



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAONI DE FREITAS GÓIS

**PROPOSTAS DE CONFIGURAÇÕES TRANSDUTORAS PARA SENSORES EM
FIBRA ÓPTICA OPERANDO EM MODO DE RETRORREFLEXÃO**

Recife

2024

RAONI DE FREITAS GÓIS

**PROPOSTAS DE CONFIGURAÇÕES TRANSDUTORAS PARA SENSORES EM
FIBRA ÓPTICA OPERANDO EM MODO DE RETRORREFLEXÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fontana.

Coorientador: Dr. Ignacio Llamas Garro.

Recife

2024

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

G616p Góis, Raoni de Freitas.
Propostas de configurações transdutoras para sensores em fibra
óptica operando em modo de retroreflexão / Raoni de Freitas Góis,
2024.

114 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fontana.

Coorientador: Ignacio Llamas Garro.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Recife, 2024.

Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia elétrica. 2. Alumínio. 3. Espectrometria. 4. Ouro. 5.
Plásmons de superfície. 6. Sensores. I. Fontana, Eduardo (Orientador).
II. Garro, Ignacio Llamas (Coorientador). III. Título.

621.3 CDD (22. Ed.)

UFPE
BCTG / 2024 - 93

RAONI DE FREITAS GOIS

“PROPOSTAS DE CONFIGURAÇÕES TRANSDUTORAS PARA SENSORES EM FIBRA ÓPTICA OPERNADO EM MODO DE RETRORREFLEXÃO”

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Fotônica.

Aprovada em: 29/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Fontana
(Orientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Renato Evangelista de Araujo
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Oliveira Cavalcanti
(Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. João Batista Rosolem
(Examinador Externo)
Fundação CPQD

Dedico esta Tese de Doutorado às pessoas que são essenciais em minha vida. Em especial, à mãe, Edineia, que sempre me apoiou na minha jornada em busca de conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Eduardo Fontana, que sempre me direcionou para os melhores caminhos na Pós-Graduação e pela honra de partilhar da sua experiência e fazer parte do Grupo de Sensores e Instrumentação.

Ao meu coorientador, Professor Ignacio Llamas-Garro, que me acolheu e guiou durante o período de intercambio, pelo apoio e orientação durante períodos conturbados de pandemia.

Ao Professor Gustavo Oliveira Cavalcanti, que participou ativamente da minha formação de pesquisador, pelo apoio ao longo da minha trajetória acadêmica.

Aos docentes do PPGEE, em especial aos professores Renato Evangelista de Araújo e Joaquim Ferreira Martins Filho, que contribuíram diretamente para minha formação de pesquisador.

Ao professor Juliano Bandeira Lima, coordenador do PPGEE, e à Secretária Andréa Tenório, pelo comprometimento com o programa.

Aos amigos que a Pós-Graduação me presenteou: Marcio, Marianne, Hebio, Valdemir, Allamys e Henrique, pelo apoio nos momentos difíceis e pelos momentos descontraídos.

Aos amigos que o intercambio me presenteou: Qiu, Roberto, Jadoom, Vrinda e muitos outros, pelo acolhimento em terras distantes.

À minha amiga Keila, pelo apoio desde os tempos de graduação.

À minha prima Martha, pelas extensivas correções gramaticais.

À toda minha família, em especial a minha mãe, Edineia, aos meus irmãos, Pedro e Mariana, e ao meu Pai, Otacílio, por todo apoio e motivação dado ao longo dessa e de todas minhas jornadas.

A todos os amigos que contribuíram direta e indiretamente nessa jornada.

À FACEPE, pela bolsa de Doutorado.

À CAPES, pela bolsa de Intercâmbio.

Ao CNPq, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE, ao governo da Espanha e à OTAN pelo suporte financeiro.

RESUMO

Neste trabalho são investigadas duas configurações transdutoras para o desenvolvimento de sensores em fibra óptica que possam operar em modo de retrorreflexão. Na primeira configuração, investigam-se os potenciais ganhos na sensibilidade de sensores a fibra para detecção de interface entre líquidos imiscíveis, resultantes da adição de uma ou mais camadas de filmes finos à ponta sensora da fibra óptica. Em comparação com um sensor de fibra nua, a adição de filme de ouro apresentou a possibilidade de um ganho de sensibilidade de 13 vezes. Para uma interface transdutora com múltiplas camadas dielétricas, calculou-se um ganho de sensibilidade de 19,5 vezes. Em uma segunda configuração, investiga-se o emprego de grades de difração metalizadas, sob o efeito de Ressonância de Plásmons de Superfície (RPS), para a confecção de sensores a fibra acoplados em modo de retrorreflexão, os quais têm o potencial de atingir sensibilidades 25.000 vezes maiores que a de um sensor de ponta de fibra nua. Foi implementado um arranjo experimental com emprego de uma grade de alumínio acoplada à face clivada de uma fibra óptica. Com essa configuração, foram desenvolvidos diversos esquemas experimentais para aplicar o sistema sensor tanto na caracterização do espectro do efeito de RPS, quanto no seu emprego na determinação do ponto de orvalho ambiente.

Palavras-chaves: Alumínio; Espectrometria; Ouro; Plásmons de Superfície; Sensores.

ABSTRACT

In this work, two transducer configurations are investigated for the development of optical fiber sensors capable of operating in retroreflection mode. In the first configuration, the potential gains in sensitivity of fiber sensors for detecting interfaces between immiscible liquids are explored by adding one or more layers of thin films to the tip of the optical fiber. In comparison with a bare tip fiber sensor, the deposition of a gold film can improve the sensitivity by 13-fold. A transducer interface with multiple dielectric layers, can improve the sensitivity by 19,5-fold. In a second configuration, the use of metalized diffraction gratings under the effect of Surface Plasmon Resonance (SPR) for the fabrication of fiber sensors coupled in retroreflection mode is investigated. This configuration has the potential to achieve sensitivities 25,000 times greater than that of a bare fiber tip sensor. An experimental arrangement was implemented using an aluminum grating coupled to the cleaved tip of an optical fiber. With this configuration, experimental schemes were developed to apply the sensor system in the SPR spectrum characterization and in the implementation of a sensor capable of determining the ambient dew point.

Keywords: Aluminum; Spectrometry; Gold; Surface Plasmon; Sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura do sensor reflexivo de ponta de fibra (GÓIS, 2017)	21
Figura 2 – Correlação entre o sinal médio e a posição vertical da ponta do sensor durante quatro ciclos de medição, para o sinal original e filtrado com janelas de dois tamanhos diferentes (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022)	23
Figura 3 – Correlação entre a acurácia e o tamanho da janela do filtro digital aplicado ao sensor de ponta de fibra nua (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022)	25
Figura 4 – Dependência angular da reflectância para uma interface sílica-água e comprimento de onda incidente de 780 nm, calculada com emprego do aplicativo SWSO(CALVALCANTI; FONTANA, 2016).	26
Figura 5 – Interface plana com filme de ouro (GÓIS et al., 2019).	27
Figura 6 – Correlação obtida entre a espessura do filme de ouro e reflectâncias (absoluta e diferencial) da interface sensora na presença de água e óleo (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).	28
Figura 7 – Relação entre o sinal médio e a posição vertical da ponta do sensor durante quatro ciclos de medição, para o sinal original e filtrado com janelas de dois tamanhos diferentes (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022)	30
Figura 8 – Relação entre a acurácia e a diferença entre índices de refração para a interface plana com filme de ouro, com e sem filtro digital (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).	31
Figura 9 – Interface plana com estrutura multicamada dielétrica (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).	32
Figura 10 – Correlação entre a sensibilidade e espessura da camada de N-SF2 (GÓIS et al., 2019).	33
Figura 11 – Correlação entre a sensibilidade e o numero de camadas em uma interface sensora multicamadas (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).	34
Figura 12 – Configurações de Sensores RPS planares: (a) Otto e (b)Kretschmann	38
Figura 13 – Representação do efeito da difração em uma grade.	39
Figura 14 – Configuração de Kretschmann com grade de difração.	43
Figura 15 – Configuração de Otto com grade de difração	44

Figura 16 – Sensibilidade de interfaces com parâmetros otimizados para diferentes filmes metálicos	45
Figura 17 – Influência da periodicidade na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade: (a) configuração de Otto; (b) configuração de Kretschmann (GÓIS et al., 2020).	48
Figura 18 – Influência da distância na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).	49
Figura 19 – Influência da espessura na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).	50
Figura 20 – Influência da amplitude na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).	51
Figura 21 – Influência da amplitude na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade na configuração de Kretschmann (GÓIS et al., 2020).	52
Figura 22 – Influência da distância na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade de configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).	53
Figura 23 – Estratégia de fabricação de matriz de grade para configuração de Otto	56
Figura 24 – Espectros da função reflectância em uma configuração de Otto com grade comercial de alumínio e espelho de alumínio	58
Figura 25 – Influência da distância na sensibilidade da configuração de Otto com grade comercial de alumínio	59
Figura 26 – Influência da distância na sensibilidade da configuração de Otto com grade comercial recoberta com ouro	60
Figura 27 – Espectros da função reflectância em uma configuração de Otto com grade comercial recoberta com ouro	60
Figura 28 – Arquitetura óptica de banda larga utilizada nos experimentos(GÓIS et al., 2022)	62
Figura 29 – Sistema experimental.	63
Figura 30 – Mecanismo de suporte e alinhamento da grade: (a) Perspectiva frontal da parte dianteira; (b) Perspectiva posterior da parte dianteira; (c) Perspectiva frontal da parte traseira; (d) Perspectiva posterior da parte traseira; (e) Vista frontal do mecanismo montado; (f) Vista posterior do mecanismo montado.	64

Figura 31 – Montagem do suporte do colimador e polarizador: (a) Montagem do suporte do colimador: 1. Superior; 2. Colimador; 3. Inferior. (b) Suporte do colimador montado. (c) Montagem do suporte do polarizador: 1. Polarizador; Suporte do polarizador; 3. Trilho; 4. Suporte do colimador; 5. Trilho; 6. Botão. (d) Suporte do polarizador montado. (e) Montagem da base: 1. Base superior; 2. Suporte do polarizador; 3. Base inferior. (f) Suporte do colimador e polarizador montado.	67
Figura 32 – Sistema experimental de alinhamento com movimento controlado em quatro graus de liberdade	68
Figura 33 – Configuração de Otto com distância macroscópica	68
Figura 34 – Espectros de reflectância e sensibilidade para uma interface utilizando grade na configuração de Otto com distância macroscópica(GÓIS et al., 2022)	69
Figura 35 – Espectro de reflectância do espelho plano de Al utilizado como referência	70
Figura 36 – Espectros de intensidade do sinal refletido pelo espelho plano normalizado pela intensidade obtida na distância mínima	71
Figura 37 – Espectro de intensidade do sinal normalizado refletido pela grade comercial.	72
Figura 38 – Espectros de reflectância normalizado obtidos em distâncias diferentes.	73
Figura 39 – Comparação dos espectros de reflectância calculados e experimentais em diversos ângulos de polarização (GÓIS et al., 2022)	74
Figura 40 – Espectros de reflectância experimental e simuladas com dois ângulos de incidência.	76
Figura 41 – Curvas de reflectância calculadas para interfaces com camadas de Al_2O_3 com espessuras de 2 nm e 20 nm	78
Figura 42 – Comparação dos espectros de reflectância calculados e experimentais em diversos ângulos de incidência	79
Figura 43 – Relação entre a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura atmosférica para diferentes umidades relativas.	80
Figura 44 – Suporte da grade de difração: (a) Montagem; (b) Montado.	82
Figura 45 – Sistema de alinhamento e polarização: (a) Montagem; (b) Montado.	83
Figura 46 – Plataforma de rotação. (a) Montagem; (b) Montado.	84
Figura 47 – Plataforma de rotação: (a) Montagem; (b) Montado.	84
Figura 48 – Suporte do colimador: (a) Montagem; (b) Montado.	84
Figura 49 – base do colimador: (a) Montagem; (b) Montado.	85

Figura 50 – Suporte do Polarizador: (a) Montagem; (b) Montado.	85
Figura 51 – Conjunto colimador/: (a) Montagem; (b) Montado.	85
Figura 52 – Evolução da resposta espectral da reflectância durante a formação de orvalho.	86
Figura 53 – Evolução da reflectância e temperatura durante 7 ciclos experimentais, em um comprimento de onda de 840nm.	87
Figura 54 – Evolução da reflectância e temperatura no primeiro ciclo experimental, em um comprimento de onda de 840nm.	88
Figura 55 – Evolução da resposta espectral da reflectância durante a formação de orvalho, entre diferentes ciclos.	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	ORGANIZAÇÃO	19
2	SENSORES POR RETRORREFLEXÃO COM INTERFACES TRANSDUTORAS PLANARES	21
2.1	SENSOR COM PONTA DE FIBRA NUA	21
2.2	EMPREGO DE FILTRO DIGITAL PARA MELHORIA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO	23
2.3	PROJETO DE INTERFACES SENSORAS MULTICAMADAS	26
2.3.1	Projeto de interface sensora com filme fino de ouro	26
2.3.2	Projeto de interface sensora com multicamadas dielétricas	31
3	INTERFACES TRANSDUTORAS COM EMPREGO DO EFEITO RPS EM GRADE DE DIFRAÇÃO	36
3.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	36
3.2	REVISÃO DA LITERATURA	39
3.3	PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE INTERFACE SENSORA UTILIZANDO RPS EM GRADE DE DIFRAÇÃO	42
3.3.1	Otimização de interfaces sensoras utilizando RPS em grade	42
3.3.2	Estudo dos parâmetros e tolerâncias de fabricação de grades de difração para sensores baseados em RPS	46
3.3.3	Estratégia de fabricação de grade de difração otimizada para sensor RPS	53
3.3.4	Projeto de sensor com grade sub-ótima comercial	57
4	EXPERIMENTOS PARA VISUALIZAÇÃO DO EFEITO DE RPS NA GRADE DE DIFRAÇÃO COMERCIAL	61
4.1	CONFIGURAÇÃO ÓPTICA	61
4.2	SISTEMA DE ALINHAMENTO	62
4.3	OBSERVAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE RPS EM GRADE COMERCIAL SUB-ÓTIMA	69

5	SISTEMA DE DETECÇÃO DE PONTO DE ORVALHO EM GRADE DE DIFRAÇÃO	80
5.1	INTRODUÇÃO	80
5.2	PROTOTIPAÇÃO EXPERIMENTAL	81
5.3	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	86
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	90
6.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES:	92
6.2	TRABALHOS FUTUROS:	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA . . .	103
	APÊNDICE B – TRABALHOS PUBLICADOS	114

1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento em meios fluidos integra uma variedade de processos produtivos e de monitoramento os quais exigem diferentes capacidades dos sensores empregados. Na indústria petroquímica, por exemplo, sensores utilizados na detecção da interface água-óleo são submetidos a alta pressão e temperatura presentes em tanques de separação (SPEIGHT, 2014). A indústria farmacológica, por sua vez, requer a detecção de diminutas variações de agentes químicos e biológicos presentes em líquidos (HOMOLA; YEE; GAUGLITZ, 1999). Dentre outras finalidades, sensores de gases estão presentes na detecção de agentes venenosos e explosivos em áreas com grande concentração de pessoas (BOGUE, 2015), na detecção de gases específicos, como o hidrogênio, em minas (JAVAHIRALY, 2015) e na análise de dissoluções gasosas em transformadores por parte das companhias elétricas (LIMA et al., 2019).

Um dos métodos mais eficazes para o monitoramento de um meio fluido é a determinação de suas características ópticas, ou seja, do índice de refração do fluido estudado. Disponíveis há décadas, a refratometria e a cromatografia, ainda são, provavelmente, as técnicas mais utilizadas para aferição do índice de refração de fluidos em ambientes laboratoriais controlados, permitindo a determinação desse parâmetro em uma variedade de substâncias (HAWKINS; SCHMIDT, 2010). Todavia, ambas as técnicas, tradicionalmente, recorrem à utilização de equipamentos mecanicamente complexos, inviabilizando o monitoramento de índice de refração em campo.

Uma maneira de se reduzir o número de partes móveis e, conseqüentemente, a complexidade mecânica de um sistema óptico, é o emprego de fibras ópticas. Imunes a ruídos eletromagnéticos externos e quimicamente inertes. As fibras ópticas são utilizadas para confinar e conduzir sinais luminosos, podendo transportá-los eficientemente por quilômetros (UDD; SPILLMAN, 2011). Devido a essas características, dispositivos baseados em fibra óptica, em comparação com suas contrapartes elétricas e mecânicas, costumam apresentar maior robustez quando aplicados em ambientes hostis como nas proximidades de sistemas elétricos de alta potência e ambientes com altas temperaturas e pressão, como os encontrados nas indústrias químicas e petrolíferas (POHORECKI; BRIDGWATER; GALLEGOS, 2010; SPEIGHT, 2014). Além disso, a utilização de fibras ópticas torna mais prática a adição de elementos, como, por exemplo, atenuadores, acopladores, circuladores e isoladores, ao caminho óptico do dispositivo.

1.1 MOTIVAÇÃO

Empregados há décadas, os sensores à fibra podem ser encontrados em diversas configurações. Nessas a interação entre a luz guiada na fibra e o meio sensoriado pode ocorrer tanto ao longo da fibra como em sua ponta. Em geral, as fibras utilizadas comercialmente em comunicações ópticas são fabricadas de modo que a luz guiada em seu núcleo não interaja com o meio externo. Dessa forma, para que o sensoriamento possa ocorrer ao longo da fibra, é necessário que um trecho dessa fibra seja modificado de forma a permitir que a radiação guiada em seu núcleo interaja com o meio externo. Dentre as técnicas utilizadas para isso, destacam-se as fibras de Bragg (AGLIULLIN et al., 2023), as fibras tipo D (HENRIQUE PATRIOTA ALVES, 2020) e as fibras com heteronúcleo (OLIVEIRA, 2023). Por permitirem que o sinal modificado pelo meio externo seja transmitido ao longo da fibra, essas técnicas são particularmente eficazes na fabricação de dispositivos onde a área de sensoriamento se encontra distribuída ao longo de uma extensão significativa do meio (SILVA et al., 2018) ou quando se deseja correlacionar áreas de sensoriamento colocadas em série, ou seja, em cascata (da Silva Júnior; NASCIMENTO; Martins Filho, 2021; Da Silva; FILHO; Do Nascimento, 2021).

Os sensores de ponta de fibra, por sua vez, costumam operar por reflectometria, sendo mais utilizados quando se deseja obter pontos de sensoriamentos discretos. Nestes, a ponta clivada da fibra é exposta ao meio sensoriado, de forma que o sinal refletido na interface está intrinsecamente ligado às características ópticas desse meio. Em geral, sensores de ponta de fibra são mais simples, baratos e de fácil manipulação, se comparados a sensores cuja interface transdutora se encontra ao longo da fibra. Em Góis, Calvalcanti e Fontana (2022), foram investigadas as capacidades de uma interface sensora de ponta nua, onde o núcleo da fibra foi exposto diretamente ao meio sensoriado. Como discutido em mais detalhes na secção 2.1, com um sensor de baixo custo, foi possível se obter um limiar de detecção de 10^{-2} Unidades de Índice de Refração (*RIU*), similar ao obtido por Ja'afar et al. (2021) e por (AL-JANABY; AL-DERGAZLY, 2020). Todavia, como tabelado por (BRIENTIN et al., 2021), a com o emprego de técnicas mais complexas, como a interferometria (KACHIRAJU; GREGORY, 2012) e a reflectometria no domínio do tempo (YUAN et al., 2014), é possível alcançar limiares de detecção inferiores a 10^{-3} *RIU*. Uma opção para contornar o limite de detecção do sensor, é a utilização de técnicas avançadas de tratamento de dados, a exemplo do implementado por Naku et al. (2023), onde se utilizou de aprendizado de máquina para prever o comportamento oscilatório de compostos orgânicos voláteis presentes na ponta da fibra, possibilitando a discriminação de

suas concentrações. Embora muito eficazes, a implementação desse tipo recurso representa um aumento significativo na complexidade do sistema de aquisição de dados e consequente no custo do dispositivo.

Um dos maiores limitantes do desempenho dos sensores de ponta de fibra nua supracitados é a baixa reflectância obtida na interface transdutora, constituída pelo núcleo da fibra e o meio sensoriado. Uma das maneiras mais simples de contornar essa limitação é a deposição de filmes finos semitranslúcidos à ponta da fibra, criando uma interface transdutora com múltiplas camadas. Tendo-se isso em vista, foram investigadas computacionalmente os possíveis benefícios referentes à implementação de duas configurações de interface transdutoras: uma com filme de ouro e outra com múltiplas camadas dielétricas. Em ambos os casos, pode-se inferir que a aplicação do filme fino tem o potencial de melhorar o desempenho do sensor de ponta de fibra em mais de dez vezes. Além disso, a adição de filmes finos à ponta da fibra pode ser utilizada para atribuir especificidade à interface sensora, como é o caso de Razali et al. (2020), o qual acrescenta uma camada de proteína sensível ao chumbo à interface sensora, e de Salunkhe et al. (2020), que acrescenta um polímero sensível à temperatura.

Embora constituam uma solução simples adequadas a diversas aplicações, as interfaces multicamadas planas resultante da deposição de filmes diretamente sobre a ponta da fibra possuem suas limitações. Algumas aplicações, como a detecção de gases e líquidos em baixas concentrações, requerem limiares de detecção menores do que as interfaces sensoras planas se mostram capazes de alcançar. Nesses casos, torna-se necessário recorrer a interfaces sensoras geometricamente mais complexas. Dentre essas geometrias, uma das mais utilizadas é a cavidade de Fabry-Perot. Em suma, esse tipo de dispositivo opera como um filtro, onde a frequência de ressonância está intrinsecamente ligada ao comprimento da cavidade. Dessa forma a cavidade pode ser intencionalmente fabricada de forma a que seu comprimento dependa de outros parâmetros físicos, possibilitando sua utilização em sensores de umidade (CHEN et al., 2021), temperatura (ZHAO et al., 2019) e pressão (GUO et al., 2019; LIU et al., 2020), por exemplo. Todavia, essa mesma característica torna esse tipo de sensor potencialmente sensível a ruídos, muitas vezes, requerendo cuidados especiais na fabricação da cavidade e o emprego de sensores secundários utilizados como referência.

Uma opção potencialmente mais robusta para fabricação de sensores ópticos é a utilização de Ressonância de Plásmons de Superfície (RPS). Como abordado com mais detalhes no Capítulo 3, a RPS é um fenômeno óptico que ocorre na interface entre um dielétrico e um condutor. Resumidamente, esse fenômeno ocorre quando um feixe de luz incidente, proveniente

do meio dielétrico, atinge a superfície condutora com um número de onda igual ao da oscilação natural dos elétrons livres no material. Quando isso ocorre, a energia proveniente do feixe incidente se propaga sobre a superfície condutora, reduzindo significativamente a potência do feixe refletido pela interface. Uma vez que para a maioria dos condutores sólidos o comprimento médio de oscilação dos elétrons livres é bem definido, a RPS ocorre em comprimentos de onda do feixe incidente bem específicos, causando uma queda abrupta no espectro de reflectância da interface transdutora, formada pelo dielétrico e o condutor. Com isso, o fenômeno pode ser utilizado na concepção de dispositivos sensíveis a variações de índice de refração.

Um dos maiores requisitos dos projetos de sensores baseados em RPS é a determinação de parâmetros e materiais que possibilitem a obtenção de um feixe incidente com o número de onda necessário para observação do efeito. Assim, a maioria dos sensores baseados em RPS comercialmente recorrem às configurações de Kretschmann (1971) ou Otto (1968) as quais utilizam um prisma para obter o número de onda incidente desejado. Uma das maiores limitações desse tipo de configuração é o ângulo do feixe incidente sobre a interface transdutora necessário para excitação de RPS, o qual é determinado pelas características ópticas dos materiais da interface, impossibilitando projetos com ângulo de incidência frontal, necessário ao projeto de sensores de ponta de fibra retrorreflexivos. Assim, para implementar esse tipo de sensor na ponta de uma fibra, faz-se necessário a utilização de estratégias de fabricação pouco escalonáveis (WU et al., 2019; ZHANG et al., 2019; ALONSO-MURIAS; VELAZQUEZ-GONZALEZ; MONZON-HERNANDEZ, 2019).

Uma outra estratégia de fabricação de sensores baseados em RPS é a utilização de grade de difração. Embora ainda pouco exploradas em sensores de ponta de fibra, o emprego de grades de difração trás, entre outros, o benefício de permitir a excitação de RPS sob incidência frontal, como abordado com mais detalhes no Capítulo 3. Isso permite que uma grade de difração fabricada em escala seja mais facilmente acoplada à ponta da fibra. Ressalta-se que, embora a fabricação de uma matriz de grade de difração requeira a utilização de equipamentos complexos, essa matriz pode ser replicada com a utilização de técnicas bem mais simples, reduzindo drasticamente o custo final de um dispositivo desse tipo. Tudo isso aponta para viabilidade dos sensores de ponta de fibra óptica, os quais podem ser configurados com interfaces transdutoras de diferentes complexidades, de modo a se adequar a diferentes aplicações.

Neste sentido, essa tese de doutorado contribui com propostas de configurações transdutoras para sensores em fibra óptica em modo de retrorreflexão. Inicialmente, foram investigadas configurações de sensores com interfaces transdutoras planares, tomando-se como base a con-

figuração proposta em (GÓIS, 2017), concebendo-se estratégias para melhorar o seu limite de detecção. Utilizando os dados experimentais obtidos em (GÓIS, 2017), foi implementado um filtro passa-baixa caracterizado por uma função de média móvel, o qual aumentou a acurácia do sensor, na discriminação de água e óleo, de aproximadamente 65% para 99,7%. Com base nesses resultados, foram propostas estratégias para o aprimoramento da sensibilidade da interface transdutora. Os resultados obtidos no estudo computacional, onde se otimizou a espessura de um filme fino de ouro depositado sobre a ponta da fibra, indicaram um crescimento de sensibilidade de 13 vezes. Já os resultados do estudo computacional referente à interface com múltiplas camadas dielétricas indicaram um crescimento de 19 vezes.

Posteriormente, foram propostas interfaces com emprego do efeito de RPS em grade de difração. Foram realizados estudos computacionais onde se otimizou os parâmetros geométricos para duas configurações de interfaces transdutoras com grade de difração, originalmente proposta por (MELO; FONTANA, 2012), abordando quatro opções de filmes metálicos: alumínio, cobre, prata e ouro. Para as configurações com filmes de ouro, foram realizados estudos computacionais mais amplos onde se determinou o comportamento da sensibilidade da interface transdutora mediante possíveis discrepâncias entre os parâmetros geométricos otimizados determinados em projeto e os parâmetros reais obtidos, decorrentes de erros de fabricação. Tendo-se como base esses resultados, foi proposta uma estratégia para fabricação de uma grade de difração otimizada, delimitando as tolerâncias requeridas para um bom desempenho da interface sensora. Como não foi possível a obtenção da grade de difração otimizada em tempo hábil para execução desta tese, foram realizados estudos computacionais onde se determinou a viabilidade de uma grade comercial de baixo custo para realização de experimentos preliminares.

Foram realizados experimentos para visualização do efeito de RPS na grade de difração comercial. Para isso, foram implementadas as configurações ópticas e o aparato de suporte e alinhamento utilizado nos experimentos. Assim, foi possível demonstrar a viabilidade da estratégia para implementação da interface transdutora proposta, identificando-se o efeito de RPS no espectro de reflexão da fibra.

Finalmente, foi desenvolvido um sistema de detecção do ponto de orvalho em grade de difração. Para isso, implantou-se uma nova configuração experimental, dotada de um sistema de resfriamento/aquecimento, incluindo sensores de temperatura. Esse sistema foi utilizado para provocar, de forma controlada, a condensação e evaporação do orvalho depositado sobre a grade, onde observando-se o efeito de RPS no espectro de reflexão da fibra, foi possível

determinar o ponto de orvalho na grade. Com isso, este trabalho comprovou a viabilidade da interface transdutora com grade de difração no sensoriamento de um fenômeno físico relevante com potenciais aplicações.

1.2 ORGANIZAÇÃO

Esta Tese de Doutorado está organizada em seis capítulos. O Capítulo 1 contém essa introdução. No Capítulo 2 são abordados sensores por retroreflexão com interfaces transdutoras planares, estando subdividido em três seções. Na primeira, encontra-se uma breve descrição da configuração de sensor apresentada em (GÓIS, 2017). A segunda apresenta os resultados obtidos com a implementação de um filtro passa-baixas na saída desse sensor. A terceira discute sobre o projeto de interfaces sensoras multicamadas, uma com filme fino de ouro e outra com múltiplas camadas dielétricas, apresentando os resultados dos estudos computacionais onde foram obtidos os parâmetros ótimos que maximizam a sensibilidade dessas interfaces.

O Capítulo 3 aborda interfaces transdutoras não planares, que se utilizam de grades de difração para fomentar o efeito de RPS, estando subdividido em três seções. A primeira contém a fundamentação teórica, onde os princípios de funcionamento dessas interfaces são abordadas. A segunda, apresenta um resumo dos dados analisados na revisão sistemática da literatura realizada sobre o tema. Na terceira, são realizadas propostas de interfaces sensoras utilizando RPS em grade de difração, incluindo a otimização e estudo comportamental dos parâmetros da grade, bem como uma estratégia para sua fabricação. Além disso, são apresentados os resultados do estudo computacional realizado para a grade de difração comercial de baixo custo utilizada nos experimentos apresentados nesta tese.

Subdividido em três seções, o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados para a visualização do efeito de RPS na grade de difração comercial. Na primeira seção, é descrito o sistema de alinhamento utilizado nos experimentos apresentados nesta tese. Na segunda, é descrito o sistema de translação e rotação concebido para realização do alinhamento necessário para execução dos experimentos apresentados. No terceiro, são apresentados os resultados dos experimentos, onde se registrou o efeito de RPS na grade de difração comercial.

O Capítulo 5 apresenta o sistema de detecção de ponto de orvalho, concebido com o objetivo de testar a eficácia das estratégias para fabricação de sensores de ponta de fibra com a utilização do efeito de RPS em grade de difração. Para facilitar a compreensão dos resultados

experimentais obtidos, a primeira secção apresenta uma breve introdução sobre o fenómeno caracterizado como orvalho. O segundo, descreve o sistema concebido para realização do alinhamento e controle de temperatura nos experimentos, cujos resultados são apresentados na terceira secção.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais deste trabalho, destacando suas contribuições e propostas de trabalhos futuros. Além disso, o Apêndice A contém a metodologia e os dados extraídos e tabulados na revisão da literatura, enquanto o Apêndice B contém a lista de trabalhos publicados referentes a esta tese.

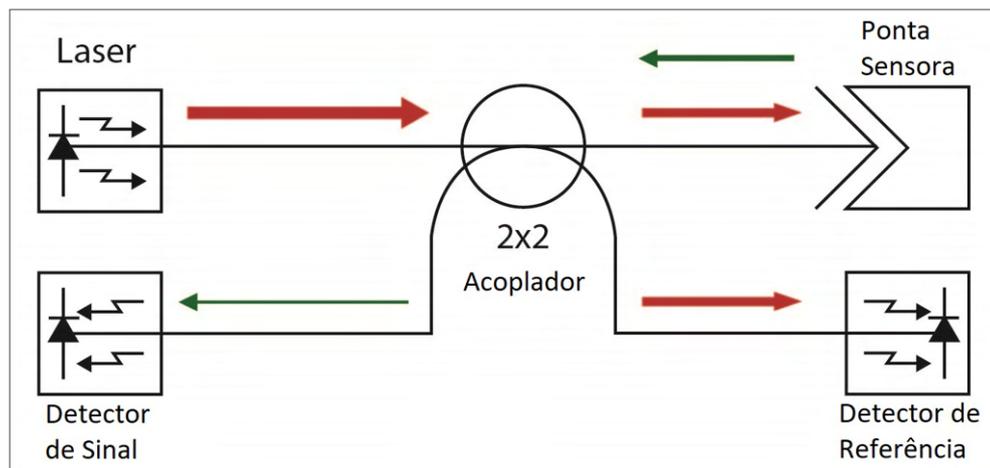
2 SENSORES POR RETRORREFLEXÃO COM INTERFACES TRANSDUTORAS PLANARES

Neste capítulo, demonstramos como o emprego de técnicas de processamento digital de dados em conjunto com a aplicação de uma ou mais camadas metálicas e/ou dielétricas à parte clivada da fibra óptica, podem aumentar significativamente o desempenho de um sensor de índice de refração de meios líquidos. O estudo é feito com base na proposta de um sensor de nível de líquidos imiscíveis, desenvolvida por (GÓIS, 2017), que, por sua natureza simples, apresentou baixa relação sinal/ruído.

2.1 SENSOR COM PONTA DE FIBRA NUA

Um dos métodos mais simples de se fabricar um sensor de ponta de fibra retroreflexivo é utilizar a ponta da fibra como interface. Neste caso, em ao menos um trecho da fibra, o sinal transmitido irá se propagar, no sentido inverso, no mesmo espaço que o sinal transmitido. Embora outros dispositivos, como circuladores ópticos, possam ser empregados para discriminar esses sinais, a arquitetura proposta em Góis (2017) se baseia em um acoplador óptico com duas entradas e duas saídas, como ilustrado na Fig. 1.

Figura 1 – Arquitetura do sensor reflexivo de ponta de fibra (GÓIS, 2017)



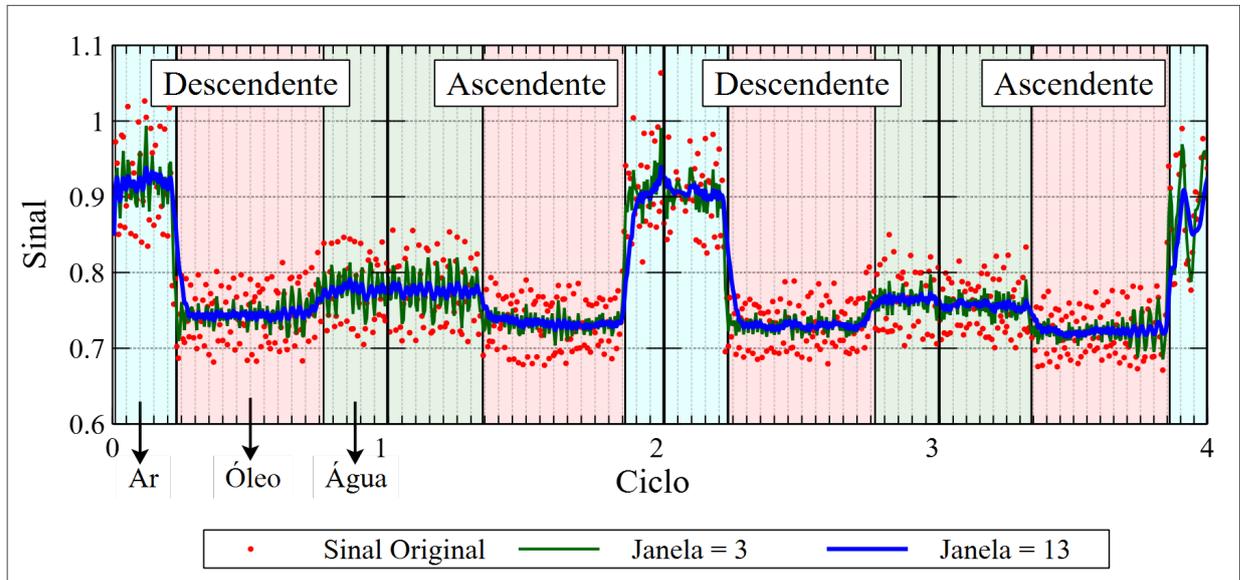
Fonte: O Autor (2017)

Nessa arquitetura, o sinal proveniente da fonte de luz é inserido em uma das entradas do acoplador óptico, que transmite parte da radiação à ponta da fibra, utilizada como interface sensora e parte da radiação, a um detector de referência conectado à outra saída do acoplador. O sinal refletido, por sua vez, é transmitido no sentido contrário, sendo dividido novamente pelo acoplador e alcançando o detector de sinal e o laser. Apesar de arquiteturas desse tipo comumente exigirem o emprego de um isolador óptico entre o laser e acoplador, neste caso em específico, a potência do sinal refletido contra-propagado se mostrou insuficiente para causar instabilidades e riscos à fonte de luz.

Como fonte de luz, nos experimentos descritos com mais detalhes em (GÓIS, 2017), foi utilizado um laser *pigtail* com comprimento de onda central de 780 nm (THORLABS, 2013a) e um acoplador com razão de acoplamento de 0.5/0.5 (THORLABS, 2011). Os detectores foram construídos utilizando o fotodiodo FDS 100 (THORLABS, 2013b), possuindo um circuito amplificador de um estágio baseado no amplificador operacional LF356 (Texas Instruments, 2015). Apesar da alta razão de rejeição de ruído de modo comum e impedância de entrada do circuito de amplificação, dada a baixa potência do sinal refletido, na ordem de microwatts, os resultados obtidos em Góis (2017) apresentaram uma relação sinal ruído aquém da ideal.

Resumidamente, os experimentos realizados em (GÓIS, 2017) consistem em deslocar verticalmente a interface sensora na ponta da fibra por uma região heterogênea contendo, de baixo para cima, água, óleo e ar. A Fig. 2 ilustra a correlação entre a posição da ponta do sensor e o sinal obtido durante uma sequência de experimentos com quatro ciclos de descida e subida. No eixo esquerdo estão referenciados os valores do sinal refletido normalizado, em unidade arbitrária. No eixo inferior esta referenciada a posição normalizada da interface sensora, onde cada unidade representa um ciclo de descida ou subida. Como se pode observar no gráfico, a capacidade de discriminar água e óleo é muito pequena, para este tipo de sensor. Nas próximas sessões empregamos algumas estratégias simples que permitem aumentar significativamente o desempenho do sensor.

Figura 2 – Correlação entre o sinal médio e a posição vertical da ponta do sensor durante quatro ciclos de medição, para o sinal original e filtrado com janelas de dois tamanhos diferentes (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022)



Fonte: O Autor (2022).

2.2 EMPREGO DE FILTRO DIGITAL PARA MELHORIA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Posteriormente, como relatado em Góis, Calvalcanti e Fontana (2022), com o objetivo de melhorar a relação sinal ruído do sensor de ponta de fibra retroreflexivo, um filtro digital passa-baixa foi implementado. Embora implementado em um script de Matlab, o filtro digital foi mantido o mais computacionalmente simples possível, de modo a facilitar sua implementação em um sistema embarcado. Para isso, optou-se por um algoritmo de média-móvel, com janelas deslizantes variando entre 1 e 20 elementos.

Na Fig. 2, é possível visualizar a melhora da relação sinal ruído com o crescimento do número de elementos da janela deslizante do filtro de média móvel. Nesse tipo de algoritmo, a frequência de corte do filtro decresce com aumento do número de elementos da janela. Todavia, o incremento do número de elementos da janela acarreta, também, no aumento do custo computacional do algoritmo e do atraso amostral, o qual também pode ser visualizado na Fig. 2.

Objetivando melhor quantizar os benefícios da implementação do algoritmo, os dados presentes na Fig. 2 foram utilizados em estudo estatístico para inferir a acurácia do sensor em distinguir a água, a qual tem o índice de refração de aproximadamente 1,33 e o óleo, com índice de refração de aproximadamente 1,46, ou seja, uma diferença de índice de refração

$\Delta n = 0,15$. Para isso, foi definida e calculada a meia distância entre os valores médios obtidos para água e para o óleo, ou seja,

$$x \equiv \frac{\Delta R}{2}, \quad (1)$$

onde ΔR é a diferença mínima entre os valores médios obtidos para água e óleo, como a variação mínima que determina a detecção entre a água e o óleo. Assim, assumindo uma distribuição gaussiana para um ruído espalhado em volta do valor médio, definiu-se a função acurácia, $acc(x)$, como a probabilidade de se detectar o fluido esperado, a qual pode ser calculada por

$$acc(x) = erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right), \quad (2)$$

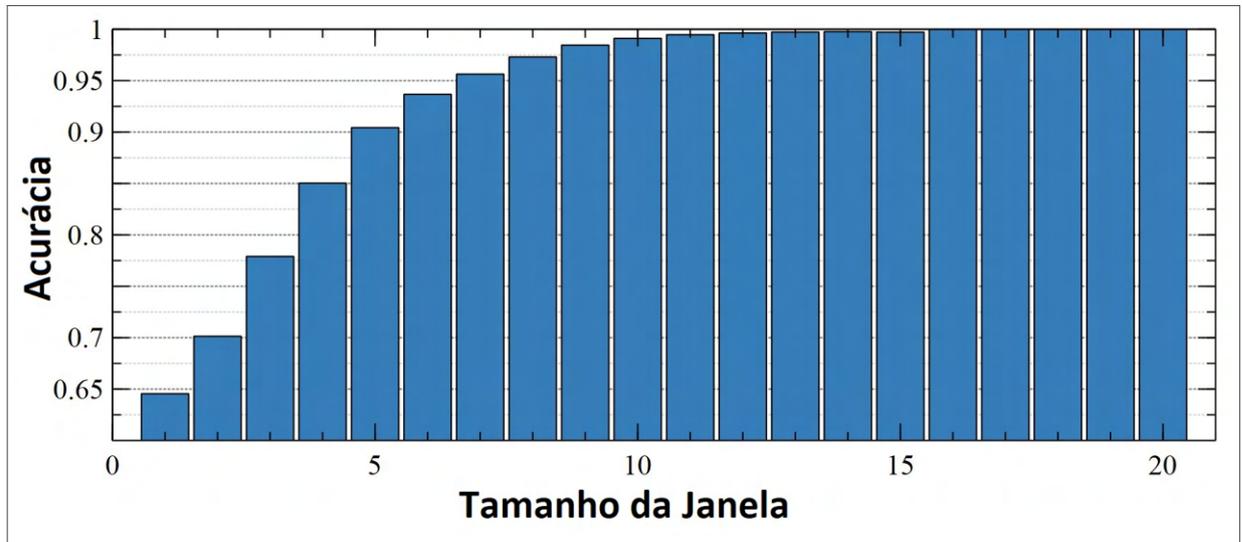
onde σ é o desvio padrão e erf é a função erro (LARSON; FARBER, 2011).

