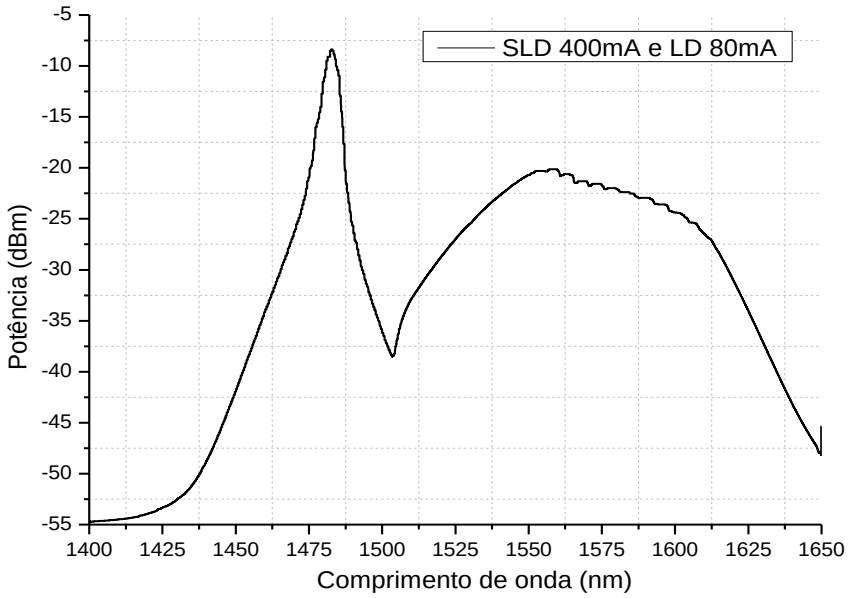



Figura 4.8: Espectro do sinal na saída do WDM-mux com LD=80 mA e SLD=400 mA.

Os métodos utilizados para avaliação dos resultados são os mesmos métodos utilizados na análise do primeiro grupo experimental. Após o espectro passar pela estrutura de sensoriamento (SMS), passa a apresentar um padrão com interferências construtivas e destrutivas. Para analisar o deslocamento do espectro a cada alteração do índice de refração do meio o qual é exposto, foram selecionados seis vales. Os vales selecionados para este experimento estão nos comprimentos de onda de 1443 nm,

1466 nm, 1492 nm, 1509 nm, 1555 nm e 1563 nm. Na figura 4.9, os seis vales para exposição a solução $n_1$ são selecionados, apresentados e respectivamente enumerados em ordem crescente para corrente de polarização de 80 mA. A localização dos picos e vales é igual para as correntes de polarização de 50 mA e 80 mA, e os vales 1, 2, 3 e 4 ausentes para corrente de polarização 0 mA. Quando a corrente no LD é configurada para zero ocorre a interrupção no fornecimento de sinal luminoso na faixa de comprimento de onda entre aproximadamente 1400 a 1510 nm.

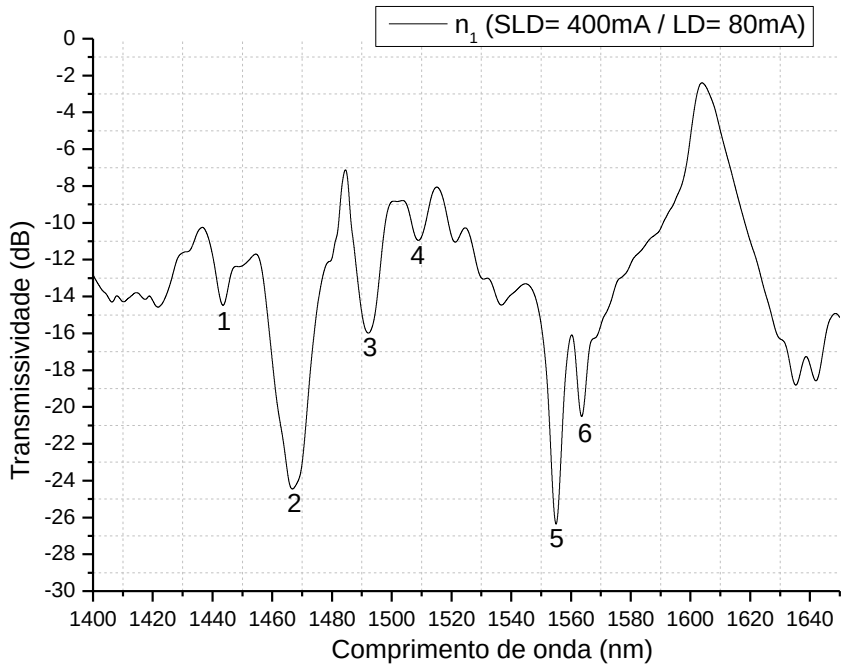



Figura 4.9: Espectro sinal após estrutura de sensoriamento SMS, com corrente na fonte SLD em 400mA, LD em 80mA e marcação dos vales analisados.

O espectro proveniente da estrutura de sensoriamento SMS apresenta deslocamento espectral para comprimentos de onda mais longos e uma maior taxa de deslocamento para as soluções ($n_{13}$, $n_{15}$ e $n_{18}$) que possuem valores de índice de refração próximos ao da seção de fibra multimodo no-core. A figura 4.10 apresenta a variação do comprimento de onda de cada vale analisado em função do índice de refração externo,

tendo como referência a posição do vale para $n_1$ = 1,3460. O deslocamento do comprimento de onda apresenta um crescimento aproximado de uma exponencial.

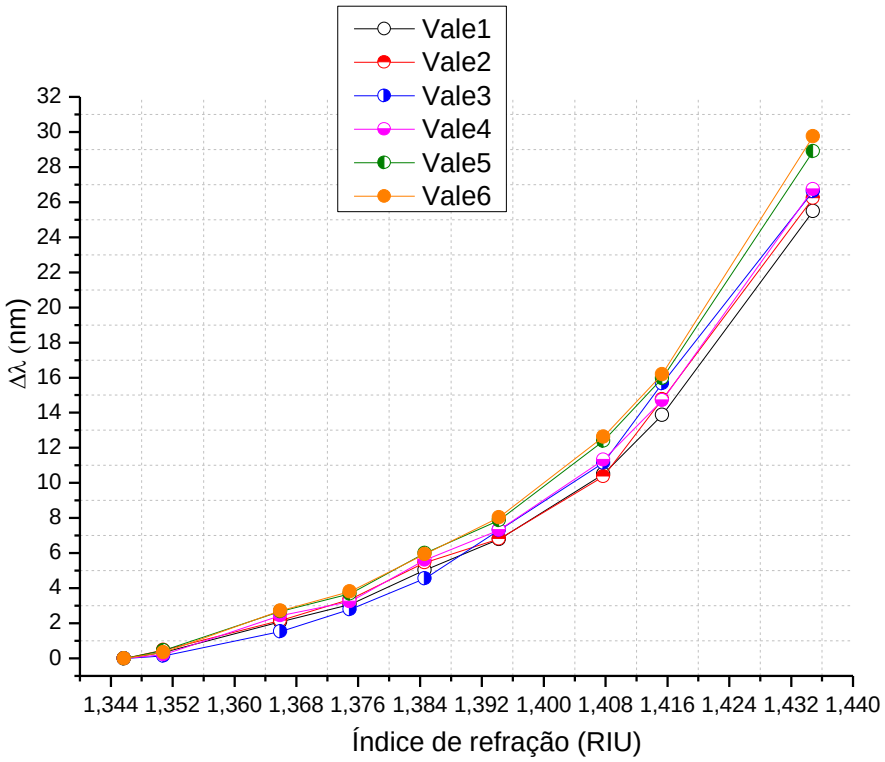



Figura 4.10: Deslocamento do comprimento de onda em função do índice de refração para os vales 1 a 6 em configuração de corrente para fonte SLD em 400mA e LD em 80mA.

