



LUIZ DAVID COSTA SILVA

**ESTUDO SOBRE INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT
EM FIBRAS ÓPTICAS PARA APLICAÇÃO EM SENSORES**

LAVRAS – MG

2026

LUIZ DAVID COSTA SILVA

**ESTUDO SOBRE INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT EM FIBRAS ÓPTICAS
PARA APLICAÇÃO EM SENSORES**

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

Orientador

Prof. Dr. Jefferson Esquina Tsuchida

Coorientadores

Prof.^a Dr. Jonas Henrique Osório

Prof.^a Dr. Flavio Augusto de Melo Marques

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).**

Costa Silva, Luiz David.

Estudo sobre interferômetro de Fabry-Perot em fibras ópticas para aplicação em
sensores / Luiz David Costa Silva. - 2026.

80 p. : il.

Orientador: Jefferson Esquina Tsuchida

Coorientador: Jonas Henrique Osório

Coorientador: Flavio Augusto de Melo Marques

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

Bibliografia.

1. Sintonização espectral. 2. Filmes finos poliméricos. 3. Sensor óptico híbrido. I.
Esquina Tsuchida, Jefferson. II. Osório, Jonas Henrique . III. de Melo Marques, Flavio
Augusto. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

LUIZ DAVID COSTA SILVA

**ESTUDO SOBRE INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT EM FIBRAS ÓPTICAS
PARA APLICAÇÃO EM SENSORES**

**STUDY ON FABRY-PEROT INTERFEROMETER IN OPTICAL FIBER FOR
APPLICATION IN SENSORS**

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

APROVADA em 24 de fevereiro de 2026.

Dr. Jefferson Esquina Tsuchida UFLA

Dr. Leomar Santos Marques UFLA

Dr. Alexandre Bessa dos Santos UFJF

Orientador

Prof. Dr. Jefferson Esquina Tsuchida

Coorientadores

Prof. Dr. Jonas Henrique Osório

Prof. Dr. Flávio Augusto de Melo Marques

LAVRAS – MG

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Lavras – UFLA, ao Departamento de Física – DFI, à equipe do Laboratório Multiusuário de Óptica e Fotônica – LaMOF e ao Programa de Pós-Graduação em Física da UFLA – PPGFis/UFLA, pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Mestrado.

Agradeço a Capes pela concessão da bolsa de estudos, que tornou possível a realização do Mestrado.

Agradeço à minha família pelo amor, apoio e incentivo incondicional durante a realização do meu mestrado.

“O sucesso não é conquistado. É alugado. E a parcela é paga todo dia.”
(LeBron James)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a caracterização experimental do interferômetro de Fabry-Perot (*Fabry-Perot Interferometer* - FPI) em fibra óptica, visando sua consolidação como plataforma versátil para o aumento da capacidade de detecção de sistemas de sensoriamento. A pesquisa foca inicialmente na análise fundamental das propriedades interferométricas do dispositivo, para então validar sua eficácia através da hibridização com um sensor de índice de refração baseado em Interferência Multimodal (*Multimodal Interference* - MMI). A metodologia consistiu na caracterização de duas arquiteturas de FPI extrínseco (*Extrinsic Fabry-Perot Interferometer* - EFPI): uma cavidade de ar (*air-gap*) com ajuste micrométrico e uma cavidade de estado sólido composta por um filme fino de poliestireno sulfonato de sódio (PSSH). Os resultados experimentais confirmaram a precisão do controle da Largura do Espectro Livre (*Free Spectral Range* - FSR) em função do comprimento da cavidade, permitindo a sintonização fina das franjas de interferência. Na etapa de aplicação, o FPI foi integrado a um sensor de índice de refração baseado em MMI fabricado na estrutura monomodo-multimodo-monomodo (*singlemode-multimode-singlemode* - SMS). O sistema híbrido foi submetido a soluções de água e glicerina (0% a 40%). A hibridização permitiu que as franjas de alta frequência do FPI modulassem o envelope largo do MMI, atuando como marcadores espectrais finos. Esta configuração otimizou significativamente a capacidade de identificar deslocamentos espectrais e detectar variações de índice de refração com maior precisão e clareza visual. O uso do filme de PSSH, com espessura estimada em $387,12\mu m$, conferiu ao dispositivo maior compactação e estabilidade, consolidando uma plataforma versátil para monitoramento em tempo real.

Palavras-chave: Sintonização espectral; Filmes finos poliméricos; Sensor óptico híbrido.

ABSTRACT

This work presents the development and experimental characterization of a fiber-optic Fabry-Perot Interferometer (FPI), aiming for its consolidation as a versatile platform to enhance the detection capabilities of sensing systems. The research initially focuses on the fundamental analysis of the device's interferometric properties, subsequently validating its efficacy through hybridization with a refractive index sensor based on Multimode Interference (MMI). The methodology involved characterizing two extrinsic FPI architectures: a micrometrically adjustable air-gap cavity and a solid-state cavity composed of a sodium polystyrene sulfonate (PSSH) thin film. Experimental results confirmed the precision of Free Spectral Range (FSR) control as a function of cavity length, allowing for the fine-tuning of interference fringes. In the application stage, the FPI was integrated into a refractive index sensor based on MMI fabricated using a singlemode-multimode-singlemode (SMS) structure. The hybrid system was tested with water and glycerin solutions (0% to 40%). The hybridization allowed the high-frequency fringes of the FPI to modulate the broad envelope of the MMI, acting as fine spectral markers. This configuration significantly optimized the ability to identify spectral shifts and detect refractive index variations with greater precision and visual clarity. The use of the PSSH film, with an estimated thickness of $387,12\mu\text{m}$, provided the device with increased compactness and stability, establishing a versatile platform for real-time monitoring.

Keywords: Spectral tuning; words; Polymer thin films; Hybrid optical sensor.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente estudo, ao desenvolver e caracterizar sensores baseados em interferômetros de Fabry-Pérot (FPI) em fibra óptica, apresenta resultados com elevado caráter de inovação tecnológica e expressivo potencial de aplicabilidade econômica, alinhando-se estrategicamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. O principal impacto tecnológico reside na validação de uma plataforma de sensoriamento de alta precisão e resolução, capaz de operar em ambientes hostis onde sensores eletrônicos convencionais falham devido à interferência eletromagnética, o que contribui diretamente para a ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) ao promover a modernização e a resiliência de infraestruturas industriais. A pesquisa ratifica a viabilidade de produzir dispositivos de baixo custo mediante arquiteturas simplificadas que prescindem de processos onerosos de microfabricação. Essa simplificação impacta positivamente a cadeia produtiva, alinhando-se à ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) ao maximizar a eficiência no uso de recursos e mitigar o desperdício industrial. Adicionalmente, a utilização de materiais acessíveis e de uso comum, como o polímero PSSH e a fibra óptica padrão, favorece a soberania tecnológica nacional ao reduzir a dependência de dispositivos importados de alto valor agregado. Por fim, a versatilidade da plataforma para a monitorização rigorosa de parâmetros ambientais e estruturais reforça a segurança em Cidades e Comunidades Sustentáveis (ODS 11) e auxilia na Ação Contra a Mudança Global do Clima (ODS 13), ao fornecer ferramentas precisas para a mitigação de falhas e o acompanhamento de variáveis críticas em tempo real.

IMPACT INDICATORS

By developing and characterizing optical fiber sensors based on Fabry-Pérot Interferometers (FPI), this study presents results characterized by high technological innovation and significant economic applicability, strategically aligning with the UN Sustainable Development Goals (SDGs). The primary technological impact lies in the validation of a high-precision, high-resolution sensing platform capable of operating in harsh environments where conventional electronic sensors fail due to electromagnetic interference. This directly contributes to SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) by promoting the modernization and resilience of industrial infrastructures. The research confirms the feasibility of producing low-cost devices through simplified architectures that bypass expensive microfabrication processes. This simplification positively impacts the production chain, aligning with SDG 12 (Responsible Consumption and Production) by maximizing resource efficiency and mitigating industrial waste. Additionally, the use of accessible, common materials—such as the PSSH polymer and standard optical fiber—promotes national technological sovereignty by reducing dependence on high-value imported devices. Finally, the platform's versatility for the rigorous monitoring of environmental and structural parameters reinforces safety in Sustainable Cities and Communities (SDG 11) and supports Climate Action (SDG 13) by providing precise tools for failure mitigation and real-time tracking of critical variables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Diagrama da estrutura de uma fibra óptica.	15
Figura 1.2 - Diagrama de uma fibra óptica SMF (a) e MMF (b).	16
Figura 1.3 - Diagrama de um sensor de umidade baseado em fibra óptica com FPI com gráfico de resposta espectral.	18
Figura 1.4 - Esquema da estrutura do sensor de umidade com filme fino de quitosana.	19
Figura 1.5 - Esquema da estrutura da fibra com filme de AAP.	20
Figura 1.6 - Diagrama esquemático do sensor de umidade com HVEEFPI.	20
Figura 1.7 - Diagrama esquemático de sensores de deslocamento.	22
Figura 1.8 - Esquemas de diferentes configurações de sensores de deformação baseados em EFPI.	23
Figura 2.1 - Diagrama de um Interferômetro de Fabry-Perot.	25
Figura 2.2 - Esquema de configurações de IFPI e EFPI.	26
Figura 3.1 - Esquema do EFPI em fibra óptica com cavidade air-gap e cavidade de filme fino.	31
Figura 3.2 - Cavidade Fabry-Perot na Máquina de emendas Fitel S179+.	32
Figura 3.3 - Esquema de montagem experimental do FPI com cavidade de ar.	32
Figura 3.4 - Filme fino de PSSH sendo aplicado na fibra óptica.	34
Figura 3.5 - Fibra óptica acoplada em um conector com filme fino de PSSH aplicado na extremidade.	34
Figura 3.6 - Diagrama de montagem do FPI com filme fino.	35
Figura 3.7 - Diagrama de montagem do sensor de índice de refração baseado em MMI.	36
Figura 3.8 - Diagrama da hibridização do sensor MMI com FPI com cavidade de ar.	36
Figura 3.9 - Diagrama da hibridização do sensor MMI com FPI com filme fino.	37
Figura 4.1 - Diagrama de estrutura SMS.	38
Figura 4.2 - Simulação computacional do fenômeno de re-imagem.	39
Figura 5.1 - Resposta espectral teórica do FPI para diferentes finesses.	42
Figura 5.2 - Resposta espectral teórica do FPI em função da frequência com parâmetros da finesse.	43
Figura 5.3 - Variação teórica do FSR em função do comprimento da cavidade.	44
Figura 5.4 - Decaimento teórico do FSR em função do comprimento da cavidade.	45
Figura 5.5 - Diagrama simplificado da cavidade Fabry-Perot preenchida por ar.	46
Figura 5.6 - Resposta espectral obtida da montagem experimental da cavidade Fabry-Perot ar.	46
Figura 5.7 - Comportamento experimental do FSR em função do comprimento da cavidade FP com barras de erro.	47
Figura 5.7 - Diagrama simplificado da cavidade Fabry-Perot preenchida por PSSH.	48
Figura 5.8 - Interferências FP no filme fino de PSSH.	48
Figura 5.8 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI.	49
Figura 5.9 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração.	49
Figura 5.10 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI com o FPI PSSH.	50
Figura 5.11 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI com o FPI ar.	51

Figura 5.12 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.	51
Figura 5.13 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.	52
Figura 5.14 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.	53
Figura 5.15 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.	54
Figura 5.16 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.	55
Figura 5.17 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI com o FPI PSSH.	56
Figura 5.18 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI de PSSH.	57
Figura 5.19 - Comparação entre o sensor MMI com e sem o FPI	58

LISTA DE SIGLAS

AAP	Alumina Anódica Porosa
DSS	<i>Dynamic Spectrum Sharing</i>
EFPI	<i>Extrinsic Fabry-Perot Interferometer</i>
FBG's	<i>Fiber Bragg Gratings</i>
FPI	<i>Fabry-Perot Interferometer</i>
HVE	<i>Harmonic Vernier Effect</i>
HVEFPI	Interferômetro de Fabry-Perot com Efeito Vernier Harmônico
IFPI	<i>Intrinsic Fabry-Perot Interferometer</i>
LPG's	<i>Long Periods Gratings</i>
MMF	<i>Multimode Fiber</i>
MMI	<i>Multi-modal Interference</i>
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
UR	Umidade relativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT	25
3	METODOLOGIA	31
4	INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT ACOPLADO A UM SENSOR BASEADO EM INTERFERÊNCIA MULTIMODAL	37
5	RESULTADOS	41
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXOS	60
	APÊNDICES	61

1 INTRODUÇÃO

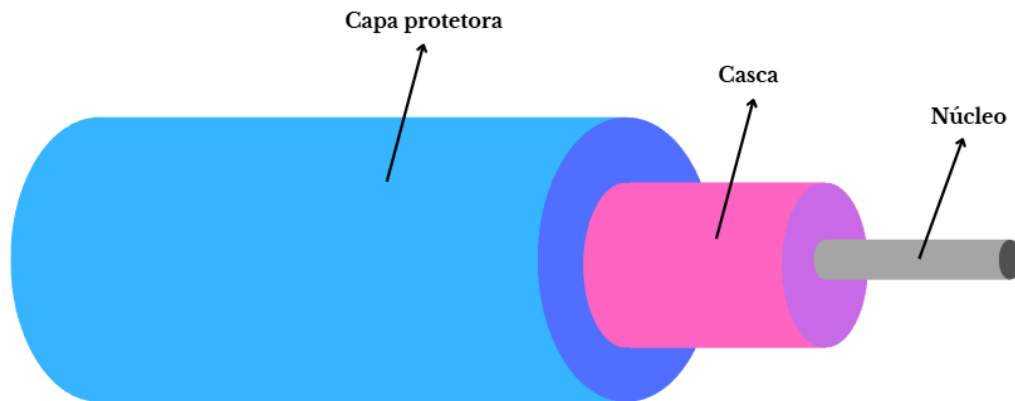
Nos últimos anos, houve um aumento significativo nos estudos científicos focados no desenvolvimento de sensores baseados em fibras ópticas. A fibra óptica é essencialmente um cilindro, geralmente de sílica, que opera com base no princípio de reflexão interna total permitindo a transmissão de dados por meio de pulsos eletromagnéticos gerados por luz. O físico suíço Daniel Colladon foi um dos pioneiros a demonstrar esse princípio na década de 1840 quando realizou um experimento onde usou um jato de água fluindo de um tanque e observou que ao incidir luz através da água, a luz seguia a trajetória curva do jato de água, ficando confinada dentro dele. Na década de 1850, o físico irlandês John Tyndall popularizou essa demonstração ao mostrar que a luz poderia ser “dobrada” dentro de um fluxo de água. A luz atingia a interface entre a água e o ar em um ângulo tão raso que ao invés de escapar, era completamente refletida. A partir desses experimentos, fibras ópticas foram sendo construídas a partir de tubos de vidro e abriram-se inúmeros caminhos para diversas aplicações, como endoscópios na área médica e principalmente para telecomunicações.

Na década de 1960, as telecomunicações estavam atingindo o limite da sua capacidade, pois dependia de cabos de cobre que não conseguiam transportar muita informação simultaneamente e havia grandes perdas de sinal elétrico. As fibras de vidro eram consideradas inadequadas por haver uma grande perda de sinal em poucos metros de extensão e acreditava-se que essa perda era uma característica intrínseca do vidro. Por volta de 1966, Charles K. Kao, em seu trabalho intitulado *Dielectric-fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies*, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 2009, teorizou que a perda de sinal era resultado de impurezas no material da fibra e calculou que, para a comunicação ser viável, uma fibra de vidro precisaria ter uma atenuação de no máximo 20 dB/km, diferente do vidro da época que tinha atenuação de 1000 dB/km.

Em 1970, a equipe de Robert Maurer, Donald Keck e Peter Schultz publicou o artigo intitulado *Fused Silica as an Optical Material* que consistia basicamente em tentar purificar o vidro que já existia. Eles utilizaram um método conhecido como deposição de vapor químico para fabricar sílica ultra-pura. O resultado foi a primeira fibra óptica de baixa perda da história, atingindo uma atenuação de 17 dB/km, superando a meta teórica de Charles K. Kao e provando que a comunicação óptica era viável. A estrutura de uma fibra óptica atual, ilustrada na Figura 1.1, compreende um núcleo de sílica dopado envolvido por uma casca (revestimento) de sílica pura. Essa diferença de composição é o que estabelece índices de

refração distintos, garantindo o confinamento da luz por reflexão interna total. Externamente, uma capa plástica proporciona a proteção mecânica necessária ao conjunto enquanto o núcleo é feito de sílica.

Figura 1.1 - Diagrama da estrutura de uma fibra óptica.

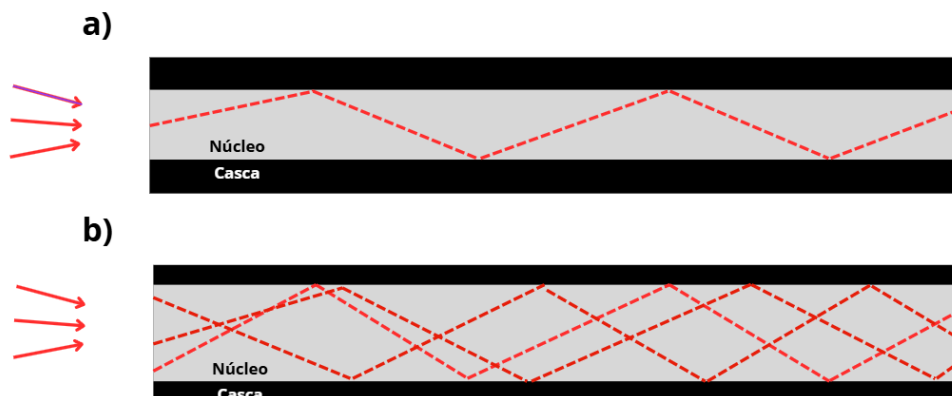


Fonte: Do autor (2026).

Atualmente, as fibras ópticas consolidaram-se como pilares nas telecomunicações e na instrumentação científica, devido à sua baixa atenuação de sinal e imunidade a interferências eletromagnéticas. Essa versatilidade, aliada à alta estabilidade mecânica e química, viabiliza o desenvolvimento de dispositivos sensores capazes de operar em ambientes hostis com elevada eficiência. A eficiência desses sistemas ópticos é intrinsecamente ligada ao regime de propagação eletromagnética no interior do guia de onda. Dependendo do diâmetro do núcleo e do comprimento de onda de operação, as fibras são categorizadas como monomodo (*Monomode Fiber* - SMF) ou multimodo (*Multimode Fiber* - MMF), distinção esta que determina a aplicação final do dispositivo, seja em redes de alta velocidade ou em sistemas de sensoriamento interferométrico.

As fibras monomodo caracterizam-se pela simplicidade estrutural e pelo núcleo reduzido, com diâmetro variando entre 8 μm e 10 μm . Essa dimensão estreita limita a propagação a um único modo eletromagnético, eliminando a dispersão modal. Consequentemente, a integridade do pulso luminoso é preservada por distâncias maiores, tornando-as ideais para transmissões de longo alcance.

Figura 1.2 - Diagrama de uma fibra óptica SMF (a) e MMF (b).



Fonte: Do autor (2026).

Em contraste, a MMF, esquematizada na Figura 1.2 b, apresenta um núcleo significativamente maior, com diâmetros a partir de $50\mu\text{m}$. Essa geometria permite que a luz se propague através de múltiplos caminhos, denominados modos. Embora o maior diâmetro facilite o acoplamento de luz, a existência de diversos modos gera uma perda denominada dispersão modal que traz limitações no desempenho do sinal, causada principalmente por macro e micro curvaturas ao longo da fibra. A SMF oferece vantagens para a transmissão de dados em comparação às variantes MMF. Isso ocorre porque, nas fibras MMF, os diversos modos de propagação resultam em atrasos diferenciais que causam o alargamento temporal dos pulsos luminosos, fenômeno conhecido como dispersão modal (Saleh, B. E. A., Teich, M. C. 2019).