Conforme essa metodologia, a Fig. 3 apresenta a correlação entre acurácia e tamanho da janela do filtro digital, onde a janela de 1 elemento equivale ao sinal original, antes da aplicação do filtro. É possível verificar que a precisão se estabiliza após um tamanho de janela correspondente a 13 meios-passos, com um valor de aproximadamente 99,7%. Como esse princípio de detecção pode ser configurado em uma configuração multiponto, permitindo uma análise mais abrangente dos sinais aferidos, a precisão encontrada é aceitável, incentivando futuros experimentos em condições ambientais mais próximas das esperadas em um tanque separador.

Todavia, apesar de os resultados terem apontado a viabilidade do sensor com ponta de fibra nua na diferenciação de água e óleo, o sistema também se mostrou apto a melhorias, principalmente no que refere à sensibilidade de sua interface sensora. Um dos fatores mais impactantes na baixa sensibilidade do sensor com ponta de fibra nua é a baixa reflectância da interface sensora formada pelo núcleo da fibra e o fluido aferido. Essa baixa reflectância se deve, majoritariamente, a dois fatores, o ângulo de incidência do sinal proveniente da fonte de luz, normal ao plano da fibra, e a proximidade entre os índices de refração dos meios que compõem a interface. Por exemplo, como calculado em (GÓIS et al., 2016), para ângulo de incidência frontal, a reflectância da interface entre o núcleo da fibra e a água é da ordem de 10^{-3} , enquanto para interface entre a fibra e o óleo é da ordem de 10^{-4} .

Uma possível solução para esse problema é alterar o ângulo de incidência de forma a explorar a zona de transição para reflectância total, como a encontrada na curva de reflectância da

Figura 3 – Correlação entre a acurácia e o tamanho da janela do filtro digital aplicado ao sensor de ponta de fibra nua (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022)

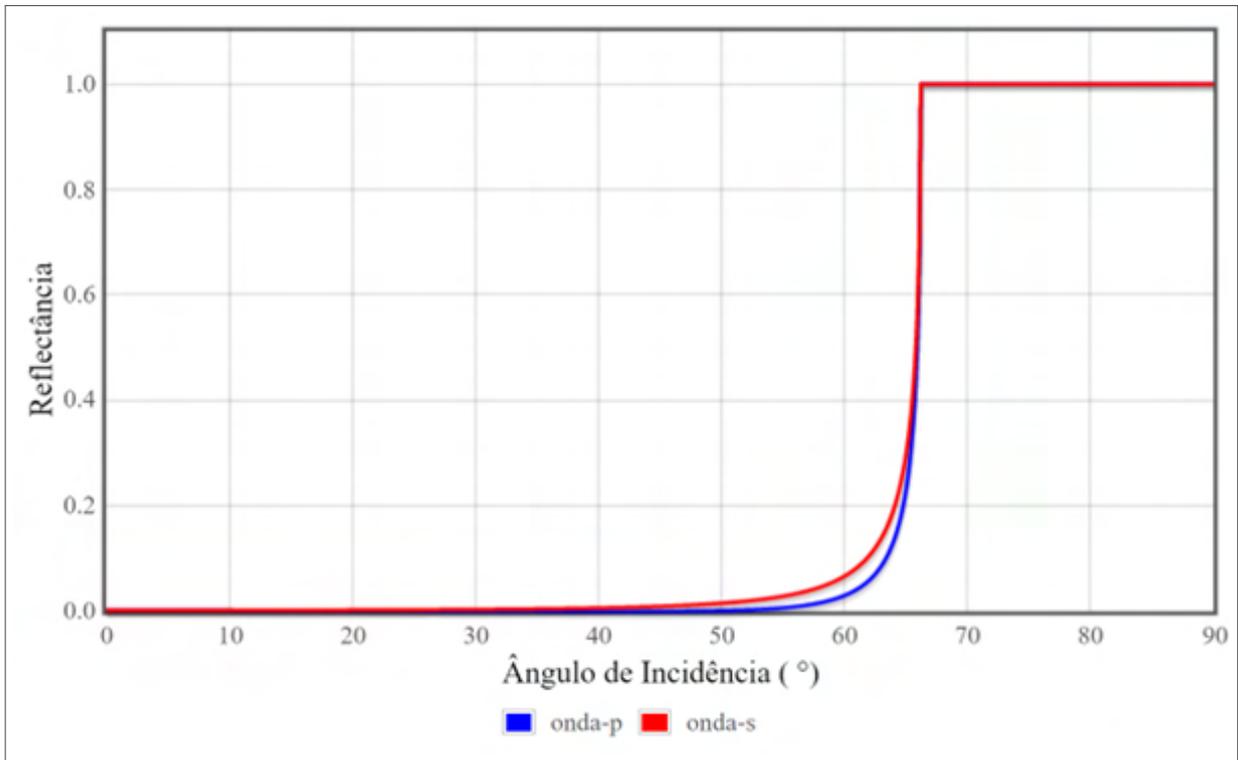


Fonte: O Autor (2002).

interface entre a fibra e a água ilustrada na Fig. 4. Todavia, como é possível observar na Fig. 4, para o caso da interface fibra-água, por exemplo, a reflectância total ocorre para ângulos superiores a 65 graus, ou seja, para ângulos maiores do que o ângulo de aceitação das fibras ópticas comerciais. Com isso, a obtenção do ângulo necessário apenas pela clivagem da fibra se torna ineficaz, sendo necessária a adição de outros elementos ópticos, como prismas, à interface sensora, aumentando a complexidade mecânica e, conseqüentemente, o custo de fabricação.

Conforme discutido nas seções seguintes, demonstra-se que a simples estratégia de adicionar um ou mais filmes finos planares à ponta de fibra, produz aumento significativo de desempenho para o problema de detecção óptica de interface entre líquidos imiscíveis de baixo contraste óptico.

Figura 4 – Dependência angular da reflectância para uma interface sílica-água e comprimento de onda incidente de 780 nm, calculada com emprego do aplicativo SWSO(CAVALCANTI; FONTANA, 2016).



Fonte: O Autor (2016).

2.3 PROJETO DE INTERFACES SENSORAS MULTICAMADAS

2.3.1 Projeto de interface sensora com filme fino de ouro

Uma solução, mecanicamente simples e escalonável, para o melhoramento da sensibilidade do sensor com ponta de fibra nua, se dá pela deposição de um filme metálico fino à ponta da fibra, formando a interface sensora ilustrada na Fig. 5. Com técnicas de deposição bem estabelecidas, cada rodada de deposição de filme metálico fino pode cobrir um número muito grande de pontas de fibra, reduzindo muito os custos de fabricação.

Embora não seja possível excitar ondas de superfície em uma interface plana sob incidência normal, adicionando-se à interface um filme de ouro, fino o suficiente para se tornar semitransparente, a refletância na ponta pode ser aumentada por um fator que pode ser controlado pela espessura do filme. Desse modo, a correlação entre reflectância R da estrutura da Fig. 5 e a espessura d do filme metálico pode ser modelada como

$$R = \left| \frac{r_1 + r_2 \exp(-j2kd)}{1 + r_1 r_2 \exp(-j2kd)} \right|^2, \quad (3)$$

onde

$$r_1 = \frac{(n_m - n_1) - j(\kappa_m - \kappa_1)}{(n_m + n_1) - j(\kappa_m + \kappa_1)}, \quad (4)$$

$$r_2 = \frac{(n_2 - n_m) - j(\kappa_2 - \kappa_m)}{(n_2 + n_m) - j(\kappa_2 + \kappa_m)} \quad (5)$$

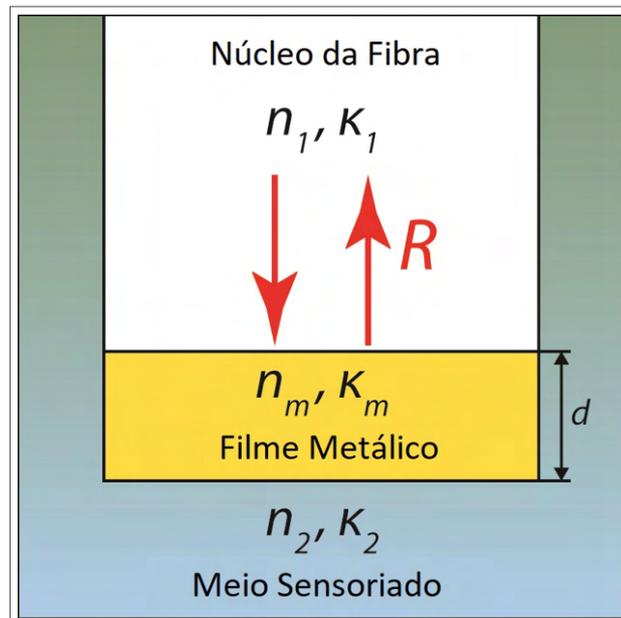
e

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}(n_m - j\kappa_m), \quad (6)$$

onde n_1 , n_2 e n_m representam, respectivamente, os índices de refração da fibra, do fluido estudado e do metal, κ_1 , κ_2 e κ_m representam, respectivamente, os coeficientes de extinção da fibra, do fluido estudado e do metal, e λ representa o comprimento de onda da luz incidente.

Com isso, o software de simulação SPRinG (MELO; FONTANA, 2013) foi utilizado para o cálculo de (3). Nestes cálculos, a fibra foi considerada como feita de sílica, possuindo coeficiente de extinção desprezível, e o índice de refração foi calculado a partir de Malitson (1965). O índice de refração e coeficiente de extinção do ouro foram extraídos de Weaver et al. (1981). O índice de refração da água foi calculado por meio da regressão dos dados relatados por Daimon e Masumura (2007). O índice de refração do óleo foi calculado por meio da regressão dos dados relatados por Otremba (2007).

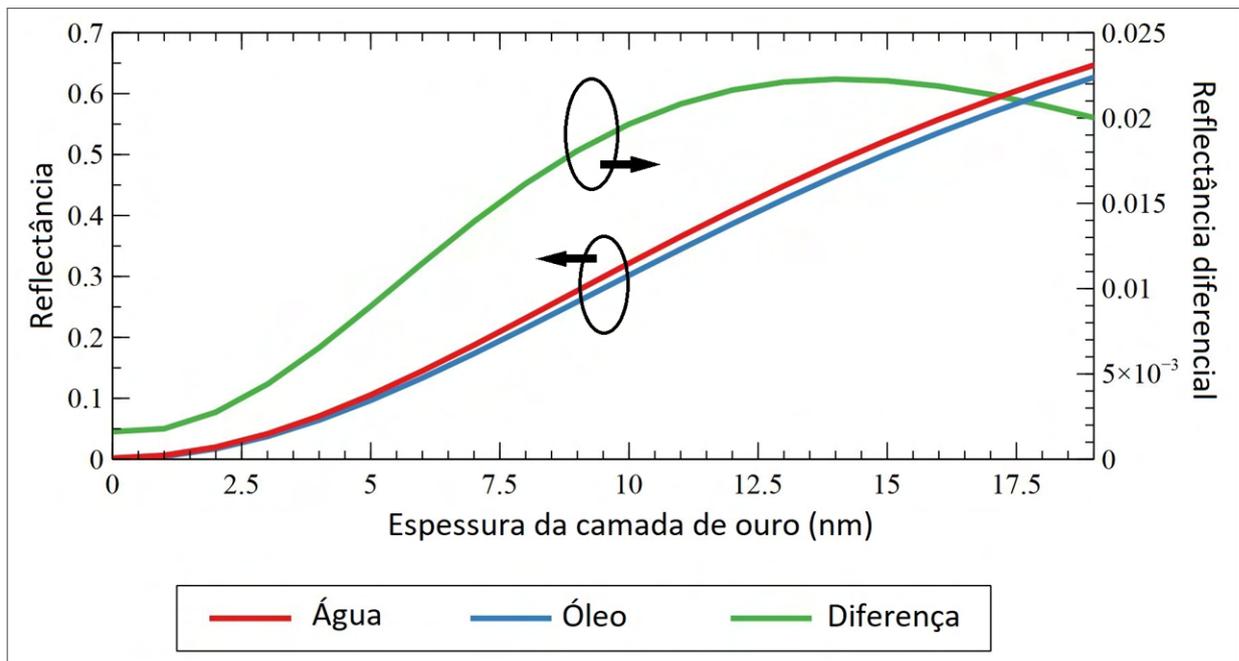
Figura 5 – Interface plana com filme de ouro (GÓIS et al., 2019).



Fonte: O Autor (2019).

Para encontrar a espessura d ideal do filme de ouro, para a qual a refletância diferencial do óleo em relação à água é maximizada, as funções de refletância foram simuladas na faixa $0 \leq d \leq 19nm$, com um comprimento de onda fixo de $\lambda = 780nm$. A Fig. 6 apresenta a correlação obtida entre a espessura d do filme de ouro e as refletâncias da interface sensora na presença de água e óleo, referenciadas no eixo esquerdo. A Fig. 6 apresenta, também, a correlação entre a espessura d do filme de ouro e a diferença entre essas refletâncias, referenciadas no eixo direito. A diferença entre as refletâncias atinge um valor de pico, de aproximadamente $2,2 \times 10^{-2}$, para uma espessura de $13nm$, o que representa um aumento de aproximadamente 10 vezes em comparação a diferenças entre as refletâncias da interface sem o filme de ouro.

Figura 6 – Correlação obtida entre a espessura do filme de ouro e refletâncias (absoluta e diferencial) da interface sensora na presença de água e óleo (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).



Fonte: O Autor (2022).

Para melhor inferir o potencial impacto do aumento da diferença entre as refletâncias na sensibilidade do sensor com a adição de um filme de ouro otimizado, de $13nm$ de espessura, foi realizada uma simulação de acordo com o procedimento a seguir. Primeiramente, a média dos valores obtidos experimentalmente com a interface na presença de água e óleo, representada na Fig. 2, foram utilizados para determinar o fator de conversão entre unidades de refletância para unidades de sinal experimentais. Posteriormente, utilizando o aumento de aproximadamente 10 vezes na diferença entre refletâncias, inferiu-se o valor médio do sinal refletido para uma interface com filme de ouro otimizada em unidades de sinal. Por fim, considerando que o

ruído nos detectores seja majoritariamente devido a fontes externas, ou seja, independentemente da magnitude do sinal luminoso, os ruídos obtidos nos experimentos com a ponta de fibra nua foram adicionados aos valores médios obtidos no passo anterior. Desta forma, os valores obtidos, contendo a soma entre os valores médios projetados para nova interface e os valores referentes ao ruído nos detectores, representam uma boa estimativa para o comportamento do sensor com a interface de filme de ouro.

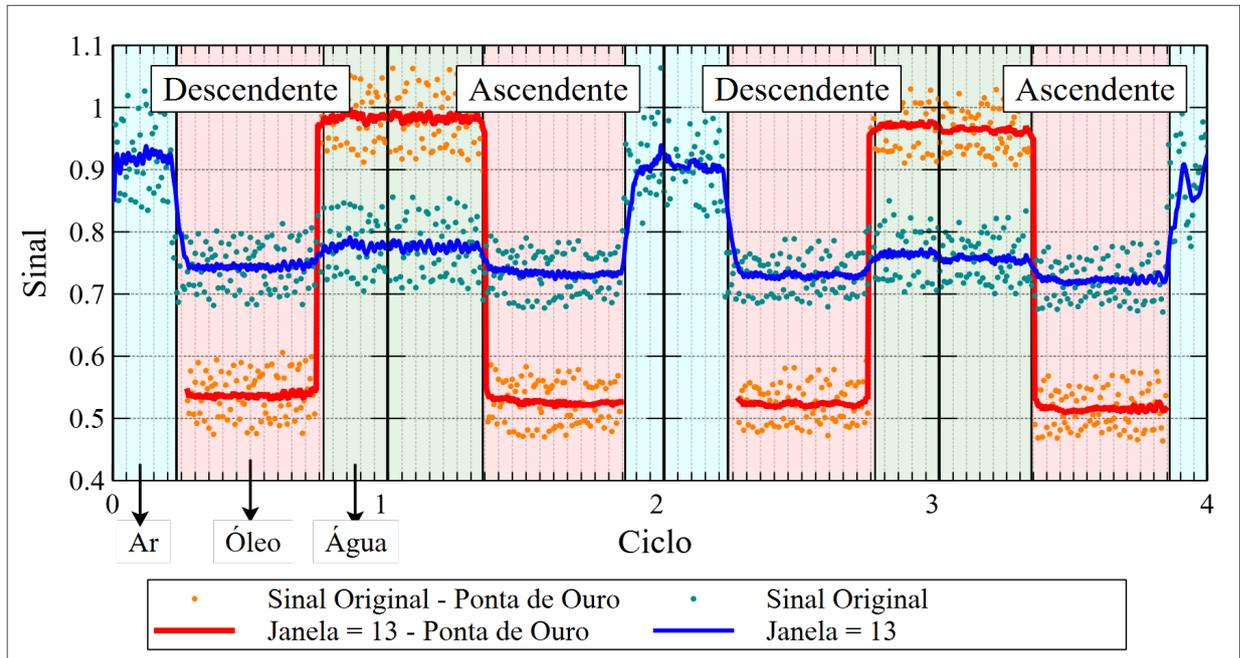
A Fig. 7 reproduz os valores referentes ao sinal obtido nos experimentos com a ponta de fibra nua, antes e após o tratamento com o filtro digital com janela de 13 elementos, já apresentados anteriormente na Fig. 2, juntamente com os sinais obtidos na simulação com interface com filme de ouro supracitada. Para permitir a representação junto com o sinal medido original, foi adicionado ao sinal simulado, apresentado na Fig. 7, uma constante de deslocamento arbitrária. No caso das curvas referentes aos valores simulados para interface com filme de ouro, os valores referentes à reflectância da interface em contato com o ar não foram representados no gráfico, uma vez que os valores absolutos obtidos são muito maiores que os obtidos para água e para óleo e exigiriam uma adequação do eixo vertical que atrapalharia a visualização dos demais dados representados. Observando o gráfico da Fig. 7, é possível inferir visualmente, uma vez que a mudança de amplitude acarretada pela mudança de sinal é pelo menos 5 vezes maior que o nível de ruído, que a adição do filme metálico à ponta do sensor retroreflexivo utilizado nos experimentos o tornaria capaz de discriminar a presença de água ou óleo na interface mesmo sem a utilização de filtro digital.

Para avaliar melhor a capacidade do sensor com interface de filme de ouro em discriminar líquidos imiscíveis distintos, foi realizada uma análise estatística semelhante à apresentada na Seção 2.1. Todavia, no lugar da reflectância, o índice de refração foi utilizado como variável aleatória para a função de acurácia. Assim, a precisão foi calculada em função da diferença entre os índices de refração de dois líquidos imiscíveis. O desvio padrão no sinal foi convertido para o desvio padrão correspondente no índice de refração, σ_n . Em seguida, uma mudança no índice de refração, em relação ao valor correspondente na água, n_w , ou seja,

$$\Delta n \equiv n - n_w, \quad (7)$$

foi definida como a variável aleatória. A função de precisão, neste caso, foi calculada a partir de

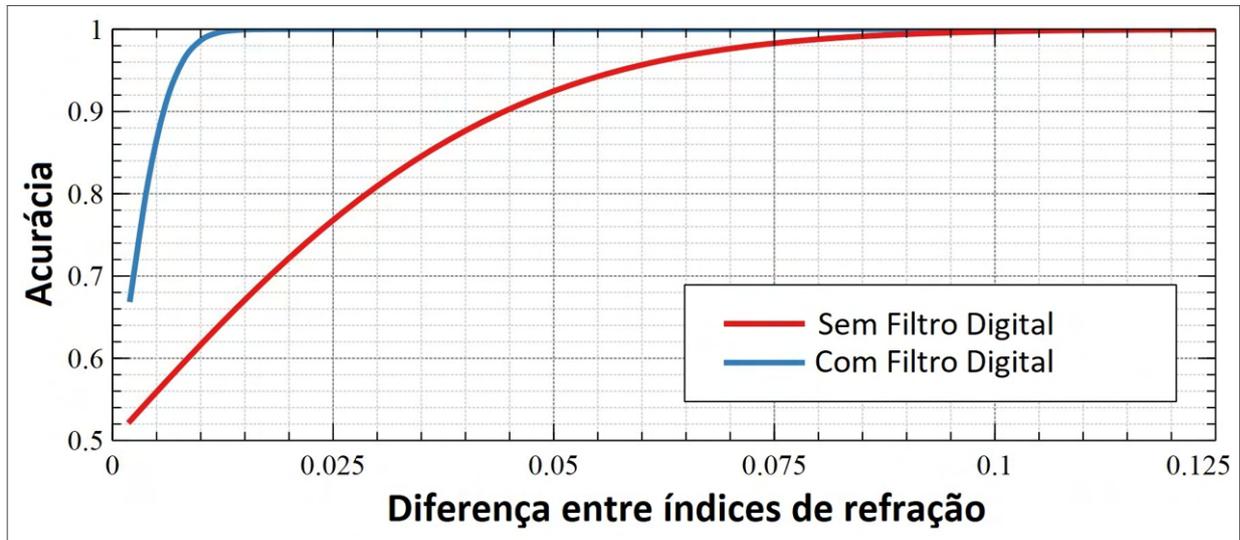
Figura 7 – Relação entre o sinal médio e a posição vertical da ponta do sensor durante quatro ciclos de medição, para o sinal original e filtrado com janelas de dois tamanhos diferentes (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022)



$$acc_n(x) = erf\left(\frac{\Delta n}{\sqrt{2}\sigma_n}\right). \quad (8)$$

A Fig. 8 mostra a correlação entre a precisão e a diferença do índice de refração, antes e depois da aplicação do filtro digital. Considerando uma precisão de 99,7% aceitável, sem o filtro digital, o sensor com interface com filme de ouro proposto atingiu um limite de detecção, no qual é capaz de discriminar líquidos imiscíveis, tendo diferença de 0,1 unidades no índice de refração. Como já antecipado qualitativamente, levando em consideração os índices de refração da água e do óleo, respectivamente de 1,33 e 1,46, ou seja, para uma diferença entre índices de refração $\Delta n = 0,13$, a configuração com interface sensora com filme metálico, sem filtro digital, exibe um desempenho semelhante à configuração com interface sensora de ponta nua com o filtro digital. Com a aplicação do filtro digital, o sensor com filme de ouro atinge um limite de detecção de 0,01 unidades de índice de refração, ou seja, um aumento de 13 vezes na capacidade de detecção do sensor em relação ao sensor de ponta de fibra nua.

Figura 8 – Relação entre a acurácia e a diferença entre índices de refração para a interface plana com filme de ouro, com e sem filtro digital (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).



Fonte: O Autor (2022).

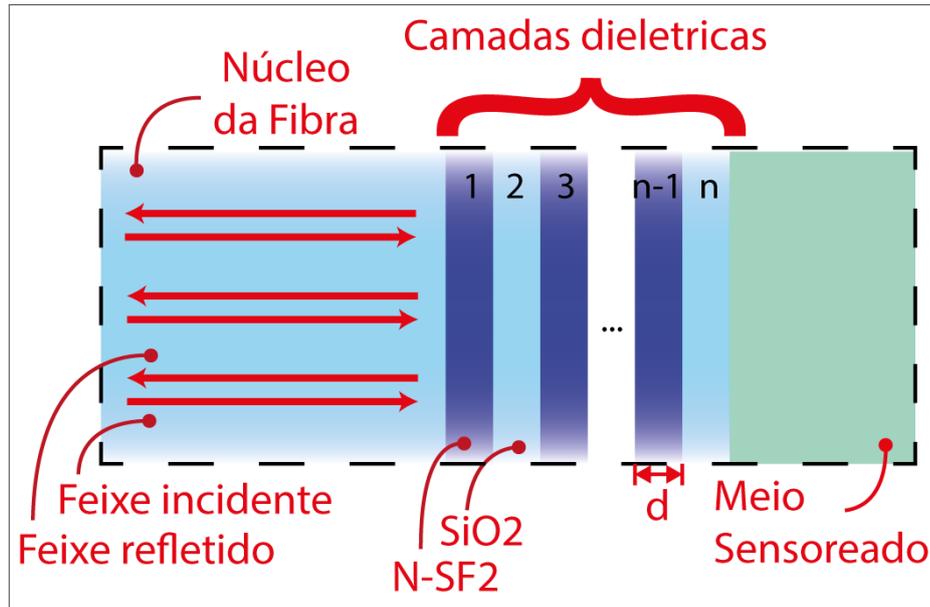
2.3.2 Projeto de interface sensora com multicamadas dielétricas

Uma alternativa ao uso de filmes metálicos finos semi-translúcidos para implementação de interfaces sensoras multicamadas na ponta de fibra é a utilização de camadas de materiais dielétricos translúcidos, comumente cristais ou óxidos metálicos, com índices de refração diferentes intercalados, como ilustrado na Fig. 9 (GÓIS et al., 2019). Assim como nos filmes metálicos, a deposição desses materiais dielétricos pode ser alcançada por uma gama de técnicas bem estabelecidas, com algumas que permitem a deposição simultânea de grande número de superfícies, permitindo o escalonamento da fabricação da interface multicamada.

Assim como ocorre com interface multicamada plana com filme metálico, em uma superfície multicamada plana dielétrica, também não é possível estimular a ocorrência de ondas de superfície, como por exemplo, ondas de Bloch, com ângulo de incidência normal à interface. Dessa forma, os possíveis aumentos de sensibilidade decorrentes da adição da interface multicamada dielétrica sobre a fibra nua se devem majoritariamente a efeitos de interferência.

Para quantificar esses prováveis ganhos de sensibilidade, o aplicativo online SWSO, Cavalcanti e Fontana (2016) foi utilizado para simular variações, com diferentes valores de distância d e número de camadas n , da interface multicamada ilustrada na Fig. 9. Para fins de cálculo, nessas simulações, a interface multicamada foi modulada como uma pilha onde camadas de N-SF2 e SiO_2 são depositadas consecutivamente. Para fins de cálculo, adotou-se o índice de refração do N-SF2 tabulado por SCHOTT AG (2010). Para os demais materiais, foram utiliza-

Figura 9 – Interface plana com estrutura multicamada dielétrica (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).



Fonte: O Autor (2022).

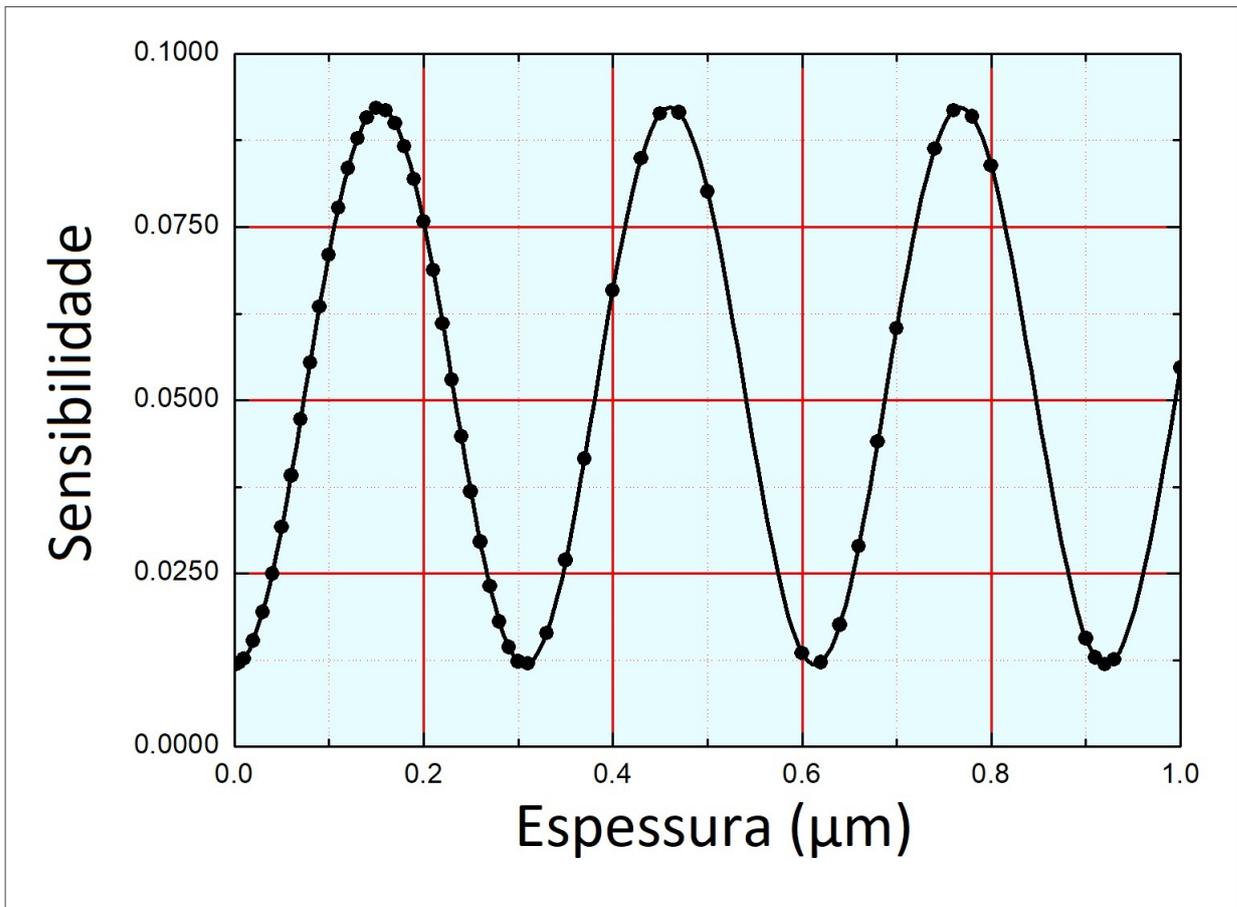
dos os mesmos índices de refração e coeficientes de extinção relatados na Secção 2.1, onde se considerou um núcleo de fibra feito de sílica e um meio externo aquoso. A escolha do N-SF2 e do SiO_2 foram arbitradas com base na sua disponibilidade comercial e na diferença entre seus índices de refração relativamente grande em comparação com outros materiais disponíveis, de aproximadamente 0,17, o que permite obter maiores reflectâncias na interface. Além disso, arbitrou-se uma onda incidente com comprimento de onda $\lambda = 780nm$.

Desta forma, para melhor avaliar a influência das espessuras das camadas na sensibilidade da interface multicamada dielétrica, inicialmente, foram realizadas simulações com apenas uma camada de N-SF2 depositada sobre a ponta da fibra, onde se variou a espessura dessa camada. A Fig. 10 apresenta a correlação entre sensibilidade e a espessura da camada de N-SF2, a qual, para os estudos computacionais deste trabalho, é definida por

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta n}. \quad (9)$$

Dados os efeitos alternados de interferência construtiva e destrutiva, como esperado, a curva apresenta a periodicidade, com período de aproximadamente $0,3 \mu m$. O primeiro máximo ocorre para uma espessura de aproximadamente $0,15 \mu m$, ou seja, um quarto do comprimento de onda dentro da camada, a interface com uma camada dielétrica apresentou uma sensibilidade de aproximadamente 0,09, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 5,85 vezes, se comparado com a interface de fibra nua.

Figura 10 – Correlação entre a sensibilidade e espessura da camada de N-SF2 (GÓIS et al., 2019).



Fonte: O Autor (2019).

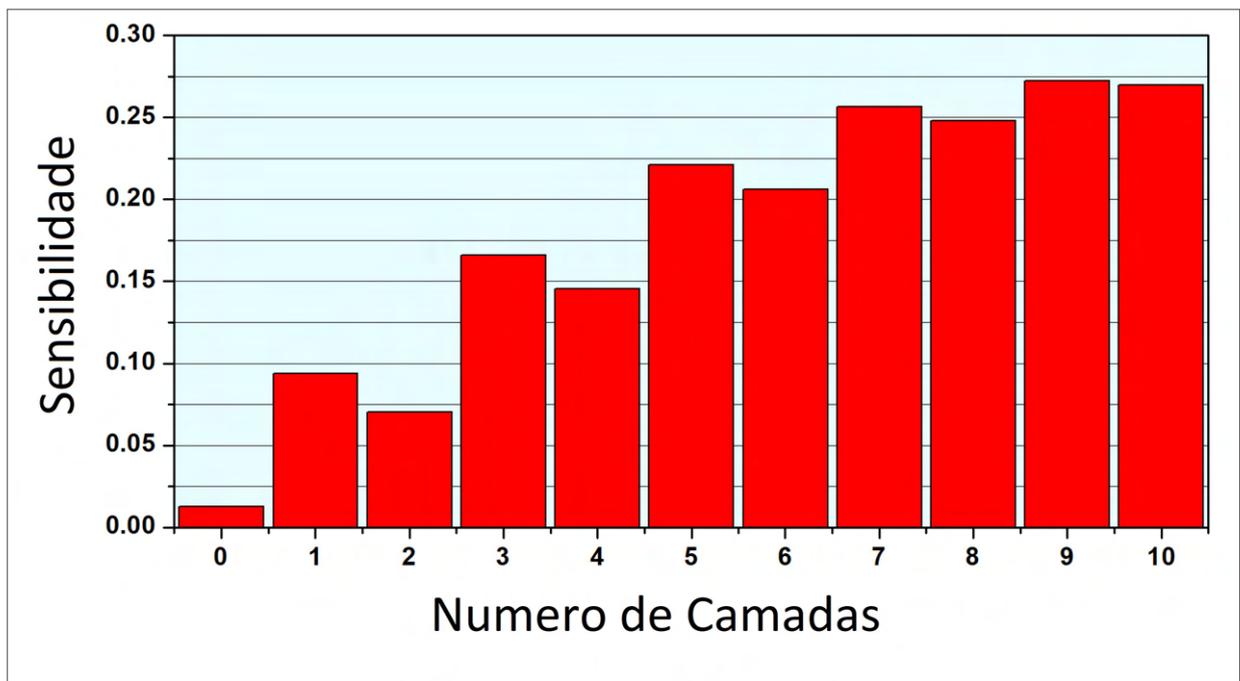
Posteriormente, utilizando-se camadas com espessura de quarto de onda, foram simuladas interfaces multicamadas dielétricas contendo de uma a dez camadas. A Fig. 11 apresenta a correlação entre a sensibilidade da interface sensora e o número de camadas dielétricas. Na figura, as colunas com número de camadas ímpar se referem a interfaces que terminam em camadas de N-SF2. As colunas com número de camadas par, por sua vez, se referem a interfaces que terminam em camadas de SiO_2 . Enquanto, a coluna de valor zero se refere à interface de fibra nua.

Na Fig. 11, é possível observar que, devido ao maior contraste em relação ao meio externo, interfaces terminadas em camadas de N-SF2 possuem maior sensibilidade que aquela terminada com uma camada subsequente de SiO_2 . É possível observar ainda, que a sensibilidade dessas interfaces terminadas em camadas de N-SF2 apresentam um crescimento amortecido em relação ao número de camadas, que se estabiliza por volta da nona camada, atingindo um valor próximo a 0,3, o que representa um crescimento de sensibilidade de aproximadamente 19,5 vezes, em comparação à sensibilidade obtida com interface de ponta de fibra nua.

Comparando-se com a interface com filme de ouro, a interface multicamada dielétrica apresentou um potencial aumento de sensibilidade de aproximadamente 80% vezes maior. Com isso, extrapolando-se, de maneira simplória, os resultados obtidos na Subseção 2.3.1, espera-se que, utilizando a arquitetura do sensor com interface de ponta de fibra nua, apresentado na Seção 2.1, a interface multicamada dielétrica seja capaz de atingir um limiar de detecção de aproximadamente $\Delta n \approx 5,6 \times 10^{-3}$.

Os resultados computacionais obtidos tanto para a interface de filme de ouro, como para interface multicamada dielétrica, apontam não só para a possibilidade de aprimoramento da confiabilidade do sensor na identificação de líquidos imiscíveis de baixo contraste em misturas heterogêneas, mas também possibilidade de sua utilização na determinação da concentração de componentes em misturas homogêneas, os quais apresentam diferenças menores de índice de refração. Embora as simulações tenham indicado a possibilidade de interface multicamada dielétrica em atingir resultados ligeiramente melhores, em comparação à interface com filme de ouro, não é possível presumir a superioridade de uma estratégia sobre a outra. Desta forma, tendo-se em vista as diferentes características ópticas e físico-químicas inerentes a cada tipo de interface, a determinação da técnica mais adequada é melhor definida caso a caso.

Figura 11 – Correlação entre a sensibilidade e o número de camadas em uma interface sensora multicamadas (GÓIS; CALVALCANTI; FONTANA, 2022).



Fonte: O Autor (2022).

A melhoria de desempenho com filme de ouro ou multicamadas tem confiabilidade suficiente para a implementação prática de um sensor para detecção de interface entre líquidos imiscíveis de baixo contraste em que a diferença de índices seja no mínimo $\Delta n \approx 0,1$. Em aplicações em que variações do índice de refração sejam bem menores do que esse limite é necessário o emprego de técnicas envolvendo ondas de superfície, tais como plásmons de superfície. Em modo de retroreflexão é necessário o emprego de grades de difração metálica, conforme discutido nos capítulos seguintes.

3 INTERFACES TRANSDUTORAS COM EMPREGO DO EFEITO RPS EM GRADE DE DIFRAÇÃO

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Amplamente empregado no desenvolvimento de sensores ópticos, a Ressonância de Plásmons de Superfície (RPS) é um fenômeno resultante da interação da luz com uma interface formada entre um dielétrico e um condutor. Esse fenômeno foi inicialmente relatado por Wood (1901), que observou resultados da influência do campo eletromagnético alternado da luz incidente sobre os elétrons livres no metal, os quais, ao entrarem em ressonância, geram um movimento oscilatório de cargas no interior do metal, acarretando na retenção de parte da potência da radiação incidente sobre a interface dielétrico-condutor. Como descrito matematicamente por Rayleigh (1907), a essa oscilação, é possível atribuir uma frequência característica, denominada de frequência de plasma, a qual, juntamente com as interações da banda de valência, é responsável pela cor característica dos metais.

Em frequências menores que a frequência de plasma luz é absorvida pelos elétrons livres do metal, tendo sua energia transferida para o sólido em eventos de colisão. Neste caso, a permissividade relativa do metal é representada com sinal negativo. Em frequências maiores que o da frequência de plasma, os elétrons oscilam em fase com o campo incidente e a permissividade relativa do metal é representada com sinal positivo (FONTANA, 2023). Na região espectral abaixo da frequência de plasma, as equações de Maxwell preveem a existência de uma onda de superfície na interface metal-dielétrico, denominada de plásmon de superfície.

As primeiras configurações de interface viável à fabricação de sensores vieram a ser apresentadas na segunda metade do Século XX. Estas recorrem à utilização de uma interface planar dupla, a qual consiste de um filme metálico depositado sobre um dielétrico. A redução da profundidade do metal a dimensões nanométricas proporciona um caráter bidimensional à interface, restringindo as oscilações de carga à superfície e propiciando a propagação plásmons de superfície (LI; CUSHING; WU, 2015). Desta forma, o espectro de excitação é restrito a um número de onda para uma dada frequência, conforme características da interface.