Os resultados foram separados em faixas de índice de refração, sendo; faixa A ($n_1$, $n_3$ e $n_5$) faixa B ($n_7$, $n_9$ e $n_{11}$) e faixa C ($n_{13}$, $n_{15}$ e $n_{18}$). A fim de se obter a sensibilidade de cada vale, foi aplicada uma regressão linear nas faixas citadas acima para cada vale. Os resultados são apresentados na tabela 4.4.

Na faixa A de índice de refração, as sensibilidades obtidas estão em torno de 106 a 140 nm/RIU, apresentam um desvio padrão em torno de 7% e coeficiente de determinação $94{,}72\% \leq R^2 \leq 99{,}76\%$. A sensibilidade apresenta um padrão crescente com o número do vale a partir do vale 4. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração estão em torno de 192 a 219 nm/RIU, apresentam um desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação $96{,}59\% \leq R^2 \leq 99{,}99\%$ para os seis vales. A faixa C de

índice de refração apresenta sensibilidades em torno de 561 a 644 nm/RIU, desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação 98,82% ≤ $R^2$ ≤ 99,99%.

Tabela 4.4: Sensibilidade, Desvio Padrão, Ajuste $R^2$ para os seis nas três faixas de índice de refração. Corrente de polarização de 80 mA.

| | | **Vales** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Faixas (RI)** | **Parâmetros** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| **A($n_1$,$n_3$,$n_5$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 106,446 | 108,23 | 79,4932 | 127,228 | 136,18 | 140,024 |
| | Desvio Padrão | 9,36851 | 3,76348 | 12,3224 | 20,9609 | 11,4704 | 17,8963 |
| | Coeficiente $R^2$ | 98,463% | 99,758% | 98,82% | 94,715% | 98,591% | 96,786% |
| **B($n_7$,$n_9$,$n_{11}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 192,514 | 177,973 | 233,78 | 210,966 | 217,069 | 219,396 |
| | Desvio Padrão | 4,9885 | 21,2436 | 30,8032 | 19,4054 | 12,7978 | 0,76822 |
| | Coeficiente $R^2$ | 99,866% | 97,19% | 96,587% | 98,322% | 99,307% | 99,998% |
| **C($n_{13}$,$n_{15}$,$n_{18}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 561,401 | 585,88 | 569,586 | 578,732 | 619,856 | 644,176 |
| | Desvio Padrão | 33,7724 | 2,05679 | 6,92944 | 37,4787 | 41,9577 | 49,7271 |
| | Coeficiente $R^2$ | 99,279% | 99,998% | 99,97% | 99,165% | 99,088% | 98,815% |

A corrente no LD foi alterada para 50 mA, para analisar o comportamento da sensibilidade conforme a corrente de polarização é reduzida. A mesma metodologia de análise de resultados é aplicada. Os vales selecionados estão na mesma faixa de comprimento onda descritos para o experimento anterior. A figura 4.12 apresenta a variação do comprimento de cada vale analisado em função do índice de refração externo.

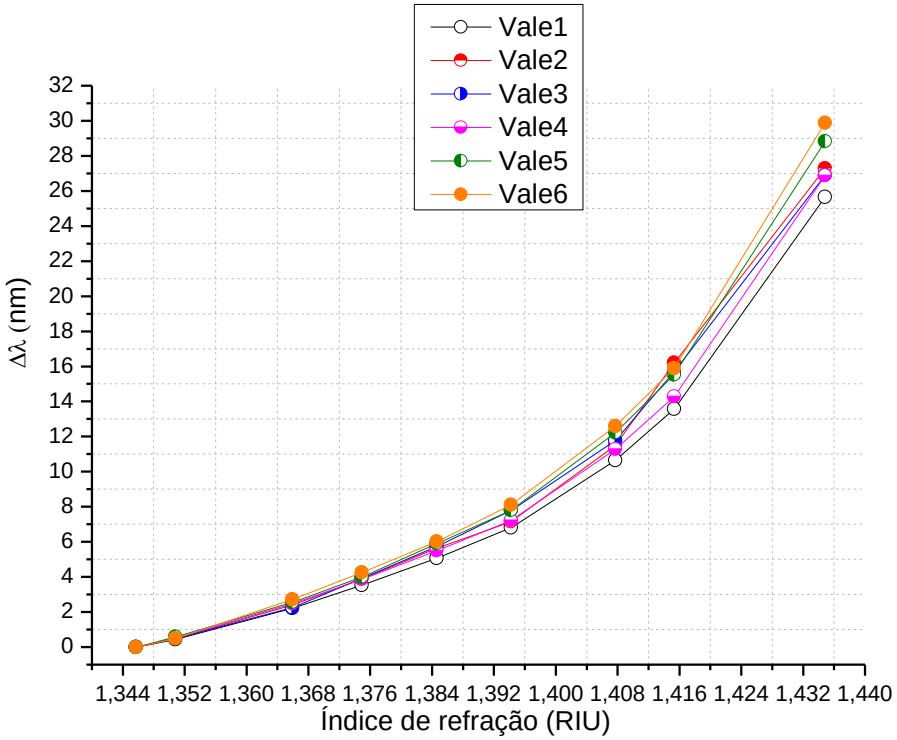



Figura 4.12: Deslocamento do comprimento de onda em função do índice de refração em configuração de fonte dupla com SLD = 400 mA e LD = 50 mA.

A fim de se obter a sensibilidade de cada vale, foi aplicada uma regressão linear nas faixas de índice de refração para cada vale. Os resultados são apresentados na tabela 4.5. Na faixa A de índice de refração, as sensibilidades estão em torno de 112 a 137 nm/RIU, apresentam um desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação $99{,}05\% \leq R^2 \leq 99{,}73\%$. A sensibilidade apresenta um padrão crescente com o número do vale a partir do vale 4. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração estão em torno de 170 a 199 nm/RIU, apresentam um desvio padrão em torno de 3% e coeficiente de determinação $99{,}46\% \leq R^2 \leq 99{,}99\%$ para os seis vales. A faixa C de índice de refração apresenta sensibilidades em tono de 566 a 653 nm/RIU, desvio padrão em torno de 7% e coeficiente de determinação $98{,}21\% \leq R^2 \leq 99{,}93\%$.