A transição do uso das fibras ópticas das telecomunicações para a instrumentação científica permitiu o surgimento dos sensores ópticos a fibra que, de acordo com (SOUZA, et. al., 2020), as fibras ópticas demonstraram ser uma excelente plataforma para a obtenção de uma ampla variedade de sensores. Esses dispositivos fundamentam-se na modulação de uma ou mais propriedades da luz — como amplitude, fase, polarização e comprimento de onda — em resposta a estímulos externos do ambiente. A grande vantagem desta tecnologia está na capacidade da fibra de atuar tanto como o próprio elemento sensor quanto como o canal de transmissão do sinal, permitindo o monitoramento remoto e em tempo real além da imunidade eletromagnética. No contexto do sensoriamento, as perturbações externas, como variações de temperatura, pressão ou índice de refração do meio, alteram as condições de propagação no guia de onda, gerando um sinal óptico que pode ser correlacionado à grandeza física de interesse.

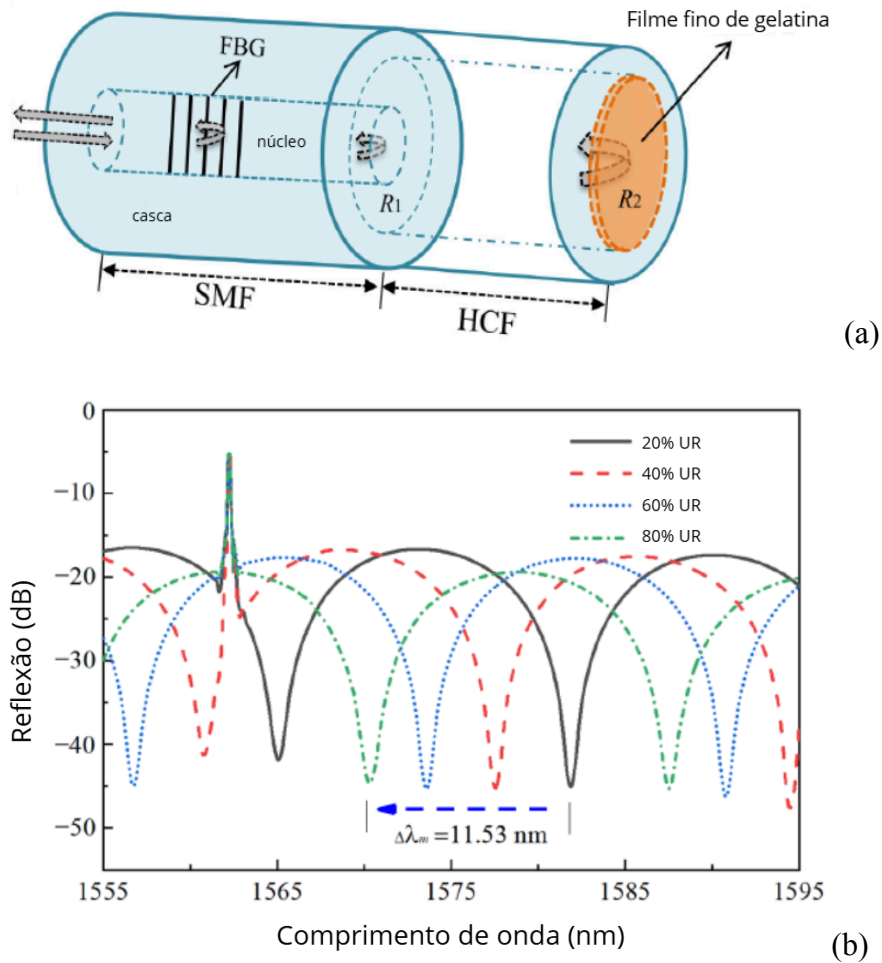
Apesar desses desafios intrínsecos à propagação de sinal, o constante aprimoramento dessas estruturas abriu portas para aplicações que vão além da transmissão de dados. Nesse contexto, PENG, J. (2018) destaca que, com o desenvolvimento da tecnologia de fibras ópticas, a combinação do Interferômetro de Fabry-Perot (*Fabry-Perot Interferometer* - FPI) com fibras ópticas tem sido amplamente implementada no campo de sensoriamento com fibras ópticas. Esse avanço deve-se à crescente demanda por soluções de alta precisão e eficiência em diversas áreas, como telecomunicações, monitoramento ambiental, segurança e saúde.

Polyzos (2017) demonstra que a estabilidade do FPI em temperaturas superiores a 900°C é viável, desde que fatores como a difusão de dopantes e a integridade estrutural da cavidade sejam controlados. Essa robustez térmica torna a configuração mais versátil, permitindo sua aplicação em setores críticos, como o monitoramento de turbinas aeroespaciais e processos petroquímicos, onde sensores eletrônicos convencionais não sobreviveriam. Essa adaptabilidade permite que o FPI vá além do monitoramento térmico e estrutural, estendendo sua utilidade para a detecção de grandezas químicas e ambientais.

Dentre as diferentes tecnologias para a construção de sensores baseados em fibras ópticas, a configuração do FPI desponta como altamente promissora. A integração de microarranjos poliméricos na ponta de fibras ópticas possibilita a otimização de sensores robustos, aproveitando a capacidade da fibra de atuar simultaneamente como suporte mecânico e canal de sinal óptico. (GONG *et al.*, 2019). Um artigo publicado por Zhong (2022) descreve o desenvolvimento de um sensor de umidade a base de fibra óptica que utiliza um FPI com filme fino de gelatina. O FPI, detalhado na seção 2 do presente estudo, consiste em uma cavidade óptica entre duas superfícies paralelas parcialmente refletoras. As múltiplas reflexões internas geram interferências cujas franjas espectrais variam com precisão micrométrica conforme o comprimento da cavidade ou o índice de refração do meio. Devido a essa versatilidade, diferentes arranjos experimentais têm sido propostos, destacando-se as configurações apresentadas a seguir. A estrutura do sensor é criada pela fusão de uma fibra de núcleo oco (*Hollow Core Fiber* - HCF) a uma fibra SMF, que contém uma rede de Bragg (*Fiber Bragg Grating* - FBG) em seu núcleo para compensar variações térmicas, e revestindo a extremidade com uma película de gelatina sensível à umidade. A medição de umidade relativa (UR) é alcançada ao observar a mudança no comprimento de onda do pico de interferência, que é modulada pela variação da espessura da gelatina em resposta à umidade do ambiente. O sensor demonstrou uma sensibilidade de 0,192 nm/%UR. Os autores

concluem que este projeto oferece desempenho superior em comparação com outros sensores de fibra óptica existentes, destacando sua potencial aplicação em medição de umidade em tempo real.

Figura 1.3 - Diagrama de um sensor de umidade baseado em fibra óptica com FPI com gráfico de resposta espectral.

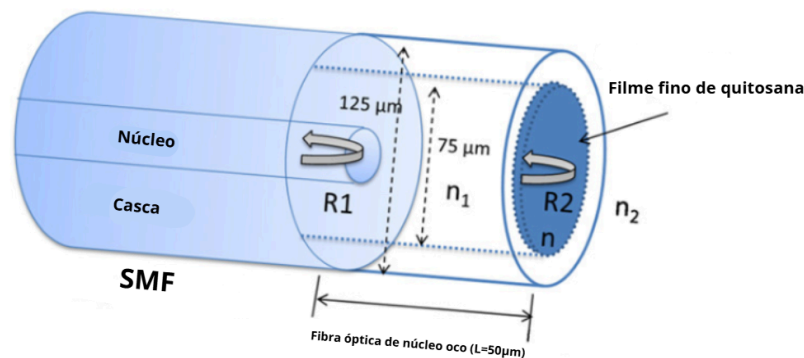


Fonte: Adaptado de Zhong, Y., *et al.* (2022).

O princípio de operação do sensor esquematizado na Figura 1.3 (a), baseia-se na interação do filme fino de gelatina com o ambiente. Como a gelatina é um material higroscópico, ela absorve ou libera moléculas de água dependendo da umidade relativa local. Esse processo causa uma variação física na espessura da película, o que altera o comprimento efetivo da cavidade óptica. Como resultado, o espectro de interferência sofre um deslocamento no comprimento de onda dos seus picos, como ilustrado na Figura 1.3 (b). Ao monitorar esse deslocamento espectral, é possível correlacionar a variação óptica diretamente com a variação da umidade, permitindo uma medição precisa e em tempo real, conforme destacado pelos autores.

Seguindo a mesma linha, existe uma configuração de EFPI semelhante, porém sem a rede de Bragg na fibra monomodo. Chen *et al.* (2012) relatam o desenvolvimento de um sensor de umidade relativa em fibra óptica fundamentado no EFPI. O elemento transdutor do dispositivo consiste em uma película de quitosana, ilustrado na Figura 1.4, um polímero natural selecionado por suas propriedades higroscópicas intrínsecas.

Figura 1.4 - Esquema da estrutura do sensor de umidade com filme fino de quitosana.

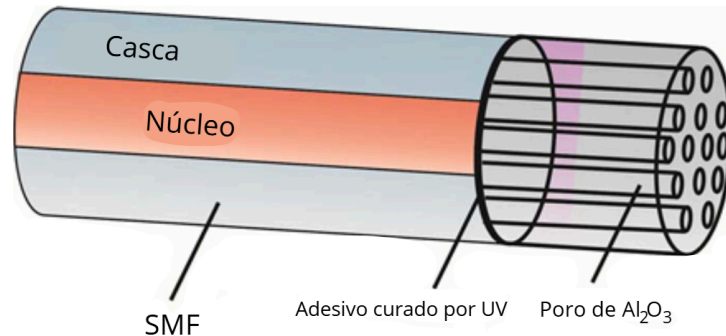


Fonte: Chen, L. H., *et al.* (2012).

O mecanismo de detecção baseia-se na expansão volumétrica do filme de quitosana em resposta à variação da umidade ambiente; esse fenômeno altera o comprimento óptico da cavidade ressonante, resultando em um deslocamento espectral mensurável. Chen *et al.* (2012) mostra em seu artigo que os ensaios experimentais demonstraram que o sensor possui alta sensibilidade e um tempo de resposta de 380 ms, validando sua aplicabilidade para monitoramento em tempo real. A proposta visa oferecer uma alternativa compacta, de baixo custo e alta confiabilidade aos sistemas convencionais. Paralelamente ao uso de polímeros, materiais nanoestruturados inorgânicos oferecem outra rota tecnológica viável, focada na robustez e estabilidade térmica.

Seguindo essa mesma linha de investigação sobre o uso de materiais sensíveis acoplados a estruturas de fibra, outros estudos exploram materiais inorgânicos para a formação da cavidade interferométrica. Nesse contexto, Huang *et al.* (2015) investigaram o uso de filmes finos feitos de alumina anódica porosa (AAP) integrados à ponta de uma fibra óptica monomodo. A figura 1.5 mostra um esquema deste dispositivo:

Figura 1.5 - Esquema da estrutura da fibra com filme de AAP.

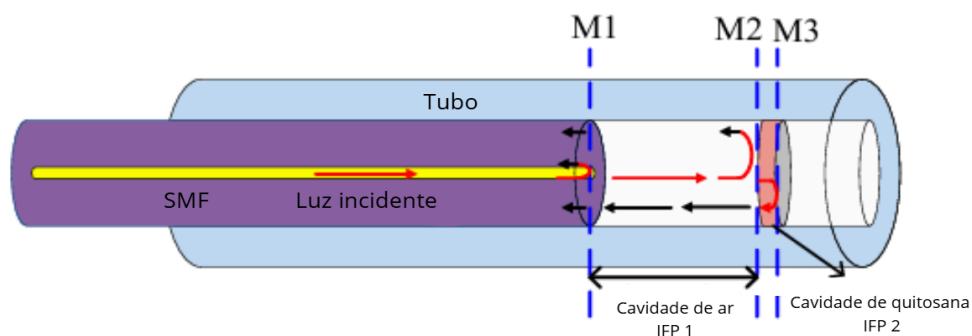


Fonte: Adaptado de Huang, C., *et al.* (2015).

Diferentemente do mecanismo de inchamento observado no sensor de umidade com filme fino de gelatina, a AAP atua através da adsorção física e condensação capilar de água dentro de seus nanoporos cilíndricos. Esse processo altera o índice de refração efetivo da camada, deslocando o espectro de interferência. Um aspecto crítico deste estudo foi a otimização dos parâmetros de fabricação: ao comparar sondas anodizadas sob diferentes tensões, os autores identificaram que a estrutura formada a 30V proporciona o equilíbrio ideal entre tamanho de poro e densidade, resultando em uma sensibilidade otimizada de 0,31 nm/%UR. A repetibilidade demonstrada na faixa de 20% a 90%UR sugere que sensores baseados em cerâmicas porosas representam uma solução durável para ambientes hostis.

Abordagens recentes, como a apresentada por Zhou *et al.* (2022), na revista *Sensors*, demonstrou um sensor de umidade de altíssima sensibilidade. A Figura 1.6 mostra o diagrama esquemático do sensor de umidade baseado no princípio do Interferômetro de Fabry-Perot Extrínseco com Efeito Vernier Harmônico (*Harmonic Vernier Effect with Extrinsic Fabry-Perot Interferometer* - HVEEFPI) que consiste de uma fibra óptica monomodo, um filme de quitosana e um tubo capilar.

Figura 1.6 - Diagrama esquemático do sensor de umidade com HVEEFPI.



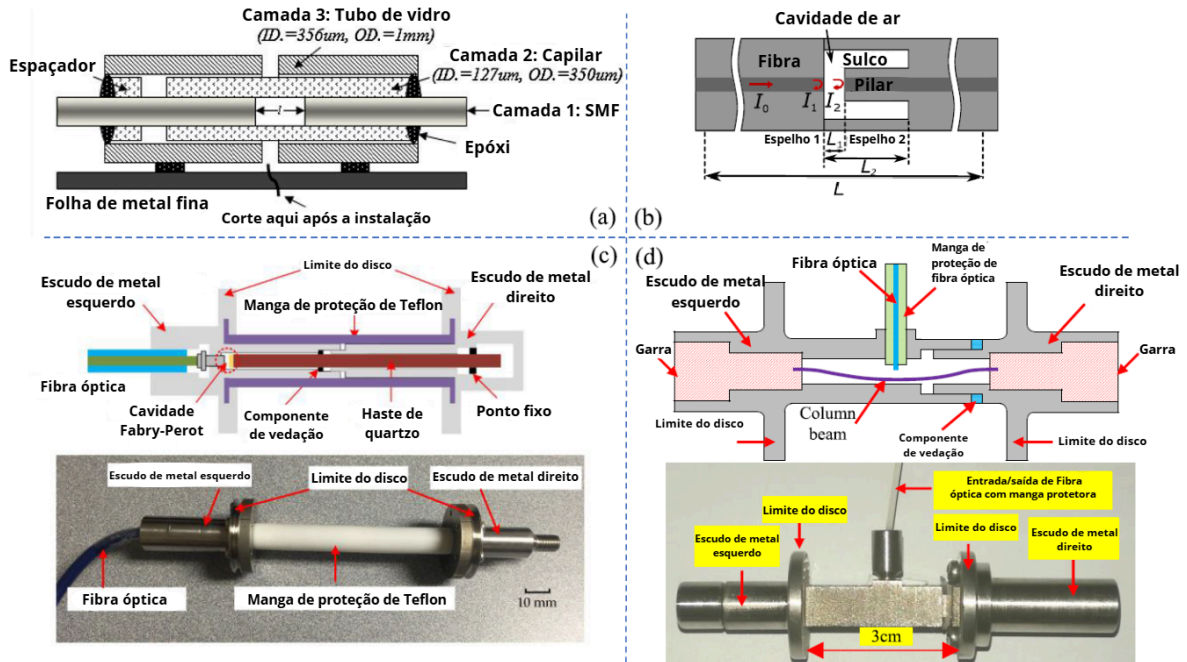
Fonte: Adaptado de Zhou, C., *et al.* (2022).

A arquitetura proposta consistia em um FPI em cascata com um filme de quitosana, material escolhido por sua resposta à umidade, devido aos diferentes índices de refração, existem três superfícies refletoras, sendo rotuladas como M1, M2 e M3. A cavidade de quitosana, FP2 (M2-M3), é a cavidade sensora com índice de refração sendo $n = 1,52$, e a cavidade de ar FP1(M1-M2) é a cavidade de referência. A principal inovação do trabalho foi a aplicação do Efeito Vernier Harmônico (*Harmonic Vernier Effect* - HVE), que ao ajustar a ordem harmônica, os autores alcançaram um fator de amplificação de aproximadamente 54 vezes, resultando em uma sensibilidade de $-83,77 \text{ nm}/\%UR$. O trabalho sugere que o uso do HVE fornece uma excelente alternativa para o desenvolvimento de sensores de fibra de alta sensibilidade.

Embora o uso de efeitos como o HVE permita amplificar drasticamente a sensibilidade por meio de múltiplas cavidades, a busca por dispositivos mais compactos e de fabricação simplificada tem impulsionado o desenvolvimento de arquiteturas baseadas em elementos transdutores únicos. Nesse sentido, além das configurações em cascata com capilares de ar,

Sensores estruturais são fundamentais nos setores aeroespacial e automotivo, onde deformações micrométricas podem sinalizar falhas críticas em componentes importantes (Cosgun *et al.*, 2024). Uma revisão abrangente feita por Zhu (2023) consolida o progresso significativo na área do sensoriamento à base de fibra óptica utilizando um FPI e mostra a versatilidade dessa plataforma em suas diversas aplicações, incluindo sensores de deformação. No sensoriamento de deslocamento, buscou-se aumentar o alcance dinâmico através do uso de fibras monomodo (SMF) afiladas, atingindo 80 mm, ou incorporando mecanismos de transferência com geometria triangular para obter resolução submicrométrica em alcances de centímetros além de um sensor baseado em microesfera (Figura 1.7 (a, b e c)). Também foram desenvolvidos sensores baseados em geometria triangular com faixa de medição na ordem de centímetros e resolução submicrométrica, além de sensores multi dimensionais (2D e 3D) empregando refletores externos, como meta-superfícies ou matrizes de guia de onda integradas (Figura 1.7 (d e e)).

Figura 1.8 - Esquemas de diferentes configurações de sensores de deformação baseados em EFPI.



Fonte: Adaptado de Zhu, C., *et al.* (2023).

Na medição de força, os avanços são igualmente notáveis, com o registro de uma resolução recorde de 54,9 nN obtida através de uma sonda de polímero na ponta da fibra, e o desenvolvimento de sensores baseados em cavidades ar-líquido com sensibilidades de até 8700 nm/N, muitas vezes auxiliados por técnicas de fabricação avançadas como a escrita direta a laser para criar estruturas de mola (*spring structure*). Além das medições lineares, a plataforma foi estendida ao sensoriamento de inclinação (*tilt*), onde designs baseados em pêndulos sólidos suspensos permitiram resoluções de 20 nanorradianos (nrad), inclusive em configurações 2D. Para aceleração e vibração, a otimização de materiais e do *design* estrutural de molas levou ao desenvolvimento de acelerômetros all-optical micro mecanizados e sensores de alta sensibilidade com faixas dinâmicas que ultrapassam 10 kHz.

Apesar da versatilidade das fibras ópticas, a implementação de sensores de alta precisão enfrenta desafios relacionados à estabilidade do sinal e à necessidade de sintonização espectral fina. Sensores baseados apenas em interferência multimodal (*Multimodal Interference* - MMI), por exemplo, podem apresentar limitações de resolução que dificultam a detecção de variações mínimas em ambientes complexos. Como alternativa para superar tais limitações, o presente estudo propõe e realiza a caracterização experimental de um EFPI. O objetivo principal é investigar a resposta dessa configuração em dois meios distintos, sendo

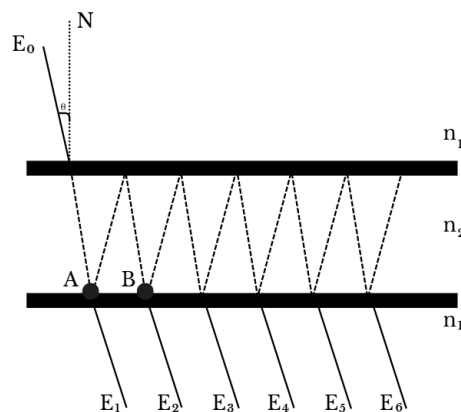
eles o ar e um filme fino polimérico de poliestireno sulfonato de sódio (PSSH), avaliando como a cavidade ressonante atua na sintonização do sinal e na melhoria da resolução espectral de sensores à base de fibra óptica. Com isso, busca-se validar uma plataforma de sensoriamento mais compacta e robusta para diversos tipos de sensores ópticos.