Matematicamente, essa condição pode ser modelada aplicando as devidas condições de contorno para os campos no meio de contato, obtendo-se o número de onda para excitação de plásmons de superfície

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_{metal}\epsilon_{diel}}{\epsilon_{metal} + \epsilon_{diel}}}, \quad (10)$$

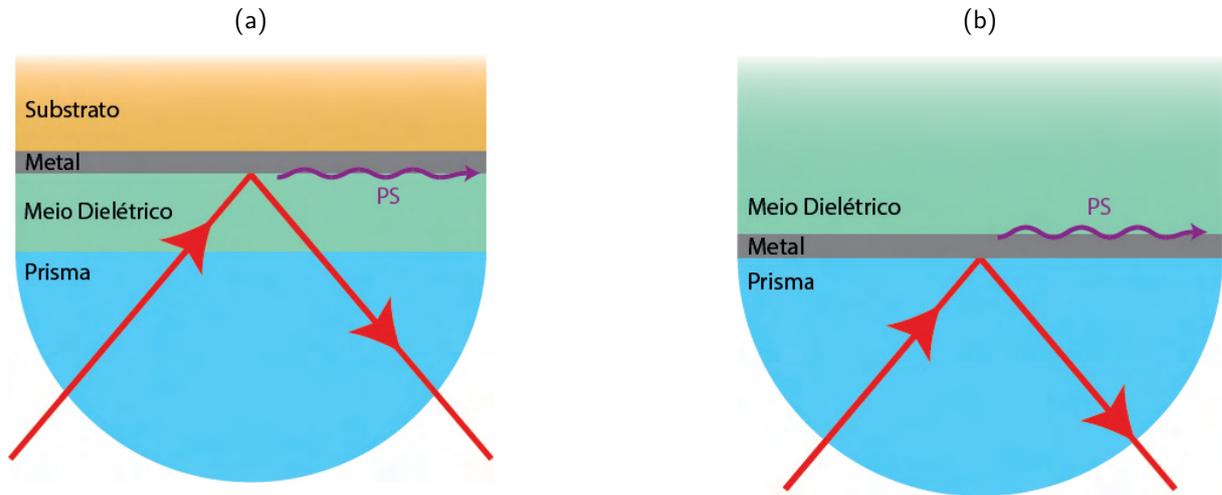
onde k_0 é o número de onda no vácuo, ϵ_{metal} a parte real da permissividade elétrica do metal e ϵ_{diel} a permissividade elétrica do dielétrico. Dado que $\epsilon_{diel} > 0$, a Equação 10 só tem solução real para $\epsilon_{metal} < 0$. Desta forma, a solução da Equação 10 resulta um número de onda $k_{ps} > k_0$. Desta forma, é necessária a utilização de alguns artifícios para suprir o número de onda necessário para excitação do plásmon de superfície.

Pioneiramente, Otto (1968) e Kretschmann (1971) propuseram o mecanismo de reflexão total atenuada, no qual um prisma é adicionado a interface, aumentando o número de onda do campo incidente, tal que a componente k_x , tangencial a interface, possa satisfazer a condição $k_x = k_{ps}$. Na configuração de Otto (1968) o filme metálico é depositado sobre um substrato e fixado a uma distância do prisma, como ilustrado na Fig. 12a. O meio sensoriado, por sua vez, reside na cavidade entre o prisma e o filme metálico. Desta forma, a espessura da região de campo evanescente se torna um parâmetro determinante das características do sensor. Na configuração de Kretschmann (1971) o filme metálico com uma dada espessura é depositado diretamente sobre o prisma, permitindo a incidência direta do feixe de excitação em uma das faces do filme metálico. Por sua vez, a face oposta do filme metálico é exposta ao meio sensoriado, como ilustrado na Fig. 12b. Desta forma, a espessura do filme se torna um parâmetro determinante das características do sensor. Assim, o plásmon de superfície, tanto na configuração de Otto, quanto na configuração de Kretschmann, interage com o meio sensoriado na região de campo evanescente de oscilação.

A configuração de Kretschmann permite a concepção de dispositivos onde se tem fácil acesso à região de sensoriamento, o que torna seu uso conveniente a uma diversidade de aplicações (HOMOLA; YEE; GAUGLITZ, 1999). A configuração de Otto, por sua vez, mostra-se particularmente, mas não exclusivamente, adequada ao sensoriamento em circuitos microfluídicos (BOGUE, 2015; JAVAHIRALY, 2015).

Todavia, um dos maiores obstáculos a ser contornado para implementação de sensores de ponta de fibra utilizando as configurações de Otto (1968) e Kretschmann (1971) é a restrição do ângulo do feixe incidente o qual está intrinsecamente ligado às características ópticas dos materiais utilizados nos dispositivos. Nessas configurações planares, por exemplo, não é possível

Figura 12 – Configurações de Sensores RPS planares: (a) Otto e (b) Kretschmann



Fonte: O Autor

utilizar ângulo de incidência frontal, ou muito raso, para excitar plásmons de superfície, o que dificulta o acoplamento aos guias de onda. Embora, na maioria dos casos, o núcleo da fibra possua um índice de refração suficientemente grande para permitir a excitação de plásmons de superfície, em geral, é necessário recorrer ao uso de prismas ou fibras geometricamente modificadas para se obter o ângulo de incidência requerido (SHARMA; PANDEY; KAUR, 2018).

Uma estratégia que permite a implementação de dispositivos RPS com ângulo de incidência arbitrários é a utilização de grades de difração. Essas estruturas têm uma superfície cujo perfil varia periodicamente em uma ou mais direções ao longo de sua extensão. Dada a natureza não planar da interface, as ondas refletidas e transmitidas resultantes da interação da luz com a superfície da grade se propagam em ângulos diferentes ao do ângulo de incidência do feixe de luz incidente sobre a superfície (RAYLEIGH, 1907). Fenômeno esse, conhecido como difração. Como resultado desse fenômeno de interferência, em grade planas de periodicidade singular, as ondas transmitidas e refletidas assumem um conjunto discreto de ordens de difração, como ilustrado na Fig. 13. Assim, para uma interface de período Λ , como a ilustrada na Fig. 13, o número de onda da grade, pode ser definido por (FONTANA, 2004)

$$k_g \equiv \frac{2\pi}{\Lambda}. \quad (11)$$

A componente x do número de onda da m -ésima ordem de difração é dada por

$$k_m = n_1 k_0 \sin\theta + m k_g, \quad (12)$$

em que k_0 e θ representam, respectivamente, o número de onda no vácuo e o ângulo da onda

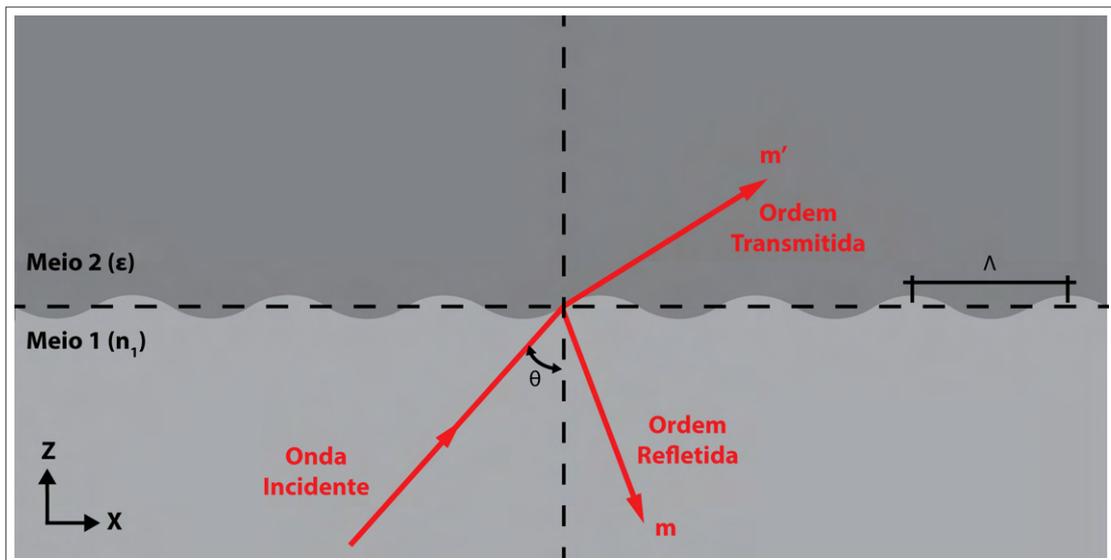
incidente e $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ o índice de refração do meio de entrada. Desta forma, a componente x das ordens de difração pode ser manipulada para coincidir com a constante de propagação $k_{0_{sp}}$ da RPS. Assim, admitindo um regime de pequenas perdas, ou seja, $\epsilon''/\epsilon' \ll 1$, pode-se obter a aproximação

$$n_1 \sin \theta_{sp} + \frac{m\lambda}{\Lambda} = \pm \sqrt{\frac{\epsilon' \epsilon_1}{\epsilon' + \epsilon_1}}, \quad (13)$$

onde θ_{sp} é uma aproximação do ângulo de ressonância. Os sinais de mais e menos indicam plásmon de superfície propagando-se ao longo das direções x e $-x$, respectivamente. ϵ_1 é a permissividade elétrica do meio de entrada e a permissividade elétrica do metal é definida por

$$\epsilon_{metal} = \epsilon' - j\epsilon''. \quad (14)$$

Figura 13 – Representação do efeito da difração em uma grade.



Fonte: O Autor

3.2 REVISÃO DA LITERATURA

Com o objetivo de compreender os avanços recentes em sensores baseados em RPS que utilizam grades de difração, foi realizada uma revisão sistemática por busca exaustiva em três das mais relevantes bases de dados sobre o tema, *IEEE*, *Scopus* e *Web of Science*, como descrito com mais detalhes no Apêndice A.

Dentre outras informações, os artigos foram categorizados conforme o método utilizado para fabricação da grade. Seis dos 19 artigos analisados, assim como o realizado no grupo de

trabalho que inclui essa tese, em (FONTANA, 2004), utilizaram como base o padrão nanométrico existente em CD-Rs ou DVD-Rs. Dentre esses, 3 trabalhos se destacam por utilizarem ângulo de incidência normal, similar ao que se pretende explorar nesse trabalho. Todavia, diferentemente do almejado neste trabalho, o trabalho apresentado em Kadhim et al. (2022) realiza a aferição da variação da transmitância através de uma grade semitranslúcida, fabricada com filme fino de ouro sobre um substrato de policarbonato. Para produzir essa variação de transmitância, expôs-se a superfície da grade a diferentes concentrações de dopamina, utilizada como analito. Embora tenha-se alcançado resultados interessantes, a configuração utilizada nos experimentos dificulta a comparação direta com o que se pretende obter nesse estudo.

Com configurações mais próximas ao estudado nesse trabalho, Ni et al. (2022) e Choi et al. (2021) tiveram como base a aferição do espectro de reflexão da grade, tendo-se em Ni et al. (2022) uma grade metalizada com prata [Ag] e Choi et al. (2021) metalizada com ouro [Au]. Contudo, nenhum dos trabalhos descreve com precisão o método utilizado para o alinhamento do feixe incidente e a captura do feixe refletido, objetivos importantes deste trabalho. Apesar disso, ambos os trabalhos apresentam resultados experimentais condizentes com o teorizado, constituindo mais um indicativo da viabilidade das estratégias escolhidas para este trabalho.

Em Choi et al. (2021), é descrito o processo de fabricação de uma grade a partir de uma amostra recortada de um DVD-R. Nesse a camada protetora, constituída por um corante orgânico, é removida quimicamente, submetendo-a a lavagem com etanol. Posteriormente, o filme de alumínio também é removido quimicamente, ao ser exposto ao ácido nítrico por 10 minutos. Ao filme de policarbonato remanescente, que contém o padrão periódico da grade, foi, então depositada uma camada de 5 nm de espessura de cromo [Cr] e, em seguida, uma camada de 50 nm de espessura de Au, ambas utilizando processo de *Sputtering*. Para averiguar o desempenho da grade para o sensoriamento, foi utilizado o metanol como analito. Assim como na maioria dos trabalhos revisados nesta secção, a sensibilidade foi definida como a variação do comprimento de onda central da RPS. dada a variação do índice de refração, alcançando-se a sensibilidade de $S(d\lambda/dn) = 956.57nm/RIU$.

Assim como em Choi et al. (2021), em Ni et al. (2022) a remoção da camada protetora de corante foi realizada quimicamente, pela lavagem com etanol. A camada de Al presente no DVD-R, contudo, foi removida mecanicamente. Um filme metálico Ag com espessura de 125nm, por sua vez, foi formado por meio do derretimento de nanopartículas de Ag depositadas na superfície do substrato de policarbonato. Acima dessa camada de Ag, foi depositada ainda uma camada espaçadora com 280 nm de espessura de poliestireno, seguida por uma camada

plana com 25 nm de espessura de Ag. Segundo Ni et al. (2022), essa segunda camada foi adicionada objetivando confinar as ondas difratadas de mais altas ordens e conferir maior estabilidade ao efeito de RPS. Apesar disso, possivelmente devido à escolha da Ag, de menor custo, a sensibilidade obtida, $S(d\lambda/dn) = 494nm/RIU$, foi inferior à relatada por Choi et al. (2021).

Tratando-se ainda de sensibilidade, dentre os demais trabalhos baseados em DVD-R, com ângulos de incidência oblíquos, destacasse o trabalho relatado em Choi et al. (2022), o qual relatou uma sensibilidade máxima alcançada de $S(d\lambda/dn) = 887,59nm/RIU$. Além da elevada sensibilidade, próxima ao relatado em Choi et al. (2021), Choi et al. (2022) também apresenta o método utilizado para replicação do padrão periódico na superfície de policarbonato do DVD-R. Nesse, após deposição do filme de ouro sobre o substrato de policarbonato, uma camada de resina epóxi é adicionada a outra extremidade do filme de ouro. Após a cura da resina, juntamente com esta, o filme de ouro é delaminado do substrato de policarbonato, mantendo o padrão periódico replicado do DVD-R.

Além de Choi et al. (2022), Long et al. (2022) também apresenta um método de replicação do padrão periódico presente no DVD-R. Nesse uma camada de Dimetil Polissiloxano (PDMS), um polímero de silicone translúcido, é aplicada sobre o substrato de policarbonato do DVD-R. Após a cura do material, o PDMS contendo uma réplica do padrão periódico do DVD-R, é separado mecanicamente do substrato de policarbonato. Finalmente, é depositada sobre o PDMS um filme fino de Cr, seguido por um filme de Au.

Embora não tenha relatado sua origem da grade utilizada como matriz, Lertvachirapaiboon et al. (2021a) descreve a metodologia utilizada para replicar o padrão de uma grade constituída de PDMS, similar à apresentada por Long et al. (2022), sobre uma das faces de um prisma. Para isso, uma camada de resina Ultravioleta (UV) foi depositada sobre a superfície do prisma. Subsequentemente, a grade de PDMS foi posicionada sobre a resina. Após a cura da resina, a grade de PDMS foi removida mecanicamente, expondo o padrão periódico formado na resina, então coberta por uma fina camada de ouro, formada por evaporação.

Embora a replicação de padrões nanométricos não faça parte do escopo deste trabalho, ambas as técnicas se mostram factíveis e potencialmente aplicáveis a trabalhos futuros. Quanto aos trabalhos que relatam o método de fabricação do padrão periódico da grade, podemos os organizar conforme a técnica utilizada, em quatro categorias, crescimento cristalino, feixe de partículas, litografia a laser e interferometria, descritas com mais detalhes no apêndice A.

3.3 PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE INTERFACE SENSORA UTILIZANDO RPS EM GRADE DE DIFRAÇÃO

Intrinsecamente ligado às características ópticas do meio estudado, que, em geral, estão além do controle do projetista, o ângulo de incidência é um dos parâmetros mais limitantes no projeto de sensores RPS com interface plana, seja na configuração de Otto (1968) ou Kretschmann (1971). Como mencionado anteriormente, uma forma de contornar essa limitação se dá pelo emprego de superfícies não planares, ou seja, pelo uso de grades de difração. Dentre outras variáveis, os ângulos dos modos de difração são determinados pela periodicidade da grade. Assim, tendo-se o controle do período, é possível se obter RPS com qualquer ângulo de incidência, incluindo o ângulo de incidência normal, característico da arquitetura dos sensores estudados nesse trabalho.

Tendo-se isso em vista, essa secção apresenta resultados referentes ao projeto e otimização de interfaces sensoras utilizando RPS em grade de difração. Assim, essa secção se encontra subdividida em quatro subsecções. A primeira subsecção apresenta os modelos das configurações utilizadas, bem como o resultado de otimizações realizadas utilizando esses modelos. A segunda subsecção apresenta os resultados de um estudo mais aprofundado sobre a influência dos parâmetros geométricos da grade na sensibilidade da interface sensora, incluindo uma análise crítica dos resultados e a inferência de tolerâncias. A terceira subsecção apresenta, passo a passo, a estratégia de fabricação utilizando nanolitografia óptica, a qual se pretende utilizar para fabricação da grade otimizada projetada na subsecção anterior. Por fim, a subsecção quatro apresenta os resultados de simulações referentes à grade comercial utilizada nos experimentos desta tese.

3.3.1 Otimização de interfaces sensoras utilizando RPS em grade

Como discutido na secção anterior, dependendo da técnica de fabricação utilizada, a superfície que caracteriza uma grade de difração pode assumir diversas formas, podendo variar de simples ranhuras a padrões mais complexos. Invariavelmente, contudo, as grades de difração são formadas por estruturas periódicas, de forma que, teoricamente, todos esses padrões podem ser modelados matematicamente por uma soma de funções senoidais, ou seja, utilizando séries de Fourier. Em geral, a resposta da grade é majoritariamente influenciada pela sua componente de primeira ordem, ou seja, por uma senoide com período idêntico ao da

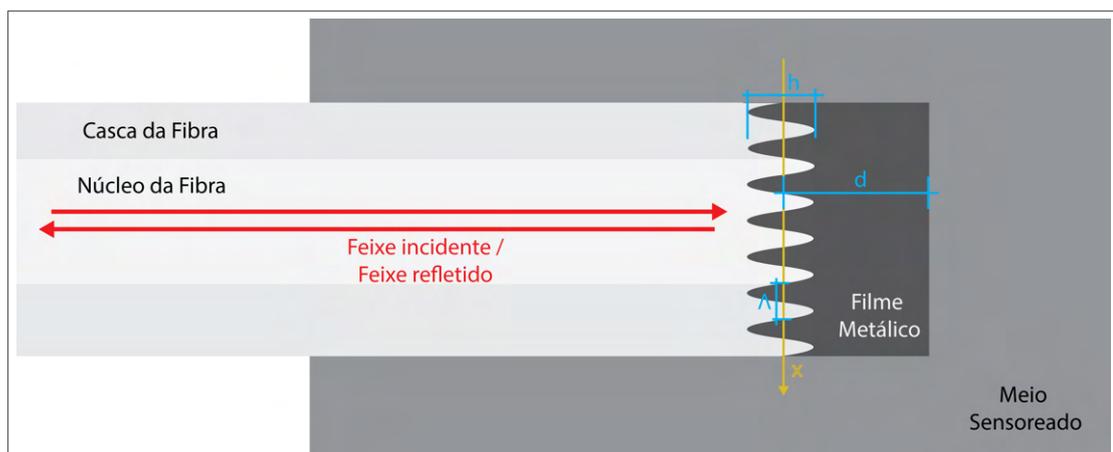
periodicidade da grade. Tendo-se isso, por simplicidade, os estudos computacionais apresentados nesta secção assumem grades de difração senoidais modeladas por uma superfície tendo o seguinte perfil:

$$s(x) = h \sin\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \quad (15)$$

onde h e Λ são, respectivamente, a amplitude e a periodicidade da grade.

Desta forma, o software de simulação SPRinG (MELO; FONTANA, 2012) foi utilizado para simular e obter os parâmetros otimizados para duas configurações, aqui também denominadas de Otto e Kretschmann, em correlação com as configurações propostas originalmente por Otto (1968) e Kretschmann (1971). Como ilustrado na Fig. 14, assim como na configuração de Kretschmann (1971) original, na configuração de Kretschmann modelada neste trabalho, o filme metálico se encontra depositado entre o meio de onda incidente, ou seja, o núcleo da fibra, e o meio sensoriado. Entretanto, a configuração de Kretschmann modelada neste capítulo apresenta uma interface entre a fibra e o metal não plana, caracterizada pela senoide da Equação 15. Com isso, a espessura do filme metálico, d , é definida pela distância entre a interface plana formada pelo metal e o meio sensoriado e o plano médio da senoide que caracteriza a interface formada pela ponta da fibra e o filme metálico.

Figura 14 – Configuração de Kretschmann com grade de difração.

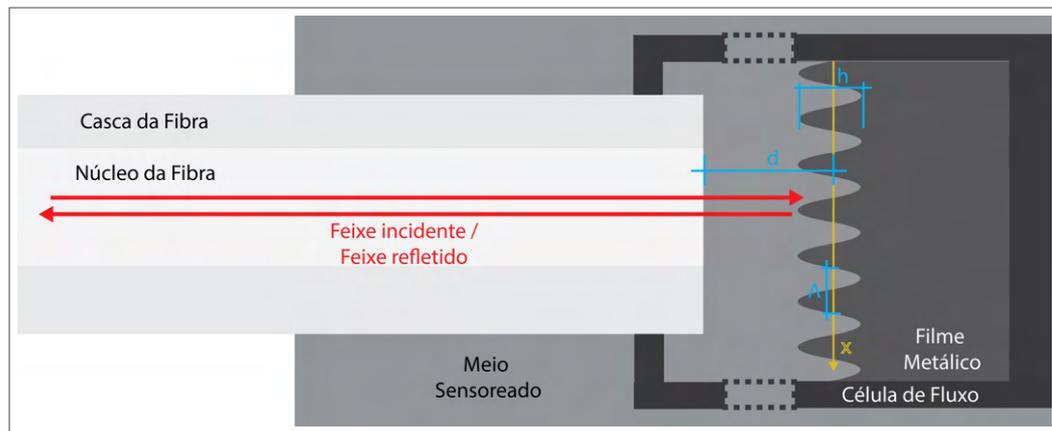


Fonte: O Autor.

Como ilustrado na Fig. 15, assim como na configuração de Otto (1968) original, na configuração de Otto modelada neste trabalho, um filme metálico, com espessura maior que a profundidade de penetração da luz incidente, é depositado sobre um substrato, cujas características ópticas não interferem na RPS, e posicionado a uma distância d da fibra, tendo-se o meio sensoriado localizado entre a fibra e o filme metálico. Contudo, a configuração de

Otto modelada neste trabalho apresenta uma interface periódica entre o meio sensoriado e o metal, caracterizada pela senoide da Equação 15. Nesse caso a distância d entre as interfaces é definida como a distância entre o ponto médio da senoide e a ponta da fibra incluindo o filme metálico.

Figura 15 – Configuração de Otto com grade de difração



Fonte: O Autor.

Para facilitar a comparação com outros resultados apresentados neste trabalho, as simulações apresentadas adotam uma fonte de luz com comprimento de onda $\lambda = 780nm$, onde foram analisadas as reflectâncias referentes apenas às difrações de ordem zero, as quais retornam, de forma contra-propagante, com um ângulo normal a interface, permitindo seu acoplamento à fibra. Pelo mesmo motivo, admitiu-se a fibra como constituída de sílica, utilizando-se os parâmetros ópticos relatados por Malitson (1965). Quanto ao filme metálico, foram estudados os comportamentos referentes a quatro metais, ouro, prata, alumínio e cobre, cujas características ópticas foram extraídas de Weaver et al. (1981). Ainda, foi considerado um meio sensoriado aquoso, ou seja, $n \approx 1,33$ (DAIMON; MASUMURA, 2007).

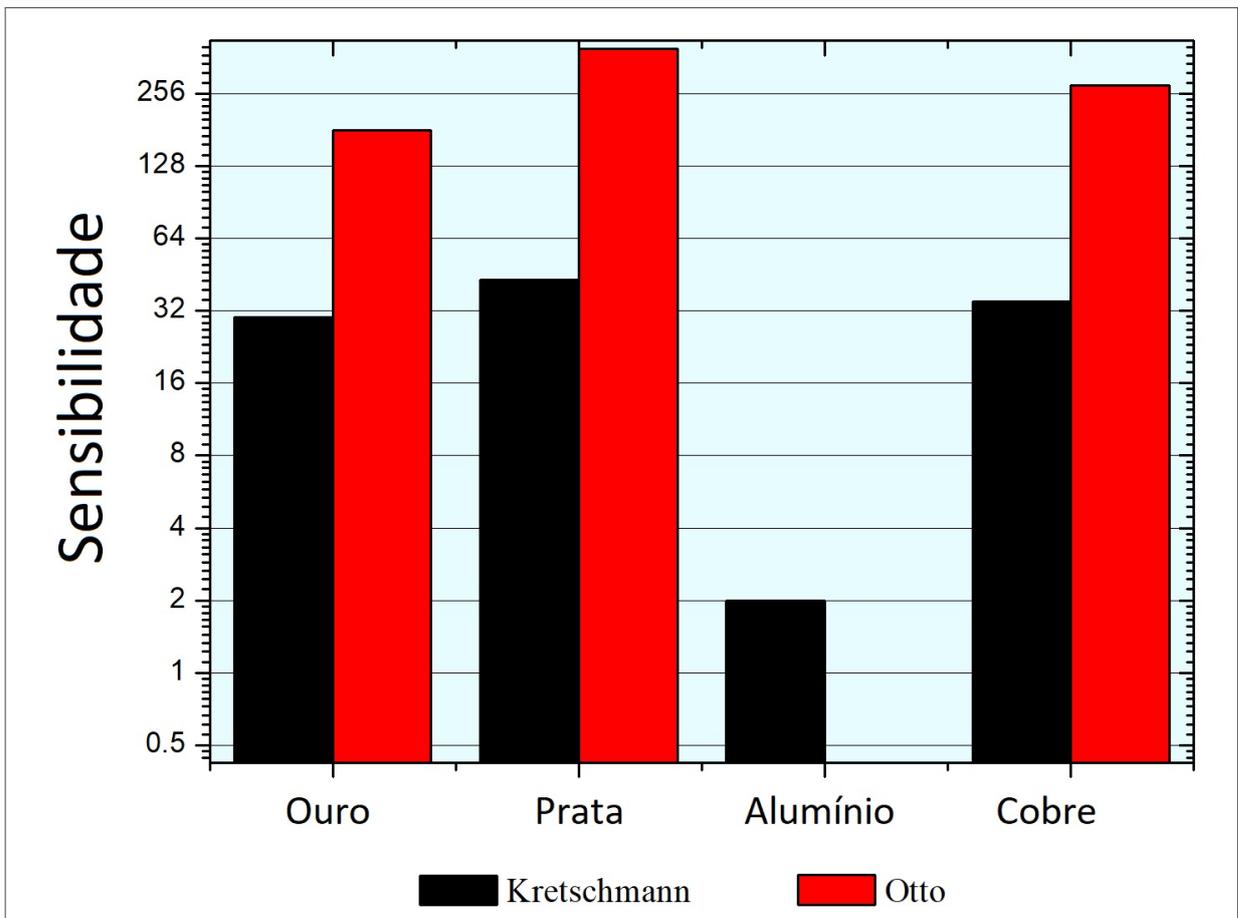
A Tabela 1, apresenta os resultados computacionais, também ilustrados graficamente na Fig. 16, das otimizações realizadas para configuração de Kretschmann com os quatro metais, ouro, prata, alumínio e cobre, e para configuração de Otto com três metais, ouro, prata e cobre.

As configurações com o metal de maior condutividade, a prata, obtiveram maior sensibilidade. Além disso, as simulações com a configuração de Otto apresentaram sensibilidades maiores que suas contrapartes com a configuração de Kretschmann, chegando a atingir valores quase 200.000 vezes maiores que a interface de ponta de fibra nua, para configuração de Otto com filme de prata. A configuração menos sensível otimizada, Kretschmann com filme

Tabela 1 – Sensibilidades e Parâmetros Otimizados de Sensores RPS com Grade de Difração

Parâmetro	Kretschmann				Otto		
	Au	Ag	Al	Cu	Au	Ag	Cu
Amplitude (nm)	20,42	17,51	34,70	23,46	7,000	6,088	6,039
Periodicidade (nm)	560,3	566,2	374,5	561,6	561,7	567,8	564,3
Espessura (nm)	67,73	44,69	34,98	49,74	1680	1701	1689
Sensibilidade	30	43	2	35	180	392	276

Figura 16 – Sensibilidade de interfaces com parâmetros otimizados para diferentes filmes metálicos



Fonte: O Autor.

de alumínio, por sua vez, atingiu valores aproximadamente 1000 vezes maiores que os encontrados para a interface de fibra nua. Utilizando-se da mesma extrapolação apresentada nas seções anteriores, é possível prever que, com a adição de uma interface sensora com grade de difração, o sensor de retroreflexão estudado neste trabalho atinja um limite de detecção de até 10^{-6} unidades de reflectância, ou seja, um desempenho similar ao estado da arte.

Embora a sensibilidade seja um bom indicativo das possibilidades de um sensor, a prototipação de uma matriz de grade de difração otimizada representa um custo significativo. Tendo

isso em vista, o estudo computacional abordado na subsecção a seguir analisa a influência dos parâmetros geométricos da grade de difração na sensibilidade do sensor, de modo a tentar determinar as tolerâncias adequadas para esses parâmetros.

3.3.2 Estudo dos parâmetros e tolerâncias de fabricação de grades de difração para sensores baseados em RPS

Embora o SPRinG, software de simulação utilizado neste trabalho, seja muito mais eficiente que outros métodos mais generalistas, como, por exemplo, elementos finitos, utilizados em alguns softwares comerciais, a realização de um estudo aprofundado com a variação de mais de um parâmetro requer um esforço computacional elevado. Assim, decidiu-se restringir os estudos computacionais dessa secção a apenas um metal, o ouro. Embora, como mostra a Tabela 1, a prata e o cobre, teoricamente, possam atingir sensibilidades maiores. Dadas algumas de suas úteis características, em especial sua inércia química, o ouro costuma ser o metal mais utilizado em sensores RPS. Como nas simulações anteriores, nesta secção, admitiu-se a fibra como constituída de sílica e como meio sensoriado a água. Assim, as características ópticas utilizadas neste estudo foram adquiridas como apontado nas subsecções anteriores. Diferentemente dos outros estudos computacionais deste trabalho, tendo em vista, dentre outras questões, a disponibilidade de equipamentos, nos estudos apresentados nesta secção, optou-se por usar como referência o comprimento de onda de 980 nm.

Desta forma, as simulações, apresentadas nesta secção, tem como referência os parâmetros otimizados obtidos especificamente para esse estudo, apresentados na Tabela 2. Assim, inicialmente, de forma a reduzir os esforços computacionais, foram executadas simulações variando separadamente cada parâmetro da grade, mantendo os outros parâmetros geométricos com os valores otimizados. Além disso, juntamente com cada parâmetro da grade, variou-se o comprimento de onda incidente, de maneira a se obter a sensibilidade máxima e o respectivo comprimento de onda ótimo para qual essa sensibilidade máxima ocorre.

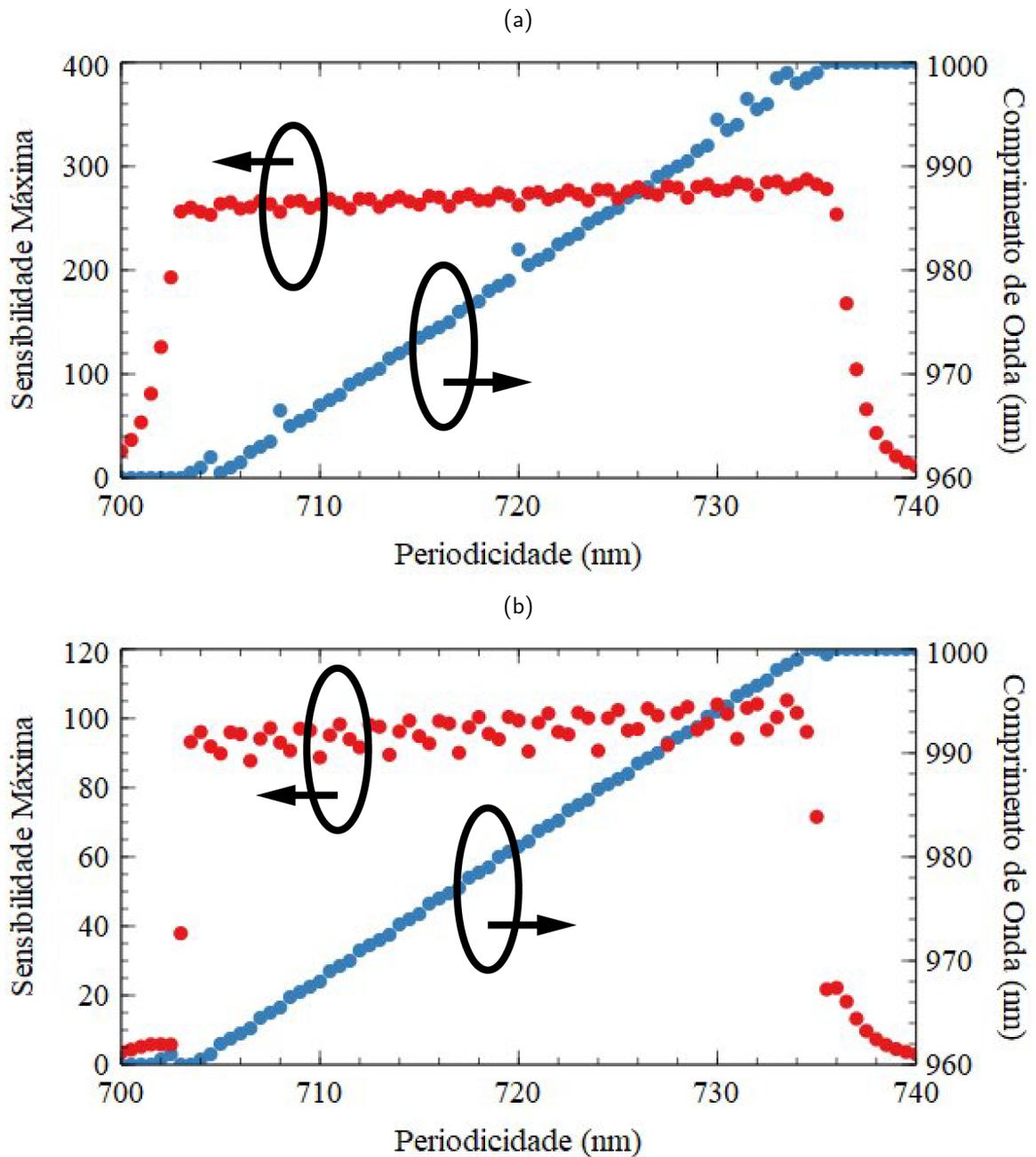
Tabela 2 – Parâmetros Otimizados para grade de ouro e comprimento de onda de 980 nm.

	Amplitude (nm)	Periodicidade (nm)	distância (nm)	Sensibilidade
Kretschmann	40	718	79	118
Otto	7	719	1794	326

As Fig. 17a e 17b ilustram a influência da periodicidade da grade na sensibilidade máxima,

e o comprimento de onda ótimo, em uma interface sensora nas configurações de Otto e Kretschmann, respectivamente. Como esperado, em ambos os casos, dentro do alcance estudado, ou seja, para pequenas variações em relação à periodicidade otimizada, o comprimento de onda ótimo encontrado é diretamente proporcional à periodicidade da grade. Em ambos os gráficos, também é possível identificar duas quedas abruptas de sensibilidade as quais ocorrem nos limites inferiores, 960 nm, e superiores, 1000 nm, do alcance do comprimento de onda deliberado para este estudo. É possível identificar, ainda, em ambos os gráficos, dentro do alcance de comprimento de onda adotado, uma pequena variação periódica da sensibilidade. Essa variação deve-se ao fato da simulação atribuir valores discretos ao comprimento de onda, com um passo de 0,5 nm, o que ocasiona discrepâncias entre os comprimentos de onda ótimos encontrados nas simulações e os comprimentos de onda ótimos teoricamente possíveis.

Figura 17 – Influência da periodicidade na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade: (a) configuração de Otto; (b) configuração de Kretschmann (GÓIS et al., 2020).

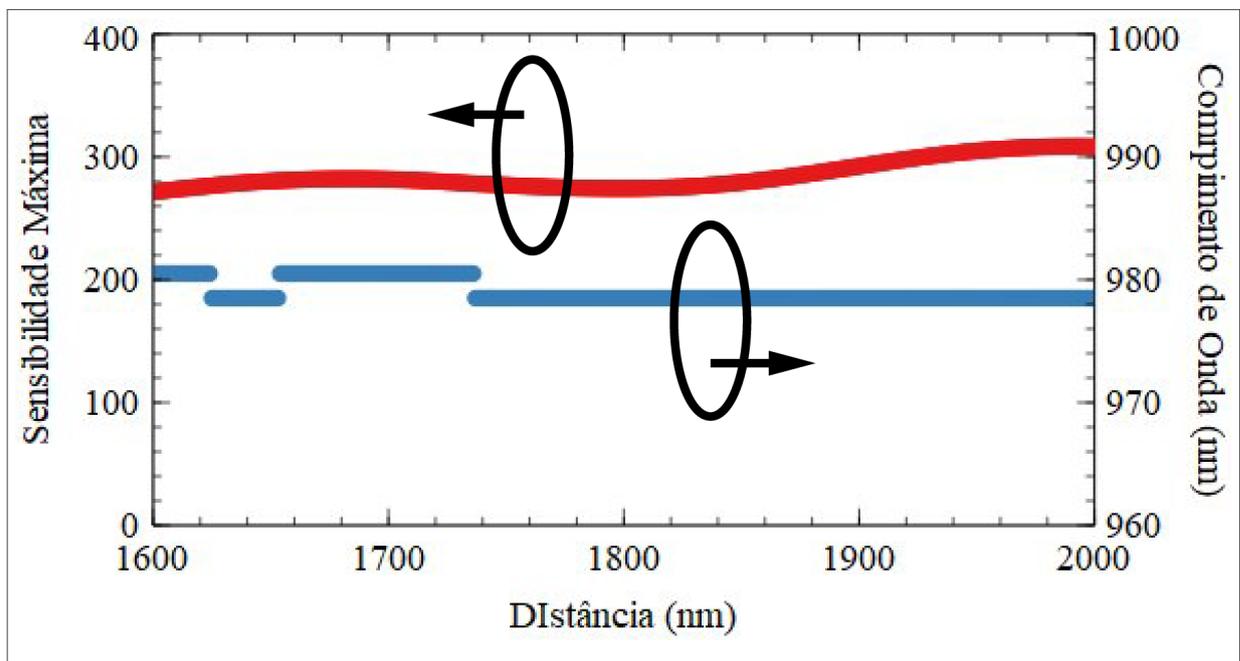


Fonte: O Autor (2020).

Em geral, os gráficos da Fig. 17 ressaltam os benefícios da utilização de um sistema com comprimento de onda ajustável capaz de se adequar a variações de periodicidade inerentes aos processos de fabricação da grade. Preferencialmente, esse sistema deve ser projetado de modo que o alcance seja superior à tolerância admitida na fabricação da grade e ter uma precisão sub-nanométrica. Esses requisitos podem ser atingidos, por exemplo, por meio de tunabilidade térmica em lasers (FERNANDES et al., 2022).

A Fig. 18 ilustra a influência da distância sobre a sensibilidade máxima, e o comprimento do onda ótimo, de uma interface sensora com grade na configuração de Otto. Como se pode visualizar no gráfico, dentro da faixa de valores estudada, ou seja, para pequenas variações em relação à distância ótima, a distância apresenta uma influência praticamente desprezível no desempenho da interface sensora. Isso se deve, provavelmente, ao fato de que, com a adição da grade, os ângulos de difração se tornam o fator predominante para obtenção do número de onda necessário para excitação de RPS.

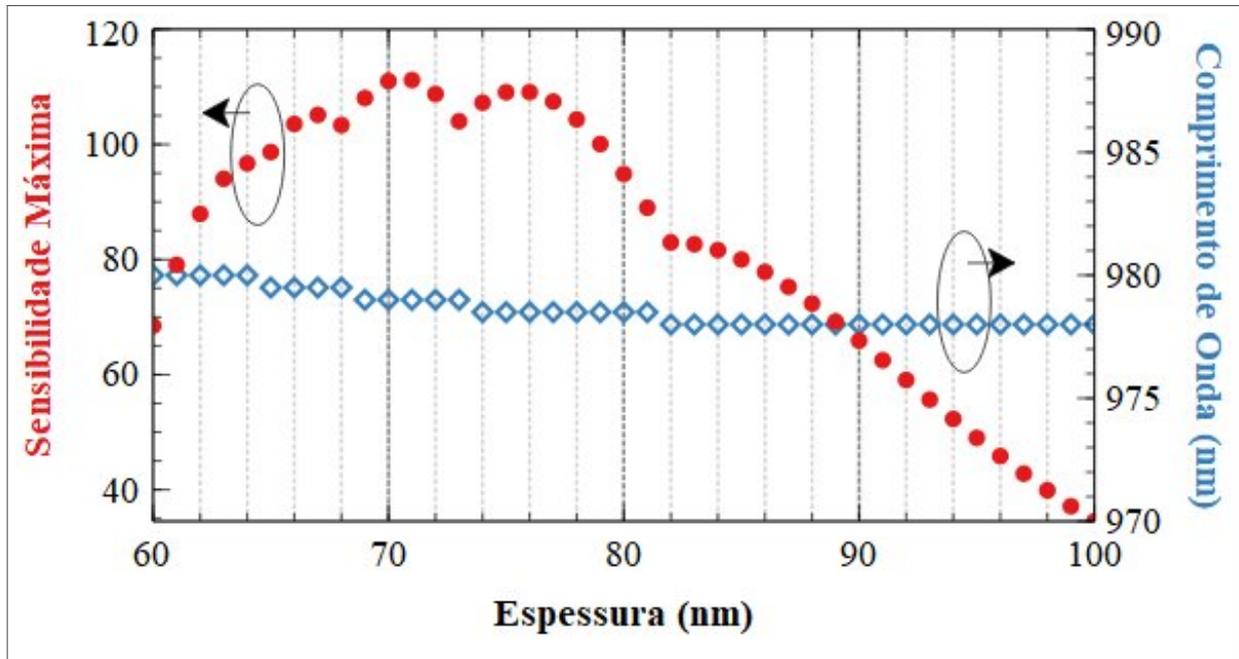
Figura 18 – Influência da distância na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).