Tabela 4.5: Sensibilidade, Desvio Padrão, Ajuste R2 para os seis vales nas três faixas de índice de refração. Corrente de polarização de 50 mA.

| | | **Vales** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Faixas (RI)** | **Parâmetros** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| **A($n_1$,$n_3$,$n_5$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 111,8344 | 121,246 | 112,9986 | 124,935 | 127,42 | 137,619 |
| | Desvio Padrão | 6,28815 | 5,65133 | 4,15217 | 6,10135 | 2,59155 | 9,50665 |
| | Coeficiente $R^2$ | 99,37% | 99,566% | 99,73% | 99,524% | 99,917% | 99,05% |
| **B($n_7$,$n_9$,$n_{11}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 170,4097 | 169,247 | 200,2862 | 173,916 | 196,797 | 198,9815 |
| | Desvio Padrão | 7,14481 | 7,24695 | 7,7215 | 3,00795 | 0,72691 | 10,30969 |
| | Coeficiente $R^2$ | 99,649% | 99,634% | 99,703% | 99,94% | 99,997% | 99,465% |
| **C($n_{13}$,$n_{15}$,$n_{18}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 566,6302 | 579,839 | 561,021 | 589,563 | 626,112 | 653,3355 |
| | Desvio Padrão | 52,29024 | 10,8404 | 12,17378 | 55,1148 | 54,0515 | 61,95687 |
| | Coeficiente $R^2$ | 98,375% | 99,93% | 99,906% | 98,267% | 98,52% | 98,217% |

Por último, a corrente no LD foi reduzida para 0mA. Sendo assim, o sistema passa a possuir como fonte luminosa principal e única a fonte SLD. Na saída do sensor SMS o padrão de interferência é reduzido para a faixa de comprimento de onda de 1500 nm até 1650 nm. A faixa de comprimento de onda em relação aos outros experimentos é reduzida, pois a corrente no LD está em zero. Na figura 4.13 é apresentado a resposta espectral na saída do sensor SMS, os vales a serem analisados nos comprimentos de onda de 1555 nm e 1563 nm respectivamente enumerados.

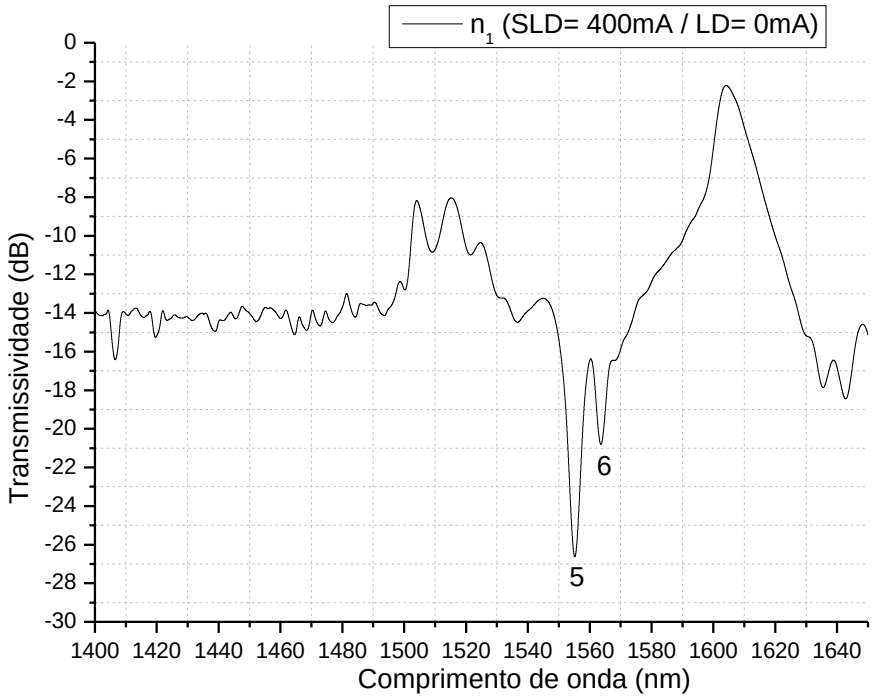



Figura 4.13: Espectro do sinal após estrutura de sensoriamento SMS para corrente no LD de 0mA, fonte SLD polarizada em 400 mA e com marcação dos vales analisados.

A resposta na saída do sensor SMS apresenta um deslocamento espectral para os comprimentos de onda mais longos e a taxa de deslocamento é maior para as soluções com índices de refração na faixa C ($n_{13}$, $n_{15}$ e $n_{18}$). A figura 4.14 apresenta a variação do comprimento de onda para os dois vales analisados em função do índice de refração externo.

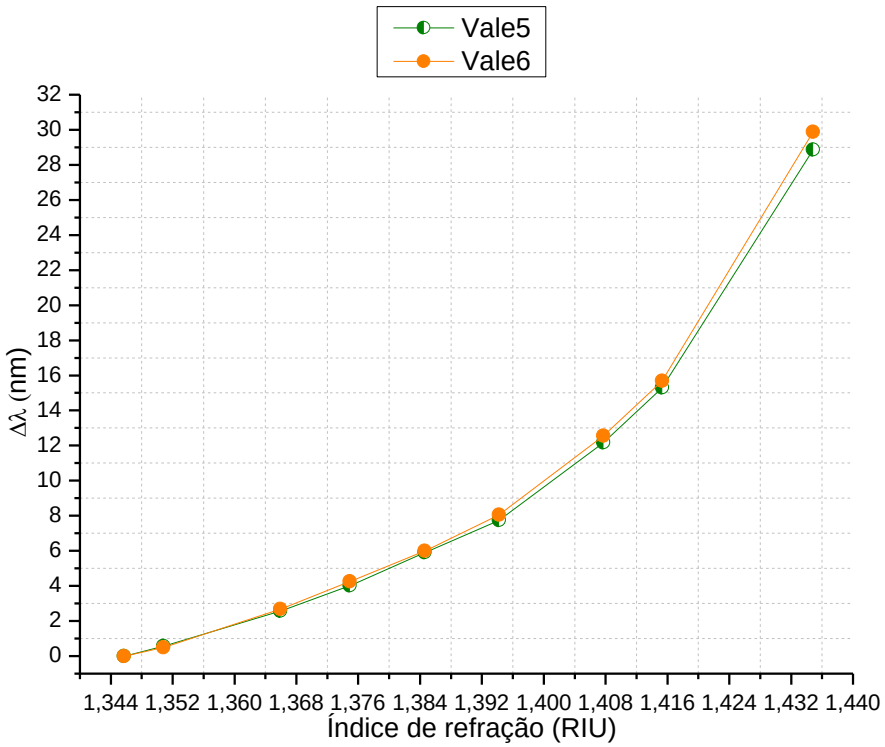



Figura 4.14: Deslocamento do comprimento de onda em função do índice de refração para configuração em fonte dupla com SLD em 400 mA e LD em 0 mA.

Uma regressão linear foi aplicada nas faixas de índice de refração A ($n_1$, $n_3$ e $n_5$) faixa B ($n_7$, $n_9$ e $n_{11}$) e faixa C ($n_{13}$, $n_{15}$ e $n_{18}$). A sensibilidade e outros parâmetros obtidos para cada faixa são apresentados na tabela 4.6.