2 INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT

De acordo com Vaughan (1989), nos últimos anos do século XIX, dois físicos franceses da Universidade de Marselha, Alfred Perot e Charles Fabry, descreveram uma nova forma de dispositivo de interferência com o intuito de superar as limitações dos interferômetros já existentes, como o de Michelson que se baseia na interferência de apenas dois feixes de luz, ou seja, o novo dispositivo conseguira ver detalhes que Michelson não conseguia. A nova configuração, conhecida como Interferômetro de Fabry-Perot, consiste no uso de duas superfícies planas, paralelas e semi refletivas separadas por uma distância L . Fabry e Perot não se limitaram a inventar o dispositivo; eles promoveram ativamente os seus princípios e aplicações. Eles defenderam o instrumento com "clareza e vigor", comparando-o favoravelmente às redes de difração de Rowland e ao interferômetro de Michelson, que eram os padrões da época.

Diferente dos sistemas de feixe duplo, a arquitetura proposta por Fabry e Perot estabelece um regime de interferência múltipla: um feixe de luz incidente de amplitude E_0 atinge a primeira superfície e uma parte é transmitida para dentro da cavidade, em seguida sofre múltiplas reflexões entre as duas superfícies. A parcela da luz que está dentro da cavidade é refletida várias vezes entre as superfícies gerando múltiplas interferências que podem ser captadas tanto na transmissão ($E_1, E_2, E_3, \dots$) quanto na reflexão, isto é, as ondas eletromagnéticas apresentam uma diferença de fase devida à diferença de caminho óptico percorrido por cada feixe refletido dentro da cavidade. A Figura 2.1 ilustra um esquema simplificado do FPI utilizando dois espelhos semi-refletores de índice de refração n_1 e o meio entre eles é preenchido por um fluido de índice de refração n_2 .

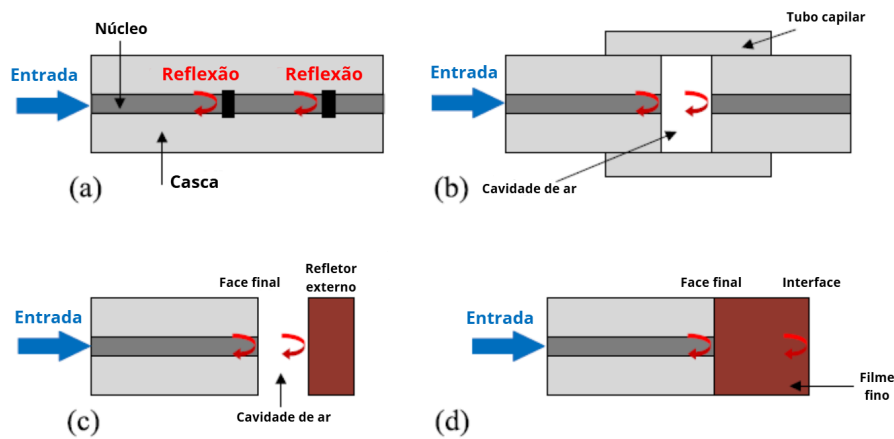
Figura 2.1 - Diagrama de um Interferômetro de Fabry-Perot.



Fonte: Do autor (2026).

Em seu trabalho, (Zhu, C., et. al., 2023) destacam que o FPI ocupa uma posição relevante na área de sensores de alta resolução. A adaptação desta configuração para guias de onda, resultando nos FPIs em fibra óptica, abriu caminho para uma nova classe de sensores de alta sensibilidade. Os autores descrevem como os FPIs em fibra se dividem estruturalmente em duas arquiteturas principais. Os interferômetros intrínsecos IFPIs (figura 2.2 (a)) são formados por refletores integrados ao longo do núcleo da fibra, de modo que o próprio material da fibra atua como a cavidade. Em contrapartida, os interferômetros extrínsecos EFPIs utilizam uma cavidade externa (figura 2.2 (b, c e d)).

Figura 2.2 - Esquema de configurações de IFPI e EFPI.



Fonte: Adaptado de Zhu, C., et al. (2023).

A configuração mais comum de EFPI, conforme apontado no artigo, é a de air-gap, onde a cavidade é o ar entre a face da fibra e um refletor separado. Os autores mencionam que a montagem desses sensores pode ser estabilizada por capilares de sílica ou formada pela deposição de filmes finos na ponta da fibra. A arquitetura EFPI, segundo os autores, oferece vantagens em comparação com outras tecnologias de sensoriamento em fibra, como as Fibras com Rede de Bragg (*Fiber Bragg Gratings* - FBGs), (*Long Periods Gratings* - LPGs) ou Compartilhamento dinâmico de espectro (*Dynamic Spectrum Sharing* - DSSs). Os autores enfatizam que a principal vantagem reside na sua flexibilidade de design, sendo a cavidade externa, ela pode ser facilmente acoplada a diversos transdutores mecânicos. Esta adaptabilidade, combinada com um processo de fabricação que não exige etapas complexas de microfabricação de alta precisão, resulta em uma plataforma de baixo custo e alta performance. Dessa forma, a análise dessas arquiteturas requer uma fundamentação teórica sólida. A descrição matemática que se segue fornece o embasamento necessário para prever a

sensibilidade e a faixa dinâmica do dispositivo em função das características do interferômetro.

A diferença de caminho óptico entre os feixes sucessivos depende da distância entre as superfícies “L”, do ângulo de incidência “ θ ” e do índice de refração do meio entre as superfícies “n”. Para a demonstração matemática, considera-se o ângulo de incidência sendo normal ao plano da primeira interface da cavidade. Pelo princípio da superposição, pode-se calcular a interferência dos feixes transmitidos como uma somatória cujo termo geral é:

$$E_k = E_0 \tau \tau' (\rho'^2)^{k-1} e^{i(k-1)\delta} \quad (1)$$

onde τ é o coeficiente de transmissão da primeira refração e τ' da segunda refração, e ρ é o coeficiente de reflexão. Na equação, o termo $e^{i(k-1)\delta}$ representa o fator de fase associado à diferença de caminho óptico percorrida pelo feixe subsequente, ou seja, é a defasagem acumulada devido ao percurso adicional do feixe refletido. E_0 é o campo eletromagnético incidido na primeira interface da cavidade, definido como:

$$E_0 = E_0 e^{-i\omega t} \quad (2)$$

e a diferença de fase δ , de acordo com Born (1999), pode ser definida pela equação:

$$\delta = \frac{4\pi n_2 \cdot L \cos\theta}{\lambda_0} \quad (3)$$

sendo $\cos\theta = 1$ considerando que a incidência da luz seja normal ao plano da cavidade. Expandindo os termos da somatória, obtém-se uma série geométrica infinita:

$$E_t = \sum_{k=1} E_k = E_0 \tau \tau' \rho' + E_0 \tau \tau' \rho'^2 e^{i\delta} + E_0 \tau \tau' \rho'^4 e^{i2\delta} + \dots$$

Percebe-se que, essa é uma série geométrica do tipo: $S = 1 + x + x^2 + x^4 + \dots$ que converge para $\frac{1}{1-x}$. Para essa série, a razão comum é $x = \rho'^2 e^{i\delta}$, e a solução para o campo transmitido é:

$$E_t = E_0 \tau \tau' \cdot \frac{1}{1 - \rho'^2 e^{i\delta}} \quad (4)$$

A Equação 4 descreve o campo elétrico resultante da interferência na transmissão. Segundo o princípio da reversibilidade da luz, se não há perda de energia, os coeficientes de reflexão ρ e ρ' (coeficientes de reflexão do meio externo para o interno e interno para externo) devem ter a mesma magnitude, mas sinais opostos. Sabendo que $\tau \tau'$ representa o produto dos coeficientes de transmissão de entrada e saída da cavidade, esse produto representa a fração de energia que consegue atravessar as interfaces, e pela conservação de energia, tudo o que

não é refletido, deve ser transmitido, assumindo que não há absorção no material, pode-se escrever agora $\tau\tau' = 1 - \rho'^2 = 1 - R$ e $\rho = -\rho'$, logo $\rho'^2 = \rho^2 = R$ e escrever também o campo transmitido em função dos novos coeficientes:

$$E(\delta) = \frac{E_0(1-R)}{1-Re^{i\delta}} \quad (5)$$

A Equação 5 representa a amplitude do campo elétrico transmitido. Como a intensidade da luz I é proporcional ao quadrado do módulo do campo elétrico $I \propto |E|^2$, a distribuição de intensidade transmitida pela cavidade é obtida multiplicando-se $E(\delta)$ pelo seu complexo conjugado $E^*(\delta)$, então:

$$I(\delta) = \frac{E_0^2(1-R)}{(1-Re^{i\delta})(1-Re^{-i\delta})} \quad (6)$$

$$I(\delta) = \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (7)$$

A Equação 7 é conhecida como Função de Airy que pode ser escrita em termos da finesse, definida por $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$, que mede o contraste do padrão de interferência quantificando a diferença relativa entre as intensidades máxima e mínima das franjas e isso define a qualidade da cavidade de Fabry-Perot. Tem-se então:

$$I(\delta) = \frac{I_0}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (8)$$

onde a interferência será construtiva quando $\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 0$, ou seja, $\delta = 2n\pi$ e $I_{\text{máx}}(\delta) = I_0$.

E a interferência será destrutiva quando: $\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 1$, ou seja, $\delta = (2n + 1)\pi$ e

$I_{\text{min}}(\delta) = \frac{I_0}{1+F}$. A função de Airy, pode ainda ser escrita em função da frequência fazendo a

alteração na diferença de fase que depende do comprimento de onda λ_0 e sabendo que $\lambda_0 = \frac{v}{c}$

. Então a equação 8 agora será descrita como:

$$I(\delta) = \frac{I_0}{1 + F \sin^2\left(\frac{4\pi v L}{2c}\right)} \quad (9)$$

Nesta nova formulação, fixando-se o comprimento L da cavidade, observa-se que a intensidade I se torna uma função da frequência v . A finesse pode ser definida em parâmetro da distância entre dois picos consecutivos e da largura de um desses dois picos ilustrados na figura 5.2, sendo escrita então na forma:

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta v}{\delta v} \sqrt{F} \quad (10)$$

Assim, é possível traçar o gráfico da resposta espectral da cavidade no domínio da frequência.

Por fim, um parâmetro importante e fundamental na caracterização do FPI é a Largura do Espectro Livre (*Free Spectral Range* - FSR). Este parâmetro representa a separação espectral entre dois picos consecutivos de ressonância e pode ser derivado diretamente da condição de fase apresentada anteriormente, considerando uma variação de fase de 2π entre modos adjacentes (m).

$$\frac{4\pi n\nu L}{c} = m2\pi \quad (11)$$

$$\nu = \frac{mc}{2nL} \quad (12)$$

sendo o FSR a diferença entre um modo $m + 1$ e m , então pode-se escrever que:

$$FSR = \nu_{m+1} - \nu_m \quad (13)$$

$$FSR = (m + 1)\frac{c}{2nL} - m\frac{c}{2nL} \quad (14)$$

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (15)$$

Esta expressão diz que o FSR é inversamente proporcional ao comprimento da cavidade L , ou seja, quanto maior o comprimento L , menor será o intervalo espectral livre entre as ressonâncias.

Desde a sua concepção por Fabry e Perot em 1899, o interferômetro estabeleceu-se como a ferramenta definitiva para a espectroscopia de ultra resolução, permitindo avanços sem precedentes na metrologia e na compreensão da estrutura fina atômica (Vaughan, 1989). Desde o início, Fabry e Perot defenderam o uso do interferômetro para medições de precisão, o trabalho inicial focou-se na medição precisa de pequenas espessuras de ar e na comparação de comprimentos de onda. Uma das primeiras aplicações práticas, segundo Vaughan (1989), foi a determinação do tamanho de um cubo de quartzo e, subsequentemente, a determinação da massa de um decímetro cúbico de água, num trabalho realizado em colaboração com Macé de Lépinay. Embora não tenha sido instantânea, a aceitação do interferômetro de Fabry-Perot foi consolidada pela sua excelência técnica disruptiva e pela adoção estratégica por instituições de metrologia, superando as limitações dos instrumentos predecessores.

A transição do FPI das bancadas ópticas macroscópicas para a integração com guias de onda representou um marco evolutivo, permitindo a miniaturização de sistemas de ultra-resolução. Enquanto os modelos pioneiros de 1899 dependiam de placas de vidro milimetricamente alinhadas em suportes mecânicos complexos, a tecnologia contemporânea viabiliza a construção de microcavidades diretamente na face terminal de fibras ópticas.

Fisicamente, o princípio permanece fiel à distribuição de Airy: a luz sofre múltiplas reflexões internas em uma cavidade de comprimento L onde a interferência construtiva ocorre apenas para comprimentos de onda que satisfazem a condição de ressonância do dispositivo (Vaughan, 1989).

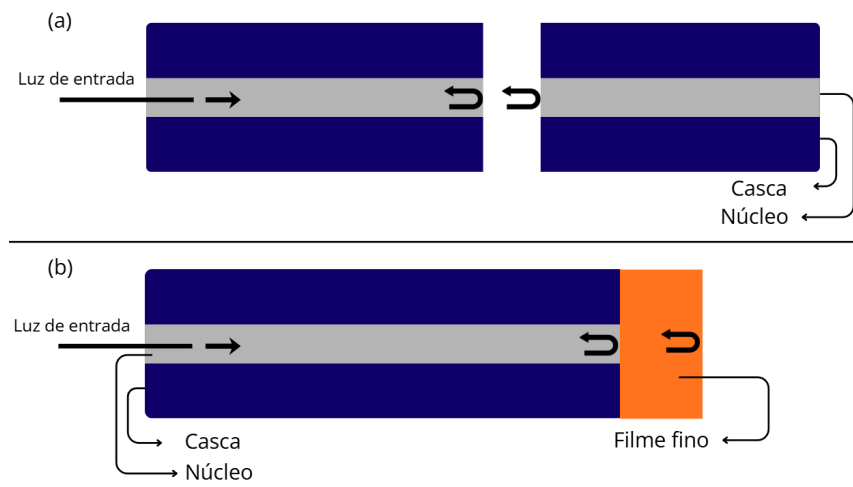
Historicamente, o FPI consolidou-se em aplicações de metrologia de precisão e estudos astrofísicos, como a análise de nebulosas e o deslocamento de raios solares, superando a capacidade de resolução de redes de difração da época (VAUGHAN, 1989). Atualmente, essa versatilidade expandiu-se para o sensoriamento bioquímico e ambiental, utilizando materiais transdutores para converter grandezas físicas em deslocamentos espectrais. Um exemplo proeminente é o desenvolvimento de sensores de umidade relativa, nos quais o uso de fibras de núcleo oco (hollow core fibers) fusionadas a fibras monomodo permite a criação de cavidades robustas, onde o elemento sensor é uma película de material higroscópico, como a gelatina (ZHONG *et al.*, 2022). Nesses dispositivos, a absorção de moléculas de água altera a espessura do filme depositado, modulando diretamente o comprimento da cavidade óptica do FPI. Consequentemente, a medição da umidade é realizada através do monitoramento do deslocamento do comprimento de onda das franjas de interferência, oferecendo tempos de resposta rápidos e alta estabilidade à temperatura ambiente (ZHONG *et al.*, 2022). Essa evolução para sistemas de microcavidades em fibra, aliada a arquiteturas híbridas como a integração com sensores MMI, permite que assinaturas ópticas de banda larga sejam refinadas por picos estreitos, facilitando a identificação de variações infinitesimais em ambientes industriais e científicos complexos.

A robustez teórica apresentada até aqui fornece o embasamento necessário para prever a sensibilidade e a faixa dinâmica do FPI em função de seus parâmetros geométricos e ópticos. Contudo, a transição da teoria para a instrumentação prática exige um controle rigoroso dos processos de fabricação e alinhamento. A seguir, serão detalhados os procedimentos experimentais utilizados para a construção dessas cavidades, desde o ajuste micrométrico de fibras até a deposição controlada de soluções para a formação de filmes finos poliméricos.

3 Metodologia

A metodologia adotada fundamenta-se em uma abordagem quantitativa, voltada à caracterização experimental do FPI em fibra óptica. O estudo concentra-se na análise do comportamento espectral e na resposta do dispositivo frente a variações controladas. Para o experimento, foram utilizados os seguintes itens e equipamentos: Duas Fibras ópticas monomodo, alicate decapador, clivador Fitel, Máquina de Emenda por fusão Fitel S179+, Interrogador BraggMETER FS22DI. Neste trabalho, foram implementadas e analisadas duas arquiteturas distintas de EFPI. A primeira se baseou em uma cavidade do tipo *air gap*, visando controlar o comprimento de onda das franjas de interferência da resposta espectral. A segunda configuração se baseou em uma cavidade preenchida por um filme fino polimérico, depositado com o intuito de fixar o número de franjas de interferência. A Figura 3.1 (a) mostra a configuração do tipo *air gap*, e a Figura 3.1 (b) mostra a configuração do tipo filme fino:

Figura 3.1 - Esquema do EFPI em fibra óptica com cavidade *air-gap* e cavidade de filme fino.



Fonte: Do autor (2026).

A configuração mostrada no diagrama da Figura 3.1 (a), foi montada utilizando-se o sistema de alinhamento no modo manual de uma máquina de emenda por fusão da marca Fitel modelo S179+, que serviu como plataforma para o posicionamento e alinhamento das fibras. A preparação das fibras ópticas ocorreram da seguinte forma: primeiramente foram removidas as capas de duas fibras ópticas em suas extremidades ao longo de aproximadamente 10cm do seu comprimento e em seguida as fibras foram clivadas em um clivador da marca fitel para garantir que as duas extremidades ficassem perfeitamente paralelas umas às outras. Após isso, as fibras foram cuidadosamente colocadas na máquina de emenda de forma a garantir que elas

não sofressem qualquer tipo de impacto. A Figura 3.2 mostra as fibras ópticas através do microscópio da máquina de emendas.

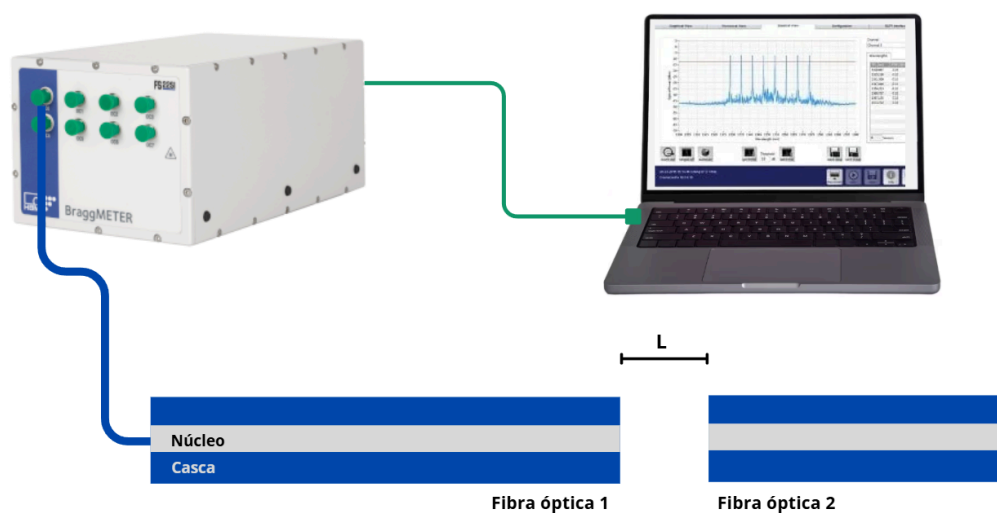
Figura 3.2 - Cavity Fabry-Perot na Máquina de emendas Fitel S179+.



Fonte: Do autor (2024).

Para a obtenção dos espectros foi utilizado o equipamento interrogador óptico da marca BraggMETER modelo FS22DI e o esquema da montagem da configuração está ilustrado na figura abaixo:

Figura 3.3 - Esquema de montagem experimental do FPI com cavidade de ar.



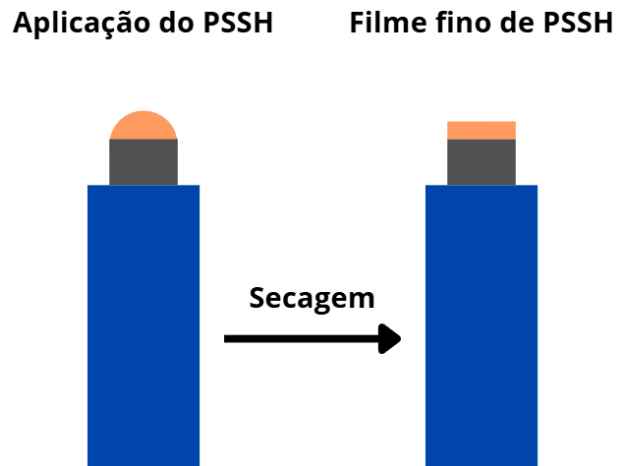
Fonte: Do autor (2026).