Fonte: O Autor (2020).

A Fig. 19 ilustra a influência da espessura do filme metálico sobre a sensibilidade máxima, e o comprimento de onda ótimo, de uma interface sensora com grade na configuração de Kretschmann. Como se pode visualizar no gráfico, a espessura do filme apresenta pouca influência sobre o comprimento de onda ótimo. Assim como nas Fig. 17a e 17b, referentes à periodicidade, a curva de sensibilidade máxima por espessura apresentou pequenas distorções que coincidem com a alteração no comprimento de onda ótimo e podem ser atribuídas às limitações da metodologia utilizada nas simulações. Em geral, com o ajuste adequado do comprimento de onda, o modelo se mostra tolerante a variações na espessura do filme fabricado, podendo-se identificar uma faixa de espessuras de aproximadamente 10nm , onde a sensibilidade máxima se mostra relativamente estável.

Figura 19 – Influência da espessura na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).

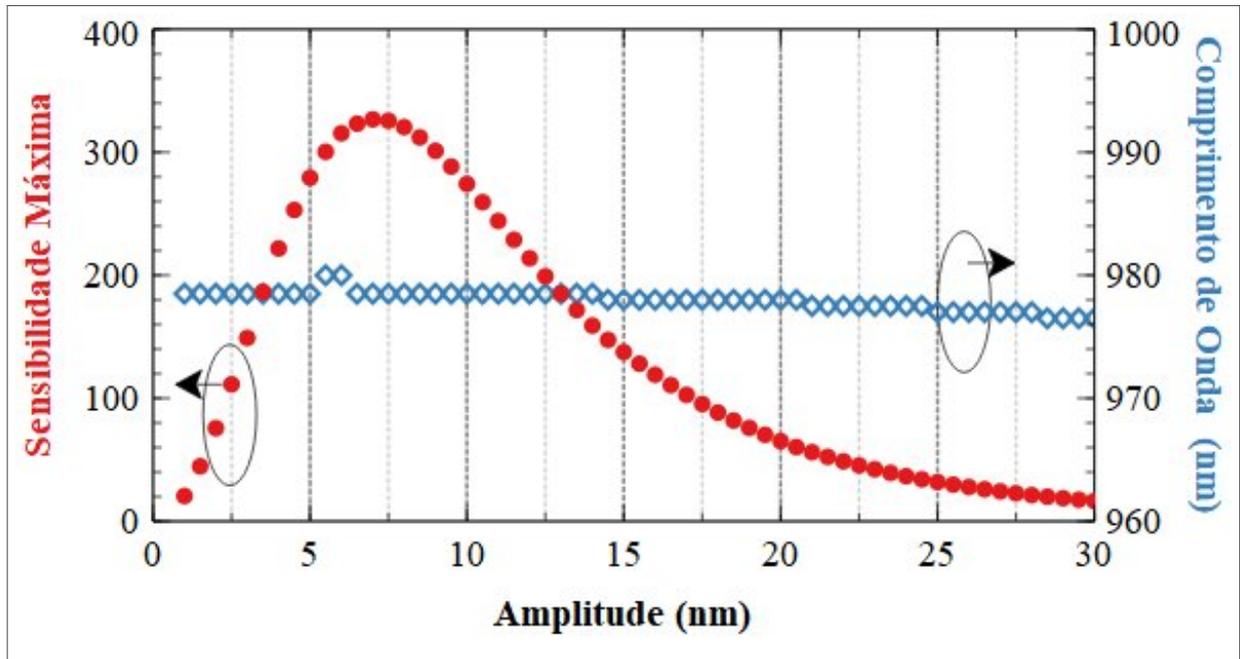


Fonte: O Autor (2020).

A Fig. 20 ilustra a influência da amplitude da grade sobre a sensibilidade máxima, e o comprimento de onda ótimo, de uma interface sensora com grade na configuração de Otto. Como é possível visualizar no gráfico, a amplitude da grade apresenta uma influência praticamente desprezível em relação ao comprimento de onda ótimo, permanecendo estável na região de maior sensibilidade máxima. A curva da sensibilidade máxima, por sua vez, apresenta um pico relativamente agudo, tendo-se a sensibilidade máxima caindo pela metade com discrepâncias inferiores a $\pm 5nm$ em relação a amplitude ótima. Desta forma, as simulações indicam a criticidade do controle da amplitude na fabricação de grade para sensores com a configuração de Otto.

A Fig. 21 ilustra a influência da amplitude da grade sobre a sensibilidade máxima, e o comprimento do onda ótimo, de uma interface sensora com grade na configuração de Kretschmann. Em comparação com a grade projetada para uso na configuração de Otto, a grade projetada para configuração de Kretschmann se mostra bem mais tolerante a discrepâncias em sua amplitude, tolerando variações de $\pm 10nm$ sem queda significativa na sensibilidade máxima. Assim como em curvas referentes a outros parâmetros, a curva de sensibilidade máxima por amplitude da grade projetada pra configuração de Kretschmann apresentou pequenas distorções que coincidem com a alteração no comprimento de onda ótimo e podem ser atribuídas as limitações da metodologia utilizada nas simulações.

Figura 20 – Influência da amplitude na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).



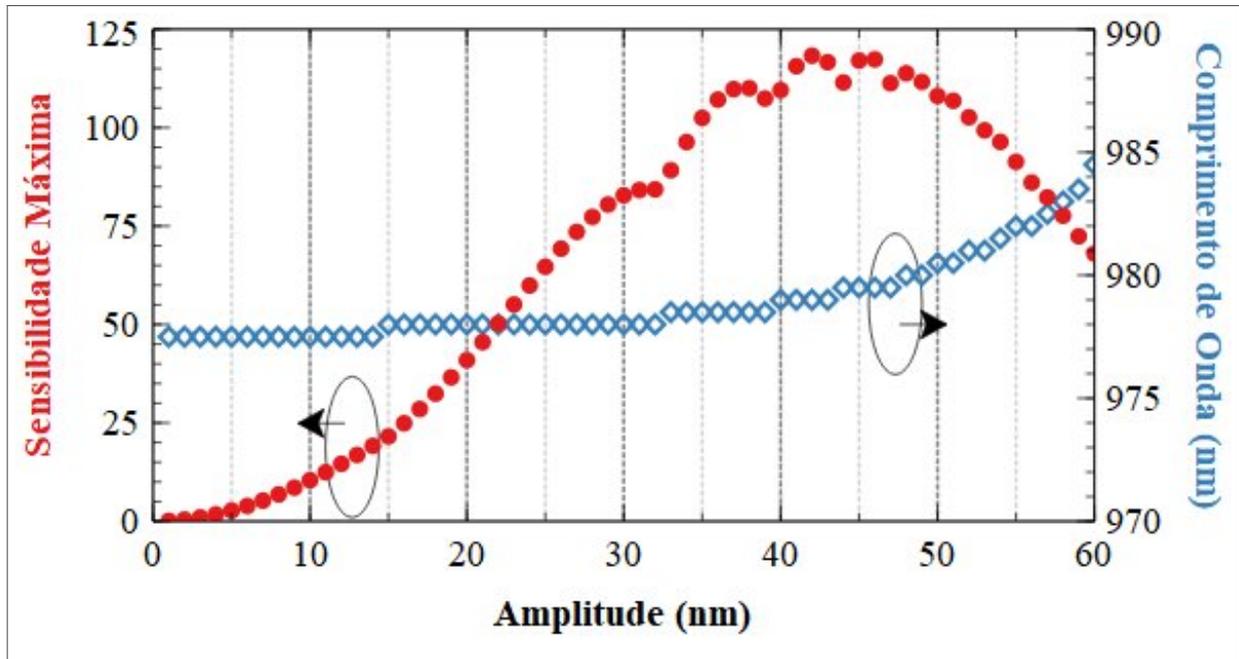
Fonte: O Autor (2020).

Todavia, a curva da Fig. 21 apresenta uma correlação não desprezível entre a amplitude e o comprimento de onda ótimo, corroborando ainda mais para a necessidade da utilização de um sistema de comprimento de onda ajustável e indicando a possibilidade da correlação do efeito da amplitude com outros parâmetros da grade. Tendo isso em vista, foram realizadas simulações variando concomitantemente a amplitude e a espessura, quando o comprimento de onda permaneceu constante com o valor de 980nm e os outros parâmetros permaneceram com os valores otimizados para a configuração de Kretschmann encontrados na Tabela 2.

A Fig. 22 ilustra a influência da amplitude da grade sobre a sensibilidade máxima, e a espessura do filme metálico ótima para a qual essa sensibilidade máxima ocorre, de uma interface sensora com grade na configuração de Kretschmann. Como se pode visualizar no gráfico, a amplitude apresenta uma relação de proporcionalidade com a espessura ótima. A curva da sensibilidade máxima, por sua vez, se apresenta menos abrupta em comparação a sua contraparte exposta na Fig. 21. Caso, em geral, a metalização da grade ocorra após a implementação de seu padrão periódico, com ajuste adequado da espessura do filme metálico, é possível tornar o processo de fabricação ainda mais tolerante a discrepâncias na amplitude da grade.

Embora o estudo apresentado nesta subsecção tenha sido realizado com base em um comprimento de onda específico, 980nm , é esperado que as conclusões obtidas através da análise

Figura 21 – Influência da amplitude na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade na configuração de Kretschmann (GÓIS et al., 2020).

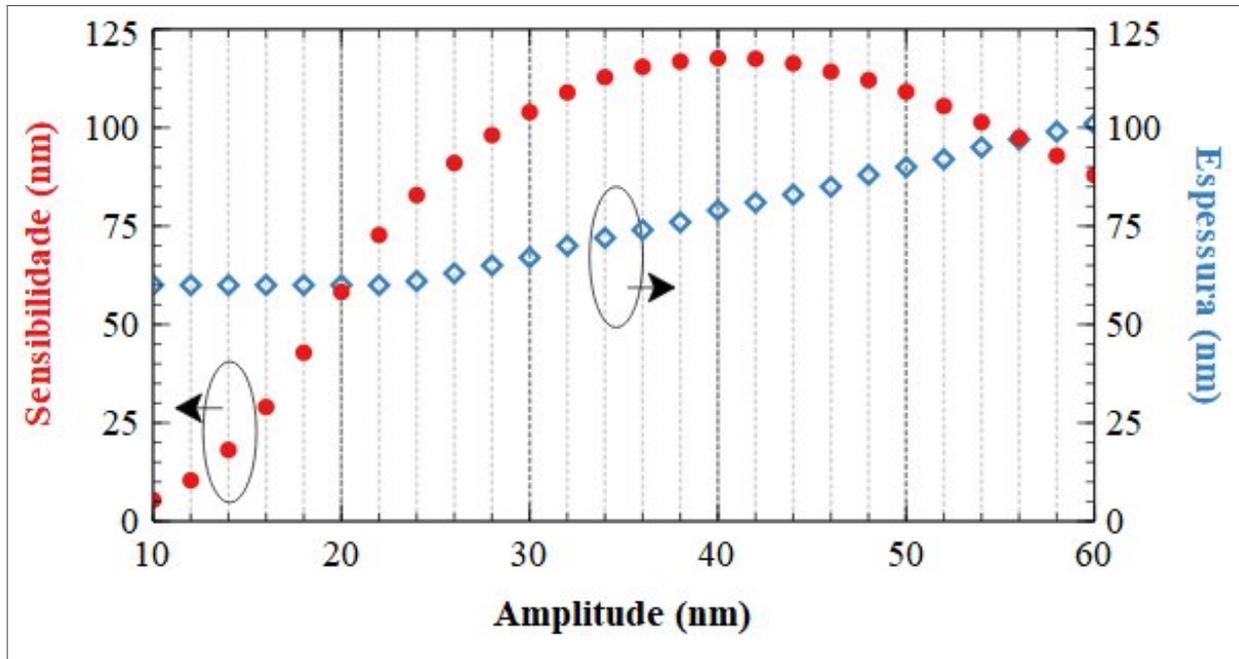


Fonte: O Autor (2020).

dos resultados das simulações possam ser extrapoladas para projetos futuros com quaisquer comprimentos de onda no espectro visível ou infravermelho. Assim, embora não seja possível inferir diretamente os parâmetros ótimos e tolerâncias de novos projetos com precisão, sendo necessárias novas simulações, é possível tomar esse estudo como base para determinar questões de interesses prioritários. Por exemplo, dada a correlação da periodicidade da grade, o ajuste do comprimento de onda de operação se mostra, independente da configuração escolhida, essencial para implementação de um sensor com grade. Além disso, é possível determinar a precisão na amplitude como um fator prioritário na fabricação de uma grade para configuração de Otto, tendo-se a distância como um fator menos predominante. Já para grades a serem utilizadas em configurações de Kretschmann, é importante salientar a correlação entre os efeitos da amplitude da grade e a espessura do filme metálico, os quais podem ser utilizados para facilitar a concepção de sensores com maiores sensibilidades.

Tendo esses aspectos em vista, a subseção a seguir apresenta uma estratégia de fabricação de grade de difração, a qual se pretende futuramente empregar para implementação de um sensor utilizando a configuração de Otto.

Figura 22 – Influência da distância na sensibilidade e comprimento de onda ótimo em uma interface sensora com grade de configuração de Otto (GÓIS et al., 2020).



Fonte: O Autor (2020).

3.3.3 Estratégia de fabricação de grade de difração otimizada para sensor RPS

Como discutido neste capítulo, em geral, o processo de fabricação em massa de grades de difração pode ser dividido em duas partes, a nanofabricação da matriz e a replicação da grade. Resumidamente, a replicação consiste na transferência não destrutiva de um padrão já presente em uma grade previamente nano-fabricada utilizada como matriz. Comumente, a replicação do padrão periódico presente na matriz é feita por estampagem ou pela deposição de uma camada de material que é separada da matriz sem causar danos à grade, permitindo a reutilização da matriz.

Contudo, dada a necessidade de precisões nanométricas, abordadas na sub-seção anterior, a fabricação de matrizes otimizadas para grades utilizadas em sensores requer a utilização de técnicas mais complexas. Dentre essas técnicas se destacam a holografia, a litografia por feixe de íons, a litografia óptica, abordadas com mais detalhes no Apêndice A. Altamente empregada na indústria de semicondutores, a litografia óptica pode ser utilizada na implementação de uma diversidade de geometrias em escala nanométrica, sejam elas periódicas ou não. Assim, essa subseção propõe uma estratégia específica para fabricação de uma matriz de grades de difração para sensores na configuração de Otto com a utilização de litografia óptica. A Fig. 23 ilustra, através de esboços de vistas laterais, as sete etapas que compõem a estratégia de

fabricação da matriz de grade proposta, as quais estão descritas a seguir.

1. Preparação do substrato:

Dado que as características ópticas do substrato não interferem no desempenho da interface sensora, esse pode ser constituído por qualquer material quimicamente inerte que possua a rigidez mecânica necessária para sua manipulação e polimento, como por exemplo, uma lâmina de vidro ou silício. Após o polimento inicial da lâmina, a cavidade com a distância de Otto d pode ser obtida por abrasão mecânica, foto ablação ou corrosão, a qual deve ser plana e lisa o suficiente para não afetar o padrão periódico final da grade.

2. Deposição de filme espesso de ouro:

Dada a dificuldade de se promover a aderência com o substrato, a deposição de ouro necessita ser precedida da deposição de um filme de cromo, ou titânio, com uma espessura mínima de $2nm$. Após a deposição do filme de adesão, é depositada uma camada de ouro com espessura muito maior que a profundidade de penetração do ouro, ou seja, de no mínimo $100nm$. Essa espessura tem como objetivo evitar a interação da RPS com as camadas inferiores ao filme de ouro.

3. Deposição da camada fotossensível:

Após a formação da base pelo filme espesso de ouro é depositada uma camada fotossensível. Em geral, a camada fotossensível é constituída de uma resina epóxi, cujo o catalizador é ativado pela exposição à radiação ultravioleta. Dadas as particularidades da estratégia proposta, a espessura do filme fotossensível deve ser ligeiramente maior que a profundidade da grade, ou seja, maior que o dobro da amplitude da grade.

4. Exposição da camada fotossensível:

Para realizar a exposição seletiva da camada fotossensível, a técnica de litografia ótica recorre ao uso de máscaras litográficas. A máscara litográfica é fabricada de forma a possuir áreas translúcidas e opacas, as quais formam uma representação em escala do padrão a ser implementado na camada fotossensível. A máscara litográfica é então exposta a um feixe de luz ultravioleta colimado, que é transmitido com o padrão da máscara litográfica. O feixe com o padrão da máscara é então condensado por um conjunto óptico de precisão atingindo a camada fotossensível com uma escala nanométrica e formando

o padrão desejado. No caso específico aqui relatado, esse padrão é formado por linhas paralelas com espessura igual à metade do comprimento do período da grade igualmente espaçadas por uma distância igual a outra metade do período.

5. Remoção da camada fotossensível não exposta:

A exposição da camada fotossensível à luz ultravioleta e, conseqüentemente, a ativação do catalisador acarreta na deflagração da reação em cadeia localizada que altera as características físico-químicas da resina exposta à luz ultravioleta. Após a exposição seletiva da camada fotossensível é possível, então, utilizar um reagente químico, em geral, uma solução alcalina, para remover a resina não ativada pela radiação ultravioleta, expondo o padrão desejado.

6. Deposição de filme de (Cr/Ti e Au):

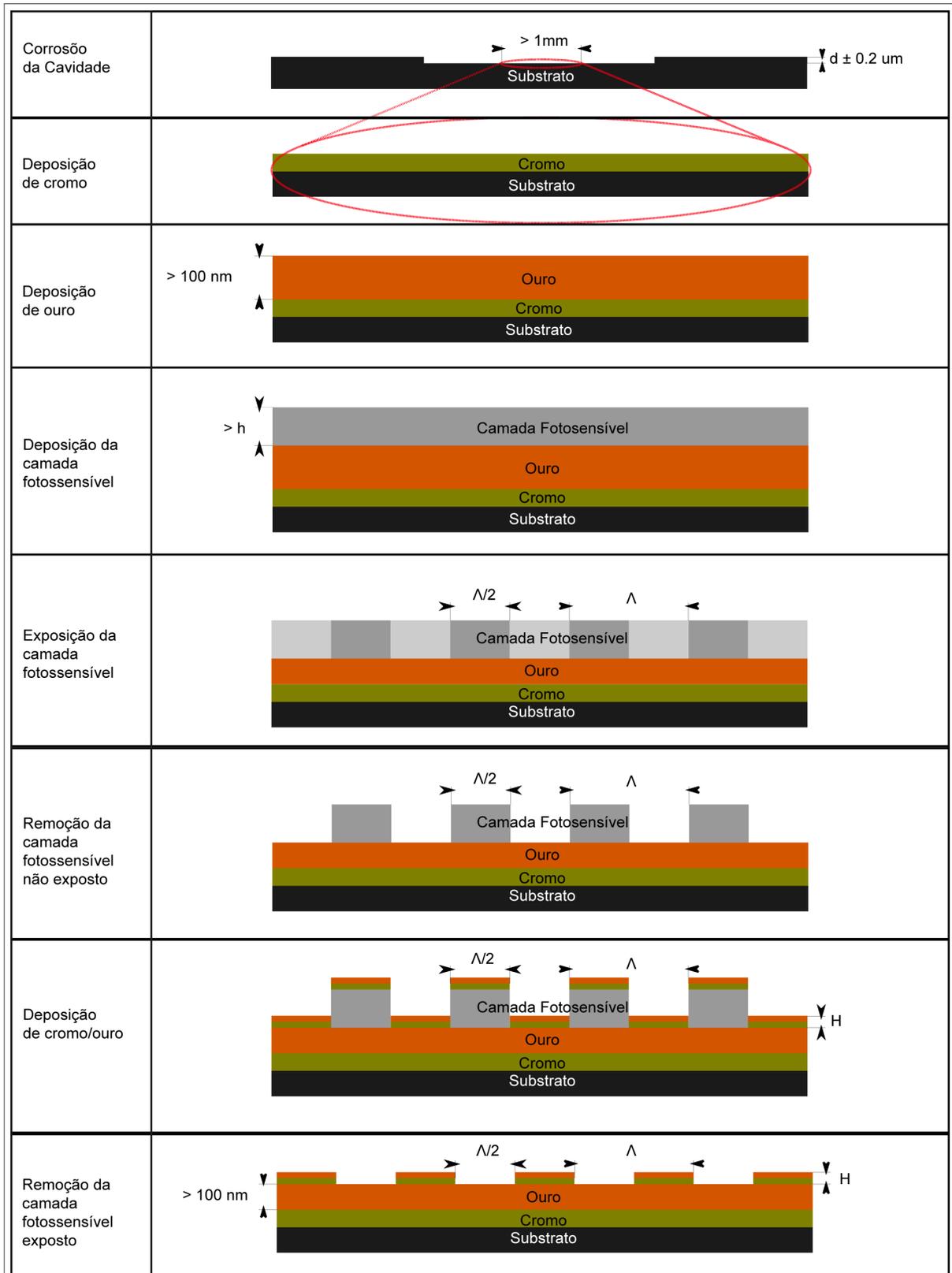
Formado o padrão periódico da grade, o filme fino de ouro que formará os degraus da grade pode ser depositado. Assim como na deposição do filme de ouro espesso sobre o substrato, a deposição do filme de ouro fino requer uma deposição prévia de um fino filme de cromo para garantir a aderência com as camadas inferiores. Deste modo, o filme de ouro deve ser adicionado ao filme de cromo de forma a atingir a espessura desejada. Ao ser depositada uniformemente por toda a superfície, parte do filme de cromo/ouro é retida pela camada fotossensível ainda presente e parte é depositada diretamente sobre o filme espesso de ouro.

7. Remoção da camada fotossensível exposta:

Finalmente, a camada de cromo/ouro indesejada é removida juntamente com a camada fotossensível sobre a qual esta depositada, concluindo a formação do padrão periódico da grade. Embora, neste caso, não seja possível evitar a interação com o sinal luminoso de excitação, espera-se que, devida à pequena quantidade, a presença da fina camada de cromo nos degraus da grade não afete o desempenho da interface sensora.

Apesar de viável, a estratégia de fabricação da matriz de grade proposta nesta subsecção requer o emprego de uma quantidade elevada de recursos. Assim, para fins de prototipação e validação do sensor proposto, este trabalho se utiliza de uma grade sub-ótima de baixo custo disponível comercialmente. Para avaliar a viabilidade da utilização da grade escolhida, foi executado um estudo computacional, cujos resultados estão relatados na subsecção a seguir.

Figura 23 – Estratégia de fabricação de matriz de grade para configuração de Otto



Fonte: O Autor.

3.3.4 Projeto de sensor com grade sub-ótima comercial

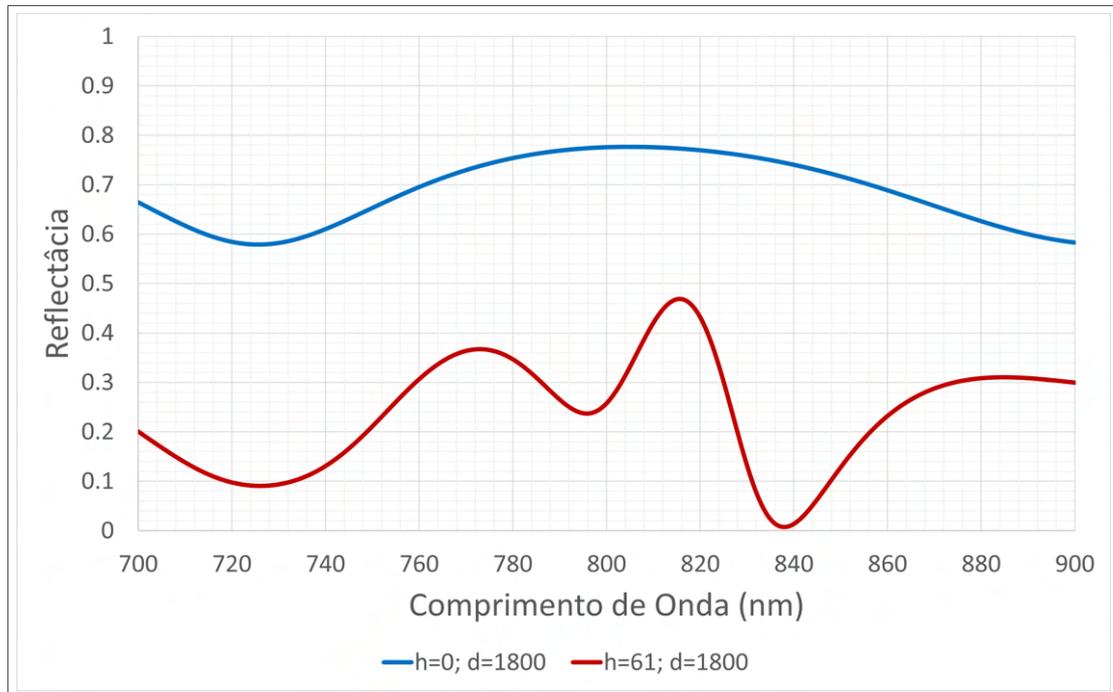
Apesar da busca extensiva, não foi possível encontrar uma grade pré-fabricada de baixo custo com parâmetros próximos aos calculados nas otimizações. Em geral, projetadas para maximizar a decomposição do espectro na maior faixa possível, as grades encontradas no mercado possuem amplitudes muito maiores que o projetado. Desta forma, mesmo antecipando um desempenho sub-ótimo, com o intuito de verificar sua utilização na prototipagem e execução de experimentos preliminares, foi executado um estudo computacional com os parâmetros da grade com menor amplitude disponível, que foi empregada nos experimentos desta tese.

Comercializada pela Edmund Optics[®], a grade escolhida foi fabricada utilizando holografia, possuindo um padrão senoidal em sua superfície, com amplitude e periodicidade nominais de $61nm$ e $833nm$, respectivamente. Originalmente projetada para operar no espectro ultravioleta, a grade comercial estudada é caracterizada por ter um filme de alumínio com espessura superior a $1\mu m$, o que impede sua utilização na configuração de Kretschmann. Assim, as simulações foram executadas exclusivamente para configuração de Otto, tendo-se as características ópticas obtidas conforme indicado anteriormente na Subseção 3.3.1.

Dessa forma, foi realizado um estudo computacional para obter o comprimento de onda e a distância ótimas para uma interface com configuração de Otto utilizando a grade comercial escolhida. Devido, muito provavelmente, às características sub-ótimas da grade comercial, não se obteve sucesso em encontrar parâmetros otimizados que apontassem a viabilidade do uso da grade para aferição de meios aquosos, ou seja, com índices de refração próximos a 1,33. Assim, foi realizado um novo estudo, o qual teve como alvo sensoriamento em meios gasosos, ou seja, com índice de refração próximos a 1, onde se obteve uma sensibilidade máxima de aproximadamente 29 e parâmetros de distância e comprimento de onda ótimos de $1800nm$ e $828nm$, respectivamente.

Para melhor compreender o comportamento da RPS na interface da grade comercial, a distância ótima obtida foi utilizada em estudo computacional onde se obteve os espectros de reflectância para grade comercial e para um espelho plano de alumínio com características ópticas idênticas ao alumínio da grade comercial, representados na Fig. 24 em vermelho e azul, respectivamente. Como esperado, é possível identificar, no espectro de reflexão da grade, dois vales, que não se apresentam no espectro de reflexão do espelho plano. Dadas suas características, pode-se inferir que a ocorrência dos vales se deve a excitação de plásmons de superfície pelas componentes de difração positiva e negativa de primeira ordem da grade.

Figura 24 – Espectros da função reflectância em uma configuração de Otto com grade comercial de alumínio e espelho de alumínio

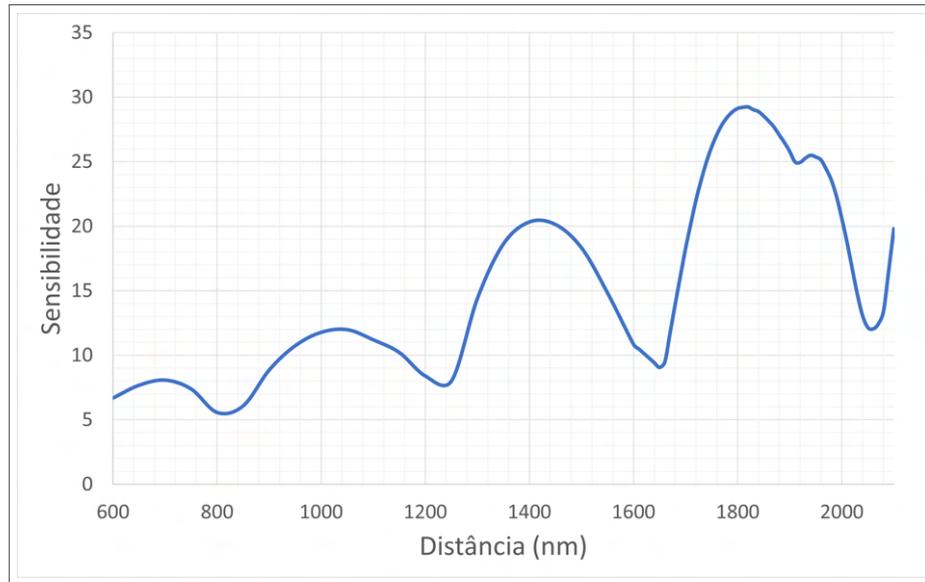


Fonte: O Autor.

Para melhor delimitar os requisitos do sistema experimental a ser implementado, foi realizado um estudo computacional para determinar a influência da distância na sensibilidade da configuração de Otto com grade comercial, ilustrada na Fig. 25. Na curva apresentada na Fig. 25, é possível identificar a ocorrência de 4 pontos de máximo local, os quais apresentam uma tendência ascendente em relação ao aumento da distância. Uma vez que o valor limítrofe superior de distância utilizado nesse estudo foi definido em função de limitações do modelo matemático utilizado pelo software de simulação, não é possível descartar a existência de picos de maior sensibilidades na região não contemplada pelo estudo. Apesar disso, é possível concluir que, a capacidade experimental de controlar a distância entre a fibra e a grade com precisão nanométrica é salutar para melhor visualização e compreensão da relação entre os parâmetros do sistema experimental e o espectro de reflectância do RPS.

Além do comportamento da grade comercial original, investigou-se computacionalmente os benefícios do recobrimento da grade comercial com filme espesso de ouro. Assim, de forma similar ao realizado para grade comercial em sua disposição inicial, ou seja, com filme de alumínio, foi realizado um estudo computacional utilizando os parâmetros geométricos da grade, porém, considerando-se uma superfície metálica de ouro maciço, cujos parâmetros óticos foram obtidos de Weaver et al. (1981).

Figura 25 – Influência da distância na sensibilidade da configuração de Otto com grade comercial de alumínio

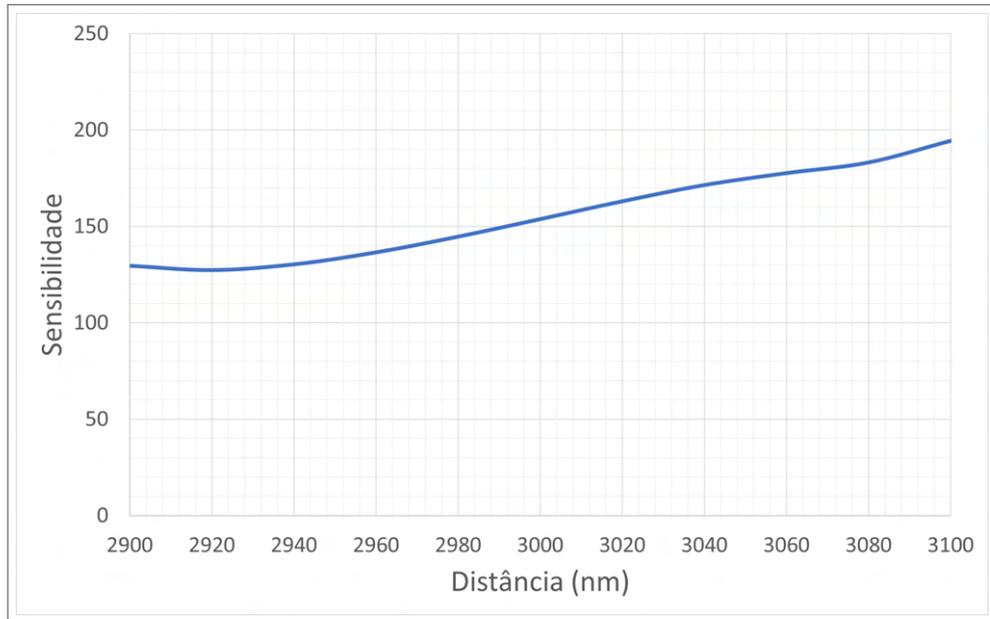


Fonte: O Autor.

A Fig. 26 apresenta a influência da distância na sensibilidade da configuração de Otto com grade comercial recoberta com ouro. Assim como ocorre na Fig. 25, a curva da Fig. 26 aponta a ascendência da sensibilidade com o aumento da distância, a qual, novamente, teve seus valores estudados limitados por questões técnicas do software de simulação. Para melhor compreender o efeito da distância sobre a RPS, foi realizado um estudo da correlação entre o comprimento de onda e a reflectância em uma configuração de Otto com grade comercial recoberta com ouro. O gráfico da Fig. 27 apresenta o espectro de reflectância para distâncias diferentes, como referenciado na sua legenda. Na curva da Fig. 27, é possível visualizar que o aumento da distância acarreta o estreitamento do espectro de ocorrência da RPS, tornando o decaimento da reflectância mais abrupto e, por consequência, permitindo a obtenção de sensibilidades mais elevadas.

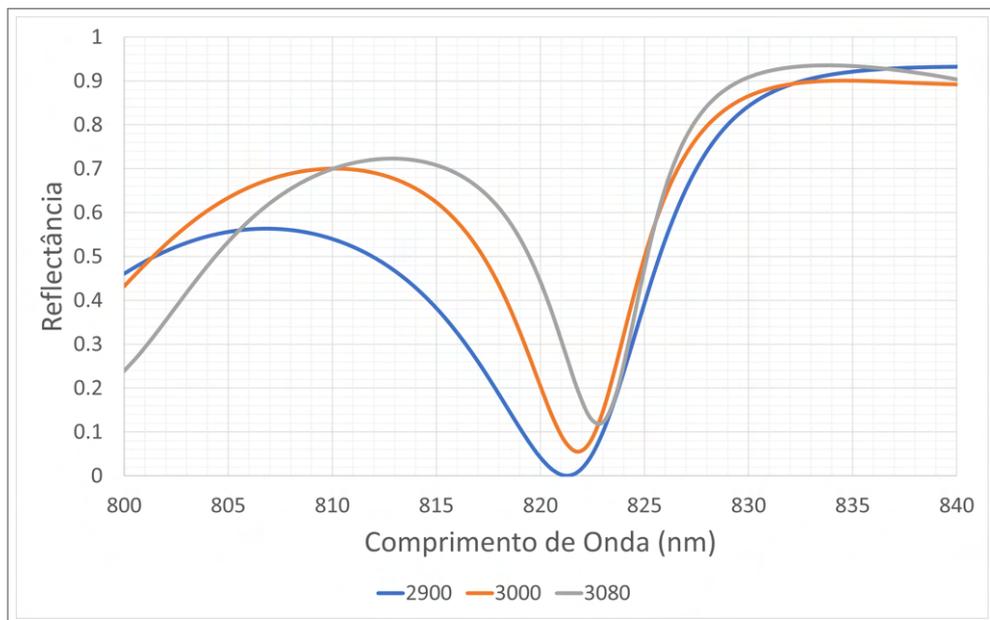
Embora, como esperado, a grade não tenha apresentado o mesmo potencial de uma grade otimizada, as simulações corroboram com a sua adequabilidade em experimentos preliminares, os quais têm como objetivos principais a concepção, prototipação e validação de um sistema experimental capaz de realizar o alinhamento entre a grade e a ponta da fibra com a precisão necessária para implementação de interface sensora na configuração de Otto. Para esse objetivo, a sensibilidade passa a ter um caráter menos determinante, sendo suficiente a identificação e caracterização da curva característica à RPS, o que é possível realizar com a grade comercial. Tendo isso em vista, a grade comercial foi utilizada nos experimentos descritos no capítulo a seguir.

Figura 26 – Influência da distância na sensibilidade da configuração de Otto com grade comercial recoberta com ouro



Fonte: O Autor.

Figura 27 – Espectros da função reflectância em uma configuração de Otto com grade comercial recoberta com ouro



Fonte: O Autor.

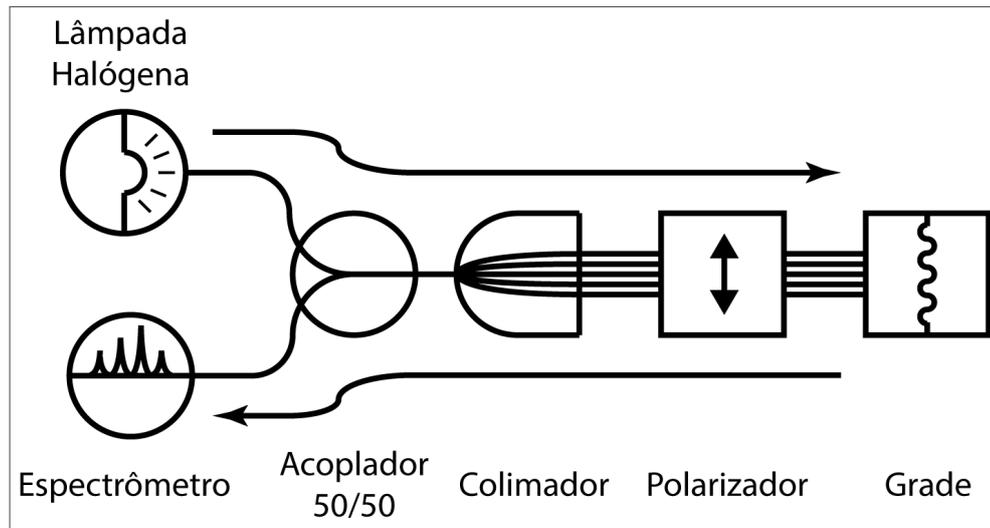
4 EXPERIMENTOS PARA VISUALIZAÇÃO DO EFEITO DE RPS NA GRADE DE DIFRAÇÃO COMERCIAL

4.1 CONFIGURAÇÃO ÓPTICA

Tendo-se os requisitos do sistema de sensoriamento, apresentados no Capítulo 3, este capítulo apresenta os trabalhos de prototipação e experimentos realizados. Nestes, foi utilizada uma variação da arquitetura de sensor à fibra descrita no capítulo anterior e empregada anteriormente em (GÓIS, 2017). Semelhantemente à arquitetura do Capítulo 3, a arquitetura utilizada neste trabalho, ilustrada na Fig. 28, se utiliza de um acoplador óptico de fibra fundida para guiar os sinais de excitação à interface sensora e o sinal refletido ao detector de sinal.

Contudo, tendo em vista os resultados computacionais obtidos e os benefícios da utilização de um sistema capaz de se ajustar às variações no comprimento do onda ótimo, expostos no Capítulo 3, decidiu-se por utilizar, neste trabalho, um sistema de espectroscopia de banda larga, como ilustrado na Fig. 28. Para isso, o laser foi substituído por uma fonte de radiação com lâmpada halógena, com espectro de operação de 400 nm a 2500 nm . Por sua vez, o detector de sinal foi substituído por um espectrômetro, com resolução de $1,5\text{ nm}$ e espectro de operação de 650 nm a 1050 nm . Dada a maior confiabilidade e custo do espectrômetro, o detector de referência foi suprimido. Com isso, optou-se pela utilização de um acoplador de fibra fundida multimodo, com duas entradas e uma saída, o qual interliga os outros componentes por meio de conectores padrão SMA 905. Para restringir a abertura angular do feixe incidente, mitigando a perda de sensibilidade causada pela excitação de plásmons de superfície em ângulos não normais e permitir o acoplamento do sinal refletido de volta à fibra, foi utilizado um colimador dotado de uma lente GRIN com abertura angular de 30 mrad . Para possibilitar o controle da polarização do sinal incidente, foi adicionado, ainda, um filtro polarizador com razão de extinção de $400 : 1$, o qual se localiza entre o colimador e a grade, como ilustrado na Fig.28.