Na faixa A de índice de refração, as sensibilidades obtidas estão em torno de 129 a 136 nm/RIU, apresentam desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação $99{,}11\% \leq R^2 \leq 99{,}81\%$. A sensibilidade apresenta um padrão crescente com o número do vale. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração estão em torno de 193 a 197 nm/RIU, apresentam um desvio padrão em torno de 3% e coeficiente de determinação $99{,}45\% \leq R^2 \leq 99{,}99\%$. A faixa C de índice de refração apresenta sensibilidades em torno 632 a 657 nm/RIU, um desvio padrão em torno de 10% e coeficiente de determinação $97{,}82\% \leq R^2 \leq 98{,}10\%$.

Tabela 4.6: Sensibilidade, Desvio Padrão, Ajuste R2 nas três faixas de índice de refração.

| | | Vales | |
|---|---|---|---|
| **Faixas (RI)** | **Parâmetros** | **5** | **6** |
| **A ($n_1$, $n_3$, $n_5$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 128,873 | 135,93 |
| | Desvio Padrão | 3,97942 | 9,07593 |
| | Coeficiente $R^2$ | 99,809% | 99,112% |
| **B ($n_7$, $n_9$, $n_{11}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 192,97876 | 196,778 |
| | Desvio Padrão | 0,86758 | 10,3004 |
| | Coeficiente $R^2$ | 99,996% | 99,453% |
| **C ($n_{13}$, $n_{15}$, $n_{18}$)** | Sensibilidade (nm/RIU) | 631,7246 | 656,7367 |
| | Desvio Padrão | 61,990995 | 68,93782 |
| | Coeficiente $R^2$ | 98,092% | 97,82% |

### 4.2.3 Considerações finais

Uma análise geral dos resultados obtidos para os dois grupos experimentais é apresentada na tabela 4.7 e é observada a resposta da sensibilidade para cada faixa de índice de refração em diferentes configurações de fonte ótica.

Comparando os resultados na faixa A de índice de refração obtidos em todos os grupos experimentais, observa-se que as maiores sensibilidades para esses vales 1, 2, 3 e 4 ocorreram com a fonte em 80mA. Quando a corrente no LD é configurada para 0 mA, ocorre no vale 6 uma queda na sensibilidade de aproximadamente 1,69 nm/RIU, entre LD em 50 mA e LD em 0mA. Uma diferença na sensibilidade de aproximadamente 14,121 nm/RIU é observada no vale 6 entre LD com corrente de 80 mA e 0 mA. O vale 5 apresenta uma queda de sensibilidade quando a corrente no LD é configurada para 80 mA, diferença na ordem de 7,307 nm/RIU em relação ao valor de maior sensibilidade.

Na faixa B de índice de refração, os melhores resultados de sensibilidade ocorreram para o primeiro grupo experimental. Quando a corrente no LD é configurada para 0mA, os vales 5 e 6 apresentam os menores valores de sensibilidade em relação aos

outros valores nessa faixa, com quedas de sensibilidade em torno de 34,315 nm/RIU e 32,62 nm/RIU nos respectivos vales.

Já a faixa C de índice de refração apresenta na configuração de LD = 80 mA no segundo grupo experimental os maiores valores de sensibilidade. Com a fonte LD em 0mA, o vale 5 apresentou a segunda menor sensibilidades e uma diferença na sensibilidade de aproximadamente 12,451 nm/RIU em relação ao valor de maior sensibilidade. Já o vale 6 alcançou a maior sensibilidade quando a corrente na fonte LD é configurada em 0mA.

Tabela 4.7: Comparativo da sensibilidade obtida para os quatro experimentos realizados.

| | **Sensibilidade (nm/RIU) / vale** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Faixa-Grupo-Corrente** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| **A - 1º - 80mA** | 105,288 | 108,828 | 101,463 | 115,665 | 123,850 | 121,809 |
| **A - 2º - 80mA** | 106,446 | 108,230 | 79,493 | 127,228 | 136,180 | 140,024 |
| **A - 2º - 50mA** | 111,834 | 121,246 | 112,999 | 124,935 | 127,420 | 137,619 |
| **A - 2º - 0mA** | ---- | ---- | ---- | ---- | 128,873 | 135,930 |
| **B - 1º - 80mA** | 193,433 | 167,461 | 223,632 | 213,536 | 227,294 | 229,398 |
| **B - 2º - 80mA** | 192,514 | 177,973 | 233,780 | 210,966 | 217,069 | 219,396 |
| **B - 2º - 50mA** | 170,410 | 169,247 | 200,286 | 173,916 | 196,797 | 198,982 |
| **B - 2º - 0mA** | ---- | ---- | ---- | ---- | 192,979 | 196,778 |
| **C - 1º - 80mA** | 427,883 | 466,237 | 440,510 | 466,513 | 490,219 | 499,148 |
| **C - 2º - 80mA** | 585,880 | 569,586 | 578,732 | 619,856 | 644,176 | 646,665 |
| **C - 2º - 50mA** | 566,630 | 579,839 | 561,021 | 589,563 | 626,112 | 653,336 |
| **C - 2º - 0mA** | ---- | ---- | ---- | ---- | 631,725 | 656,737 |

Ao analisar os resultados obtidos através do método de análise utilizado (regressão linear por faixas de índice de refração), quando a corrente no LD é levada a 0 mA ocorre uma redução na sensibilidade em relação a maior sensibilidade obtida na a faixa A, apresentando uma queda percentual de aproximadamente 3% no vale 6 e aproximadamente 5% no vale 5. A faixa B de índice de refração apresenta a maior queda percentual na sensibilidade quando a corrente no LD é levada a zero, apresentando uma queda de aproximadamente 14% no vale 6 e de aproximadamente 15% no vale 5, em relação a maior sensibilidade. A faixa C apresentou um aumento na sensibilidade quando a corrente no LD é levada a zero, apresentando um aumento de aproximadamente 32% no vale 6 e 29% no vale 5, em relação a menor sensibilidade. Nas figuras (4.15, 4.16 e

4.17) é apresentado o comparativo entre os resultados obtidos para o primeiro grupo experimental com 18 soluções e as 3 diferentes configurações de fonte ótica utilizadas no segundo grupo experimental. Além do gráfico em barras é apresentado a sensibilidade obtida em cada faixa de índice de refração e os gráficos apresentam barra de erro para o desvio padrão obtido em cada faixa de índice de refração e configuração de fonte ótica. Os vales que alcançaram desvio padrão maior que 10% em relação a sensibilidade apresentam uma elevada dispersão, possuem resultados não confiáveis que ocorreram nos vales 3, 4 e 6, para o segundo grupo experimental na corrente de LD em 80mA na faixa A de índice de refração. A faixa B de índice de refração apresentou resultados não satisfatórios para os vales 2 e 3, para o segundo grupo experimental na corrente de LD em 80mA. A faixa C de índice de refração apresentou um salto na diferença das sensibilidades entre o primeiro grupo experimental com a fonte SLD em 600mA e o segundo grupo experimenta com corrente na SLD em 400 mA.

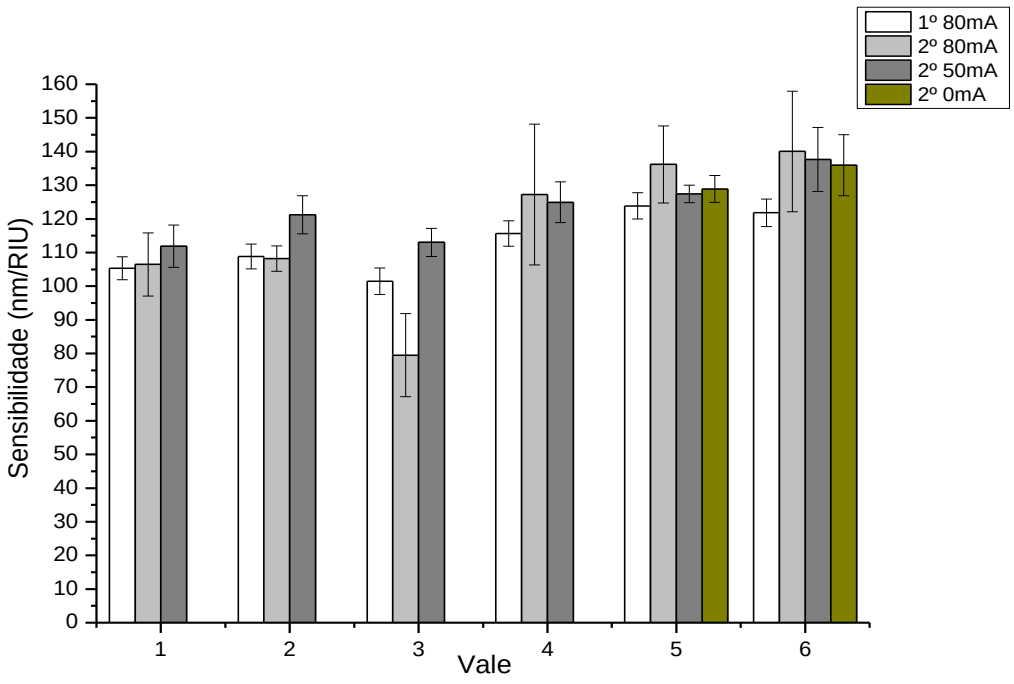



Figura 4.15: Sensibilidade com barra de erro para faixa A de índice de refração.

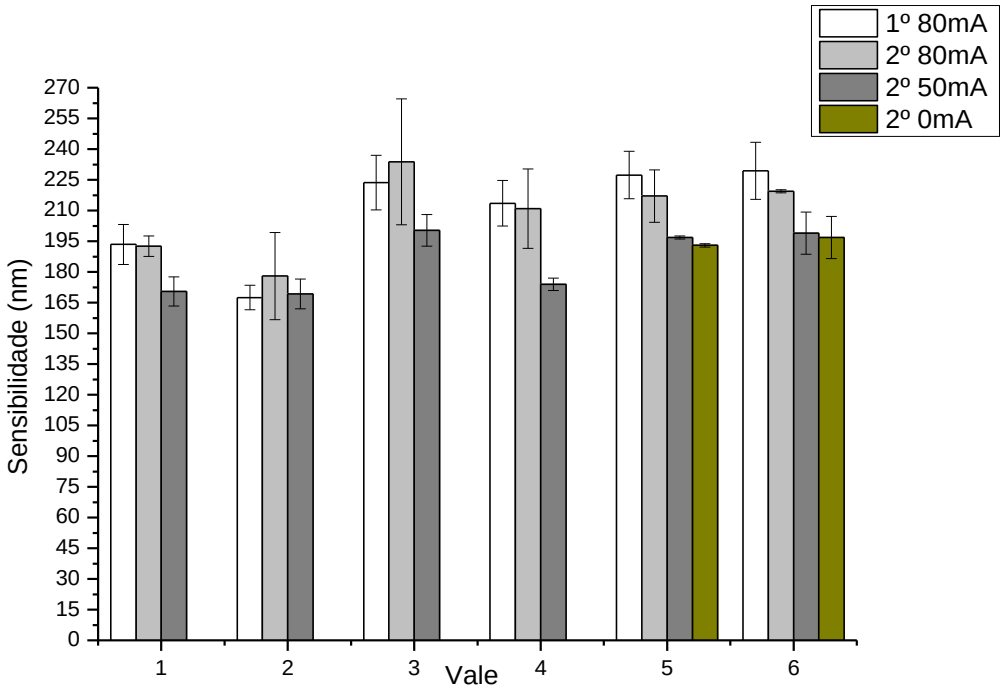



Figura 4.16: Sensibilidade com barra de erro para faixa B de índice de refração.

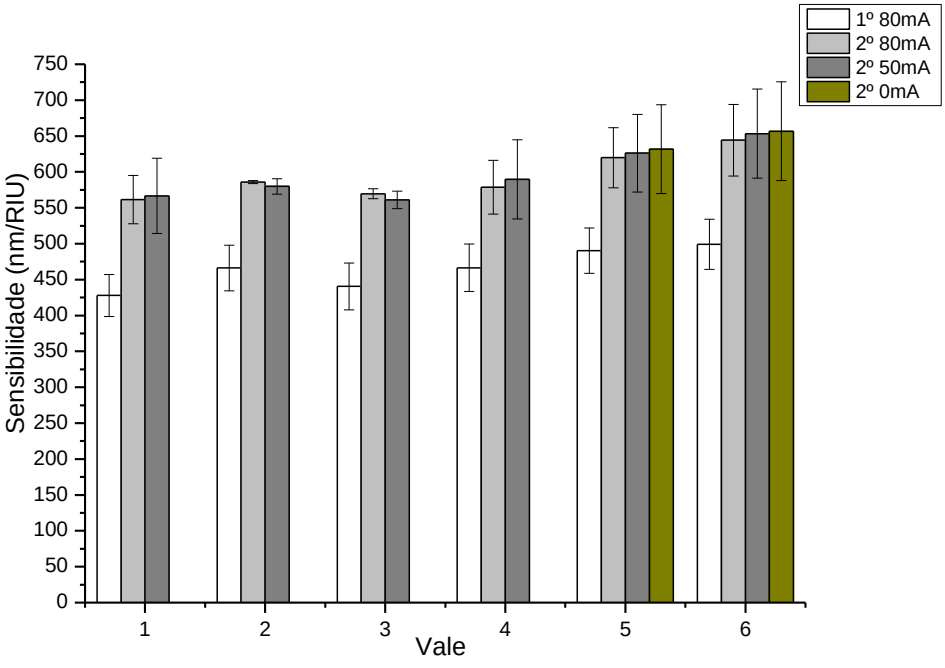



Figura 4.17: Sensibilidade com barra de erro para faixa C de índice de refração.

# 5 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi investigado o impacto na sensibilidade de um sensor de índice de refração com base na interferência multimodal em uma estrutura SMS em fibra ótica, quando configurado em fonte ótica dupla formada por uma fonte banda larga em torno da banda C, e um laser de diodo com emissão na banda S. O laser diodo amplia a faixa espectral utilizável para interrogação do sensor, permitindo a avaliação de um maior número de vales do espectro transmitido, quando comparado com a configuração mais usual que utiliza somente uma fonte de banda larga.

O desenvolvimento conceitual demonstrou que apenas os dez primeiros modos guiados presentes na seção MMF são excitados com uma parcela significativa de potência transmitida no acoplamento entre a SMF e a seção MMF.

O ponto de reimagem foi calculado e demonstrado para o lambda central de cada fonte ótica através da simulação em MatLab da transmissão de potência ao longo do eixo de propagação na seção de MMF, levando em consideração os dez primeiros modos guiados. O sensor de índice de refração em configuração SMS apresentou formação da reimagem com a reprodução de aproximadamente 97% da potência do sinal original na entrada da MMF. O ponto de reimagem ocorreu em uma distância menor do eixo de propagação da MMF para a fonte ótica de maior comprimento de onda e a diferença do ponto de reimagem calculado para o simulado foi menor que 3,1%.

O aparato experimental foi montado para analisar os resultados práticos da configuração em fonte dupla de um sensor modalmétrico de índice de refração em configuração de fonte ótica dupla. A fonte banda larga utilizada é do tipo comercial e o laser de diodo foi montado em uma fonte de corrente desenvolvida para este projeto. O sinal proveniente das fontes é combinado através de um WDM utilizado como multiplexador, onde o comprimento de onda de operação das portas são P1 (1480 nm), P2 (1550 nm) e P3 (1480 nm à 1550 nm). O espectro do sinal após o WDM apresenta um vale marcado entre os comprimentos de onda de 1490nm a 1530nm, ocorrendo na faixa de comprimento de onda entre o término da operação do laser diodo e o início da faixa de operação da fonte banda larga. O sensor SMS utilizado possui um segmento de MMF

com aproximadamente 58mm de comprimento e raio de 62,5 μm.

A estrutura de sensoriamento SMS foi montada em uma placa de acrílico transparente e posicionada mantendo uma altura de 2mm da estrutura de acrílico para tentar assegurar a remoção das soluções líquidas a cada troca e garantir o embebimento do sensor SMS pelos líquidos. Os resultados experimentais são apresentados e comparados para dois grupos de experimentos na mesma topologia, porém com variação nos valores das correntes de polarização das fontes luminosas utilizadas. No primeiro grupo de experimentos o sensor na configuração de fonte dupla com a corrente na fonte banda larga (SLD) selecionada em 600mA, corrente de polarização na fonte laser (LD) em 80mA é exposto a dezoito soluções com índice de refração variando de 1,3457 a 1,4248 e o sensor é interrogado através de um Analisador de Espectro Ótico (OSA). No segundo grupo de experimentos a topologia do experimento anterior é mantida, a corrente de polarização da fonte banda larga é alterada para 400 mA e as correntes de polarização do laser de 80 mA, 50 mA e 0 mA, foram utilizadas. A estrutura de sensoriamento SMS é exposta a nove soluções com índice de refração variando de 1,3457 a 1,4248 e são realizadas três aquisições do espectro no intervalo de aproximadamente 2 minutos para cada exposição.

No primeiro grupo experimental, a sensibilidade do sensor apresentou um aumento com o índice de refração para todos os vales, como esperado. No entanto, o comportamento da sensibilidade com os vales, para as três faixas, não apresentou um padrão. Na faixa A de índice de refração, as sensibilidades nos vales de 1 a 6 apresentaram desvio padrão em torno de 3% do valor da sensibilidade no vale, e coeficiente de determinação melhor do que 99%. A sensibilidade inicia com um padrão crescente com o número do vale. Este padrão se altera entre os vales 2 e 3, e entre os vales 5 e 6. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração apresentaram um desvio padrão em torno de 5% do valor da sensibilidade no vale e coeficiente de determinação melhor do que 98%. A alteração no padrão de comportamento da sensibilidade se dá entre os vales 2, 3 e 4. A faixa C de índice de refração apresenta um desvio padrão em torno de 7% do valor da sensibilidade e coeficiente de determinação melhor do que 97%. A alteração no padrão para essa faixa se dá entre os vales 2 e 3.

No segundo grupo experimental com corrente no LD de 80 mA, a faixa A de índice de refração apresentou sensibilidades com um desvio padrão em torno de 7% e coeficiente de determinação $94{,}72\% \leq R^2 \leq 99{,}76\%$. A sensibilidade apresentou um padrão crescente com o número do vale a partir do vale 4. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração apresentaram um desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação $96{,}59\% \leq R^2 \leq 99{,}99\%$ para os seis vales. A faixa C de índice de refração apresenta um desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação $98{,}82\% \leq R^2 \leq 99{,}99\%$.

Quando a corrente no LD é alterada para 50mA, a faixa A de índice de refração apresenta sensibilidades com um desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação $99{,}05\% \leq R^2 \leq 99{,}73\%$. A sensibilidade apresenta um padrão crescente com o número do vale a partir do vale 4. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração apresentaram um desvio padrão em torno de 3% e coeficiente de determinação $99{,}46\% \leq R^2 \leq 99{,}99\%$ para os seis vales. A faixa C de índice de refração apresenta um desvio padrão em torno de 7% e coeficiente de determinação $98{,}21\% \leq R^2 \leq 99{,}93\%$.

Ao alterar a corrente no LD para 0mA, a faixa A de índice de refração apresenta sensibilidades com um desvio padrão em torno de 5% e coeficiente de determinação $99{,}11\% \leq R^2 \leq 99{,}81\%$. A sensibilidade apresenta um padrão crescente com o número do vale. As sensibilidades alcançadas na faixa B de índice de refração apresentaram um desvio padrão em torno de 3% e coeficiente de determinação $99{,}45\% \leq R^2 \leq 99{,}99\%$. A faixa C de índice de refração apresenta um desvio padrão em torno de 10% e coeficiente de determinação $97{,}82\% \leq R^2 \leq 98{,}10\%$.

Ao analisar os resultados obtidos através do método de análise utilizado (regressão linear por faixas de índice de refração), quando a corrente no LD é levada a 0 mA ocorre uma redução na sensibilidade em relação a maior sensibilidade obtida na a faixa A, apresentando redução percentual de aproximadamente 1,2% no vale 6 e aproximadamente 5,4% no vale 5. A faixa B de índice de refração apresenta a maior queda percentual na sensibilidade quando a corrente no LD é levada a zero, apresentando uma queda de aproximadamente 14,2% no vale 6 e de aproximadamente 15,1% no vale 5, em relação a maior sensibilidade. Ao contrário das outras faixas de índice de refração, a faixa

C apresentou um aumento na sensibilidade quando a corrente no LD é levada a zero, apresentando um aumento de aproximadamente 1,9% no vale 6 e 1,9% no vale 5, em relação a menor sensibilidade obtida no segundo grupo experimental.

Os resultados obtidos no segundo grupo experimental, com a corrente no LD configurada para 80mA, nos vales (3, 4 e 6) para a faixa A e vales (2 e 3) para faixa B de índice de refração não foram conclusivos devido ao desvio padrão maior do que 10% em relação a sensibilidade. Com base nos resultados experimentais, é possível concluir que a configuração em fonte ótica dupla causou um impacto mais significante na sensibilidade final do sensor SMS nos vales (1, 4, 5 e 6) para a faixa B de índice de refração (1,37 a 1,40).

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se citar o aumento na quantidade de rodadas experimentais, ampliação da faixa de índice de refração investigada, a utilização de fontes óticas abrangendo outras faixas de comprimento de onda e a utilização de sensores SMS com diferentes comprimentos de MMF.

Outro ponto interessante a ser abordado em trabalhos futuros é a utilização de outros métodos para obtenção da sensibilidade nos vales e realizar o comparativo entre os diferentes métodos.

# Referências


AGRAWAL, P., “FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS”. JOHN WILEY &SONS, INC., E. 3ª, P.3-7, 2002

BATTLE, H.,” VIBRATING FIBER OPTIC DEVICE FOR SENSING ANGULAR DISPLACEMENT OF A SHAFT”. UNITED STATES PATENT OFFICE, p.1-6, 1970.

BCCRESEARCH. “PHOTONIC SENSORS AND DETECTORS: TECHNOLOGIES AND GLOBAL MARKETS”. PHOTONICS SENSORS DETECTORS, v.101, p.1-5, 2017.

BRYNGDAHL, O. “IMAGE FORMATION USING SELF-IMAGING TECHNIQUES. JOURNAL OF THE OPTICAL”. SOCIETY OF AMERICA, v.63, n.4, p. 416-419, 1975.

CAMERINI, M. “MONITORAMENTO DE RISERS FLEXÍVEIS ATRAVÉS DE TÉCNICA BASEADA EM VIBRAÇÕES”. DISSERTAÇÃO MESTRADO, p.40-55, 2012.

CHEN, Y., “OPTICAL FIBER MAGNETIC FIELD SENSOR BASED ON SINGLE-MODE-MULTIMODE-SINGLE-MODE STRUCTURE AND MAGNETIC FIELD”. OPTICS LETTERS, v.38, n.20, 2013.

CORREIA, S., “BIOMEDICAL APPLICATION OF OPTICAL FIBRE SENSORS”. JOURNAL OF OPTICS, v.20, n7, p.19-22, 2018.

CORNING. “CWDM passive components fabricated by FBT technology”., 2014. Disponível em:https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/SMF-28%20Ultra.pdf. Acesso em: 06 março de 2021.

CORNING. “SMF-28 ULTRA OPTICAL FIBER PRODUCT INFORMATION”, 2014. Disponível em: https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/SMF-28%20Ultra.pdf. Acesso em: 01 de junho de 2020.

COSTA, J. “SENSOR DE CURVATURA, VAZÃO E ANEMÔMETRO A FIBRA ÓTICA BASEADO EM INTERFERÊNCIA MULTIMODAL”. TESE DE DOUTORADO, p.35-44, 2019.

DESHPANDE, S “MEASURES OF CENTRAL TENDENCY AND DISPERSION”. STATISTICS FOR RESEARCHERS, v.64, p.64-66, 2016.

DIAS, R. “MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES UTILIZANDO SENSORES À FIBRA ÓPTICA: TÉCNICAS E APLICAÇÃO”. p.1-5, 2018.

DOMINGUES, M., “OPTICAL FIBER SENSORS FOR IOT AND SMART DEVICES”, Springer, 1°edição, p.1-10, 2017.

DONG, H. “CORELESS SIDE-POLISHED FIBER: A NOVEL FIBER STRUCTURE FOR MULTIMODE INTERFERENCE AND HIGHLY SENSITIVE REFRACTIVE INDEX SENSORS”. OPTICS EXPRESS, v.25, n.5, 2017.

DUIN, R. “FAST PERCENTILE FILTERING”. PATTERN RECOGNITION LETTERS, v.4, p.269-272, 1986.

FERDINAND, P., “THE EVOLUTION OF OPTICAL FIBER SENSORS TECHNOLOGIES DURING THE 35 LAST YEARS AND THEIR APPLICATIONS IN STRUCTURE HEALTH MONITORING”. EWSHM – 7$^{th}$ EUROPEAN WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, v.7, p.914-928, 2014.

FERNANDES, C., “DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL”. TESE DE DOUTORADO, p.27-31, 2016.

GAO, R. “ACOUSTIC FREQUENCY VIBRATION SENSOR BASED ON TAPERED SMS FIBER STRUCTURE”. SENSORS AND ACTUATORS A: PHISICAL, v.271, p.243-250, 2018.

GONG, Y., “ALL-FIBER CURVATURE SENSOR BASED ON MULTIMODE INTERFERENCE”. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, v.23, n.11, p.679-681, 2011.

GOTTLIEB, M., “METHOD AND MEANS FOR IMPROVED OPTICAL TEMPERATURE SENSOR”. UNITED STATES PATENT OFFICE, p.1-12, 1980.

HAQUE, N. “TEMPERATURE MONITORING OF POWER TRANSFORMER USING FIBER-OPTIC SENSOR”. CONFERENCE ON POWER DIELETRIC AND ENERGY MANAGEMENT AT NERIST (ICPDEN), p.1-5, 2015.

HATTA, A., “SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE OPTICAL FIBRE STRUCTURES FOR OPTICAL SENSING”. TESE DE DOUTORADO, p.5-10, 2009.

JDSU.”Scalable Test Platform designed for installation, commissioning, maintenance and troubleshooting of fiber networks User Manual”, 2012. Disponível em: http://www.livingston-products.com/products/pdf/157546_1_en.pdf. Acesso em: 29 maio de 2020.

JI, P. “FIBER RESHAPING-BASED REFRACTIVE INDEX SENSOR INTERROGATED THROUGH BOTH INTENSITY AND WAVELENGTH DETECTION”. SENSORS, v.19, n.11, p.1-14, 2019.

JUNG Y, “COMPACT THREE SEGMENTED MULTIMODE FIBRE MODAL INTERFEROMETER FOR HIGH SENSITIVITY REFRACTIVE-INDEX MEASUREMENT”. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, v.17, n.5, p.1129-1133, 2006.

KAPRON, F., “RADIATION LOSSES IN GLASS OPTICAL WAVEGUIDES”, 1970.
KUMAR, R., “HIGH SENSITIVITY MICRO/NANO SINGLE-MULTIMODE-SINGLEMODE FIBRE SENSOR”. APPLIED PHYSICS LETTERS, v.17, n.10, 1970.

LEE, B., “INTERFEROMETRIC FIBER OPTIC SENSORS”. SENSORS, v.12, n.3, 2012.

LI, Y. “A REFRACTIVE INDEX SENSOR BASED ON SIGLE MODE NO-CORE SEIGLE-MODE FIBER STRUCTURE”. JOURNAL OF OPTOELECTRONICS LASER, 2013.

LOPEZ, A., “ALL-FIBER MULTIMODE INTERFERENCE MICRO-DISPLACEMENT SENSOR”. MEAS. SCI. TECHNOL, v.24, n.7, p.1-7, 2013.

LÓPEZ, A., “DISTRIBUTED FIBER OPTIC SENSING SYSTEM AND METHOD BASED ON STIMUATED BRILLOUIN SCATTERING”. UNITED STATES PATENT OFFICE, p.1-8, 2017.

LOUPOS, K. “STRUCTURAL HEALTH MONITORING FIBER OPTIC SENSORS”. FIBER OPTIC SENSORS MEASUMENT AND INSTRUMENTATION, v.21, p.185-206, 2017.

LUCESOLI, A., “DISTANCE OPTICAL SENSOR FOR QUANTITATIVE ENDOSCOPY”, 2008. JOURNAL OF BIOMEDICAL OPTICS, V.13(1), P.1-3.

MATIAS, I., “FIBER OPTIC SENSORS CURRENTE STATUS AND FUTURE POSSIBILITIES”. SPRINGER, p.198-205, 2017.

MEHTA, A., “MULTIMODE INTERFERENCE-BASED FIBER-OPTIC DISPLACEMENT SENSOR”. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, v.15, n.18, p.1129-1131, 2003.

MOHAMMED, W., “WAVELENGTH TUNABLE FIBER LENS BASED ON MULTIMODE INTERFERENCE”. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, v.22, n.2, 2004.

MONTGOMERY, D. “APPLIED STATISTICS AND PROBABILITY FOR ENGINEERS”. 3.ª EDIÇÃO, CAPÍTULO 11, 2003.

MORIKAWA, A., “MONITORING OF FLEXILE OIL LINES USING FBG SENSORS”. INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBRE SENSORS, v.7004, p.1-4, 2008.

MORITA, Y., “SMOKE DETECCTING DEVICE UTILIZING OPTICAL FIBERS”. UNITED STATES PATENT OFFICE, p.1-4, 1974.

MORSHED, H., “SELF-IMAGING OPTICAL WAVEGUIDES”. IEEE, p.1-5, 1994.

MUKHERJEE, B. “WDM-BASED LOCAL LIGHTWAVE NETWORKS”, 1992.
FDK. “OPTICAL DEVICES FOR PHOTONIC NETWORKS”.,2015 Disponível em:https://www.lightwavestore.com/files/attachments/product_datasheet/OFC-EVOA-001C_pdf1.pdf. Acesso em: 29 maio de 2020.

NICOLAS, R., “LARGE SCALE APPLICATIONS USING FBG ENSORS: DETERMINATION OF IN-FLIGHT LOADS SHAPE OF A COMPOSITE AIRCRAFTWING”. AEROSPACE MDPI, v.3, n18, 2016.

OVSENÍK, T., “OPTCALLY POWERED FIBER OPTIC SENSORS”. ACTA ELECTROTECHNICA EL INFORMATICA, v.5, n.3, 2005.

PACHON, E., “DISPOSITIVOS EM FIBRA ÓTICA BASEADOS EM INTERFERÊNCIA MULTIMODAL”. DISSERTAÇÃO MESTRADO, p.12-22, 2013.

PÉREZ, M., “FIBER OPTIC PRESSURE SENSOR USING MULTIMODE INTERFERENCE”. CONFERENCE SERIES 274, v.25, n.6, p.1-6, 2011.

RAJAN, G., “OPTICAL FIBER SENSORS ADVANCED TECHNIQUE AND APLICATIONS”, CRC PRESS, p.1-10, 2015.

SANTIAGO, B. “MONITORING FLEXIBLE RISERS WITH OPTICAL SENSORS – OPERATIONAL EXPERIENCE AND FUTURE PERSPECTIVES”. OTC Brazil, 2017.

SCHAFER, R. “WHAT IS A SAVITZKY-GLOAY FILTER”. IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, p.111-117, 2011.

SOCORRO, I., “SENSITIVITY ENHACEMENT IN A MULTIMODE INTERFERENCE-BSED SMS FIBRE STRUCTURE COATED WITH A THIN-FILM”. SENSORS AND ACTUATORS B, v.190, p.363-369, 2013.

SOLDANO, B, “OPTICAL MULTI-MODE INTERFERENCE DEVICES BASED ON SELF-IMAGING”. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, v.13, n.6, p.615-625, 1995.

SOUSA, A. “DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA INTERROGAÇÃO DE SENSORES ÓTICOS”. TRABALHA DE CONCLUSÇAO DE CURSO, p.4-10, 2019.

SUN, Y.” DUAL-PARAMETERS OPTICAL FIBER SENSOR WITH ENHANCED RESOLUTION USING TWISTED MMF BASED ON SMS STRUCTURE”. IEEE SENSORS JOURNAL, v.17, n.10, p.3045-3051, 2017.

TALBOT, “FACTS RELATING TO OPTICAL SCIENCE”. PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE, n.III, p.1-4, 1836.

THORLABS. “CORELESS TERMINATION FIBER FG125LA FG250LA FG400LA”, 2017. Disponível em:https://www.thorlabs.com/drawings/46f7203730de501d-57D17533-B23B-7222-3C82DEF3D195963F/FG125LA-SpecSheet.pdf. Acesso em: 01 de junho de 2020.

THORLABS.“S5FC Series Single Channel Fiber-Coupled SLD Sources Operating Manual”, 2017. Disponível em: https://www.thorlabs.com/drawings/3a8d306ecc32ee2a-8BB5789B-CDC7-DB20-28957123AA1326DD/S5FC1005S-Manual.pdf. Acesso em: 29 maio de 2020.

ULRICH, R. “LIGHT-PROPAGATION AND IMAGING IN PLANAR OPTICAL WAVEGUIDES”. NOUVELLE REVUE D’OPTIQUE, v.6, n.5, p.253-262, 1975.

ULRICH, R. “SELFIMAGING IN HOMOGENEOUS PLANAR OPTICAL WAVEGUIDES”. APPLIED PHYSICS LETTERS, v.27, n.6, p.337-339, 1975.

VILLATORO, J., “LOW-COST OPTICAL FIBER REFRACTIVE-INDEX SENSOR BASED ON CORE DIAMETER MISMATCH”. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, v.24, n.3, p-1409-1413, 2006.

YAO, J. “MICROWAVE PHOTONICS FOR HIGH-RESOLUTION AND HIGH-SPEED INTERROGATION OF FIBER BRAGG GRATING SENSORS”. FIBER AND INTEGRATED OPTICS, v.34, p.204-216, 2015.

YOU, S. “CWDM PASSIVE COMPONENTS FABRICATED BY FBT TECHNOLOGY”. ACTIVE AND PASSIVE OPTICAL COMPONENTS FOR WDM COMMUNICATION, v.4870, p.540-546, 2002.

YU, S., “FIBER OPTICAL SENSORS”. MARCEL DEKKER INC, p.2-36, 2002.

ZHANG, T., “SUPER-HIGH SENSITIVITY OF FIBER TEMPERATURE SENSOR BASED ON LEAKY-MODE BENT SMS STRUCTURE”. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, v.25, n.6, p.560-563, 2013.

ZIYANG, G., “OPTICAL FIBER LASER SENSOR FOR LIQUID LEVEL MEASUREMENT BASED ON MULTIMODE INTERFERENCE EFFECT”. 25th WIRELESS AND OPTICAL COMMUNICATION CONFERENCE (WOCC), p.1-4, 2016.