A Figura 3.3 apresenta o esquema experimental para a caracterização do FPI. O arranjo utiliza o interrogador óptico conectado a duas fibras ópticas monomodo. O detalhe em destaque ilustra a visualização das fibras no interior da máquina de emenda por fusão, onde o

parâmetro L representa a microcavidade de ar formada entre as faces clivadas, constituindo o interferômetro. A cavidade ressonante, preenchida por ar, foi formada pelo espaçamento entre as faces de duas fibras ópticas monomodo (SMF). Nesta configuração, as duas faces da fibra atuam como espelhos de baixa refletividade devido à reflexão de Fresnel que ocorre na interface sílica-ar. O alinhamento preciso das fibras, feito no modo manual da máquina de emendas, tanto no eixo axial quanto no angular, foi uma etapa fundamental para assegurar o paralelismo entre as faces refletoras. Esta condição é essencial para a obtenção de um padrão de interferência de alta visibilidade. Para a caracterização do interferômetro, foi realizado um estudo da sua resposta espectral em função do comprimento da cavidade (L). O espaçamento entre as fibras foi variado da seguinte forma: As duas fibras foram aproximadas até o encontro de suas superfícies na máquina de emendas no modo manual e em seguida foram separadas de forma a conhecer a distância de separação através da própria interface da máquina de emendas que permite transladar a fibra com distâncias de no mínimo $5\mu\text{m}$. Após isso, foram medidos, uma vez para cada L , os espectros de interferência para comprimentos de cavidade de $30\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $65\mu\text{m}$, $90\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $115\mu\text{m}$, $130\mu\text{m}$, $145\mu\text{m}$, $160\mu\text{m}$ e $175\mu\text{m}$. Esta variação permitiu a observação direta do efeito do comprimento da cavidade no padrão de franjas, especificamente na alteração do FSR.

Para a segunda configuração, foi implementada uma cavidade baseada em um filme fino polimérico de PSSH depositado na face terminal de uma fibra óptica, como ilustrado na Figura 3.4:

Figura 3.4 - Filme fino de PSSH sendo aplicado na fibra óptica.



Fonte: Do autor (2024).

O processo de preparação consistiu no acoplamento da fibra a um conector óptico para proteger a estrutura clivada da fibra óptica, seguido da deposição controlada de uma gota da solução de PSSH utilizando uma pipeta graduada. Para garantir a formação do filme com camadas uniformes, respeitou-se um intervalo de 48 horas para a secagem e consolidação do filme. A Figura 3.5 ilustra a extremidade da fibra inserida no conector após a deposição do polímero.

Figura 3.5 - Fibra óptica acoplada em um conector com filme fino de PSSH aplicado na extremidade.

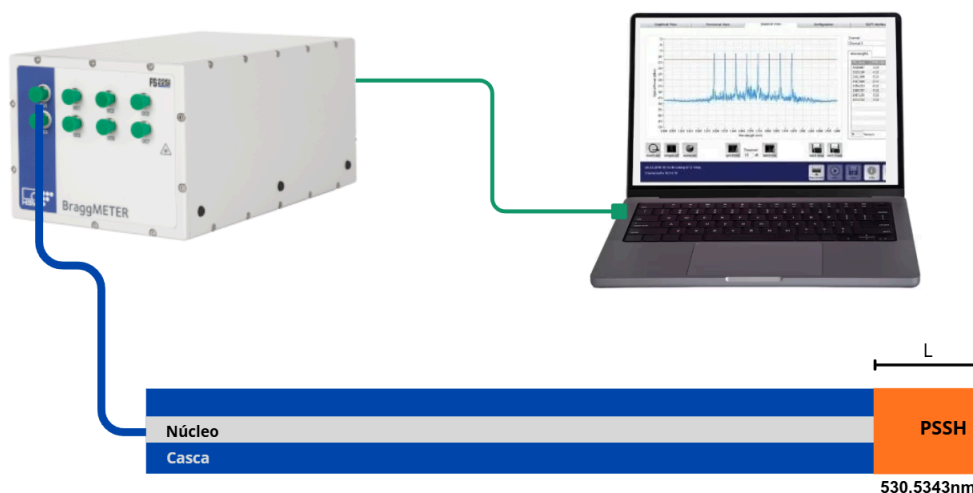


Fonte: Do autor (2024).

A montagem experimental assemelha-se à da Figura 3.6, com a particularidade de que a cavidade Fabry-Perot é definida pela espessura do filme depositado. Previamente à fase de

caracterização, respeitou-se um intervalo de 48 horas para a secagem do polímero, visando a uniformidade da interface óptica.

Figura 3.6 - Diagrama de montagem do FPI com filme fino.

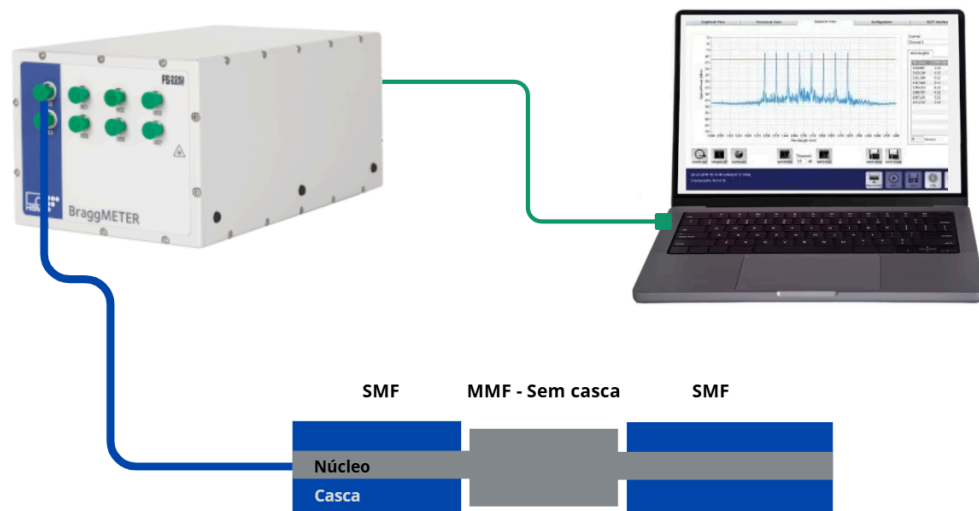


Fonte: Do autor (2026).

A Figura 3.4 ilustra o arranjo experimental para a caracterização do sensor de fibra óptica com cavidade Fabry-Perot baseada em filme fino. O sistema é composto pelo mesmo interrogador óptico conectado a uma fibra monomodo, em cuja extremidade foi depositado um filme de PSSH. O reagente poli(4 estireno sulfônico) na forma ácida (PSSH), fornecido pela Sigma ALdrich (CAS 28210 41 5) consiste de uma solução com concentração 18wt. % em H₂O, com peso molecular MW~75.000 e índice de refração $n_{20/D}=1,3718$ e pH=1,55 a 25°C. Esta solução apresenta uma boa capacidade de formar filmes finos estáveis e é frequentemente utilizado em compósitos com materiais condutores ou sensíveis para o desenvolvimento de sensores ópticos.

Após a caracterização individual do Interferômetro de Fabry-Perot (FPI), este foi integrado a um sensor de índice de refração baseado em Interferência de Modos Múltiplos (MMI), previamente desenvolvido em configuração SMS (*Single-mode — Multimode — Single-mode*) em parceria com outro aluno de mestrado em física da Universidade Federal de Lavras, cujo diagrama está representado na Figura 3.7. Para a construção deste sensor, foi utilizada uma fibra sem núcleo (*No-Core Fiber* - NCF) com diâmetro de $(80 \pm 1)\mu\text{m}$ e comprimento de $(25,0 \pm 0,5)\text{mm}$. A resposta base do sensor MMI foi estabelecida por meio do sensoriamento de soluções binárias de água e glicerina, com concentrações variando de 0% a 40%.

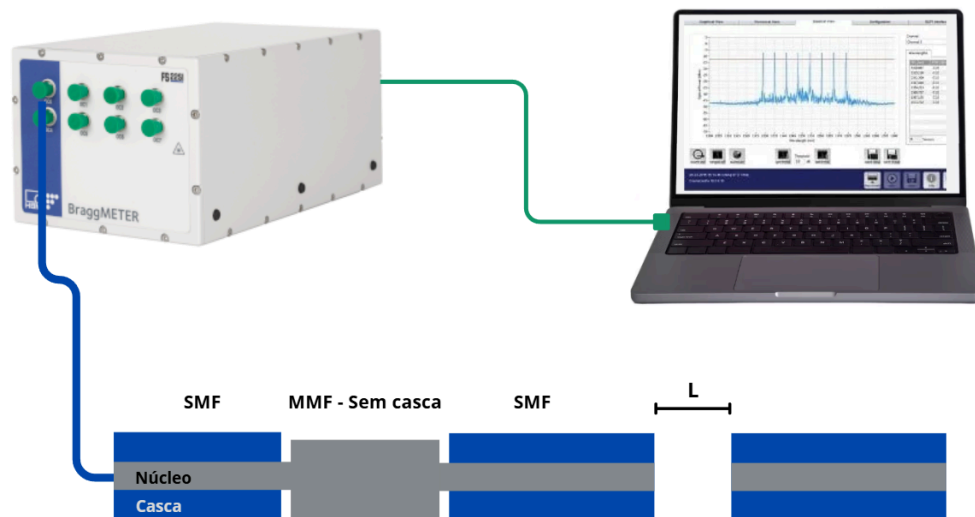
Figura 3.7 - Diagrama de montagem do sensor de índice de refração baseado em MMI.



Fonte: Do autor (2026).

Subsequentemente, realizou-se a hibridização do sistema com um FPI de cavidade de ar, com o intuito de investigar a modulação do espectro combinado, representado no diagrama da Figura 3.8.

Figura 3.8 - Diagrama da hibridização do sensor MMI com FPI com cavidade de ar.



Fonte: Do autor (2026).

Para tanto, o comprimento da microcavidade ressonante foi transladado na máquina de emendas de $100\mu\text{m}$ a $350\mu\text{m}$, em incrementos de $50\mu\text{m}$, evidenciando que o envelope espectral resultante é funcionalmente dependente da dimensão da cavidade. Na etapa final, o

dispositivo foi configurado com um FPI composto por um filme fino polimérico de PSSH, demonstrado no diagrama da Figura 3.9.

Figura 3.9 - Diagrama da hibridização do sensor MMI com FPI com filme fino.



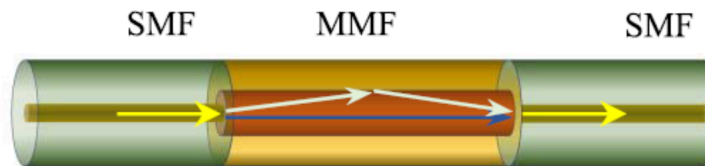
Fonte: Do autor (2026).

Nesta arquitetura, a sensibilidade do sensor híbrido foi avaliada frente às variações de concentração de glicerina, visando otimizar a capacidade de detecção das assinaturas espectrais e a identificação precisa dos deslocamentos espectrais correspondentes.

4 Interferômetro de Fabry-Perot acoplado a um sensor baseado em interferência multimodal

Dentre os sensores de fibra óptica, os sensores baseados em interferência multimodal (MMI) têm se destacado na literatura recente devido à sua robustez e versatilidade (Oliveira *et al.*, 2016). A arquitetura SMS (Singlemode-Multimode-Singlemode) é uma heteroestrutura óptica composta por um segmento de fibra multimodo (MMF) fusionado entre duas fibras monomodo (SMF), e essa configuração consolidou-se pela eficiência de sua arquitetura minimalista, que alia facilidade de implementação a uma alta sensibilidade no monitoramento de perturbações ambientais. (Wu *et al.*, 2020). A transição entre a SMF e a MMF marca o início do processo de interferência.

Figura 4.1 - Diagrama de estrutura SMS.



Fonte: Adaptado de Wang, Q., *et al.* (2008).

Quando o campo fundamental LP_{01} da SMF encontra a interface da MMF, a descontinuidade geométrica e o descasamento de campo (*field mismatch*) forçam a redistribuição da energia. O seu funcionamento baseia-se em MMI, especificamente no fenômeno de *self-imaging*, que dita a reprodução periódica do perfil do campo eletromagnético à medida que este se propaga pelo guia de onda multimodo. A formalização analítica deste mecanismo foi estabelecida por Soldano e Bachmann (1995), cujos estudos sintetizaram os avanços da fotônica do início da década de 1990, tornando-se a referência basilar para o design de acopladores e sensores contemporâneos. De acordo com a perspectiva de Bellini, Werneck e Allil (2024), o trabalho de Soldano vai além da descrição fenomenológica, provendo o rigor matemático necessário para modelar a interferência entre modos de ordem superior.

A consolidação teórica de Soldano e Bachmann (1995) permite prever com precisão o comprimento da seção da MMF necessária para a ocorrência da *self-image*. A distância de batimento entre os dois modos de menor ordem é definida por:

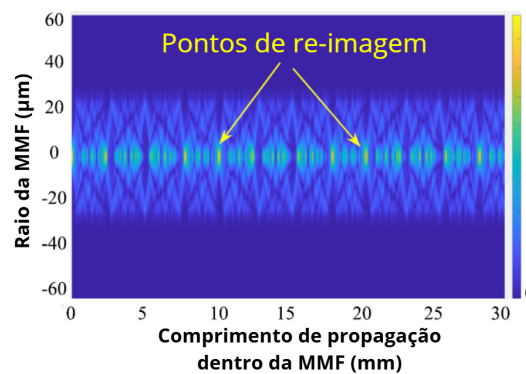
$$Z_{SI} = \frac{4n_{core} D_{core}^2}{\lambda_0} \quad (16)$$

com p sendo um número inteiro. Para sensores práticos, o comprimento é ajustado para que o

pico do envelope espectral caia dentro da janela de operação do interrogador óptico utilizado. Perturbações sutis no índice de refração do meio externo podem resultar em deslocamentos espectrais menores do que a largura de banda do próprio pico. Dessa forma, a variação da grandeza física acaba sendo quase imperceptível pela baixa seletividade do envelope MMI, impedindo o sistema de discernir alterações infinitesimais no meio sensor. O fato da variação do índice de refração alterar o raio efetivo W_{eff} através do campo evanescente, deslocando o ponto de re-imagem e, conseqüentemente, o espectro de transmissão.

Soldano e Bachmann (1995) explicam como guias de onda que suportam múltiplos modos de luz podem reproduzir imagens de um campo de entrada em intervalos periódicos, permitindo o desenvolvimento de acopladores e divisores de sinal altamente eficientes. O princípio de *self-imaging* é uma propriedade óptica que ocorre em guias de onda largos o suficiente para suportar múltiplos modos de luz, ou seja, em fibras multimodo. Em uma estrutura SMS, a seção de fibra multimodo funciona como o elemento sensor. De acordo com Wu (2021), a configuração geométrica da seção multimodo é determinante para a resposta espectral do sensor. Quando o guia de onda monomodo atinge um campo fundamental no núcleo MMF, ocorre um descasamento de campo, chamado de *field mismatch*. Como o diâmetro do núcleo da MMF é significativamente maior, a energia é redistribuída entre vários modos de ordem superior radialmente simétricos. O fenômeno pode ser visualizado através de simulações da propagação da intensidade luminosa ao longo do guia de onda (Wang Q., *et al.* 2021), como ilustrado na Figura 4.2. Nesta representação, observa-se a evolução do campo elétrico à medida que este percorre o segmento de fibra multimodo (MMF).

Figura 4.2 - Simulação computacional do fenômeno de re-imagem.



Fonte: Adaptado de Wang, Q., *et al.* (2021).

Observa-se na Figura 4.2, um padrão complexo de interferência modal, onde as setas indicam os pontos específicos de autoimagem, que ocorrem em aproximadamente em 10 mm e 20

mm. Nestas regiões, a interferência entre os múltiplos modos excitados torna-se construtiva, replicando com máxima fidelidade o perfil do campo óptico de entrada. A escala de intensidade normalizada demonstra que a concentração de energia no núcleo é periódica, validando a necessidade de um ajuste preciso no comprimento da fibra para otimizar tanto a transmissão quanto a sensibilidade do dispositivo frente a variações do meio externo. O ponto crucial para o sensoramento é que, em comprimentos específicos da fibra multimodo, a interferência entre todos os modos excitados torna-se construtiva, reproduzindo uma imagem do campo de entrada. O comprimento de onda para o qual essa re-imagem ocorre com máxima eficiência é o pico observado no espectro de transmissão. A distância de autoimagem é intrinsecamente ligada ao índice de refração efetivo dos modos. Qualquer alteração no ambiente externo afeta o campo elétrico que se estende para fora do núcleo, alterando o índice de refração, obtém-se um deslocamento da posição espectral do pico de autoimagem.

A eficácia do sensor SMS reside na sensibilidade das constantes de propagação modal ao índice de refração externo, característica potencializada pelo uso de fibras sem casca (*no-core fibers*). Entretanto, a resolução espectral desta arquitetura é frequentemente limitada pela expressiva largura de banda dos picos multimodais, o que dificulta a detecção de variações infinitesimais. Para superar essa limitação, este trabalho propõe uma configuração híbrida que integra o mecanismo de *self-imaging* a uma cavidade de Fabry-Pérot. Esta arquitetura combina distintos fenômenos de interferência para viabilizar a medição ultrasensível do índice de refração, evoluindo a partir das abordagens em cascata discutidas na primeira seção para otimização de sensores de umidade. A limitação de resolução mencionada anteriormente ocorre porque o envelope MMI é inerentemente largo devido à superposição de poucos modos dominantes. Ao introduzir o FPI, seja por *air-gap* ou por filme fino polimérico, sobrepõe-se um fenômeno de interferência de múltiplos feixes. Enquanto o sensor MMI responde por uma variação de fase lenta no domínio espectral, o FPI responde com oscilações rápidas. O FPI constitui uma solução robusta e compacta para mitigar as limitações de resolução inerentes aos espectros de banda larga do MMI, cujo perfil espectral dificulta a identificação precisa do centro do pico em processos de varredura. Ao atuar como um refinador sintonizável, o FPI pode ser acoplado em série, como no caso do presente trabalho, ou integrado intrinsecamente à fibra para gerar um padrão de franjas característico. Quando estas oscilações estreitas se sobrepõem ao envelope largo do sensor MMI, cria-se uma assinatura espectral híbrida de alto desempenho. A hibridização não apenas melhora a resolução, mas também oferece um mecanismo de autocompensação. Em ambientes

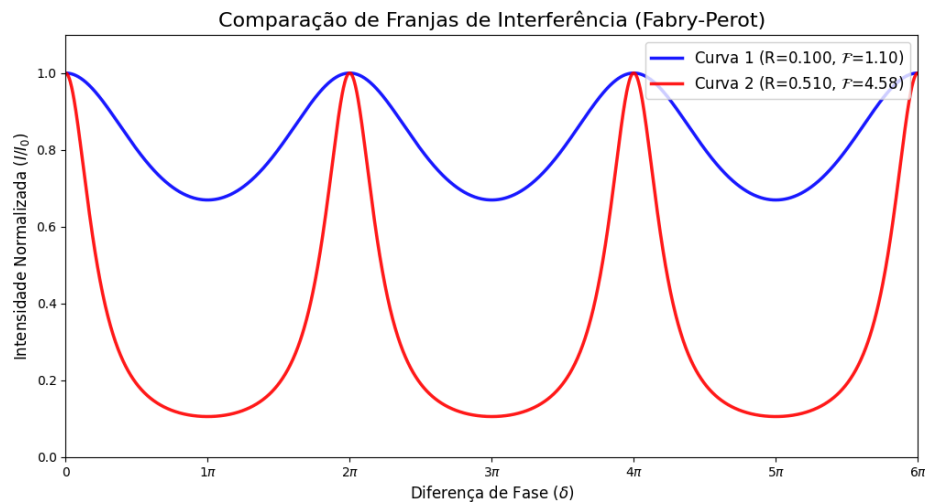
industriais, onde flutuações de potência da fonte laser são comuns, a análise baseada na frequência espacial (via Transformada de Fourier) permite separar o ruído da fonte da informação sensorial. A alta frequência das franjas do FPI facilita a filtragem digital, garantindo que variações infinitesimais no índice de refração sejam discerníveis mesmo em condições de baixa relação sinal-ruído.