Figura 28 – Arquitetura óptica de banda larga utilizada nos experimentos (GÓIS et al., 2022)



Fonte: O Autor (2020).

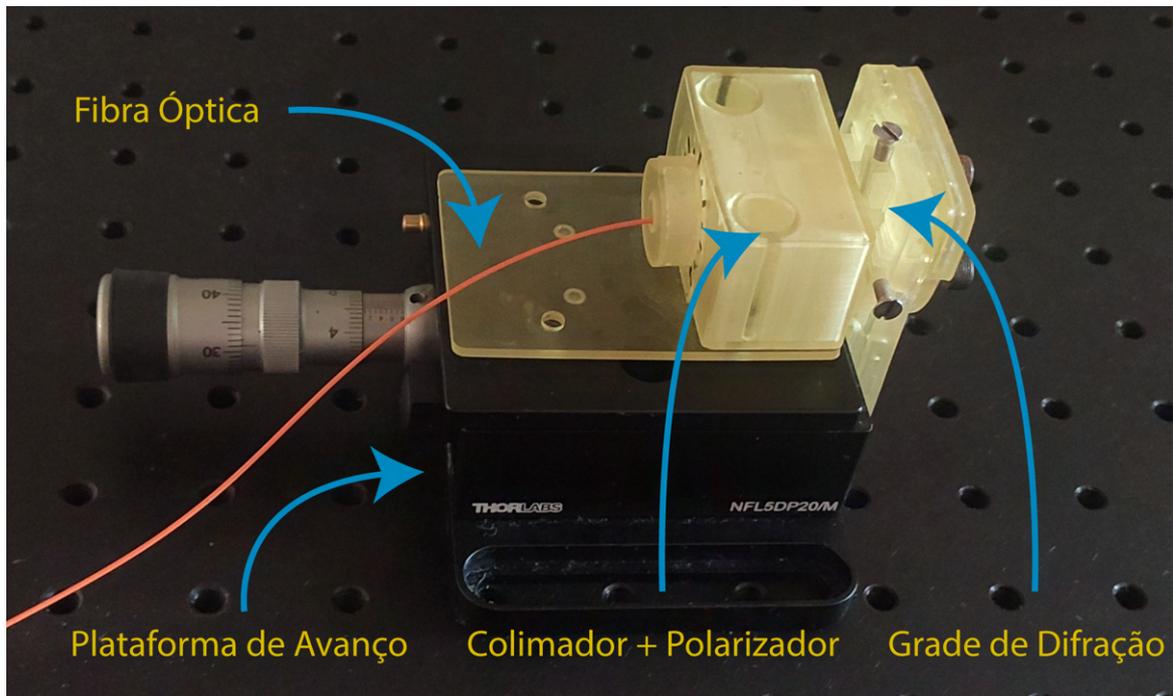
4.2 SISTEMA DE ALINHAMENTO

Além da montagem do sistema óptico supracitado, a implementação de um sensor à fibra retrorreflexivo na configuração de Otto com grade exige o alinhamento da grade com a interface plana ligada à ponta da fibra. Assim, para executar a manufatura do sistema necessário a este alinhamento, recorreu-se à manufatura aditiva, dada por meio de uma impressora 3D estereolitográfica. Similarmente ao que ocorre no processo de nanolitografia óptica, descrito na Seção 4.1, esse tipo de impressora 3D se utiliza de um resina epóxi, cujo catalizador é ativado pela exposição à radiação ultravioleta. Com isso, as impressoras 3D estereolitográficas atingem melhores resoluções em comparação as suas contrapartes termoplásticas, sendo recomendadas para fabricação de peças que requerem maior detalhamento. Por exemplo, a impressora utilizada neste trabalho opera com uma tela *LCD* reflexiva *Quad-HD*, a qual proporciona uma resolução de exposição nominal de $50 \mu m$ nos eixos horizontais. Na prática, a resolução efetiva em uma impressão depende, também, de vários outros fatores, como a qualidade da resina e o tempo de exposição. Além disso, a resolução do eixo horizontal da impressão depende das características mecânicas e do passo utilizado na impressão, o qual, para impressora utilizada, costuma ser igual ou superior a $0,5 mm$. Desta forma, para fins de projeto, admitiu-se uma tolerância de $0,5 mm$.

Desta forma, o sistema de suporte e alinhamento da interface sensora, utilizado nos experimentos apresentados nesta secção, é composto por três peças, uma plataforma de translação, fabricada pela Thorlabs, um mecanismo para suporte e alinhamento da grade e um mecanismo

de suporte do colimador e polarizador, ambos fabricados com o auxílio de uma impressora 3D estereolitográfica. Dispondo de um cristal piezoelétrico ligado a um parafuso micrométrico, o topo da plataforma de translação se desloca unidirecionalmente em relação à sua base. Além disso, a plataforma de translação possui uma série de cavidades com rosca, possibilitando a fixação do suporte da grade à lateral de sua base e o suporte do colimador ao topo da plataforma, como ilustrado na Fig. 29. Assim, a plataforma de translação proporciona ao sistema a capacidade de controlar a distância entre a grade e a fibra.

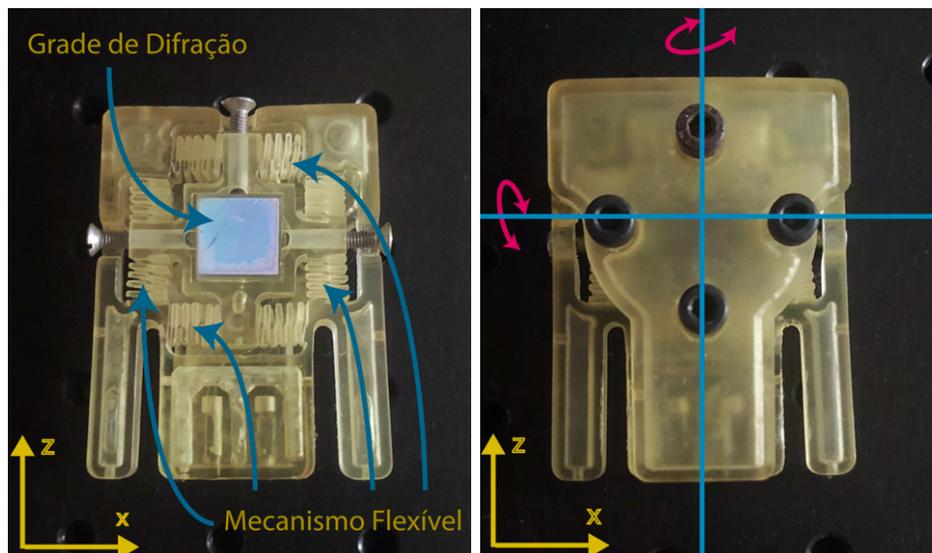
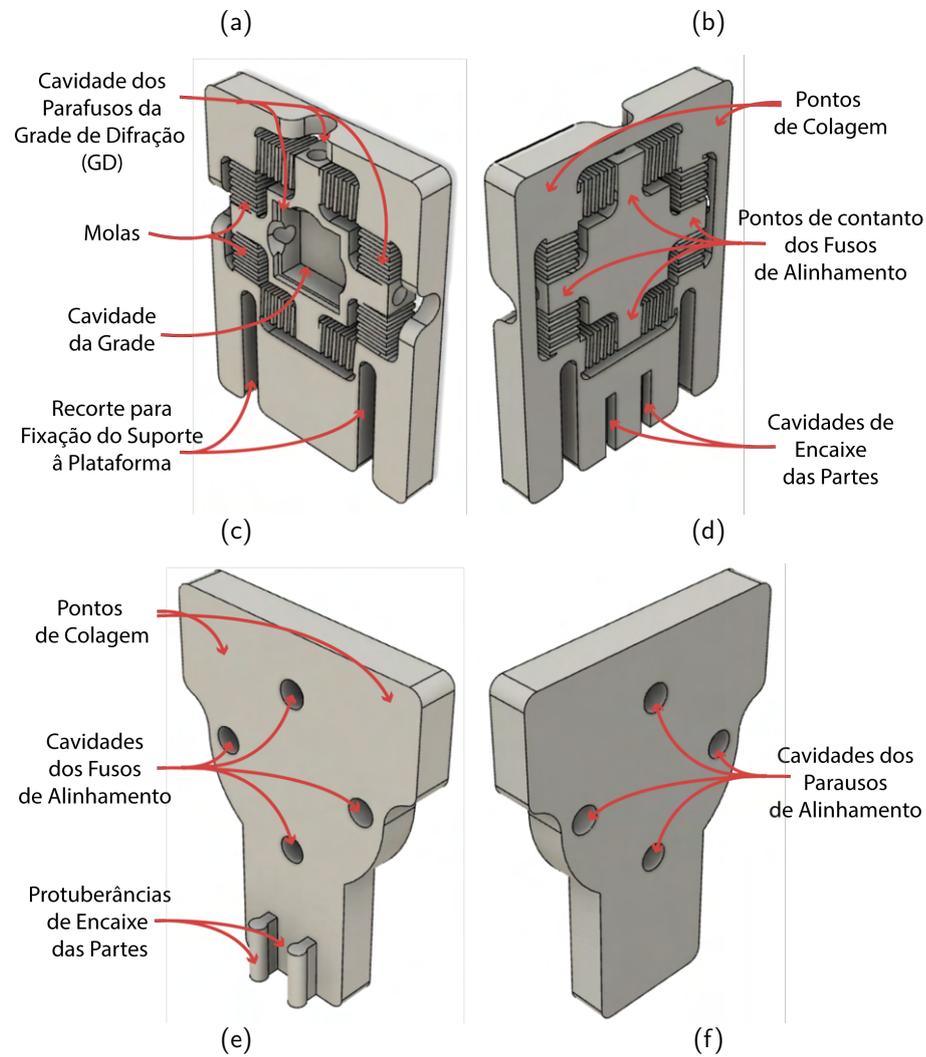
Figura 29 – Sistema experimental.



Fonte: O Autor.

Objetivando o acoplamento do sinal refletido ao colimador, de abertura angular nominal de 30 mrad , o mecanismo para o suporte e alinhamento da grade, por sua vez, foi projetado de forma a possibilitar a rotação precisa da grade nos dois eixos contidos no plano de seu padrão periódico. Para facilitar sua confecção, esse mecanismo foi concebido em duas partes, ilustradas na Fig. 30. Como ilustrado na Fig. 30a a peça dianteira possui dois recortes em sua parte inferior, que possibilitam, com auxílio de parafusos, sua fixação à lateral da base da plataforma de translado. Como ilustrado na 30c a peça dianteira possui, também em sua parte inferior, duas cavidades, as quais se encaixam nas protuberâncias da parte traseira, ilustrada na 30b. Para garantir maior robustez mecânica, os cantos superiores das partes foram afixados uns aos outros por meio de cola epóxi.

Figura 30 – Mecanismo de suporte e alinhamento da grade: (a) Perspectiva frontal da parte dianteira; (b) Perspectiva posterior da parte dianteira; (c) Perspectiva frontal da parte traseira; (d) Perspectiva posterior da parte traseira; (e) Vista frontal do mecanismo montado; (f) Vista posterior do mecanismo montado.



Fonte: O Autor (2022)

Para assegurar a grade em sua cavidade, o suporte possui três cavidades, rosqueados três parafusos, como ilustrado na Fig. 30e. A cavidade da grade, por sua vez, é ligada ao corpo do suporte por molas. Apesar da resina utilizada na fabricação do suporte se tornar rígida após sua cura, a lâmina que compõe a estrutura helicoidal da mola possui espessura inferior a 1 mm , o que confere uma elasticidade à mola, permitindo que a grade se desloque em relação ao corpo do suporte. Esse deslocamento é controlado por quatro parafusos rosqueados às cavidades da parte traseira, como ilustrado na 30d. Esses parafusos, pressionam a cavidade da grade, conforme apontado na Fig. 30b, rotacionando a grade em dois eixos, conforme ilustrado na Fig. 30f.

Como ilustrado na Fig. 28, a arquitetura óptica utilizada nesse trabalho dispõe de um filtro polarizador, o qual foi posicionado imediatamente após o colimador. Assim como nas junções dos conectores, para reduzir reflectâncias indesejadas, o espaço entre o colimador e o polarizador foi preenchido por um gel, com índice de refração similar ao da sílica. Para o melhor funcionamento do sistema, o polarizador necessita ser posicionado o mais perpendicular possível ao eixo longitudinal do colimador, e conseqüentemente à direção de propagação do sinal incidente. Ainda, para que seja possível o controle da polarização do sinal incidente em relação à grade, é necessário realizar rotação do polarizador sobre seu próprio eixo. Assim, como ilustrado na Fig. 31, o suporte do conjunto colimador e polarizador foi desenvolvido de forma a atender esses requisitos.

Como ilustrado na Fig. 31a, o suporte do colimador é constituído de duas partes idênticas, uma superior e outra inferior. Em seu interior, o suporte do colimador possui uma cavidade suspensa a qual, assim como as molas do suporte da grade, foi construída com uma espessura inferior a 1 mm , conferindo-lhe a elasticidade necessária para se moldar e conter o colimador, conforme ilustrado na Fig. 31b. Para manter sua coesão, do suporte o colimador foi concebido de forma a se encaixar na cavidade de dois trilhos idênticos, ilustrados na Fig. 31c. A face oposta ao colimador de cada um desses trilhos, possui duas cavidades semiesféricas, utilizadas como guias para a fixação de partes subsequentes. Ao trilho encaixado após o colimador, foi fixado, com cola epóxi, o anel de suporte do polarizador. Para permitir colocação e retirada do polarizador, possui uma pequena elipse elástica, a qual pressiona levemente o colimador contra o interior do anel de suporte, mantendo-o no local. Ao outro trilho, foi fixado, também com cola epóxi, um botão, utilizado para girar manualmente o conjunto. Esse botão possui centro vazado, de forma a permitir a passagem da fibra e, em sua extremidade, uma ranhura utilizada para indicar o ângulo de polarização. Assim, a posição do polarizador em relação ao

colimador é assegurada, conforme ilustrada na Fig. 31d. Ainda, para fixar o conjunto colimador e polarizador a plataforma de translação, foi concebida uma base, fabricada em duas partes: uma inferior e uma superior, ilustradas na Fig. 31e. Semelhantemente ao suporte do colimador, a base possui uma cavidade, onde é inserido o conjunto colimador e polarizador montado, ilustrado na Fig. 31d. Esse cavidade contudo, é inelástica, e possui em seu interior duas outras cavidades, onde se encaixam as protuberâncias dos dois trilhos, restringindo o movimento do conjunto a rotação sobre um dos eixos. Esse conjunto, foi fabricado de forma a ter a menor folga possível, sendo utilizado vaselina para lubrificação externa do conjunto. Após fechada, a base foi fixada ao topo da plataforma de translação por dois parafusos, inseridos nas cavidades superiores da base.

Assim, o sistema experimental foi montado de forma a permitir o movimento preciso sob quatro graus de liberdade, como ilustrado na Fig. 32. Todavia, embora que, com sua precisão nanométrica, a plataforma de avanço seja, teoricamente, capaz de aproximar a face do polarizador à grade até a distância micrométrica simulada na Subsecção 3.3.2, dado que essa separação não é visível ao olho nu e o sistema experimental montado não é auto referenciado, a execução dessa aproximação acarreta o risco de colisão e destruição da grade. Assim, tendo-se em vista a baixa influência da distância na sensibilidade da interface, apontada pelas simulações da subsecção 3.3.2, resolveu-se verificar, em novas simulações, a viabilidade da execução dos experimentos em distância macroscópica. Sendo qualquer distância macroscópica muito maior que o comprimento de onda do sinal incidente, para fins de cálculo, considerou-se essa distância como infinita, ou seja, desconsiderou-se a presença da interface plana entre o polarizador e ar, adotando-se o modelo ilustrado na Fig. 33.

Figura 31 – Montagem do suporte do colimador e polarizador: (a) Montagem do suporte do colimador: 1. Superior; 2. Colimador; 3. Inferior. (b) Suporte do colimador montado. (c) Montagem do suporte do polarizador: 1. Polarizador; Suporte do polarizador; 3. Trilho; 4. Suporte do colimador; 5. Trilho; 6. Botão. (d) Suporte do polarizador montado. (e) Montagem da base: 1. Base superior; 2. Suporte do polarizador; 3. Base inferior. (f) Suporte do colimador e polarizador montado.

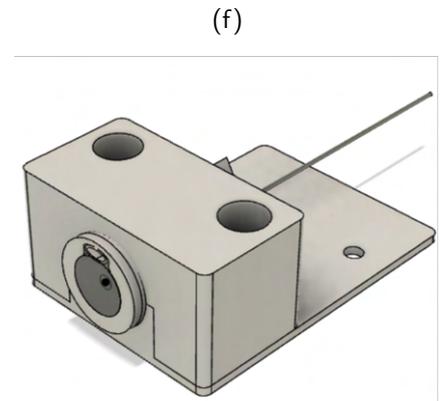
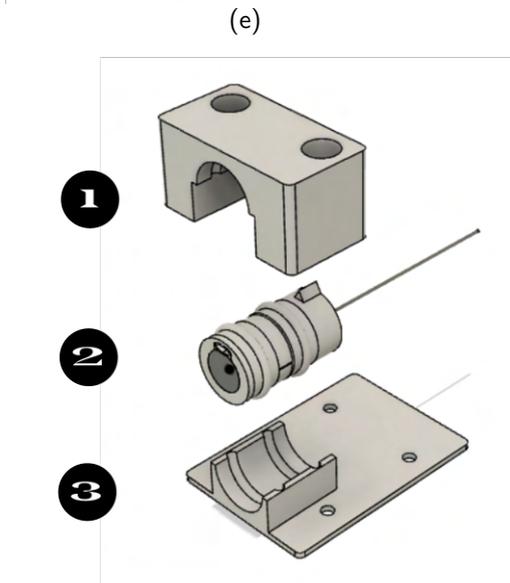
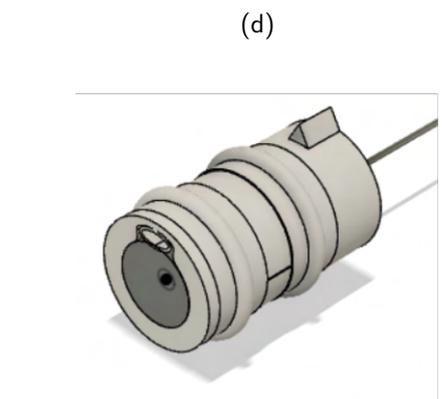
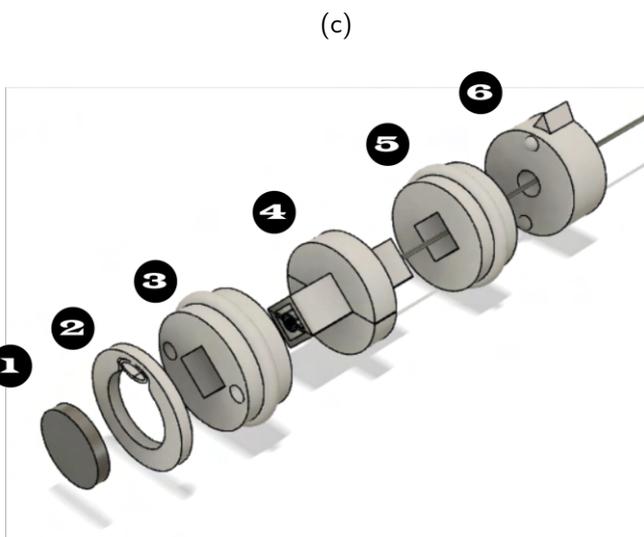
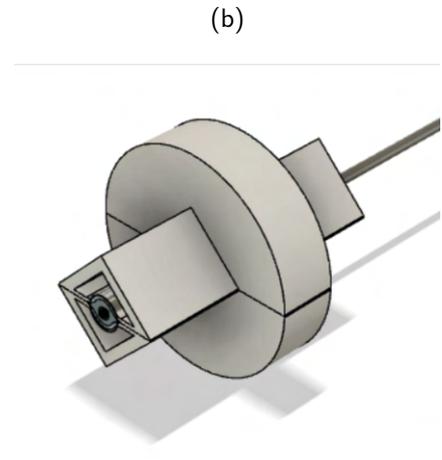
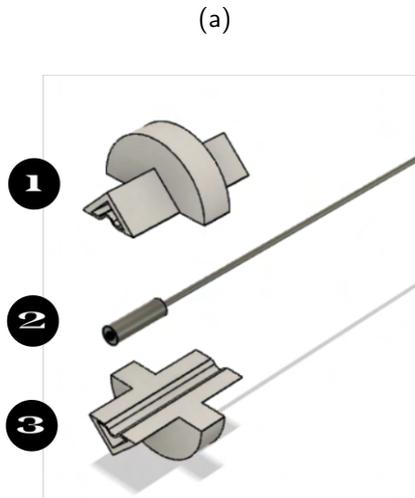
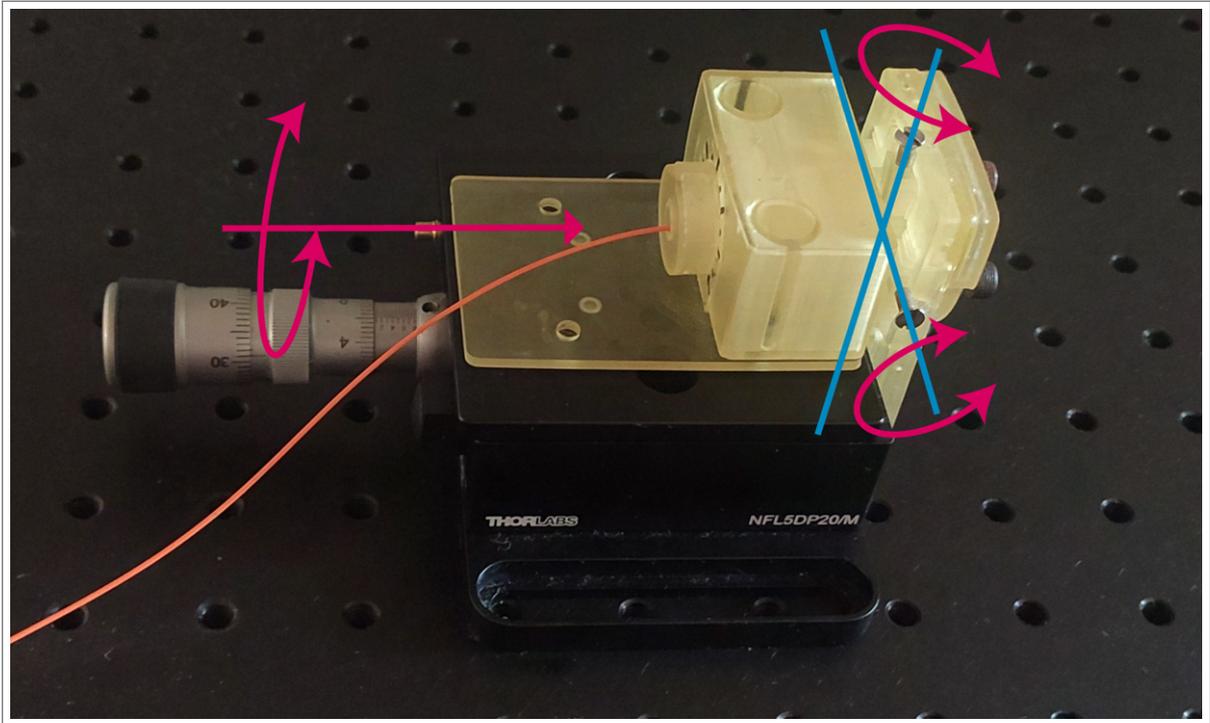
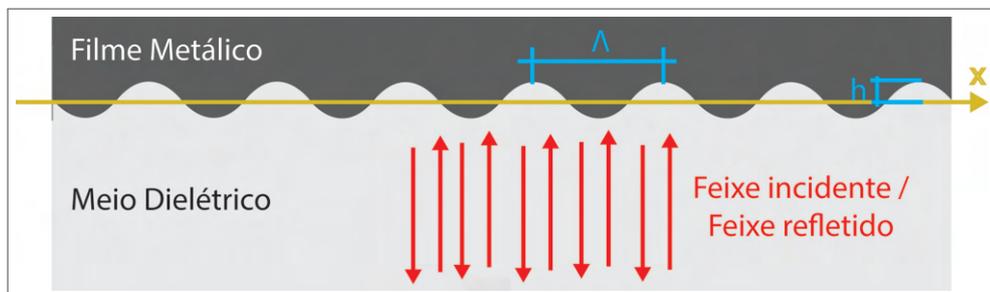


Figura 32 – Sistema experimental de alinhamento com movimento controlado em quatro graus de liberdade



Fonte: O Autor.

Figura 33 – Configuração de Otto com distância macroscópica

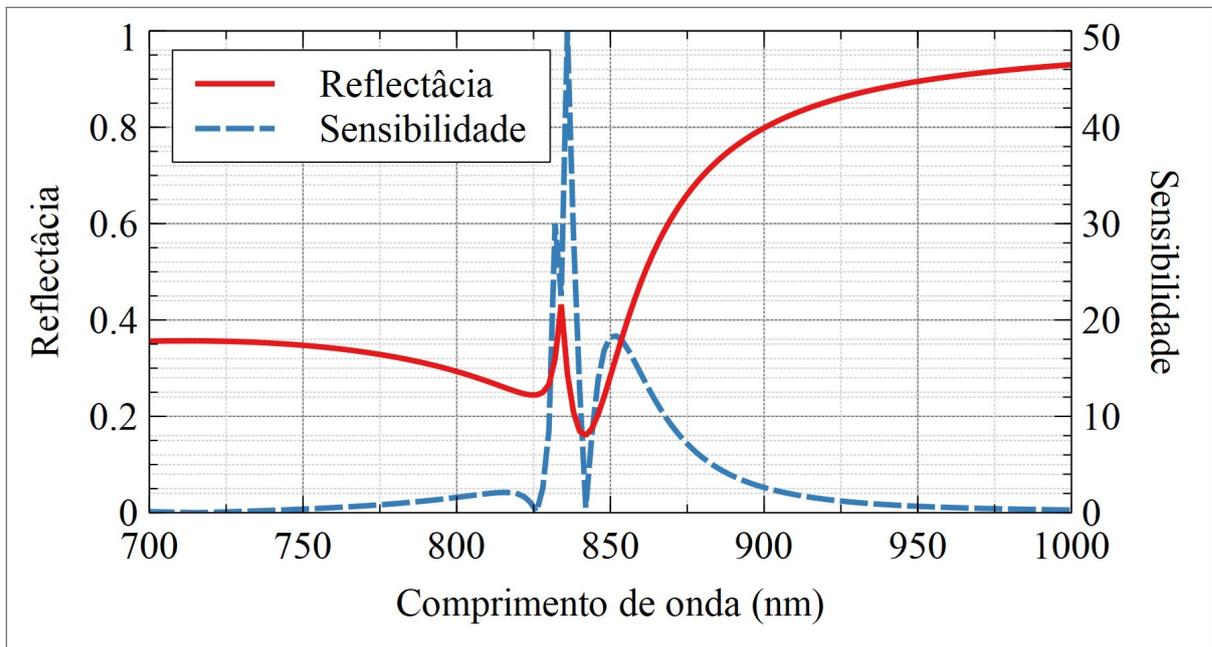


Fonte: O Autor.

4.3 OBSERVAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE RPS EM GRADE COMERCIAL SUB-ÓTIMA

A Fig. 34 ilustra os espectros de reflectância e de sensibilidade da interface sensora na configuração de Otto simulados com o auxílio do aplicativo SPRinG. Nessas simulações, adotou-se a distância entre as interfaces como sendo muito maior que o comprimento de onda, ou seja, uma distância grande o suficiente para ser vista ao olho nu. Como se pode visualizar no gráfico, a simulação aponta uma potencial sensibilidade de 50, superior ao calculado para distâncias microscópicas. Além disso, é possível verificar uma curva de reflectância passível de ser caracterizada experimentalmente, o que corrobora com a viabilidade da execução dos experimentos com distância macroscópica. Assim, nos experimentos apresentados nesse capítulo, de forma a obter o melhor acoplamento do sinal refletido possível, a face do polarizador foi aproximada à grade manualmente até a menor distância segura possível.

Figura 34 – Espectros de reflectância e sensibilidade para uma interface utilizando grade na configuração de Otto com distância macroscópica (GÓIS et al., 2022)

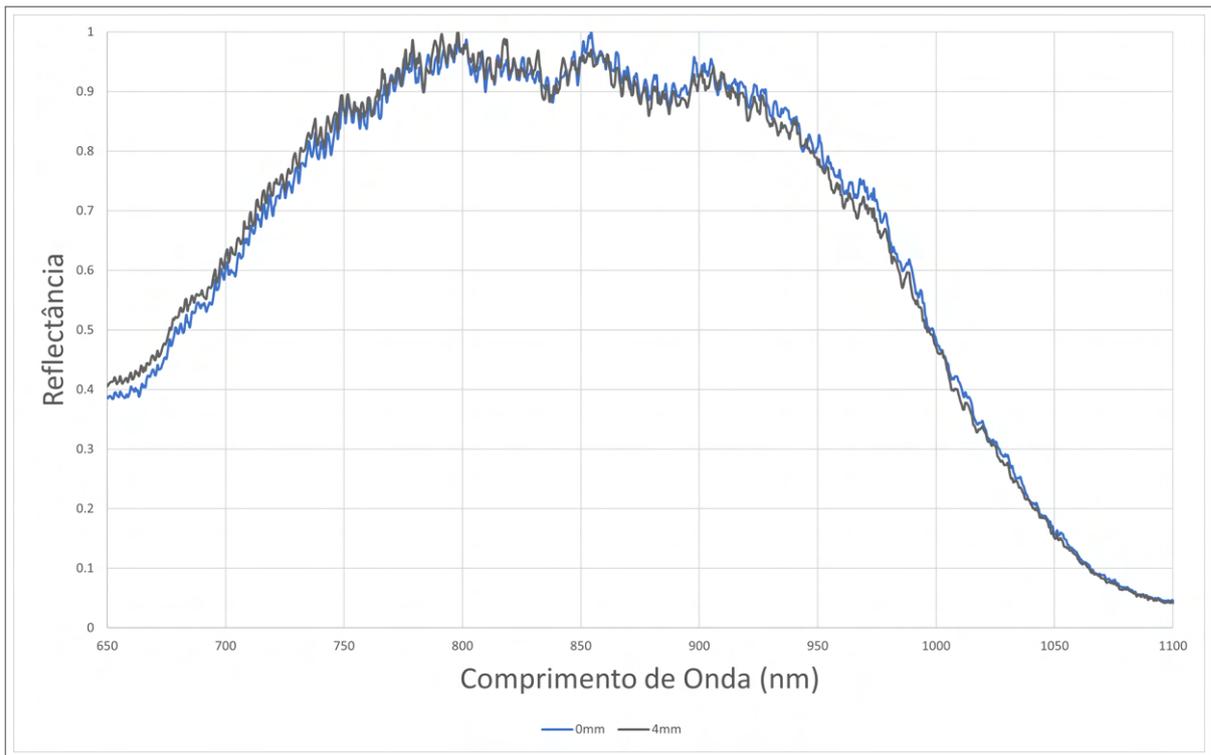


Fonte: O Autor (2022).

Deste modo, foi executada uma série de aferições, objetivando a observação de RPS. Primordialmente, para caracterizar a resposta do sistema óptico implementado, realizou-se medidas de referência utilizando um espelho plano de alumínio. Durante os experimentos iniciais, observou-se que a intensidade exibida pelo espectrômetro apresentou uma oscilação periódica e de baixa amplitude em todo o espectro aferido. Para facilitar a comparação dos

resultados, optou-se por normalizar as medidas, dividindo cada ponto do espectro pelo valor mais alto obtido na medida. Assim, a Fig. 35 apresenta o espectro do sinal refletido normalizado referente ao espelho plano. Durante esse experimento, foram realizadas medidas com diversas distâncias, tomando-se como referência a menor distância segura, a qual se arbitrou o valor $d = 0$, referenciado no gráfico.

Figura 35 – Espectro de reflectância do espelho plano de Al utilizado como referência

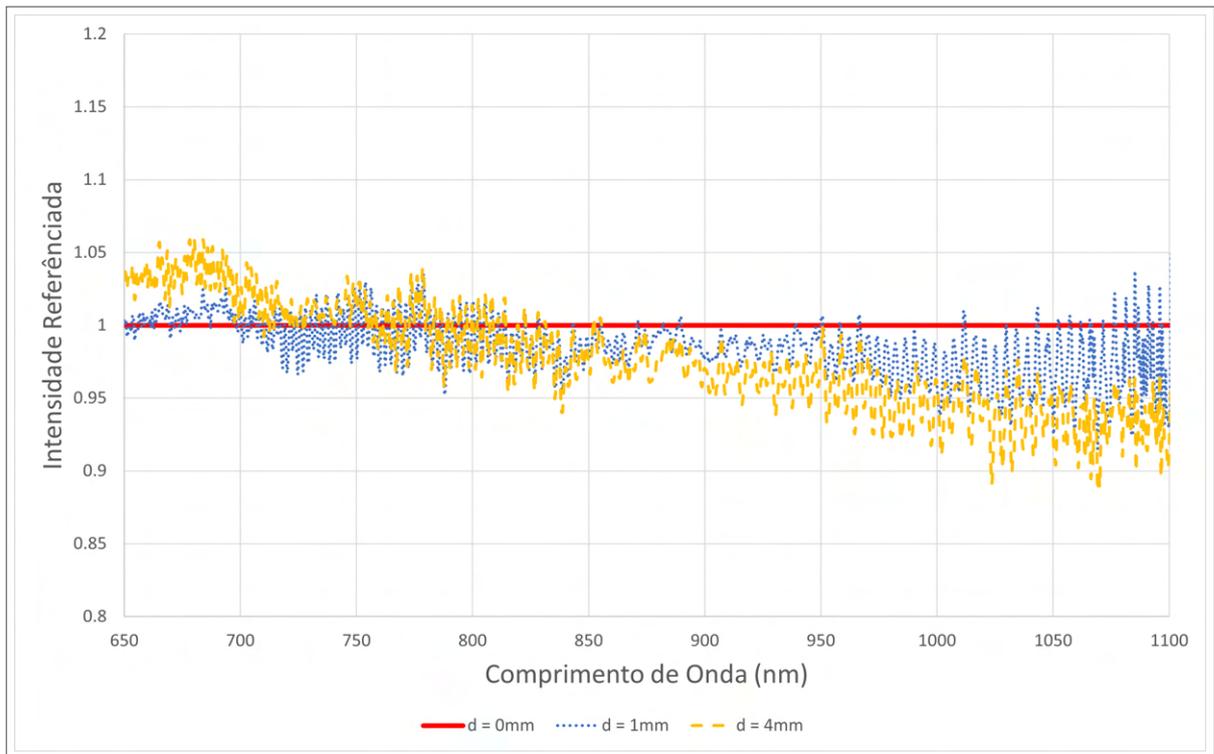


Fonte: O Autor.

Nesse gráfico, é possível verificar o comportamento não uniforme da curva, caracterizado pelo decaimento da intensidade registrada nas extremidades do espectro observado. Esse comportamento, deve-se às características do espectrômetro utilizado, o qual não é autoreferenciado. É possível verificar, também, um ruído de baixa amplitude presente em todo espectro. Constante no tempo, essa oscilação, pode ser atribuída a ocorrência de interferências indesejadas no caminho óptico, provavelmente, localizada no interior do acoplador. É possível verificar, ainda, dois pequenos decaimentos de intensidade, localizados entre 800 nm e 900 nm , os quais podem ser atribuídos às características ópticas do alumínio, o qual também apresenta um decaimento similar em seu espectro de índice de refração. Finalmente, é possível verificar uma mínima discrepância entre as curvas referentes a distâncias distintas. Para melhor verificar a natureza dessa discrepância, foi gerado um novo gráfico, ilustrado na Fig. 36, onde se tomou como a menor distância, dividindo cada ponto do espectro de cada medida pelo seu corres-

pondente valor de referência. Nesse gráfico, é possível verificar uma inclinação descendente, que tende a aumentar de ângulo com a distância. Esse fator, deve-se, provavelmente, a aberrações cromáticas, ou seja, à diferenças no ângulo de colimação nos diferentes comprimentos de onda, ocasionados pela não uniformidade espectral do índice de refração na lente de Grin.

Figura 36 – Espectros de intensidade do sinal refletido pelo espelho plano normalizado pela intensidade obtida na distância mínima



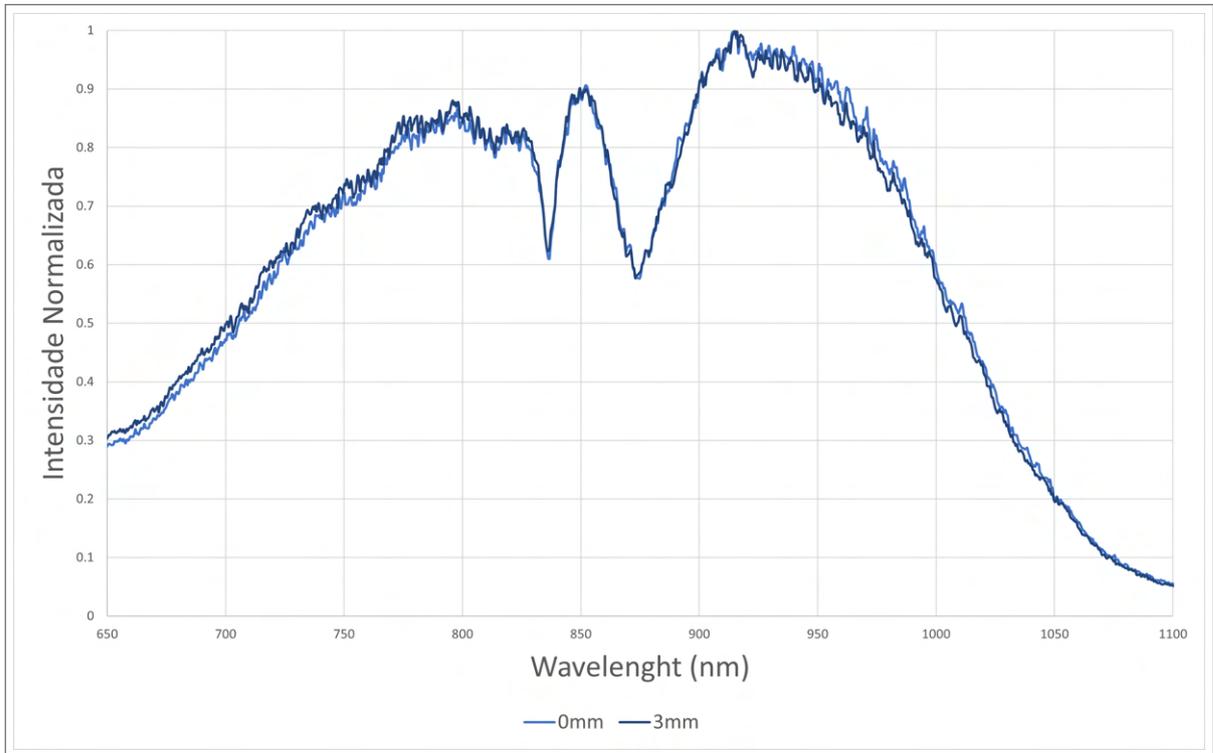
Fonte: O Autor.

Tendo-se as informações adquiridas nos experimentos com o espelho plano, executou-se experimentos similares com a grade. A Fig. 37 apresenta o espectro de intensidade do sinal refletido normalizado obtido nos experimentos com a grade. Na curva da Fig. 37, é possível observar dois vales, que indicam a existência de RPS, como esperado. Para melhor avaliar a magnitude dos vales característicos da RPS, de forma similar ao executado para a Fig. 36, utilizou-se o espelho plano como referência para se obter o espectro do sinal refletido referenciado e normalizado. Desse modo, a Fig. 38 apresenta os espectros de reflectância para diferentes distâncias obtidos nos experimentos iniciais com a grade. No gráfico da Fig. 38 é possível verificar que, diante da intensidade dos vales característicos da RPS, os efeitos do afastamento da grade se mostram desprezíveis.

