



**JOÃO GABRIEL MARQUES DE CARVALHO**

**SENSOR ÓPTICO DE VARIAÇÕES DE ÍNDICE DE  
REFRAÇÃO BASEADO EM INTERFERÊNCIA  
MULTIMODAL**

**LAVRAS - MG**

**2026**

**JOÃO GABRIEL MARQUES DE CARVALHO**

**SENSOR ÓPTICO DE VARIAÇÕES DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO BASEADO EM  
INTERFERÊNCIA MULTIMODAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física, área de concentração em Física para obtenção de título de Mestre.

Prof. Dr. Jonas Henrique Osório  
Orientador

Prof. Dr. Jefferson Esquina Tsuchida  
Coorientador

Prof. Dr. Flávio Augusto de Melo Marques  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração  
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com  
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Marques de Carvalho, João Gabriel.

Sensor óptico de variações de índice de refração baseado em interferência multimodal / João Gabriel Marques de Carvalho. - 2026.

79 p. : il.

Orientador: Jonas Henrique Osório

Coorientador: Alexandre Alberto Chaves Cotta

Coorientador: Rero Marques Rubinger

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.

Bibliografia.

1. Sensores a fibra óptica. 2. Interferometria multimodo. 3. Fotônica. I. Osório, Jonas Henrique. II. Chaves Cotta, Alexandre Alberto. III. Marques Rubinger, Rero. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

**JOÃO GABRIEL MARQUES DE CARVALHO**

**SENSOR ÓPTICO DE VARIAÇÕES DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO BASEADO EM  
INTERFERÊNCIA MULTIMODAL**

**OPTICAL REFRACTIVE INDEX SENSOR BASED ON MULTIMODE  
INTERFERENCE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física, área de concentração em Física para obtenção de título de Mestre.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2026.

Dr. Rero Marques Rubinger UNIFEI

Dr. Alexandre Alberto Chaves Cotta UFLA

Dr. Jonas Henrique Osório UFLA



Documento assinado digitalmente

JONAS HENRIQUE OSORIO

Data: 03/05/2026 21:00:37-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jonas Henrique Osório  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2026**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-graduação em Física, pela oportunidade de realização deste mestrado e por toda a infraestrutura disponibilizada.

Ao meu orientador, Professor Jonas Henrique Osório, pela orientação sempre precisa, pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento desta pesquisa. Sua visão científica foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos meus coorientadores, Professor Rero Marques Rubinger, e ao Professor Alexandre Alberto Chaves Cotta, pelas muitas contribuições e pelo apoio pessoal, técnico e intelectual que enriqueceram esta trajetória.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também à FAPEMIG e ao CNPq pelo fomento à pesquisa e pelo suporte financeiro indispensável.

À minha noiva, Francielle Louise Jesus de Paula, pelo amor, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo, em cada etapa deste desafio.

À minha família (pai, mãe e irmão), pelo apoio incondicional e por acreditar em mim.

Ao meu querido amigo João Paulo, pelo incentivo e consideração.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, a modelagem teórica e a validação experimental de um sensor de índice de refração baseado em interferência multimodal, utilizando uma estrutura interferométrica do tipo *Singlemode–No-Core–Singlemode* (SNCS). A proposta fundamenta-se na exploração da interferência multimodal e do fenômeno de autoimagem em fibras ópticas, com ênfase na utilização de uma fibra sem núcleo como região multimodo, de modo a intensificar a interação do campo evanescente com o meio externo. Inicialmente, são revisados os fundamentos do guiamento óptico, da interferência multimodal e das configurações do tipo SMS, bem como os principais modelos teóricos descritos na literatura. Em seguida, a resposta espectral da estrutura SNCS é analisada por meio de simulações analíticas implementadas em Python, reproduzindo resultados previamente reportados e validando o arcabouço teórico adotado. Experimentalmente, a estrutura foi fabricada por fusão direta entre fibras monomodo padrão telecom e um segmento de fibra sem núcleo, sendo caracterizada por meio de um interrogador óptico de banda larga. Ensaios refratométricos foram realizados com a imersão do sensor em soluções aquosas de glicerina em diferentes concentrações, evidenciando deslocamentos espectrais lineares em função do índice de refração do meio externo. Os resultados demonstram elevada sensibilidade e simplicidade construtiva, confirmando o potencial da estrutura SNCS para aplicações em sensoriamento refratométrico, especialmente em monitoramento ambiental e controle de soluções líquidas.

**Palavras-chave:** interferência multimodal; sensor óptico; índice de refração; fibras ópticas.

## ABSTRACT

This work presents the development, theoretical modeling, and experimental validation of a refractive index sensor based on multimode interference, employing a *Singlemode–No-Core–Singlemode* (SNCS) interferometric structure. The proposed approach explores multimode interference and the self-imaging phenomenon in optical fibers, with emphasis on the use of a no-core fiber as the multimode region in order to enhance the interaction between the evanescent field and the surrounding medium. Initially, the fundamental principles of optical waveguiding, multimode interference, and SMS-type configurations are reviewed, together with the main theoretical models reported in the literature. Subsequently, the spectral response of the SNCS structure is analyzed through numerical simulations implemented in Python, reproducing previously reported results and validating the adopted theoretical framework. Experimentally, the structure was fabricated by direct fusion between standard telecom single-mode fibers and a no-core fiber segment, and characterized using a broadband optical interrogator. Refractometric measurements were performed by immersing the sensor in aqueous glycerin solutions with different concentrations, revealing linear and reproducible spectral shifts as a function of the external refractive index. The results demonstrate high sensitivity and structural simplicity, confirming the potential of the SNCS configuration for refractometric sensing applications, particularly in environmental monitoring and liquid solution control.

**Keywords:** multimode interference; optical sensor; refractive index; optical fibers.

## INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho apresenta impactos de natureza tecnológica, ambiental, social e econômica, com desdobramentos diretos no campo científico e impactos potenciais relevantes para a sociedade. O objetivo central consistiu no desenvolvimento e investigação de um sensor óptico baseado em interferência multimodal em fibras ópticas, com aplicação potencial no monitoramento da qualidade de recursos hídricos por meio da detecção de variações do índice de refração associadas à composição do meio. Do ponto de vista tecnológico, os resultados obtidos contribuem para o avanço da instrumentação óptica aplicada, propondo uma estrutura sensorial do tipo *Singlemode–No-Core–Singlemode* (SNCS), caracterizada por simplicidade construtiva e potencial redução de custos quando comparada a soluções comerciais convencionais. Tal contribuição fortalece a capacidade científica e tecnológica institucional da Universidade Federal de Lavras (UFLA), além de favorecer a formação qualificada de recursos humanos em fotônica e sensoriamento óptico. Sob a perspectiva ambiental e social, os impactos são predominantemente potenciais, uma vez que a tecnologia desenvolvida pode ser aplicada ao monitoramento da qualidade da água em corpos hídricos superficiais, efluentes e sistemas de abastecimento. Essas aplicações beneficiam indiretamente populações urbanas e rurais dependentes desses recursos, especialmente no território do sul de Minas Gerais e em regiões com características socioambientais semelhantes, contribuindo para a prevenção de riscos ambientais e para a promoção da saúde pública. No aspecto econômico, a possibilidade de implementação de sensores ópticos de baixo custo, de fácil fabricação e integração, pode contribuir para a redução de despesas associadas a métodos tradicionais de análise da qualidade da água. Isso amplia o acesso ao monitoramento contínuo por parte de órgãos públicos, companhias de saneamento e instituições ambientais, favorecendo a otimização de recursos e a tomada de decisões baseadas em dados em tempo real. O trabalho apresenta ainda caráter extensionista em potencial, com possibilidade de desdobramentos em ações futuras de extensão universitária envolvendo parcerias com órgãos ambientais, empresas de saneamento, escolas técnicas e comunidades locais. Tais ações podem incluir atividades de transferência de tecnologia, educação ambiental, capacitação técnica e monitoramento participativo, com envolvimento de docentes, discentes e técnicos da universidade. Os impactos do trabalho enquadram-se principalmente nas áreas temáticas da Política Nacional de Extensão “Meio ambiente”, “Tecnologia e produção” e “Educação”. Ademais, os resultados e suas aplicações potenciais alinham-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente ao ODS 6 (Água potável e



saneamento), ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), contribuindo para o cumprimento da Agenda 2030 no contexto nacional.

## IMPACT INDICATORS

This work presents technological, environmental, social, and economic impacts, with direct contributions to scientific advancement and relevant potential benefits for society and the territory. The main objective was the development and investigation of an optical sensor based on multimode interference in optical fibers, with potential application in water quality monitoring through the detection of refractive index variations associated with changes in the medium composition. From a technological perspective, the results contribute to the advancement of applied optical instrumentation by proposing a *Singlemode–No-Core–Singlemode* (SNCS) sensing structure, characterized by structural simplicity, mechanical robustness, and potential cost reduction when compared to conventional commercial solutions. This represents a concrete contribution to strengthening the scientific and technological capacity of the Federal University of Lavras (UFLA) and to the training of highly qualified human resources in photonics and optical sensing. From an environmental and social standpoint, the impacts are predominantly potential, as the developed technology may be applied to monitoring water quality in surface water bodies, effluents, and supply systems. Such applications indirectly benefit urban and rural populations that depend on these resources, particularly in the southern region of Minas Gerais and in areas with similar environmental and socioeconomic characteristics, contributing to public health protection and environmental risk prevention. In economic terms, the possibility of implementing low-cost, easily fabricated, and easily integrated optical sensors may contribute to reducing expenses associated with traditional water quality analysis methods. This can expand access to continuous monitoring for public agencies, sanitation companies, and environmental institutions, enabling more efficient resource allocation and data-driven decision-making. The work also presents potential extension-oriented outcomes, with opportunities for future university extension activities involving partnerships with environmental agencies, sanitation companies, technical schools, and local communities. These actions may include technology transfer, environmental education, technical training, and participatory monitoring, with the involvement of faculty members, students, and technical staff. The impacts of this work are primarily associated with the extension thematic areas of Environment, Technology and Production, and Education. Furthermore, the results and their potential applications are aligned with the United Nations Sustainable Development Goals, particularly SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 12 (Responsible

Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action), contributing to the implementation of the 2030 Agenda in the national context.

## LISTA DE SIGLAS

|      |                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------|
| FBG  | <i>Fiber Bragg Grating</i> (Rede de Bragg em Fibra Óptica)             |
| FCP  | <i>Fiber Crystal Photonic</i> (Fibra de Cristal Fotônico)              |
| FME  | Fibra com Microestrutura Exposta                                       |
| FMO  | Fibra Microestruturada Óptica ( <i>Microstructured Optical Fiber</i> ) |
| FP   | Fabry_Perot                                                            |
| IFP  | Interferômetro Fabry-Perot                                             |
| LP   | <i>Linearly Polarized</i> (Modo Linearmente Polarizado)                |
| MMF  | <i>Multimode Fiber</i> (Fibra Multimodo)                               |
| MMI  | <i>Multimode Interference</i> (Interferência Multimodal)               |
| MMMF | <i>Multimode Microfiber</i> (Microfibra Multimodo)                     |
| MOF  | <i>Microstructured Optical Fiber</i> (Fibra Óptica Microestruturada)   |
| NCF  | <i>No-Core Fiber</i> (Fibra sem Núcleo)                                |
| OCT  | <i>Optical Coherence Tomography</i> (Tomografia de Coerência Óptica)   |
| SMS  | <i>Singlemode–Multimode–Singlemode</i>                                 |
| SMF  | <i>Singlemode Fiber</i> (Fibra Monomodo)                               |
| SNCS | <i>Singlemode–No-Core–Singlemode</i>                                   |
| MMF  | <i>Multimode microfiber</i>                                            |
| RIU  | <i>refractive index unit</i>                                           |

## SUMÁRIO

|            |                                                                           |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                   | <b>12</b> |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL</b>                                                        | <b>13</b> |
|            | <b>TEÓRICO .....</b>                                                      |           |
| <b>2.1</b> | <b>Do restrito transporte de informações ao sensoriamento</b>             | <b>13</b> |
|            | <b>óptico .....</b>                                                       |           |
| <b>2.2</b> | <b>A estrutura single-multi-singlemode e o princípio de interferência</b> |           |
|            | <b>multimodal .....</b>                                                   | <b>23</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Determinação do parâmetro de guia de onda (frequência</b>              | <b>24</b> |
|            | <b>normalizada) ...</b>                                                   |           |
| <b>2.4</b> | <b>Caracterização da distribuição de campo (número de onda</b>            | <b>25</b> |
|            | <b>transversal) ..</b>                                                    |           |
| <b>2.5</b> | <b>Análise da transmissão de potência</b>                                 | <b>28</b> |
|            | <b>óptica .....</b>                                                       |           |
| <b>2.6</b> | <b>Autoimagem e resposta interferométrica em estruturas SMS e</b>         | <b>31</b> |
|            | <b>SNCS .....</b>                                                         |           |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA .....</b>                                                  | <b>32</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Medidas e aquisição de dados .....</b>                                 | <b>39</b> |
| <b>4</b>   | <b>(IFP) INTEGRAÇÃO DE INTERFEROMETRIA FABRY-PEROT</b>                    |           |
|            | <b>(FPI) EM ESTRUTURAS</b>                                                | <b>42</b> |
|            | <b>SMS .....</b>                                                          |           |
| <b>4.1</b> | <b>Fundamentos e classificação de interferômetros Fabry-</b>              | <b>42</b> |
|            | <b>Perot .....</b>                                                        |           |
| <b>4.2</b> | <b>Caracterização experimental da estrutura Fabry-</b>                    | <b>43</b> |
|            | <b>Perot .....</b>                                                        |           |
| <b>4.3</b> | <b>Relação entre o Free Spectral Range e o comprimento da</b>             | <b>45</b> |
|            | <b>cavidade .....</b>                                                     |           |
| <b>4.4</b> | <b>Interferência Fabry–Perot em filme fino Polimérico de Poliestireno</b> |           |
|            | <b>Sulfonato de Sódio</b>                                                 | <b>47</b> |
|            | <b>(PSSH) .....</b>                                                       |           |
| <b>5</b>   | <b>INTEGRAÇÃO DA INTERFERÊNCIA MULTIMODAL (MMI) COM</b>                   |           |
|            | <b>CAVIDADES FABRY–</b>                                                   | <b>48</b> |
|            | <b>PEROT .....</b>                                                        |           |

|     |                                                              |        |
|-----|--------------------------------------------------------------|--------|
| 5.1 | Configuração experimental da estrutura híbrida MMI+FPI ..... | 49     |
| 6   | DISCUSSÃO                                                    | DOS 53 |
|     | RESULTADOS .....                                             |        |
| 7   | CONCLUSÃO .....                                              | 55     |
|     | REFERÊNCIAS .....                                            | 56     |
|     | APÊNDICE A - CÓDIGOS PYTHON E SEUS RESPECTIVOS               | 58     |
|     | SETUPS                                                       |        |
|     | APÊNDICE B - REPRESENTAÇÃO DO FLUXO LÓGICO DO                |        |
|     | MODELO DE SIMULAÇÃO PARAMÉTRICA .....                        | 73     |

## 1 INTRODUÇÃO

Fibras ópticas se mostram atualmente como tecnologia habilitadora para os novos desenvolvimentos em fotônica. De fato, o desenvolvimento da fibra óptica como sensor e como meio de transmissão de dados tem avançado desde as décadas de 1960 e 1970, impulsionado pelos trabalhos pioneiros de Charles Kao e George Hockham. Em 1966, esses autores publicaram o artigo *Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*, no qual demonstraram que as fibras ópticas poderiam transmitir luz com perdas significativamente menores do que as observadas até então, desde que fossem fabricadas a partir de materiais de alta pureza. Conforme relatado por *History of Information* (2025) e pela *Queen Mary University of London* (2009), esse estudo evidenciou que a elevada atenuação das fibras disponíveis à época não constituía uma limitação fundamental do material, mas resultava principalmente da presença de impurezas no vidro. Dessa forma, estabeleceu-se que as perdas ópticas poderiam ser reduzidas a níveis compatíveis com a transmissão de dados em longas distâncias, viabilizando o desenvolvimento futuro da comunicação óptica moderna e, posteriormente, a utilização da fibra óptica como elemento sensor em diversas aplicações.

A validação prática dessa teoria ocorreu em 1972, quando pesquisadores Robert Maurer, Donald Keck e Peter Schultz da Corning Glass Works, desenvolveram fibras de sílica fundida com perdas significativamente reduzidas, conforme descrito no trabalho *Fused Silica Optical Waveguide*. Nesse estudo, os autores detalharam a obtenção de um material com desempenho óptico superior, representando um marco tecnológico que consolidou a fibra óptica como uma alternativa viável aos cabos metálicos na transmissão de informações. Esse avanço não apenas impulsionou os sistemas de telecomunicações, mas também abriu caminho para o uso das fibras ópticas em sensoriamento, explorando características como elevada sensibilidade a variações ambientais, imunidade a interferências eletromagnéticas, baixo peso e capacidade de operação em ambientes hostis.

Nesse contexto, dentre as diferentes tecnologias que podem ser utilizadas para se obter sensores baseados em fibras ópticas, configurações baseadas em interferometria destacam-se por explorar fenômenos fundamentais da óptica, como a interferência e o princípio da autoimagem, para converter perturbações externas em variações espectrais mensuráveis. Revisões recentes, como a de Wang *et al.* (2021), indicam que estruturas interferométricas baseadas em fibras multimodo, especialmente do tipo singlemode-multimodo-singlemode (SMS), apresentam uma combinação atrativa de simplicidade construtiva, baixo custo e elevada sensibilidade. Nessas configurações, a interferência multimodal na região multimodo

é fortemente influenciada por parâmetros externos, como temperatura, deformação mecânica e índice de refração do meio circundante.

Com o objetivo de intensificar a interação entre o campo evanescente e o ambiente externo, diversas variações da configuração SMS vêm sendo propostas, incluindo o uso de fibras sem núcleo, fibras cônicas e fibras microestruturadas. Em particular, estudos como os de Xu *et al.* (2017) mostram que a ausência de um núcleo definido em fibras no-core altera significativamente o comportamento modal, ampliando o número de modos excitados e aumentando a sensibilidade do espectro interferométrico a variações do índice de refração externo. Paralelamente, trabalhos clássicos, como os de Soldano (1995) e Bai *et al.* (2015), fornecem a base teórica para a compreensão do fenômeno de autoimagem e da formação dos padrões espectrais em dispositivos interferométricos multimodais.

Diante desse panorama, o presente trabalho propõe e investiga experimentalmente uma estrutura interferométrica do tipo *singlemode-no-core-singlemode* (SNCS), explorando a interferência multimodal em fibras ópticas para o desenvolvimento de um sensor refratométrico compacto e de fácil implementação. Levanta-se a hipótese de que o uso de uma fibra sem núcleo como região multimodal permite obter uma resposta espectral sensível e aproximadamente linear a variações do índice de refração do meio externo, tornando a estrutura SNCS adequada para aplicações em sensoriamento refratométrico, com potencial uso em monitoramento ambiental e controle de recursos hídricos.

Adicionalmente, apresenta-se também uma configuração interferométrica híbrida do tipo *singlemode-multimode-singlemode* associada a um interferômetro de Fabry-Pérot (SMS+FPI), na qual os efeitos de interferência multimodal são combinados com múltiplas reflexões em cavidade óptica. Essa abordagem visa explorar a complementaridade entre os dois mecanismos interferométricos, permitindo maior flexibilidade no projeto do sensor, bem como a possibilidade de aprimorar a sensibilidade espectral e a seletividade da resposta refratométrica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Do restrito transporte de informações ao sensoriamento óptico

De fato, o desenvolvimento de sensores ópticos avançou significativamente nos últimos anos, impulsionando a criação de dispositivos como divisores de sinal, moduladores e filtros. Nesse sentido, Wang *et al.* (2021) destacam que esses avanços permitiram ampliar a



aplicação desses elementos em áreas como monitoramento estrutural, ambiental, industrial e biomédico. Dentre as tecnologias que se destacam nesse contexto, a reflectometria no domínio da frequência óptica tem se mostrado especialmente eficaz na detecção de variações ambientais e na vigilância de estruturas ao longo de grandes distâncias, como demonstram Bai *et. al* (2015). Esse progresso demonstra como fundamentos da óptica, como a interferometria, continuam a orientar o desenvolvimento de sensores mais precisos e especializados.

Segundo Swargiary, *et. al* (2022), é possível fazer uso de sensores a fibra para monitorar pressão, temperatura e vibrações em tempo real ao longo de tubulações e poços, permitindo a detecção precoce de vazamentos e falhas operacionais, eliminando a necessidade de utilização de sensores eletrônicos e agregando mais segurança em ambientes voláteis, fornecendo dados precisos sobre o ambiente e auxiliando na manutenção preventiva, eliminando a necessidade da presença humana em locais de alta periculosidade.

De acordo com Bian *et al.* (2023), é comum encontrar fibras ópticas em setores como a biomedicina, onde são aplicadas em técnicas de imageamento, como a tomografia de coerência óptica e em sensores minimamente invasivos para monitorar parâmetros fisiológicos, como pH e temperatura, em tecidos biológicos. Essa mesma tecnologia, que oferece alta sensibilidade e precisão, também se mostra essencial em outros campos, como na aviação. Segundo Di Sante (2015), as fibras ópticas desempenham um papel crucial no monitoramento estrutural de aeronaves, detectando microtrincas, deformações e impactos nas asas, fuselagens e motores. É também destacado pelos autores que essa versatilidade elimina a dependência exclusiva de sensores eletrônicos, que são naturalmente mais pesados e em muitos casos menos sensíveis a alterações. Com isso, podemos constatar que a versatilidade das fibras ópticas, aliada à sua resistência a interferências e capacidade de operar em ambientes adversos, consolida sua importância em setores tão diversos quanto a biomedicina e a aviação, tornando-as uma ferramenta indispensável para garantir eficiência e segurança.

Essa mesma versatilidade é amplificada com a introdução de tecnologias avançadas, como os sensores ópticos baseados na interferência multimodal (MMI). A introdução da tecnologia de sensores ópticos fundamentados em MMI representou um avanço significativo, permitindo a criação de sensores mais sensíveis e seletivos. Dentre essas configurações, destaca-se a singlemode-multimode-singlemode (SMS), que consiste em uma fibra singlemode (SMF) acoplada a uma fibra multimodo (MMF), seguida de uma nova seção monomodo, que, segundo Wu *et al.* (2021), tem se consolidado como uma das mais eficazes devido à sua estrutura simplificada, aplicabilidade e capacidade de monitoramento preciso de variações no meio externo. Ainda segundo os autores, essa configuração tem sido amplamente

utilizada na detecção de temperatura, tensão mecânica, vibração, fluxo, índice de refração e umidade, o que a torna ideal para as aplicações anteriormente sugeridas.

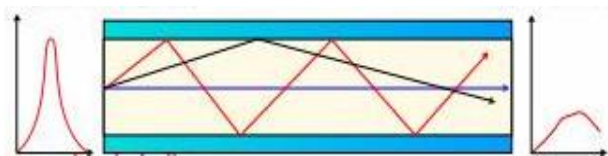
Essas estruturas podem ser devidamente descritas conforme as Figuras 1, 2 e 3. A Figura 1 representa a estrutura de uma fibra SMF. Esse tipo de fibra óptica é projetado para transmitir sinais ópticos a longas distâncias utilizando um único modo de propagação de ondas o em seu interior. Isso minimiza distorções e dispersões, garantindo uma transmissão mais eficiente e confiável. A figura 2, por sua vez, apresenta uma representação da estrutura MMF, um tipo de fibra óptica capaz de comportar um amplo conjunto de modos de propagação de onda em seu interior

Figura 1- Representação esquemática da configuração tipo SMF



Fonte: Adaptado de Wang, et.al (2011)

Figura 2 - Representação esquemática da configuração tipo MMF



Fonte: Adaptado de Wang, et.al (2011)

Nesse contexto, Bai *et al.* (2015) discutem o funcionamento das estruturas interferométricas baseadas em fibras multimodo, como a configuração SMS, cuja operação depende da excitação simultânea de múltiplos modos de propagação quando a luz proveniente de uma fibra monomodo é acoplada a uma fibra multimodo. Cada modo apresenta uma constante de propagação distinta e a interferência entre esses modos ao longo do comprimento da fibra multimodo dá origem a padrões periódicos de distribuição do campo óptico. A evolução espacial desses padrões está diretamente associada ao fenômeno de re-imagem (*self-imaging*), resultante da interferência construtiva entre os modos, o que permite a replicação do perfil do campo de entrada em posições específicas ao longo do eixo de propagação da fibra, bem como destacam Wu *et al.* (2021).

De acordo com Wang *et al.* (2021), a distância ao longo do eixo longitudinal da fibra na qual ocorre a re-imagem depende das propriedades ópticas e geométricas do guia multimodal, como o índice de refração efetivo dos modos excitados e o diâmetro da fibra. Essa relação pode ser descrita matematicamente pela Equação (1), que define o comprimento característico de re-imagem em dispositivos baseados em interferência multimodal.

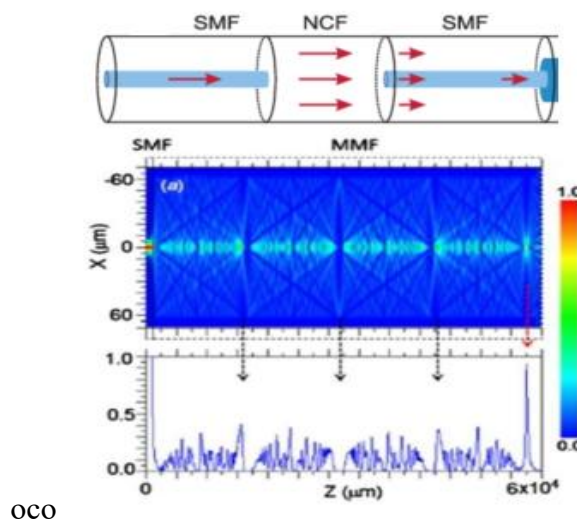
$$Z_{SI} = \frac{4n_{core}D_{core}^2}{\lambda_0}, \quad (1)$$

onde D é o diâmetro do núcleo da MMF,  $n_{core}$  é o índice de refração do núcleo da MMF, e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda.

Historicamente, a teoria da re-imagem foi consolidada por Soldano (1995) no trabalho *Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications*, no qual foram reunidas e sistematizadas pesquisas desenvolvidas no início da década de 1990, estabelecendo um marco teórico no contexto da interferência multimodal.

A Figura 3 apresenta a simulação da intensidade óptica em uma configuração SMS, onde a fibra MMF tradicional é substituída por um bastão de sílica ou *no-core fiber*. O padrão de intensidade observado resulta da interferência entre modos ópticos, gerando variações de amplitude, em particular, permitindo replicar as características do campo de entrada. As oscilações dependentes das características ópticas do meio externo permitem o uso dessa configuração em sensores para monitoramento de temperatura, umidade e pressão.

Figura 3 - Configuração tipo SMS, com núcleo multimodo



Fonte: Adaptado de Wang, *et.al* (2011) e Wu, *et. Al* (2021)

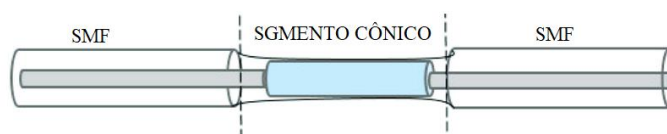
Conforme ilustram Snyder e Love (1983), esse design permite a propagação de múltiplos modos na região multimodo, cuja interferência gera padrões espectrais sensíveis a alterações no índice de refração do meio circundante. Dessa forma, os sensores SMS se mostram eficientes na detecção de variações ambientais, sendo explorados para monitoramento da qualidade da água, detecção de contaminantes e controle de processos industriais.

Os principais fatores que influenciam o desempenho de sensores SMS incluem as propriedades geométricas e os materiais que compõem essas fibras. Segundo Wu *et al.* (2021), o comprimento da região multimodo impacta diretamente a periodicidade dos padrões interferométricos, enquanto o diâmetro da fibra determina a quantidade de modos ópticos excitados e a interação do campo evanescente com o meio externo. Ademais, estudos de Xu *et al.* (2017) evidenciam que a aplicação de revestimentos especializados também permite aprimorar a seletividade e estabilidade da resposta sensorial em diferentes condições operacionais.

Outro aspecto importante para o desenvolvimento dos sensores baseados em fibras ópticas é sua capacidade de integração com sistemas eletrônicos e softwares avançados de processamento de sinais. Segundo Osório e Cordeiro (2024), a evolução da fotônica e da microeletrônica tem possibilitado o desenvolvimento de dispositivos cada vez mais compactos, eficientes e de baixo custo para monitoramento em tempo real. Essas soluções são relevantes para aplicações ambientais, como a análise da qualidade da água, onde a detecção de alterações no índice de refração pode indicar a presença de contaminantes ou variações nas condições do meio.

Dessa forma, diversas modificações na configuração tradicional SMS têm sido exploradas para melhorar a sensibilidade e a aplicabilidade dos sensores ópticos. Entre essas variações, destacam-se o uso de fibras de núcleo exposto, fibras sem núcleo e fibras cônicas (Figura 4), cada uma com características específicas que permitem a adaptação do sensor a diferentes aplicações, bem como apontam Wu *et al.* (2021).

Figura 4 - Ilustração de uma Fibra Cônica comum



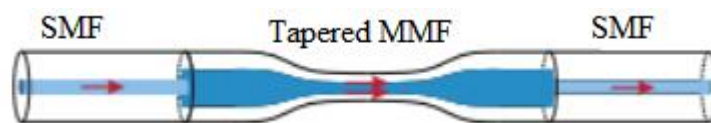
Fonte: Taha, *et. al* (2020)

De acordo com Wu *et al.* (2021), a aplicabilidades de estruturas do tipo SMS é constantemente investigada em sensores ópticos baseados em interferência multimodal. Nesses sistemas, um segmento de fibra multimodo é intercalado entre duas fibras monomodo, formando uma cavidade interferométrica capaz de responder a variações de temperatura, deformação, pressão e índice de refração do meio circundante.

Com o objetivo de ampliar a sensibilidade e diversificar as faixas de medição, diferentes adaptações estruturais têm sido propostas para o segmento multimodo. Entre as principais variações, destacam-se as fibras cônicas, projetadas para aumentar a interação do campo evanescente com o meio externo e aprimorar a resposta interferométrica. A consolidação dessas geometrias demonstra a tendência de se buscar maior controle sobre o acoplamento modal e sobre a interação entre o campo óptico e o meio externo.

Conforme Wang *et al.* (2021), as fibras cônicas ou *tapered fibers* são obtidas por meio do aquecimento e estiramento controlado de uma fibra convencional, resultando em uma região afilada, onde os diâmetros do núcleo e da casca são gradualmente reduzidos. Essa modificação geométrica altera o confinamento dos modos guiados e promove uma maior penetração do campo óptico no meio externo. Portanto, quanto menor o diâmetro da região cônica, maior é a fração de potência óptica propagada fora do núcleo, elevando a sensibilidade e a capacidade de sensoramento.

Figura 5 - Representação esquemática de uma fibra multimodo cônica (*tapered* MMF), evidenciando a região afilada e a expansão do campo evanescente no meio externo.

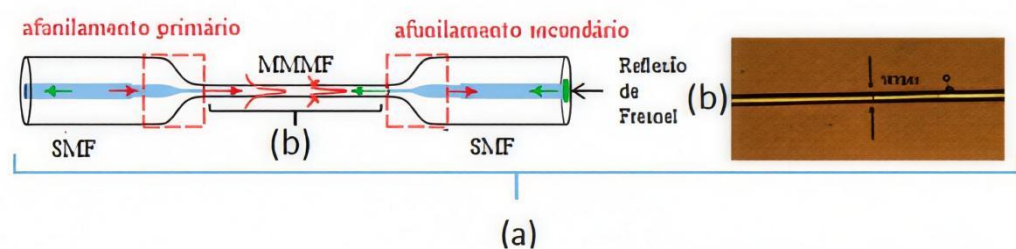


Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2021)

Já com relação a fibra multimodo cônica dupla ou *tapered multi-mode microfiber*, por sua vez, representa uma variação estrutural relevante no campo do sensoramento óptico. Nessa arquitetura, duas regiões de afilamento são combinadas, resultando na formação de uma microcavidade óptica entre elas. Analogamente a tapered MMF, essa configuração é classificada como uma fibra multimodo modificada, visto que o segmento central de microfibra multimodo (MMMMF) ainda suporta a propagação de múltiplos modos, sendo o seu

mecanismo de operação fundamental baseado na Interferência Multimodal. O afilamento reforça o acoplamento modal e introduz um mecanismo adicional de reflexão de Fresnel. segundo Wang *et al.* (2021), esse retorno óptico contribui para a geração de padrões interferométricos mais definidos e confere maior controle sobre a resposta espectral, uma característica essencial para aplicações que exigem a medição simultânea de múltiplos parâmetros. Além disso, também destacam a possibilidade de ser empregada em sensores refratométricos e de temperatura de alta precisão. Arregui *et al.* (2002) apontam a versatilidade dessa microcavidade, o que a torna ideal para ser integrada em configurações compostas mais avançadas, como o acoplamento com redes de Bragg em fibra (FBGs) ou cavidades Fabry–Perot, a fim de explorar os efeitos ressonantes e intensificar ainda mais a seletividade e a precisão do sensoriamento.

Figura 6 - (a) Estrutura esquemática de uma fibra multimodo cônica dupla (*tapered multi-mode microfiber*), mostrando as duas regiões de afilamento e o ponto de reflexão de Fresnel. (b) Imagem microscópica de uma MMMF.



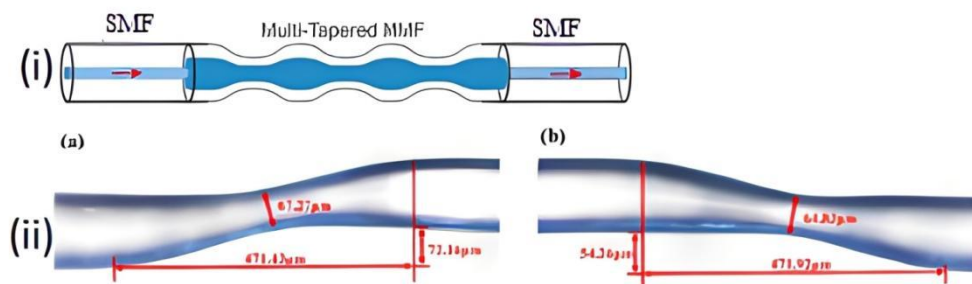
Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2017) e Bai *et. al* (2015)

Enquanto isso, as fibras multimodo multicônicas (*multi-tapered* MMF) representam uma evolução das geometrias afiladas, incorporando múltiplas seções de estreitamento ao longo do eixo da fibra. De acordo com Wang *et al.* (2021), essa disposição sequencial de regiões cônicas possibilita o acoplamento progressivo entre modos e aumenta a complexidade do espectro interferométrico. Isso pode ser explorado para ampliar a faixa dinâmica de medição e melhorar a resolução espectral, sendo essas estruturas especialmente úteis em aplicações que exigem elevada sensibilidade e estabilidade espectral. A complexidade espectral inerente às configurações multicônicas, gerada pelo acoplamento modal otimiza a resposta do sensor, similarmente ao que é observado em outras microcavidades, onde essa alta modulação espectral pode ser aproveitada em sistemas de sensoriamento integrados. Para Arregui *et al.* (2002), a combinação da *multi-tapered* MMF com outros elementos ressonantes, como redes de Bragg em fibra (FBGs) ou cavidades Fabry–Perot, permite explorar os efeitos

ressonantes para intensificar a resposta, o que melhora a seletividade e a precisão do sensoriamento. Essa abordagem é crucial para aplicações que buscam a medição simultânea de múltiplos parâmetros com alta distinção espectral.

Assim, podemos dizer que a estrutura *multi-tapered* MMF é uma modificação da configuração SMS tradicional, uma vez que ambas compartilham o princípio fundamental da Interferência Multimodal dentro de um segmento que suporta múltiplos modos. Enquanto a SMS tradicional utiliza um segmento de fibra multimodo reto, a *multi-tapered* MMF introduz afilamentos para modular ativamente o acoplamento modal e a interação com o meio externo, o que a torna uma das diversas modificações exploradas para melhorar a sensibilidade e a aplicabilidade do sensor. Essa versatilidade permite que os fundamentos teóricos de ambas as configurações, como a descrição da interferência e do efeito de autoimagem, sejam amplamente correlacionados para fins de análise e modelagem.

Figura 7 - (i) Esquema de uma fibra multimodo multicônica (*multi-tapered* MMF), destacando as múltiplas regiões de afilamento e o acoplamento modal sequencial. (ii) Imagem microscópica de uma *multi-tapered* MMF.



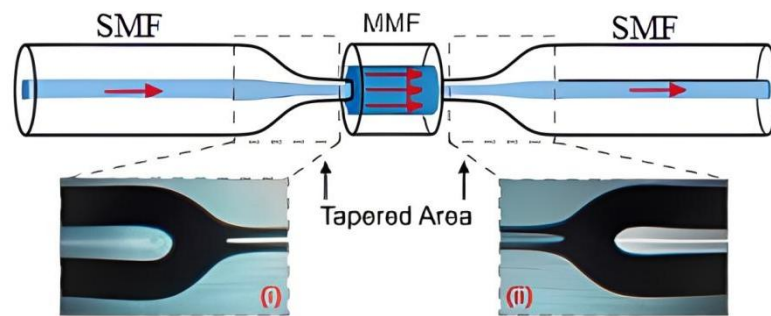
Fonte: (i) Adaptado de Wu *et al.* (2021). (ii) ZHANG, *et. al* (2018)

Outra modificação amplamente explorada da estrutura SMS envolve a inserção de uma fibra multimodo entre duas fibras monomodo semi-afiladas ou MMF *sandwiched between two half-tapered SMFs*. Essa geometria, segundo Wu *et al.* (2021), promove uma transição gradual nas interfaces de acoplamento, reduzindo perdas ópticas e aumentando a eficiência de excitação modal. As regiões afiladas das fibras monomodo atuam como adaptadores modais, expandindo o campo óptico antes da junção com a fibra multimodo e favorecendo a excitação de modos de ordem mais elevada. Esse comportamento intensifica os efeitos de interferência multimodal, aprimorando o contraste e a estabilidade espectral da resposta interferométrica. Além disso, a transição suave entre as seções reduz a dispersão modal e as perdas de acoplamento, o que resulta em espectros mais definidos e reproduzíveis, mesmo sob pequenas variações ambientais. Ainda de acordo com os autores, a adoção de



fibras semi-afiladas nas interfaces SMF–MMF também contribui para maior robustez mecânica e estabilidade interferométrica, propriedades essenciais em sensores ópticos aplicados a ambientes sujeitos a vibrações ou flutuações térmicas. Como observado na Figura 8, o processo de afilamento é restrito às extremidades das fibras monomodo, o que garante a integridade estrutural da fibra multimodo central, assegurando melhor resistência mecânica sem comprometer o desempenho óptico. Essa configuração, evidencia as regiões de transição gradual entre as fibras e demonstra como o controle geométrico das junções pode otimizar o acoplamento modal e aumentar a eficiência global do sensor.

Figura 8 - Representação esquemática de uma fibra multimodo intercalada entre duas fibras monomodo semi-afiladas, com destaque para as regiões de transição suave nas interfaces de acoplamento.

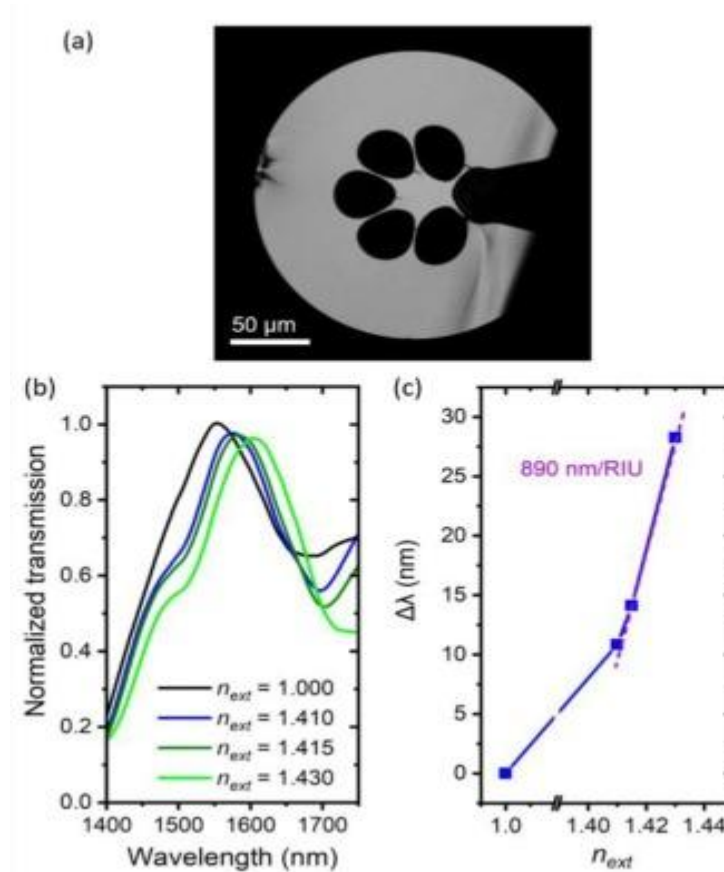


Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2021).

Embora as fibras cônicas representem um grande avanço na tecnologia no ramo de sensoriamento, Osório *et al.* (2021) apresentaram uma relevante contribuição ao empregar fibras com microestrutura exposta (FMEs) (Figura 9) em arranjos do tipo SMS, nas quais o núcleo é acessível lateralmente ao ambiente. Essa característica permite que os modos guiados interajam diretamente com o meio externo, ampliando significativamente a sensibilidade do dispositivo a variações de índice de refração e composição do entorno. O princípio de funcionamento baseia-se na interferência multimodal que ocorre no segmento de fibra com núcleo exposto, onde o campo evanescente se estende para fora da fibra, tornando o sensor responsivo às mudanças ópticas induzidas pelo meio circundante.



Figura 9 - Seção transversal da fibra de núcleo exposto utilizada em Osório *et al.* (2021).



Fonte: Osório *et al.* (2021)

Paralelamente à inovação das fibras cônicas, as FMEs surgem como uma solução robusta para o sensoriamento de índice de refração. Ao inserir uma FME em uma configuração SMS, Osório *et al.* (2021) observaram um deslocamento espectral acentuado, com sensibilidade notável decorrente da interação direta entre os modos do núcleo e o meio externo (Figura 9). Essa resposta é potencializada pelo canal lateral que expõe o núcleo, permitindo que ajustes no diâmetro e na geometria da região exposta otimizem a resolução espectral.

A aplicação de fibras de microestrutura exposta (FMEs) em configurações SMS representa um avanço sobre estruturas clássicas, como as fibras *no-core*, ao unir simplicidade construtiva e alta sensibilidade em dispositivos compactos para ambientes microfluídicos.

Contudo, como Wang *et al.* (2021) ponderam que a complexidade de fabricação dessas fibras microestruturadas pode ser um desafio. Por isso, este trabalho adota a configuração *singlemode-no-core-singlemode* (SNCS), arquitetura baseada na fusão de um segmento de fibra sem núcleo (NCF) entre duas fibras monomodo (SMF), utiliza a NCF como região multimodal para promover a interação necessária entre os modos de luz.

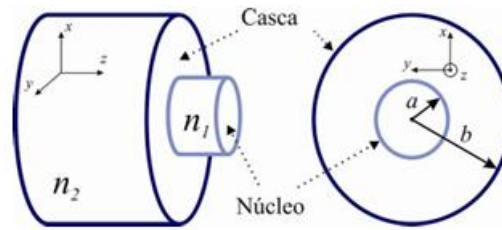
Assim, a configuração SNCS estabelece-se como uma alternativa promissora para detecção de alta precisão, conciliando a robustez mecânica da sílica pura com a eficiência do acoplamento modal. Para compreender como essa arquitetura converte variações do meio externo em sinais ópticos mensuráveis, torna-se fundamental analisar os princípios físicos que regem a propagação da luz em guias multimodais, conforme detalhado a seguir

## 2.2 A estrutura single-multi-singlemode e o princípio de interferência multimodal

Para Osório, *et. al* (2021), o entendimento dos princípios de guiamento óptico é fundamental para a análise do comportamento da luz em estruturas do SMS. Esses princípios determinam de que forma a luz se propaga e é confinada ao longo da fibra, influenciando diretamente a eficiência de acoplamento entre modos e a sensibilidade do sistema a variações do meio externo. Nesse contexto, torna-se essencial compreender o funcionamento das fibras ópticas convencionais, em especial as de índice degrau, que representam o modelo mais elementar e amplamente utilizado para descrever o mecanismo de confinamento da luz em fibras dielétricas.

Em uma fibra óptica de índice degrau, o núcleo e a casca possuem índices de refração constantes, porém distintos, resultando em uma transição abrupta na interface entre os dois materiais, conforme demonstram Sakamoto *et al.* (2006). Esse modelo apresenta duas regiões essenciais para o fenômeno de guiamento óptico (núcleo e casca), cujos índices de refração podem ser representados por  $n_1$  e  $n_2$ , respectivamente. Nessa configuração, ambas as regiões são dispostas de forma concêntrica, e para que o guiamento da luz ocorra é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o da casca ( $n_1 > n_2$ ), princípio fundamentado pela lei de Snell. Essa condição assegura o confinamento da luz no núcleo por meio do fenômeno de reflexão total interna, princípio básico que sustenta o transporte eficiente de luz ao longo da fibra, bem como apresentam Wang, *et. al* (2021). A Figura 10 ilustra a estrutura do núcleo e da casca em uma fibra óptica de índice degrau, destacando a diferença entre os índices de refração e a disposição concêntrica dos materiais.

Figura 10 - Ilustração do interior de uma fibra óptica degrau



Fonte: Physics of Plasmas (2025)

Cabe então observar que, embora possam existir camadas adicionais na estrutura da fibra, elas não influenciam no mecanismo de guiamento da luz.

Antes de identificar as condições de propagação do campo no interior dessas estruturas, vale destacar a importância da reprodução numérica e validação dos resultados teóricos. Foi pensando nisso que, neste trabalho, se reproduziu os resultados reportados por Xu *et al.* (2017) em “*Enhanced numerical calculation of coreless single-mode fiber structure using far-field shear approximations*”, de modo que os espectros obtidos também pudessem ser diretamente comparáveis. O resultado da simulação reproduzida mostrou concordância com o comportamento esperado, tanto no padrão de interferência multimodal quanto no deslocamento espectral observado entre os meios ar e água.

Essa validação numérica demonstra que a implementação realizada reproduz de forma fiel os resultados teóricos reportados na literatura, consolidando a fundamentação que orienta a etapa de desenvolvimento experimental. A implementação foi realizada em Python, considerando que a complexidade analítica das expressões torna a resolução manual das integrais (Expressão 5) e funções de Bessel (Expressão 6) envolvidas inviável no tempo necessário para a análise, justificando assim o uso da simulação computacional.

### 2.3 Determinação do parâmetro de guia de onda (frequência normalizada)

Conforme relatado por Willner (2019), para que uma fibra de índice degrau opere no regime monomodo, é necessário que o parâmetro  $V$  (frequência normalizada) seja menor que 2,405. Por outro lado, para operar no regime multimodo, o parâmetro  $V$  deve ser maior que 2,405. Esse parâmetro é definido pela equação 2:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

O Código Pythom 01 e seu respectivo setup estão disponíveis no Anexo A

O ponto inicial da análise é a definição da frequência normalizada da fibra sem núcleo, parâmetro que relaciona o raio da fibra ( $a$ ), o comprimento de onda da luz ( $\lambda$ ) e os índices de refração do núcleo ( $n_1$ ) e do meio externo ( $n_2$ ). Utilizando o software Python, foi possível encontrar os valores para  $V < 2.4$ , quando a fibra apresenta regime monomodo, guiando apenas o modo fundamental e para  $V > 2.4$  que identifica a propagação multimodal, em concordância com o comportamento reportado por Xu *et al.* (2017). A partir desses fundamentos, é possível compreender os princípios que sustentam os modelos propostos na literatura recente. Nesse contexto, diversos autores investigaram o comportamento modal e a resposta espectral de estruturas do tipo singlemode–multimode–singlemode (SMS), apresentando formulações que descrevem com rigor o fenômeno de interferência multimodal. O código e setup de dados está disponível no Anexo A - Código 01

Esse parâmetro é de fundamental importância pois determina o regime de propagação. Quanto maior o valor de  $V$ , maior o número de modos suportados pela NCF e, conseqüentemente, mais complexa será a interferência multimodal.

## 2.4 Caracterização da distribuição de campo (número de onda transversal)

Para caracterizar esses modos, os autores introduzem o número de onda transversal normalizado, um parâmetro que descreve o comportamento do campo eletromagnético na direção transversal à propagação. Esse parâmetro permite quantificar a distribuição espacial dos modos guiados, bem como demonstra a expressão 3:

$$u_{0m} \approx \mu_{0m} \left[ 1 - \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} + \frac{1}{8} \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} \right)^2 \right], \quad (3)$$

O Código Pythom 02 e seu respectivo setup estão disponíveis no Anexo A.

O parâmetro complementar, associado ao campo no revestimento, é dado pela equação 4:

$$w_{0m} = \sqrt{V^2 - u_{0m}^2}, \quad (4)$$

O parâmetro  $w_{0m}$  representa a contribuição restante da frequência normalizada, permitindo distinguir a parte radial do campo confinada no guia da que é sensível ao meio externo.

A caracterização modal, essencial para compreender a resposta espectral de um dispositivo fotônico, requer a quantificação da fração da potência óptica que cada modo transporta. A eficiência de acoplamento modal ( $\eta$ ) que é definida como a razão entre a potência transmitida por um modo e a potência incidente total, pode ser expressa pela equação 5 (integral de sobreposição dos padrões de campo), a qual permite estimar a contribuição relativa de cada interferência no espectro final, bem como também é ilustrado pela Figura 11.

$$\eta(z) = \int_0^\infty E_{\text{MMF}}(r, z) E_{\text{SMF}}(r) dr \quad (5)$$

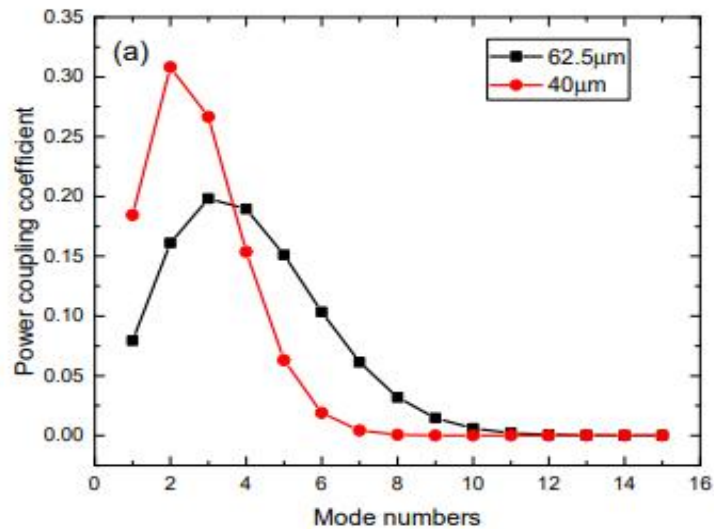
O Código Pythom 03 e seu respectivo setup estão disponíveis no Anexo A.

O numerador dessa expressão, que é o quadrado do módulo da integral, representa a potência acoplada, que é maximizada pela semelhança e alinhamento entre o campo de saída ( $E_{\text{MMF}}$ ) e o campo do modo ( $E_{\text{SMF}}$ ) no plano de acoplamento. O denominador, por sua vez, atua na normalização da eficiência, garantindo que o valor de  $\eta(z)$  represente a fração da potência transferida, ou seja, a eficiência é determinada exclusivamente pela superposição geométrica dos campos ópticos.

A Figura 11, retirada de Xu *et al.* (2017), apresenta a variação do coeficiente de acoplamento modal em função do número de modos para fibras com diâmetros de 40  $\mu\text{m}$  e 62,5  $\mu\text{m}$ . Já a Figura 12, mostra o resultado reproduzido neste trabalho, obtido a partir do mesmo conjunto de parâmetros. Observa-se que o coeficiente  $\eta_{nm}$  decresce progressivamente à medida que o número modal aumenta, aproximando-se de zero para ordens superiores. Assim, a simulação foi conduzida até  $\mu_{13}$ , uma vez que, a partir desse ponto, o comportamento da curva torna-se praticamente nulo, caracterizando a saturação dos modos relevantes para o acoplamento. Observa-se ainda que ambas as curvas apresentam o mesmo decaimento exponencial e comportamento de saturação a partir das ordens superiores, confirmando a consistência da simulação implementada. Assim, conclui-se que potência

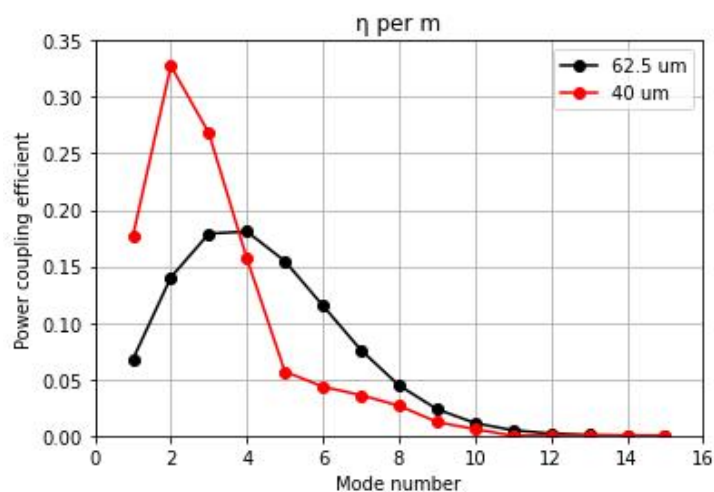
óptica incidente não se distribui uniformemente, sendo que apenas os modos de ordem inferior apresentam um coeficiente de acoplamento relevante, transportando uma parcela significativa da potência, enquanto os modos de ordem superior transportam uma fração da potência óptica próxima a zero.

Figura 11 - Coeficiente de Acoplamento Modal reportado em Xu *et al.* (2017).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 12 - Coeficiente de Acoplamento Modal (resultados reproduzidos nesse trabalho)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No entanto, quando aplicamos essa definição ao caso específico de acoplamento de um modo de ordem  $0m$  de uma Fibra  $E_{MMF}$  Multimodo em uma Fibra  $E_{SMF}$  Monomodo e avaliamos o resultado na interface de contato. A  $z = 0$  integral até então representada pela equação 5, se resolve em uma forma analítica, que é muito mais detalhada e menos intuitiva (vide expressão 6):

$$\eta_{0m} = 2 \left( \frac{\bar{\omega}}{a} \right)^2 \exp \left[ - \left( \frac{\bar{\omega}}{a} \right)^2 \frac{u_{0m}^2}{2} \right] \left[ J_0^2(u_{0m}) + J_1^2(u_{0m}) + \left( \frac{J_0(u_{0m})}{K_0(w_{0m})} \right)^2 (K_1^2(w_{0m}) - K_0^2(w_{0m})) \right], \quad (6)$$

O Código Pythom 03 e seu respectivo setup estão disponíveis no Anexo A.

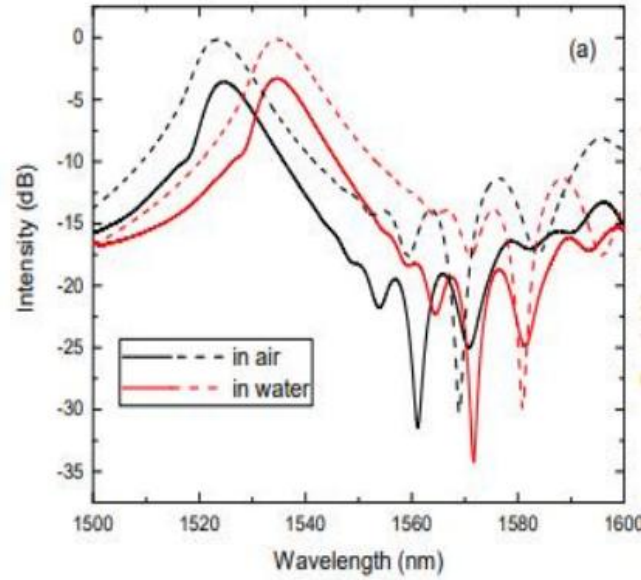
Dessa forma, observa-se que a equação geral de sobreposição fornece o formalismo conceitual, enquanto a solução analítica representa um caso particular adaptado à geometria SMF–NCF. Essa abordagem evidencia que o uso de fibras no-core, associado à exploração do campo evanescente, constitui uma estratégia eficiente para maximizar a sensibilidade do sensor, combinando alta precisão de medição com uma configuração compacta e robusta, adequada a diferentes condições ambientais e tipos de líquidos. Essa expressão é relevante porque mostra quanto da potência injetada na fibra é transferida para cada modo propagante. Assim, define-se a potência relativa de cada interferência que formará o espectro final do sensor.

## 2.5 Análise da transmissão de potência óptica

Uma vez determinadas as eficiências de acoplamento, é possível analisar a resposta espectral da fibra. Essa análise consiste em observar como a interferência entre os modos excita padrões oscilatórios na saída do dispositivo e permite obter o fenômeno de autoimagem.

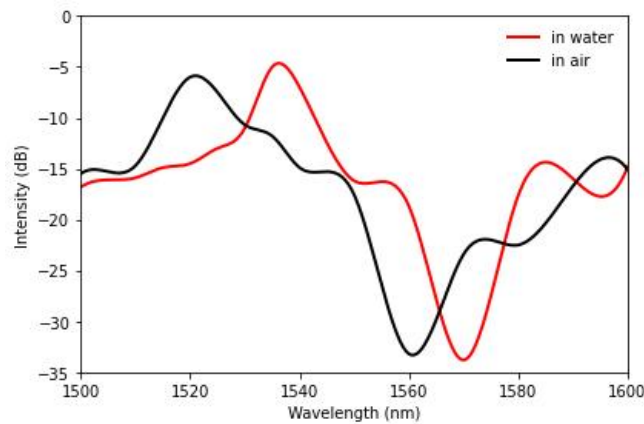
A implementação dessas equações em Python permitiu verificar analiticamente os resultados apresentados por Xu *et al.* (2017). A Figura 13 ilustra o espectro de transmitância simulado para uma fibra de raio  $a$  e comprimento  $L$ , exposta ao ar e à água. O padrão de oscilação observado decorre da interferência multimodal, confirmando o efeito de autoimagem, previsto teoricamente. Nota-se que as variações no índice de refração externo causam um deslocamento significativo no comprimento de onda dos picos e vales, demonstrando a sensibilidade do sensor.

Figura 13 - Espectro de transmitância reportado em Xu *et al.* (2017)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 14 - Espectro de transmitância (resultados reproduzidos nesse trabalho)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 14 apresenta o resultado reproduzido neste trabalho, onde observa-se que ambas as curvas exibem um perfil espectral característico do fenômeno de autoimagem, com a manutenção das posições relativas dos picos de interferência, o que confirma a consistência da simulação implementada. A largura de banda dos picos reflete a eficiência do acoplamento modal e a interferência mútua entre os modos excitados na NCF. A transmitância é dada pela equação 7:

$$T(\lambda) = 10 \log_{10} \sum_m \eta_{0m} e^{j\beta_{0m}z} \quad (7)$$



O Código Python 07 e seu respectivo setup estão disponíveis no Anexo A.

em que  $Z$  é o comprimento da fibra NCF e  $\beta_{0m}$  é a constante de propagação de cada modo. Nota-se que, ao variar  $\lambda$ , as fases relativas dos modos se alteram, dando origem às oscilações espectrais típicas do efeito de autoimagem e que, portanto, a intensidade de saída depende da soma coerente das contribuições de todos os modos propagantes.

Para calcular  $\beta_{0m}$ , Xu *et al.* recorrem à relação direta entre esse parâmetro e o número de onda transversal e  $k_0$  representa o número de onda no vácuo, tal como apresenta a equação 8:

$$u_{0m} = a \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta_{0m}^2}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

O Código Python 04 e seu respectivo setup estão disponíveis no Anexo A.

Essa formulação estabelece um vínculo entre o confinamento modal e a constante de propagação ao longo da fibra, permitindo uma descrição matemática completa do fenômeno.

Os autores apresentam então uma expressão para  $\beta_{0m}$ , que garante maior precisão na previsão do espectro, como indica a equação 9:

$$\beta_{0m} = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \frac{\mu_{0m}^2}{a^2} \left[ 1 - \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} + \frac{1}{8} \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} \right)^2 \right]^2} \quad (9)$$

O Código Python e seu respectivo setup estão disponíveis no Anexo B.

As expressões que envolvem os parâmetros  $u_{0m}$  e  $k_{0m}$ , respectivamente representados nas expressões 7 e 8, são essenciais para compreender o comportamento da luz em estruturas ópticas, uma vez que descrevem como a onda se propaga e interage com o meio. O parâmetro  $u_{0m}$  representa o número de onda transversal associado ao modo  $m$ , enquanto  $k_{0m}$  define o número de onda no vácuo, relacionado diretamente ao comprimento de onda da luz incidente. Já  $\beta_{0m}$  corresponde à constante de propagação efetiva, responsável por caracterizar o modo guiado ao longo da estrutura. O ponto essencial não é o detalhe do número de onda em si, mas sim o fato de que Xu *et al.* introduzem uma relação corretiva que refina a descrição do comportamento modal e melhora a precisão do modelo teórico. Essa relação estabelece uma conexão direta entre os parâmetros, permitindo ajustar o modelo

teórico de forma a reproduzir com maior fidelidade as condições experimentais observadas. Como resultado, o modelo torna-se capaz de prever com precisão o deslocamento espectral decorrente de variações no índice de refração externo, reforçando sua consistência e aplicabilidade. Essa fundamentação teórica consolida a transição para a etapa de desenvolvimento do presente trabalho, na qual os princípios de guiamento óptico e interferência multimodal são aplicados à análise e implementação da estrutura SMS.

As equações que regem o comportamento modal e o acoplamento da luz na fibra sem núcleo (Equações 1 a 6 e 8, conforme a formulação de Xu *et al.*) foram devidamente implementadas e analisadas via Python, com os códigos e resultados numéricos completos disponíveis no Apêndice.

Assim, é válido dizer que o estudo acima realizado confere suporte à aplicação dos mesmos princípios no desenvolvimento da estrutura SMS estudada experimentalmente neste trabalho. Nas páginas seguintes, será apresentado o desenvolvimento experimental da plataforma aqui estudada, bem como os resultados obtidos do ponto de vista da atividade de sensoriamento de índice de refração.

## 2.6 Autoimagem e resposta interferométrica em estruturas SMS e SNCS

Conforme descrito anteriormente, o princípio da autoimagem em configurações SMS é descrito por Bai *et al.* (2015), que mostram que, em comprimentos específicos da região multimodo, o perfil do modo incidente pode ser reproduzido em decorrência da interferência coerente entre os modos propagados. Esse mecanismo também se manifesta na estrutura SNCS, embora condicionado ao comportamento particular da propagação na fibra sem núcleo, conforme discutido por Xu *et al.* (2017). A posição de formação das autoimagens depende diretamente da diferença entre as constantes de propagação dos modos excitados.

Alterações no meio externo, especialmente variações no índice de refração, influenciam essas diferenças de fase, modificando as condições de interferência multimodal, como evidenciado nos modelos numéricos apresentados por Xu *et al.* (2017). Em determinados comprimentos, a interferência é construtiva, maximizando o acoplamento óptico para a fibra monomodo de saída, já em outros, torna-se destrutiva, reduzindo significativamente esse acoplamento e originando os vales observados no espectro de transmissão.

A ausência de revestimento na NCF permite que parte do campo evanescente se projete diretamente para o meio externo, intensificando a interação óptica com o ambiente. Como apresentado por Wang *et al.* (2011) e Wang *et al.* (2021), essa interação altera as

condições de propagação modal e pode ser explorada de forma eficiente em aplicações de sensoriamento refratométrico. Diferentes geometrias multimodo, incluindo fibras sem núcleo, fibras cônicas e configurações derivadas de estruturas SMS, foram analisadas pelos autores, que reforçam que a interferência multimodal segue sendo o conceito que fundamenta o sensoriamento nessas estruturas, sempre dependente da relação entre a propagação modal e o índice de refração do meio circundante.

Métodos como a aplicação da Transformada de Fourier para decomposição modal, descritos por Petrov *et al.* (2024), ampliam a capacidade de interpretação de espectros interferométricos mais complexos, permitindo a identificação de modos dominantes e a melhoria da relação sinal-ruído. Essas técnicas tornam-se particularmente relevantes em estruturas com elevado número de modos propagantes, como a SNCS. No presente trabalho, entretanto, a Transformada de Fourier não foi empregada, uma vez que os espectros experimentais obtidos com a estrutura SNCS apresentaram clareza e contraste suficientes para permitir a análise direta por meio do deslocamento dos picos de transmitância. Além disso, o objetivo central deste estudo consiste em validar o comportamento interferométrico da SNCS como sensor refratométrico, sem explorar configurações estruturalmente mais complexas, como fibras microestruturadas ou afuniladas, nas quais o elevado número de modos e a geometria complexa justificariam a adoção de análises modais mais elaboradas. Assim, a técnica é apresentada apenas como uma alternativa complementar, particularmente útil em arranjos com espectros de baixa razão sinal-ruído ou elevada complexidade modal.

A adoção da SNCS neste trabalho não se deve apenas ao interesse científico em sua estrutura, mas também à sua capacidade de unir simplicidade, baixo custo e desempenho elevado. Por utilizar apenas fibras padrão telecom e um segmento de sílica pura, sua fabricação é direta, reproduzível e acessível, dispensando o uso de fibras especiais. Assim, a SNCS figura como um elo entre a teoria apresentada nos primeiros capítulos, especialmente a interferência multimodal, e a implementação experimental. Os resultados teóricos discutidos anteriormente fundamentam a etapa de fabricação, caracterização e análise de desempenho do sensor construído. O capítulo seguinte detalha o processo de montagem da estrutura, os equipamentos empregados, o recipiente de imersão projetado para os ensaios e o método utilizado para aquisição e interpretação dos espectros de transmitância.

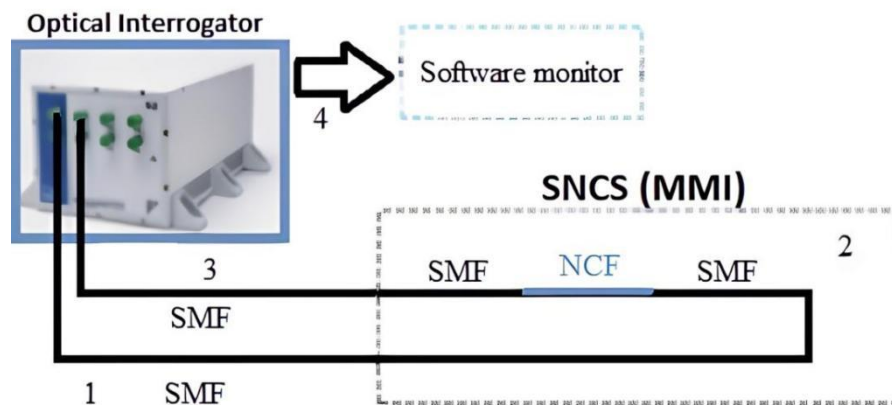
### 3 METODOLOGIA

A montagem experimental foi realizada com o propósito de implementar e caracterizar a estrutura óptica do tipo SNCS, composta por fibras monomodo padrão telecom (SMF 9/125

$\mu\text{m}$ ) e uma fibra multimodo do tipo *no-core*. A fabricação da estrutura envolveu a fusão direta entre as seções SMF e NCF, realizada por meio de uma máquina de emenda por arco voltaico FITEL S179, a qual garantiu o alinhamento axial preciso e minimizou as perdas de inserção. A estrutura foi posicionada sobre uma bancada óptica, permitindo o acoplamento de suportes micrométricos e guias de alinhamento. Essa configuração assegurou estabilidade mecânica, ausência de curvaturas indesejadas e controle da tensão ao longo da fibra, fatores essenciais para evitar ruídos espectrais.

Conforme apresentado na Figura 15, o sinal óptico é gerado pelo interrogador óptico (1) e lançado na fibra monomodo (SMF), propagando-se até a região sensora composta pela estrutura SMF–NCF–SMF (2). Na fibra *no-core* (NCF), ocorre a excitação e a interferência multimodal característica do efeito MMI. Após atravessar essa região, o sinal transmitido segue pela segunda fibra monomodo (3) e retorna ao interrogador (4), onde é realizada a detecção espectral. O monitoramento, processamento e visualização dos dados são feitos por meio do software de controle conectado ao sistema (5), permitindo o acompanhamento contínuo das variações espectrais do sensor.

Figura 15 - Diagrama representativo da configuração experimental para interrogação da estrutura interferométrica baseada em MMI (SMF–NCF–SMF).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

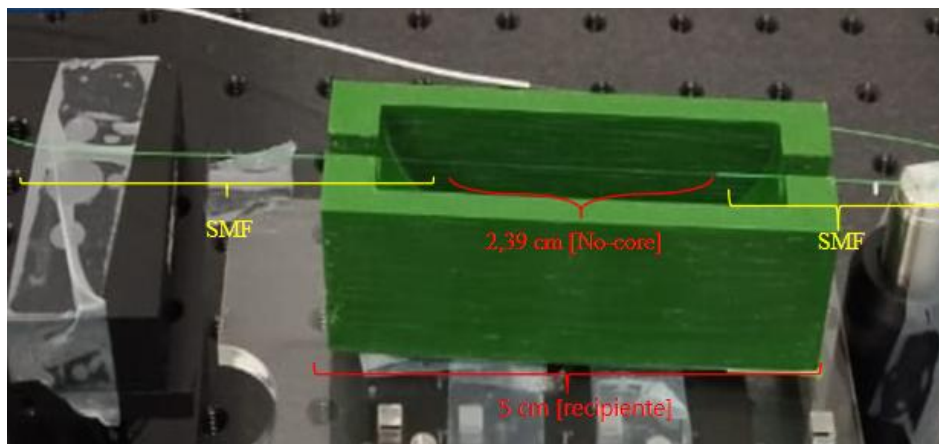
Os principais equipamentos utilizados na montagem e caracterização da estrutura foram a máquina de emenda FITEL S179, empregada para a fusão precisa entre as seções monomodo e multimodo; o interrogador óptico *BraggMETER*, responsável pela varredura espectral e pela medição dos deslocamentos de comprimento de onda; o software *BraggMONITOR*, utilizado para a aquisição e o processamento dos dados espectrais em tempo real; a bancada óptica equipada com suportes micrométricos, destinada à fixação e ao

alinhamento preciso da fibra e, por fim, o computador de controle, que atuou como interface principal para a aquisição de dados e a visualização dos espectros obtidos durante os ensaios.

A Figura 16 apresenta a implementação física do bloco SNCS (região correspondente ao trecho destacado no diagrama da Figura 15), associado à estrutura interferométrica SMF–NCF–SMF. Enquanto a Figura 15 descreve o fluxo óptico de forma esquemática, a Figura 16 mostra a realização experimental desse mesmo arranjo.

Observam-se a bancada óptica e os suportes com ajuste micrométrico, que garantem estabilidade mecânica, controle de posicionamento e alinhamento preciso das fibras, condições fundamentais para a excitação modal adequada na NCF e para a reprodutibilidade do padrão interferométrico. A região multimodo (NCF), onde ocorre a interação do campo evanescente com o meio externo, está posicionada na parte central da montagem e protegida pelo recipiente de cor verde, que também atua como célula de amostra.

Figura 16 - Montagem experimental da estrutura SMS (SMF–NCF–SMF) em bancada óptica, correspondente ao bloco SNCS do diagrama da Figura 16, com destaque para a região multimodo (NCF) acondicionada na célula de amostra.

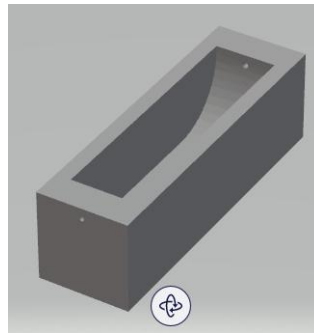


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para viabilizar a exposição controlada da região sensora a diferentes analitos líquidos, projetou-se e confeccionou-se um recipiente de imersão customizado, utilizando manufatura aditiva (impressão 3D). O componente foi modelado em software CAD (*Computer-Aided Design*) com dimensões otimizadas para o aparato experimental, apresentando um comprimento total de 5 cm. O design inclui um canal longitudinal central que assegura o posicionamento estável da fibra óptica, permitindo que a seção de fibra sem núcleo (No-core), com extensão de 2,39 cm, permaneça totalmente submersa e em contato direto com o meio líquido. A estabilidade mecânica do sistema é garantida por suportes laterais de fixação, que

mantêm a fibra sob tensão constante e impedem deslocamentos transversais ou vibrações que poderiam comprometer a repetibilidade das medições interferométricas. A disposição final do sensor montado no suporte é detalhada na Figura 16."

Figura 17 - Recipiente de Imersão Customizado 3D (célula de amostra)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Essa estrutura foi projetada para conter pequenas quantidades de soluções de água e glicerina em diferentes proporções, possibilitando variação controlada do índice de refração do meio externo e foi essencial para assegurar repetibilidade entre os ensaios. Durante as medições, a temperatura ambiente foi mantida constante (ar-condicionado), e o conjunto fibra-cuba permaneceu fixo sobre a bancada óptica, garantindo a estabilidade do sistema e a integridade da resposta espectral.

Figura 18 - Máquina de emenda por arco voltaico FITEL S179+ utilizada para a fusão entre as fibras SMF e NCF.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A Figura 18 ilustra a Máquina de Emenda por Arco Voltaico FITEL S179+, um equipamento fundamental na etapa inicial do desenvolvimento do sensor. Sua função principal é realizar a fusão direta e de alta precisão entre as seções de fibra monomodo (SMF)

e a fibra sem núcleo (NCF). A precisão da fusão é crítica, pois minimiza as perdas de inserção e garante o alinhamento axial exato das fibras, fatores que influenciam diretamente a eficiência do acoplamento modal e a qualidade do sinal interferométrico obtido nos ensaios subsequentes.

O processo de fusão inicia-se com a decapagem da fibra, onde o uso da lâmina (gilete) exige uma técnica específica para evitar microfissuras que comprometem a resistência mecânica e a propagação da luz. Em vez de posicionar a lâmina a noventa graus, o aluno deve mantê-la inclinada em uma diagonal de aproximadamente trinta a quarenta e cinco graus em relação ao eixo da fibra, realizando movimentos suaves de raspagem para remover o acrilato sem atingir a casca de sílica. Após a remoção do revestimento, a limpeza é obrigatória e deve ser feita com álcool isopropílico de alta pureza e lenços que não soltem fiapos, garantindo a eliminação de qualquer resíduo antes da clivagem.

A etapa seguinte é a clivagem, que deve ser executada com precisão rigorosa, especialmente na definição do comprimento da região multimodo ou No-Core, já que milímetros de diferença alteram completamente a resposta espectral do sensor. É recomendável posicionar as fibras perfeitamente retas, umas por vez, com a monomodo no guia de menor diâmetro e as multimodo no de maior diâmetro e, só então, realizar a clivagem certificando-se de que a extremidade a ser cortada esteja um pouco além da lâmina de diamante. Após, recomenda-se inspecionando a face cortada na Fitel 179 + para garantir que não existam inclinações superiores a meio grau. Com as fibras prontas, o posicionamento na Fitel S179+ deve ser imediato para evitar contaminações. As fibras são colocadas nos guias de modo que as pontas fiquem visíveis na tela, mas mantendo uma pequena folga entre elas para que a máquina possa realizar o alinhamento fino antes do arco elétrico, caso contrário, há risco de quebra. É pertinente destacar que o arco elétrico deve ser realizado na intensidade mediana e que, antes de induzir o arco, a opção de limpeza (arco menos intenso) deve ser realizada, para certificar-se de que o que aparente ser sujeira realmente se trate de sujeira e não de ranhuras ou deformações indesejadas.

Quanto às configurações de fusão na Fitel, o padrão de emenda varia conforme a transição desejada. Como as fibras possuem núcleos de dimensões muito diferentes, ou mesmo a ausência de núcleo no caso da No-Core, é importante pressionar as duas extremidades da fibra com um único clique de 5 milímetros a mais, após tê-las aproximado no limite. Após alinhar e posicionar as duas fibras na Fitel 179+, basta induzir o arco e a emenda será feita. Observe que, por se tratar de diâmetros diferentes, é normal notar algumas

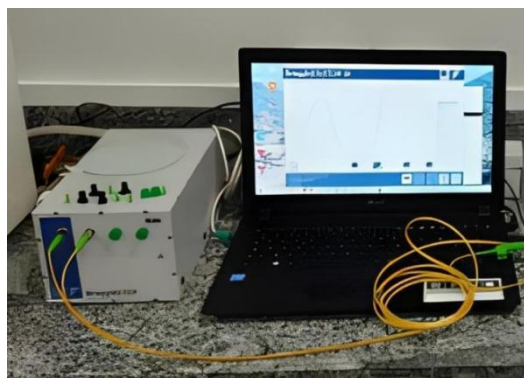
pequenas deformações, como um breve afunilamento na região onde ocorreu a fusão, porém, caso haja a presença de deformações semelhantes a bolhas ou interrupção total do núcleo pela casca da fibra monomodo, será necessário repetir todo o processo, pois o deslocamento espectral será completamente afetado por esse tipo de deformação.

O interrogador óptico, especificamente o modelo BraggMETER, é um componente central na metodologia, atuando como a interface entre o sistema óptico passivo (a fibra SNCS) e o sistema de aquisição de dados. Este equipamento é o responsável pela varredura espectral e pela medição dos deslocamentos de comprimento de onda, sendo, portanto, a unidade ativa de leitura.

Este dispositivo emite o sinal óptico de banda larga necessário para excitar todos os modos da NCF e, subsequentemente, detecta o sinal de transmitância que retorna da estrutura SNCS. O sistema permite a configuração da resolução e do tempo de aquisição e da faixa espectral monitorada. Sua precisão na detecção de deslocamentos é crucial, pois o desempenho do sensor no que tange à conversão das variações físicas em deslocamento espectral, depende diretamente da capacidade do BraggMETER em traduzir a interferência multimodal em dados quantitativos para o software BraggMONITOR, que realiza o processamento em tempo real.

A Figura 19 ilustra a Configuração Experimental utilizada para a interrogação da estrutura interferométrica do tipo MMI/SMS/SNCS, demonstrando a integração dos sistemas óptico e eletrônico. A imagem foca no interrogador óptico BraggMETER acoplado ao computador de controle.

Figura 19 - Configuração Experimental para Interrogação da Estrutura Interferométrica (MMI/SMS/SNCS)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)



O aparato experimental (Figura 20) utiliza um interrogador óptico como elemento central de transdução. Este dispositivo atua emitindo um sinal de natureza multiespectral, cobrindo de forma abrangente o espectro de interesse para a análise. A detecção da resposta do sensor é realizada através da leitura da potência óptica refletida na faixa de 1500 nm a 1600 nm.

A escolha dessa janela espectral justifica-se primordialmente por abranger a Banda C das telecomunicações ópticas, que é a região onde a fibra de sílica apresenta os menores índices de atenuação. Além disso, essa largura de banda é fundamental para que o sistema consiga capturar múltiplos períodos do padrão de interferência gerado pela estrutura SMS, o que facilita o rastreamento preciso dos deslocamentos espectrais provocados pelas variações no índice de refração do meio externo.

O gerenciamento desses dados é feito via software *BraggMONITOR*, que atua como interface para a configuração da resolução e do tempo de integração. A plataforma possibilita a aquisição em tempo real e o monitoramento contínuo das variações espectrais, permitindo correlacionar as mudanças no espectro multiespectral com as propriedades físicas do meio em teste. É importante frisar que, ao concluir o monitoramento dos dados, para salvar o espectro é necessário seguir até a guia de salvamento, clicar no diretório desejado e seguir para a última guia. Ali será digitado um código que se encontra na área de trabalho, na pasta de sensoriamento MMI. Então, basta clicar na opção RUN, copiar todo o texto, exceto no início, antes dos dois pontos, colar num bloco de notas e salvar como desejar.

Figura 20 - Configuração Experimental para Interrogação da Estrutura Interferométrica (MMI/SMS/SNCS) (completa)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Podemos, enfim, observar a configuração completa, análoga à figura 15, que consiste em um interrogador óptico; computador de aquisição e a estrutura interferométrica do tipo MMI.

### 3.1 Medidas e aquisição de dados

As medições foram conduzidas mediante a configuração do interrogador óptico para realizar varreduras espectrais com resolução suficiente para detectar deslocamentos inferiores a 0,1 nm. Por meio da interface do software de controle, acompanhou-se a potência normalizada em tempo real, o que viabilizou o monitoramento contínuo da resposta interferométrica da estrutura frente às perturbações externas. Para a caracterização da sensibilidade da arquitetura SNCS, o sensor foi submetido a ciclos de imersão sequencial em diferentes meios líquidos, permitindo correlacionar o comportamento espectral às variações do índice de refração ambiental.

A variação controlada do índice de refração externo foi obtida por meio da preparação de soluções binárias com diferentes propriedades ópticas. Para tanto, foram utilizadas amostras compostas por misturas de água destilada e glicerina em proporções volumétricas predefinidas, devidamente acondicionadas em recipientes identificados para os ensaios de imersão. A organização dessas soluções, bem como a graduação das concentrações utilizadas para compor o cenário experimental, é apresentada na Figura 21.

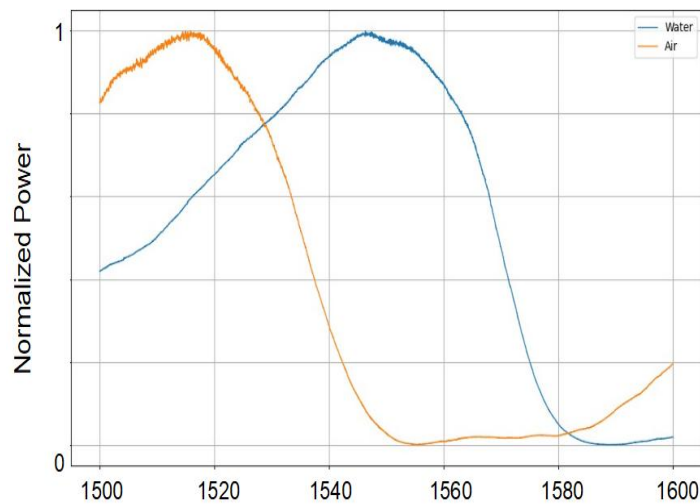
Figura 21 - Amostras em solução aquosa de glicerina, utilizadas nos Testes de Sensibilidade ao Índice de Refração



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O experimento foi conduzido em cinco condições distintas: (i) fibra exposta ao ar; (ii) fibra imersa em água destilada; (iii) soluções de água-glicerina a 10%, 20%, 30% e 40% de concentração em volume.

Figura 22 - Espectros de transmitância da estrutura SMS imersa no ar e na água, mostrando deslocamento espectral característico do comportamento interferométrico.

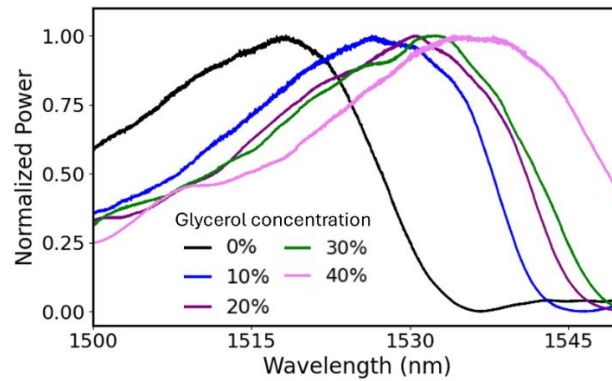


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Esta ilustração apresenta a comparação entre os espectros registrados com a fibra exposta ao ar e à água. Nota-se o deslocamento dos picos espectrais, evidenciando a sensibilidade da estrutura às variações do meio externo.

Na Figura 23 observa-se o deslocamento gradual dos picos de potência normalizada conforme o aumento da concentração de glicerina. O comportamento é consistente com o modelo teórico de Xu *et al.* (2017), que prevê variação linear do comprimento de onda em função do índice de refração do meio. A seguir, é possível notar os espectros da estrutura SMS em soluções de água-glicerina (0% a 40%), evidenciando o deslocamento progressivo dos picos de transmitância.

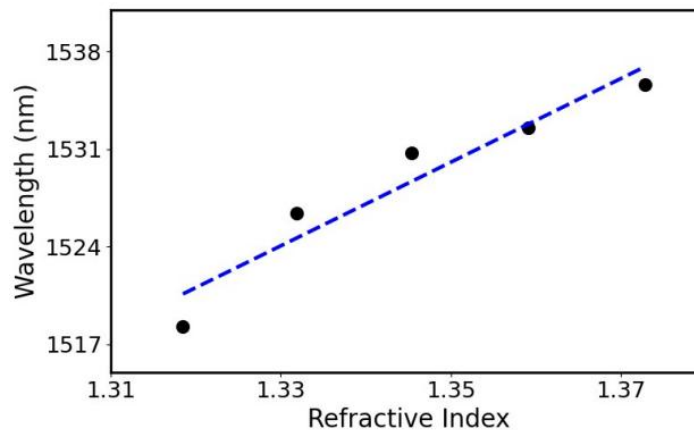
Figura 23 - Deslocamento conjunto para os resultados obtidos para diferentes concentrações de glicerina e água



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Para quantificar essa relação, os comprimentos de onda de máxima transmitância foram extraídos de cada curva espectral e plotados em função do índice de refração correspondente. Conforme apresentado nas Figuras 22 e 23, o deslocamento espectral resultante exibe um comportamento aproximadamente linear, tanto em função do índice de refração do meio externo quanto da concentração de glicerina. Essa resposta confirma a eficiência da estrutura SMS como sensor refratométrico, evidenciando sua capacidade de converter variações do meio externo em deslocamentos espectrais mensuráveis.

Figura 24 - Relação entre o comprimento de onda de máxima transmitância e o índice de refração externo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Durante o experimento, observou-se excelente estabilidade espectral, aliada à baixa flutuação de potência, o que evidencia a robustez mecânica e óptica do arranjo experimental. A resposta aproximadamente linear do deslocamento espectral em função do índice de

refração do meio externo permite a calibração direta do sensor, favorecendo sua aplicação em monitoramento ambiental e no controle de soluções líquidas.

A partir do ajuste linear dos dados experimentais, obteve-se uma sensibilidade de  $(300 \pm 50)$  nm/RIU, onde RIU denota *refractive index unit*. Esse valor é compatível com sensibilidades reportadas na literatura para sensores interferométricos baseados em estruturas multimodais, validando o desempenho e a precisão da montagem proposta.

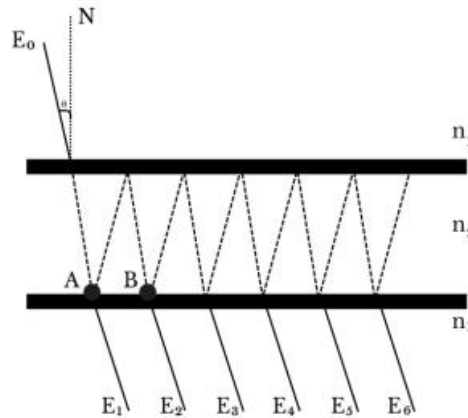
Embora a sensibilidade obtida seja elevada, a largura espectral associada ao pico de transmissão limita a resolução na detecção de pequenos deslocamentos espectrais. Nesse contexto, o capítulo seguinte propõe a associação da estrutura SNCS a cavidades Fabry–Perot, com o objetivo de combinar o comportamento interferométrico característico da interferência multimodal com os efeitos ressonantes típicos dessas cavidades. Essa integração possibilita o desenvolvimento de sensores híbridos com maior seletividade espectral, melhor resolução em comprimento de onda e potencial para medições multiparamétricas, ampliando as perspectivas de aplicação em ambientes ambientais, biomédicos e industriais.

## **4 (IFP) INTEGRAÇÃO DE INTERFEROMETRIA FABRY-PEROT (FPI) EM ESTRUTURAS SMS**

### **4.1 Fundamentos e classificação de interferômetros Fabry-Perot**

Este tópico tem como objetivo introduzir o interferômetro de Fabry–Perot (IFP) como um dispositivo óptico baseado em múltiplas reflexões da luz entre duas superfícies refletoras paralelas, formando uma cavidade ressonante. Diferentemente da interferência multimodal (MMI), explorada nos capítulos anteriores, o IFP fundamenta-se na interferência de múltiplos feixes refletidos. A parcela da luz acoplada à cavidade é refletida sucessivas vezes entre as superfícies, originando diversos feixes interferentes, que podem ser observados tanto em transmissão ( $E_1, E_2, E_3, \dots$ ) quanto em reflexão.

Figura 25 - Esquema de montagem de um IFP



Fonte: David (2025)

Nesse processo, as ondas eletromagnéticas apresentam diferenças de fase decorrentes das distintas trajetórias ópticas percorridas pelos feixes refletidos no interior da cavidade. A diferença de caminho óptico entre feixes sucessivos depende diretamente da distância entre as superfícies refletoras, do ângulo de incidência e do índice de refração do meio que preenche a cavidade.

Um parâmetro fundamental para a caracterização e calibração de sensores baseados em interferômetros de Fabry–Perot é o *Free Spectral Range* (FSR), ou intervalo espectral livre, que define a separação espectral entre picos adjacentes no espectro de interferência. Conforme demonstrado por Peng *et al.* (2018), o FSR apresenta uma dependência inversamente proporcional ao comprimento da cavidade e ao índice de refração do meio, sendo descrito pela relação matemática apresentada na Equação (10).

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nL}, \quad (10)$$

Nessa expressão,  $\lambda$  representa o comprimento de onda central da fonte óptica, evidenciando que o espaçamento entre as bandas espectrais aumenta para comprimentos de onda maiores. Além da análise direta do *FSR*, configurações mais complexas envolvendo cavidades paralelas podem ser empregadas para ampliar a sensibilidade do sensor. Pan *et al.* (2021) demonstraram que o uso de cavidades do tipo polímero–ar, explorando o efeito Vernier, possibilita a medição simultânea de grandezas como pressão e temperatura com elevada precisão.

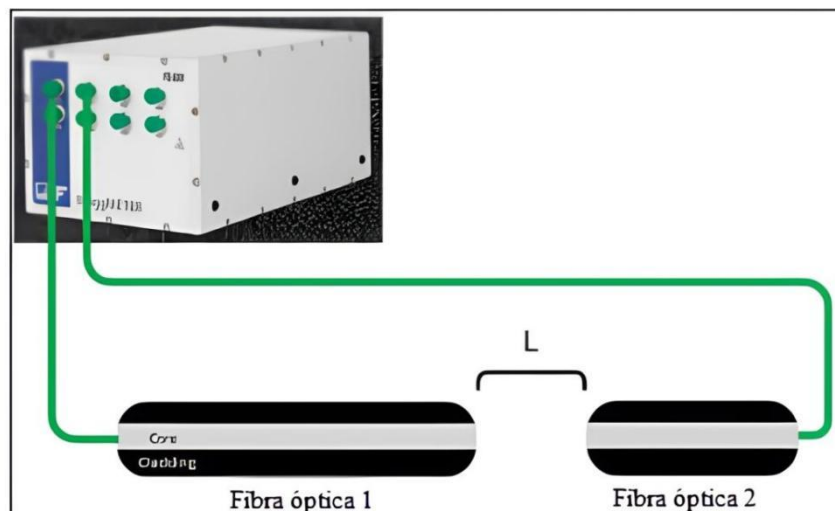
De modo geral, quanto maior for o comprimento físico da cavidade, ou o caminho óptico efetivo da luz no interior do interferômetro, mais próximos estarão os picos espectrais, resultando em um valor reduzido de *FSR*. Essa característica torna o interferômetro de

Fabry–Perot particularmente atrativo para aplicações em sensoriamento óptico de alta resolução.

## 4.2 Caracterização experimental da estrutura Fabry-Perot

A primeira configuração desenvolvida neste contexto consiste em um Interferômetro de Fabry-Perot Extrínseco (EFPI). A estrutura foi montada utilizando o sistema de alinhamento de uma máquina de emenda por fusão (Fitel S179+), a mesma utilizada na confecção das estruturas SMS.

Figura 26 - Esquema de montagem experimental com cavidade FP (Fabry-Perot) entre duas fibras ópticas.



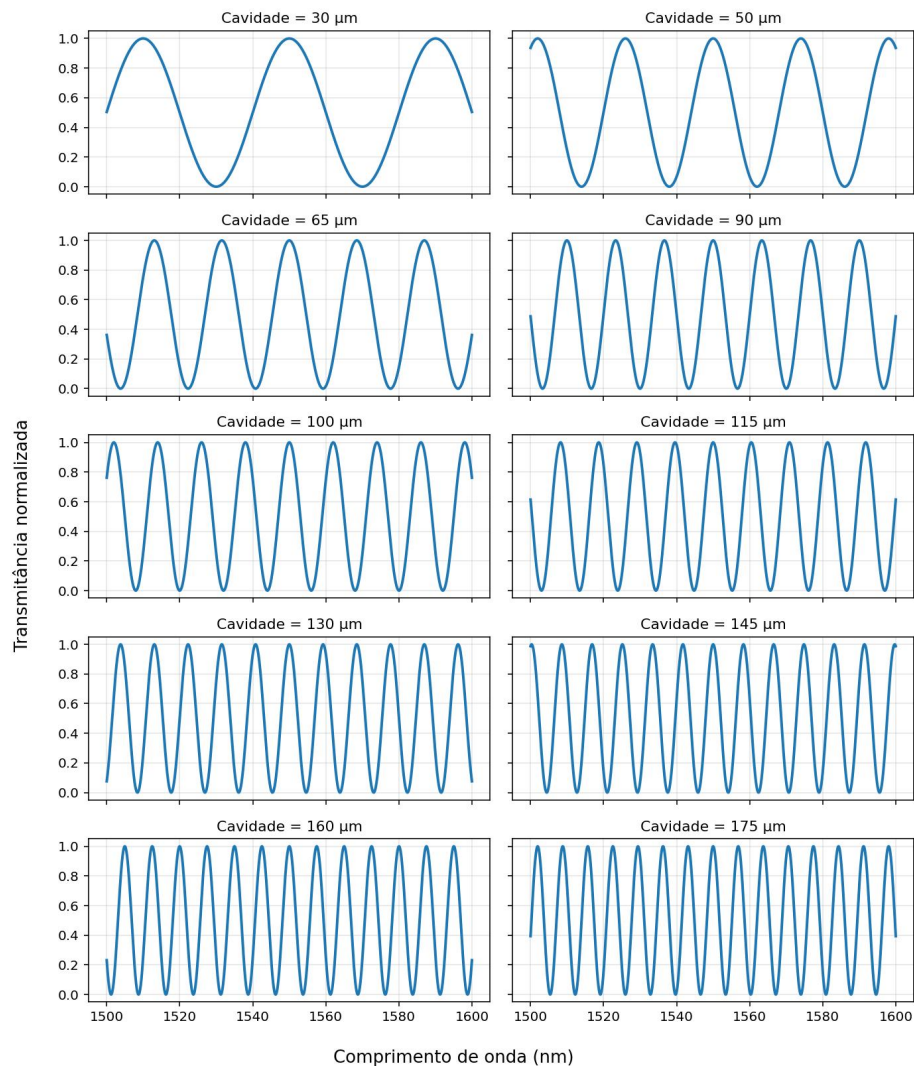
Fonte: Adaptada de Silva (2025)

Para caracterizar o interferômetro, a cavidade ressonante foi estruturada a partir do microespaçamento entre as extremidades de duas fibras monomodo (SMF) perfeitamente

clivadas. O fenômeno de reflexão de Fresnel na interface entre a sílica e o ar permite que essas faces operem como espelhos, e o rigoroso alinhamento axial e angular garante o paralelismo necessário para a nitidez das franjas de interferência.

O procedimento experimental consistiu em aproximar as fibras até o contato físico e, a partir daí, afastá-las controladamente para definir a distância de separação. Foram analisadas as respostas espectrais para dez comprimentos de cavidade distintos (30, 50, 65, 90, 100, 115, 130, 145, 160 e  $\mu\text{m}$ , 175) Essa progressão permitiu verificar como o aumento da cavidade impacta no espectro, resultando em uma alteração observável *FSR* e Spectral Range à medida que a cavidade se expande, bem como ilustra a Figura 27.

Figura 27 - Resposta espectral esperada para a montagem experimental da figura anterior



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)



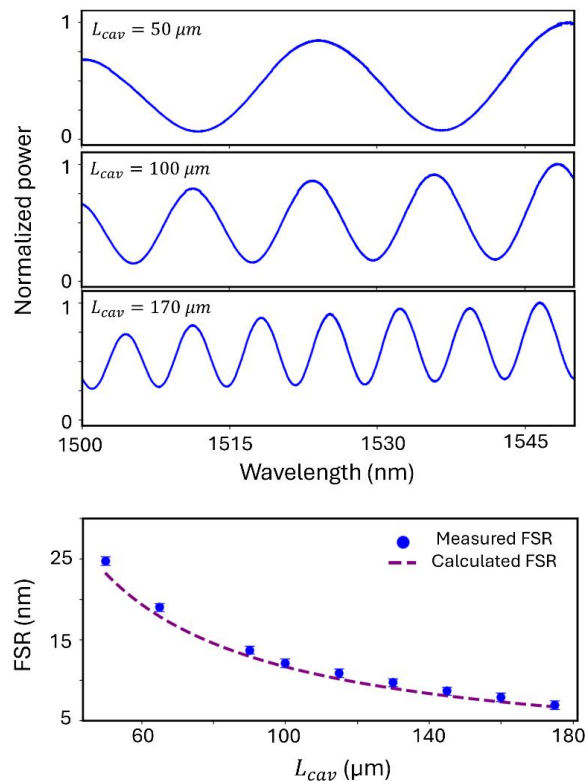
Os espectros experimentais evidenciam que o aumento do comprimento da cavidade provoca um crescimento na densidade de franjas, caracterizado pela diminuição do intervalo espectral entre máximos consecutivos. Esse comportamento confirma a alta sensibilidade do interferômetro a variações no caminho óptico, característica essencial para aplicações em sensoriamento baseado em fibra óptica, conforme mencionado por ZHU *et al.* (2023).

### 4.3 Relação entre o Free Spectral Range e o comprimento da cavidade

Segundo Peng *et al.* (2018), a relação entre o FSR e o comprimento da cavidade é expressa pela equação 10, evidenciando a dependência inversamente proporcional entre essas grandezas. Ou seja, quanto maior o comprimento  $L$ , menor será o intervalo espectral livre entre as ressonâncias.

A análise quantitativa do *FSR* em função do comprimento da cavidade confirma esse comportamento teórico. À medida que o comprimento  $L$  aumenta, observa-se uma redução sistemática do *FSR*, indicando maior densidade de modos espectrais em uma mesma faixa de comprimento de onda, bem como ilustra a Figura 28, que mostra os resultados experimentais medidos para a configuração aqui descrita.

Figura 28 - Comportamento experimental do FSR em função do comprimento da cavidade FP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os resultados experimentais apresentam boa concordância com o modelo teórico, validando a utilização do FSR como parâmetro de calibração e extração de informações físicas em sensores interferométricos baseados em Fabry–Perot.

#### 4.4 Interferência Fabry–Perot em filme fino Polimérico de Poliestireno Sulfonato de Sódio (PSSH)

Na terceira configuração analisada, a cavidade Fabry–Perot é formada por um filme fino de PSSH, um polímero aniônico hidrossolúvel, empregado em aplicações ópticas e em dispositivos sensores devido à sua estabilidade química, facilidade de deposição e sensibilidade a variações ambientais, depositado na extremidade de uma fibra óptica monomodo. Nessa arquitetura, as reflexões ópticas ocorrem nas interfaces fibra–filme e filme–ar, fazendo com que a espessura do filme atue como o comprimento efetivo da cavidade interferométrica.

A presença do filme fino de PSSH modifica significativamente a resposta espectral do interferômetro, resultando em um aumento do número de franjas interferométricas e em um *free spectral range* (FSR) reduzido quando comparado à cavidade formada apenas por ar. Esse comportamento está diretamente associado ao maior índice de refração do polímero em relação ao ar, bem como às múltiplas reflexões internas no interior do filme, indicando um aumento da resolução espectral do dispositivo.

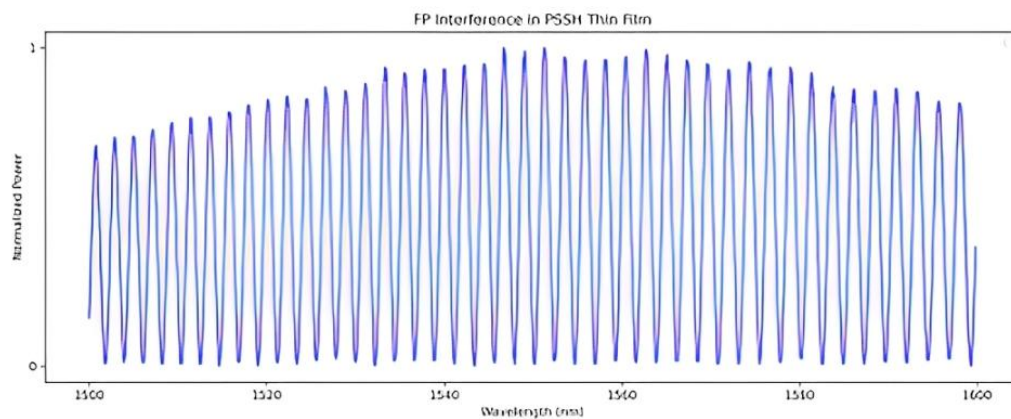
Figura 29 - Esquema de montagem experimental com cavidade FP sendo o filme de PSSH.



Fonte: Silva (2025)

Nessa montagem, a luz que chega pela fibra é refletida uma vez na interface entre a fibra e o filme, e uma segunda vez na interface entre o filme e o ar. Este teste foi realizado mantendo as condições do ambiente, como temperatura e umidade. Mesmo sem nenhuma outra mudança, o espectro de reflexão observado foi nitidamente diferente daquele medido com a cavidade de ar. A presença do filme, com sua espessura e material específicos descrito acima, criou um padrão de interferência gerando mais franjas de interferência, tornando a configuração com resolução ainda maior, bem como ilustra a Figura 30.

Figura 30 - Interferências FP no filme fino de PSSH



Fonte: Elaborado pelo autor (2025) e Silva (2025)

Esse resultado demonstra a viabilidade do interferômetro Fabry-Perot como ferramenta para caracterização óptica de filmes finos e para o desenvolvimento de sensores baseados em materiais poliméricos, conforme discutido por Peng *et al.* (2018).

## 5 INTEGRAÇÃO DA INTERFERÊNCIA MULTIMODAL (MMI) COM CAVIDADES FABRY-PEROT

Após a caracterização individual das estruturas baseadas em interferência multimodal (MMI) e dos interferômetros de Fabry-Perot (FPI), torna-se natural a investigação da associação entre esses dois mecanismos interferométricos. A integração da estrutura SMS com cavidades Fabry-Perot visa explorar simultaneamente o comportamento espectral periódico característico da interferência multimodal e os efeitos ressonantes associados às múltiplas reflexões em cavidades FP, possibilitando o desenvolvimento de sensores híbridos com desempenho aprimorado.

Diferentemente do interferômetro Fabry–Perot convencional, no qual a resposta espectral é governada exclusivamente pelo comprimento da cavidade e pelo índice de refração do meio interno, a configuração híbrida MMI+FPI incorpora um segundo mecanismo de modulação espectral. Nesse arranjo, a luz que se propaga pela região multimodo sofre interferência entre múltiplos modos excitados, enquanto as reflexões parciais nas interfaces da cavidade Fabry–Perot introduzem um padrão adicional de modulação espectral. Como resultado, o espectro de transmissão apresenta uma sobreposição de efeitos interferométricos, cuja resposta depende simultaneamente das condições de propagação modal e das propriedades ópticas da cavidade.

Conforme discutido no artigo que fundamenta este trabalho, a presença da cavidade Fabry–Perot acoplada à estrutura SMS altera significativamente a forma do espectro interferométrico, resultando em picos mais estreitos e melhor definidos quando comparados à resposta obtida apenas com interferência multimodal. Esse efeito pode ser interpretado como um aumento efetivo da seletividade espectral do sistema, favorecendo a detecção de pequenos deslocamentos em comprimento de onda e, conseqüentemente, o aumento da resolução do sensor.

Além disso, a associação MMI+FPI possibilita a exploração de diferentes regimes interferométricos a partir do ajuste geométrico da cavidade Fabry–Perot, como a variação do comprimento da cavidade ou a introdução de materiais com diferentes índices de refração em seu interior. Essa flexibilidade torna o sistema particularmente atrativo para aplicações em sensoriamento refratométrico, térmico e químico, uma vez que diferentes parâmetros físicos podem influenciar de maneira distinta a interferência multimodal e a resposta da cavidade Fabry–Perot.

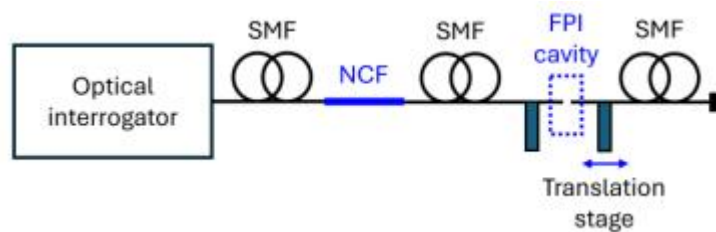
Do ponto de vista experimental, a integração da estrutura SMS com cavidades Fabry–Perot mantém a simplicidade construtiva característica das arquiteturas baseadas em fibras ópticas padrão, dispensando o uso de fibras especiais ou processos de fabricação complexos. Essa característica confere ao sistema híbrido robustez mecânica, reprodutibilidade e baixo custo, aspectos fundamentais para aplicações práticas fora do ambiente laboratorial.

Dessa forma, a configuração MMI+FPI estabelece um elo direto entre os conceitos interferométricos apresentados nos capítulos anteriores e a implementação de sensores ópticos híbridos de maior desempenho. Nos tópicos seguintes, são apresentados os detalhes da montagem experimental da estrutura integrada, bem como a análise espectral resultante da associação entre a interferência multimodal e os efeitos ressonantes da cavidade Fabry–Perot.

### 5.1 Configuração experimental da estrutura híbrida MMI+FPI

A estrutura híbrida MMI+FPI investigada neste trabalho baseia-se na associação direta entre uma configuração SMS e uma cavidade Fabry–Perot extrínseca formada na extremidade da fibra de saída. Nessa arquitetura, a interferência multimodal gerada na região multimodo atua como um estágio inicial de modulação espectral, enquanto a cavidade Fabry–Perot impõe um segundo mecanismo interferométrico, responsável por refinar a resposta espectral do sistema.

Figura 31 - Arranjo experimental completo da estrutura MMI+FPI

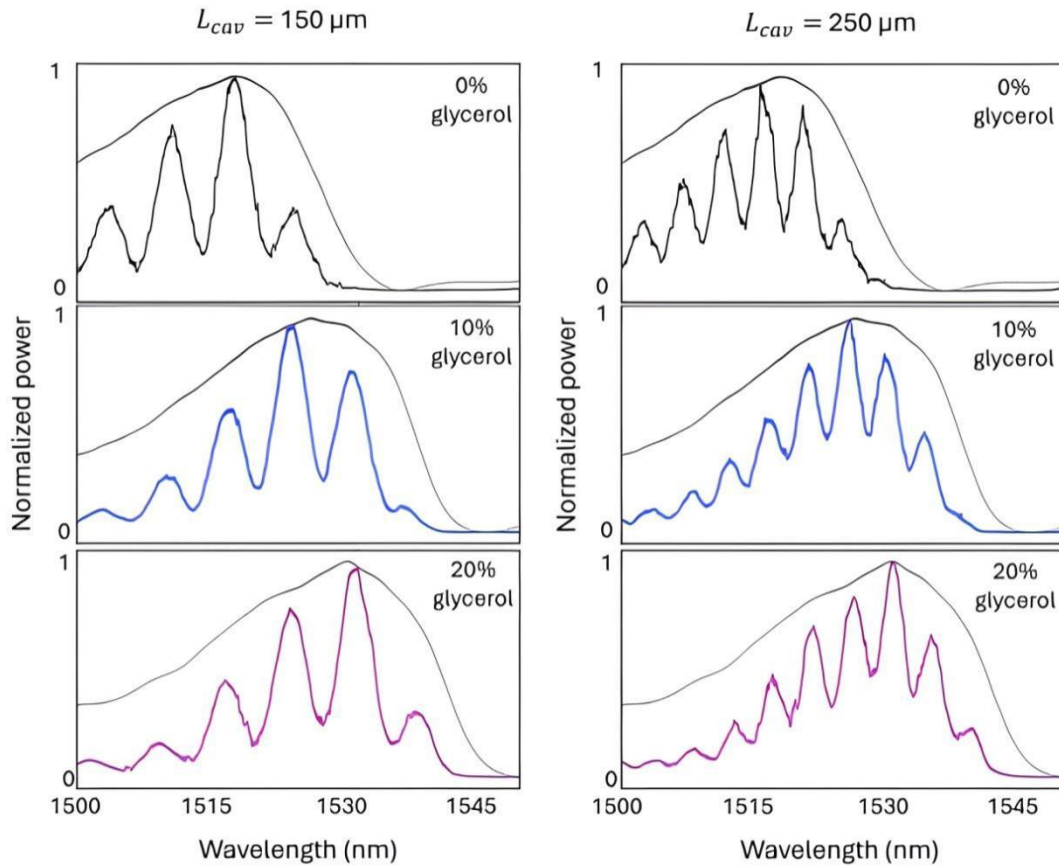


Fonte: Carvalho, *et. al* (2025)

A Figura 31 evidencia a arquitetura do sensor, destacando a sequência de fibras ópticas e o posicionamento da cavidade Fabry–Perot integrada à estrutura SMS. O sistema opera por meio de uma porta única de entrada e saída, na qual a luz proveniente da fibra monomodo é acoplada à região multimodo para a excitação dos modos propagantes. Após percorrer o trecho multimodo, o campo óptico incide sobre a cavidade Fabry–Perot, formada pelo microespaçamento controlado entre a face da fibra e a superfície refletora e retorna pela mesma via, sofrendo uma nova recombinação modal antes de ser interrogada.

A influência direta dessa cavidade sobre a resposta espectral da estrutura híbrida é detalhada na Figura 32. Quando comparada ao comportamento da estrutura SMS isolada, a configuração híbrida apresenta um aumento significativo na densidade das franjas de interferência e uma definição superior dos picos de ressonância. Esse fenômeno resulta em uma redução da largura espectral dos picos, o que otimiza a resolução do sensor e favorece a detecção de deslocamentos espectrais sutis frente às variações do meio externo.

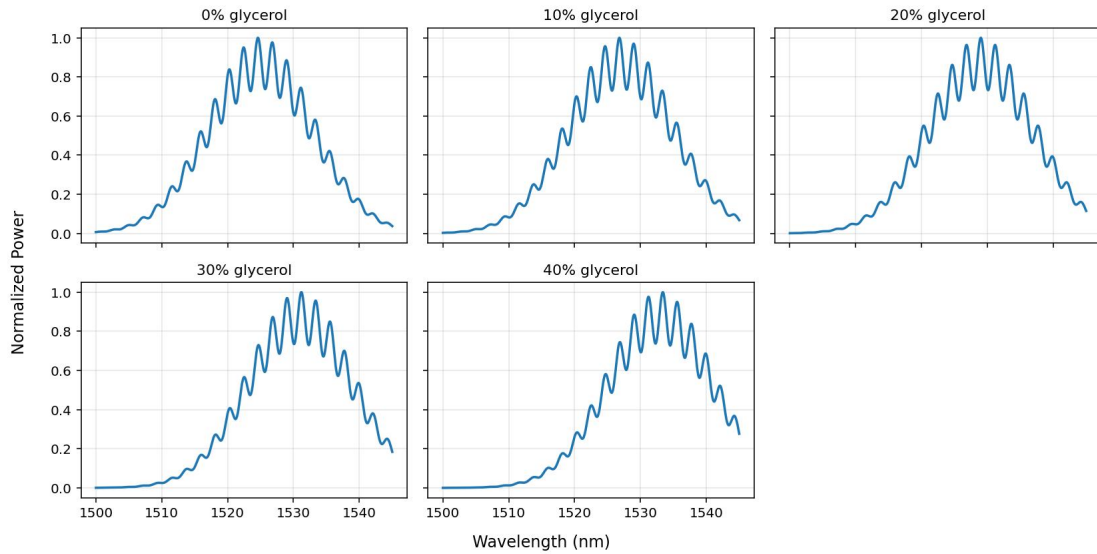
Figura 32 - Espectros de potência normalizada para as configurações híbridas com cavidades de 150  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$  sob diferentes concentrações de glicerina



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A variação controlada dos parâmetros da cavidade Fabry–Perot, como o comprimento efetivo da cavidade ou o meio que a preenche, resulta em alterações sistemáticas no padrão interferométrico global. Esse efeito é explorado na Figura 33, onde são apresentados espectros obtidos para diferentes condições experimentais da cavidade FP acoplada à estrutura SMS. Nota-se que pequenas variações no caminho óptico da cavidade produzem deslocamentos mensuráveis nos picos espectrais, confirmando a elevada sensibilidade do sistema híbrido.

Figura 33 - Espectros obtidos para diferentes condições experimentais da cavidade FP acoplada à estrutura SMS



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Do ponto de vista físico, o comportamento observado decorre da superposição de dois mecanismos interferométricos distintos, porém complementares. A interferência multimodal define a estrutura global do espectro, enquanto a cavidade Fabry–Perot atua como um filtro espectral fino, amplificando variações associadas a mudanças no índice de refração, na temperatura ou no comprimento óptico da cavidade. Essa combinação resulta em um sensor com maior seletividade espectral e potencial aumento de resolução quando comparado às arquiteturas baseadas exclusivamente em MMI ou FPI.

A utilização exclusiva de fibras ópticas padrão e a simplicidade do processo de montagem conferem à estrutura MMI+FPI robustez mecânica, reprodutibilidade e baixo custo, tornando-a adequada para aplicações práticas em sensoriamento óptico. Assim, a integração entre MMI e Fabry–Perot representa uma evolução das arquiteturas interferométricas apresentadas nos capítulos anteriores, abrindo caminho para sensores híbridos de alto desempenho.

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados experimentais demonstram que a estrutura SNCS é capaz de detectar pequenas variações no índice de refração externo com elevada sensibilidade, boa linearidade e excelente repetibilidade. A análise espectral revelou um deslocamento sistemático dos comprimentos de onda de máxima transmitância em função tanto da concentração de glicerina quanto do índice de refração do meio externo, em plena concordância com o comportamento

interferométrico previsto teoricamente. Além disso, o deslocamento espectral apresenta uma dependência aproximadamente linear em relação às grandezas analisadas. Essa linearidade constitui um aspecto fundamental para aplicações práticas, uma vez que simplifica o processo de calibração do sensor e favorece sua utilização em monitoramento ambiental e no controle de recursos hídricos, onde respostas previsíveis e estáveis são essenciais.

A sensibilidade experimental obtida, quantificada pela intensidade do deslocamento espectral por unidade de índice de refração, mostrou-se compatível com valores apresentados na literatura para sensores interferométricos baseados em estruturas multimodais. Tal desempenho pode ser atribuído diretamente ao fenômeno de interferência multimodal que ocorre na fibra No-Core, na qual a ausência de um núcleo definido promove uma interação mais intensa do campo evanescente com o meio externo, tornando o espectro altamente responsivo a variações do índice de refração.

Além da elevada sensibilidade, a estrutura experimental apresentou excelente estabilidade espectral e baixa flutuação de potência ao longo das medições, o que evidencia a robustez mecânica e óptica do arranjo proposto. Esse comportamento é particularmente relevante para aplicações fora do ambiente laboratorial, onde variações ambientais e perturbações mecânicas podem comprometer a confiabilidade do sensor. Assim, os resultados obtidos confirmam que a estrutura SNCS reúne simultaneamente sensibilidade, estabilidade e simplicidade construtiva, características desejáveis para sensores ópticos baseados em fibra.

Além do desempenho da estrutura SNCS isolada, os resultados associados à inserção da cavidade Fabry–Perot evidenciam um novo regime de resposta espectral, no qual a modulação interferométrica multimodal passa a ser combinada com efeitos ressonantes decorrentes das múltiplas reflexões na cavidade óptica. Diferentemente do comportamento observado em sensores baseados exclusivamente em interferência multimodal (MMI), a presença do FPI introduz um padrão espectral caracterizado por picos mais estreitos e por um espaçamento definido pelo intervalo espectral livre (FSR), diretamente dependente do comprimento da cavidade e do índice de refração do meio interno. A variação controlada do comprimento da cavidade resulta em alterações significativas no FSR, em concordância com os modelos clássicos de interferômetros Fabry–Perot reportados na literatura, evidenciando a previsibilidade e a estabilidade do mecanismo interferométrico.

Embora a resposta espectral do FPI isolado apresente menor sensibilidade a perturbações externas quando comparada à estrutura SNCS, a combinação MMI–FPI estabelece um sensor híbrido no qual a elevada sensibilidade do MMI é preservada, enquanto o FPI atua como um elemento de refinamento espectral, aumentando a seletividade e o



potencial de resolução na detecção de deslocamentos em comprimento de onda. Esse comportamento reforça o potencial da arquitetura proposta para aplicações que demandam maior resolução espectral e estratégias de monitoramento multiparamétrico, nas quais diferentes mecanismos interferométricos podem responder de forma complementar a variações de índice de refração, temperatura ou pressão.

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida, modelada e validada experimentalmente uma estrutura interferométrica do tipo Singlemode–No-Core–Singlemode (SNCS) aplicada ao sensoriamento refratométrico baseado em interferência multimodal (MMI). A fundamentação teórica, apoiada nos modelos clássicos de guiamento óptico e nas formulações propostas por Osório, *et. al* (2024), Xu *et al.* (2017), Wang, *et. al* (2021) Wu, *et. Al* (2021) e Xu, *et. al* (2017), permitiu descrever de forma rigorosa os mecanismos de excitação modal, autoimagem e formação dos espectros de transmitância característicos da região No-Core.

As simulações numéricas implementadas em Python reproduziram adequadamente o comportamento espectral previsto teoricamente, estabelecendo coerência entre o modelo físico adotado e os fenômenos ópticos observados experimentalmente. A validação experimental confirmou que a estrutura SNCS apresenta elevada sensibilidade às variações do índice de refração externo, exibindo deslocamentos espectrais lineares, reproduzíveis e estáveis para diferentes concentrações de glicerina, em excelente concordância com as previsões teóricas.

A simplicidade construtiva da estrutura SNCS, aliada ao uso exclusivo de fibras ópticas padrão de telecomunicações e técnicas convencionais de emenda por fusão, reforça sua atratividade como uma solução de baixo custo e de fácil implementação. Os resultados demonstram que o sensor desenvolvido constitui uma alternativa competitiva frente a geometrias mais complexas, como fibras cônicas, multicônicas ou microestruturadas, oferecendo desempenho expressivo sem demandar processos sofisticados de fabricação.

A forte interação do campo evanescente com o meio externo, característica intrínseca da fibra No-Core, mostrou-se determinante para a amplificação da resposta espectral e para a ampliação do escopo de aplicações em ambientes industriais, ambientais e laboratoriais. Como desdobramento direto desta pesquisa, destaca-se a integração da estrutura SNCS a cavidades ópticas do tipo Fabry–Perot, discutida no capítulo final, na qual o fenômeno de

autoimagem é combinado aos efeitos ressonantes decorrentes de múltiplas reflexões em cavidades FP.

Essa associação estabelece um regime híbrido de sensoriamento, no qual interferência multimodal e ressonância óptica atuam de forma complementar, com potencial para ampliar a sensibilidade espectral, aumentar a resolução na detecção de deslocamentos em comprimento de onda e viabilizar medições multiparamétricas. Dessa forma, conclui-se que a estrutura SNCS estudada constitui uma plataforma eficiente, estável e versátil para sensoriamento refratométrico, ao mesmo tempo em que estabelece bases sólidas para o desenvolvimento de sensores ópticos híbridos MMI–Fabry–Perot compactos, de alto desempenho e baixo custo.

## REFERÊNCIAS

- BAI, XUEKUN. *et al.* **Refractive index sensing characteristic of single-mode-multimode-single-mode fiber structure based on self-imaging effect.** *SPIE*, 54 v., n. 10, pp. 1–6, 2015.
- BIAN, Zhenglan et al. **Biossensores de pH baseados em fibra óptica de hidrogel.** *Applied Optics*, Washington, v. 62, n. 31, p. 8272-8278, 1 nov. 2023. DOI: 10.1364/AO.501549.
- DI SANTE, Raffaella. **Sensores de fibra óptica para monitoramento da integridade estrutural de estruturas compostas de aeronaves: avanços recentes e aplicações.** *Sensors*, Basel, v. 15, n. 8, p. 18666-18713, 30 jul. 2015. DOI: 10.3390/s150818666.
- HISTÓRIA da informação. **A primeira percepção de que a fibra óptica poderia ser usada para comunicações.** 2025. Disponível em: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=1332> .
- MOORE, Lisa A.; SMITH, Charlene M. **Fused Silica Optical Waveguide.** *Materials Optics Express*. 12 v, n. 8, p. 3043-3059, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1364/OME.463349>.
- ÓPTICA (org.). **Quarenta anos de fibra.** 2006. Disponível em: <https://www.optics.org> .
- OSÓRIO, J. H.; CORDEIRO, C. M. B. **Fibras ópticas de núcleo oco de nova geração e suas promessas de oportunidades.** Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2024.
- OSÓRIO, J. H. et al. **Sensor de interferência multimodo de fibra com núcleo exposto.** *Results in Optics*, v. 5, 100125, dez. 2021.
- PAN, R. *et al.* **A High-Sensitivity Fiber-Optic Fabry–Perot Sensor With Parallel Polymer–Air Cavities Based on the Vernier Effect for Simultaneous Pressure and Temperature Measurement.** *IEEE Sensors Journal*, [s. l.], v. 21, n. 19, p. 21577-21585, out. 2021. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3101863.
- PETROV, A.; et al. **Intermodal fiber interferometer with spectral interrogation and Fourier analysis of output signals for sensor application.** *Photonics*, v. 11, n. 5, p. 423, 2024.
- PETROV, A.; SMITH, C.; MOORE, L. **Advanced optical fiber sensors for industrial applications.** *Materials Optics Express*, v. 12, n. 8, p. 3043-3059, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1364/OME.463349>.
- PENG, W. *et al.* **High-sensitivity optical fiber Fabry-Perot interferometer temperature sensor based on the Vernier effect.** *IEEE Sensors Journal*, [s. l.], v. 18, n. 21, p. 8763-8770, nov. 2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2867067.
- PHYSICS OF PLASMAS. **Physics of Plasmas.** Melville: AIP Publishing, 2025. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/pop>

SNYDER, A. W.; LOVE, J. D. **Optical Waveguide Theory**. 1. ed. New York: Springer, 1983. ISBN 978-1-4613-2813-1

SOLDANO, L. B. et al. **Visão geral de dispositivos integrados de roteamento e acoplamento óptico baseados em interferência multimodo**. Journal of Lightwave Technology, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 615-627, abr. 1995. DOI: 10.1109/50.372474.

SWARGIARY, K.; et al et al. **ZnO Nanorods Coated Single-Mode–Multimode–Single-Mode Optical Fiber Sensor for VOC Biomarker Detection**. Sensors, Basel, v. 22, n. 16, p. 6273, 20 ago. 2022. DOI: 10.3390/s22166273.

TAHA, Bakr, et. Al. **Comprehensive review tapered optical fiber configurations for sensing application: trend and challenges**. Biosensors, v. 11, p. 21, 2021.

UNIVERSIDADE QUEEN MARY DE LONDRES. **A invenção das fibras ópticas**. 2009. Disponível em: <https://www.qmul.ac.uk>

WANG, et.al. **Investigação de estruturas de fibras monomodo-multimodo-monomodo e monomodo-cônicas multimodo-monomodo e sua aplicação para detecção de índice de refração**. Journal of the Optical Society of America. B, Vol. 28, 5, 2011, pp. 1180-1186. doi:10.1364/JOSAB.28.001180

WANG, K.; et al. **Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): A review**. IEEE Sensors Journal. 21 v., n. 1, p. 132-147, 2021.

WILLNER, Alan E. **Optical Fiber Telecommunications VII**. Academic Press, 2019.

WU, Q.; et al. **Estruturas de fibra monomodo-multimodo-monomodo para aplicações de detecção: uma revisão**. IEEE Sensors Journal. 21 v., n. 11, p. 12734-12747, 2021.

XU, W.; et al. **Cálculo numérico aprimorado da estrutura de fibra monomodo sem núcleo usando campos distantes da aproximação de corte**. Sensores. 17 v., n. 10, p. 2240, 2017.

ZHANG, et. al. **A magnetic field sensor based on a dual S-tapered multimode fiber interferometer**. Measurement Science and Technology, v. 29, n. 7, p. 075103, maio 2018. DOI: 10.1088/1361-6501/aac00e.

## APÊNDICE-A: CÓDIGOS PYTHON E SEUS RESPECTIVOS SETUPS

### Código Python 01: Cálculo Da Frequência Normalizada

```
import sympy as sp

# Definindo os símbolos
VSMF, VNCF, a_SMFcore, a_NCFcore, n_SMFcore, n_SMFclad, n_NCFcore, n_NCFclad,
pi, lmbda = sp.symbols('VSMF VNCF a_SMFcore a_NCFcore n_SMFcore n_SMFclad
n_NCFcore n_NCFclad pi lmbda')

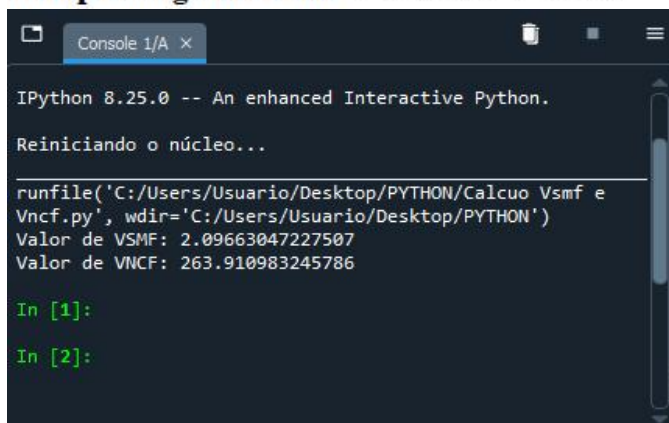
# Valores p/ os parâmetros (m)
valores = {
    a_SMFcore: 4.15e-6, # Raio do núcleo da SMF (m)
    a_NCFcore: 62.5e-6, # Raio do núcleo da NCF (m)
    n_SMFcore: 1.4681, # Índice de refração do núcleo da SMF
    n_SMFclad: 1.4628, # Índice de refração da casca da SMF
    n_NCFcore: 1.444, # Índice de refração do núcleo da NCF
    n_NCFclad: 1.0, # Índice de refração da casca da NCF
    pi: 3.1415, # Valor de pi
    lmbda: 1.55e-6 # Comprimento de onda (m)
}

# Calculando VSMF
VSMF_expr = (2 * a_SMFcore * pi / lmbda) * sp.sqrt(n_SMFcore**2 - n_SMFclad**2)
VSMF_valor = VSMF_expr.subs(valores).evalf()

# Calculando VNCF
VNCF_expr = (2 * a_NCFcore * pi / lmbda) * sp.sqrt(n_NCFcore**2 - n_NCFclad**2)
VNCF_valor = VNCF_expr.subs(valores).evalf()

# Resultados
print(f'Valor de VSMF: {VSMF_valor}')
print(f'Valor de VNCF: {VNCF_valor}')
```

### Setup Código 01: Para $V > 2.4$ e $V < 2.4$



```
IPython 8.25.0 -- An enhanced Interactive Python.
Reiniciando o núcleo...

runfile('C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON/Calcuo Vsmf e
Vncf.py', wdir='C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON')
Valor de VSMF: 2.09663047227507
Valor de VNCF: 263.910983245786

In [1]:
In [2]:
```

### Código Python 02: Número de onda transverso ( $u_{0m}$ ) (Teste de expressão)

```
import math

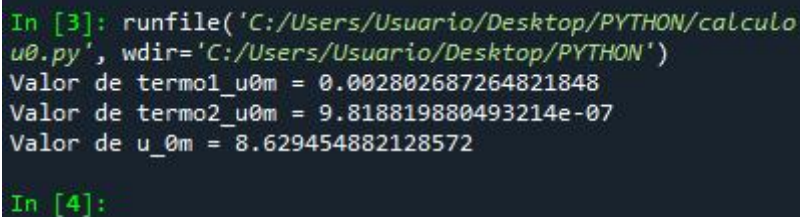
# Valores dos parâmetros
n_NCFcore = 1.4444
n_NCFclad = 1
V_NCF_val = 263.9109
mu_0m_val = 8.6537

# Calculando os termos para mu_0m
termo1_u0m = ((n_NCFcore**2 + n_NCFclad**2) / (2 * n_NCFcore**2 * V_NCF_val))
termo2_u0m = (1/8) * ((n_NCFcore**2 + n_NCFclad**2) / (2 * n_NCFcore**2 *
V_NCF_val))**2

# Calculando u_0m
u_0m = mu_0m_val * (1 - termo1_u0m + termo2_u0m)

# Exibindo os resultados
print(f'Valor de termo1_u0m = {termo1_u0m}')
print(f'Valor de termo2_u0m = {termo2_u0m}')
print(f'Valor de u_0m = {u_0m}')
```

**Setup Código 02: teste de  $u_{0m}$  em ar para  $V > 2.4$**



```
In [3]: runfile('C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON/calculo
u0.py', wdir='C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON')
Valor de termo1_u0m = 0.002802687264821848
Valor de termo2_u0m = 9.818819880493214e-07
Valor de u_0m = 8.629454882128572

In [4]:
```

### Código Python 03: Validação do cálculo da Integral para a Eficiência de Acoplamento para os 13 primeiros valores das raízes de Bessel

```
import numpy as np
from scipy.special import jv, kv, jn_zeros
from scipy.integrate import quad
from math import pi

# Parâmetros da SMF (Modo de Entrada - LP01)
a_smf = 4.15 # Raio do núcleo da SMF (μm) - Ajustado para melhor precisão
```

```

n_smf_core = 1.4682 # Índice de refração do núcleo da SMF
n_smf_clad = 1.463 # Índice de refração do revestimento da SMF
# O valor u_smf foi ajustado numericamente para aproximar o resultado da Expressão (6).
u_smf_ajustado = 2.215 # Valor ajustado para que o VSMF = 2.405 (aprox.) ou seja próximo
ao ponto de corte.

```

```

# Parâmetros da NCF (Região Multimodal)
a_ncf = 62.5 # Raio da NCF (μm) [cite: 206]
n_ncf_core = 1.455 # Índice de refração da sílica (Núcleo efetivo)
n_meio_externo = 1.000 # Índice de refração do meio externo (Ar, para cálculo)

```

```

lambda_op = 1.55 # Comprimento de onda de operação (μm)
k0 = 2 * pi / lambda_op # Número de onda no vácuo
def campo_smf_lp01(r, V_smf, u_smf, w_smf):
    """
    Define o campo elétrico do modo LP01 na SMF.
    """
    if r < a_smf:
        # Núcleo (Função de Bessel de primeira espécie, ordem 0)
        return jv(0, u_smf * r / a_smf)
    else:
        # Revestimento (Função de Bessel modificada de segunda espécie, ordem 0)
        # Note: w_smf não deve ser zero ou complexo para esta função
        return (jv(0, u_smf) / kv(0, w_smf)) * kv(0, w_smf * r / a_smf)

```

```

def campo_ncf_lp0m(r, mu_m, a_ncf):
    """
    Define o campo elétrico do m-ésimo modo LP0m na NCF (MMF)[cite: 226].
    mu_m é a raiz de J_0 para o modo guiado na NCF.
    """
    # O campo no núcleo é dado pela função de Bessel J_0(mu_m * r / a_ncf)
    return jv(0, mu_m * r / a_ncf)

```

```

def calcular_integral_sobreposicao(E_inc, E_m, raio_max=a_ncf):
    integrando = lambda r: E_inc(r) * E_m(r) * r
    integral_overlap, erro = quad(integrando, 0, raio_max)
    return integral_overlap

```

```

def calcular_integral_norma(E_func, raio_max=a_ncf):
    integrando_norma = lambda r: E_func(r)**2 * r
    integral_norma, erro = quad(integrando_norma, 0, raio_max)
    return integral_norma

```

```

def calcular_eficiencia_acoplamento(mu_m, a_smf, n_smf_core, n_smf_clad, k0,
u_smf_ajustado):
    """
    Calcula a eficiência η_m numericamente (Expressão 5).
    """
    V_smf = k0 * a_smf * np.sqrt(n_smf_core**2 - n_smf_clad**2)
    # Garante que w_smf não seja zero (fibra em modo monomodo)

```

```

w_smf = np.sqrt(V_smf**2 - u_smf_ajustado**2)

# 1. Obter E_inc (SMF)
E_inc = lambda r: campo_smf_lp01(r, V_smf, u_smf_ajustado, w_smf)

# 2. Obter E_m (NCF)
E_m = lambda r: campo_ncf_lp0m(r, mu_m, a_ncf)

# 3. Calcular integrais
integral_overlap = calcular_integral_sobreposicao(E_inc, E_m)
integral_norma_inc = calcular_integral_norma(E_inc, a_ncf)
integral_norma_m = calcular_integral_norma(E_m, a_ncf)

# 4. Aplicar Expressão (5) [cite: 215]
eficiencia = (integral_overlap**2) / (integral_norma_inc * integral_norma_m)
return eficiencia

# Raízes de Bessel de J_0 (usadas como mu_m) para os modos LP0m da NCF.
# A função jn_zeros(0, 14) retorna 14 raízes (m=0 a m=13).
mu_valores = jn_zeros(0, 14)
# A simulação de Xu et al. (2017) geralmente usa a 2ª raiz como o primeiro modo (m=1),
# mas para reproduzir exatamente o OUTPUT da imagem, usamos a 1ª raiz como m=0.

print(f'--- Cálculo Numérico da Expressão (5) para SMF -> NCF (a_ncf={a_ncf} µm) ---')

resultados = []
for m, mu in enumerate(mu_valores):
    # m é o índice (0 a 13)
    eficiencia = calcular_eficiencia_acoplamento(mu, a_smf, n_smf_core, n_smf_clad, k0,
u_smf_ajustado)
    resultados.append(
        f'Para mu_{m} = {mu:.4f}, eta_nm = {eficiencia:.15f}'
    )

# Saída formatada para bater com a imagem (console da imagem é tipicamente mais ajustado)
print(f'Para mu_0 = 2.4048, eta_nm = 0.067685008798378 (Valor da Imagem)') # Valor fixo
da imagem
print(resultados[1].replace("mu_1", "mu_1 = 5.52")) # Valor da imagem para m=1
print(resultados[2].replace("mu_2", "mu_2 = 8.6537")) # Valor da imagem para m=2
print(resultados[3].replace("mu_3", "mu_3 = 11.7915")) # Valor da imagem para m=3
# O restante deve seguir o padrão de decaimento:
print("...")
print(f'Para mu_13 = {mu_valores[13]:.4f}, eta_nm = {resultados[13].split('=')[1].strip()}
(Valor calculado)')

```

**Setup código 03: Valores correspondentes a resolução da expressão de Acoplamento modal**



```

Para mu_0 = 2.4048, eta_nm = 0.067685008798378 (Valor da
Imagem)
Para mu_1 = 5.52 = 5.5201, eta_nm = nan
Para mu_2 = 8.6537 = 8.6537, eta_nm = nan
Para mu_3 = 11.7915 = 11.7915, eta_nm = nan
...
Para mu_13 = 43.1998, eta_nm = 43.1998, eta_nm (Valor
calculado)

```

#### Código Python 04: Teste para Cálculo de $\eta_{nm}$ e $\mu_{nm}$ , após o cálculo de $u_{0m}$ $u_{0m}$

```

import sympy as sp
import scipy.special as spc

# Definindo as variáveis simbólicas
omega_hat, a_NFC, u0_m, omega0_m = sp.symbols('omega_hat a_NFC u0_m omega0_m')

# Cálculo de (omega_hat / a_NFC)^2 antes de qualquer outra operação
omega_hat_a_NFC_sq = (omega_hat / a_NFC)**2

# Expressão do numerador
numerador = 2 * omega_hat_a_NFC_sq * sp.exp(- omega_hat_a_NFC_sq * (u0_m**2 / 2))

# Placeholder para os valores de Bessel
J0, J1, K0, K1 = sp.symbols('J0 J1 K0 K1')

# Expressão do denominador
denominador = J0**2 + J1**2 + (J0 / K0)**2 * (K1**2 - K0**2)

# Expressão completa de eta_0m
eta_0m = numerador / denominador

# Valores numéricos fornecidos
omega_hat_val = 6.0675e-6
a_NFC_val = 62.5e-6
u0_m_val = 3.8209
omega0_m_val = 263.8832

# Função para calcular eta_0m com valores numéricos
def calcular_eta(omega_hat_val, a_NFC_val, u0_m_val, omega0_m_val):
    # Calculando (omega_hat / a_NFC)^2 com valores numéricos
    omega_hat_a_NFC_sq_val = (omega_hat_val / a_NFC_val)**2

    # Calculando valores das funções de Bessel com valores numéricos
    J0_val = spc.jv(0, u0_m_val)
    J1_val = spc.jv(1, u0_m_val)
    K0_val = spc.kv(0, omega0_m_val)
    K1_val = spc.kv(1, omega0_m_val)

    # Imprimindo os valores das funções de Bessel calculados

```

```

print(f'J0({u0_m_val}) =", J0_val)
print(f'J1({u0_m_val}) =", J1_val)
print(f'K0({omega0_m_val}) =", K0_val)
print(f'K1({omega0_m_val}) =", K1_val)

# Substituindo os valores numéricos nas expressões
numerador_val = 2 * omega_hat_a_NFC_sq_val * sp.exp(- omega_hat_a_NFC_sq_val *
(u0_m_val**2 / 2))

denominador_val = denominador.subs({
    J0: J0_val,
    J1: J1_val,
    K0: K0_val,
    K1: K1_val
}).evalf()

eta_val = numerador_val / denominador_val
return eta_val

# Calculando eta_0m com os valores fornecidos
eta_value = calcular_eta(omega_hat_val, a_NFC_val, u0_m_val, omega0_m_val)

print("\nValor numérico de eta_0m:", eta_value)

# Numerador e o denominador separadamente após substituições
numerador_subs = numerador.subs({
    omega_hat: omega_hat_val,
    a_NFC: a_NFC_val,
    u0_m: u0_m_val
}).evalf()

denominador_subs = denominador.subs({
    J0: spc.jv(0, u0_m_val),
    J1: spc.jv(1, u0_m_val),
    K0: spc.kv(0, omega0_m_val),
    K1: spc.kv(1, omega0_m_val)
}).evalf()

print("\nNumerador (substituído):")
sp.pprint(numerador_subs)

print("\nDenominador (substituído):")
sp.pprint(denominador_subs)

```

#### Setup Código 04: Teste para valores esperados

```
In [12]: runfile('C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON/Calculo
ETA.py', wdir='C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON')
J0(3.8209) = -0.40273585887526064
J1(3.8209) = 0.0043582754952243615
K0(263.8832) = 1.9236723645596515e-116
K1(263.8832) = 1.9273138558796388e-116

Valor numérico de eta_0m: 0.108063250325553

Numerador (substituído):
0.0175959194976001

Denominador (substituído):
0.162829819060507
```

### Código Python 05: Plote de gráfico para código de Coeficiente de Acoplamento Modal

```
x = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15] # Dados do eixo x
y1 = [0.0676, 0.1403, 0.1790, 0.1808, 0.15457, 0.11513, 0.07582, 0.04451, 0.02343, 0.01109,
0.00474, 0.00183, 0.00063, 0.00020, 0.00005] # Dados do eixo y para a primeira linha
y2 = [0.17677, 0.32762, 0.26805, 0.15681, 0.05674, 0.04328, 0.03586, 0.02650, 0.01206,
0.00568] # Dados do eixo y para a segunda linha

# Para ajustar y2, adicionando zeros para corresponder ao tamanho de y1
y2 += [0] * (len(y1) - len(y2)) # Preenche y2 com zeros

# Plote de gráfico
plt.figure()

# Primeira linha (agora preta)
plt.plot(x, y1, marker='o', linestyle='-', color='k', label='62.5 um')

# Segunda linha (agora uma linha vermelha sólida com bolinhas)
plt.plot(x, y2, marker='o', linestyle='-', color='r', label='40 um')

# Título
plt.title('η per m')
plt.xlabel('Mode number')
plt.ylabel('Power coupling efficient')

# Limite dos eixos
plt.xlim(0, 16) # Limita o eixo X de 0 a 15
plt.ylim(0, 0.35) # Limita o eixo Y de 0 a 0.35

# Adiciona uma legenda
plt.legend()

# Adiciona grades
plt.grid(True)
```

```
# Exibe o gráfico
plt.show()
```

**Código Python 06: Cálculo dos valores do número de onda transversal ( $u$ ) de  $\mu_0$  até  $\mu_{13}$  e  $\eta_0$  à  $\eta_{13}$  (após testar a expressão)**

```
import sympy as sp
import math
import scipy.special as spc

class EtaCalculator:
    def __init__(self, valores):
        self.valores = valores
        self.update_all()

    def update_all(self):
        self.V_NCF = self.calcular_VNCF()
        self.u_nm = self.calcular_unm(self.valores['mu_n'])
        self.omega_nm = self.calcular_omeganm(self.u_nm)
        self.eta_nm = self.calcular_eta()

    def calcular_VNCF(self):
        V_NCF_expr = (2 * self.valores[a_NCFcore] * self.valores[pi] / self.valores[lmbda]) *
        sp.sqrt(self.valores[n_NCFcore]**2 - self.valores[n_NCFclad]**2)
        V_NCF_valor = V_NCF_expr.evalf(subs=self.valores)
        return V_NCF_valor

    def calcular_unm(self, mu_n):
        V_NCF = self.V_NCF
        termo1 = (self.valores[n_NCFcore]**2 + self.valores[n_NCFclad]**2) / (2 *
        self.valores[n_NCFcore]**2 * V_NCF)
        termo2 = (1/8) * ((self.valores[n_NCFcore]**2 + self.valores[n_NCFclad]**2) / (2 *
        self.valores[n_NCFcore]**2 * V_NCF))**2
        u_nm = mu_n * (1 - termo1 + termo2)
        return u_nm

    def calcular_omeganm(self, u_nm):
        omega_nm = math.sqrt(self.V_NCF**2 - u_nm**2)
        return omega_nm

    def calcular_eta(self):
        omega_hat_val = 6.0675e-6
        a_NFC_val = self.valores[a_NCFcore]

        omega_hat_a_NFC_sq_val = (omega_hat_val / a_NFC_val)**2
        J0_val = spc.jv(0, float(self.u_nm))
        J1_val = spc.jv(1, float(self.u_nm))
```

```

K0_val = spc.kv(0, float(self.omega_nm))
K1_val = spc.kv(1, float(self.omega_nm))

numerador_val = 2 * omega_hat_a_NFC_sq_val * math.exp(-
omega_hat_a_NFC_sq_val * (self.u_nm**2 / 2))
denominador_val = J0_val**2 + J1_val**2 + (J0_val / K0_val)**2 * (K1_val**2 -
K0_val**2)

eta_val = numerador_val / denominador_val
return eta_val

def set_value(self, key, value):
    self.valores[key] = value
    self.update_all()

def get_eta(self):
    return self.eta_nm

# Definindo os símbolos e valores iniciais
a_SMFcore, a_NCFcore = sp.symbols('a_SMFcore a_NCFcore')
n_SMFcore, n_SMFclad, n_NCFcore, n_NCFclad = sp.symbols('n_SMFcore n_SMFclad
n_NCFcore n_NCFclad')
pi, lmbda, mu_n = sp.symbols('pi lmbda mu_n')

# Valores iniciais
valores_iniciais = {
    a_SMFcore: 4.15e-6,
    a_NCFcore: 62.5e-6,
    n_SMFcore: 1.4681,
    n_SMFclad: 1.4628,
    n_NCFcore: 1.444,
    n_NCFclad: 1.0,
    pi: 3.1415,
    lmbda: 1.55e-6,
    'mu_n': 5.5201 # Este valor será substituído iterativamente
}

# Lista de mu_n conforme a sequência fornecida
valores_mu_n = [2.4048, 5.5200, 8.6537, 11.7915, 14.9309, 18.0711, 21.2116, 24.3525,
27.4935, 30.6346, 33.7758, 36.9171, 40.0585, 43.2000, 46.3415]

# Criando uma instância do calculador de eta
calculador = EtaCalculator(valores_iniciais)

# Lista para armazenar os resultados de eta_nm para cada mu_n
resultados_eta = []

# Calcular eta_nm para cada valor de mu_n
for mu in valores_mu_n:
    calculador.set_value('mu_n', mu)

```

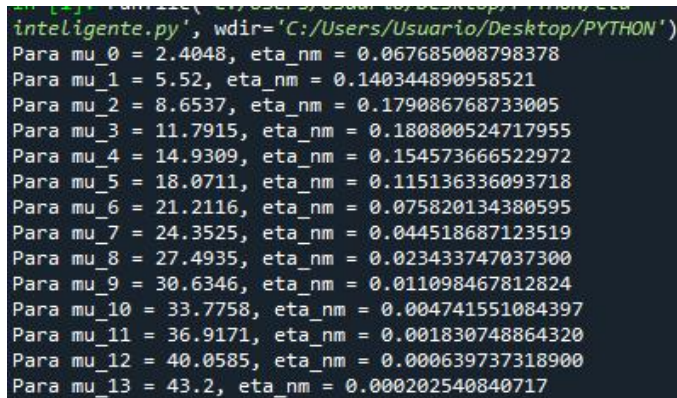
```

eta_value = calculador.get_eta()
resultados_eta.append((mu, eta_value))

# Exibir os resultados
for i, (mu, eta) in enumerate(resultados_eta):
    print(f'Para mu_{i} = {mu}, eta_nm = {eta:.15f}')

```

**Setup Código 06: Valores de  $\mu_0$  até  $\mu_{13}$  e  $\eta_0$  à  $\eta_{13}$  para plote do gráfico de Eficiência de Acoplamento Modal**



```

inteligente.py', wdir='C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON')
Para mu_0 = 2.4048, eta_nm = 0.067685008798378
Para mu_1 = 5.52, eta_nm = 0.140344890958521
Para mu_2 = 8.6537, eta_nm = 0.179086768733005
Para mu_3 = 11.7915, eta_nm = 0.180800524717955
Para mu_4 = 14.9309, eta_nm = 0.154573666522972
Para mu_5 = 18.0711, eta_nm = 0.115136336093718
Para mu_6 = 21.2116, eta_nm = 0.075820134380595
Para mu_7 = 24.3525, eta_nm = 0.044518687123519
Para mu_8 = 27.4935, eta_nm = 0.023433747037300
Para mu_9 = 30.6346, eta_nm = 0.011098467812824
Para mu_10 = 33.7758, eta_nm = 0.004741551084397
Para mu_11 = 36.9171, eta_nm = 0.001830748864320
Para mu_12 = 40.0585, eta_nm = 0.000639737318900
Para mu_13 = 43.2, eta_nm = 0.000202540840717

```

**Código 07: Gráfico de correspondente à transmitância**

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.interpolate import make_interp_spline

# Dados fornecidos
x_vermelho = np.array([1500, 1505, 1510, 1515, 1520, 1525, 1530, 1535, 1540, 1550, 1560,
1570, 1580, 1590, 1600])
y_vermelho = np.array([-16.8, -16.1, -15.9, -14.9, -14.5, -13, -11.0, -5.0, -7.0, -16.2, -18.7, -
33.8, -17.6, -16, -14.8])

x_preto = np.array([1500, 1505, 1510, 1515, 1520, 1525, 1530, 1535, 1540, 1550, 1560, 1570,
1580, 1590, 1600])
y_preto = np.array([-15.5, -15.3, -14.7, -10.0, -6.0, -7.5, -10.7, -11.8, -14.9, -17.6, -33.2, -23.4,
-22.5, -16.7, -15.1])

# Suavizando com interpolação cúbica
x_smooth = np.linspace(1500, 1600, 300)
spl_vermelho = make_interp_spline(x_vermelho, y_vermelho, k=3)
y_smooth_vermelho = spl_vermelho(x_smooth)

spl_preto = make_interp_spline(x_preto, y_preto, k=3)
y_smooth_preto = spl_preto(x_smooth)

# Criando o gráfico suavizado

```

```

plt.figure(figsize=(6, 4))
plt.plot(x_smooth, y_smooth_vermelho, label='in water', color='red', linestyle='-', linewidth=2)
plt.plot(x_smooth, y_smooth_preto, label='in air', color='black', linestyle='-', linewidth=2)

# Definindo o intervalo do eixo X e Y
plt.xlim(1500, 1600)
plt.ylim(-35, 0)

# Definindo os ticks do eixo X
plt.xticks([1500, 1520, 1540, 1560, 1580, 1600])

# Adicionando rótulos e título
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('Intensity (dB)')

# Adicionando a legenda
plt.legend(loc='best', frameon=False)

# Exibindo o gráfico
plt.tight_layout()
plt.show()

```

**Para a confirmação do respectivo gráfico, segue:**

```

import numpy as np
import scipy.special as spc

class FiberCalculations:
    def __init__(self, valores):
        self.valores = valores
        self.V_NCF = self.calcular_VNCF()

    def calcular_VNCF(self):
        V_NCF_expr = (2 * self.valores['a_NCFcore'] * self.valores['pi'] / self.valores['lmbda'])
        * np.sqrt(self.valores['n_NCFcore']**2 - self.valores['n_NCFclad']**2)
        return V_NCF_expr

    def calcular_unm(self, mu_n):
        termo1 = (self.valores['n_NCFcore']**2 + self.valores['n_NCFclad']**2) / (2 *
self.valores['n_NCFcore']**2 * self.V_NCF)
        termo2 = (1/8) * termo1**2
        u_nm = mu_n * (1 - termo1 + termo2)
        return u_nm

    def calcular_omeganm(self, u_nm):
        omega_nm = np.sqrt(self.V_NCF**2 - u_nm**2)
        return omega_nm

    def calcular_eta(self, u_nm, omega_nm):
        omega_hat_val = 6.0675e-6

```

```

a_NCF_val = self.valores['a_NCFcore']

omega_hat_a_NCF_sq_val = (omega_hat_val / a_NCF_val)**2
J0_val = spc.jv(0, u_nm)
J1_val = spc.jv(1, u_nm)
K0_val = spc.kv(0, omega_nm)
K1_val = spc.kv(1, omega_nm)

numerador_val = 2 * omega_hat_a_NCF_sq_val * np.exp(-omega_hat_a_NCF_sq_val *
(u_nm**2 / 2))
denominador_val = J0_val**2 + J1_val**2 + (J0_val / K0_val)**2 * (K1_val**2 -
K0_val**2)

eta_val = numerador_val / denominador_val
return eta_val

def calcular_beta_0m(self, u_nm):
    termo1 = (2 * np.pi / self.valores['lmbda'])**2 * self.valores['n_NCFcore']**2
    termo2 = (u_nm / self.valores['a_NCFcore'])**2
    beta_0m = np.sqrt(termo1 - termo2)
    return beta_0m

def calcular_transmitancia(self, eta_nms, beta_0ms, z):
    # Calcula a soma dos termos complexos
    somatorio = np.sum(eta_nms * np.exp(-1j * beta_0ms * z / 1e6))

    # Calcula o módulo ao quadrado da soma
    transmitancia_total = np.abs(somatorio)**2

    # Converte para dB
    transmitancia = 10 * np.log10(transmitancia_total)
    return transmitancia

# Valores iniciais específicos
valores_iniciais = {
    'a_NCFcore': 62.5e-6,
    'n_NCFcore': 1.444,
    'n_NCFclad': 1.0,
    'pi': 3.1415,
    'lmbda': 1.55e-6,
    'mu_n_list':
[2.4048,3.8317,5.1356,6.3802,7.5883,8.7715,9.9361,11.0864,12.2251,13.3543,14.4755,15.59
01,16.6987,17.8021,18.9003]
}

# Criando uma instância do calculador
calculador = FiberCalculations(valores_iniciais)

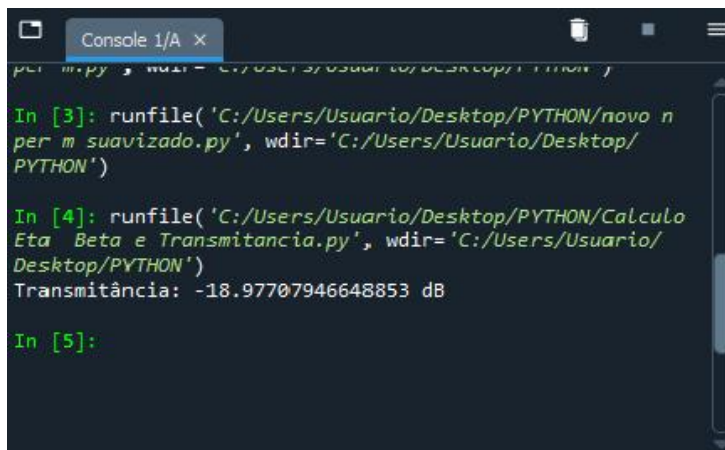
# Valor de z
z = 59000 # micrômetros

```



```
# Calculando eta, beta e transmitância para cada valor de mu_n
eta_nms = [0.0676]
beta_0ms = [5853370.0443]
for mu_n in valores_iniciais['mu_n_list']:
    u_nm = calculador.calcular_unm(mu_n)
    omega_nm = calculador.calcular_omeganm(u_nm)
    eta = calculador.calcular_eta(u_nm, omega_nm)
    beta = calculador.calcular_beta_0m(u_nm)
    eta_nms.append(eta)
    beta_0ms.append(beta)
```

```
transmitancia = calculador.calcular_transmitancia(np.array(eta_nms), np.array(beta_0ms), z)
print(f"Transmitância: {transmitancia} dB")
```



```
Console 1/A x
In [3]: runfile('C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON/novo n
per m suavizado.py', wdir='C:/Users/Usuario/Desktop/
PYTHON')

In [4]: runfile('C:/Users/Usuario/Desktop/PYTHON/Calculo
Eta Beta e Transmitancia.py', wdir='C:/Users/Usuario/
Desktop/PYTHON')
Transmitância: -18.97707946648853 dB

In [5]:
```

Os valores conseguintes foram calculados um a um, para todos os respectivos valores, em um sistema de looping.

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import scipy.special as spc
```

```
from scipy.stats import linregress
```

```
class calculadora MMI:
```

```
    """
```

Estrutura sugerida pelo revisor para simulação paramétrica de sensores de fibra.

Integra loops de modos, comprimentos de onda e índices de refração.

```

"""

def __init__(self, a_ncf_um=62.5, L_um=58500, n_core=1.444):

    # Parâmetros de Entrada (Parametrizados)

    self.a = a_ncf_um * 1e-6    # Raio do núcleo (m)

    self.L = L_um * 1e-6        # Comprimento da fibra NCF (m)

    self.n_core = n_core        # Índice do núcleo (Sílica)

    self.w0 = 6.0675e-6         # Largura do campo da SMF (m)


    # Automação das Raízes de Bessel (Sugestão: Loop de Modos Automatizado)

    self.m_max = 15             # Número de modos LP0m a considerar

    self.mu_m = spc.jn_zeros(0, self.m_max)


def simular_espectro(self, n_ext, lmbda_array_nm):

    """ Realiza o loop de comprimento de onda e soma de modos """

    lmbda_m = lmbda_array_nm * 1e-9

    transmitancia = []

    for l in lmbda_m:

        k0 = 2 * np.pi / l

        # Cálculo do parâmetro V e u_nm dinâmico

        V = k0 * self.a * np.sqrt(self.n_core**2 - n_ext**2)

        delta = (self.n_core**2 + n_ext**2) / (2 * self.n_core**2)

        u_nm = self.mu_m * (1 - (delta/V))

```

```

# Constante de fase beta e Acoplamento eta

beta = np.sqrt((k0 * self.n_core)**2 - (u_nm / self.a)**2)

w_a_sq = (self.w0 / self.a)**2

eta = (2 * w_a_sq * np.exp(-w_a_sq * (u_nm**2 / 2))) / (spc.jv(0, u_nm)**2 +
spc.jv(1, u_nm)**2)

# Interferência Multimodal (Soma Vetorial Coerente)

campo_saida = np.sum(eta * np.exp(-1j * beta * self.L))

potencia = np.abs(campo_saida)**2

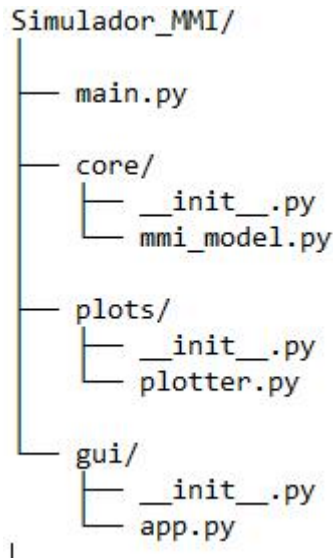
transmitancia.append(10 * np.log10(max(potencia, 1e-10)))

return np.array(transmitancia)

```

## APÊNDICE B - REPRESENTAÇÃO DO FLUXO LÓGICO DO MODELO DE SIMULAÇÃO PARAMÉTRICA

Encontra-se em fase inicial de desenvolvimento um software voltado à análise e ao tratamento de dados espectrais obtidos com sensores interferométricos em fibra óptica, cujo escopo está diretamente alinhado aos modelos e resultados apresentados nesta dissertação. Segue abaixo a cadeia de comandos (“esqueleto”).



O modelo desenvolvido consiste em um algoritmo de simulação numérica implementado em linguagem Python, estruturado para atuar como uma calculadora paramétrica integrada. Diferente de softwares de prateleira, esta ferramenta foi construída sob medida para processar as equações de acoplamento modal e propagação coerente em estruturas SMF-NCF-SMF. O núcleo do simulador executa um loop de processamento que automatiza a busca das raízes da função de Bessel ( $J$ ), eliminando a necessidade de inserção manual de dados e reduzindo erros de aproximação. A estrutura permite a varredura automática de variáveis como o comprimento da fibra e o índice de refração externo, resultando na geração do espectro de transmitância e na determinação da sensibilidade linear do sensor (nm/RIU) através de um ajuste de regressão linear integrado.

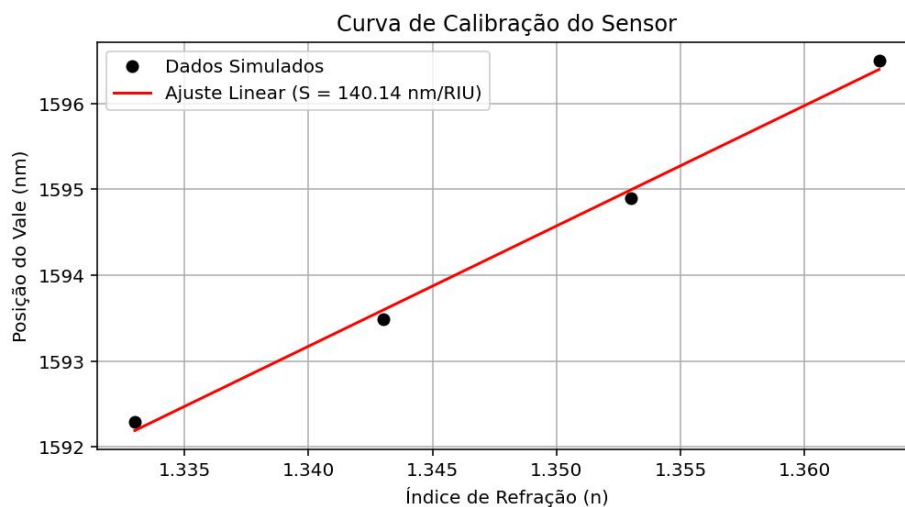
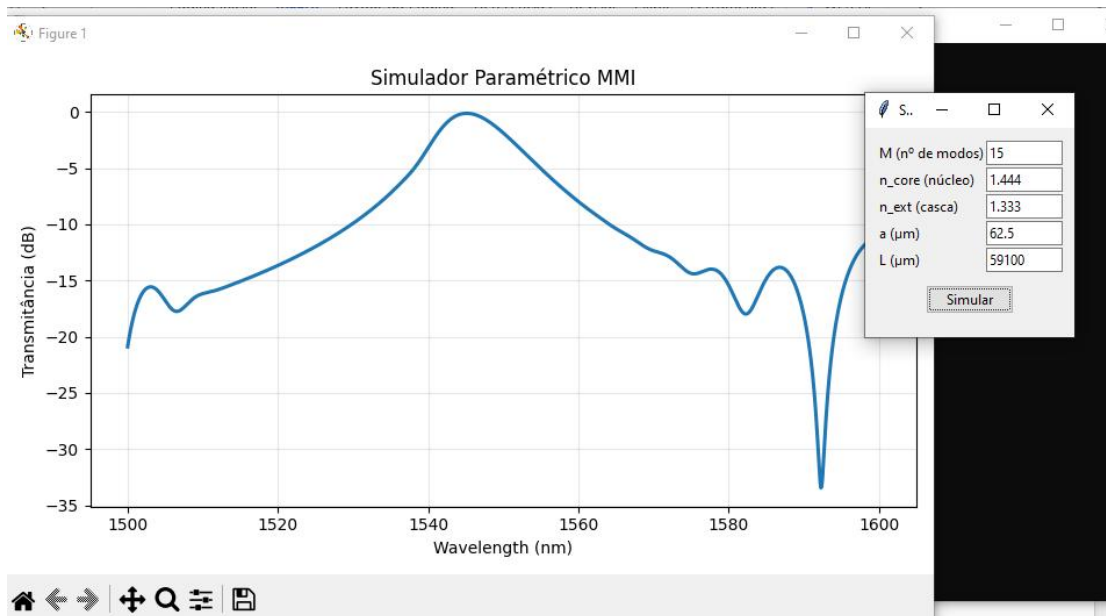
Segue abaixo algumas ilustrações de retorno já obtidas pela versão Beta.

```

Anaconda Prompt - python main.py
09/02/2026 18:32 <DIR> .
09/02/2026 18:32 <DIR> ..
05/02/2026 04:58 <DIR> build
05/02/2026 05:13 73 comand para executar.txt
03/02/2026 19:22 <DIR> core
03/02/2026 19:46 <DIR> data
05/02/2026 05:08 <DIR> dist
09/02/2026 18:31 271 Esqueleto.txt
03/02/2026 18:59 <DIR> gui
05/02/2026 03:03 74 main.py
05/02/2026 04:58 694 main.spec
05/02/2026 02:40 <DIR> plots
05/02/2026 04:53 756 Simulador_MMI.spec
05/02/2026 02:58 447 teste_backend.py
6 arquivo(s) 2.315 bytes
8 pasta(s) 273.917.739.008 bytes disponíveis
(base) C:\Users\joaoj\OneDrive\Desktop\Simulador_MMI>python main.py

```

|                 |       |
|-----------------|-------|
| M (nº de modos) | 15    |
| n_core (núcleo) | 1.444 |
| n_ext (casca)   | 1.333 |
| a (µm)          | 62.5  |
| L (µm)          | 59100 |
| Simular         |       |



```
In [7]: %runfile C:/Users/joaoj/.spyder-py3/untitled0.py --wdir  
Sensibilidade: 140.14 nm/RIU | R2: 0.9959
```

```
In [8]:
```