Esta abordagem de hibridização, que combina a robustez da estrutura SMS com a precisão do FPI, foi detalhada e submetida para publicação, podendo ser consultada através do seguinte link: <https://arxiv.org/abs/2512.06305>.

5 Resultados

Nesta seção, os resultados obtidos na caracterização do FPI são detalhados e analisados de acordo com os modelos teóricos pertinentes. O estudo abrange tanto a configuração de cavidade extrínseca por ar quanto a configuração com o polímero PSSH. Primeiramente, descreve-se a fenomenologia espectral teórica, seguida da análise dos espectros experimentais obtidos, visando validar a estabilidade e a visibilidade das franjas de interferência. Abaixo está representada a resposta espectral teórica da cavidade baseada na equação (8). Nesta análise, comparam-se duas configurações distintas onde a variação da refletividade resulta em diferentes valores de finesse.

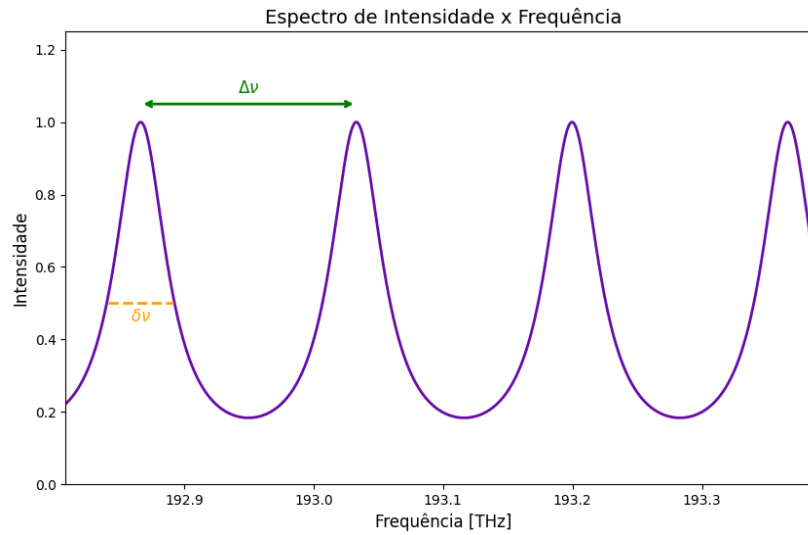
Figura 5.1 - Resposta espectral teórica do FPI para diferentes finesses.



Fonte: Do autor (2025).

Na figura 5.1, compara-se o efeito da refletividade no perfil de transmissão onde o comportamento espectral do dispositivo, caracteriza-se por um padrão periódico de franjas de interferência resultante da superposição das ondas refletidas nas interfaces da cavidade. A curva em azul ilustra o comportamento de uma cavidade com baixa refletividade (baixa finesse), resultando em picos de ressonância mais largos. Em contrapartida, a curva em vermelho representa um cenário de alta refletividade (alta finesse), caracterizado por picos mais estreitos e definidos, o que indica uma maior seletividade espectral. As curvas demonstram como o perfil de transmissão se torna mais estreito à medida que a refletividade dos espelhos aumenta. Quando se define a finesse em termos da distância entre dois picos consecutivos e da largura de um desses picos, é possível traçar o gráfico da resposta espectral da cavidade no domínio da frequência, ilustrado na figura abaixo:

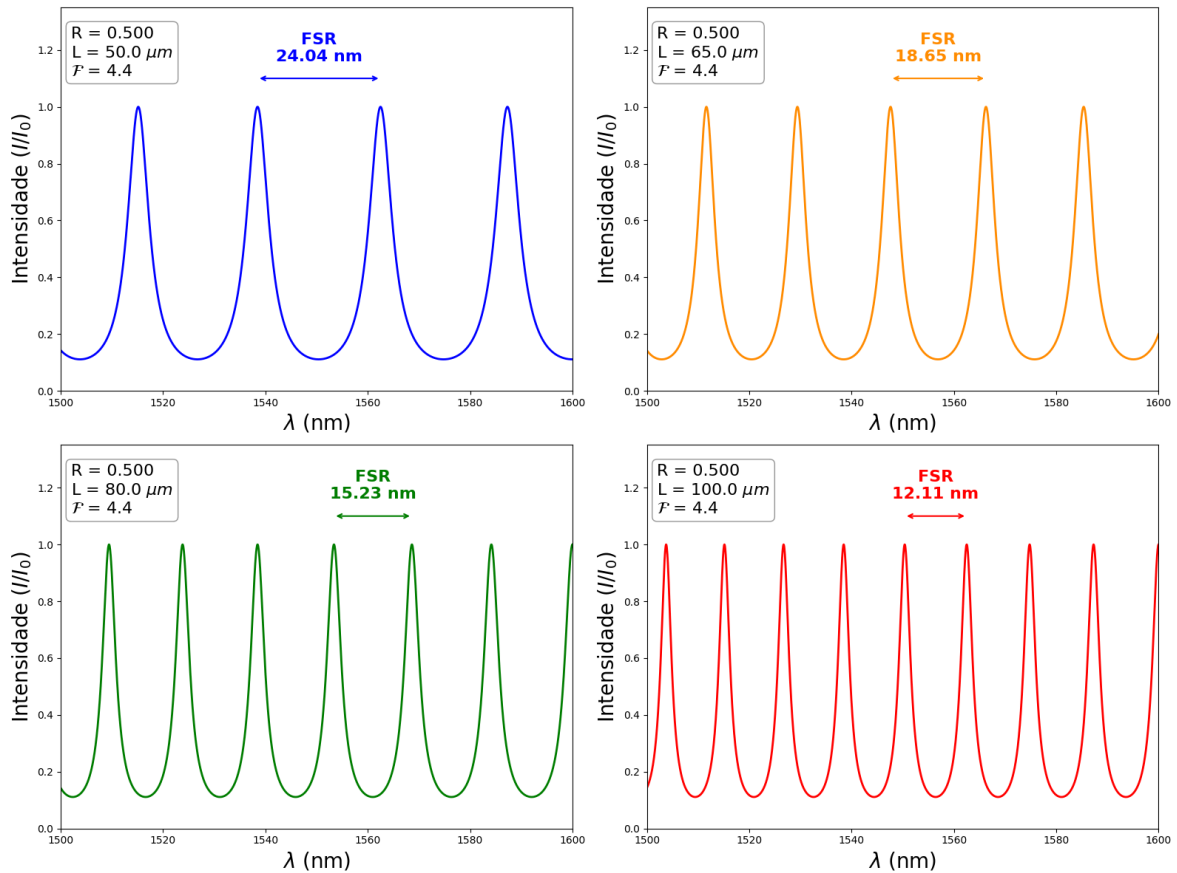
Figura 5.2 - Resposta espectral teórica do FPI em função da frequência com parâmetros da finesse.



Fonte: Do autor (2025).

A relação entre esses dois parâmetros ($\Delta\nu/\delta\nu$) define a capacidade da configuração em detectar pequenas variações ambientais, uma vez que picos mais estreitos facilitam o rastreamento preciso de deslocamentos espectrais durante a caracterização experimental. Já a Equação 15 diz que o FSR é inversamente proporcional ao comprimento da cavidade L , ou seja, quanto maior o comprimento L , menor será o intervalo espectral livre entre as ressonâncias. A representação gráfica da Equação 15 está ilustrada na Figura 5.3:

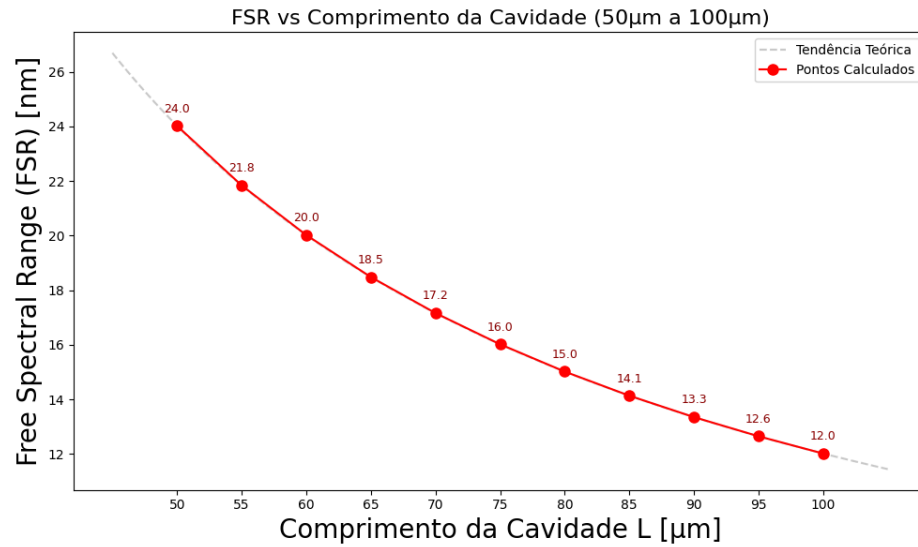
Figura 5.3 - Variação teórica do FSR em função do comprimento da cavidade.



Fonte: Do autor (2025).

A Figura 5.3 ilustra a sensibilidade do FPI em relação à variação do comprimento da cavidade. Os gráficos demonstram a relação inversa prevista teoricamente nos cálculos. À medida que o comprimento da cavidade aumenta para $65\mu\text{m}$ e posteriormente para $80\mu\text{m}$ e por fim para $100\mu\text{m}$, nota-se uma redução progressiva no espaçamento entre as franjas de interferência evidenciando que cavidades maiores acomodam uma maior densidade de modos espectrais dentro da mesma faixa de comprimento de onda. A redução progressiva do FSR pode ser observada no gráfico da figura 5.4, quando se obtém vários comprimentos de cavidade:

Figura 5.4 - Decaimento teórico do FSR em função do comprimento da cavidade.

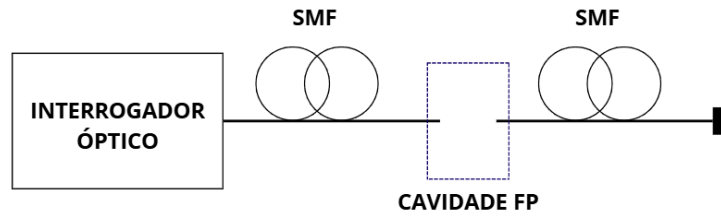


Fonte: Do autor (2025).

A figura 5.4 sintetiza o comportamento do FSR ao longo de uma faixa contínua de comprimentos de cavidade, variando de $50\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$. O gráfico evidencia o decaimento não linear, confirmando a relação inversamente proporcional prevista pela Equação (15) do FSR. Quantitativamente, observa-se que ao dobrar o comprimento da cavidade de $50\mu\text{m}$ para $100\mu\text{m}$, o FSR é reduzido pela metade.

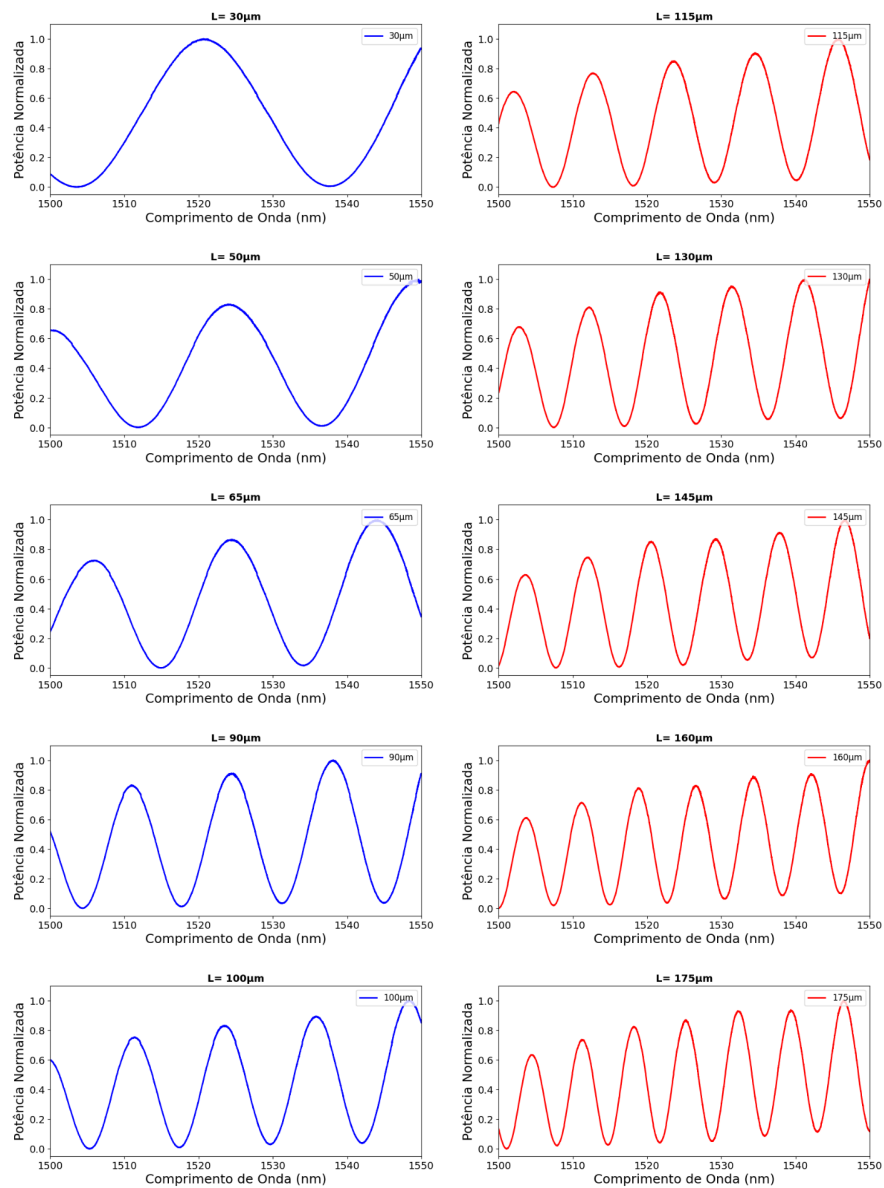
No âmbito experimental, a figura 5.5 ilustra de maneira simplificada, o setup experimental utilizado para obtenção das medidas e a Figura 5.6 ilustra a variação na frequência espacial das franjas de interferência para o FPI configurado com air-gap. Observa-se que a densidade das franjas de interferência é diretamente proporcional ao comprimento da cavidade. Dessa forma, o aumento da dimensão “L” resulta em uma redução do FSR, permitindo a detecção de um maior número de franjas em uma mesma janela espectral. O ajuste do comprimento da cavidade foi realizado de forma sistemática utilizando o sistema de micro posicionamento da máquina de emendas. Inicialmente, as interfaces das fibras foram aproximadas até o ponto de contato total, estabelecendo o referencial de distância zero. A partir desse ponto, uma das fibras foi movida no sentido oposto à outra, permitindo o controle preciso e a aferição da distância de separação para a formação da microcavidade de ar.

Figura 5.5 - Diagrama simplificado da cavidade Fabry-Perot preenchida por ar.



Fonte: Do autor (2025).

Figura 5.6 - Resposta espectral obtida da montagem experimental da cavidade Fabry-Perot ar.

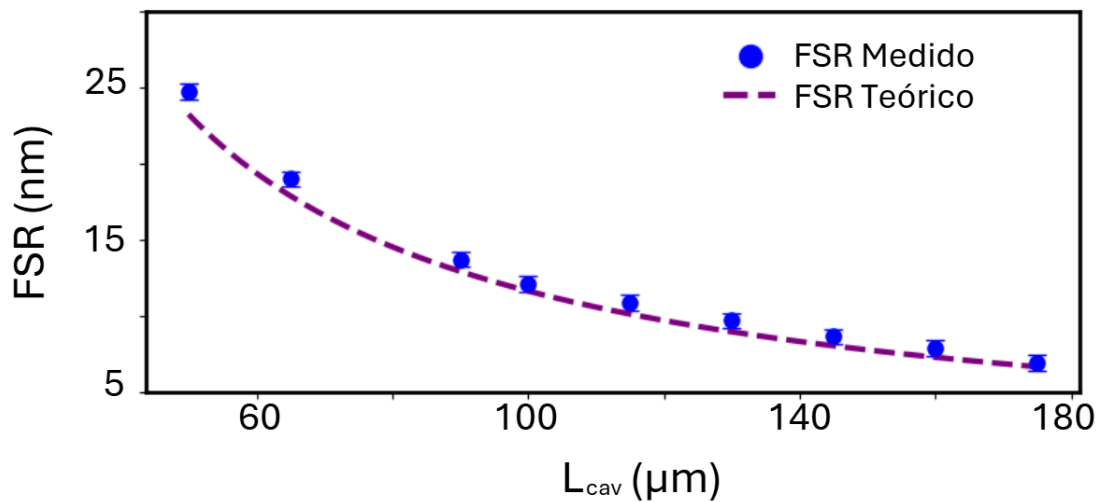


Fonte: Do autor (2025).

Cada um dos dez espectros corresponde a um FPI com um diferente comprimento de cavidade ressonante “L”, conforme indicado na legenda de cada um. Pode-se perceber que quanto

maior o comprimento da cavidade, mais frequentes são as oscilações e menor é a distância entre dois picos consecutivos, isso é explicado pela equação do FSR, demonstrada pela equação (13). Como o comprimento da cavidade está no denominador, aumentar “L” causa uma diminuição direta no espaçamento $\Delta\lambda$, ou seja, qualquer mudança no comprimento do percurso óptico causará uma mudança mensurável no espectro de interferência, e isso pode ser explorado para criar diversos tipos de sensores, como sensores de temperatura, deformação, pressão e umidade.

Figura 5.7 - Comportamento experimental do FSR em função do comprimento da cavidade FP com barras de erro.



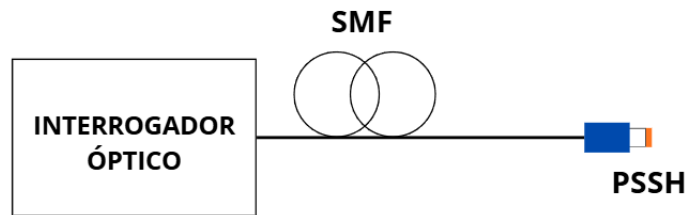
Fonte: Do autor (2025).

Da equação (15), tem-se:

$$L = \frac{\lambda^2}{2n \cdot FSR} \quad (16)$$

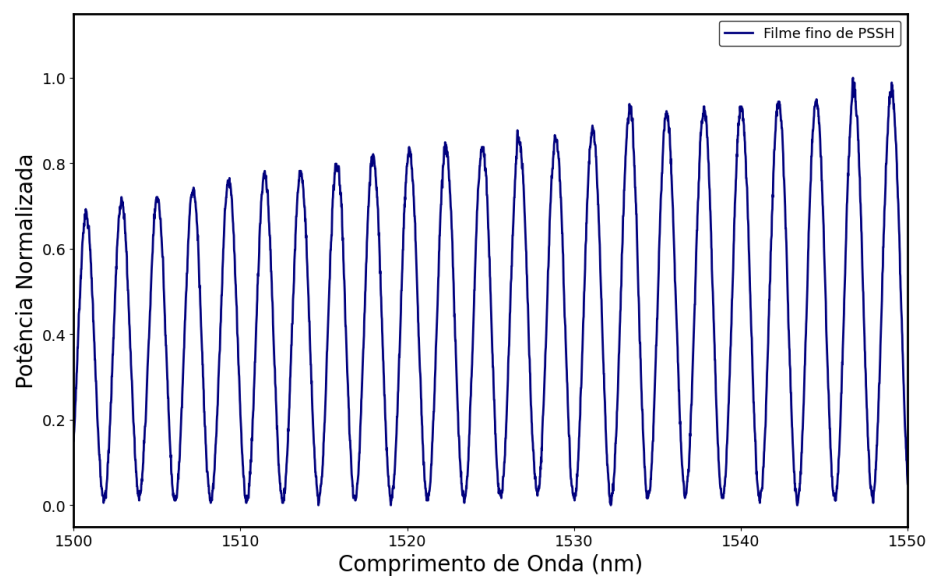
Na montagem experimental, representada de forma simplificada pela figura 5.7, o próprio filme fino passa a ser a cavidade do interferômetro. A luz que chega pela fibra é refletida uma vez na interface entre a fibra e o filme, e uma segunda vez na interface entre o filme e o ar. Este teste foi realizado 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 novo padrão de interferência gerando mais franjas de interferência, tornando a configuração com resolução ainda maior.

Figura 5.7 - Diagrama simplificado da cavidade Fabry-Perot preenchida por PSSH.



Fonte: Do autor (2025).

Figura 5.8 - Interferências FP no filme fino de PSSH.



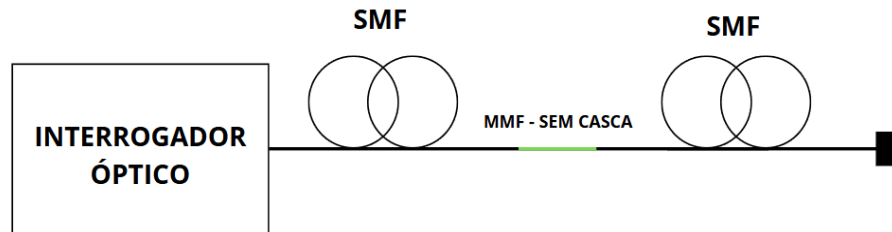
Fonte: Do autor (2024).

A partir do índice de refração dessa solução e da resposta espectral obtida, é possível estimar a espessura do filme fino através da equação do FSR. Utilizando um código de programação, disponível em apêndice, foi calculado o FSR médio do espectro de interferência, mostrado na figura acima, resultando no valor de 2.262nm , ao substituir este valor na equação do comprimento da cavidade, e utilizando o valor de $n_{20}/D=1,3718$ para o índice de refração do PSSH, obteve-se $L=387,12\mu\text{m}$.

Concluída a etapa de caracterização fundamental do FPI, onde se validou a dependência do FSR com o comprimento da cavidade e à natureza do meio, este estudo prossegue para a análise da aplicação desse dispositivo em um sensor de índice de refração baseado em interferência multimodal. Inicialmente será mostrada a resposta espectral do sensor MMI isolado para diferentes concentrações de glicerina que servirão como base comparativa para a hibridização do sistema com o FPI. Abaixo, tem-se o diagrama

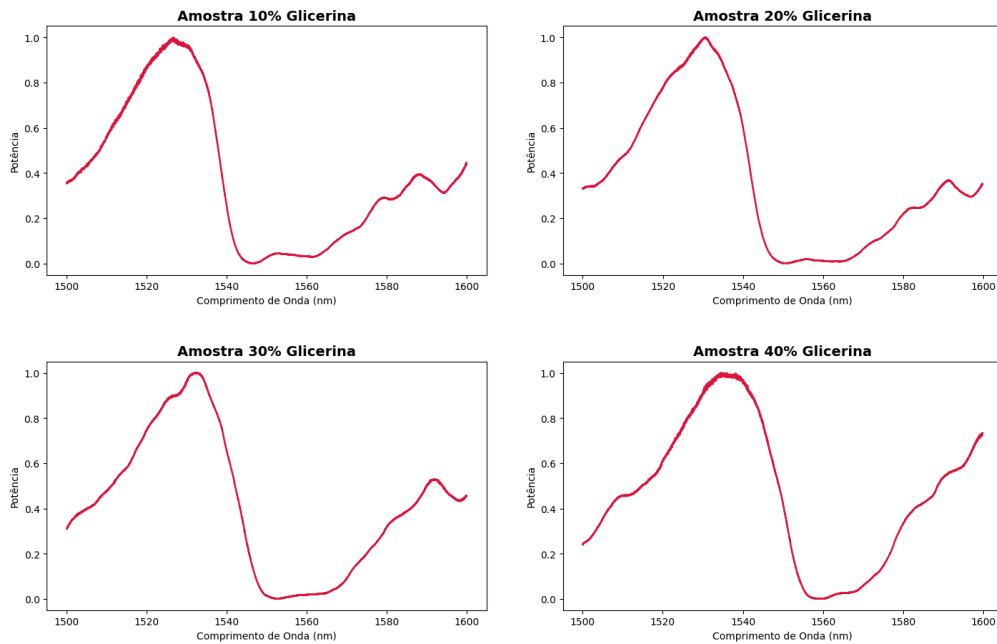
simplificado do sensor de índice de refração baseado em MMI ilustrado na figura 5.8 e os resultados obtidos para o sensor antes da hibridização do sistema são mostrados em seguida na figura 5.9.

Figura 5.8 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI.



Fonte: Do autor (2025).

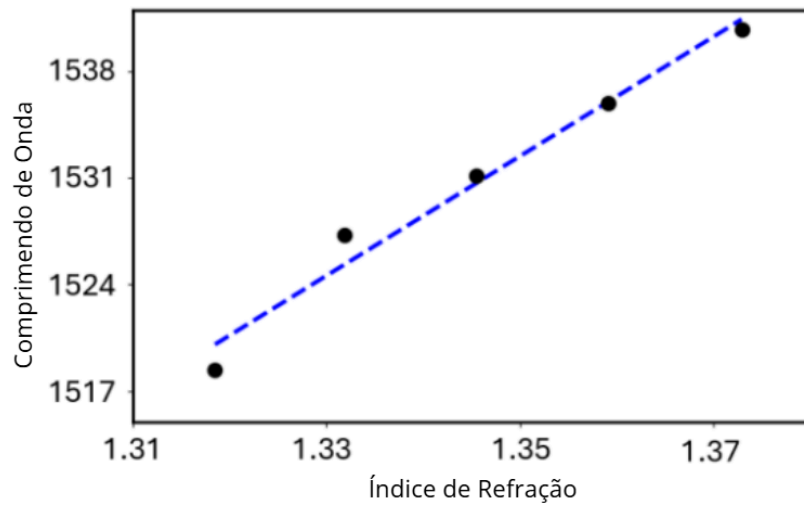
Figura 5.9 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração.



Fonte: Do autor (2026).

Este resultado descreve o comportamento do sensor de índice de refração quando submetido à soluções de água com diferentes concentrações de glicerina. Como observado na Figura 5.9 o sensor MMI apresenta um deslocamento característico em seu perfil espectral, conforme a concentração de glicerina é elevada, o pico é deslocado para regiões de maior comprimento de onda. Este comportamento valida a sensibilidade da heteroestrutura SMS a variações infinitesimais no índice de refração do meio externo. O gráfico da Figura 5.10 mostra o índice de refração por comprimento de onda das respostas espectrais do sensor MMI.

Figura 5.10 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI com o FPI PSSH.



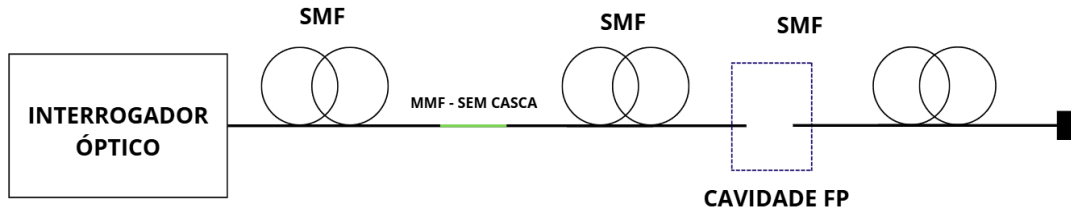
Fonte: Do autor (2025).

A disposição dos pontos experimentais mostra o quanto o pico de interferência se deslocou para comprimentos de onda mais longos à medida que o índice de refração do fluido em contato com o sensor aumenta, e isso mostra de forma mais clara, a sensibilidade do sensor para variações de tal parâmetro.

Embora o sensor MMI forneça uma resposta clara a variações de índice de refração, a precisão da leitura é limitada pela largura do seu envelope espectral. Para mitigar essa restrição, os resultados a seguir demonstram o desempenho da configuração híbrida, onde a introdução de uma cavidade de Fabry-Pérot sobrepõe franjas de alta frequência ao sinal original, permitindo um rastreamento muito mais refinado dos deslocamentos espectrais.

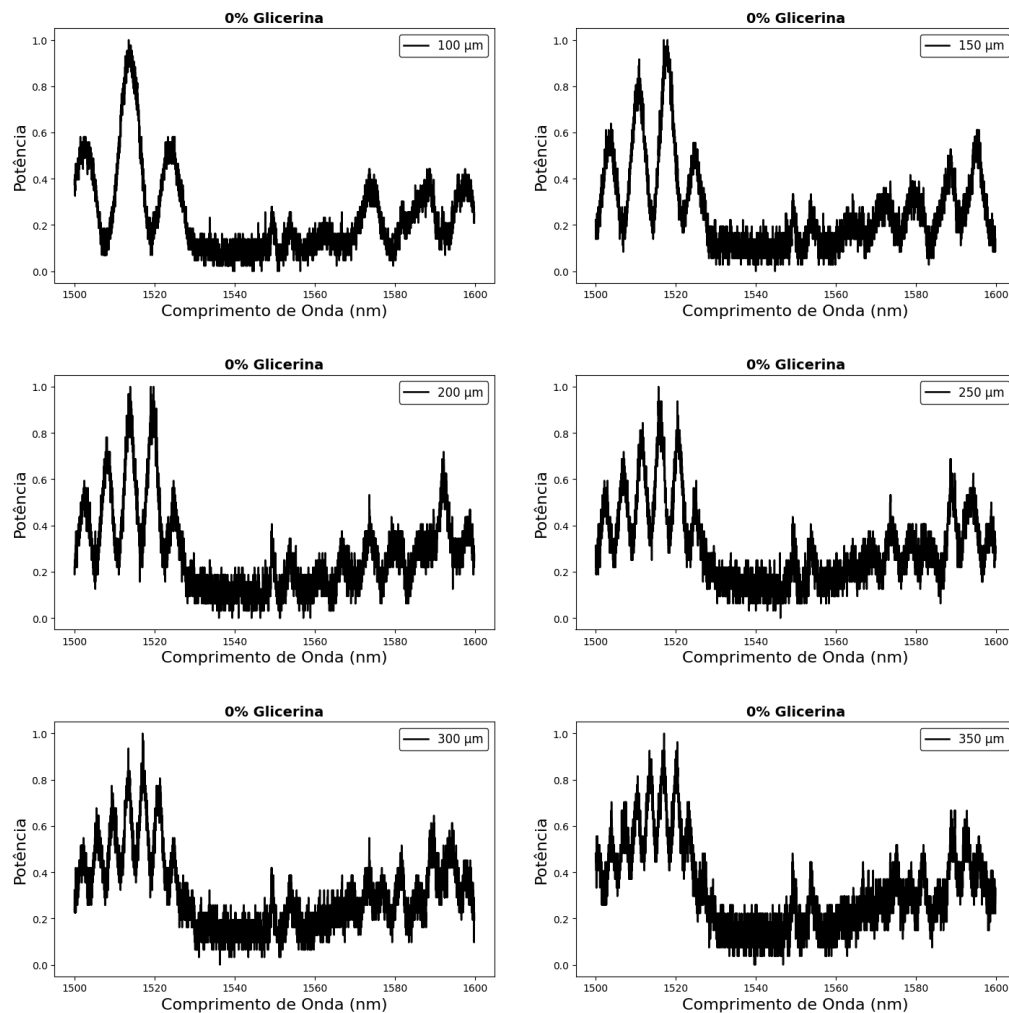
Na caracterização do sensor híbrido com *air-gap*, adotou-se um procedimento sistemático na medição para cada solução de glicerina preparada. Para cada concentração, o comprimento da cavidade Fabry-Perot foi variado progressivamente de 100 μm a 350 μm , com incrementos de 50 μm . Esta configuração é ilustrada de forma simplificada na Figura 5.10. O procedimento realizado permitiu capturar a resposta espectral do sistema em seis diferentes dimensões de cavidade para cada índice de refração, permitindo uma análise detalhada de como a modulação das franjas de interferência interage com o envelope do sensor MMI em diferentes condições.

Figura 5.11 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI com o FPI ar.



Fonte: Do autor (2025).

Figura 5.12 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.

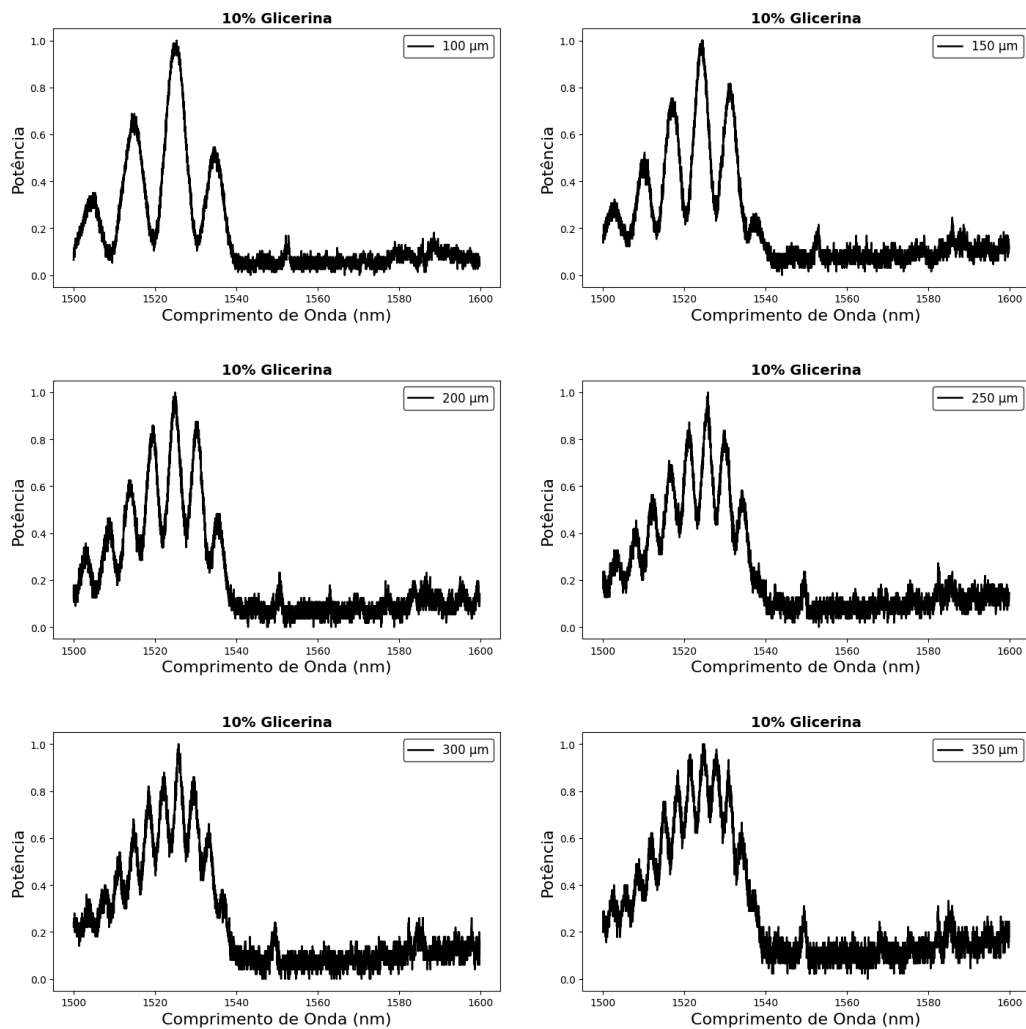


Fonte: Do autor (2026).

A Figura 5.12 ilustra a modulação do envelope do sensor MMI pela cavidade de Fabry-Pérot, com o sistema operando em meio aquoso (0% de glicerina). Observa-se que a densidade das franjas de interferência é proporcional à dimensão da cavidade ressonante: à medida que o

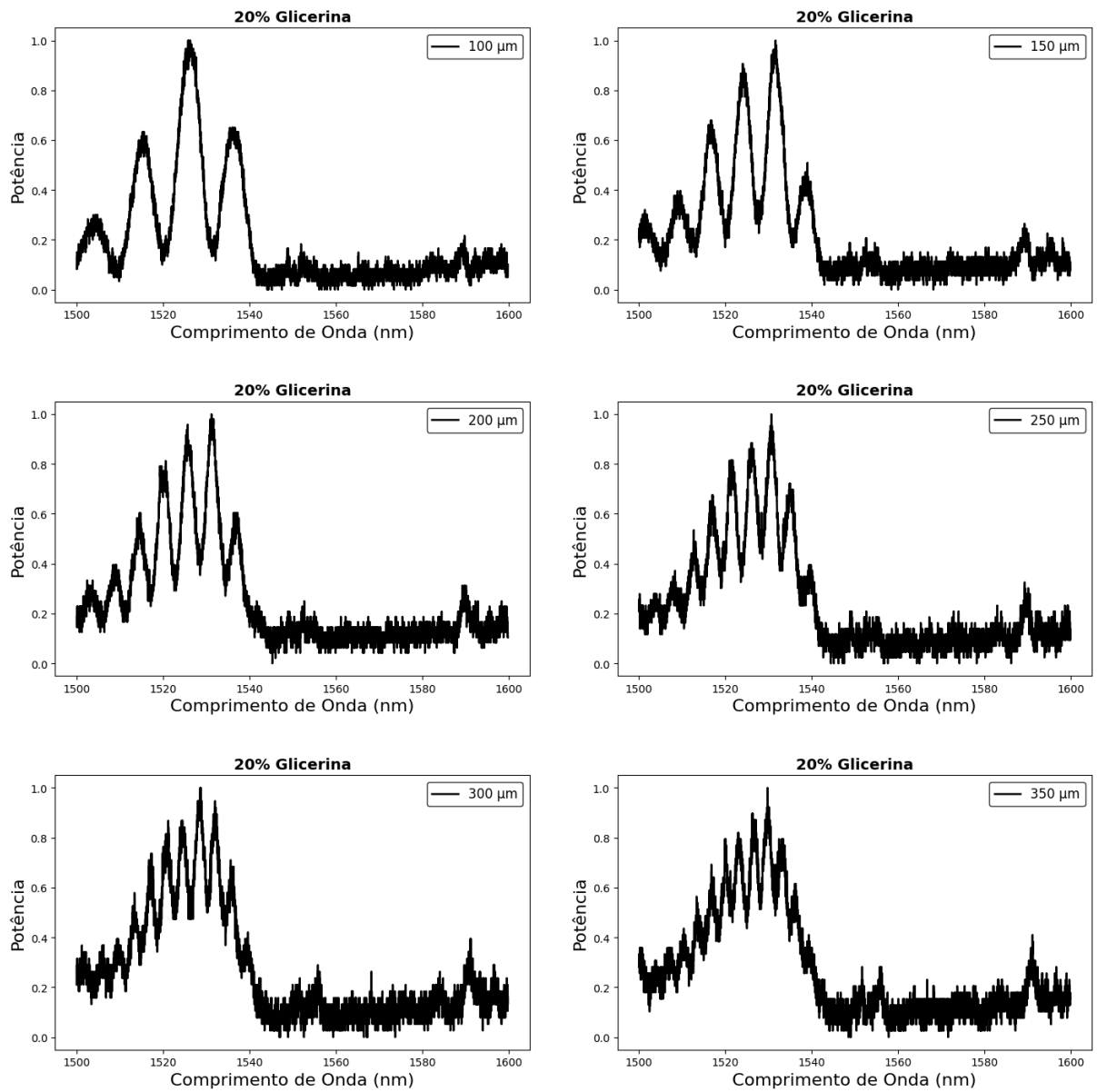
comprimento aumenta de 100 para 350 μm , em incrementos de 50 μm , nota-se o surgimento de um maior número de oscilações sobrepostas ao envelope. Este comportamento é característico de dispositivos interferométricos, como o FPI, onde o aumento do caminho óptico resulta em uma frequência espacial mais elevada das franjas. Os resultados subsequentes mantêm a consistência com o comportamento observado, reiterando o aumento da densidade das franjas do FPI proporcionalmente à dimensão da cavidade. Em todas as análises seguintes, o comprimento da cavidade ressonante progride de 100 para 350 μm , mantendo-se o incremento constante de 50 μm .

Figura 5.13 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.



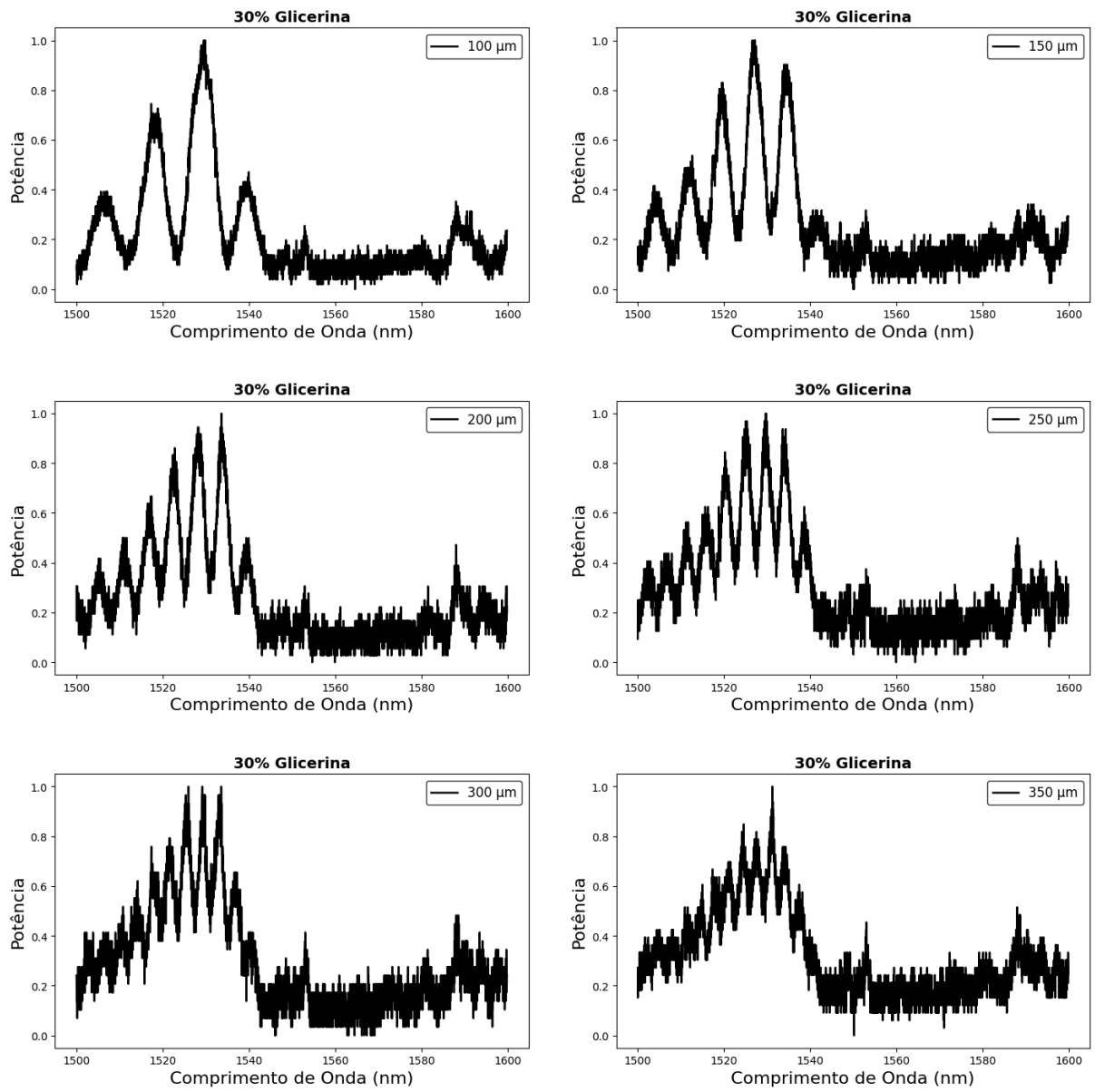
Fonte: Do autor (2026).

Figura 5.14 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.



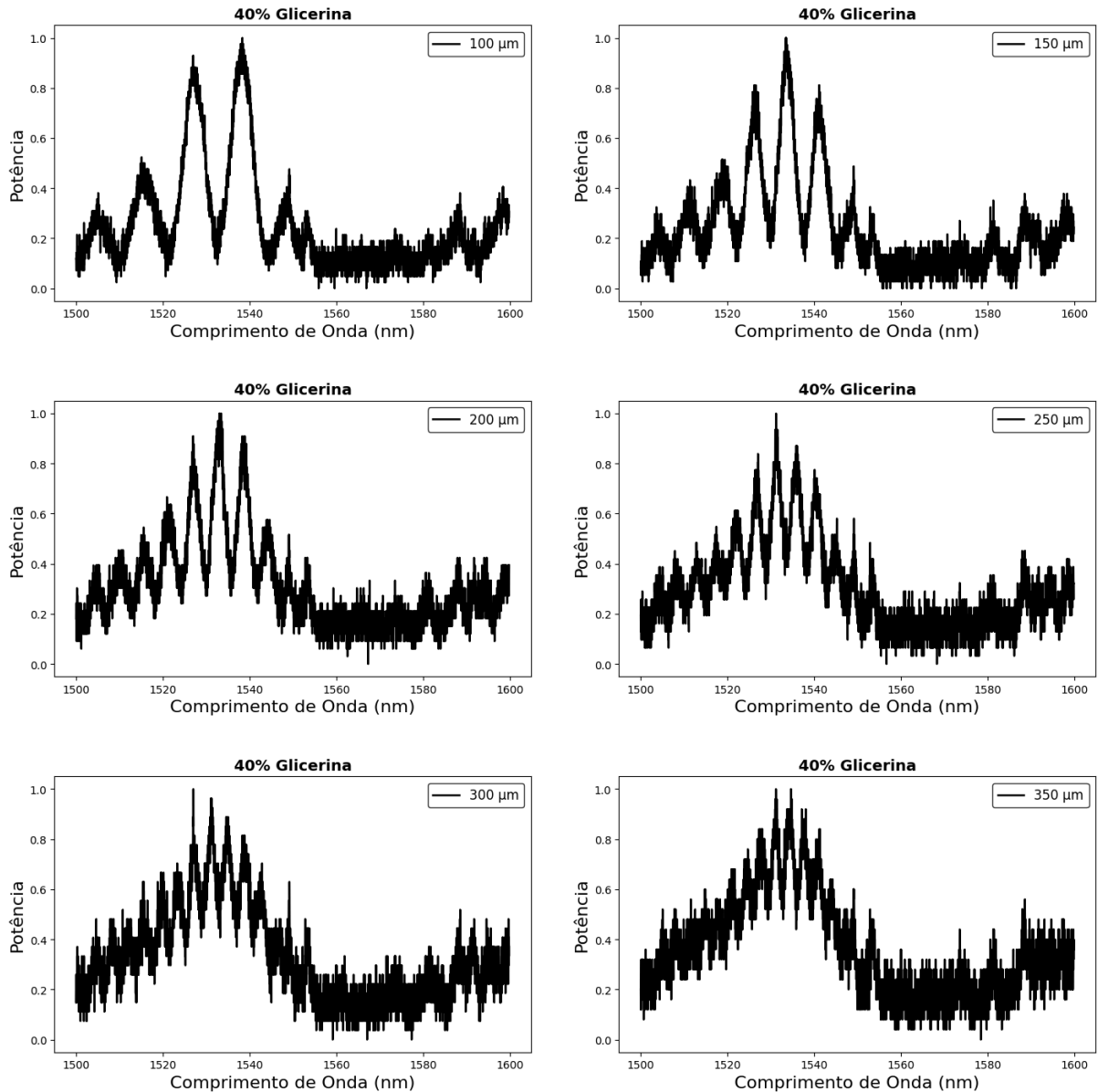
Fonte: Do autor (2026).

Figura 5.15 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.



Fonte: Do autor (2026).

Figura 5.16 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI.



Fonte: Do autor (2026).

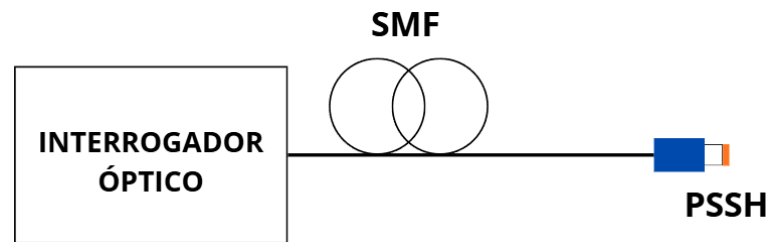
Nota-se que o envelope de banda larga gerado pelo sensor MMI apresenta um deslocamento para comprimentos de onda mais longos, em consonância com as observações anteriores. Contudo, nesta configuração, o sinal surge modulado pelas franjas de interferência do FPI, o que confere uma resolução superior à identificação dos picos ressonantes e aumenta a precisão na detecção das variações de índice de refração.

A eficácia e qualidade desta modulação e a sensibilidade do sistema são intrinsecamente dependentes das propriedades da cavidade ressonante. Para explorar essa dependência, a próxima série de resultados detalha o desempenho do sensor utilizando um FPI fabricado com filme fino de PSSH, cujas características foram mencionadas no capítulo

de metodologia.

Agora, utilizando a montagem do sensor MMI com o FPI de PSSH ilustrado na Figura 5.17, obteve-se as respostas espectrais para esta hibridização.

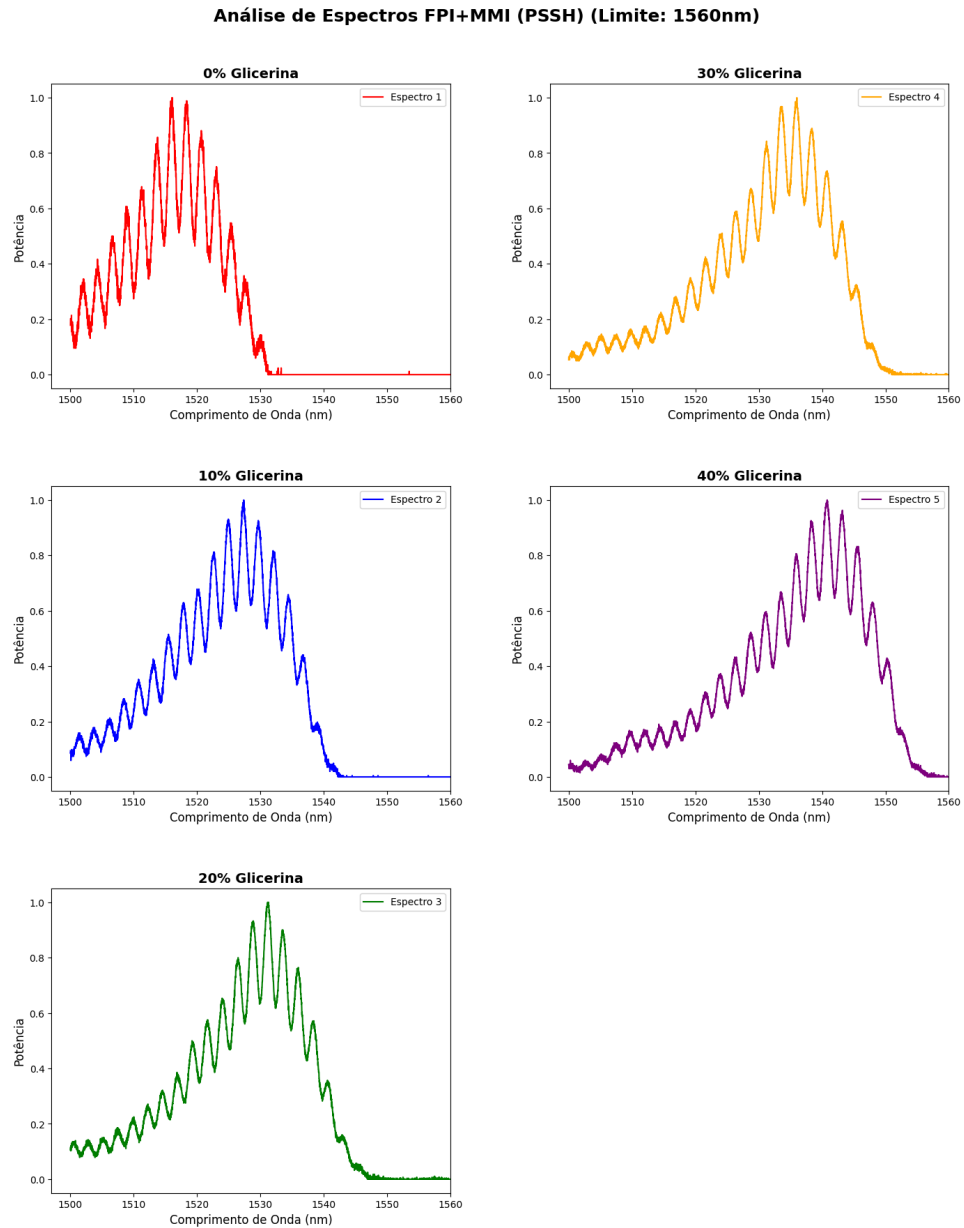
Figura 5.17 - Diagrama simplificado da montagem experimental do sensor de índice de refração baseado em MMI com o FPI PSSH.



Fonte: Do autor (2025).

E a Figura 5.18 ilustra o comportamento espectral do sensor híbrido utilizando um FPI composto por um filme fino de PSSH. Estão representadas as variações obtidas para concentrações de glicerina entre 0% e 40%, evidenciando a resposta do sistema com uma cavidade polimérica de dimensões fixas. Diferente das etapas anteriores, esta configuração explora as propriedades ópticas do filme fino para modular o envelope MMI de forma fixa, permitindo correlacionar o deslocamento dos picos diretamente com o índice de refração do meio externo.

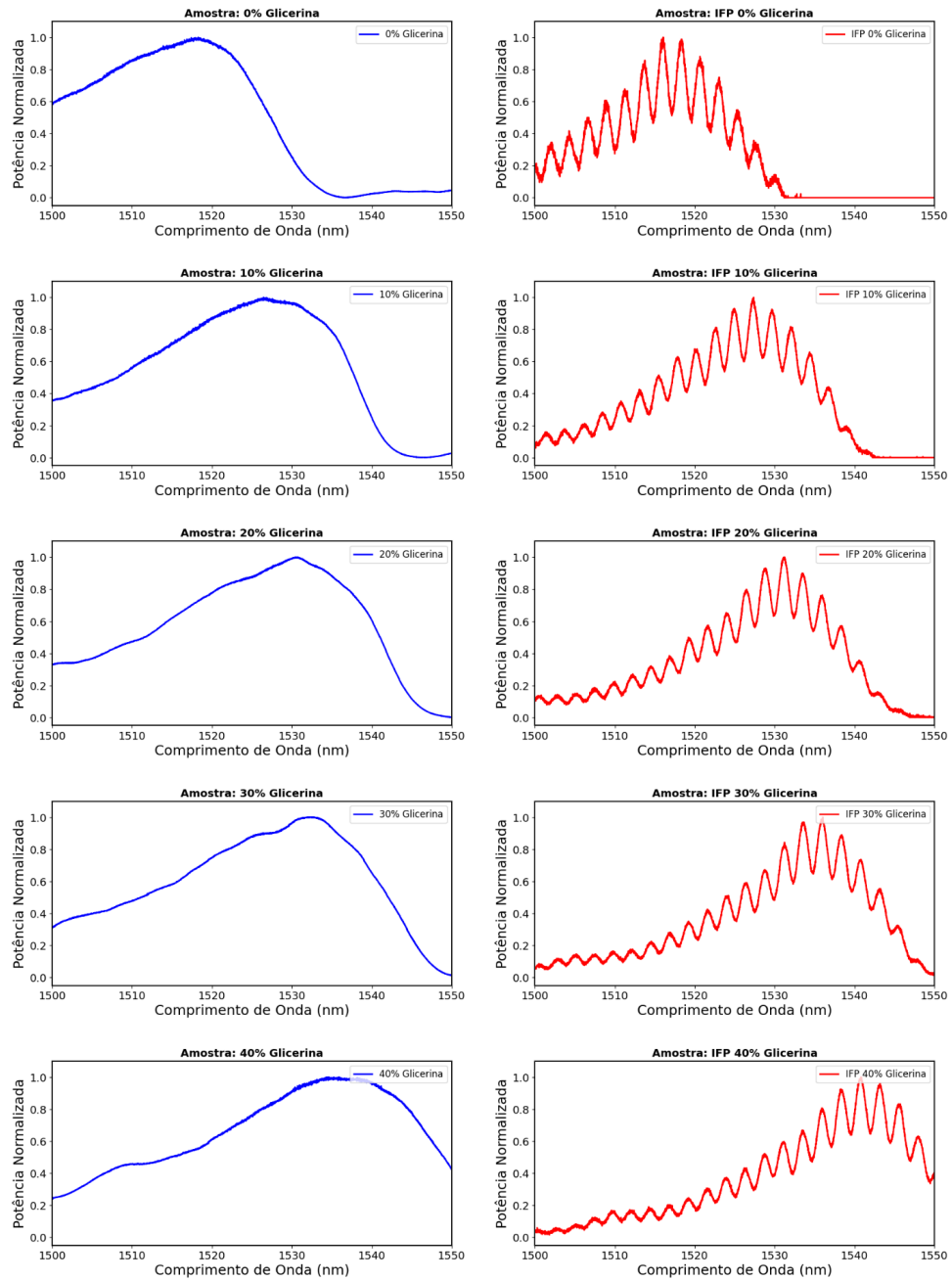
Figura 5.18 - Resposta espectral do sensor MMI de índice de refração com FPI de PSSH.



Fonte: Do autor (2026).

A análise comparativa do sensor de índice de refração baseado em MMI, antes e após a integração com a arquitetura FPI, revela um aumento significativo na capacidade de detalhamento do sistema.

Figura 5.19 - Comparação entre o sensor MMI com e sem o FPI



Fonte: Do autor (2026).

Enquanto a configuração SMS isolada produz picos de transmissão intrinsecamente largos, o que limita a precisão na identificação de pequenos deslocamentos espectrais, a hibridização introduz franjas de interferência extremamente estreitas sobre o sinal original. Esta modulação funciona como um conjunto de marcadores de alta frequência espacial que definem com maior clareza o perfil do espectro. Dessa forma, a sobreposição das oscilações do FPI ao envelope do MMI permite uma localização muito mais rigorosa dos pontos de ressonância,

otimizando o monitoramento visual em tempo real e garantindo que variações sutis no índice de refração do meio externo sejam detectadas com maior acurácia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou com sucesso o desenvolvimento e a caracterização de uma plataforma de sensoriamento híbrida, integrando um FPI a um sensor baseado em MMI. A pesquisa validou que a combinação dessas duas tecnologias supera as limitações intrínsecas de resolução dos sensores MMI convencionais, oferecendo uma solução robusta para o monitoramento de índices de refração. Os resultados experimentais estão de acordo com as previsões teóricas de que o FSR é inversamente proporcional ao comprimento da cavidade. Nas medições realizadas com a configuração *air-gap*, a variação sistemática da cavidade entre 100 μm e 350 μm evidenciou que o aumento do caminho óptico eleva a densidade de franjas de interferência. Esse fenômeno permitiu que o envelope largo do sensor MMI construído em uma estrutura SMS fosse modulado por oscilações de alta frequência espacial, transformando picos de banda larga em assinaturas espectrais refinadas e facilitando a identificação de deslocamentos sutis.

A implementação da segunda configuração, utilizando um filme fino polimérico de PSSH como cavidade ressonante, representou um avanço significativo em termos de compactação e funcionalidade. A caracterização do filme revelou uma espessura aproximada de 387,12 μm , capaz de gerar um padrão de interferência estável e de alta resolução. Ao submeter esse sensor híbrido a variações de concentração de glicerina (0% a 40%), observou-se um deslocamento consistente para comprimentos de onda mais longos, mantendo a integridade da modulação fornecida pelo polímero. Comparativamente, a hibridização provou ser uma estratégia eficaz para elevar o fator de qualidade do sistema de sensoriamento. Enquanto o sensor MMI puro apresenta dificuldades na localização precisa do centro do pico devido à sua largura de banda, a sobreposição das franjas do FPI atua como um refinador sintonizável, garantindo maior precisão no monitoramento em tempo real.

Em suma, o trabalho atingiu seu objetivo de validar uma plataforma de sensoriamento mais precisa e versátil. A versatilidade do filme de PSSH e a simplicidade da estrutura SMS abrem caminhos para futuras aplicações em biossensoriamento e monitoramento ambiental, onde a detecção de variações infinitesimais em meios líquidos é um requisito crítico.

REFERÊNCIAS

- BORN, Max; WOLF, Emil. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- CHEN, L. H., *et al.* **Chitosan based fiber-optic Fabry–Perot humidity sensor**. Sensors and Actuators B: Chemical, v. 169, p. 167-172, 2012.
- COSGUN, T. Y. *et al.* **Miniaturised gap sensor using fibre optic Fabry-Pérot interferometry for structural health monitoring**. Optics Express, v. 30, n. 24, p. 42923-42932, 2022.
- FIBCONET. **History of Fiber Optics**. Disponível em: <https://fibconet.com/pt/history-of-fiber-optics/>. Acesso em: 10 dez. 2026.
- GONG, J. *et al.* **Polymer Microarrays for the Discovery and Optimization of Robust Optical-Fiber-Based pH Sensors**. ACS Combinatorial Science, v. 21, n. 5, p. 417-424, 2019.
- HUANG, C., *et al.* **Optical Fiber Fabry–Perot Humidity Sensor Based on Porous Al₂O₃ Film**. IEEE Photonics Technology Letters, New York, v. 27, n. 20, p. 2127-2130, 15 out. 2015.
- Kao, C. K., Hockham, G. A. **Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies**. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 113. disponível em <https://doi.org/10.1049/piee.1966.0189>.
- Kok, SP, Go, YI, Wang, X & Wong, MLD 2024, **Advances in Fiber Bragg Grating (FBG) Sensing: A Review of Conventional and New Approaches and Novel Sensing Materials in Harsh and Emerging Industrial Sensing**, IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 19, pp. 29485-29505. <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3434351>.
- PENG, J., *et al.* **Thin-film-based optical fiber Fabry–Perot interferometer used for humidity sensing**. Applied Optics, Washington, v. 57, n. 12, p. 2967-2972, 20 abr. 2018.
- POLYZOS, D. *et al.* **Optical fibre Fabry-Pérot sensor stability at high temperatures**. Proceedings of SPIE, v. 10323, p. 103231S, 2017.

SOLDANO, L. B.; PENNINGS, E. C. M. **Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications**. Journal of Lightwave Technology, v. 13, n. 4, p. 615-627, abr. 1995.

SOUZA, K. R., et. al. **3D Printing Technology for Tapered Optical Fiber Protection With Gas Sensing Possibilities**. PHOTONIC SENSORS / Vol. 10, No. 4, 2020: 298–305

Universidade Queen Mary de Londres. **A invenção das fibras ópticas**. 2009. Disponível em: <<https://www.qmul.ac.uk>>.

VAUGHAN, J. M. **The Fabry-Perot Interferometer: History, theory, practice and applications**. Taylor & Francis Group, Nova Iorque, New York, NY. 1989.

ZHONG, Y., *et al.* **Optical Fiber Interferometric Humidity Sensor by Using Hollow Core Fiber Interacting with Gelatin Film**. Sensors, Basel, v. 22, n. 12, art. 4514, jun. 2022.

ZHOU, C., *et al.* **Ultra-High-Sensitivity Humidity Fiber Sensor Based on Harmonic Vernier Effect in Cascaded FPI**. Sensors, Basel, v. 22, n. 3, art. 1163, fev. 2022.

ZHU, Chen *et al.* **Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry–Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review**. IEEE Sensors Journal, New York, v. 23, n. 7, p. 6406-6428, 1 abr. 2023.

ANEXOS

ANEXO A – PRODUÇÃO TÉCNICA E TRABALHOS APRESENTADOS

Sensor óptico encapsulado para monitoramento de umidade na produção agrícola. Apresentado no IX Encontro Mineiro de Física (2024).

Encapsulated optical humidity sensor for agricultural production. Apresentado por Jefferson E. Tsuchida no evento XXII B-MRS Meeting SBPMAT (2024)

Utilização do interferômetro de Fabry-Perot como melhoria de resolução de um sensor óptico de índice de refração. Apresentado no Congresso Unificado da UFLA (2025).

Sintonia da Resolução de um Sensor de Índice de Refração por Interferência Multimodal Utilizando um Interferômetro de Fabry-Perot. Apresentado no VII Simpósio da Pós-Graduação em Física (2025).

In-series multimode interference sensors and Fabry-Perot interferometers for enhanced wavelength shift resolving capabilities. Artigo submetido à revista Optical Fiber Technology (2026). Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2512.06305>

Fiber Optics Technology for Temperature and Humidity Sensor Development. Capítulo de livro publicado na revista Intech Open. Disponível em: <https://www.intechopen.com/online-first/1232065>

APÊNDICES

APÊNDICE A- Código para conversão e normalização de arquivos txt em csv.

```
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
import os
import csv
import shutil
from google.colab import files

OUTPUT_FOLDER = 'processados_e_normalizados'
os.makedirs(OUTPUT_FOLDER, exist_ok=True)

def processar_e_normalizar(nome_arquivo, conteudo_raw):
    try:
        raw_data = conteudo_raw.decode('utf-8').strip()
        parts = raw_data.split(':', 1)
        if len(parts) != 2:
            return False

        power_hex_string = parts[0]
        wavelength_csv_string = parts[1]

        power_values_decimal = []
        chunk_size = 3
        if len(power_hex_string) % chunk_size != 0:
            power_hex_string = power_hex_string[:len(power_hex_string) -
(len(power_hex_string) % chunk_size)]

        for i in range(0, len(power_hex_string), chunk_size):
            hex_chunk = power_hex_string[i:i+chunk_size]
            power_values_decimal.append(int(hex_chunk, 16))
```

```

wavelength_strings = wavelength_csv_string.split(',')
wavelength_values = [float(wl.strip()) for wl in wavelength_strings if wl.strip()]

num_points = min(len(power_values_decimal), len(wavelength_values))
df = pd.DataFrame({
    'Comprimento_de_Onda_nm': wavelength_values[:num_points],
    'Potencia': power_values_decimal[:num_points]
})

scaler = MinMaxScaler()
df['Potencia'] = scaler.fit_transform(df[['Potencia']])

base_name = os.path.splitext(nome_arquivo)[0]
output_path = os.path.join(OUTPUT_FOLDER, f'{base_name}_final.csv')
df.to_csv(output_path, index=False)
return True

except Exception as e:
    print(f"Erro ao processar {nome_arquivo}: {e}")
    return False

print("Selecione os arquivos originais (.txt ou sem extensão) para converter e normalizar:")
uploaded = files.upload()

if not uploaded:
    print("Nenhum arquivo selecionado.")
else:
    sucessos = 0
    for nome_arquivo, conteudo in uploaded.items():
        if processar_e_normalizar(nome_arquivo, conteudo):
            print(f"✔ {nome_arquivo} processado com sucesso.")
            sucessos += 1

```

```
if sucessos > 0:  
    shutil.make_archive('resultados_completos', 'zip', OUTPUT_FOLDER)  
    print(f"\nProcessamento concluído: {sucessos} arquivos.")  
    files.download('resultados_completos.zip')
```

APÊNDICE B - Código para plotagem de gráficos a partir de arquivo csv.

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from google.colab import files
import os
import re

LIMITE_MIN = 1500
LIMITE_MAX = 1550
TITULO_GLOBAL = "Comparativo: Resposta Espectral Comum vs. FPI"

TAMANHO_FONTE_EIXOS = 18
TAMANHO_FONTE_NUMEROS = 14
TAMANHO_FONTE_TITULO_GRAFICO = 14
TAMANHO_FONTE_LEGENDA = 12

print("Selecione os 10 arquivos CSV (5 sem FPI e 5 com FPI):")
uploaded = files.upload()

def extrair_numero(nome):
    busca = re.findall(r'\d+', nome)
    return int(busca[0]) if busca else 0

file_names_raw = list(uploaded.keys())

if len(file_names_raw) < 1:
    print("Nenhum arquivo foi carregado.")
else:
    arquivos_esquerda = sorted([f for f in file_names_raw if "FPI" not in f.upper()],
key=extrair_numero)

```

```
arquivos_direita = sorted([f for f in file_names_raw if "FPI" in f.upper()],
key=extrair_numero)
```

```
n_linhas = max(len(arquivos_esquerda), len(arquivos_direita))
```

```
fig, axes = plt.subplots(nrows=n_linhas, ncols=2, figsize=(18, 5 * n_linhas))
```

```
def processar_e_plotar(file_name, ax, cor):
```

```
    df = pd.read_csv(file_name)
```

```
    col_onda, col_pot = df.columns[0], df.columns[1]
```

```
    df_f = df[(df[col_onda] >= LIMITE_MIN) & (df[col_onda] <= LIMITE_MAX)].copy()
```

```
    if not df_f.empty:
```

```
        df_f['Pot_Norm'] = df_f[col_pot] / df_f[col_pot].max()
```

```
        nome_sem_ext = os.path.splitext(file_name)[0]
```

```
        nome_limpo = nome_sem_ext.split(' ')[0]
```

```
        ax.plot(df_f[col_onda], df_f['Pot_Norm'], color=cor, linewidth=2, label=nome_limpo)
```

```
                                ax.set_title(f'Amostra: {nome_limpo}',
fontsize=TAMANHO_FONTE_TITULO_GRAFICO, fontweight='bold')
```

```
        ax.set_xlabel("Comprimento de Onda (nm)", fontsize=TAMANHO_FONTE_EIXOS)
```

```
        ax.set_ylabel("Potência Normalizada", fontsize=TAMANHO_FONTE_EIXOS)
```

```
        ax.tick_params(axis='both', labelsize=TAMANHO_FONTE_NUMEROS)
```

```
        ax.set_xlim(LIMITE_MIN, LIMITE_MAX)
```

```
        ax.set_ylim(-0.05, 1.1)
```

```
        ax.grid(False)
```

```
        ax.legend(loc='upper right', fontsize=TAMANHO_FONTE_LEGENDA)
```

```
    for spine in ax.spines.values():
```

```

spine.set_linewidth(1.5)

for i, file_name in enumerate(arquivos_esquerda):
    processar_e_plotar(file_name, axes[i, 0], 'blue')

for i, file_name in enumerate(arquivos_direita):
    processar_e_plotar(file_name, axes[i, 1], 'red')

for i in range(len(arquivos_esquerda), n_linhas):
    fig.delaxes(axes[i, 0])
for i in range(len(arquivos_direita), n_linhas):
    fig.delaxes(axes[i, 1])

plt.suptitle(TITULO_GLOBAL, fontsize=24, fontweight='bold', y=1.01)

plt.tight_layout(pad=4.0)

plt.savefig('grade_final_separada.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.show()

print("\nGrade de 10 gráficos gerada!")
    print(f'Esquerda:  {len(arquivos_esquerda)}  arquivos  comuns  |  Direita:
{len(arquivos_direita)} arquivos FPI")

```

APÊNDICE C - Código para plotagem de gráficos teóricos do FPI em função da refletividade e do comprimento da cavidade.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import ipywidgets as widgets
from ipywidgets import interactive

c = 299_792_458.0

def desenhar_subplot(ax, R, L_um, cor, numero_grafico):
    L_m = L_um * 1e-6
    n = 1.0
    I_0 = 1.0

    lambdas_m = np.linspace(1500e-9, 1600e-9, 2000)
    lambdas_nm = lambdas_m * 1e9
    lambda_centro_m = 1550e-9

    F_coef = (4 * R) / ((1 - R)**2)
    delta = (4 * np.pi * n * L_m) / lambdas_m
    denominador = 1 + F_coef * (np.sin(delta / 2)**2)
    I = I_0 / denominador

    m_central = round((2 * n * L_m) / lambda_centro_m)
    if m_central == 0: m_central = 1

    pico_1_nm = ((2 * n * L_m) / m_central) * 1e9
    pico_2_nm = ((2 * n * L_m) / (m_central - 1)) * 1e9
    fsr_nm = abs(pico_2_nm - pico_1_nm)
    finesse_val = (np.pi * np.sqrt(F_coef)) / 2

    ax.plot(lambdas_nm, I, lw=2, color=cor)
    ax.set_ylabel(r'Intensidade ($I/I_0$)', fontsize=20)
    ax.set_xlabel(r'$\lambda$ (nm)', fontsize=20)

```

```

ax.set_ylim(0, 1.35)
ax.set_xlim(1500, 1600)
ax.grid(False)

if 1500 < pico_1_nm < 1600 and 1500 < pico_2_nm < 1600:
    y_set = 1.1
    ax.annotate("", xy=(pico_1_nm, y_set), xytext=(pico_2_nm, y_set),
                arrowprops=dict(arrowstyle='<->', color=cor, lw=1.5))
    ax.text((pico_1_nm + pico_2_nm)/2, y_set + 0.05, f'FSR\{fsr_nm:.2f} nm',
            color=cor, ha='center', va='bottom', fontsize=16, fontweight='bold')

texto_info = (rf'R = {R:.3f}' + '\n' +
              rf'L = {L_um:.1f} $\mu m$' + '\n' +
              rf'$\mathcal{{F}}$ = {finesse_val:.1f}')

props = dict(boxstyle='round', facecolor='white', alpha=0.8, edgecolor='gray')
ax.text(0.02, 0.95, texto_info, transform=ax.transAxes, fontsize=16,
        verticalalignment='top', bbox=props)

def plotar_quatro_graficos(R1, L1, R2, L2, R3, L3, R4, L4):
    fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(16, 12))

    # Mapeia os eixos para facilitar o acesso
    desenhar_subplot(axes[0, 0], R1, L1, 'blue', 1)
    desenhar_subplot(axes[0, 1], R2, L2, 'darkorange', 2)
    desenhar_subplot(axes[1, 0], R3, L3, 'green', 3)
    desenhar_subplot(axes[1, 1], R4, L4, 'red', 4)

    plt.tight_layout()
    plt.show()

style = {'description_width': 'initial'}
layout = widgets.Layout(width='350px')

```


Sliders Grupo 1

```
s_R1 = widgets.FloatSlider(value=0.85, min=0.1, max=0.99, step=0.01, description='(1) R',
style=style, layout=layout)
```

```
s_L1 = widgets.FloatSlider(value=100.0, min=10.0, max=500.0, step=1.0, description='(1) L
[μm]', style=style, layout=layout)
```

Sliders Grupo 2

```
s_R2 = widgets.FloatSlider(value=0.60, min=0.1, max=0.99, step=0.01, description='(2) R',
style=style, layout=layout)
```

```
s_L2 = widgets.FloatSlider(value=200.0, min=10.0, max=500.0, step=1.0, description='(2) L
[μm]', style=style, layout=layout)
```

Sliders Grupo 3

```
s_R3 = widgets.FloatSlider(value=0.30, min=0.1, max=0.99, step=0.01, description='(3) R',
style=style, layout=layout)
```

```
s_L3 = widgets.FloatSlider(value=50.0, min=10.0, max=500.0, step=1.0, description='(3) L
[μm]', style=style, layout=layout)
```

Sliders Grupo 4 (Novo)

```
s_R4 = widgets.FloatSlider(value=0.95, min=0.1, max=0.99, step=0.01, description='(4) R',
style=style, layout=layout)
```

```
s_L4 = widgets.FloatSlider(value=300.0, min=10.0, max=500.0, step=1.0, description='(4) L
[μm]', style=style, layout=layout)
```

```
ui = interactive(plotar_quatro_graficos,
```

```
    R1=s_R1, L1=s_L1,
```

```
    R2=s_R2, L2=s_L2,
```

```
    R3=s_R3, L3=s_L3,
```

```
    R4=s_R4, L4=s_L4)
```

```
display(ui)
```

APÊNDICE D - Código para cálculo do FSR da figura 5.7.

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import files
import ipywidgets as widgets
from ipywidgets import interactive
from scipy.signal import find_peaks

print("Selecione o arquivo CSV do seu espectro:")
uploaded = files.upload()
file_name = list(uploaded.keys())[0]
df_original = pd.read_csv(file_name)

col_x = df_original.columns[0]
col_y = df_original.columns[1]
df_original = df_original.sort_values(by=col_x).reset_index(drop=True)

def analisar_espectro(n_refracao, altura_pico):
    df = df_original.copy()

    indices_picos, _ = find_peaks(df[col_y], height=altura_pico, distance=50)

    lambdas_picos = df[col_x].iloc[indices_picos].values
    intensidade_picos = df[col_y].iloc[indices_picos].values

    plt.figure(figsize=(12, 6))
    plt.plot(df[col_x], df[col_y], color='black', label='Espectro Experimental', alpha=0.7)
    plt.scatter(lambdas_picos, intensidade_picos, color='red', marker='x', label='Picos
Detectados')

    if len(lambdas_picos) >= 2:
        fsr_exp = np.abs(np.mean(np.diff(lambdas_picos)))

```



```
step=0.01, description='Sensibilidade (Altura Pico)',  
style=style, layout={'width': '500px'}))  
  
display(ui)
```

APÊNDICE E - Código para plotagem de gráficos comparativos do sensor MMI com FPI.

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import files
import os

LIMITE_NM = 1560
CORES = ['red', 'blue', 'green', 'orange', 'purple']
TITULOS = ["0% Glicerina", "10% Glicerina", "20% Glicerina", "30% Glicerina", "40% Glicerina"]

print(f"Selecione os 5 arquivos CSV (O gráfico será limitado em {LIMITE_NM}nm):")
uploaded = files.upload()

file_names = sorted(list(uploaded.keys()))

if len(file_names) < 1:
    print("Nenhum arquivo foi carregado.")
else:
    fig, axes = plt.subplots(nrows=3, ncols=2, figsize=(15, 18))
    ordem_eixos = [axes[0,0], axes[1,0], axes[2,0], axes[0,1], axes[1,1]]

    for i, file_name in enumerate(file_names):
        if i >= len(ordem_eixos):
            break

        df = pd.read_csv(file_name)
        df_filtrado = df[df['Comprimento_de_Onda_nm'] <= LIMITE_NM]

        ax_atual = ordem_eixos[i]
        titulo_at = TITULOS[i] if i < len(TITULOS) else file_name

```

```
ax_atual.plot(df_filtrado['Comprimento_de_Onda_nm'],
              df_filtrado['Potencia'],
              color=CORES[i],
              label=f'Espectro {i+1}',
              linewidth=1.5)

ax_atual.set_title(titulo_at, fontsize=14, fontweight='bold')
ax_atual.set_ylabel('Potência', fontsize=12)
ax_atual.set_xlabel('Comprimento de Onda (nm)', fontsize=12)
ax_atual.legend(loc='upper right', fontsize=10, frameon=True)
ax_atual.grid(False)
ax_atual.set_xlim(right=LIMITE_NM)

fig.delaxes(axes[2,1])
plt.tight_layout(pad=5.0)
plt.suptitle(f'Análise de Espectros FPI+MMI (PSSH) (Limite: {LIMITE_NM}nm)', y=1.01,
            fontsize=18, fontweight='bold')
plt.show()
```

APÊNDICE F - Código para plotagem de gráfico teórico do FSR em função do comprimento da cavidade.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

lambda_centro = 1550e-9
n = 1.0

L_pontos_um = np.arange(50, 105, 5)
L_pontos_m = L_pontos_um * 1e-6

FSR_nm = (lambda_centro**2 / (2 * n * L_pontos_m)) * 1e9

print("--- TABELA DE DADOS GERADOS ---")
print(f'{'L (μm)':<10} | {'FSR (nm)':<10}')
print("-" * 25)
for l, fsr in zip(L_pontos_um, FSR_nm):
    print(f'{'l':<10.1f} | {'fsr':<10.3f}')
print("-" * 25)

plt.figure(figsize=(10, 6))

L_continuo = np.linspace(45, 105, 200)
fsr_continuo = (lambda_centro**2 / (2 * n * L_continuo * 1e-6)) * 1e9
plt.plot(L_continuo, fsr_continuo, color='gray', linestyle='--', alpha=0.4, label='Tendência Teórica')

plt.plot(L_pontos_um, FSR_nm, 'o-', color='red', markersize=8, label='Pontos Calculados')

for l, fsr in zip(L_pontos_um, FSR_nm):
    plt.text(l, fsr + 0.5, f'{'fsr':.1f}', ha='center', fontsize=9, color='darkred')

```

```
plt.title(f'FSR vs Comprimento da Cavity (50µm a 100µm)', fontsize=16)
plt.xlabel('Comprimento da Cavity L [µm]', fontsize=20)
plt.ylabel('Free Spectral Range (FSR) [nm]', fontsize=20)
plt.grid(False)
plt.legend()
plt.xticks(L_pontos_um)
plt.tight_layout()
plt.show()
```