Dada sua utilidade e simplicidade, o método de referenciação e normalização supracitado foi estendido aos experimentos posteriormente executados. Assim, por simplicidade, a menos

que explicitado, os sinais refletidos referenciados e normalizados, obtidos experimentalmente, são, neste trabalho, denominados simplesmente de reflectância.

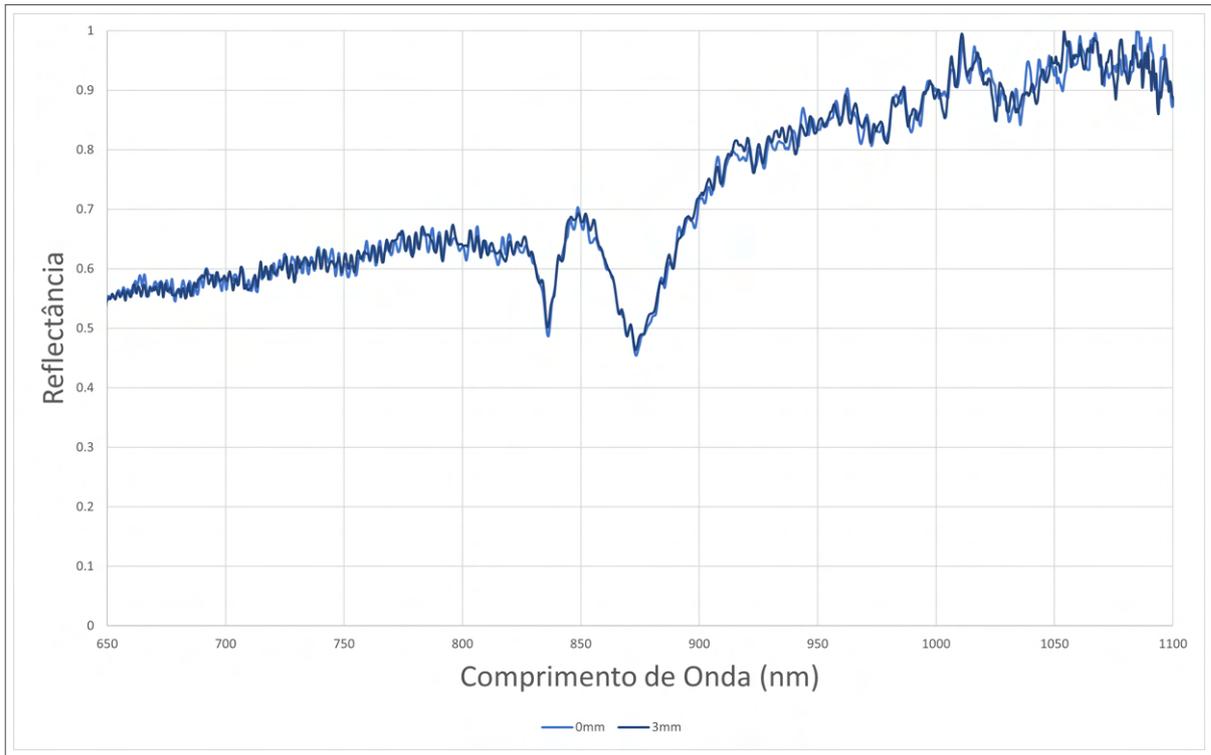
Figura 37 – Espectro de intensidade do sinal normalizado refletido pela grade comercial.



Fonte: O Autor.

Objetivando uma maior compreensão do comportamento da RPS na curva de reflectância da RPS, realizou-se, ainda, mais uma série de medições utilizando a grade, nas quais o conjunto colimador mais o polarizador foi rotacionado, alterando o ângulo de polarização do sinal incidente. Inicialmente, para avaliar os resultados obtidos nesses experimentos, tomou-se como referência os valores simulados exibidos na Fig. 34. Uma vez que o aplicativo SPRinG ainda está limitado a simulações com ondas incidentes com polarização Transversal Magnética (TM), de campo magnético perpendicular ao eixo x da Fig.33, recorreu-se ao aplicativo COMSOL para a simulação da interface sensora sob polarização Transversal Elétrica (TE), de campo elétrico perpendicular ao eixo x da Fig.33. Para isso, utilizou-se como base o modelo proposto e validado por Araujo, Melo e Fontana (2023), modificando a polarização do campo incidente. Para que o modelo convergisse, foi necessário a utilização de uma malha com elementos de dimensões inferiores a um décimo do comprimento de onda central do feixe incidente, ou seja, de aproximadamente 80nm. Dadas as limitações computacionais, a simulação com onda incidente de polarização TE foi modelada com uma distância de $50\mu m$. Com essa distância, a curva de reflectância da interface simulada apresenta oscilações decorrentes do efeito de

Figura 38 – Espectros de reflectância normalizado obtidos em distâncias diferentes.



Fonte: O Autor.

interferência, os quais não condizem com os previstos para a distância macroscópica medida nos experimentos. Assim, para reduzir o impacto dessas oscilações indesejadas, foi aplicado, ao longo do espectro de comprimento de onda, um filtro passa-baixa de janela deslizante, similar ao utilizado no Capítulo 2. Para facilitar sua visualização, aplicou-se o mesmo filtro à curva de reflectância experimental, mitigando os efeitos de interferências.

Para o cálculo das reflectâncias com estados de polarização arbitrários, utilizou-se, com base na formulação apresentada em Fontana (2002), a função reflectância

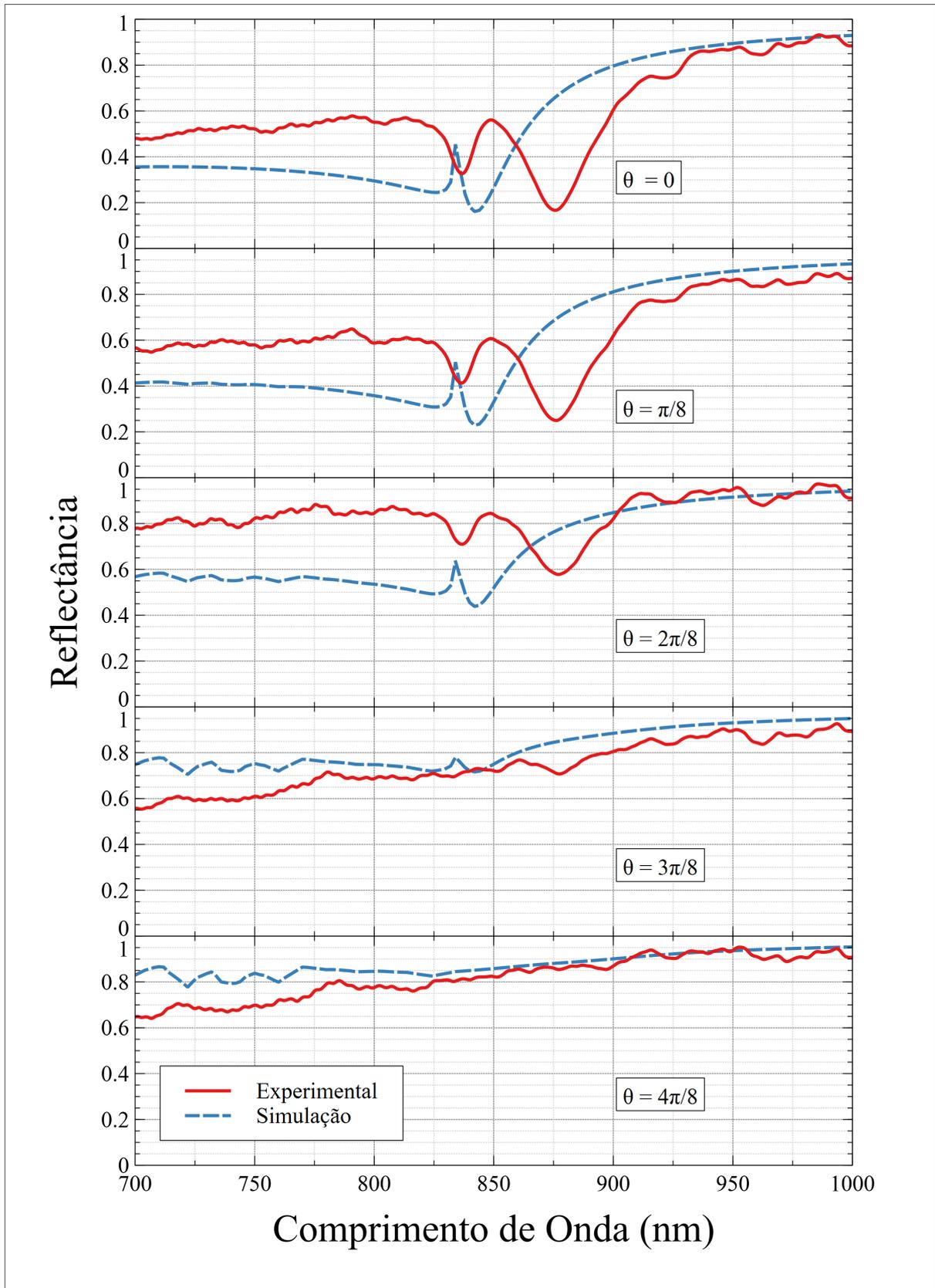
$$R = R_x \cos^4 \theta + R_y \sin^4 \theta + \frac{\sqrt{R_x R_y} \sin^2 \theta \cos \phi}{2}, \quad (16)$$

onde R_x e R_y são, respectivamente, as reflectâncias com polarização TM e com polarização TE, o θ é ângulo de polarização em relação a direção x e ϕ é a fase relativa entre os coeficientes de reflexão r_x e r_y , estes associados às respectivas reflectâncias pelas relações

$$R_x \equiv |r_x|^2, \quad (17)$$

$$R_y \equiv |r_y|^2. \quad (18)$$

Figura 39 – Comparação dos espectros de reflectância calculados e experimentais em diversos ângulos de polarização (GÓIS et al., 2022)



Fonte: O Autor (2022).

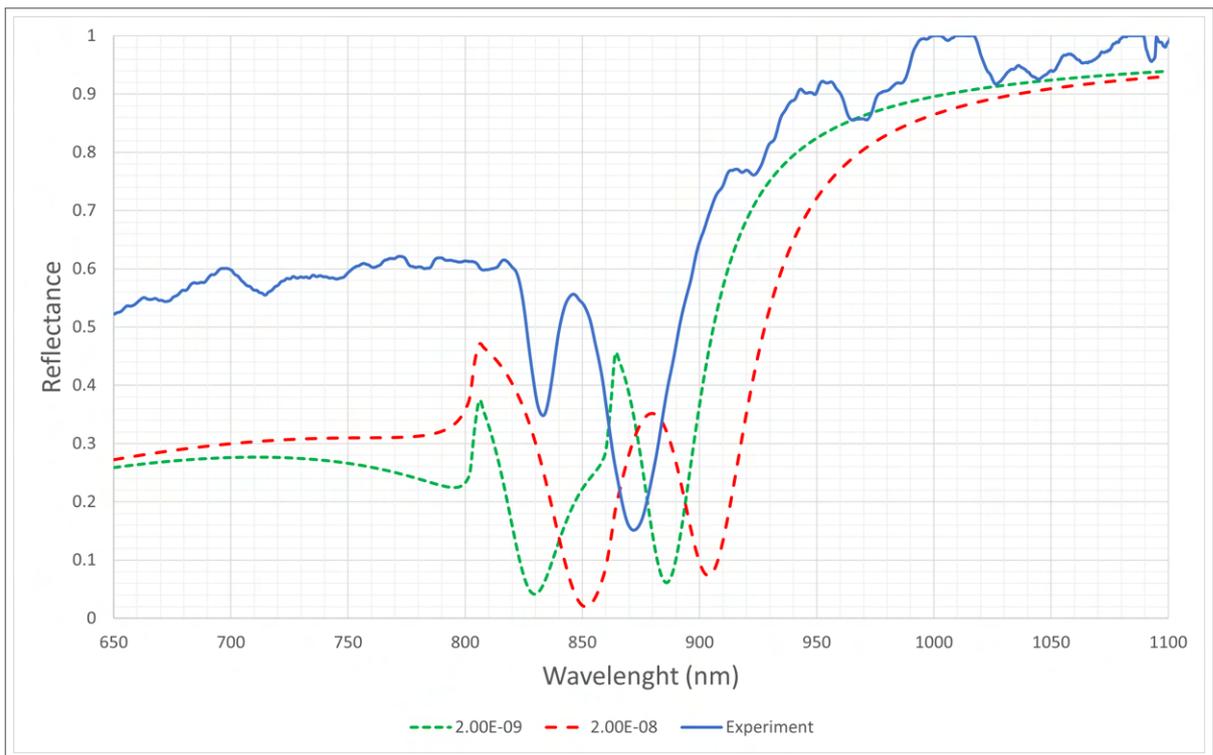
A Fig. 39 apresenta as curvas de reflectância experimentais e simuladas com 5 ângulos de polarização θ diferentes, onde o ângulo $\theta = 0$ corresponde à polarização TM e o ângulo $\theta = \pi/2$ à polarização TE. Na Fig. 34, é possível identificar o gradual desaparecimento dos vales centrais, conforme o aumento do ângulo de polarização, o que evidencia o sucesso na observação de RPS.m grade. Apesar disso, é possível destacar duas discrepâncias entre as curvas experimentais e simuladas. A primeira, refere-se ao deslocamento espectral do ponto central entre os vales, na curva experimental, localizado em 850 nm e não em 833 nm , como esperado. O segundo, refere-se à largura e profundidade dos vales, os quais, na curva experimental, são bem mais largos.

Visando identificar a causa dessas discrepâncias, foram investigados computacionalmente os efeitos de dois fatores não abordados nas simulações anteriores, o ângulo real do sinal incidente, o qual é diferente de zero, e a presença de uma camada de óxido na superfície da grade, inerente à exposição do alumínio a atmosfera. Assim, o SPRinG foi utilizado para simular a interface sensora sob diversos ângulos de incidência. A Fig. 40 apresenta as curvas de reflectância simulada com diferentes ângulos de incidência α , juntamente com a medida obtida experimentalmente. Nessas curvas, conforme o aumento do ângulo de incidência, é possível verificar o gradual afastamento dos vales, os quais sob um ângulo de incidência normal $\alpha = 0^\circ$ se encontram sobrepostos, separando-se a um ângulo de incidência de aproximadamente $\alpha = 0,8^\circ$.

Os efeitos da oxidação do alumínio, por sua vez, foram modelados pela adição de uma camada de óxido de alumínio, Al_2O_3 , de espessura E sobre o filme metálico, cujo as constantes ópticas foram obtidas de (QUERRY, 1985). Uma vez que o SPRinG ainda não dispõe da capacidade de simular interfaces com mais de 3 camadas, o COMSOL foi empregado para realização das simulações envolvendo a camada de óxido de alumínio. Novamente, utilizou-se como base o modelo proposto e validado por Araujo, Melo e Fontana (2023), adicionando a camada de óxido. Em contraste com a curva de reflectância obtida experimentalmente, a Fig. 41 apresenta as curvas de reflectância calculadas para interfaces com camadas de Al_2O_3 com espessuras de 2 nm e 20 nm , ambas sob um ângulo de incidência $\alpha = 2^\circ$. No gráfico da Fig. 41, é possível destacar três pontos de influência sob a curva de reflectância acarretados pelo crescimento da camada de óxido de alumínio. Primeiramente, é possível verificar o deslocamento do ponto central de ressonância, localizado entre os vales, o qual ocorre em comprimentos de onda mais elevados, conforme o aumento da espessura E da camada de óxido, o que pode explicar a discrepância entre o local do ponto central de ressonância veri-

ficado experimentalmente e a periodicidade nominal da grade. É possível verificar, também, o alargamento e achatamento dos vales, os quais se confundem com os efeitos do aumento do ângulo de incidência α . É possível verificar, ainda, o aumento da assimetria entre os vales simulados, os quais, diferentemente do verificado experimentalmente, tem seu vale de menor comprimento de onda, à esquerda do ponto central, maior que sua contraparte de maior comprimento de onda, à direita do ponto central.

Figura 40 – Espectros de reflectância experimental e simuladas com dois ângulos de incidência.



Fonte: O Autor.

Tendo-se um melhor entendimento sobre os possíveis efeitos de oxidação, angulação, parâmetros ópticos e geométricos sobre a curva de reflectância da interface, objetivando-se obter um melhor casamento entre as curvas de reflectância simuladas e experimental, o COMSOL foi empregado em novas simulações da interface com camada de óxido de alumínio. Dessa vez, contudo, o feixe incidente foi modelado por uma função normal centrada no ângulo de incidência $\alpha = 0$, dada por

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)^2}, \quad (19)$$

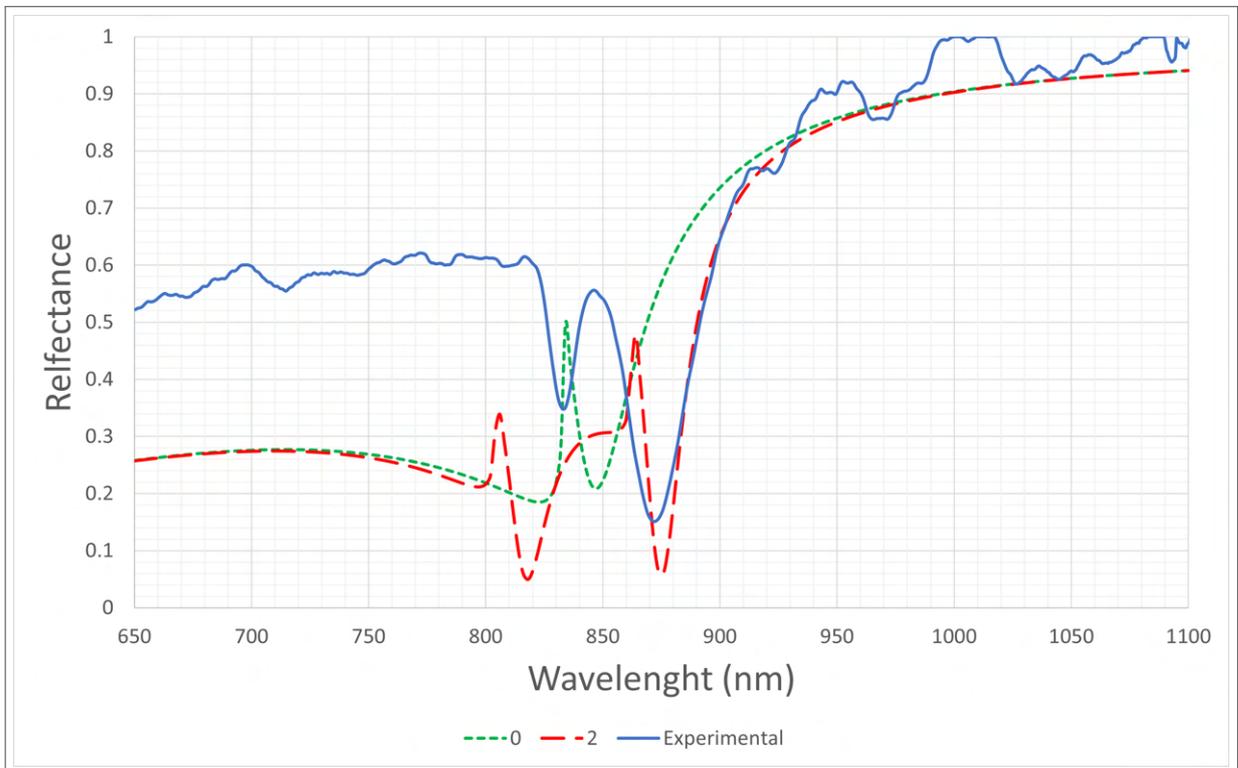
onde adotou-se o ângulo de colimação nominal do colimador com um desvio padrão de $\sigma = 1,7^\circ$. Desta forma, em contraste com as respectivas curvas de reflectância obtidas ex-

perimentalmente, a Fig. 42 apresenta as curvas de reflectância das interfaces simuladas sob incidência de um feixe gaussiano com camada de Al_2O_3 de 6 nm de espessura, a qual apresentou a curva de reflectância simulada de maior concordância com a curva de reflectância obtida experimentalmente.

O modelamento do feixe incidente gaussiano e o ajuste da espessura da camada de óxido de alumínio, foi possível obter o casamento dos pontos centrais das curvas de reflectância simuladas e experimentais. Além disso, foi possível observar vales à direita do ponto central com profundidade e espessuras relativamente condizentes às obtidas experimentalmente. Todavia, os ajustes supracitados tornaram os vales de menor comprimento de onda simulados ainda mais discrepantes aos obtidos experimentalmente. Assim como visto anteriormente na Fig. 40 o crescimento da camada de Al_2O_3 acarreta no encolhimento do vale à direita e expansão do vale à esquerda, contrariando o observado experimentalmente. Infelizmente, dado o alto custo computacional inerentes ao emprego do COMSOL, o qual se utiliza do método dos elementos finitos, a realização de estudos mais amplos e detalhados para determinação das causas desse fenômeno ficarão dirigidas a trabalhos futuros.

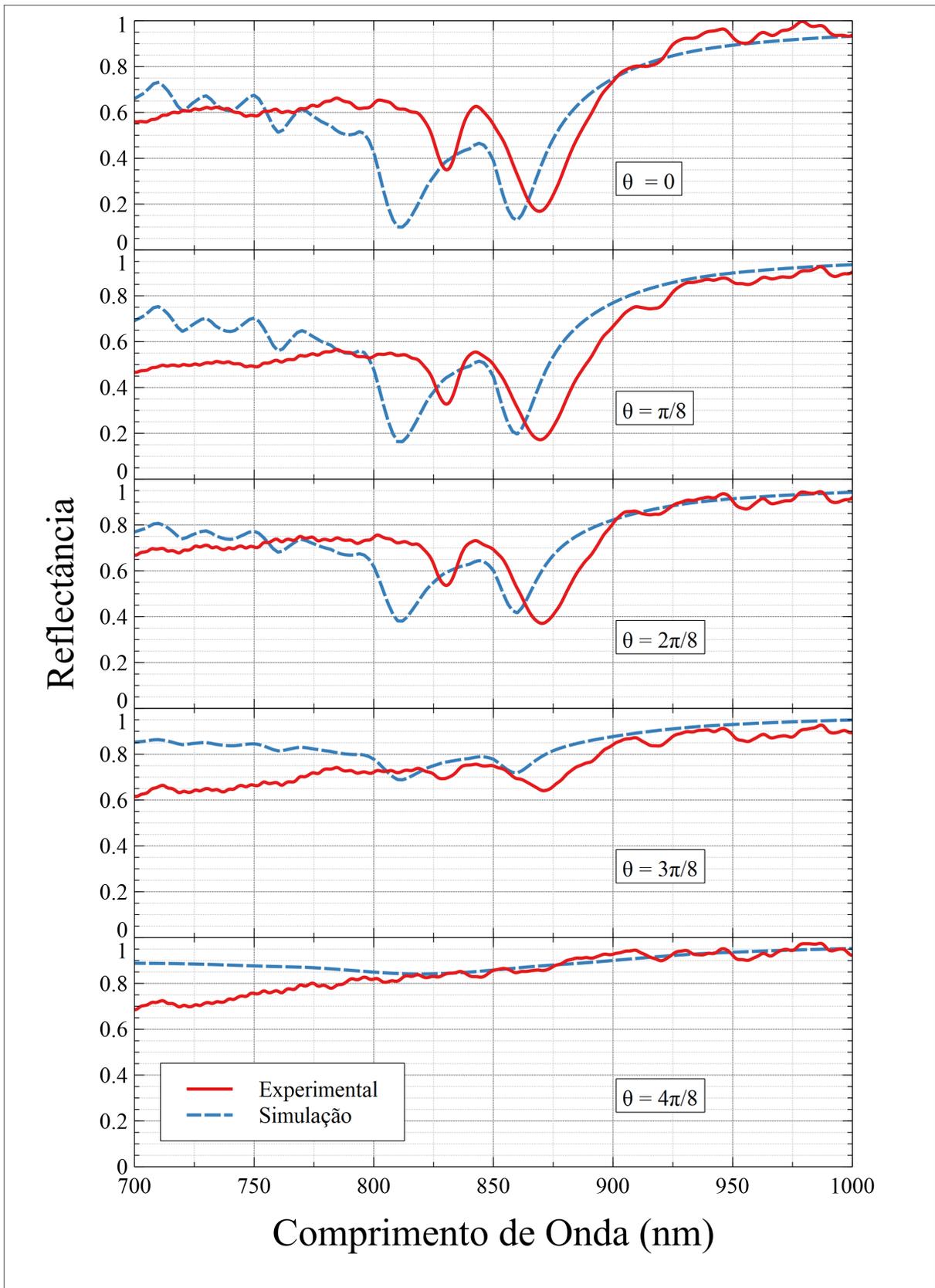
As simulações executadas concordam semi-quantitativamente com as observações experimentais do efeito RPS e os resultados apresentados nesta seção corroboram a eficácia do sistema retro-reflexivo em promover e detectar RPS.m grades. Assim, como forma de ratificar sua viabilidade no sensoriamento do índice de refração de meios fluidos, empregou-se a técnica proposta na implementação de um dispositivo capaz de promover e detectar o ponto de orvalho ambiente, conforme discutido no Capítulo 5.

Figura 41 – Curvas de reflectância calculadas para interfaces com camadas de Al_2O_3 com espessuras de 2 nm e 20 nm



Fonte: O Autor.

Figura 42 – Comparação dos espectros de reflectância calculados e experimentais em diversos ângulos de incidência



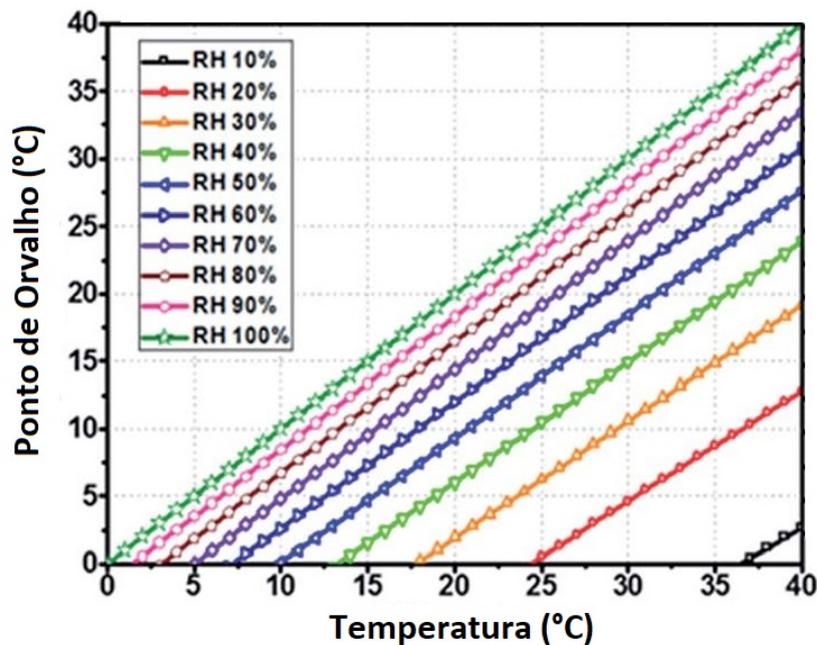
Fonte: O Autor.

5 SISTEMA DE DETECÇÃO DE PONTO DE ORVALHO EM GRADE DE DIFRAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

De acordo com a *National Oceanic and Atmospheric Administration's*, NOAA (2023), o ponto de orvalho é uma medida da umidade do ar, representando a temperatura em que o ar precisa ser resfriado para atingir a saturação, resultando na condensação do vapor de água presente na atmosfera. Em termos mais amplos, o termo "orvalho" refere-se ao conjunto de partículas líquidas formadas por essa condensação. Alternativamente, o ponto de orvalho pode ser descrito como a máxima quantidade de vapor que pode ser encontrada dissolvida em uma massa de ar, dependente da pressão e temperatura do sistema. A quantidade de vapor dissolvida em um ambiente atmosférico é chamada de umidade absoluta. Para simplificação, essa temperatura é frequentemente referida pela umidade relativa, que é a razão entre a umidade absoluta do ambiente e a umidade absoluta de saturação, ou seja, o ponto de orvalho. A Fig. 43 ilustra a relação entre a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura atmosférica para diferentes níveis de umidade relativa, indicados na legenda.

Figura 43 – Relação entre a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura atmosférica para diferentes umidades relativas.



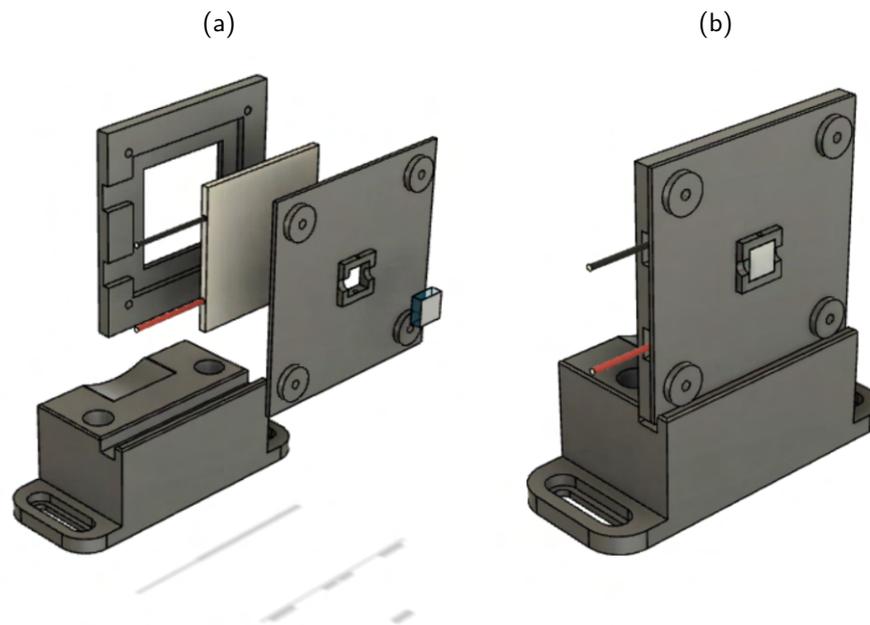
Fonte: Adaptado de Ko et al. (2018).

A medição precisa e confiável da umidade é fundamental em uma variedade de setores e atividades, desde a meteorologia até o controle de qualidade na indústria (KU; CHUNG, 2023). Os sensores de umidade desempenham um papel crucial nessa tarefa, permitindo a quantificação precisa da quantidade de água presente no ar ou em substâncias sólidas. Em sua maioria, os dispositivos comercialmente disponíveis para esse fim se baseiam em materiais higroscópicos, os quais absorvem a água presente no ambiente, alterando suas características físico-químicas, que são aferidas permitindo a determinação da umidade de forma indireta. Todavia, dadas as possibilidades de miniaturização e de se obter melhores resoluções, o interesse da academia em sensores de umidade ópticos é crescente, destacando-se em aplicações envolvendo a aferição de umidade em ambientes hostis (CHANI; KHAN; ASIRI, 2023). Diferentemente dos sensores baseados em materiais higroscópicos, os sensores de umidade ópticos, em geral, se valem da variação do índice de refração do meio externo.

5.2 PROTOTIPAÇÃO EXPERIMENTAL

Tendo isso em vista, decidiu-se averiguar experimentalmente a viabilidade da utilização da técnica de reflectometria óptica descrita no Capítulo 4 para observação da formação de orvalho sobre a grade de difração. Assim, para possibilitar o resfriamento da grade e, conseqüentemente, a formação controlada de orvalho, foi adicionada ao sistema experimental uma célula Peltier. Para monitorar o processo, foram adicionados dois sensores de temperatura: um fixado na lateral do substrato da grade de difração e um para medir a temperatura ambiente do experimento. Para isso, foi necessário o desenvolvimento de um novo suporte para grade de difração. Como ilustrado na Fig. 44, a célula Peltier foi fixada entre duas placas impressas em resina 3D, onde, para dirimir a perda do gradiente de temperatura entre as faces, foi utilizada ainda uma camada de polímero isolante entre a face fria da célula e o suporte. Na face quente da célula foi fixado um dissipador térmico com ventoinha, que, por simplicidade, foi omitido da Fig. 44. A grade de difração foi fixada ao lado frio da célula. Para facilitar a transferência de calor entre o dissipador de calor, a grade de difração e as respectivas faces da célula Peltier, utilizou-se de pasta térmica condutora. Finalmente, o conjunto foi montado em uma base, fixada à mesa óptica.

Figura 44 – Suporte da grade de difração: (a) Montagem; (b) Montado.



Fonte: O Autor.

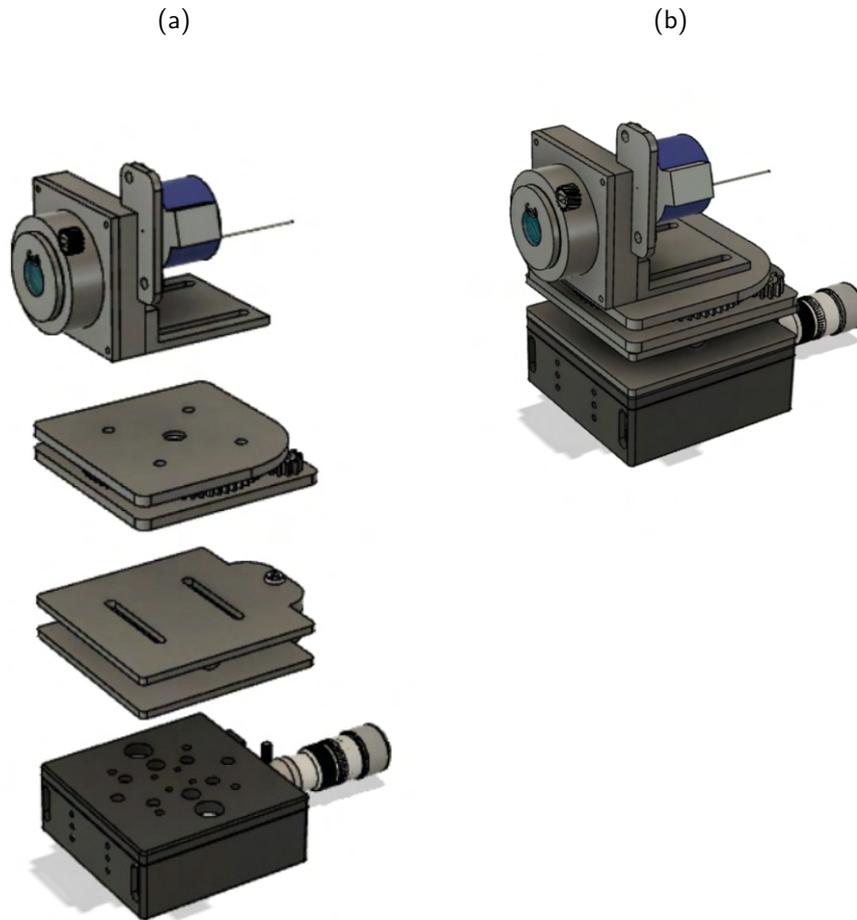
Dada a dificuldade de movimentar a grade de difração, fixada à célula Peltier, com precisão, foi necessária a concepção de um novo sistema de alinhamento, onde todos os elementos móveis utilizados no alinhamento do sistema óptico se encontram ligados ao suporte do colimador/polarizador. Além disso, para automatizar o processo de ajuste do ângulo de polarização, foi adicionado um motor de passo ao suporte do colimador/polarizador. Deste modo, a estrutura de alinhamento e polarização do sistema óptico conta com partes, uma base de translação, montada sobre a mesa óptica, uma base de rotação axial, uma base de rotação azimutal e o suporte do colimador/polarizador, montados em sequência como ilustrado na Fig. 45.

Como ilustrado na Fig. 46, a plataforma de rotação azimutal consiste em duas placas paralelas que deslizam em torno de um eixo central. Além disso, para facilitar o processo de alinhamento, a plataforma de rotação azimutal dispõe de uma engrenagem, com 64 dentes, concêntrica ao eixo central, ligada a uma engrenagem menor, com 12 dentes, localizada em um dos cantos da plataforma, resultando em uma razão de redução de aproximadamente 5,3.

Já a plataforma de rotação axial, ilustrada na Fig. 47, tem seu eixo de rotação em torno de um parafuso, que interliga as duas placas da plataforma formando uma dobradiça. Para possibilitar o controle do ângulo de alinhamento, a plataforma dispõe ainda de um sistema composto por uma mola, um parafuso e uma porca, engastada em uma cavidade na placa inferior da plataforma.

O suporte do colimador, ilustrado na Fig. 48, foi baseado em um mecanismo complacente

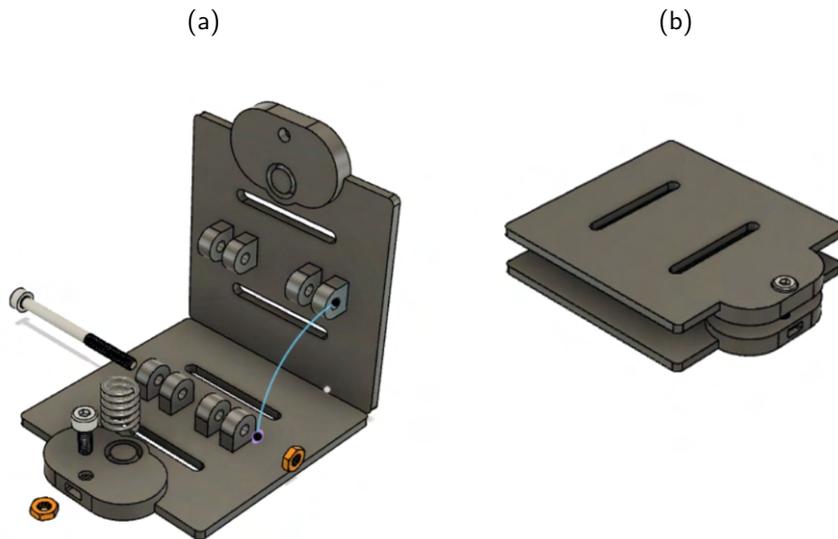
Figura 45 – Sistema de alinhamento e polarização: (a) Montagem; (b) Montado.



Fonte: O Autor.

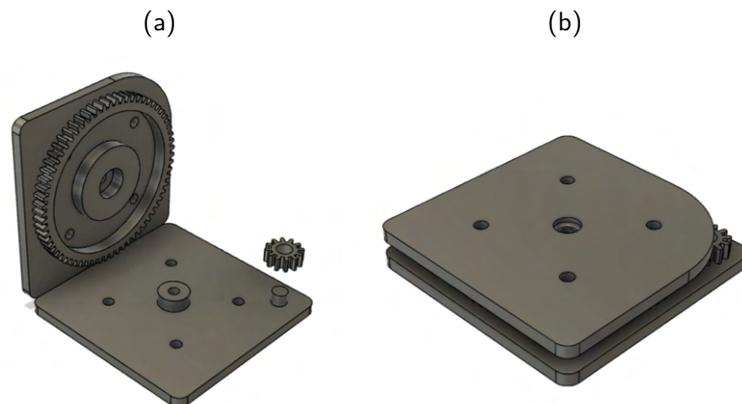
similar ao descrito na Seção 5.1. Nesse caso, optou-se por fixá-lo a uma base montada perpendicularmente à plataforma de rotação azimutal, que da suporte, também ao motor de passo, como ilustrado na Fig 49. Após a fixação ao suporte, ao eixo do motor de passo foi engastado uma engrenagem, a qual se conecta a outra engrenagem existente no suporte do polarizador, como ilustrado na Fig. 50. Como ilustrado na Fig. 51, montado em um eixo concêntrico ao colimador, ao acionar do motor de passo, apenas o suporte do polarizador rotaciona, idealmente, não interferindo no alinhamento do experimento. Para evitar o atrito, foi criado um espaçamento entre o polarizador e o colimador, o qual, para evitar perdas por reflexão, foi preenchido por um gel como mesmo índice de refração do substrato do polarizador.

Figura 46 – Plataforma de rotação. (a) Montagem; (b) Montado.



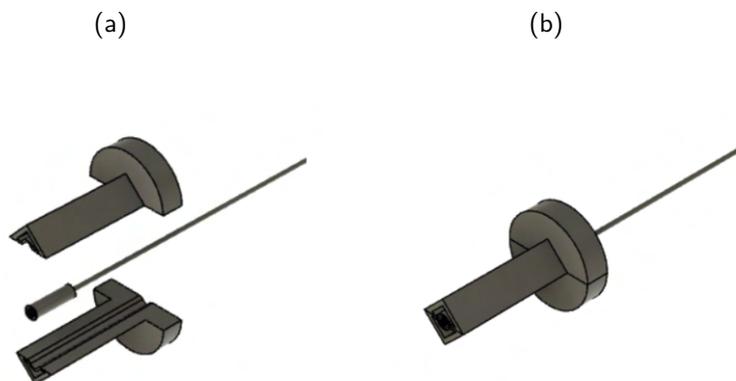
Fonte: O Autor.

Figura 47 – Plataforma de rotação: (a) Montagem; (b) Montado.



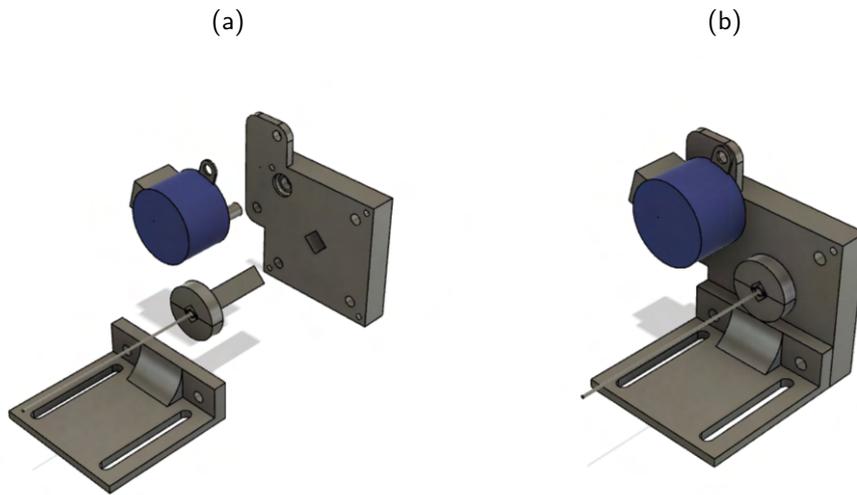
Fonte: O Autor.

Figura 48 – Suporte do colimador: (a) Montagem; (b) Montado.



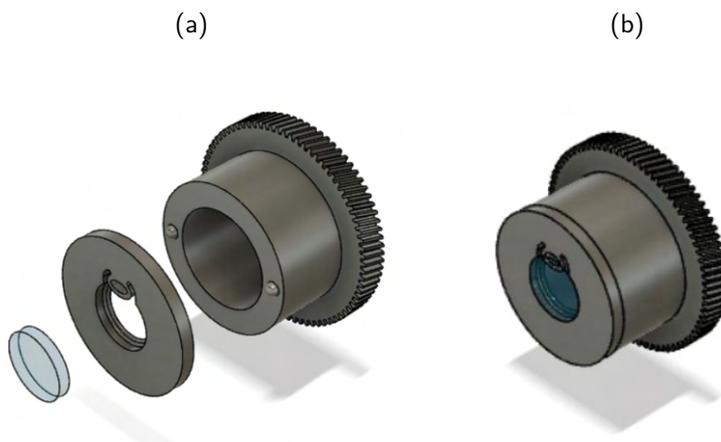
Fonte: O Autor.

Figura 49 – base do colimador: (a) Montagem; (b) Montado.



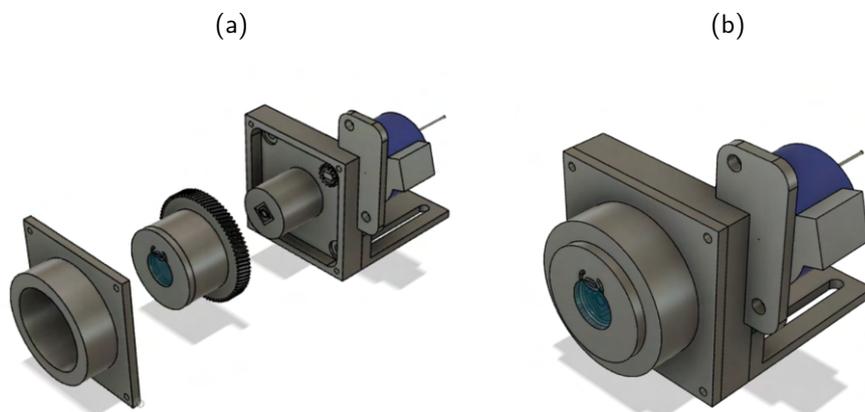
Fonte: O Autor.

Figura 50 – Suporte do Polarizador: (a) Montagem; (b) Montado.



Fonte: O Autor.

Figura 51 – Conjunto colimador/: (a) Montagem; (b) Montado.

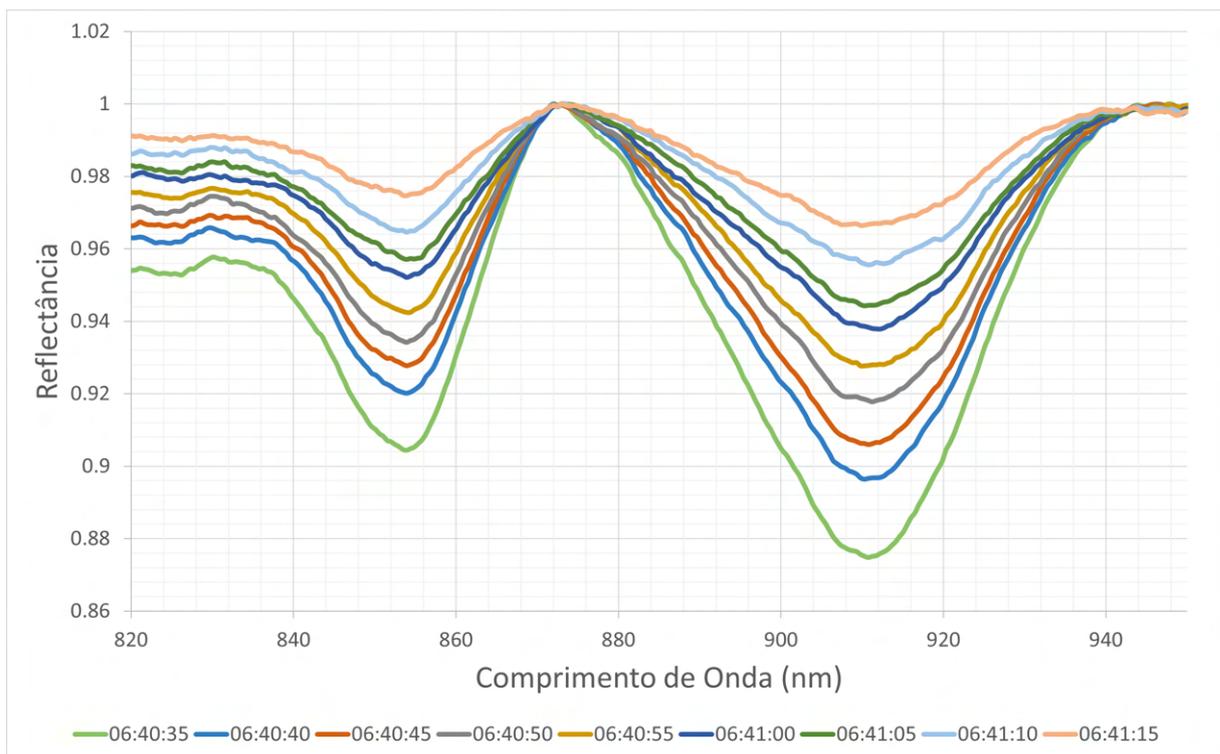


Fonte: O Autor.

5.3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Tendo-se o sistema experimental montado e alinhado, foram realizados os experimentos para observação da formação de orvalho sobre a grade de difração, os quais, do ponto de vista óptico, possuem uma arquitetura idêntica ao apresentado na Fig. 28. A Fig. 52 apresenta a evolução temporal da resposta espectral da reflectância durante a formação de orvalho, normalizada e referenciada com base nos procedimentos descritos na Seção 5.2, na qual os valores apresentados na legenda representam a hora, minuto e segundo em que as medidas foram feitas. Nas curvas do gráfico é possível visualizar o vale característico as curvas espectrais de RPS, os quais tem suas amplitudes diminuídas conforme a formação do orvalho sobre a grade de difração.

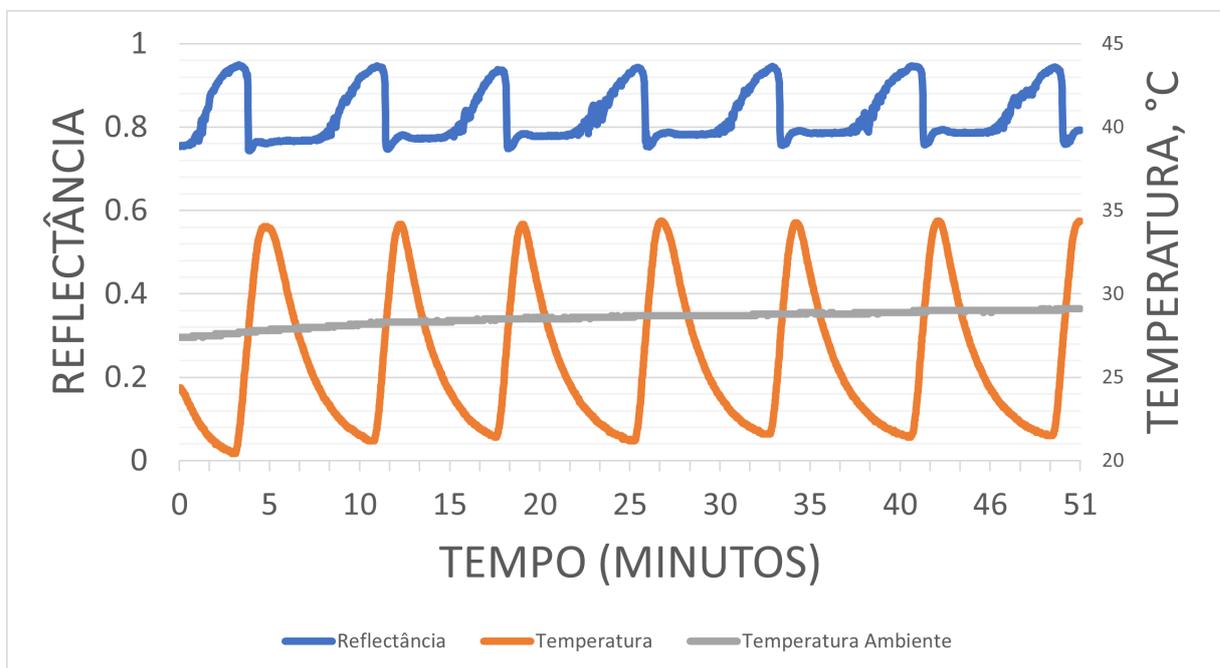
Figura 52 – Evolução da resposta espectral da reflectância durante a formação de orvalho.



Fonte: O Autor.

A Fig. 53 apresenta a evolução da reflectância em um comprimento de onda de 840nm, em azul, e suas respectivas temperaturas, em laranja, de 7 ciclos experimentais realizados em sequência. Em cada um destes ciclos, a grade de difração foi resfriada, ao ponto de fomentar orvalho, e, posteriormente, aquecida, evaporando o orvalho formado. Em cada um dos ciclos, é possível visualizar uma curva de elevação amortecida da reflectância, resultante da formação de orvalho, seguido de um decaimento abrupto da reflectância, resultante da evaporação do orvalho, os quais aparentam estar relacionadas conforme a temperatura varia durante o experimento. Ressalta-se que discrepância entre a velocidade de resfriamento e aquecimento obtidas no experimento se deve à célula peltier, da forma utilizada, é mais eficiente em aquecer do que resfriar a grade de difração. É possível verificar também um leve aumento da temperatura mínima atingida durante os ciclos, o que pode ser atribuído ao aumento da temperatura ambiente, representada no gráfico em cinza, resultante do calor gerado pelo próprio experimento.

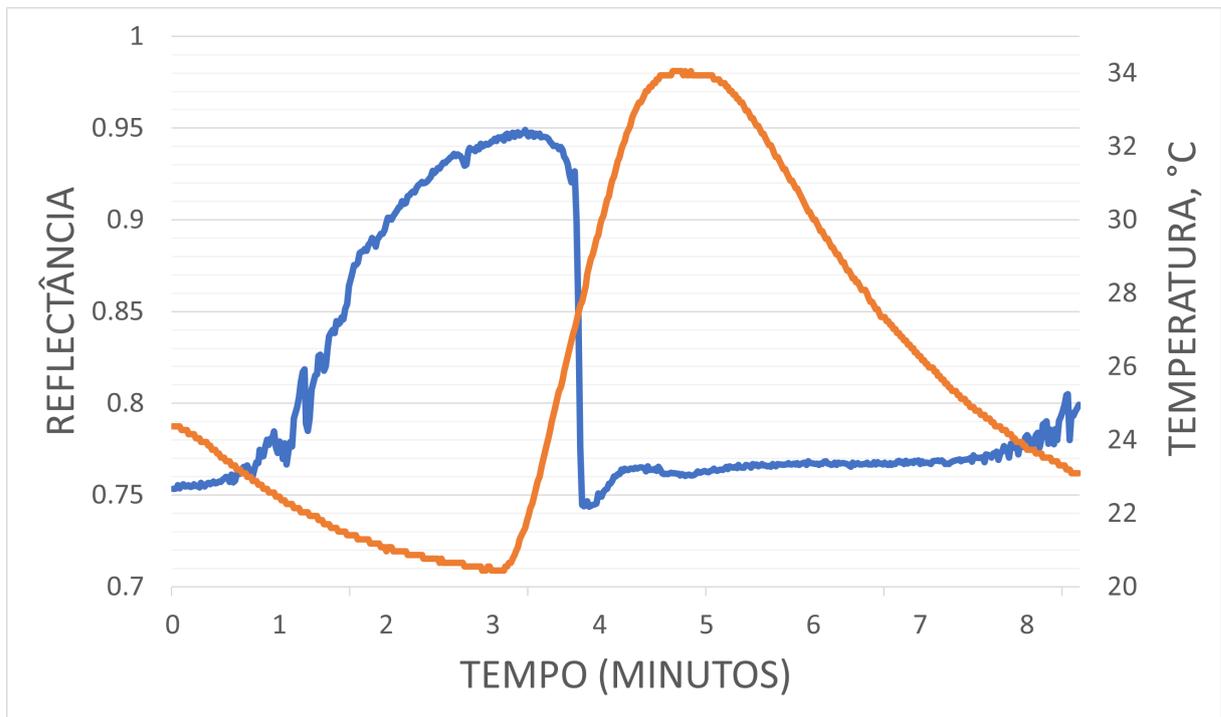
Figura 53 – Evolução da reflectância e temperatura durante 7 ciclos experimentais, em um comprimento de onda de 840nm.



Fonte: O Autor.

A Fig. 54 reapresenta, em maior escala, os resultados obtidos durante o primeiro ciclo experimental. No início da curva de ascensão da reflectância é possível identificar uma leve instabilidade, a qual pode ser atribuída ao modo como o orvalho se forma sobre a grade de difração. É possível verificar, também, que o decaimento abrupto da reflectância atinge um ponto de mínimo inferior ao obtido com a grade sem orvalho, o que, por sua vez, pode ser atribuído à presença de vapor entre a grade e o polarizador.

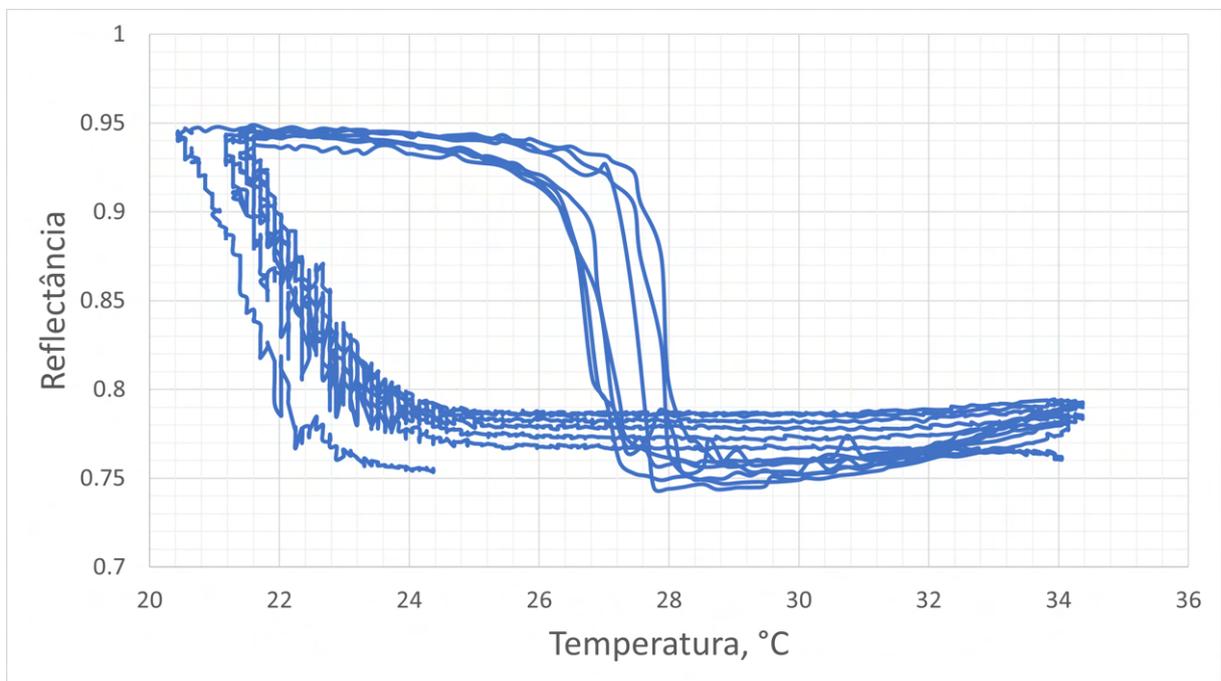
Figura 54 – Evolução da reflectância e temperatura no primeiro ciclo experimental, em um comprimento de onda de 840nm.



Fonte: O Autor.

Finalmente, a Fig. 55 apresenta a curva de histerese obtida nos 7 ciclos experimentais. A curva de histerese evidencia uma forte correlação entre a temperatura e reflectância na grade de difração. Além disso, é evidenciado, também, o deslocamento lateral da curva de histerese, resultante do aumento da temperatura ambiente e, conseqüentemente, do ponto de orvalho. Assim, com o auxílio da aferição da temperatura ambiente, a técnica utilizada se mostra promissora para a aferição não só do ponto de orvalho como da umidade relativa do ambiente.

Figura 55 – Evolução da resposta espectral da reflectância durante a formação de orvalho, entre diferentes ciclos.



Fonte: O Autor.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta metodologias e resultados referentes ao projeto, otimização e experimentos realizados com sensores de índice de refração retrorreflexivos em configuração planares ou em grades de difração. Para o caso de interfaces planares, dando continuidade aos trabalhos iniciados em Góis et al. (2016), implementou-se um filtro digital de baixo custo computacional, caracterizado por uma função de média móvel. Foi, então, realizada uma análise estatística de dados, determinando a potencialidade da configuração utilizada em detectar variações de reflectância na interface sensora na ordem de 10^{-3} . Todavia, devido à baixa sensibilidade da interface sensora de ponta de fibra nua, utilizada em Góis et al. (2016), foi obtido um limiar de detecção de $0,13 RIU$, que está muito aquém das possibilidades da configuração experimental.

Tendo-se como objetivo aprimorar a sensibilidade da interface sensora e, conseqüentemente, o limiar de detecção do dispositivo, foram realizados o projeto e a otimização de três opções de interfaces sensoras multicamadas. Uma vez que o objetivo final é implementar uma ou mais dessas interfaces na ponta da fibra, todas as interfaces propostas foram estudadas admitindo um sinal de entrada com incidência normal à superfície. Foram avaliados computacionalmente os benefícios da adição de um filme fino semitranslúcido de ouro à ponta da fibra óptica. Após a otimização da espessura do filme de ouro, a qual indicou uma espessura ótima de $13 nm$, inferiu-se, através da extrapolação estatística dos resultados obtidos anteriormente, um limiar de detecção de $10^{-2} RIU$. Foi avaliado computacionalmente o comportamento de uma interface sensora composta por múltiplas camadas de dielétricos com índices de refração distintos. Inicialmente, otimizou-se as espessuras da camadas para um dispositivos camadas, obtendo-se picos de sensibilidade em espessuras múltiplas de um quarto do comprimento de onda da luz incidente. Dada essa característica, é possível atribuir o ganho de sensibilidade a influência de interferências construtivas nas camadas dielétricas. Foi, então, avaliada a resposta da interface em relação ao número de camadas, obtendo-se um crescimento amortecido da sensibilidade, o qual se estabilizou na nona camada. Para um interface otimizada com 9 camadas dielétricas, foi calculado um limite de detecção do dispositivo $\Delta n \approx 5,6 \times 10^{-3}$.

No tocante ao uso do efeito RPS em grade de difração, para observação do efeito de RPS sob incidência frontal, foram otimizadas grades de difração com perfis senoidais em duas configurações metalizadas, cada uma com 4 metais diferentes: ouro, prata, alumínio e cobre.

Em ambas configurações, a prata alcançou as maiores sensibilidades, seguida pelo cobre e pelo ouro. Todavia, dada a confiabilidade resultante da sua maior inércia química, optou-se por focar os estudos subsequentes ao ouro, para o qual se obteve valores ótimos de sensibilidade, $30nm$ e $180nm$, amplitude, $20,42nm$ e $7nm$, periodicidade, $560,3nm$ e $561,7nm$, e espessura, $67,73nm$ e $1689nm$, para as configurações de Kretschmann e Otto, respectivamente.

Assim, para obter melhor compreensão do impacto das incertezas inerentes ao processo de fabricação das grades de difração, foram realizados estudos computacionais onde se variou os parâmetros em torno dos valores otimizados, onde se determinou as sensibilidades correspondentes. Nesses estudos, constatou-se, tanto para a configuração de Kretschmann quanto para a configuração de Otto, que a periodicidade da grade de difração é diretamente proporcional ao comprimento de onda ótimo da radiação incidente, de modo que, realizado o ajuste do comprimento de onda, a influência de pequenas variações na periodicidade da grade é desprezível. Verificou-se, também, que variações relativamente pequenas na amplitude da grade podem resultar em grandes perdas de sensibilidade, contudo, sem acarretar no deslocamento do comprimento de onda ótimo. Na configuração de Otto, a sensibilidade pode ser reduzida à metade com um erro de amplitude inferior a $5nm$ e, na configuração de Kretschmann, com um erro inferior a $15nm$. Para configuração de Kretschmann, foi verificada ainda uma correlação entre a espessura do filme metálico e a amplitude da grade, a qual indica, que com o ajuste da espessura do filme metálico, o erro necessário para reduzir a sensibilidade da grade passa a ser de $20nm$. Para a configuração de Otto, a distância entre a grade e a ponta da fibra apresenta pouco impacto na sensibilidade do dispositivo, e, praticamente, nenhum impacto no comprimento de onda ótimo.

Tendo-se os parâmetros otimizados e tolerâncias definidas, foi concebida uma metodologia para fabricação da grade otimizada, a qual se utiliza de técnicas de fotolitografia amplamente difundidas. Infelizmente, devido a motivos de força maior, a fabricação da grade otimizada teve que ser delegada a trabalhos futuros. Desta forma, para realização dos experimentos, adquiriu-se uma grade de difração de baixo custo, com perfil senoidal de amplitude $61nm$ e periodicidade $833nm$, metalizada com alumínio. Apesar dos parâmetros sub-ótimos da grade de difração adquirida, as simulações previram a ocorrência de RPS com intensidade suficiente para ser identificada no espectro de reflexão, viabilizando a execução dos experimentos. Objetivando-se obter maiores informações sobre a influência da RPS no espectro de reflexão da grade de difração, foi montada uma configuração experimental com banda espectral larga, constituída de um espectrômetro, uma lâmpada halógena, um acoplador óptico, um colimador e um

polarizador.

Para realizar o alinhamento entre o colimador e a grade de difração, foi fabricado um aparato de suporte experimental, o qual permite o ajuste do ângulo de incidência em dois eixos de rotação. Dada a precisão requerida para o acoplamento da radiação refletida, limitada pelo colimador, cujo ângulo de abertura é de 30 mrad , optou-se pela utilização de uma impressora 3D baseada em resina UV. Além da manutenção e ajuste do alinhamento, o aparato experimental fabricado, a rotação do polarizador e, conseqüentemente, a mudança da polarização do feixe incidente em relação a grade de difração. Para mitigar o risco de colisão, decidiu-se manter uma distância macroscópica entre o polarizador e grade, a qual, como previsto nas simulações, apresentou influência desprezíveis sobre o resultado obtido. Assim, pode-se observar a presença de dois vales no espectro de refração, os quais desaparecem com a mudança da polarização da radiação incidente, evidenciando o sucesso experimental em exitar RPS.

Para validar ainda mais as metodologias e configurações experimentais empregadas, resolveu-se por induzir a formação de orvalho sobre grade. Para isso, optou-se por resfriar diretamente o substrato da grade de difração. Assim, fez-se necessária a concepção de um novo aparato experimental. Aproveitando a oportunidade, foi adicionado ao aparato um motor de passo, que possibilitou a automatização do ajuste da polarização da onda incidente. Foi adicionado, ainda, ao aparato experimental, sensores para aferir a temperatura ambiente e a temperatura na grade de difração. Assim, o sistema experimental foi utilizado, com sucesso, para determinar o ponto de orvalho do ambiente experimental, registrando a curva de histerese resultante da formação e evaporação do orvalho.

Desta forma, pode-se reivindicar as seguintes contribuições e propor os seguintes trabalhos futuros.

6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES:

- **Otimizações:** Foi realizada uma serie de otimizações envolvendo interfaces sensoras acopladas a ponta de fibra óptica, incluindo resultados comparativos referentes a 4 filmes metálicos diferentes, os quais não foram encontrados previamente na literatura.
- **Projetos:** Foi realizado um estudo computacional detalhado sobre a influência da variação do parâmetros em torno dos valores ótimos obtidos, o qual, até onde se tem conhecimento, foi o primeiro a ser reportado. Ainda, tendo em vista as tolerâncias de-

finidas no estudo, foi proposta uma estratégia inovadora para confecção da grade de difração otimizada.

- **Experimentos:** Foram desenvolvidos dois aparatos experimentais de baixo custo, ambos fabricados com tecnologia 3D e capazes de realizar o alinhamento em dois eixos de rotação e rotação do polarizador. Além disso, desenvolveu-se uma técnica para determinação do ponto de orvalho utilizando RPS em grade de difração.

6.2 TRABALHOS FUTUROS:

- **Metalização da grade de difração com filme de ouro:** Mesmo com sua amplitude sub-ótima, as simulações indicam que a metalização da grade de difração adquerida com ouro proverá um ganho significativo na sensibilidade do dispositivo, permitindo a realização de experimentos com gases.
- **Fabricação de célula hermética:** A inserção da grade de difração em uma célula hermética estanque permitirá a utilização do aparato experimental para determinação da concentração de gases, conseqüentemente, permitindo a determinação da sensibilidade da interface sensora.
- **Automatização do Alinhamento:** Tendo-se em vista que o processo de alinhamento é um das etapas mais laboriosas do processo experimental, propõe-se a adição de motores de passo a plataformas de rotação utilizadas no alinhamento, assim como a integração do sistema de controle dessas plataformas com o software do espectrômetro.
- **Experimentação com DVD-R:** Como averiguado na literatura, a exposição e metalização da grade de difração presente no DVD-R é viável e compatível com a configuração e aparato experimental montado, devendo ser necessário apenas ajustes menores.
- **Fabricação da grade de difração otimizada:** A metodologia e aparato experimental se mostrou eficaz e confiável de modo que a obtenção de resultados condizentes com o estado da arte depende apenas da obtenção da grade de difração otimizada, a qual pode se dar pela estratégia de fabricação desenvolvida ou por outros métodos como a holografia ou Litografia por feixe de íons.

- **Implementação de um sensor com grade difração fixada à ponta da fibra:** Com alguns ajustes, os estudos computacionais e as estratégias experimentais desenvolvidos neste trabalho podem ser aplicados ao sensoriamento de concentração de fluídos. Para isso, é necessário a concepção de uma célula de fluxo, que encapsulará a grade. Idealmente, essa célula deverá dispor de uma janela de vidro, na qual o colimador ligado à ponta da fibra poderá ser fixado, garantindo uma distância constante entre a grade e o meio da onda incidente. Além disso, essa célula de fluxo deverá ser estanque, permitindo o controle do fluxo do fluído analisado dentro da célula.

REFERÊNCIAS

- AGLIULLIN, T.; IL'IN, G.; KUZNETSOV, A.; MISBAKHOV, R.; MISBAKHOV, R.; MOROZOV, G.; MOROZOV, O.; NUREEV, I.; SAKHABUTDINOV, A. Overview of Addressed Fiber Bragg Structures' Development. *Photonics*, v. 10, n. 2, 2023. ISSN 23046732.
- AL-JANABY, N.; AL-DERGAZLY, A. Fabrication of multi-mode tip fiber sensor based on surface plasmon resonance (SPR). *Sustainable Engineering and Innovation*, v. 2, n. 1, p. 10–17, 2020.
- ALONSO-MURIAS, M. D. C.; VELAZQUEZ-GONZALEZ, J. S.; MONZON-HERNANDEZ, D. SPR Fiber Tip Sensor for the Simultaneous Measurement of Refractive Index, Temperature, and Level of a Liquid. *Journal of Lightwave Technology*, v. 37, n. 18, p. 4808–4814, 2019. ISSN 15582213.
- ARAUJO, F. J. L. de; MELO, E. F. de; FONTANA, E. Optimization of the Surface Plasmon Resonance Effect on a Rectangular Metal Grating. In: *2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 10–12.
- BOGUE, R. Detecting gases with light: A review of optical gas sensor technologies. *Sensor Review*, v. 35, n. 2, p. 133–140, 2015. ISSN 02602288.
- BRIENTIN, A.; LEDUC, D.; GAILLARD, V.; GIRARD, M.; LUPI, C. Numerical and experimental study of a multimode optical fiber sensor based on Fresnel reflection at the fiber tip for refractive index measurement. *Optics and Laser Technology*, Elsevier Ltd, v. 143, n. June, p. 107315, 2021. ISSN 00303992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107315>>.
- CAVALCANTI, L. M.; FONTANA, E. *SWSO - Surface Wave Sensor Optimizer*. Universidade Federal de Pernambuco, 2016. Disponível em: <<http://www.ufpe.br/fontana/swso>>.
- CHANDRA, S.; COZART, J.; BISWAS, A.; LEE, S.; CHANDA, D. Magnetoplasmons for Ultrasensitive Label-Free Biosensing. *ACS PHOTONICS*, v. 8, n. 5, p. 1316–1323, may 2021. ISSN 2330-4022.
- CHANI, S. M. T.; KHAN, S. B.; ASIRI, A. M. *Humidity Sensors - Types and Applications*. [s.n.], 2023. ISBN 9781839685651. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>>.
- CHEN, M. qing; ZHAO, Y.; WEI, H. ming; ZHU, C. liang; KRISHNASWAMY, S. 3D printed castle style Fabry-Perot microcavity on optical fiber tip as a highly sensitive humidity sensor. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, Elsevier B.V., v. 328, n. October 2020, p. 128981, 2021. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128981>>.
- CHOI, B. B.; JO, J. H.; BICE, J.; TAYLOR, C.; JIANG, P.; YOO, S. J. Monitoring electrochemical methanol oxidation and CO coverage using Pt deposited SPR sensor platform. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, v. 45, n. 13, p. 19535–19546, oct 2021. ISSN 0363-907X. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85110542511&doi=10.1002%2Fer.7047&partnerID=40&md5=aaa93b94fa5e713d9d9ccae349ad495b>>.

CHOI, B. B.; KIM, B.; BICE, J.; TAYLOR, C.; JIANG, P. Inverse DVD-R grating structured SPR sensor platform with high sensitivity and figure of merit. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85139065491&doi=10.1016%2Fj.jiec.2022.09.022&partnerID=40&md5=05a46b5aee378cc560ecab89fff0c0d2>>.

da Silva Júnior, V. M.; NASCIMENTO, J. F.; Martins Filho, J. F. Analysis of D-shaped optical fiber based corrosion sensor using LMR and SPR effects. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 20, n. 3, p. 585–599, 2021. ISSN 21791074.

Da Silva, V. M.; FILHO, J. F. M.; Do Nascimento, J. F. Cascaded refractive index and corrosion sensors in a D-Shaped optical fiber using LMR and SPR effects. *2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference: Keep on Shining, SBFoton IOPC 2021*, p. 2–6, 2021.

DAIMON, M.; MASUMURA, A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region. *Appl. Opt.*, v. 46, n. 18, p. 3811, jun 2007. ISSN 0003-6935. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-46-18-3811>>.

DAS, A.; AGRAWAL, A. K.; GUPTA, N.; DHAWAN, A. Highly Sensitive LSPR Sensor Chips Based on Crystalline Gold Nanoparticles Grown on Silica. *IEEE SENSORS JOURNAL*, v. 22, n. 13, p. 12784–12795, jul 2022. ISSN 1530-437X.

FABBRI, S.; SILVA, C.; HERNANDES, E.; OCTAVIANO, F.; Di Thommazo, A.; BELGAMO, A. Improvements in the StArt tool to better support the systematic review process. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*. New York, NY, USA: ACM, 2016. p. 1–5. ISBN 9781450336918. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/2915970.2916013>>.

FERNANDES, G. D. F.; GÓIS, R. F.; MELO, E. F.; FONTANA, E. Espectroscopia RPS com laser diodo sintonizável. *SBMO*, 2022. Disponível em: <<https://www.edas.info/showManuscript.php?m=1570819438&type=final&ext=pdf&title=PDF+file>>.

FONTANA, E. A novel gold-coated multimode fiber sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 50, n. 1, p. 82–87, 2002. ISSN 00189480. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/981251/>>.

FONTANA, E. Theoretical and experimental study of the surface plasmon resonance effect on a recordable compact disk. *Appl. Opt.*, Optica Publishing Group, v. 43, n. 1, p. 79–87, jan 2004. Disponível em: <<https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-43-1-79>>.

FONTANA, E. *Tratado de eletromagnetismo*. Editora da Unicamp, 2023. ISBN 9788526815278. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Mrka0AEACAAJ>>.

GÓIS, R. F. *Sistema optico de detecção de nível na mistura água/óleo*. Tese (MSc Dissertation in Systems Engineering) — Universidade de Pernambuco, 2017.

GÓIS, R. F.; CALVALCANTI, G. O.; FONTANA, E. Prospects for Developing Low-Cost Optical Fiber Sensors for Liquid-Liquid Interface Detection. *Journal of Microwaves*,

Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 12, n. 3, p. 338–350, 2022. ISSN 21791074.

GÓIS, R. F.; CAVALCANTI, G. O.; FEITOSA, M. A. F.; FONTANA, E. Otimização da Detecção da Interface Água-Petróleo em Tanques Trifásicos por Fibras Ópticas. 2016.

GÓIS, R. F.; CAVALCANTI, G. O.; MELO, E. F.; LLAMAS-GARRO, I.; FONTANA, E. Ressonância de Plásmons de Superfície em Grade de Difração de Alumínio Sob Incidência Normal. *SBMO*, 2022. Disponível em: <<https://www.edas.info/showManuscript.php?m=1570819152&type=final&ext=pdf&title=PDF+file>>.

GÓIS, R. F.; CAVALCANTI, G. O.; MELO, E. F. D.; FONTANA, E.; LLAMAS-GARRO, I. Estudo Computacional de Sensores Plasmônicos em Grades de Difração. *Anais do Simpósio Brasileiro de Micro-ondas (SBMO)*, 2020.

GÓIS, R. F.; CAVALCANTI, G. O.; MELO, E. F. de; FONTANA, E. Highly Sensitive Retro-Reflectance Fiber-Optic Sensors for Liquid-Liquid Interface Detection. In: *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–3.

GUO, X.; ZHOU, J.; DU, C.; WANG, X. Highly sensitive miniature all-silica fiber tip fabry-perot pressure sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 31, n. 9, p. 689–692, 2019. ISSN 19410174.

HAWKINS, A. R.; SCHMIDT, H. *Handbook of Optofluidics*. Taylor & Francis Group, 2010. ISBN 9781420093544. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Rj8LrUwbkPoC>>.

HENRIQUE PATRIOTA ALVES. *FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D: fabricação e aplicações em sensoriamento*. 1–171 p. Tese (Tese de Doutorado) — UFPE, 2020.

HOMOLA, J.; YEE, S. S.; GAUGLITZ, G. Surface plasmon resonance sensors: review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 54, n. 1-2, p. 3–15, jan 1999. ISSN 09254005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400598003219>>.

HWANG, D.; KIM, J.-y.; KIM, H.-S.; LEE, M. G.; KOREA, R. O. NOVEL STAGE WITH VOICE COIL MOTOR FOR LASER BEAM DIRECT WRITING. n. June, 2016.

JA'AFAR, P. N. S. S.; RAZALI, N. M.; AMBRAN, S.; AHMAD, F. Sodium Chloride Concentration Measurement via Optical Fiber Tip Sensor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1051, n. 1, p. 012030, 2021. ISSN 1757-8981.

JAVAHIRALY, N. Review on hydrogen leak detection: comparison between fiber optic sensors based on different designs with palladium. *Optical Engineering*, v. 54, n. 3, p. 030901, 2015. ISSN 0091-3286.

JEON, T.; KIM, D. H.; PARK, S. G. Holographic Fabrication of 3D Nanostructures. *Advanced Materials Interfaces*, v. 5, n. 18, p. 1–13, 2018. ISSN 21967350.

JIANG, X.; SHEN, M.; LUN, D. P.-K.; CHEN, W.; SOMEKH, M. G. High Aspect-Ratio Open Grating Fabry-Perot Resonator for High-Sensitivity Refractive Index Sensing. *IEEE Sensors Journal*, v. 22, n. 16, p. 15923–15933, aug 2022. ISSN 1558-1748.

- KACHIRAJU, S. R.; GREGORY, D. A. Determining the refractive index of liquids using a modified Michelson interferometer. *Optics and Laser Technology*, Elsevier, v. 44, n. 8, p. 2361–2365, 2012. ISSN 00303992. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.04.020>>.
- KADHIM, H. J.; AL-MUMEN, H.; NAHI, H. H.; HAMIDI, S. M. Tunable plasmon induced transparency in one-dimensional gold nano-grating as a new kind of neuro-transmitter sensor. *Optik*, v. 269, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137594967&doi=10.1016%2Fj.ijleo.2022.169907&partnerID=40&md5=7b5500435c0d773b4fa402ea7624f48f>>.
- KASRY, A.; NICOL, A.; KNOLL, W. Grating-coupled surface-plasmon fluorescence DNA sensor. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, v. 127, n. 5, 2021. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85104786733&doi=10.1007%2Fs00340-021-07619-4&partnerID=40&md5=44b98536746aa73ef1fcd077eee1d97c>>.
- KHODAMI, M.; HIRBODVASH, Z.; KRUPIN, O.; WONG, W. R.; LISICKA-SKRZEK, E.; NORTHFIELD, H.; HAHN, C.; BERINI, P. Fabrication of Bloch Long Range Surface Plasmon Waveguides Integrating Counter Electrodes and Microfluidic Channels for Multimodal Biosensing. *Journal of Microelectromechanical Systems*, v. 30, n. 5, p. 686–695, oct 2021. ISSN 1941-0158.
- KIM, H.-T. H.-T.; YU, M. On-Fiber Multiparameter Sensor Based on Guided-Wave Surface Plasmon Resonances. *Journal of Lightwave Technology*, v. 40, n. 7, p. 2157–2165, apr 2022. ISSN 0733-8724. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120046863&doi=10.1109%2FJLT.2021.3130148&partnerID=40&md5=7427938f10d35469ef7d73c68e5c6dd4>>.
- KO, Y.; LEE, C.; KIM, Y.; KIM, Y.; YUN, Y. J.; JUN, Y. Dew point temperature as an invariant replacement for relative humidity for advanced perovskite solar cell fabrication systems. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 6, n. 42, p. 20695–20701, 2018. ISSN 20507496.
- KRETSCHMANN, E. Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, v. 241, n. 4, p. 313–324, aug 1971. ISSN 0939-7922. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF01395428>>.
- KU, C. A.; CHUNG, C. K. Advances in Humidity Nanosensors and Their Application: Review. *Sensors*, v. 23, n. 4, 2023. ISSN 14248220.
- LARSON, R.; FARBER, B. *Elementary Statistics: Picturing the World, Books a la Carte Edition*. Pearson Education Canada, 2011. 234–280 p. ISBN 9780321693785. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=i5ikcQAACAAJ>>.
- LERTVACHIRAPAIBOON, C.; BABA, A.; SHINBO, K.; KATO, K. Dual-mode surface plasmon resonance sensor chip using a grating 3D-printed prism. *Analytica Chimica Acta*, Elsevier Ltd, v. 1147, p. 23–29, 2021. ISSN 18734324. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.12.027>>.
- LERTVACHIRAPAIBOON, C.; BABA, A.; SHINBO, K.; KATO, K. Dual-mode surface plasmon resonance sensor chip using a grating 3D-printed prism. *Analytica Chimica*

Acta, v. 1147, p. 23–29, 2021. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098669596&doi=10.1016%2Fj.aca.2020.12.027&partnerID=40&md5=00fc137cc2f4f574316b7af1b64d8e30>>.

LI, M.; CUSHING, S. K.; WU, N. Plasmon-enhanced optical sensors: A review. *Analyst*, Royal Society of Chemistry, v. 140, n. 2, p. 386–406, 2015. ISSN 13645528.

LIMA, R. A. de; SOARES, V. H.; MARTINS-FILHO, J. F.; FONTANA, E. Tailoring a spectral line detection system for applications in dissolved gas analysis. *Sensors and Actuators, A: Physical*, Elsevier B.V., v. 293, p. 178–188, 2019. ISSN 09244247. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.020>>.

LIU, Y.; JING, Z.; LI, R.; ZHANG, Y.; LIU, Q.; LI, A.; ZHANG, C.; PENG, W. Miniature fiber-optic tip pressure sensor assembled by hydroxide catalysis bonding technology. *Optics Express*, v. 28, n. 2, p. 948, 2020. ISSN 10944087.

LONG, S.; WANG, E.; WU, M.; ZHU, H.; XU, N.; WANG, Y.; CAO, J. Sensing absorptive fluids with backside illuminated grating coupled SPR sensor fabricated by nanoimprint technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 337, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124288973&doi=10.1016%2Fj.sna.2022.113416&partnerID=40&md5=c9860ab698527ace7f730fd885256791>>.

MALITSON, I. H. Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica. *J. Opt. Soc. Am.*, v. 55, n. 10, p. 1205, oct 1965. ISSN 0030-3941. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-55-10-1205>>.

MAMYKIN, S. V.; GNILITSKYI, I. M.; DUSHEYKO, M. G.; DEVOL, T. A.; BLIZNYUK, V. N. Femtosecond laser nano-structuring for surface plasmon resonance-based detection of uranium. *APPLIED SURFACE SCIENCE*, v. 576, feb 2022. ISSN 0169-4332.

MELO, E. F. de; FONTANA, E. Design of Surface Plasmon Resonance Sensors Having Maximum Response at Normal Incidence. In: *Frontiers in Optics 2012/Laser Science XXVIII*. Washington, D.C.: OSA, 2012. p. FTu3A.18. ISBN 978-1-55752-956-5. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=FiO-2012-FTu3A.18>>.

MELO, E. F. de; FONTANA, E. *SPRinG - Surface Plasmon Resonance in Gratings*. Universidade Federal de Pernambuco, 2013. Disponível em: <<http://www.ufpe.br/fontana/spring>>.

NAKU, W.; NAMBISAN, A. K.; ROMAN, M.; ZHU, C.; GERALD, R. E.; HUANG, J. Identification of Volatile Organic Liquids by Combining an Array of Fiber-Optic Sensors and Machine Learning. *ACS Omega*, v. 8, n. 5, p. 4597–4607, 2023. ISSN 24701343.

NI, H.; ZHANG, L.; PING, A.; KRASAVIN, A. V.; ALI, H.; NI, B.; CHANG, J. Dual-mode independent detection of pressure and refractive index by miniature grating-coupled surface plasmon sensor. *Optics Express*, v. 30, n. 4, p. 5758, 2022. ISSN 10944087.

NOAA. *National Weather Service Glossary*. 2023. Disponível em: <<https://w1.weather.gov/glossary/index.php?word=dew+point>>.

OLIVEIRA, H. J. B. de. *SENSORES À FIBRA ÓPTICA COM DUPLA CAMADA METÁLICA NA FACETA E COM ESTRUTURA HETERONÚCLEO*. 1–149 p. Tese (Tese de Doutorado) — UFPE, 2023.

- OTREMBA, Z. Oil droplets as light absorbents in seawater. *OE*, v. 15, n. 14, p. 8592–8597, 2007. ISSN 10944087. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-15-14-8592>>.
- OTTO, A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, v. 216, n. 4, p. 398–410, aug 1968. ISSN 14346001. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF01391532>>.
- POHORECKI, R.; BRIDGWATER, J.; GALLEGOS, M. *Chemical Engineering and Chemical Process Technology - Volume V: Chemical Engineering Education and Main Products*. EOLSS Publications, 2010. 339 p. ISBN 9781848264007. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=WtNNCwAAQBAJ>>.
- QUERRY, M. R. Optical Constants, Report No. AD-A158 623. *Crdc*, CR-85034, p. 1–413, 1985. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a158623.pdf>>.
- RAYLEIGH, L. On the Dynamical Theory of Gratings. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 79, n. 532, p. 399–416, 1907. ISSN 1364-5021.
- RAZALI, N. M.; ZAIDI, N. F. A.; JA'AFAR, P. N. S. S.; HAMZAH, A.; AHMAD, F.; AMBRAN, S. Optical fibre tip sensor coated with chitosan for lead ion detection. *AIP Conference Proceedings*, v. 2203, 2020. ISSN 15517616.
- ROTHSCHILD, M. Projection optical lithography. *Materials Today*, Elsevier Ltd, v. 8, n. 2, p. 18–24, 2005. ISSN 13697021. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)00698-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(05)00698-X)>.
- SALUNKHE, T. T.; LEE, H. K.; CHOI, H. W.; PARK, S. J.; KIM, J. H.; KIM, I. T. High sensitivity temperature sensor based on Fresnel reflection with thermosensitive polymer: Control of morphology and coating thickness. *Japanese Journal of Applied Physics*, IOP Publishing, v. 59, n. SG, 2020. ISSN 13474065.
- SCHOTT AG. *Optical Glass Data Sheets*. Mainz: [s.n.], 2010. Disponível em: <www.schott.com/advanced_optics>.
- SHARMA, A. K.; PANDEY, A. K.; KAUR, B. A Review of advancements (2007–2017) in plasmonics-based optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 43, n. March, p. 20–34, 2018. ISSN 10685200. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.03.008>>.
- SHEN, Y.; HE, K.; ZOU, Q.; XING, S.; HUANG, J.; ZHENG, M.; SHE, X.; JIN, C. Ultrasooth Gold Nanogroove Arrays: Ultranarrow Plasmon Resonators with Linewidth down to 2 nm and Their Applications in Refractive Index Sensing. *Advanced Functional Materials*, v. 32, n. 10, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85119844659&doi=10.1002%2Fadfm.202108741&partnerID=40&md5=043a6ef523bfc6e175752380634cde46>>.
- SIERANT, A.; JANY, B. R.; KAWALEC, T. Near-field characterization of surface plasmon polaritons on a nanofabricated transmission structure. *Physical Review B*, v. 103, n. 16, 2021. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105493031&doi=10.1103%2FPhysRevB.103.165433&partnerID=40&md5=e54cba28a1b1142e33ca5896db37441b>>.

SILVA, M. S.; ALVES, H. P.; Do Nascimento, J. F.; MARTINS-FILHO, J. F. Impact of pulse width on the sensitivity and range of a raman-based distributed fiber-optic temperature sensor. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 17, n. 4, p. 539–551, 2018. ISSN 21791074.

SPEIGHT, J. G. *Handbook of Petroleum Product Analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley Sons, Inc, 2014. ISBN 9781118986370.

SU, Y.; GENG, Z.; LV, X.; FANG, W.; WANG, S.; MA, Z.; PEI, W. Self-referenced plasmonic biosensor with gold grating on thin gold film. *AIP Advances*, v. 11, n. 3, 2021. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102269785&doi=10.1063%2F5.0039981&partnerID=40&md5=610a01e0e57597d4a136bce197c9e7e1>>.

Texas Instruments. LFX5x JFET Input Operational Amplifiers. n. 1, 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf357.pdf>>.

THORLABS. FC780-50B-FC. 2011. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/>>.

THORLABS. Pigtailed Laser Diode , SMF LPS-785-FC. 2013. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/>>.

THORLABS. Si Photodiode 350-1100 nm FDS100. 2013. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/>>.

UDD, E.; SPILLMAN, W. B. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Wiley, 2011. ISBN 9780470126844. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=FDs850m70%5C_gC>.

URBANCOVA, P.; PUDIS, D.; GORAUS, M.; Kovac Jr., J. IP-Dip-Based SPR Structure for Refractive Index Sensing of Liquid Analytes. *NANOMATERIALS*, v. 11, n. 5, may 2021.

WEAVER, J. H.; KRAFKA, C.; LYNCH, D. W.; KOCH, E. E. Optical properties of metals. *Appl. Opt.*, OSA, v. 20, n. 7, p. 1124₁ – – – –1125, 1981. *Disponível em* : <>.

WOOD, R. W. A suspected case of the electrical resonance of minute metal particles for light-waves. A new type of absorption. *Proceedings of the Physical Society of London*, v. 18, n. 1, p. 166–182, 1901. ISSN 14787814.

WU, M.; XU, N.; WANG, E.; GEN, S.; ZHU, H.; LIU, C.; CAO, J. Nan gratings fabricated by wet etching assisted femtosecond laser modification of silicon for surface plasmon resonance sensing. *Applied Surface Science*, v. 603, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135899990&doi=10.1016%2Fj.apsusc.2022.154446&partnerID=40&md5=dc220b4ba39529668482bd27d328f7a6>>.

WU, Q. L.; ZHAO, Y.; SI-YU, E.; ZHANG, Y. nan. Reflex optical fiber probe for simultaneous determination of seawater salinity and temperature by surface plasmon resonance. *Instrumentation Science and Technology*, v. 47, n. 4, p. 374–388, 2019. ISSN 15256030.

YANG, N.-Z.; HSIUNG, C.-T.; HUANG, C.-S. Biosensor based on two-dimensional gradient guided-mode resonance filter. *Optics Express*, v. 29, n. 2, p. 1320–1332, 2021. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099157191&doi=10.1364%2FOE.408597&partnerID=40&md5=cdb8e50b2b295ed1fc0370ad6ad840e7>>.

YUAN, J.; ZHAO, C.; YE, M.; KANG, J.; ZHANG, Z.; JIN, S. A Fresnel reflection-based optical fiber sensor system for remote refractive index measurement using an OTDR. *Photonic Sensors*, v. 4, n. 1, p. 48–52, 2014. ISSN 16749251.

ZHANG, Z.; CHU, F.; GUO, Z.; FAN, J.; LI, G.; CHENG, W. Design and optimization of surface plasmon resonance sensor based on polymer-tipped optical fiber. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 37, n. 11, p. 2820–2827, 2019. ISSN 07338724.

ZHAO, L.; ZHANG, Y.; CHEN, Y.; WANG, J. Composite cavity fiber tip Fabry-Perot interferometer for high temperature sensing. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 50, n. January, p. 31–35, 2019. ISSN 10685200. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.01.027>>.

APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A.1 METODOLOGIA

Com o objetivo de compreender os avanços recentes em sensores em fibra baseados em grades de difração, foi realizada uma revisão sistemática por busca exaustiva em três das mais relevantes bases de dados sobre o tema, *IEEE*, *Scopus* e *Web of Science*. Para isso, utilizou-se a *String* de busca "*((Plasmon)OR(RPS))AND(Grating)AND(Sensor)NOT(Bragg)*" para filtrar trabalhos publicados na língua inglesa. Dada a amplitude da busca, para tornar o trabalho factível, restringiu-se o escopo de busca a trabalhos publicados em revistas no período compreendido entre janeiro de 2021 e Dezembro de 2022, resultando em um catálogo de 271 artigos, 18 provenientes do *IEEE*, 120 provenientes da *Scopus* e 133 provenientes da *Web of Science*.

Para facilitar a organização do revisão sistemática foi utilizado o programa de computador *State of the Art through Systematic Review (StArt)* (FABBRI et al., 2016). Com o auxílio do StArt foram identificadas 95 artigos duplicados, reduzindo o catálogo para 176 artigos. Ainda, durante a fase de seleção, onde se avaliou os títulos e resumos dos artigos, foram rejeitados 87 artigos, os quais tratavam de assuntos distintos do estudados nessa revisão, reduzindo o catálogo a 89 artigos. Infelizmente, não foi possível a obtenção de 7 dos 89 artigos selecionados, reduzindo o catálogo final avaliado a 82 artigos.

Para avaliação desses artigos, foram definidos quatro critérios de rejeição. Assim, 15 artigos foram rejeitados por não apresentarem resultados experimentais, 2 foram rejeitados por se tratarem de trabalhos de revisão, 3 por se tratarem de sensores baseados em fibras de Bragg e 30 por não utilizarem grade. Ao final, 19 artigos foram selecionados para extração de dados, resultando na Tabela 3.

A.2 ESTADO DA ARTE

Dentre outras informações, os artigos foram categorizados conforme o método utilizado para fabricação da grade. Seis dos 19 artigos analisados, assim como o realizado no grupo de trabalho que inclui essa tese, em (FONTANA, 2004), utilizaram como base o padrão nanométrico existente em CD-Rs ou DVD-Rs. Dentre esses, 3 trabalhos se destacam por utilizarem ângulo de incidência normal, similar ao que se pretende explorar nesse trabalho. Todavia, diferentemente

do almejado nesse trabalho, o trabalho apresentado em Kadhim et al. (2022) a aferição da variação da transmitância através de uma grade semitranslúcida, fabricada com filme fino de ouro sobre um substrato de policarbonato. Para acarretar essa variação de transmitância, expôs-se a superfície da grade a diferentes concentrações de dopamina, utilizada como analito. Embora tenha-se alcançado resultados interessantes, a configuração utilizada nos experimentos dificulta a comparação direta com o que se pretende obter nesse estudo.

Com configurações mais próximas ao estudado nesse trabalho, Ni et al. (2022) e Choi et al. (2021) tiveram como base a aferição do espectro de reflexão da grade, tendo-se em Ni et al. (2022) uma grade metalizada com prata [Ag] e Choi et al. (2021) metalizada com ouro [Au]. Contudo, nenhum dos trabalhos descreve com precisão o método utilizado para o alinhamento do feixe incidente e a captura do feixe refletido, objetivos importantes deste trabalho. Apesar disso, ambos os trabalhos apresentam resultados experimentais condizentes com o teorizado, constituindo mais um indicativo da viabilidade das estratégias escolhidas para este trabalho.

Em Choi et al. (2021), é descrito o processo de fabricação de uma grade. a partir de uma amostra recortada de um DVD-R. Nesse a camada protetora, constituída por um corante orgânico, é removida quimicamente, submetendo-a a lavagem com etanol. Posteriormente, o filme de alumínio também é removido quimicamente, ao ser exposto ao ácido nítrico por 10 minutos. Ao filme de policarbonato remanescente, que contém o padrão periódico da grade, foi, então depositado uma camada de 5 nm de espessura de cromo [Cr] e, em seguida, uma camada de 50 nm de espessura de Au, ambas utilizando processo de *Sputtering*. Para averiguar o desempenho da grade. para o sensoriamento, foi utilizado foi utilizado o Metanol como analito. Assim como na maioria dos trabalhos revisados nesta secção, a sensibilidade foi definida como a variação do comprimento de onda central da RPS. dada a variação do índice de refração, alcançando-se a sensibilidade de $S(d\lambda/dn) = 956.57nm/RIU$.

Assim como em Choi et al. (2021), em Ni et al. (2022) a remoção da camada protetora de corante foi realizada quimicamente, pela lavagem com etanol. A camada de Al presente no DVD-R, contudo, foi removida mecanicamente. O filme metálico Ag com espessura de 125nm, por sua vez, foi formado por meio do derretimento de nanopartículas de Ag depositadas na superfície do substrato de policarbonato. Acima dessa camada de Ag, foi depositada ainda uma camada espaçadora com 280 nm de espessura de poliestireno, seguida por uma camada plana com 25 nm de espessura de Ag. Segundo Ni et al. (2022), esse segunda camada foi adicionada objetivando confinar as ondas difratadas de mais altas ordens e conferir maior estabilidade ao efeito de RPS.. Apesar disto, possivelmente devido a escolha da Ag, de menor

custo, a sensibilidade obtida, $S(d\lambda/dn) = 494nm/RIU$, foi inferior a reportada por Choi et al. (2021).

Tratando-se ainda de sensibilidade, dentre os demais trabalhos baseados em DVD-R, com ângulos de incidência oblíquos, destacasse o trabalho reportado em Choi et al. (2022), o qual reportou uma sensibilidade máxima alcançada de $S(d\lambda/dn) = 887,59nm/RIU$. Além da elevada sensibilidade, próxima ao reportado em Choi et al. (2021), Choi et al. (2022) também apresenta o método utilizado para replicação do padrão periódico na superfície de policarbonato do DVD-R. Nesse, após deposição do filme de ouro sobre o substrato de policarbonato, uma camada de resina epóxi é adicionada a outra extremidade do filme de ouro. Após a cura da resina, juntamente com esta, o filme de ouro é delaminado do substrato de policarbonato, mantendo o padrão periódico replicado do DVD-R.

Além de Choi et al. (2022), Long et al. (2022) também apresenta um método de replicação do padrão periódico presente no DVD-R. Nesse uma camada de Dimetil Polissiloxano (PDMS), um polímero de silicone translúcido, é aplicada sobre o substrato de policarbonato do DVD-R. Após a cura do material, o PDMS contendo uma réplica do padrão periódico do DVD-R, é separado mecanicamente do substrato de policarbonato. Finalmente, é depositada sobre o PDMS um filme fino de Cr, seguido por um filme de Au.

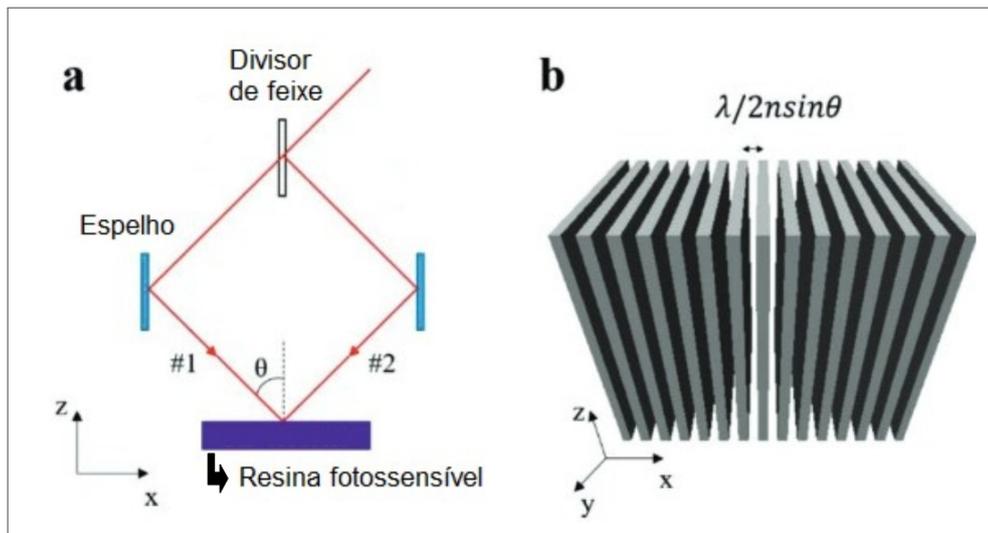
Embora não tenha reportado sua origem da grade utilizada como matriz, Lertvachirapiboon et al. (2021a) descreve a metodologia utilizada para replicar o padrão de uma grade constituída de PDMS, similar a apresentada por Long et al. (2022), sobre uma das faces de um prisma. Para isso, uma camada de resina Ultravioleta (UV) foi depositada sobre a superfície do prisma. Subsequentemente, a grade de PDMS foi posicionada sobre a resina. Após a cura da resina, a grade de PDMS foi removida mecanicamente, expondo o padrão periódico formado na resina, então coberta por uma fina camada de ouro, formada por evaporação.

Embora a replicação de padrões nanométricos não faça parte do escopo deste trabalho, ambas as técnicas se mostram factíveis e potencialmente aplicáveis a trabalhos futuros. Quanto aos trabalhos que reportam o método de fabricação do padrão periódico da grade, podemos os organizar conforme a técnica utilizada, em 4 categorias, Crescimento Cristalino, Feixe de Íons ou Elétrons, Litografia a Laser e interferometria.

Dentre essas, a técnica de litografia à laser, utilizada por Kasry, Nicol e Knoll (2021), destacasse por produzir um padrão senoidal na grade. Resumidamente, a técnica de fabricação de nanoestruturas por holografia se utiliza do padrão de interferometria resultante da interação de dois feixes coerentes com ângulos de incidência opostos sobre uma superfície. Em geral, a

superfície de incidência é constituída por uma camada plana de resina fotossensível, a qual tem suas características físicoquímicas modificadas conforme a exposição a radiação proveniente dos feixes incidentes Fig. ??(JEON; KIM; PARK, 2018). Assim, é possível realizar, por meios químicos ou físicos, a remoção seletiva do material sensibilizado, expondo o padrão periódico, o qual pode ser replicado em outro material. Dada a natureza periódica das ondas eletromagnéticas o padrão de interferência resultante da interação entre os dois feixes possui uma periodicidade, a qual está intrinsecamente ligada ao comprimento de onda e o ângulo de incidência desses feixes, como ilustrado na Fig. ??(JEON; KIM; PARK, 2018). A amplitude do padrão formado, por sua vez, pode ser controlada por meio do ajuste da intensidade, tempo de exposição e do método de remoção da resina sensibilizada.

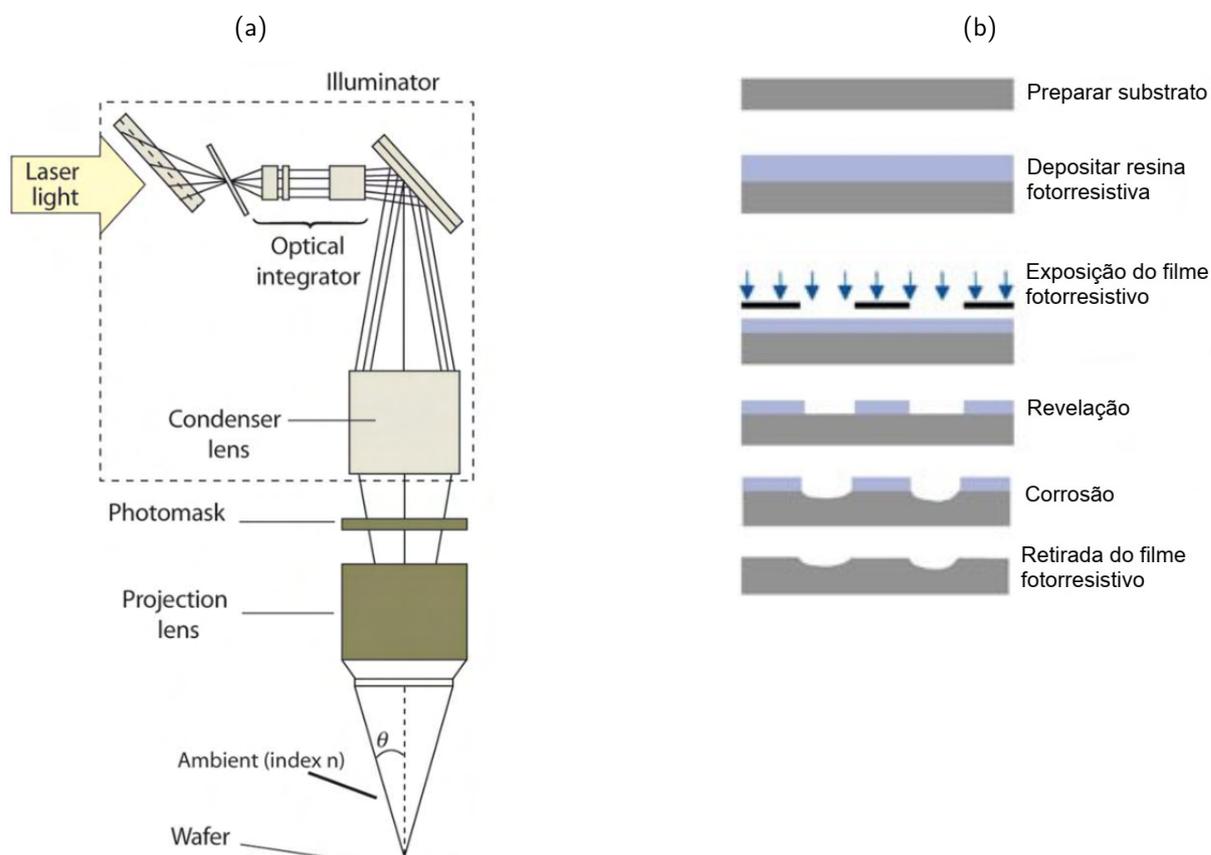
Figura A1 - Litografia holográfica: (a) Configuração óptica; (b) Padrão da luz incidente.



Fonte: Adaptado de JEON; KIM; PARK (2018)

Khodami et al. (2021), por sua vez, empregou a fotolitografia fabricar o padrão nanométrico da grade. Em resumo, no processo fotoligráfico um feixe de luz é homogenizado e, então, condensado sobre a superfície de uma máscara litográfica que contém partes translúcidas e aborritavas, as quais formam o padrão 2D a ser fabricado. Subseqüentemente, um conjunto de lentes objetivas é utilizado para focalizar a imagem formada na máscara litográfica sobre a superfície de um filme fotossensível, criando uma cópia em escala nanométrica do padrão macroscópico contido na máscara litográfica, como ilustrado na Fig. A1a (HWANG et al., 2016). Diferentemente do que ocorre na litografia holográfica, a radiação incidente uniformemente sobre toda as áreas sensibilizadas, de modo que se torna mais simples de se obter um padrão quadrado, como ilustrado na Fig. A1b (HWANG et al., 2016), que um padrão senoidal.

Figura A2 - Litografia Óptica: (a) Configuração Óptica; (b) Processo.



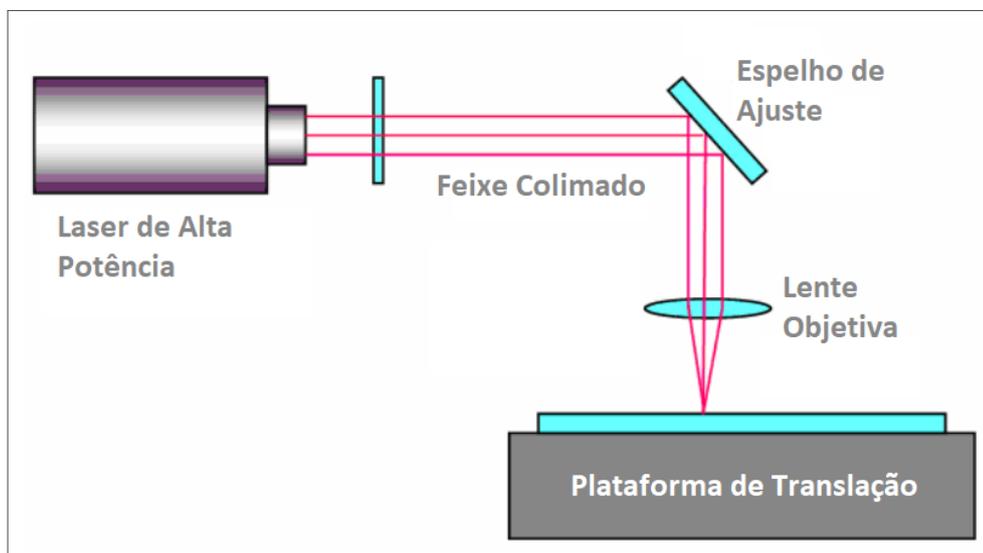
Fonte: Adaptado de (a) ROTHSCHILD (2005) e (b) HWANG et al. (2016)

Outra técnica empregada para fabricação de grade, utilizada em 4 dos trabalhos selecionados, é a litografia a laser. Como ilustrado na Fig. ?? (JEON; KIM; PARK, 2018), a configuração óptica utilizada na litografia a laser é similar à utilizada na fotolitografia. Na litografia a laser, contudo, a máscara litográfica não é utilizada, tendo-se toda a luz incidente focalizada em um mesmo ponto. A posição do ponto de incidência, por sua vez, pode ser controlada por meio

da translação do substrato ou pela rotação dos espelhos de alinhamento. Assim, o padrão nanométrico desejado é formado sensibilizando a camada de resina fotossensível ponto a ponto. Uma das maiores limitações da litografia a laser é a área desse ponto, a qual é o fator de maior relevância para definição da resolução de um equipamento de litografia a laser. Embora uma série de lentes possam ser empregadas para a melhor homogenização e correção de aberrações, a obtenção de um ponto com diâmetro muito menor que o comprimento de onda utilizado se torna inviável, restringido a técnicas a resoluções de algumas centenas de nanômetros.

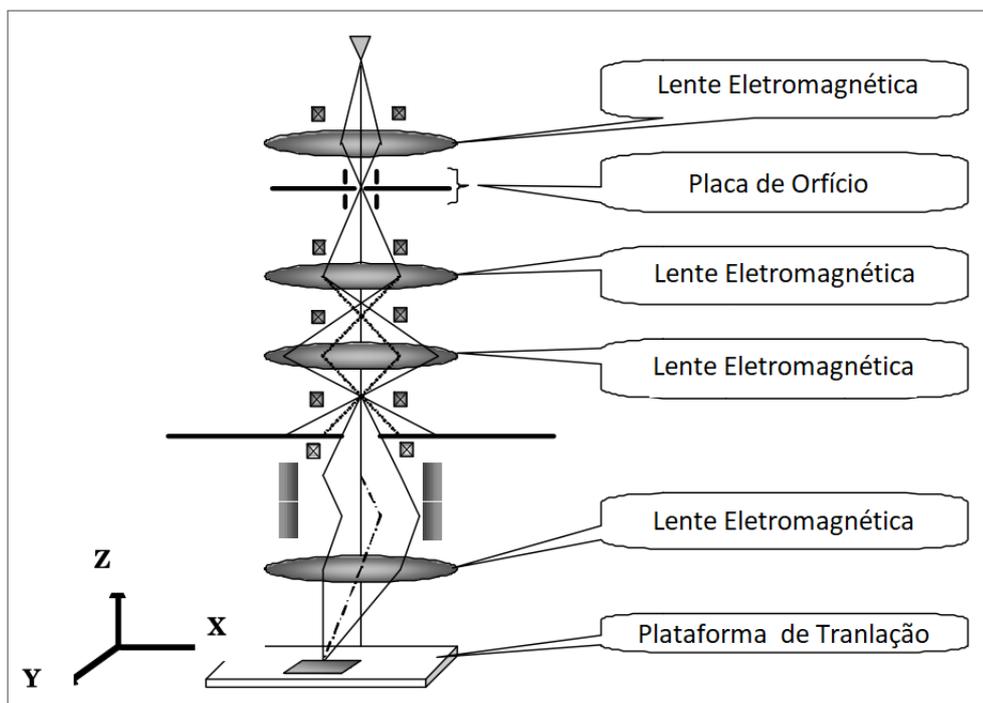
Uma forma de contornar essa limitação é a utilização de Litografia por Feixe de Íons ou a Litografia por Feixe de Elétrons, utilizadas por cinco dos trabalhos avaliados. Em ambos os casos, é utilizada uma série de lentes eletromagnéticas para acelerar, focar e direcionar um feixe de partículas a um substrato, como ilustrado na ?? (JEON; KIM; PARK, 2018). Neste caso, a resolução alcançável depende majoritariamente da precisão das lentes eletromagnéticas e do tamanho das partículas utilizadas. Utilizando-se um feixe de íons, é possível obter resoluções de algumas dezenas de nanômetros, enquanto equipamentos que utilizam elétrons atingem resoluções de alguns nanômetros. Ao contrário dos outros métodos avaliados, a litográfica por feixe de partículas, o alvo do feixe não necessita ser constituído por um material fotossensível. Em geral o feixe utilizado possui energia suficiente para causar a vaporização do alvo na região atingida, possibilitando, por ablação, a escultura do substrato, o qual pode ser constituído desde dielétricos, como o silício, a condutores, como o ouro. Embora seja uma técnica bastante eficaz, comparando-se com os outros métodos de nanofabricação abordados, a maior limitação das litografias por feixe de íons ou elétrons está ligada a eficiência. Isso se deve ao fato que o número de pontos necessários para preencher uma dada área é inversamente proporcional a resolução do equipamento empregado. Tendo-se em vista o elevado custo dos equipamentos e dos profissionais necessários a aplicação desse tipo de litografia, a impressão de dispositivos de dimensões macroscópicas podem se mostrar morosa e, conseqüentemente, custosa.

Figura A3 - Configuração óptica utilizada no processo de Litografia a Laser.



Fonte: Adaptado de JEON; KIM; PARK (2018)

Figura A4 - Configuração Óptica utilizada no processo de Litografia por feixe de elétrons.



Fonte: Adaptado de JEON; KIM; PARK (2018)

Tabela 3 – Sumário da Revisão Sistemática

#	Citação	Título
1	(DAS et al., 2022)	Highly Sensitive LSPR Sensor Chips Based on Crystalline Gold Nanoparticles Grown on Silica
2	(SU et al., 2021)	Low-cost surface plasmon resonance refractive index sensor based on the metal grating in DVD-ROM disc
3	(CHOI et al., 2021)	Monitoring electrochemical methanol oxidation and CO coverage using Pt-deposited SPR sensor platform
4	(KADHIM et al., 2022)	Tunable plasmon induced transparency in one-dimensional gold nano-grating as a new kind of neurotransmitter sensor
5	(NI et al., 2022)	Dual-mode independent detection of pressure and refractive index by miniature grating-coupled surface plasmon sensor
6	(LONG et al., 2022)	Sensing absorptive fluids with backside illuminated grating coupled SPR sensor fabricated by nanoimprint technology
7	(CHOI et al., 2022)	Inverse DVD-R grating structured SPR sensor platform with high sensitivity and figure of merit
8	(JIANG et al., 2022)	High Aspect-Ratio Open Grating Fabry-Perot Resonator for High-Sensitivity Refractive Index Sensing
9	(SHEN et al., 2022)	Ultrasmooth Gold Nanogroove Arrays: Ultranarrow Plasmon Resonators with Linewidth down to 2 Å nm and Their Applications in Refractive Index Sensing
10	(YANG; HSIUNG; HUANG, 2021)	Biosensor based on two-dimensional gradient guided-mode resonance filter
11	(SIERANT; JANY; KAWALEC, 2021)	Near-field characterization of surface plasmon polaritons on ananofabricated transmission structure
12	(KIM; YU, 2022)	On-Fiber Multiparameter Sensor Based on Guided-Wave Surface Plasmon Resonances
13	(KASRY; NICOL; KNOLL, 2021)	Grating-coupled surface-plasmon fluorescence DNA sensor
14	(CHANDRA et al., 2021)	Magnetoplasmons for Ultrasensitive Label-Free Biosensing
15	(WU et al., 2022)	Nanogratings fabricated by wet etching assisted femtosecond laser modification of silicon for surface plasmon resonance sensing

Tabela 3 - Resumo da Revisão Sistemática (Continuação)

#	Citação	Título
16	(URBANCOVA et al., 2021)	IP-Dip-Based SPR Structure for Refractive Index Sensing of LiquidAnalytes
17	(MAMYKIN et al., 2022)	Femtosecond laser nano-structuring for surface plasmon resonance-baseddetection of uranium
18	(KHODAMI et al., 2021)	Fabrication of Bloch Long Range Surface Plasmon Waveguides Integrating Counter Electrodes and Microfluidic Channels for Multimodal Biosensing
19	(LERTVACHIRAPAIBOON et al., 2021b)	Dual-mode surface plasmon resonance sensor chip using a grating 3D-printed prism

Tabela 3 - Resumo da Revisão Sistemática (Continuação)

#	Caminho Óptico	Configuração	Perfil da Grade	Periodicidade da Grade	Amplitude da Grade	Material	Metodo de Fabricação
1	Ar	Transmitancia	Nanoparticulas		40 nm	Au	Crescimento de nanoparticulas cristalinas de ouro
2	Ar	Single	Quadrada	740 nm	48 nm	Al	DVD-R
3	Ar	Single	Quadrada		39.09 / 61.05 nm	Au / Pt	DVD-R
4	Ar	Trasmitancia	Quadrada			Au	DVD-R
5	Ar	Otto	Quadrada	740 nm	42.5 nm	Ag	DVD-R
6	Ar	Single	Quadrada	741 nm	35.5 nm	Au	DVD-R
7	Ar	Single	Quadrada		91.42 nm	Au	DVD-R
8	Ar	Kretschmann	Quadrada	600 nm	500 nm	Au	Feixe de eletrons
9	Ar	Single	Quadrada	700 nm	172.5 nm	Au	Feixe de eletrons
10	Ar	Trasmitancia	Quadrada	250-550nm		TiO2	Feixe de ions
11	Ar	Kretschmann	Blaze	588 nm	55 nm	Au	Feixe de ions
12	Fibra	Kretschmann	Quadrada	1030 nm	40 nm	Au	Feixe de ions
13	Ar	Kretschmann	Senoidal	470 - 650 nm	15 - 50 nm	Au	Interferometria
14	Ar	Single	Triangular		30 nm	Au-Fe-Au	Litografia a Laser
15	Ar	Kretschmann	Triangular	800 nm	27.5 nm	Au	Litografia a Laser
16	Guia de Onda	Single	Quadrada	500 nm	20 nm	Au	Litografia a Laser
17	Guia de Onda	Kretschmann	Blaze	900 ± 42 nm	37.5 nm	Au/(PDA)	Litografia a Laser
18	Guia de Onda	Single	Quadrada	980 nm	160 nm	Au	Litografia Optica
19	Ar	Kretschmann	Quadrada	320nm	5nm	Au	Soft Litografy

Tabela 3 - Resumo da Revisão Sistemática (Continuação)

#	Ângulo	Comprimento de onda	Interrogação	Sensibilidade	Alcance RI	Limiar de detecção	FoM	Análito
1	0	630–560 nm	Comprimento de onda	147,54 nm/RIU	1,615-1,618		1,08	
2	28	678 nm	Comprimento de onda	540 nm/RIU 32,4 degree/RIU	1,3331 - 1,3701			NaCl
3	38,3	817 nm	Comprimento de onda	973,95 nm/RIU 956,57 nm/RIU			69.17 - 55.96	CO
4	0	400 - 700 nm						dopamine
5	0	824 nm	Comprimento de onda	494 nm/RIU	1,3290 - 1,3792			Etanol
6	25	450 - 1050 nm	Comprimento de onda	311,97 nm/RIU	1,359 - 1,446	43 ⁻⁵	11,39	Glicose
7	0	771,18 nm	Comprimento de onda	872,01 nm/RIU	1,332 - 1,372		112,34	Metanol
8	45	633 nm	Reflectancia	1,1/RIU	1,33 - 1,38	1,6 × 10 ⁻⁹	1394	Etanol
9	0	700 nm	Comprimento de onda	681 nm/RIU	1,333 - 1,384		284	glycerol
10		455-839 nm	Pixel shift	17,129 nm/RIU		5,62 × 10 ⁻⁴		Sucarose
11	15	780 nm						
12	90	1550 nm	Comprimento de onda	-210, 1nm/°C				Temperatura
13		632.8 nm	Fluorecência			1,5μM		DNA
14	22-32	655 nm	ângulo			66 pM	0.1	IgG anticorpo
15	90	830 nm	Comprimento de onda	707.4 nm/RIU	1,33-1,36	5,3 × 10 ⁻⁴	13,37	Proteína
16	20	820 - 890 nm	Comprimento de onda	617 nm/RIU	1,3330 - 1,3753			Isopropanol
17	60	1929 nm	Reflectância	1,05 nm/dUO2				UO2
18	90	1330 nm	Transmitância		1,3340 - 1,3360	4 × 10 ⁻⁶		Proteína/glicerol
19	45	500 - 1000nm	Comprimento de onda	414,9 nm/RIU	1,333-1,383			Corante

APÊNDICE B – TRABALHOS PUBLICADOS

GÓIS, R. F.; CALVALCANTI, G. O.; FONTANA, E. Prospects for Developing Low-Cost Optical Fiber Sensors for Liquid-Liquid Interface Detection. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 12, n. 3, p. 338–350, 2022. ISSN 21791074.

GÓIS, R. F.; CAVALCANTI, G. O.; MELO, E. F.; LLAMAS-GARRO, I.; FONTANA, E. Ressonância de Plásmons de Superfície em Grade de Difração de Alumínio Sob Incidência Normal. SBMO, 2022.

De Freitas Fernandes, G.; De Freitas Góis, R.; De Melo, E. F.; FONTANA, E. Tunable diode laser surface plasmon spectroscopy. In: 2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC).

GÓIS, R. F.; CAVALCANTI, G. O.; MELO, E. F. D.; FONTANA, E.; LLAMAS-GARRO, I. Estudo Computacional de Sensores Plasmônicos em Grades de Difração. *Anais do Simpósio Brasileiro de Micro-ondas (SBMO)*, 2020.

GÓIS, R. F.; CAVALCANTI, G. O.; MELO, E. F. de; FONTANA, E. Highly Sensitive Retro-Reflectance Fiber-Optic Sensors for Liquid-Liquid Interface Detection. In: 2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC).