



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WILLIAM DONIZETE INACIO DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE SENSOR BASEADO NA
RESSONÂNCIA DE PLASMON DE SUPERFÍCIE PARA MEDIÇÃO DE
SUBSTÂNCIAS LÍQUIDAS E GASOSAS.**

MOSSORÓ

2025

WILLIAM DONIZETE INACIO DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE SENSOR BASEADO NA
RESSONÂNCIA DE PLASMON DE SUPERFÍCIE PARA MEDIÇÃO DE
SUBSTÂNCIAS LÍQUIDAS E GASOSAS.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas de controle e automação.

Orientador: Prof. Dr. Leiva Casemiro Oliveira

Defendida em: 10/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leiva Casemiro Oliveira (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Antônio Marcus Nogueira Lima (UFCG)
Membro examinador Externo

Prof. Dr. Isaac Barros T. da Silva (UFERSA)
Membro Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586d Silva, William Donizete Inacio.
DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE SENSOR BASEADO
NA RESSONÂNCIA DE PLASMON DE SUPERFÍCIE PARA
MEDIÇÃO DE SUBSTÂNCIAS LÍQUIDAS E GASOSAS /
William Donizete Inacio Silva. - 2025.
90 f. : il.

Orientadora: Leiva Casemiro OLIVEIRA.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2025.

1. Instrumentação óptica. 2. Sensores RPS dual.
3. Modo de Interrogação Angular (AIM). 4. Sensores
RPS. 5. Substâncias líquidas e gasosas. I.
OLIVEIRA, Leiva Casemiro, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Donizete Inacio da Silva (In memorian).

Aos meus familiares e amigos, em especial aos meus pais — principalmente ao meu pai, que, enquanto esteve vivo, não mediu esforços para que eu continuasse frequentando a universidade. Minhas pequenas conquistas sempre foram, segundo ele, suas grandes conquistas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todo suporte nos momentos difíceis.

Aos familiares que sempre estiveram ao meu lado, em especial à minha mãe, Claudinete, que sempre fez o possível para me manter frequentando e ativo no mestrado. Aos amigos, pelos bons momentos vividos mesmo em tempos de dificuldade.

Destaque para Vitória, minha fiel companheira, que nunca saiu do meu lado, independentemente das dificuldades enfrentadas ao longo de todo o mestrado. Sempre me aconselhando e me ouvindo.

Ao meu professor orientador, Dr. Leiva, que sempre esteve disponível, fornecendo suporte e soluções para os problemas oriundos da pesquisa e do mestrado em geral. À coordenação do PPGE, por todo o suporte que me foi fornecido.

RESUMO

Sensores de Ressonância de Plasmons de Superfície (RPS) são dispositivos que se baseiam na ressonância de plasmons de superfície. Frequentemente estão inacessíveis devido à complexidade de fabricação, instrumentação e operação, além da limitada disponibilidade comercial. A principal característica desses sensores é a capacidade de detectar biomoléculas em tempo real sem a necessidade de marcadores, como corantes ou marcadores radioativos. Entretanto, uma problemática que se apresenta em grande parte dos sensores RPS é a incapacidade operacional de analisar líquidos e gases no mesmo equipamento. Para superar essa restrição, sensores que operam com múltiplos fluidos geralmente requerem componentes móveis que ajustem o ângulo de incidência da luz sobre um prisma, o que aumenta a complexidade do sistema. Neste contexto, desenvolveu-se o um dispositivo RPS com partes móveis, fabricado por meio de manufatura aditiva (impressão 3D) e incorporando peças de uso geral. O mesmo foi projetado para operar com líquidos e gases, utilizando um sistema multiprisma. Opera no modo de interrogação angular (AIM) e emprega filmes finos de ouro (Cassete). A estrutura multicamada para excitação óptica da RPS, no modo AIM, consiste em seis camadas: prisma (BK7), glicerina, placa de vidro (BK7), ouro (50 nm), substância e analito. Além disso, o sensor integra todos os componentes essenciais à excitação do fenômeno em uma única estrutura, destacando-se o sistema fluídico, cuja célula de fluido mantém o arranjo multicamadas fixo e estável. Simulações matemáticas baseadas nas equações de Fresnel indicam que o sensor opera adequadamente em uma faixa angular entre 35° e 75°. Possui dimensões gerais de 250mm de largura, 150mm de altura e 130mm de comprimento. Além de possuir baixo peso 1,7kg, que é propiciado por sua estrutura geométrica, impressa em PLA (1,238kg) e PetG (0,1kg). E também apresentou, baixa vibração $0,12 \pm 0,02 \text{ m/s}^2$. Por fim, A validação experimental comprovou a eficácia do s²lg sensor, apresentando pontos de ressonância compatíveis com os valores simulados — 70° para água e 43° para ar — e medições de FWHM variando entre 7 e 20 nm, dentro dos parâmetros recomendados pela literatura (5 a 50 nm).

Palavras-chave: Instrumentação óptica; Sensores RPS dual; Modo de Interrogação Angular (AIM); Sensores RPS; Substâncias líquidas e gasosas.

ABSTRACT

Surface Plasmon Resonance (SPR) sensors are devices based on the surface plasmon resonance phenomenon. They are often inaccessible due to the complexity of manufacturing, instrumentation, and operation, in addition to limited commercial availability. The main characteristic of these sensors is the ability to detect biomolecules in real-time without the need for labels. However, a problem present in most SPR sensors is the inability to analyze liquids and gases in the same device. To overcome this restriction, sensors that operate with multiple fluids generally require moving components to adjust the angle of light incidence, which increases complexity. In this context, an SPR device with moving parts was developed, manufactured through additive manufacturing (3D printing) and incorporating general-purpose parts. It was designed to operate with liquids and gases, using a multi-prism system. The sensor operated in the angular interrogation mode (AIM) and employed thin gold films (cassette). The multilayer structure for optical excitation of SPR consisted of six layers: prism (BK7), glycerin, glass plate (BK7), gold (50 nm), substance, and analyte. Furthermore, the sensor integrated all essential components into a single structure, with emphasis on the fluidic system, whose fluid cell kept the multilayer arrangement fixed and stable. Mathematical simulations based on Fresnel equations indicated that the sensor operated adequately in an angular range between 35° and 75°. The prototype had overall dimensions of 250 mm in width, 150 mm in height, and 130 mm in length, as well as a low weight (1.7 kg), enabled by its structure printed in PLA (1.238 kg) and PETG (0.1 kg). It also presented low vibration, of $0.12 \pm 0.02 \text{ m/s}^2$. Finally, the experimental validation proved the effectiveness of the S²LG sensor, showing resonance points compatible with the simulated values — 70° for water and 43° for air — and FWHM measurements varying between 7° and 20°, within the parameters recommended by the literature (5° to 50°).

Keywords: Optical instrumentation; Dual SPR sensors; Angular Interrogation Mode (AIM); SPR sensors; Liquid and gaseous substance.

Sumário

Capítulo 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Trabalhos relacionados	4
1.3 Estrutura do trabalho	6
Capítulo 2	7
REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1 Sensores RPS.....	7
2.1.1 Condições para excitação dos plasmons de superfície (<i>SPs</i>)	8
2.1.2 Análise de Fresnel	9
2.1.3 Características térmicas	12
Resumo do capítulo 2	14
Capítulo 3	15
METODOLOGIA.....	15
3.1 Levantamento de requisitos	15
3.2 <i>Desing</i>	22
3.3 Prototipação.....	23
3.4 Montagem e automação.....	24
3.5 Experimentos	25
Capítulo 4	29
MATERIAIS	29
4.1 Prismas e Cassete.....	29
4.2 Fluido de acoplamento.....	30
4.3 Bomba de alimentação.....	31

4.4 Impressoras 3D	32
4.5 Elementos eletrônicos.....	33
4.6 Elementos ópticos.....	35
4.7 <i>Software</i> de interpretação das capturas e elaboração das curvas.....	36
Resumo do capítulo 4	36
Capítulo 5	37
PROJETO DO SENSOR	37
5.1 design proposto.....	38
Capítulo 6	42
RESULTADOS	42
6.1 Protótipo do sensor proposto	42
6.2 Experimento com soluções aquosas.	47
6.3 Experimentos com soluções gasosas	49
6.5 Teste vibracional.....	53
Resumo do capítulo 5	55
Capítulo 7	56
CONCLUSÕES	56
7.1 Trabalhos futuros.....	58
Apêndice A - Peças do sensor em visualização 3d.....	59
Apêndice B - Código utilizado para movimentação dos motores de passo implementado no Arduino UNO.	66
Apêndice C – Código para simulação de vibrações dos motores de passo	68
REFERÊNCIAS	70

Lista de símbolos e abreviações

<i>ABS</i>	Acrilonitrila Butadieno Estireno
<i>D.A</i>	Aproximação de Drude
<i>DF</i>	Distancia focal
<i>AF</i>	Análise de Fresnel
<i>AIM</i>	Modo de Interrogação Angular
<i>ATR</i>	Attenuated Total Reflection
<i>CDF</i>	Função Dielétrica Complexa
<i>EBR</i>	Abertura do Feixe de Luz
<i>FWHM</i>	Largura da curva SPR (Full Width at Half Maximum)
<i>LED</i>	Diodo Emissor de Luz (Light Emitting Diode)
<i>LSPR</i>	Localized Surface Plasmon Resonance
<i>LRSPP</i>	Long-Range Surface Plasmon Polariton
<i>OP</i>	Ponto de Operação
<i>PLA</i>	Polimero termoplastico com ácido láctico
<i>PPBIO</i>	Prisma Polimérico para Aplicações BIOLógicas
<i>RIT</i>	Reflexão Interna total
<i>RIU</i>	Refractive Index Unit
<i>RIV</i>	Região do Infra-Vermelho
<i>RPP</i>	Região dos Plasmons Radiativos
<i>SP</i>	Surface Plasmon
<i>SPP</i>	Surface Plasmon Plarition
<i>SPR</i>	Surface Plasmon Resonance
<i>UACPE</i>	Unidade de Aquisição, Controle, Processamento e Exibição
<i>WIM</i>	Modo de interrogação Espectral
k_p	Vetor de onda de luz incidente
k_{px}	Componente horizontal do vetor de onda de luz incidente
k_{sp}	Vetor de onda dos plasmons de superfície
k_e	Vetor de onde dos elétrons-livres
d_i	Espessura do meio i do arranjo multicamadas
$r(\lambda)$	Coefficiente de refletividade de fresnel - WIM
$r(\theta)$	Coefficiente de refletividade de fresnel - AIM
θ_{res} ou θ_R	Ângulo plasmônico ou ângulo de ressonância
λ_{res} ou λ_R	Comprimento de onda plasmônica ou comprimento de onda de ressonância
n_i	Índice de Refração do meio i do arranjo multicamadas
ε_i	Permissividade ou CDF do meio i do arranjo multicamadas
S_θ	Sensibilidade do sensor SPR operando no modo AIM

S_{λ}	Sensibilidade do sensor SPR operando no modo WIM
D_{θ}	Detectividade do sensor SPR operando no modo AIM
D_{λ}	Detectividade do sensor SPR operando no modo WIM

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais características dos sensores RPS analisados para desenvolvimento do S ² LG.	6
Tabela 2 – Parâmetros para simulação de teste vibracional para motor de passo 28BYJ-48...	21
Tabela 3 - Resumo das principais Especificações do Arduino UNO.	33
Tabela 4 - Especificações do motor de passo 28BJY-48.....	34
Tabela 5 – Ressonância medida nas curvas geradas para a água, solução de NaOCl, ar e fumaça com prisma semicilíndrico.....	52
Tabela 6 - Ressonância medida nas curvas geradas para a água, solução de NaOCl, ar e fumaça com prisma <i>dove</i>	52
Tabela 7 - Comparação entre vibrações medidas pelo acelerômetro.	54

Lista de Figuras

Figura 1 – Sensor RPS na configuração de ATR – Krestschmann.	1
Figura 2 - Arranjo multicamadas na configuração de ATR-Kretschmann.....	8
Figura 3 - Curva RPS ilustrativa gerada através das equações de Fresnel.	10
Figura 4 - Arranjo multicamadas na configuração ATR com 6 camadas.	11
Figura 5 – Rotina de tomada de decisões metodológicas para o desenvolvimento do sensor RPS proposto.	15
Figura 6 - Arranjo multicamadas contendo 6 camadas na configuração ATR.....	17
Figura 7 - a) Curva RPS no modo AIM para substâncias líquidas, com $\lambda = 670\text{nm}$. Subgráficos indicando o comportamento do ângulo de ressonância e largura da curva e sensibilidade em função do índice de refração. b) Curva RPS no modo WIM para água, com $\theta = 69,9^\circ$	18
Figura 8 - a) Curva RPS no modo AIM para substâncias gasosas, com $\lambda = 666,5\text{nm}$. Subgráficos indicando o comportamento do ângulo de ressonância e largura da curva e sensibilidade em função do índice de refração. b) Curva RPS no modo WIM para o ar, com $\theta = 43.37^\circ$	20
Figura 9 - a) Resposta simulada de aceleração vibracional do motor de passo 28BYJ-48. b) Espectro de frequência de aceleração (FFT).	21
Figura 10 - Fluxograma para o algoritmo de interpretação de vídeo ou foto para elaboração de curvas RPS.....	26
Figura 11– a) Prisma Dove de vidro BK7. b) Prisma semicilíndrico de vidro BK7. c) Lâmina de ouro no cassete comercial.	29
Figura 12 - Bomba peristáltica kamoer. a) vista frontal. b) vista superior.	31
Figura 13 - Duto de silicone com conector compatível com a bomba de alimentação.	32
Figura 14 - Impressoras 3d. a) Impressora cliever educacional b) Impressora Creality ender 3.	32
Figura 15 - a) Rolo de filamento PLA b) Rolo de filamento PetG c) Spray adesivo para mesa de impressora 3d.....	33
Figura 16 - Driver ULN2003.....	35
Figura 17 - Elementos ópticos a) Diodo laser b) Lente cilíndrica plano-convexa c) Câmera CMOS DDC1645C d) Lente colimadora	36

Figura 18 - a) Estrutura-fixa que irá suportar os elementos do sensor RPS. b) Estrutura-fixa com peças-mecânicas-móveis acoplada.	38
Figura 19 - Estrutura proposta para o S ² LG em 2 dimensões para facilitação da localização dos componentes enumerada para detalhar todos os elementos presentes.	39
Figura 20 - S ² LG sensor, montagem experimental com elementos 3d para uma visualização completa. a) Com prisma <i>dove</i> b) Com prisma semicilíndrico.	40
Figura 21 - Célula de fluido. a) Vista da parte superior b) Vista da parte inferior c) Vista da parte frontal.....	40
Figura 22 - Célula de fluido com modulo para líquidos acoplados a) Vista superior da célula de fluxo com modulo para líquidos. b) Vista lateral da célula destacando os furos para acoplamento dos dutos para inserção de fluidos.	41
Figura 23 - Hastes móveis. a) Haste com diodo laser e lentes colimadoras. b) Suportes para elementos ópticos. c) Haste com suporte para a câmera. d) hastes em conjunto com motores de passo.	43
Figura 24 - Suporte multiprismatico. a) Suporte desmontado apresentando os parafusos com rosca infinita, roscas e modulo 1 da célula de fluido. b) Suporte montado. c) Suporte montado com prisma <i>dove</i> e cassette.....	44
Figura 25 - Suporte para motores de passo.....	44
Figura 26 - Estrutura fixa com destaque para os encaixes de pressão.....	45
Figura 27 - Célula de fluido impressa em 3D. a) Célula de fluido na configuração para gases. b) Célula de fluido na configuração para líquidos. C) vista lateral para visualização da inserção dos dutos na célula.....	45
Figura 28 - a) vista da parte superior do sensor. b) vista interior. c) vista lateral. d) vista frontal. e) vista frontal dentro do case de proteção e transporte.	46
Figura 29 - Curva RPS para água e NaOCl com o prisma semicilíndrico tendo como ponto de destaque sua ressonância para água em 70,19° e NaOCl em 73,28°.....	47
Figura 30 - Curva RPS para água e NaOCl com o prisma <i>dove</i> , tendo como ponto de destaque sua ressonância para água em 68,58° e NaOCl em 68,46°.....	48
Figura 31 - Curva RPS para água valendo-se da análise fotográficas, ao qual foram registradas 20 fotos para elaboração do gráfico, em destaque o ponto de ressonância em 68°.....	48
Figura 32 - Fotografia do momento de ressonância para água, em destaque a linha mais “escura” característica do fenômeno RPS.	49
Figura 33 - Curva RPS para o ar e fumaça com prisma semicilíndrico com ponto de ressonância para o ar em 43,34° e para fumaça em 51,63°.....	50

Figura 34 - Curva RPS para o ar e fumaça com prisma <i>dove</i> com ponto de ressonância em 46,66° para o ar e 51,71° para a fumaça.....	50
Figura 35 - Curva RPS para o ar valendo-se da análise fotográficas, ao qual foram registradas 20 fotos para elaboração do gráfico, em destaque o ponto de ressonância em 43°.....	51
Figura 36 - Fotografia do momento de ressonância para o ar, em destaque a linha mais “escura” característica do fenômeno RPS.	51
Figura 37 – Aceleração vibracional ao longo de um ciclo experimental de medições para água.	54
Figura 38 - Medição do Espectro de frequência experimental (FFT) com água.	55

Lista de Apêndices.

Figura A1 - Case externo.	59
Figura A2 – Hastes moveis.	59
Figura A3 - Suporte para diodo e lentes.	60
Figura A4 - Célula de fluido.	60
Figura A5 - Suporte para célula de fluido e prismas.	61
Figura A6 - Parte lateral da estrutura fixa.	61
Figura A7 - Parte frontal da estrutura fixa.	62
Figura A8 - Parafuso de rosca infinita frontal.	62
Figura A9 - Conjunto de roscas infinitas para aperto dos parafusos.	63
Figura A10 - Parafuso de rosca infinita para aperto da célula de fluido.	63
Figura A11 - Suporte para motores de passo.	64
Figura A12 - Parte traseira da estrutura fixa.	64
Figura A13 - Parte superior da estrutura fixa.	65

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Os sensores de ressonância de plasmons de superfície (RPS, ou SPR, sigla em inglês para *Surface Plasmon Resonance*) são dispositivos amplamente utilizados em diversas áreas da ciência e tecnologia, incluindo a bioquímica, a medicina, a indústria farmacêutica e a ciência dos materiais. Esses sensores oferecem uma abordagem poderosa para a detecção de interações biomoleculares em tempo real e fornecem informações valiosas sobre a afinidade, a cinética e a especificidade dessas interações moleculares (NGUYEN et al., 2010).

A base dos sensores RPS é um fenômeno óptico que ocorre na interface entre um material metálico — geralmente ouro ou prata — e um meio dielétrico, como um líquido ou um filme fino. A Figura 1 ilustra a ocorrência típica do fenômeno RPS. Esse fenômeno é observado por meio do método de reflexão interna total atenuada (ATR), que ocorre quando a luz viaja de um meio com maior índice de refração e atinge a interface com um meio de menor índice de refração, sob um ângulo superior ao ângulo crítico. A incidência de um feixe de luz nessa interface torna possível excitar os plasmons de superfície (PS), que são as oscilações coletivas dos elétrons na superfície metálica. Essa excitação está intimamente relacionada às propriedades ópticas do meio na interface.

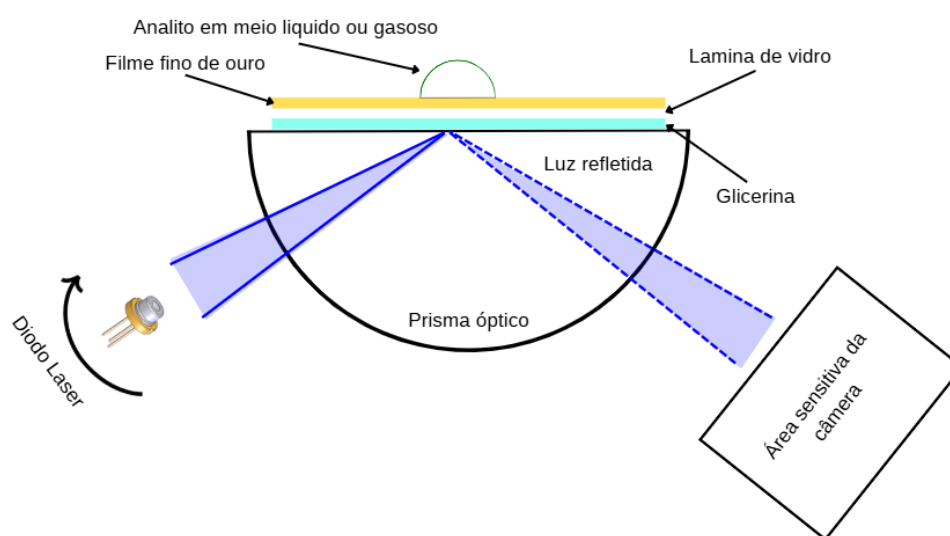


Figura 1 – Sensor RPS na configuração de ATR – Kretschmann.

A Figura 1 ilustra uma possível montagem para sensores RPS baseada na denominada configuração de Kretschmann [1]. Essa configuração é caracterizada pela deposição direta de um material metálico sobre um meio dispersivo (prisma óptico) de alto índice de refração.

Nesse arranjo, uma fonte de luz com comprimento de onda fixo incide através do prisma, excitando os plasmons de superfície no modo de interrogação angular (AIM, sigla em inglês para *Angular Interrogation Mode*).

Essa excitação dos plasmons de superfície é sensível a alterações no meio ao redor da interface metálica. A alteração na densidade eletrônica próxima à interface — isto é, a mudança no índice de refração da substância analisada (analito), como uma molécula-alvo que interage com um ligante imobilizado na superfície metálica — afeta a condição de ressonância de plasmons de superfície. Essa alteração é detectada por meio da mudança na intensidade ou no ângulo de ressonância, fornecendo um sinal mensurável e quantitativo que reflete a interação molecular em tempo real. Essa capacidade de monitorar interações biomoleculares sem a necessidade de marcação (como a mudança de cor, por exemplo) é uma das principais vantagens dos sensores RPS (OLIVEIRA et al., 2019; GOMES et al., 2023).

Diversos trabalhos científicos e de engenharia propõem diferentes estruturas para a construção de sensores RPS, com variações no formato do prisma, que pode ser triangular (BRAHMACHARI; RAY, 2013), trapezoidal (TANABE et al., 2017) ou semicilíndrico (HERNÁNDEZ et al., 2018; AKIMOTO et al., 2000). Sensores que utilizam o prisma semicilíndrico são comumente empregados em arranjos com partes móveis, como componentes rotacionais, o que torna sua instrumentação mais complexa em relação a sensores estáticos. Contudo, essa configuração móvel possibilita uma maior faixa de monitoramento dos valores de índice de refração (IR), permitindo a análise de substâncias tanto líquidas quanto gasosas.

É importante salientar que os sensores baseados em RPS utilizam mecanismos ópticos para medir o índice de refração próximo à interface metal/dielétrico. Os sensores RPS consistem basicamente em três sistemas essenciais integrados em um único dispositivo: um conjunto óptico-eletrônico, um sistema fluídico e o arranjo sensor multicamadas. Dessa forma, a integração dos componentes ópticos, eletrônicos, fluídicos e mecânicos necessários para garantir o funcionamento do sensor é um dos grandes desafios em sua construção. Atrelado a isso, existem esforços, como a proposta apresentada por Masson (2020), que buscam tornar esse tipo de sensor portátil, criando a possibilidade de garantir seu funcionamento em campo, sem restringi-lo a bancadas de testes ou laboratórios.

Cumprе destacar que o tipo de substância a ser analisada (líquida, gasosa ou ambas) impacta diretamente o projeto construtivo do sensor. Os índices de refração (IR) de líquidos e gases possuem valores distintos, $IR \geq 1,33$ para líquidos e $IR \sim 1,0$ para gases, o que leva o

acoplamento óptico para a excitação dos PS a ocorrer em ângulos diferentes. Como exemplo, para filmes finos de ouro depositados em um prisma de vidro BK7, a ressonância na interface metal-gás ($IR=1,0$) ocorre em torno de 43° , enquanto na interface metal-água ($IR=1,33$) é observada a 68° (OLIVEIRA et al., 2019).

Apesar da existência de diversos sensores RPS, observou-se que os sensores com características rotacionais, até então disponíveis, apresentavam difícil acesso, seja por sua complexa instrumentação, fabricação ou custo elevado. Portanto, existia uma lacuna a ser preenchida, que motivou o desenvolvimento de um dispositivo capaz de realizar medições precisas de substâncias líquidas e gasosas, que fosse portátil, possuisse geometria bem definida e cujo projeto pudesse ser facilmente reproduzível. Nesse sentido, propôs-se a construção do sensor S²LG (*RPS Sensor for Liquid and Gaseous Solutions*), como uma solução viável e acessível, por se tratar de um equipamento que combina peças de uso geral, manufatura aditiva (impressão 3D) e automação simples, além de se valer de materiais de baixo custo.

Dessa forma, a presente pesquisa propôs um novo projeto de sensor RPS portátil com partes rotacionais para uma operação facilitada com líquidos e gases. A excitação da RPS baseou-se em um prisma acoplado na configuração AIM-Kretschmann. A estrutura mecânica do sensor foi composta por partes modulares, especialmente projetadas para encapsular todos os elementos ópticos, eletrônicos, fluídicos e mecânicos. O projeto apresentou, ainda, uma célula de fluxo especial com partes intercambiáveis para a rápida comutação entre amostras líquidas e gasosas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sensor RPS portátil com partes móveis rotacionais, apto a analisar substâncias líquidas e gasosas em faixas angulares de 35° a 55° e de 55° a 75° . Para isso, o sensor foi projetado com peças de uso geral e um cassete comercial com lâmina de ouro. Sua estrutura foi construída por meio de manufatura aditiva, buscando garantir uma geometria bem definida, baixo custo de fabricação, tamanho reduzido e, conseqüentemente, a sua portabilidade.

Abaixo apontam-se os objetivos específicos do trabalho:

1. Projetar e desenvolver um sensor RPS com partes móveis rotacionais que deve fazer uso de prismas variados, com destaque para o semicilíndrico e *Dove* (TRAPEZOIDAL).
2. Automatizar a movimentação do sensor por meio de um microcontrolador Arduino.

3. Desenvolver algoritmo responsável pelo controle do sensor e implementar no Arduino.
4. Desenvolver programa responsável pela interpretação das respostas captadas pelo sensor, podendo ser por meio de vídeos ou fotos.
5. Adaptação de uma bomba de fluido externa com 3 roletes para servir de fonte de alimentação de substâncias.
6. Construção de célula de fluido modular para proporcionar alimentação de líquidos e gases sem alterar a geometria do sensor.
7. Construção de estrutura externa que permita o transporte, assim como botões de controle, para que haja a mínima interação do operador com os componentes internos do sensor.
8. Realizar simulações matemáticas do arranjo multicamadas valendo-se das equações de Fresnel e comparar com resultados obtidos empiricamente para líquidos e gases.
9. Quantificar resultados gerados em termos de estrutura mecânica, por meio de análise de vibrações.
10. Por fim, a caracterização da resposta do sensor por meio dos parâmetros morfológicos e figuras de mérito.

1.2 Trabalhos relacionados

A literatura relacionada a sensores RPS com partes móveis documentou diversos tipos de configurações e estratégias para garantir sua funcionalidade. McAtee et al. (2022) descreveram um arranjo SPR-AIM com prisma triangular e sistema 2-SRS¹ (*Two Stress Resultant System*), empregando movimentos sincronizados da fonte luminosa e do detector para a análise de soluções aquosas. Laksono et al. (2018) propuseram um 2-SRS baseado em um prisma semicilíndrico e movimentos coordenados do detector de imagem, configurado como um arranjo AIM para análise gasosa. Para substâncias líquidas, Costa et al. (2016) apresentaram uma montagem 1-SRS² com prisma triangular de base rotacional acoplada a um trilho para o deslocamento do detector. Um design similar de 1-SRS (*Single Stress Resultant System*), no

¹ 2-SRS representa um sistema em que dois esforços resultantes atuam simultaneamente, como em vigas que sofrem flexão e cisalhamento ou em eixos sujeitos a torção combinada com flexão, tornando-se uma abordagem mais próxima da realidade estrutural.

² 1-SRS corresponde a um sistema de esforços resultantes simples, em que apenas um esforço predominante é considerado, como em uma barra submetida unicamente à tração ou compressão axial.

qual uma superfície rotacional integrava um braço com os elementos necessários para a detecção por *SPR imaging*, foi descrito por Xiao e Zeng (2006)).

Movimentos rotacionais também foram aplicados em outras técnicas. Tsukagoshi et al. (2018) utilizaram uma abordagem com redes de difração para SPR, enquanto Ouellet et al. (2008) empregaram *SPR imaging* (SPRi), ambas para análises em meio líquido. Recentemente, uma modulação angular rotacional com estágio adicional (3-SRS) foi proposta para SPR (WEI et al., 2020) e para *Long-Range SPR* (LRSPR) (FENG et al., 2021), utilizando prismas triangulares e semicilíndricos, respectivamente, para medições em meio aquoso.

As soluções anteriormente citadas eram, em sua maioria, configurações não-portáteis, com arranjos ópticos montados manualmente para uso em laboratório, o que inviabilizava aplicações em campo. Exceções a essa regra incluíam dispositivos como o proposto por Shin et al. (2010), que utilizava um espelho rotativo para guiar a luz em uma estrutura compacta (AIM), e a linha NanoSPR LLC (ex.: NanoSPR8), que adotava um 1-SRS com prisma não convencional e uma varredura angular limitada a 17°.

Outras estratégias, como o uso de atuadores piezoelétricos (GRAHAM et al., 2011), prismas combinados para *Phase Interrogation Mode* (PIM) (SATHIYAMOORTHY, 2013), ou a modulação do caminho óptico com arranjos externos (OLIVEIRA et al., 2013) ou internos (THIRSTRUP et al., 2004), buscaram substituir os mecanismos rotacionais. Porém, tais sensores geralmente possuíam uma amplitude angular reduzida e eram restritos a um único tipo de amostra (líquido ou gás).

Sistemas baseados em fibras de cristal fotônico (LIU et al., 2021; LUO et al., 2024) ou em guias de onda (LAVERS; WILKINSON, 1994) permitiram a análise de líquidos e gases, utilizando, para isso, a atenuação espectral em bancadas não-portáteis. Kim et al. (2005) apresentaram uma sonda de fibra SPR com afunilamento múltiplo que operava em *Wavelength Interrogation Mode* (WIM) para as fases líquida e vapor. Já Liang et al. (2010) descreveram um sensor com prisma triangular (2-SRS) compatível com ar e água, embora o projeto se baseasse no equipamento obsoleto SPR 200.

A Tabela 1 apresenta outros trabalhos relacionados que também serviram como base para nortear o projeto do sensor.

Tabela 1 - Principais características dos sensores RPS analisados para desenvolvimento do S²LG.

Ref.	Montagem Experimental	Design RPS	Resposta RPS	Angulo de ataque	Observações
LAKSONO et al., 2010	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma semicilíndrico	Curva RPS	20°	Conjunto de engrenagens e engrenagens anti-folga.
DEVANARAYANAN et al., 2016	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma semicilíndrico	Curva RPS	40°	Mecanismo de rotação de espelho e detector de fotodiodos de quadrante.
YANG et al., 2010	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma Dove	Curva RPS	27°	Espelhos rotacionais em alta velocidade para modulação e geração de um feixe colimado.
GRAHAM, 2011	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma triangular	Curva RPS	45°	Espelho em dobradiça piezoelétrico juntamente com losango de Fresnel.
TETSUO et al., 2010	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma serra triangular	Curva RPS	32,98°	Prisma de silício (Si) combinado com uma grade de difração.
SATHYAMURTHY et al., 2013	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma triangular	Curva RPS	45°	Acoplamento do prisma no motor rotacional através de presilhas.
COSTA, 2016	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma triangular	Curva RPS	45°	Uso de servo motor modificado e acoplado à plataforma presa ao prisma triangular.
OULLET et al., 2010	Bancada de testes (não portátil)	AIM; prisma triângulo equilátero	Curva RPS	45°	Rotação em 2 estágios.
NanoSPR6, NanoSPR77, NanoSPR8, NanoSPR9 e NanoRPS103-LRPS	Portátil (produto comercializável)	WIM; prisma trapezoidal e lâmina de vidro	Curva RPS	17° ou 45°	Conjunto de motores de passo e engrenagens.
Proposto	Portátil (produto comercializável)	AIM; prisma semicilíndrico, ou Dove	Curva RPS	40°	Rotação em estágios aliada a conjunto de motores de passo.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa. O Capítulo 2 expõe o referencial teórico que fundamentou o estudo. O Capítulo 3 detalha a metodologia adotada e os métodos científicos aplicados. O Capítulo 4 descreve os materiais e instrumentos utilizados. O Capítulo 5 apresenta o projeto do sensor. O Capítulo 6 exhibe os resultados obtidos, acompanhados das respectivas análises e discussões. Por fim, o Capítulo 7 consolida as conclusões, oferece sugestões para pesquisas futuras e lista as referências bibliográficas.

Capítulo 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresentou os fundamentos teóricos que sustentaram o desenvolvimento deste trabalho. Nela, foram abordados os principais conceitos, definições e estudos anteriores relacionados ao tema, com o objetivo de contextualizar a pesquisa e oferecer suporte para a análise dos resultados. A revisão da literatura buscou identificar lacunas no conhecimento existente e justificar a relevância da investigação proposta.

2.1 Sensores RPS

A tecnologia RPS é uma técnica óptica que permite a análise de interações biomoleculares em tempo real. Embora o fenômeno dos plasmons de superfície seja conhecido há séculos, como evidenciado pelo Copo de Licurgo — um artefato romano do século IV (FREESTONE, 2007) —, não é possível atribuir a criação da tecnologia a um único inventor.

A primeira observação científica dos plasmons de superfície (PS) ocorreu em 1902, quando R. W. Wood percebeu linhas escuras no espectro de difração ao incidir luz policromática em grades metálicas (WOOD, 1902). Esse fenômeno foi posteriormente explicado por Ritchie, que também consolidou o termo RPS (RITCHIE, 1957).

As pesquisas na área de sensores RPS tiveram início entre as décadas de 1960 e 1970, com contribuições significativas de diversos segmentos, que iam desde a pesquisa acadêmica até o setor industrial.

- Erich Kretschmann: Ele é frequentemente creditado com a ideia inicial da técnica de RPS, que envolveu a utilização de luz polarizada para estudar a interface entre um metal e um meio dielétrico.
- Andreas Otto: Este cientista alemão trabalhou na aplicação da técnica de RPS a sistemas biológicos na década de 1980, ajudando a estabelecer sua utilidade em bioquímica e biologia molecular.
- Michael Thompson: Ele desempenhou um papel importante no desenvolvimento de sensores RPS comerciais e sistemas instrumentais na década de 1990.
- Biacore AB: Esta empresa sueca desempenhou um papel crucial na comercialização da tecnologia RPS e na fabricação de instrumentos de pesquisa RPS, contribuindo significativamente para sua disseminação na comunidade científica e na indústria.

Na década de 1960, os trabalhos de Kretschmann, Raether e Otto foram fundamentais para a demonstração experimental do fenômeno RPS. Eles desenvolveram as configurações

baseadas no método de reflexão total atenuada (ATR), no qual um feixe de luz incide sobre um prisma acoplado a uma fina camada metálica, permitindo a excitação e a observação dos plasmons de superfície (OLIVEIRA, 2011).

Otto desenvolveu uma configuração na qual o filme metálico era separado do prisma por uma distância na ordem do comprimento de onda da luz incidente. Kretschmann, por sua vez, utilizou um arranjo em que o metal era depositado diretamente sobre o prisma, o que tornou a instrumentação mais simples e facilitou a posterior construção de sensores baseados nessa tecnologia (CARVALHO, 2003).

Na Figura 2, pode-se observar uma ilustração do funcionamento das configurações de Kretschmann.

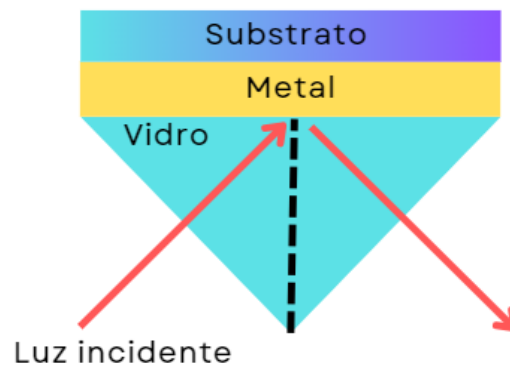


Figura 2 - Arranjo multicamadas na configuração de ATR-Kretschmann.

2.1.1 Condições para excitação dos plasmons de superfície (SPs)

Os metais possuem diversas características ópticas, tipicamente expressas pela função dielétrica complexa (FDC). Essa função é apresentada pela seguinte equação:

$$\varepsilon_2(\lambda) = \varepsilon_{2r}(\lambda) + i\varepsilon_{2i}(\lambda) \quad (1)$$

Em que: λ é o comprimento de onda de luz, $\varepsilon_2(\lambda)$ é a função dielétrica complexa do metal no comprimento de onda λ , $\varepsilon_{2r}(\lambda)$ é a parte real da função dielétrica (relacionada ao quanto o material "armazena" energia do campo elétrico), $i\varepsilon_{2i}(\lambda)$ é a parte imaginária da função dielétrica (relacionada ao quanto o material absorve energia do campo elétrico — ou seja, perdas), e i é a unidade imaginária.

Logo, a equação elucida que a resposta óptica do metal depende da frequência (ou comprimento de onda) da luz, e essa resposta tem uma parte real (relacionada ao armazenamento de energia) e uma parte imaginária (relacionada à absorção de energia).

No contexto da excitação de plasmons de superfície (SPP), o acoplamento óptico ocorre quando a componente paralela do vetor de onda da luz p-polarizada incidente, dada por

$k_{px} = k_0 \sqrt{\varepsilon_1} \sin(\theta_1)$, é igual ao vetor de onda dos plasmons na interface metal-dielétrico, expresso por $k_{SP} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_3 \varepsilon_4}{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}}$, em que, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o vetor de onda no vácuo, ε_1 é a constante dielétrica do meio de incidência (geralmente o prisma), ε_4 é a constante dielétrica do dielétrico adjacente ao metal (como ar ou água) e ε_3 corresponde à constante dielétrica do metal.

Assim, para que ocorra o acoplamento eficiente e a excitação dos plasmons de superfície, é fundamental que ε_3 seja justamente a função dielétrica complexa do metal definida anteriormente (Eq. 1). Portanto, os valores de $\varepsilon_{2r}(\lambda)$ e $i\varepsilon_{2i}(\lambda)$ determinam as condições para a ressonância plasmônica: a parte real precisa ser negativa e suficientemente grande em módulo para satisfazer a igualdade, enquanto a parte imaginária influencia diretamente a largura e a intensidade da ressonância, indicando as perdas no sistema. (OLIVEIRA L, 2016).

Destaca-se ainda, que a ressonância é obtida variando as condições de acoplamento entre luz p-polarizada e os SPs, proporcionando dois modos de operação. (DIONNE et al., 2005)

- Modo de interrogação espectral (Modo - WIM): Nesse modelo o ângulo de incidência do feixe de luz que atinge o arranjo multicamadas é mantido constante. Logo as condições de acoplamento dependem do comprimento de onda.
- Modo de interrogação angular (Modo - AIM): Nesse modelo o comprimento de onda dos feixes de luz que atinge o arranjo multicamadas é fixo. Assim as condições de acoplamento neste caso dependem dos ângulos do feixe de luz. Tornando possível o uso de câmera para determinar a refletividade em função do ângulo de incidência.

2.1.2 Análise de Fresnel

As Equações de Fresnel são um conjunto de relações matemáticas, tipicamente representadas de forma matricial. A análise dessas equações constitui a ferramenta mais adequada para estudar as excitações ópticas e as características dos sensores RPS, pois permite determinar a sensibilidade do sensor para os modos WIM e AIM. Adicionalmente, esse formalismo possibilita o cálculo dos coeficientes de reflexão e transmissão de uma onda óptica incidente sobre um sistema com múltiplas interfaces e meios (LIMA; SILVA, 2019).

No método de reflexão total atenuada (ATR), a condição para excitação dos plásmons de superfície é satisfeita quando o componente tangencial do vetor de onda da luz incidente (k_{px}) iguala-se ao vetor de onda dos plásmons superficiais (k_{sp}). (GOMES; OLIVEIRA, 2023)

$$k_{sp} \approx \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_p} \sin(\theta_1) \quad (2)$$

em que: λ é o comprimento de onda da luz incidente, ε_m e ε_d são, respectivamente, as permissividades complexas do metal e do dielétrico adjacente, ε_p representa a permissividade do prisma de acoplamento, θ_1 é o ângulo de incidência da luz no sistema.

A intensidade refletida da luz, medida na forma de refletividade (R), é obtida a partir do quadrado do módulo do coeficiente de reflexão, conforme definido por:

$$R(\theta) = |r(\theta)|^2 \text{ ou } R(\lambda) = |r(\lambda)|^2 \quad (3)$$

O coeficiente r é calculado por meio de uma matriz de transferência total que considera o empilhamento de camadas do sensor. Para um sistema com m camadas, r é dado por:

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12}q_m)q_1 - (M_{21} + M_{22})q_m}{(M_{11} + M_{12}q_m)q_1 + (M_{21} + M_{22})q_m} \quad (4)$$

em que, M_{11} , M_{12} , M_{21} e M_{22} são os elementos da matriz total

$$M_{tot} = \prod_{j=2}^{m-1} M_j \quad (5)$$

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(\beta_j) & \frac{i \sin(\beta_j)}{q_j} \\ i q_j \sin(\beta_j) & \cos(\beta_j) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ao qual, q_j é a admitância óptica da j-ésima camada: $q_j = \sqrt{\frac{\varepsilon_j^2 - (\varepsilon_1 \sin \theta_1)^2}{\varepsilon_j^2}}$ e β_j é a fase adquirida

pela onda na camada j, definida por: $\beta_j = \frac{2\pi d_j}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_j^2 - (\varepsilon_1 \sin \theta_1)^2}$, com d_j sendo a espessura da camada j.

Uma curva RPS típica é apresentada na Figura 3. Quando a ressonância ocorre, observa-se um valor mínimo de refletividade. Nesse ponto, o valor de θ_R , é determinado, a depender do modo de interrogação utilizado.

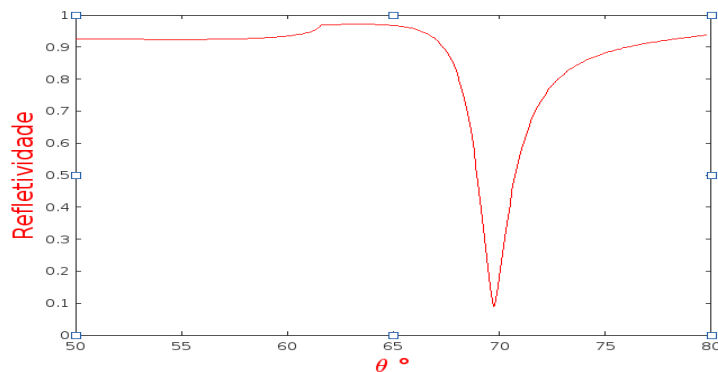


Figura 3 - Curva RPS ilustrativa gerada através das equações de Fresnel.

A análise da morfologia da curva RPS permite a obtenção de características importantes para fins de sensoriamento. Uma das principais é a nitidez da ressonância, que é quantificada pela Largura Total à Metade do Mínimo (FWHM, da sigla em inglês para *Full Width at Half Maximum*). Curvas mais estreitas — ou seja, com menor valor de FWHM — indicam uma maior capacidade de resolução do sensor, permitindo a detecção de pequenas variações no índice de refração (SAVIO et al., 2015).

Outro aspecto importante a ser considerado é a assimetria da curva em torno do ponto de mínima reflectância. Curvas assimétricas dificultam a identificação precisa do ponto de ressonância e podem ser causadas por imperfeições no acoplamento óptico ou por desalinhamentos do sistema (SILVA et al., 2015).

Outro parâmetro relevante é a energia sob a curva, interpretada como a área na região de ressonância. Essa medida está associada à eficiência do acoplamento entre os modos plasmônicos e a luz incidente. Um bom acoplamento resulta em um vale de reflectância mais profundo e acentuado, o que favorece a sensibilidade do sensor (ABDULHALIM, 2025).

Por fim, as curvaturas à esquerda (CL) e à direita (CR) do ponto mínimo fornecem informações adicionais sobre a simetria e a qualidade do acoplamento. Diferenças significativas entre essas curvaturas podem indicar interferências externas ou ruídos estruturais que afetam a resposta do sensor (KUMAR; NANDA, 2016).

No sensor proposto, foi utilizado um sistema multicamadas na configuração de Kretschmann, composto por seis camadas (prisma, fluido de acoplamento, dispositivo com lâmina de ouro e analito), conforme indicado na Figura 4.

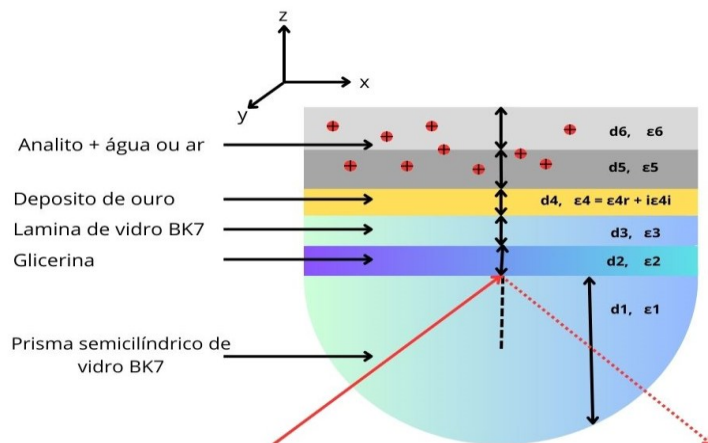


Figura 4 - Arranjo multicamadas na configuração ATR com 6 camadas.

Desse modo, utilizando as condições de acoplamento, é possível determinar o valor do índice de refração do analito (n_5). Para o modo AIM a expressão para (n_5) ($n_5 \approx \sqrt{\varepsilon_5}$) em função de θ_R enquanto λ é fixo, e é apresentada a seguir:

$$n_5(\theta_R) = \sqrt{\frac{\varepsilon_5(\lambda)[n_1(\lambda)\sin\sin(\theta_R)]^2}{\varepsilon_{4r}(\lambda)-[n_1(\lambda)\sin\sin(\theta_R)]^2}} \quad (7)$$

Em conjunto, as equações e expressões apresentadas anteriormente demonstram o funcionamento do fenômeno físico em um sensor RPS, cujo princípio de operação possui semelhança com o de um refratômetro óptico.

2.1.3 Características térmicas

Conforme esclarecido por Nóbrega et al. (2020), os sensores baseados em RPS são altamente sensíveis a mudanças nas propriedades do meio adjacente à superfície sensora, incluindo a temperatura. A influência da temperatura nesses dispositivos pode ser observada em diversos aspectos, com destaque para os seguintes pontos, frequentemente relatados na literatura.

- Índice de Refração

A temperatura afeta o índice de refração tanto do meio de acoplamento (como prismas ou fibras ópticas) quanto do meio onde ocorre a interação (como líquidos ou gases). O índice de refração varia com a temperatura devido à expansão térmica e a mudanças na densidade. Pequenas variações na temperatura podem causar deslocamentos na posição do ângulo de ressonância, levando a erros de medição (SUPRUN; SHMELEVA, 2024).

- Propriedades do Filme Metálico

Os filmes metálicos utilizados em sensores RPS, geralmente de ouro ou prata, também são influenciados pela temperatura. A condutividade elétrica e a constante dielétrica desses metais podem variar com as mudanças térmicas, o que altera a condição de ressonância. Esse efeito pode modificar a intensidade e a largura do vale de ressonância (SUPRUN; SHMELEVA, 2024).

- Estabilidade Estrutural

A temperatura pode induzir tensões térmicas no filme metálico e nos substratos, afetando a integridade estrutural do sensor. Expansões e contrações térmicas repetidas podem

causar fissuras ou deformações no filme metálico, comprometendo a estabilidade e a repetibilidade das medições. (SUPRUN; SHMELEVA, 2024)

- **Adsorção e Dessorção de Moléculas**

A temperatura pode induzir tensões térmicas no filme metálico e nos substratos, afetando a integridade estrutural do sensor. Expansões e contrações térmicas repetidas podem causar fissuras ou deformações no filme metálico, comprometendo a estabilidade e a repetibilidade das medições (SUPRUN; SHMELEVA, 2024).

Nesse contexto, destacam-se os estudos de Li et al. (2013) e Dorzinsk et al. (2015), que apresentaram algumas estratégias de mitigação para esses efeitos, tais como:

- **Controle Térmico:** Uso de dispositivos de controle de temperatura, como termostatos, para manter a temperatura constante durante as medições.
- **Compensação de Dados:** Desenvolvimento de algoritmos que compensam as variações de temperatura ao analisar os dados obtidos.
- **Materiais Estáveis:** Seleção de materiais com coeficientes de expansão térmica baixos e propriedades ópticas menos sensíveis à temperatura.

Em resumo, a temperatura tem uma influência significativa no desempenho dos sensores RPS, afetando a precisão e a confiabilidade das medições. A compreensão desses efeitos e a implementação de estratégias para mitigar suas influências são cruciais para a obtenção de resultados precisos em aplicações práticas.

2.1.4 Instrumentação eletrônica em sensores RPS

A construção de sensores RPS envolve o uso coordenado de diversos elementos eletrônicos e optoeletrônicos para garantir a precisão na excitação dos plásmons e na aquisição dos dados ópticos. Para isso, dispositivos como motores de passo, fontes de laser, câmeras CCD/CMOS e microcontroladores são integrados com precisão por meio de técnicas de instrumentação eletrônica.

O motor de passo é empregado no controle angular do prisma ou do substrato metálico, permitindo a varredura do ângulo de incidência da luz. A técnica de excitação angular requer alta precisão nesse movimento, com incrementos finos que são obtidos por meio do controle em meio-passo ou passo completo, dependendo da resolução desejada. Esse controle é realizado

através de sinais gerados pelo microcontrolador, conforme demonstrado por Lin et al. (2020), que utilizaram algoritmos PWM temporizados para varrer ângulos com precisão inferior a 0,1° por incremento.

A fonte de laser é outro componente crítico. É necessário ajustar corretamente a tensão e a corrente de operação para garantir estabilidade no comprimento de onda e na intensidade luminosa. A estabilização térmica e eletrônica do laser é frequentemente realizada por meio de circuitos de controle com realimentação (*feedback*), conforme discutido por Cheng et al. (2021), que utilizaram controladores baseados em LM317 e sensores de corrente para manter o diodo laser em regime estável.

A câmera utilizada para a leitura do feixe refletido deve possuir resolução suficiente para detectar pequenas variações na intensidade do feixe, e seu tempo de exposição (ou tempo de integração) deve ser ajustável, permitindo otimizar o sinal conforme as condições de iluminação e reflexão. Estudos como o de (MOHAMMADI, et al. 2019) utilizam câmeras CMOS com 10 bits de profundidade e ajuste automático de ganho para captar o deslocamento mínimo do ponto de reflexão em sensores RPS.

Outro aspecto relevante é a vibração mecânica gerada, especialmente pelo motor de passo. Essa vibração pode afetar a estabilidade da leitura óptica, devendo ser minimizada por meio de estratégias de desacoplamento mecânico ou amortecimento, como ressaltado por Rydosz et al. (2018), que implementaram sistemas de suspensão por elastômeros para manter o conjunto óptico isolado das vibrações induzidas pela movimentação angular.

Portanto, a integração adequada desses componentes exige uma abordagem multidisciplinar, envolvendo conhecimentos de eletrônica, controle, óptica e programação embarcada, para garantir o funcionamento confiável e repetível do sensor RPS.

Resumo do capítulo 2

Neste capítulo, foi apresentado um panorama histórico sobre os sensores RPS, com a exposição de seus fundamentos conceituais e matemáticos, além do detalhamento do fenômeno óptico envolvido. Foram abordadas as formulações teóricas que nortearam as análises, incluindo a Configuração de Kretschmann, o modo AIM e as equações de Fresnel, essenciais para a realização de simulações. Em seguida, discutiram-se as características térmicas desses sensores, destacando as problemáticas associadas à variação de temperatura e as possíveis soluções aplicáveis. Por fim, deu-se enfoque à instrumentação eletrônica do sensor.

Capítulo 3

METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa foi estruturada em cinco etapas principais: levantamento de requisitos, projeto, prototipagem, montagem e experimentação. Essas etapas foram organizadas em um fluxo iterativo, permitindo retornos a fases anteriores sempre que algum requisito não fosse atendido de forma satisfatória. Assim, caso uma etapa apresentasse inconsistências ou resultados abaixo do esperado, o processo era retomado a partir da fase anterior, promovendo ajustes e melhorias contínuas no desenvolvimento do sensor.

A Figura 5 ilustra esse fluxo metodológico, destacando as interações entre as etapas e os ciclos de verificação adotados ao longo do projeto.

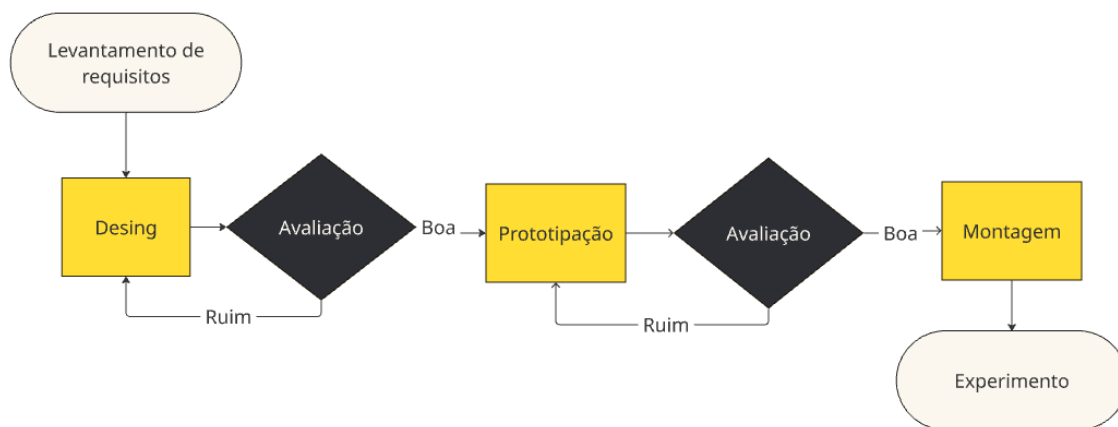


Figura 5 – Rotina de tomada de decisões metodológicas para o desenvolvimento do sensor RPS proposto.

3.1 Levantamento de requisitos

A pesquisa foi iniciada com uma revisão bibliográfica, que serviu como base para a definição dos requisitos de prototipagem do sensor S²LG. A proposta central do trabalho consistiu na construção de um sensor RPS com partes móveis e com uma bomba de alimentação integrada. Nessa fase, foram definidos os principais objetivos do projeto, visando preencher lacunas relacionadas ao tema.

O desenvolvimento do sensor foi norteado por um conjunto de desafios-chave que definiram seus principais diferenciais. Primeiramente, buscou-se garantir a portabilidade do equipamento, tornando-o compacto e de fácil manuseio. O segundo desafio, central para a inovação do projeto, foi permitir a análise tanto de substâncias líquidas quanto gasosas em um

único dispositivo, o que foi viabilizado por um sistema de deslocamento angular da fonte de luz. Para tornar esses objetivos acessíveis, os desafios subsequentes consistiram em utilizar a impressão 3D como método principal de fabricação e, como resultado, assegurar um baixo custo final de produção

Ainda nesta etapa, foi determinado que a configuração de Kretschmann seria a mais adequada, pois facilitaria a construção e a instrumentação do sensor. De posse dessas definições, deu-se início à fase de simulações matemáticas, com o intuito de levantar-se as métricas necessárias para a validação do projeto.

Simulação do arranjo multicamadas

A obtenção de resultados simulados representou uma etapa importante da pesquisa. Ao aplicar a análise de Fresnel ao arranjo multicamadas, foi possível obter informações valiosas sobre o movimento angular necessário para a geração das curvas de refletividade, bem como sobre as características dessas curvas. Tais dados teóricos foram essenciais para a posterior comparação entre as respostas experimentais e as simuladas.

O arranjo multicamadas do sensor S2LG partiu da reutilização de um cassete comercial com lâmina de ouro (SensiQ), adotando-se a configuração ATR-Kretschmann. Essa abordagem tornou necessário o uso de um fluido de acoplamento entre o prisma e o cassete, tendo sido utilizada a glicerina por possuir características ópticas próximas às do vidro BK7.

Portanto, o arranjo multicamadas efetivamente utilizado foi composto pelas seguintes camadas, conforme ilustrado na Figura 6:

- Prisma de vidro BK7 (~1 cm);
- Glicerina (1 mm);
- Cassete com substrato de vidro (1 mm);
- Filme de ouro (50 nm);
- Analito (meio aquoso ou gasoso).

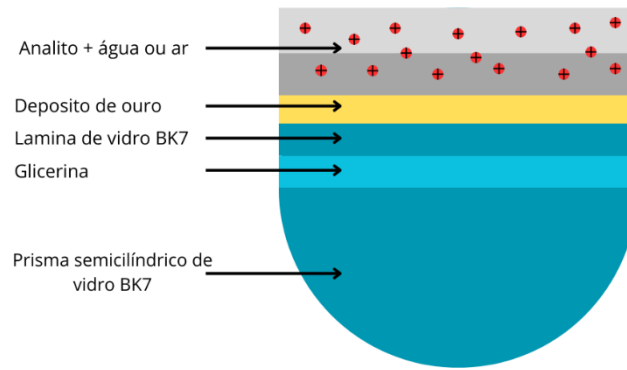


Figura 6 - Arranjo multicamadas contendo 6 camadas na configuração ATR.

Para a obtenção dos resultados simulados, foi utilizado um algoritmo desenvolvido no software MATLAB. A finalidade desse algoritmo era computar os coeficientes de Fresnel para o arranjo multicamadas do sensor e, a partir deles, gerar quatro gráficos principais: refletividade vs ângulo^o (Curva RPS), ângulo de ressonância θ_R vs índice de refração (RIU), largura a meia altura da curva FWHM^o (do inglês *Full Width at Half Maximum*) vs índice de refração (RIU) e sensibilidade $\Delta\theta_R / \Delta n_3$ (° / RIU) vs índice de refração (RIU).

Simulação com substâncias líquidas

A Figura 7 apresenta a resposta simulada para o sensor operando com substâncias líquidas, em uma faixa de índice de refração de 1,33 a 1,39, com incrementos de 5×10^{-3} RIU (*Refractive Index Unit*). Para a simulação, foi utilizado o comprimento de onda de 670 nm, e as propriedades ópticas dos materiais foram baseadas nos dados de Oliveira et al. (2019).

Os resultados simulados indicaram a faixa angular na qual o fenômeno RPS ocorreria, caracterizando uma relação linear entre os parâmetros da curva e o aumento do índice de refração.

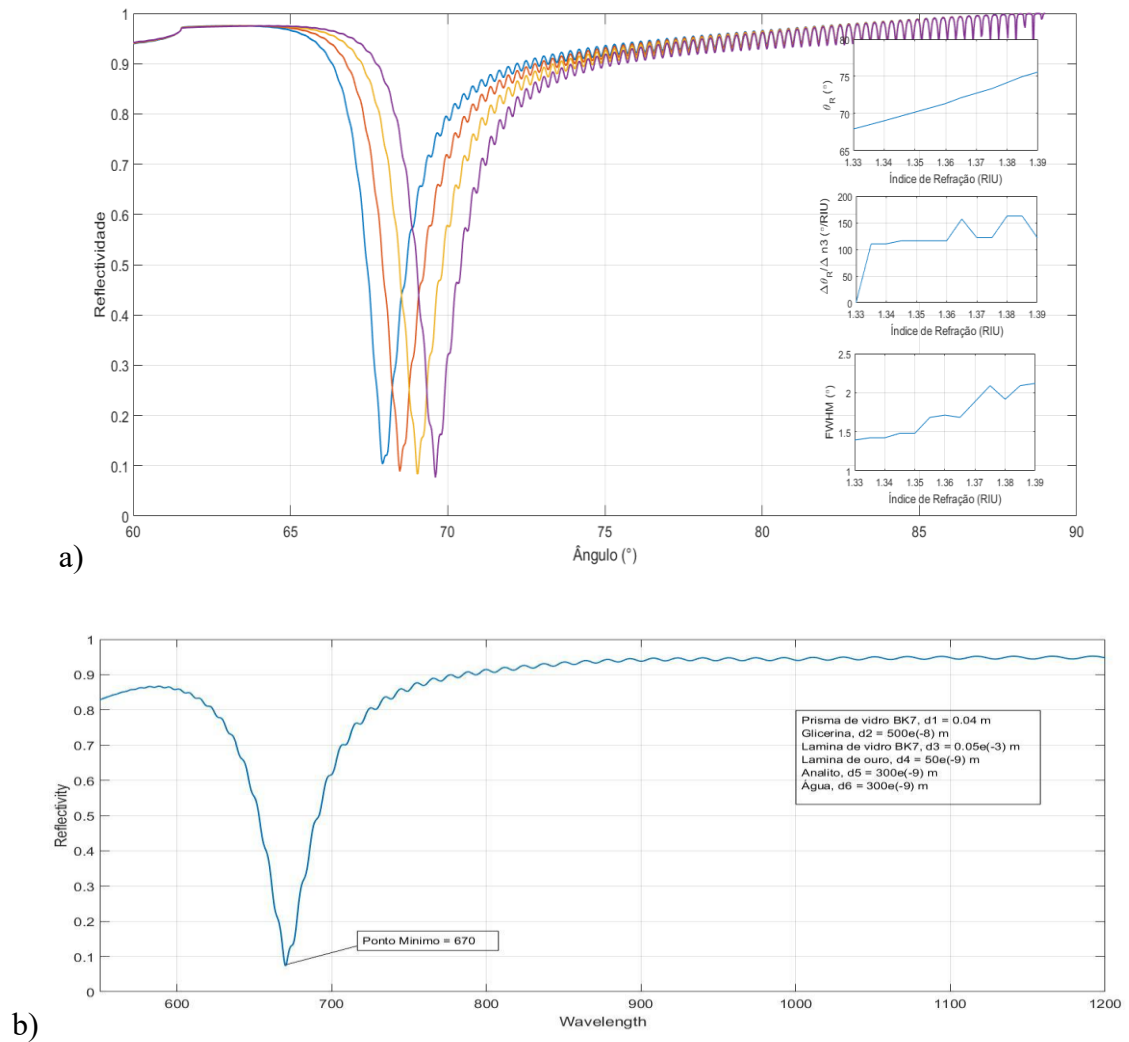


Figura 7 - a) Curva RPS no modo AIM para substâncias líquidas, com $\lambda = 670$ nm. Subgráficos indicando o comportamento do ângulo de ressonância e largura da curva e sensibilidade em função do índice de refração. b) Curva RPS no modo WIM para água, com $\theta = 69,9^\circ$.

Salienta-se que, devido ao fato de o sensor possuir diversas interfaces internas do tipo isolante-metal, podem ocorrer pontos de coexistência de ressonâncias de curto e longo alcance, o que se reflete em oscilações ao longo da curva simulada. Detalhes sobre a coexistência de ressonâncias em múltiplas camadas podem ser encontrados na literatura, como no capítulo 12 do livro *Surface Plasmon Resonance Sensors: A Materials Guide to Design, Characterization, Optimization, and Usage* (OLIVEIRA et al., 2019).

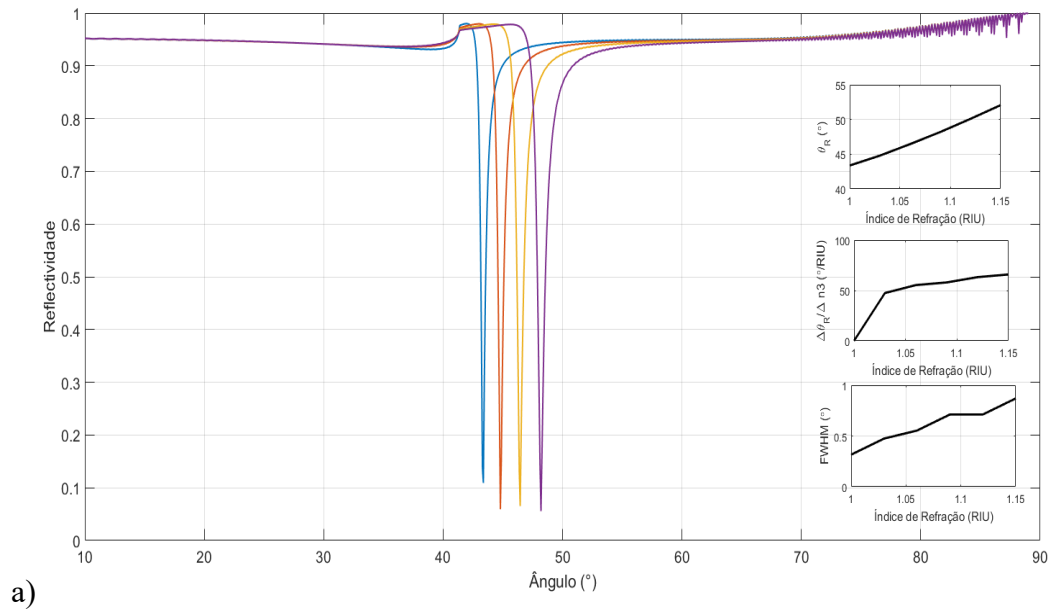
Como forma de validar a resposta obtida no modo AIM, foi realizada uma simulação complementar no modo WIM. Para essa validação, o ângulo de incidência foi fixado em $\theta = 69,9^\circ$, valor correspondente ao ângulo de ressonância previamente encontrado para a água ($n = 1,33$).

Conforme ilustrado na Figura 7b, a curva WIM resultante revela que a ressonância ocorre em 670 nm. Esse resultado confirma a coerência entre os modos, uma vez que corresponde ao mesmo comprimento de onda utilizado na simulação AIM.

Simulação com substâncias gasosas

A Figura 8a apresenta a resposta simulada para o sensor operando com substâncias gasosas, em uma faixa de índice de refração de 1,00 a 1,15, com incrementos de 3×10^{-2} RIU. Para esta simulação, foram utilizados o comprimento de onda de 670 nm e as mesmas propriedades ópticas dos materiais empregados na simulação com líquidos. A partir dos resultados, notou-se um comportamento linearmente crescente dos parâmetros da curva com o aumento do índice de refração.

Como validação da resposta AIM, foi realizada também uma simulação no modo WIM. Nesta, o ângulo de incidência foi fixado em $\theta=43,37^\circ$, valor correspondente ao ângulo de ressonância encontrado para o ar ($n=1,00$). Como ilustrado na Figura 8b, a curva resultante revela que a ressonância ocorre em 666,5 nm. Este valor, por ser próximo ao comprimento de onda de 670 nm utilizado no modo AIM, valida a consistência do modelo teórico.



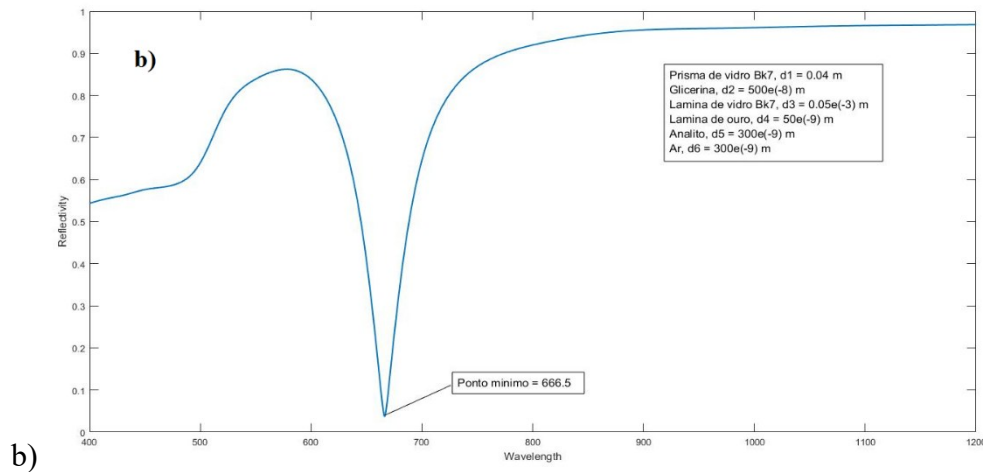


Figura 8 - a) Curva RPS no modo AIM para substâncias gasosas, com $\lambda=666,5\text{nm}$. Subgráficos indicando o comportamento do ângulo de ressonância e largura da curva e sensibilidade em função do índice de refração. b) Curva RPS no modo WIM para o ar, com $\theta = 43.37^\circ$.

As análises das curvas simuladas matematicamente desempenharam um papel fundamental na concepção deste projeto, oferecendo *insights* valiosos que transcendem as limitações de uma abordagem puramente empírica.

Ao modelar as curvas de resposta sensorial de maneira precisa e controlada, é possível antecipar e compreender melhor o comportamento do sensor. Essa abordagem permitiu otimizar o design do dispositivo, ajustando parâmetros-chave, como a faixa angular, para atender aos requisitos específicos da aplicação, cuja principal característica é a análise de líquidos e gases.

Simulação vibracional

Cumprindo a proposta inicial do sensor, que se baseia em componentes rotacionais, foram realizadas simulações matemáticas via software com o intuito principal de emular as possíveis vibrações e prever o movimento do motor de passo. Através das análises, verificou-se a aplicabilidade.

Assume-se que o motor possui um rotor de massa m , preso a um eixo com rigidez k e amortecimento C . A excitação periódica vem dos passos do motor (torque de excitação $F(t)$).

Assim pode-se apresentar a equação 8, que se deriva das aplicações das leis de Newton, nos permitindo calcular a vibração mecânica. A equação apresentada é uma equação diferencial ordinária de segunda ordem não-homogênea que descreve o movimento de um sistema massa-mola submetido tanto a forças dissipativas quanto a uma força externa periódica

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = F_0 \cos(\omega t) \quad (8)$$

em que: $x(t)$ o deslocamento angular ou linear, se transformado, F_0 o Amplitude do torque equivalente gerado por cada passo, ω a frequência de excitação relacionada ao passo por segundo, c o coeficiente de amortecimento e por fim k que representa a rigidez equivalente do sistema que se refere a mecânica do eixo mais a carga.

Para realizar a simulação com a equação 8 faz-se necessário a definição de alguns parâmetros, estimados, considerando a montagem e regime de operação do sensor:

Tabela 2 – Parâmetros para simulação de teste vibracional para motor de passo 28BYJ-48.

Parâmetros	valor
Massa rotacional estimada do rotor “m”	0,3 kg
Rigidez equivalente de montagem “K”	100 N/m
Amortecimento “C”	0,2 Ns/m
Força de excitação simplificada “F ₀ ”	0,01 N
Frequência “ω”	512 passos

A resposta para o regime permanente será: $x(t) = X \cos(\omega t - \phi)$, com amplitude dada por: $X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$.

As respostas simuladas para os parâmetros definidos apresentaram-se da seguinte forma:

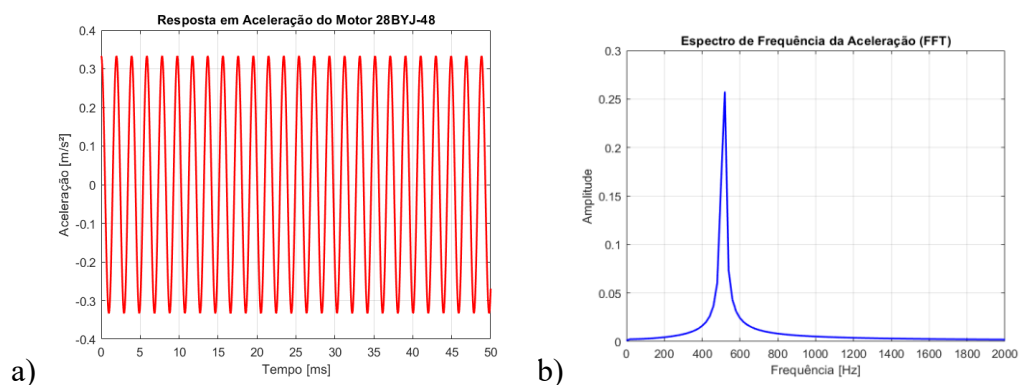


Figura 9 - a) Resposta simulada de aceleração vibracional do motor de passo 28BYJ-48. b) Espectro de frequência de aceleração (FFT).

A Figura 9a ilustra a vibração mecânica gerada pelo motor 28BYJ-48, quando operado a 512 passos por segundo. O gráfico demonstra que o motor produz uma vibração periódica com aceleração de perfil harmônico, um comportamento característico de um sistema massa-mola-amortecedor submetido a uma excitação periódica.

Da análise da curva, extraem-se duas informações principais: a amplitude da aceleração, que quantifica a intensidade da vibração, e o seu perfil senoidal, que sugere uma resposta a uma excitação constante, livre de ruídos ou efeitos transientes significativos

A Figura 9b, por sua vez, apresenta a análise no domínio da frequência do sinal de vibração, obtida por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O espectro resultante revela que a vibração do motor é dominada por uma única componente de frequência principal, localizada em 512 Hz.

Este resultado confirma que a excitação periódica, gerada pela taxa de 512 passos por segundo do motor, é a fonte primária da vibração observada. A ausência de outras componentes de frequência significativas no espectro indica que a resposta mecânica do sistema é monofrequencial e previsível, sem ruídos ou instabilidades relevantes. Mais detalhes sobre o método de simulação são apresentados no Apêndice B

3.2 *Desing*

Com os requisitos definidos, iniciou-se o processo de projeto da estrutura mecânica. Esta fase baseou-se nas medições de materiais disponíveis na UFERSA e na consulta a trabalhos relacionados, com o objetivo de planejar um modelo que se adequasse às peças e aos componentes existentes, priorizando o reaproveitamento do máximo de elementos possível.

Assim, as medições dos componentes a serem reaproveitados foram utilizadas como referência para nortear o dimensionamento da estrutura. Os componentes medidos foram: a bomba de alimentação, um prisma de vidro com geometria semicilíndrica, um prisma de vidro com geometria trapezoidal (prisma de Dove) e o cassete com lâmina de ouro. Após a coleta de todas as medidas, o desenho técnico foi realizado.

O sensor foi projetado e dividido em três estruturas principais:

1. **Estrutura Fixa:** responsável por acomodar todos os elementos do sensor.
2. **Peças Mecânicas Móveis:** elementos específicos para a fixação de componentes como a fonte de luz, as lentes, o prisma e a câmera.

3. **Case Externo:** um invólucro para todo o conjunto após a montagem, cuja função principal é proteger o sistema durante o transporte e isolá-lo de luzes externas.

Outras propostas de projeto também foram desenvolvidas, com destaque para configurações com movimento em dois e três estágios. No entanto, devido à complexidade de instrumentação prevista, essas alternativas foram descartadas

3.3 Prototipação

Para a confecção da estrutura fixa e das peças mecânicas móveis, foram utilizadas impressoras 3D, com possibilidade de variação nos tipos de filamentos empregados: Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Polilático (PLA) e Polietileno Tereftalato Glicol (PETG).

Entretanto, optou-se pela utilização do PLA na fabricação da maior parte do sensor, devido à sua ampla disponibilidade e facilidade de impressão. Embora o PLA não apresente as melhores propriedades mecânicas e térmicas em comparação ao ABS ou ao PETG, destaca-se por permitir uma impressão mais simples e eficiente, o que é essencial para a produção de protótipos descartáveis durante a fase de testes. A escolha pela manufatura aditiva (impressão 3D) justificou-se pela facilidade de acesso aos equipamentos e pelo baixo custo dos materiais.

Ressalta-se que apenas um componente foi impresso em material diferente do PLA: o módulo para líquidos da célula de fluido. Esse componente foi confeccionado em PETG, uma vez que, por se tratar de um filamento impermeável derivado de garrafas PET, apresenta maior resistência à interação com líquidos. O PLA, por ser biodegradável, pode sofrer deterioração em contato com substâncias líquidas, especialmente as de caráter alcalino, o que inviabiliza seu uso nesse contexto.

As impressoras utilizadas — conforme descrito nos materiais, Capítulo 4 — apresentam velocidades de impressão distintas. As peças mais simples foram produzidas na impressora Cliever Educacional, com velocidade média de 120 mm/s, temperatura de extrusão de 195 °C e preenchimento de 30%. Já a segunda impressora, utilizada principalmente para peças com roscas e detalhes mais precisos, operou a uma velocidade reduzida de 75 mm/s, temperatura de 185 °C e preenchimento de 100%, visando maior fidelidade dimensional.

A confecção de todas as peças totalizou aproximadamente 65 horas de impressão, com consumo de 1,238 kg de filamento, resultando em um custo estimado de R\$ 126,80, conforme cálculo realizado pelo próprio software de fatiamento da impressora Cliever.

Ressalta-se que, na etapa de prototipação, houve descarte de elementos que foram impressos fora de padrão. Sempre que a montagem experimental apresentou falhas foi retomado o processo de ajustes no *desing* para posterior prototipação e nova verificação de qualidade.

3.4 Montagem e automação

A fim de possibilitar a montagem do sensor, as peças impressas foram projetadas para se encaixar por pressão, visando à facilidade de montagem. Essas peças possuíam ressalto quadrados que, ao serem pressionados, promoviam a fixação adequada. Após a impressão, as peças apresentaram rebarbas e arestas que necessitaram de acabamento. Para o polimento dessas superfícies, utilizou-se a ferramenta Dremel em baixa rotação, uma precaução necessária para evitar que o aquecimento por atrito derretesse o plástico.

Nas partes que não eram fixadas por pressão — como o suporte dos componentes ópticos e a estrutura fixa — foram realizados testes de aderência com diferentes tipos de adesivos: resina epóxi, cola acrílica, cola branca e cola de isopor. Após os testes e o período de cura, observou-se que apenas a resina epóxi apresentou aderência satisfatória, sendo, portanto, o material escolhido para essa aplicação.

Para a fixação dos componentes eletrônicos, como o Arduino e os motores de passo, optou-se pela utilização de fita dupla face. Essa escolha baseou-se na necessidade de permitir eventuais realocações dos componentes durante os testes, o que não seria possível com o uso de adesivos permanentes, pois comprometeria as placas de circuito e inviabilizaria seu reaproveitamento.

Os componentes eletrônicos foram fixados na parte superior da estrutura fixa, com o intuito de promover a compactação do sensor, além de favorecer a proteção e o ocultamento dos circuitos. Para permitir a passagem dos cabos de alimentação e dos dutos da bomba, foi necessária a realização de furos na estrutura, os quais também foram feitos com o auxílio da ferramenta Dremel.

Para realizar a movimentação do sensor, foram definidos alguns critérios, como a variação angular entre 35°–55° e 55°–75°. Com essa limitação como ponto de partida, foram estudados diferentes métodos de automação do movimento, tanto por meio de chips dedicados quanto com a utilização de Arduino e componentes complementares.

Durante a busca por chips dedicados, observou-se uma dificuldade na aquisição de modelos que atendessem aos requisitos de movimentação desejados. Diante dessa limitação, a automação por meio do Arduino mostrou-se a alternativa mais prática e financeiramente viável.

A automação foi implementada utilizando uma placa Arduino UNO, a qual atua como unidade de controle do sistema. Por meio de um algoritmo embarcado, o Arduino é responsável por comandar os motores de passo, promovendo o movimento das partes móveis do sensor. Para a programação da placa, utilizou-se o software Arduino IDE, que permite a adição de bibliotecas e a implementação do código no microcontrolador. A biblioteca empregada para o controle dos motores de passo foi a “Stepper.h”, responsável por realizar a interface entre o Arduino, o driver e os motores de passo. Cumpre destacar que a movimentação somente ocorre se o driver estiver corretamente conectado ao motor e a biblioteca estiver devidamente incluída no algoritmo.

O Arduino oferece alimentação externa de 5V ou 3,3V. Como o sensor não requer componentes que operem com tensões superiores a 5V, não foi necessária a implementação de reguladores de tensão adicionais. A conexão entre os drivers e os demais componentes eletrônicos é realizada através do mapeamento dos pinos conectores dos drivers aos pinos digitais do Arduino. Cada pino possui uma numeração específica, a qual é definida no algoritmo de controle.

Os elementos fotodetectores, diodo laser e a câmera possuem fontes de alimentação distintas. O diodo laser é alimentado diretamente por uma fonte de corrente contínua, a qual possui botões de ajuste de tensão, permitindo a variação da intensidade luminosa conforme necessário. Durante os experimentos, a tensão aplicada ao diodo foi variada entre 2 V e 3 V. Após a análise das respostas ópticas obtidas, definiu-se a tensão de 2,7 V como valor padrão para a condução dos ensaios, por apresentar melhor desempenho na excitação dos plasmons.

A câmera, por sua vez, é alimentada por meio de um cabo USB. Ressalta-se que essa alimentação via USB é essencial, pois a captura das imagens ocorre exclusivamente com a câmera conectada ao computador e operando por meio de um software específico fornecido pelo fabricante do dispositivo.

3.5 Experimentos

Para possibilitar a caracterização e obtenção das curvas RPS, desenvolveu-se um algoritmo no software MATLAB.

O algoritmo responsável pela interpretação dos dados é capaz de processar tanto vídeos quanto imagens estáticas. No caso dos vídeos, o algoritmo opera com resolução de 720×512 pixels, gravados a 20 quadros por segundo. Cada quadro é lido sequencialmente, convertido para escala de cinza, normalizado quanto aos valores de intensidade dos pixels e, por fim, utilizado para a plotagem do gráfico correspondente.

Quando são utilizadas imagens estáticas, o algoritmo segue uma rotina alternativa de processamento. Nesse caso, ele armazena o valor de refletividade presente na imagem e o ângulo de incidência informado pelo usuário. Após o término da inserção das imagens, o algoritmo gera o gráfico correspondente às medições. O fluxograma apresentado na Figura 10 ilustra o funcionamento geral do algoritmo.

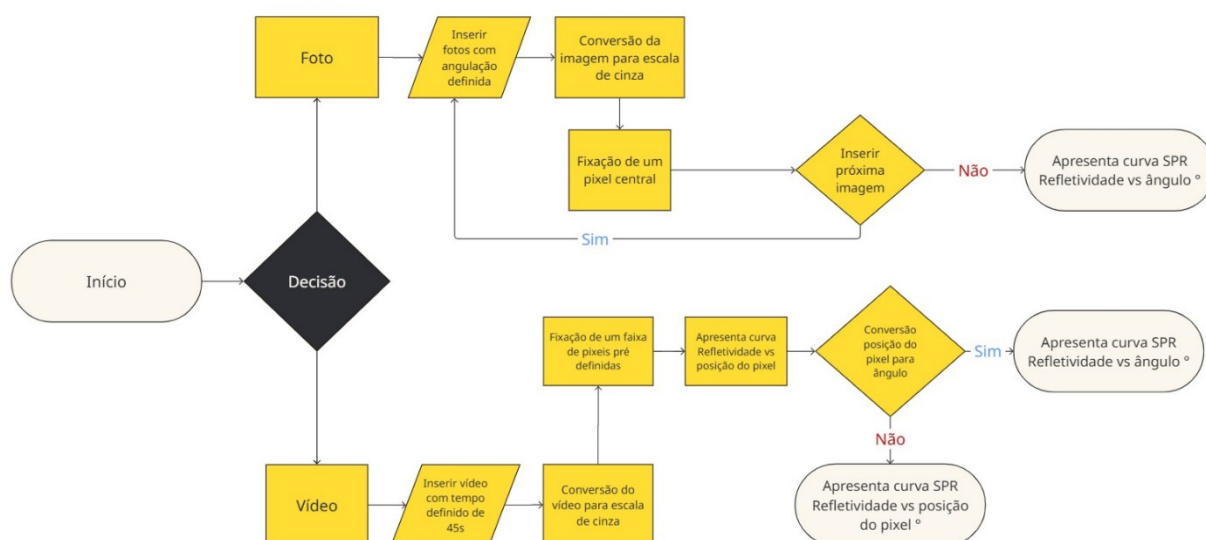


Figura 10 - Fluxograma para o algoritmo de interpretação de vídeo ou foto para elaboração de curvas RPS.

Com o algoritmo funcional, iniciou-se a fase de experimentos e medições, que categorizou-se por alguns requisitos determinados e cumpridos ao caminhar de todas as análises. Primeiro, foi escolhido o fluido de análise; na pesquisa, foram analisados ar, água, fumaça ou solução de 5 ml de NaClO diluída em 20 ml de água destilada. Na segunda etapa deve-se inserir o fluido a ser analisado no sensor, atentando-se ao módulo da célula de fluido adequada. Terceiro registra-se essa medição por meio de captura de vídeos e fotos como auxílio do fotodetector instalado no sensor. Por fim, insere-se esses vídeos e fotos no algoritmo desenvolvido para a análise da morfologia da curva.

Logo, os resultados esperados após as medições foram vídeos e imagens, para inserção no algoritmo afim da obtenção das curvas RPS. Assim como os dados de FWHM, assimetria, energia, Cl e Cr, que caracterizam a morfologia da curva.

Com o método experimental definido pode-se detalhar abaixo o passo a passo realizado para a obtenção dos resultados esperados.

- **Teste da câmera via *software*:** inicialmente, ativa-se a câmera afim de verificar o posicionamento e assegurar que as imagens estão sendo capturadas adequadamente.
- **Calibragem do S²Lg:** nessa etapa, iniciou-se a movimentação do sensor e a injeção de ar na célula de fluido. Esse procedimento, tem duração de aproximadamente 30 segundos, e tem como objetivo a limpeza dos dutos e a prevenção de travamentos no motor de passo.
- **Captura dos vídeos com ar:** O experimento inicia-se com a injeção de ar pelos dutos, seguida pelo acionamento da movimentação do sensor via comandos no Arduino. Utilizando o software da câmera, a resolução dos vídeos foi configurada para 720×512 pixels, com tempo de captura de 45 segundos. As aquisições foram realizadas dentro do intervalo angular de 35° a 55° .
- **Captura dos vídeos com fumaça:** Com o intuito de verificar alterações no ponto de ressonância, foram realizadas capturas com fumaça. O processo de inserção do gás e de captura foi rigorosamente o mesmo utilizado para o ar, garantindo o padrão de respostas.
- **Captura dos vídeos com água:** Para a análise de líquidos, é necessário acoplar o segundo módulo da célula de fluido, o qual possui um *oring* de vedação, a fim de evitar vazamentos e garantir que o líquido permaneça restrito à zona de análise. A angulação de varredura é alterada no Arduino para o intervalo de 55° a 75° . A injeção do líquido é realizada com a bomba Kamoer, com uma vazão de $10 \mu\text{L}$. As configurações de captura (resolução, taxa de quadros e tempo) foram mantidas. Deve-se destacar que, previamente à injeção de água, foi realizada uma medição com ar no mesmo intervalo angular, a qual foi posteriormente utilizada como referência para normalização das curvas.
- **Captura dos vídeos com hipoclorito de sódio (NaOCl):** por se tratar de uma substância corrosiva e que interage com a água, foi realizado o processo de calibração

novamente, para se certificar que a concentração de hipoclorito não fosse alterada. Foi preparada uma solução de 20 ml de água destilada com 5 ml de NaOCl. Essa solução foi inserida na célula de fluido com auxílio da bomba e o processo de captura repetiu-se.

- **Captura das fotos com água:** as imagens utilizadas na construção dos gráficos auxiliares foram obtidas utilizando uma nova função inserida no algoritmo do Arduino. Essa função foi associada a um botão, que ao ser pressionado incrementava o ângulo em 1° . Por exemplo, se o ângulo atual fosse de 55° , ao pressionar o botão o sistema avançava para 56° , facilitando a captura angular passo a passo. Assim como nos vídeos, uma captura com ar também foi realizada nesse intervalo angular (55° a 75°) para normalização dos dados.
- **Captura das fotos com ar:** O processo de captura das fotos para o ar é rigorosamente igual ao da água, variando apenas os ângulos de ataque, que é de 35° a 55° e o fluido inserido na célula.
- **Inserção dos vídeos e fotos no MatLab:** Os experimentos foram repetidos cerca de 20 vezes para cada prisma e substância testada. Todos os arquivos (vídeos e fotos) foram organizados e nomeados conforme o tipo de prisma utilizado, data, horário e temperatura da realização do experimento. Esses arquivos foram inseridos no algoritmo MATLAB, que, após a análise, permitiu selecionar as curvas e os parâmetros morfológicos. Ao final de cada análise, os dados foram exportados também em arquivos .txt, permitindo sua utilização em outros softwares.

Capítulo 4

MATERIAIS

Este capítulo detalha os materiais utilizados na construção do sensor S2LG. A seção apresenta tanto os componentes comerciais que foram adquiridos quanto os materiais empregados na fabricação das peças de ligação e acoplamento.

4.1 Prismas e Cassete

Para permitir o acoplamento da luz e a varredura angular do feixe, foram selecionados dois tipos de prisma, ambos fabricados em vidro BK7: um trapezoidal (prisma de Dove) e um semicilíndrico, ilustrados nas Figuras 11a e 11b, respectivamente. A escolha por esses modelos foi justificada por serem os mais utilizados em arranjos de sensoriamento por RPS, o que facilita a eventual reposição.

Outro componente fundamental utilizado foi o "cassete", um substrato de vidro com dimensões de 0,5 mm × 13 mm × 7 mm (Altura × Comprimento × Largura), coberto por uma fina camada de ouro de 50 nm.

A Figura 11 apresenta fotografias dos componentes utilizados: o prisma semicilíndrico de vidro BK7 (37 mm × 77 mm × 12 mm); o prisma de Dove de vidro BK7 (32 mm × 85 mm × 42 mm × 12 mm); e a estrutura plástica do cassete que suporta a lâmina de ouro (3 mm × 111 mm × 35 mm).

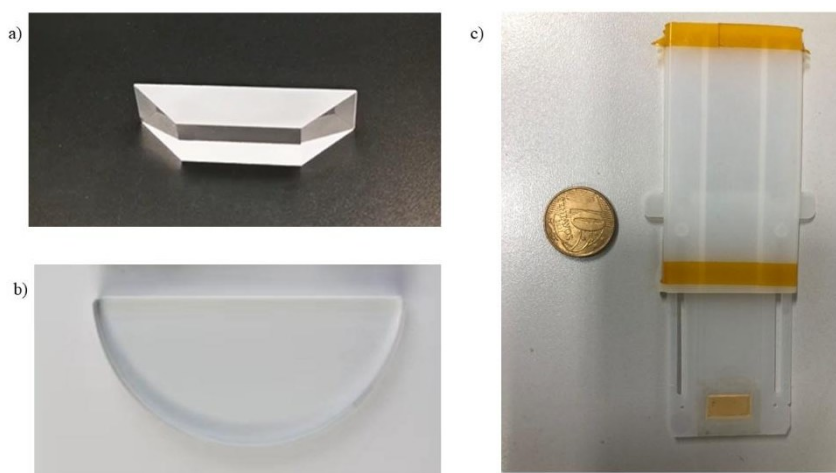


Figura 11– a) Prisma Dove de vidro BK7. b) Prisma semicilíndrico de vidro BK7. c) Lâmina de ouro no cassete comercial.

O cassete que contém a lâmina de ouro é um componente comercial fabricado por diversas empresas de biossensores. Geralmente, ele consiste em um substrato de vidro com o filme metálico, protegido por um invólucro plástico de dimensões padronizadas entre os diferentes fabricantes. Em virtude dessa padronização, optou-se por utilizar o elemento em seu formato original, sem modificações — como o destacamento do vidro —, o que permitiu sua reutilização no sensor após os devidos processos de limpeza.

Neste trabalho, foram utilizados cassetes comercializados pela empresa SensiQ (SensiQ Technologies, Inc., 2023), os quais foram obtidos por meio de doações da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ-RJ).

4.2 Fluido de acoplamento

O uso de um fluido de acoplamento óptico é necessário para garantir que a luz percorra o caminho determinado através do prisma e do cassete. A presença de bolhas de ar entre esses elementos afetaria a análise, devido às significativas diferenças de índice de refração que elas introduziriam no arranjo multicamadas.

Para solucionar essa problemática, o fluido de acoplamento deve possuir um índice de refração próximo ao do prisma e ao da lâmina de vidro do cassete, ambos de vidro BK7 (com $n \approx 1,52$). O material que melhor atende a esse requisito, além de possuir baixo custo e ampla disponibilidade, é a glicerina, com um índice de refração de aproximadamente **1,47**. Embora existam fluidos comerciais específicos para aplicações RPS (fabricados pela ThorLabs, por exemplo), a glicerina mostrou-se satisfatória para os fins deste trabalho, não sendo necessária a aquisição de um produto especializado.

Nos experimentos, foram testados dois tipos de glicerina à temperatura ambiente (26°C): a destilada, com viscosidade de 0,950 Pa·s, e a bidestilada, com 0,289 Pa·s. Ambas foram avaliadas quanto ao seu desempenho na adesão entre o prisma e o cassete. Após os testes, optou-se pela utilização da glicerina destilada. Essa escolha deveu-se ao fato de que a menor viscosidade da glicerina bidestilada facilitava seu escoamento, o que comprometia a estabilidade do sistema, levando ao desalinhamento do cassete e à formação de bolhas de ar.

Portanto, a maior viscosidade da glicerina destilada favoreceu uma adesão estável e uniforme, reduzindo a ocorrência de bolhas e garantindo o alinhamento necessário para o funcionamento do sensor.

4.3 Bomba de alimentação

Para a alimentação de líquidos no sensor, foi escolhida a bomba peristáltica de precisão KCM-ODM. Trata-se de uma bomba dosadora que opera com um motor deslizante de 6 roletes, compatível com tensões de 12 V e 24 V, e que pode ser controlada via Arduino para ajustar a vazão de acordo com a necessidade.

A escolha desse tipo de bomba foi justificada pelo regime de escoamento requerido para a alimentação de sensores RPS, cuja vazão deve ser controlada, tipicamente, na faixa de 10 a 1000 $\mu\text{L}/\text{min}$. Essa precisão só pode ser obtida por meio de microbombas. A Figura 12 apresenta uma fotografia da bomba utilizada.

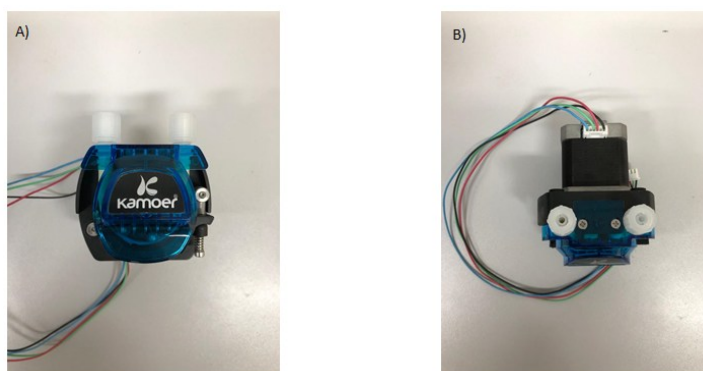


Figura 12 - Bomba peristáltica kamoer. a) vista frontal. b) vista superior.

Para compor o conjunto de alimentação de fluidos, foram utilizados dutos capilares de silicone, equipados com conectores em suas extremidades para direcionar o fluxo. A escolha pelo silicone deveu-se à sua alta flexibilidade e mobilidade. A montagem foi feita por encaixe, com o auxílio de vedantes à base de silicone para prevenir vazamentos.

Considerando que o dimensionamento dos tubos afeta diretamente a vazão, a seleção dos dutos foi baseada em cálculos de escoamento. O resultado foi a escolha de dutos com 2 mm de diâmetro externo e 0,2 mm de diâmetro interno. A Figura 13 exibe um dos dutos utilizados, já com o conector acoplado.



Figura 13 - Duto de silicone com conector compatível com a bomba de alimentação.

4.4 Impressoras 3D

Para a fabricação das peças, foram utilizadas duas impressoras 3D: uma Cliever Educacional e uma Creality Ender 3 (ambas exibidas na Figura 14). A utilização de dois equipamentos foi necessária devido às suas diferentes resoluções de impressão. A impressora Cliever Educacional era adequada para peças maiores e com menos detalhes, mas apresentava limitações na fabricação de componentes complexos, como parafusos e roscas. Dessa forma, para a impressão dos componentes que exigiam maior precisão dimensional, utilizou-se a Ender 3.

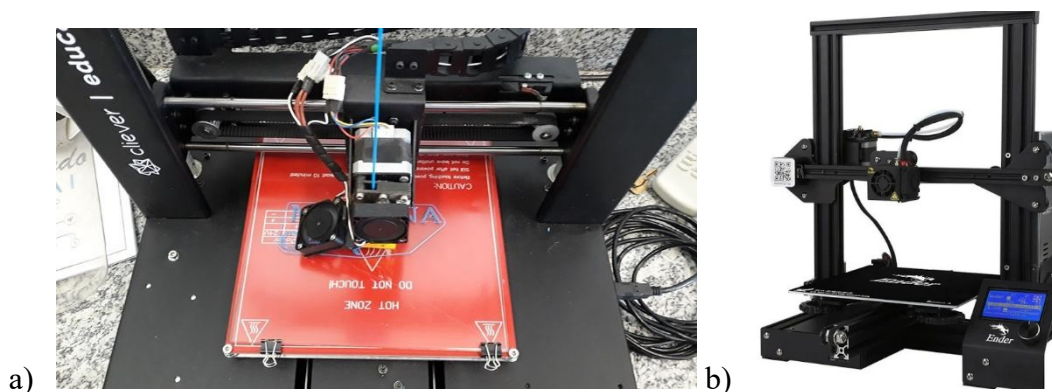


Figura 14 - Impressoras 3d. a) Impressora cliever educacional b) Impressora Creality ender 3.

Em conjunto com as impressoras, foram utilizados um adesivo líquido fixador para mesa (DynaLabs), dois rolos de filamento PLA preto com 1,75 mm de diâmetro (Velvet) e 100 gramas de filamento PETG branco (Elegoo)



Figura 15 - a) Rolo de filamento PLA b) Rolo de filamento PetG c) Spray adesivo para mesa de impressora 3d.
 Fonte: Adaptado de <[Imagens do Google](#)> (2024)

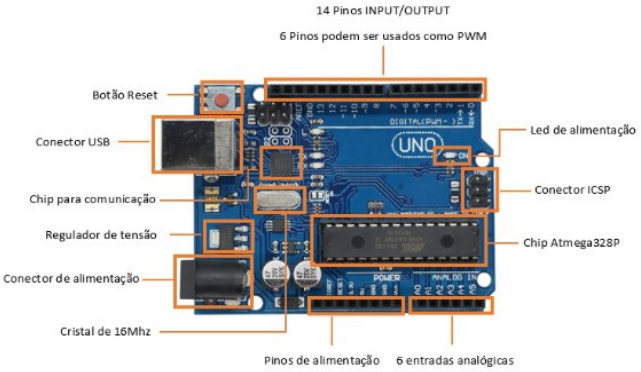
4.5 Elementos eletrônicos

Para o controle dos elementos rotacionais do sensor, foi utilizado um microcontrolador Arduino UNO. A escolha por essa plataforma deveu-se a uma combinação de fatores, como seu baixo custo, praticidade, ampla comunidade de suporte, facilidade de programação e versatilidade.

Uma vantagem adicional do Arduino é seu ecossistema de acessórios de fácil integração, denominados *shields*, que permitem expandir suas funcionalidades. A Tabela 3 apresenta um resumo das principais especificações técnicas da placa utilizada.

Tabela 3 - Resumo das principais Especificações do Arduino UNO.

Tensão de operação	5V
Tensão de entrada recomendada	7V a 12V
Pinos entrada/saída	14
Pinos analógicos	6
Corrente DC para cada pino entrada/saída	40 mA
Corrente DC para pino de 3,3V	50 mA
Memória flash	32 kb
SRAM	2 kb
EEPROM	1 kb

Velocidade CLK	16 MHZ
Dimensões. Destaque para os seus principais componentes e localizações	 14 Pinos INPUT/OUTPUT 6 Pinos podem ser usados como PWM Botão Reset Conector USB Chip para comunicação Regulador de tensão Conector de alimentação Cristal de 16Mhz Pinos de alimentação 6 entradas analógicas Chip Atmega328P Conector ICSP Led de alimentação

O movimento angular do sensor S2LG (a rotação da fonte de luz) foi realizado por meio de dois motores de passo. A principal característica desse tipo de motor, e a razão de sua escolha para este projeto, é a capacidade de girar em incrementos angulares discretos e precisos (passos) a cada pulso elétrico, permitindo um controle posicional exato. Sua estrutura interna consiste em um rotor de ímã permanente com múltiplos polos e um estator formado por enrolamentos eletromagnéticos (bobinas).

Para o projeto, adotou-se o modelo 28BYJ-48. Essa decisão foi justificada após se observar que este motor apresentava torque suficiente para a movimentação das hastes, com a vantagem de gerar baixa vibração. Adicionalmente, por serem componentes compactos e leves, seu uso contribuiu para a portabilidade do sensor. As principais especificações do motor estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações do motor de passo 28BJY-48.

Modelo	28BJY-48
Driver	ULN2003
Tensão de operação	5V
Número de fase	4
Diâmetro do eixo	5 mm
Ângulo de passo	5,625°
Resistencia	5 ohms
Torque	34,3 mN.m

Peso	80 g
Dimensão/fotografia	32mm x 35mm x 12mm 

Para realizar o controle dos motores de passo via Arduino, foram utilizados dois *drivers* modelo ULN2003, um componente comumente empregado com este tipo de motor. A placa do *driver*, demonstrada na Figura 16, possuía quatro pinos de entrada (conectados ao Arduino), um conector de cinco pinos de saída (conectado ao motor) e dois pinos para a alimentação externa (5 V ou 12 V).



Figura 16 - Driver ULN2003.

4.6 Elementos ópticos

O arranjo óptico do sensor, configurado para o modo AIM, utilizou um feixe de luz monocromático com comprimento de onda fixo em 670 nm, proveniente de um diodo laser (Thorlabs). Para o condicionamento do feixe, foram empregados uma lente cilíndrica plano-convexa (Thorlabs, LJ1960L1) e um polarizador. Este último foi essencial para garantir que a luz incidente na interface fosse p-polarizada (modo TM), uma condição necessária para a excitação dos plásmons de superfície (PS).

Para a detecção do feixe refletido, empregou-se uma câmera CMOS (Thorlabs, DDC1645C), com resolução de 1280×1024 pixels e profundidade de cor de 10 bits. Cada pixel da câmera possuía um tamanho de $3,60 \mu\text{m}$. A Figura 17 exhibe os componentes ópticos utilizados no arranjo.

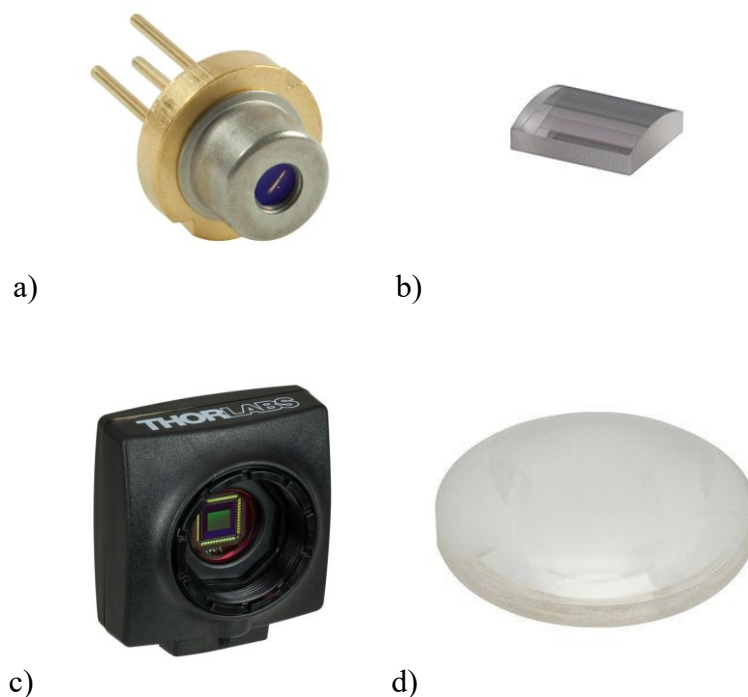


Figura 17 - Elementos ópticos a) Diodo laser b) Lente cilíndrica plano-convexa c) Câmera CMOS DDC1645C d) Lente colimadora. Fonte: Adaptado <[ThorLabs](#)> (2023).

4.7 Software de interpretação das capturas e elaboração das curvas.

Para a interpretação das imagens e vídeos capturados pelo sensor S2LG, foi desenvolvido um algoritmo específico no software MATLAB, por meio de sua versão para desenvolvimento de pesquisas. O algoritmo foi projetado para processar tanto arquivos de vídeo quanto imagens estáticas, de acordo com a seleção do usuário.

Para o seu desenvolvimento, foram utilizadas exclusivamente bibliotecas nativas do MATLAB, como VideoReader e imread, o que evitou a necessidade de softwares externos para o pré-processamento dos dados.

Resumo do capítulo 4

Neste capítulo, foram apresentados os componentes necessários para a construção do sensor S²LG, com o detalhamento de suas características, condições de uso, peças reutilizadas e princípios de funcionamento. Foram destacados, individualmente, os conjuntos que compunham o sistema, como os elementos ópticos e eletrônicos, a bomba de alimentação, os componentes de controle e o software para a elaboração do algoritmo responsável por gerar as curvas RPS.

Capítulo 5

PROJETO DO SENSOR

Com o objetivo de facilitar a montagem e garantir o desempenho do sistema, a estrutura mecânica do sensor foi dividida em três partes principais: a estrutura fixa, o case externo e as peças mecânicas móveis. Cada uma dessas partes desempenhava funções específicas e foi projetada com base em critérios de estabilidade, precisão e proteção dos componentes.

A estrutura fixa tinha como principal função acomodar os elementos do sensor, proporcionando rigidez e minimizando vibrações. Essa rigidez estrutural assegurava que os componentes se deslocassem apenas para as posições previamente designadas, um fator crucial para a precisão das análises. Nela, foram instalados o prisma de vidro BK7, os motores de passo, o Arduino, a bomba de alimentação e demais elementos essenciais. Para garantir o alinhamento necessário à excitação da RPS, foram estabelecidos parâmetros geométricos e distâncias adequadas, conforme discutido no capítulo anterior. As dimensões da estrutura fixa foram de 150 mm × 120 mm × 150 mm (altura × largura × profundidade).

O case externo tinha como finalidade proteger o sensor de interferências externas, especialmente de variações na iluminação, que poderiam comprometer a análise óptica. Sua estrutura era equipada com uma porta de acesso para manutenção, um botão liga/desliga, uma entrada para inserção e remoção da lâmina de ouro, uma maçaneta lateral para abertura e passagens isoladas para os cabos de alimentação. As dimensões do case eram da ordem de 250 mm × 250 mm × 250 mm, o que permitia o acondicionamento completo do sensor com fácil acesso aos seus elementos internos.

As peças mecânicas móveis foram projetadas para a fixação de componentes que requeriam alto grau de precisão, como a fonte de luz, as lentes, o prisma e o fotodetector. Dentre essas peças, destacavam-se dois braços (ou hastes), responsáveis pelo alinhamento dos elementos ópticos. Em um dos braços, foram fixados o diodo laser e duas lentes colimadoras, enquanto no outro foi instalado o fotodetector. A câmera acoplada ao fotodetector era conectada a um computador via cabo USB, permitindo que as imagens capturadas fossem processadas pelo algoritmo específico.

Adicionalmente, para a melhor acomodação dos motores de passo, foi desenvolvido um suporte dedicado. Considerando a sensibilidade da movimentação no processo de excitação RPS, esse suporte tinha como objetivo principal garantir a estabilidade e o alinhamento entre

os motores e os braços móveis. O desalinhamento entre a fonte de luz e a câmera representa um dos principais fatores que podem comprometer a precisão das medições em sensores baseados na excitação de plásmons de superfície.

5.1 design proposto

A modelagem 3D e o desenho técnico de todos os componentes do sensor foram realizados no software Fusion 360. As Figuras de 18 a 22, extraídas desse modelo, ilustram o projeto final do dispositivo e a disposição de seus componentes após a montagem.

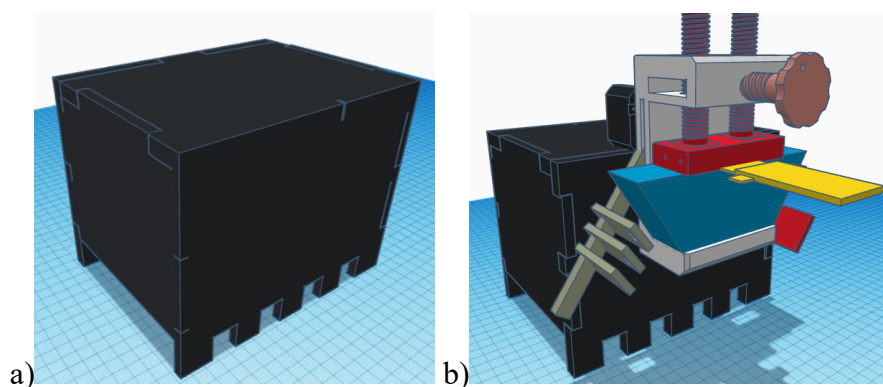


Figura 18 - a) Estrutura-fixa que irá suportar os elementos do sensor RPS. b) Estrutura-fixa com peças-mecânicas-móveis acoplada.

A Figura 19 apresenta uma vista explodida com todos os componentes enumerados que compõem a estrutura interna do sensor. Dentre eles, destacam-se três elementos considerados essenciais para o funcionamento do sistema: a estrutura fixa (12), que serve como base de sustentação para todos os outros componentes; a parte intercambiável da célula de fluxo para testes com substâncias aquosas (3); e o corpo principal da célula de fluxo (4).

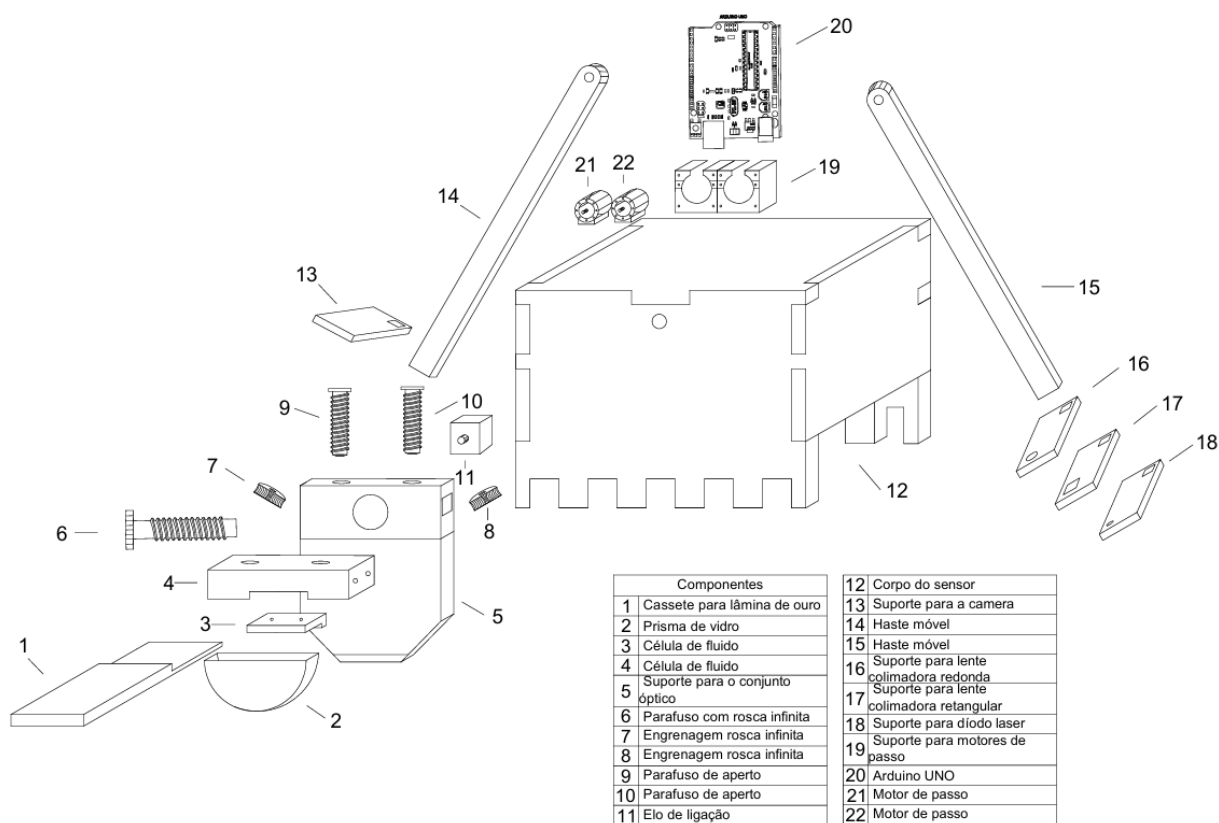


Figura 19 - Estrutura proposta para o S²LG em 2 dimensões para facilitação da localização dos componentes enumerada para detalhar todos os elementos presentes.

Os elementos (14) e (15) correspondem às partes móveis do sensor (hastes ou braços), que são articuladas pelos motores de passo (21) e (22) sob o controle do Arduino (20). Esse arranjo permitiu a variação angular do sistema em duas faixas distintas: de 35° a 55° e de 55° a 75°. A definição dessas faixas de operação foi adotada para permitir a análise tanto de substâncias gasosas (primeira faixa) quanto líquidas (segunda faixa) sem a necessidade de alterar a configuração física do sensor (13). Uma visualização detalhada de todos os componentes pode ser encontrada no Apêndice A.

Adicionalmente, a escolha por um projeto com braços móveis visou garantir maior portabilidade ao sensor, favorecendo sua compactação e evitando o uso de arranjos com geometrias mais complexas.

Outra característica implementada foi tornar o sensor multiprismático, ou seja, capaz de operar com prismas de diferentes formatos, como os modelos semicilíndrico e de Dove, que são os mais usuais. A montagem final do sensor é ilustrada na Figura 20.

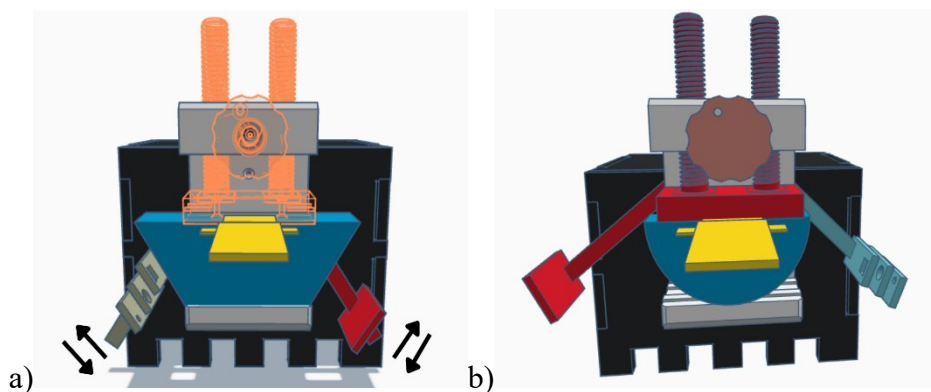


Figura 20 - S²LG sensor, montagem experimental com elementos 3d para uma visualização completa. a) Com prisma *dove* b) Com prisma semicilíndrico.

A Figura 21 apresenta o projeto da célula de fluxo em sua configuração para a análise de gases. A célula foi projetada com um design modular, característica que facilita a rápida troca do fluido a ser analisado.

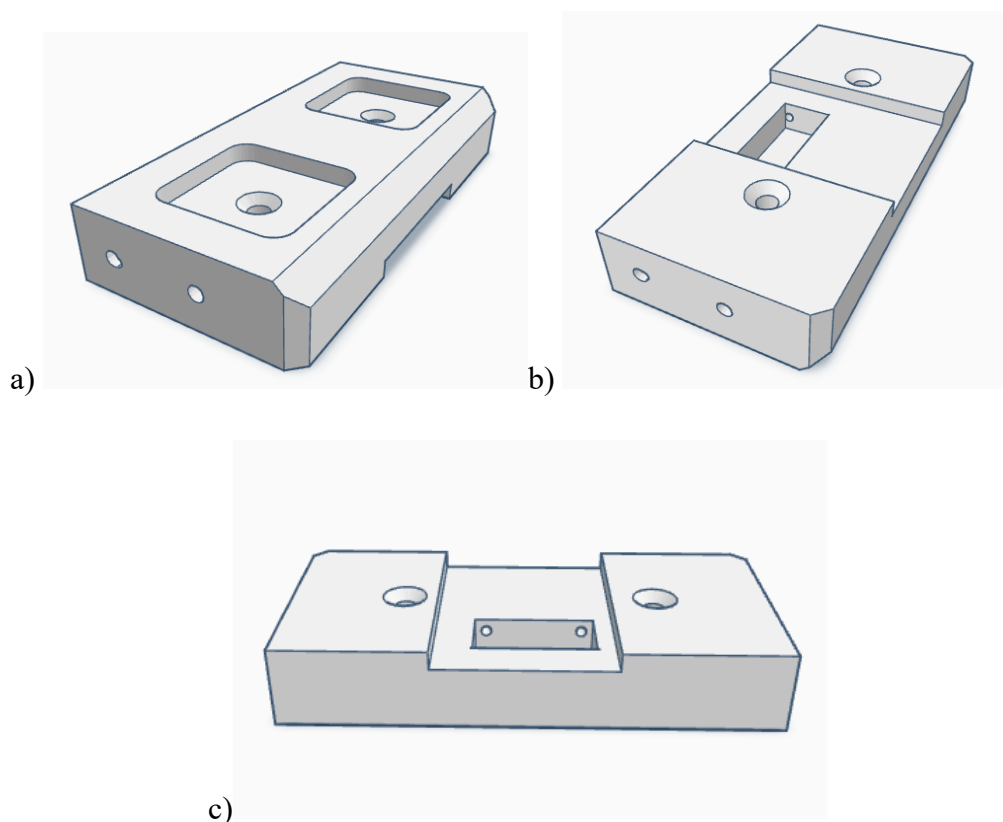


Figura 21 - Célula de fluido. a) Vista da parte superior b) Vista da parte inferior c) Vista da parte frontal.

A Figura 22 exibe a célula de fluxo em sua configuração para a análise de líquidos, a qual requer o acoplamento de um segundo módulo para seu funcionamento.

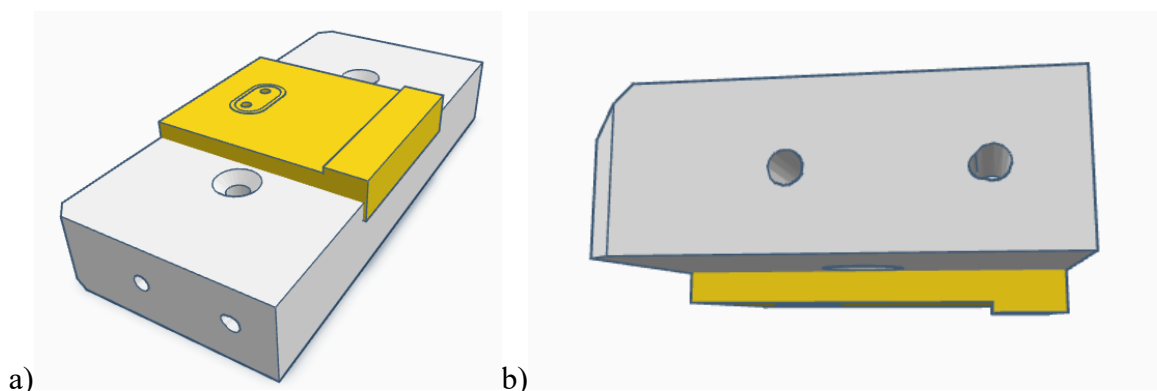


Figura 22 - Célula de fluido com modulo para líquidos acoplados a) Vista superior da célula de fluxo com modulo para líquidos. b) Vista lateral da célula destacando os furos para acoplamento dos dutos para inserção de fluidos.

Nota-se ainda, através das Figuras 22 e 23 que os módulos possuem ressaltos para conter o avanço do cassete, que garantem o acoplamento correto, confinando a lâmina de ouro ao prisma sem risco de desalinhamento.

A célula de fluido merece maior destaque no design, pois ela é responsável por garantir o perfeito funcionamento do sensor. Se o fluido não estiver sendo entregue corretamente ou o aperto oferecido entre a estrutura multicamadas não estiver correto, é impossível obter-se os requisitos necessários para a excitação da curva.

Ressalta-se, por fim, que a simulação de protótipos em 3D é uma etapa fundamental no desenvolvimento de equipamentos. Adotou-se essa abordagem a fim de reduzir custos com retrabalho, otimizar o uso de materiais e garantir maior assertividade nas etapas subsequentes de impressão e montagem.

Capítulo 6

RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos ao longo da pesquisa, abrangendo as seguintes etapas: a fabricação das peças impressas, a montagem do sistema, a automação e a elaboração das curvas RPS. Ao final, são expostos os parâmetros extraídos das curvas experimentais, os quais são comparados com dados de trabalhos correlatos da literatura.

6.1 Protótipo do sensor proposto

Finalizadas as etapas de simulação e projeto, as peças do sensor foram confeccionadas por meio de impressão 3D, seguindo os parâmetros descritos no Capítulo 3. Nas figuras a seguir, os componentes são apresentados sem cotas para facilitar a visualização geral do conjunto. Para uma análise mais detalhada das peças, recomenda-se consultar o Apêndice A.

Peças mecânicas móveis

As hastes, elemento de destaque no sensor, foram confeccionadas de modo que se movessem livremente, sem que uma entrasse em contato com a outra durante a operação. Os suportes para as lentes e para o diodo a laser foram projetados com posições ajustáveis, podendo deslizar ao longo do braço, ver Figura 23. Esse design flexível permitiu testar diferentes distâncias e configurações ópticas a fim de otimizar a excitação dos plásmons de superfície (PS).

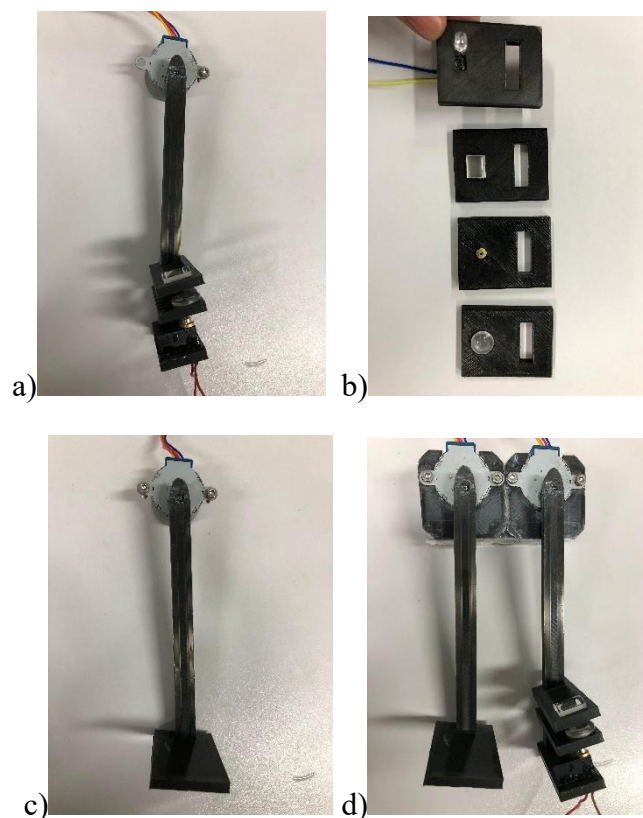


Figura 23 - Hastes móveis. a) Haste com diodo laser e lentes colimadoras. b) Suportes para elementos ópticos. c) Haste com suporte para a câmera. d) hastes em conjunto com motores de passo.

Ao final do processo de impressão, as peças passaram por acabamento, com retirada de rebarbas e lixamento, para garantir o perfeito acoplamento. As hastes foram fixadas aos motores de passo com o auxílio de resina epóxi. Após os testes, verificou-se um desempenho satisfatório, sem a ocorrência de movimentos indesejados causados por folgas ou vibrações excessivas.

Suporte para arranjo multicamadas

O suporte para prismas variados, apresentado na Figura 24, foi projetado de modo a garantir um aperto significativo entre os componentes, assegurando uma fixação precisa para que os elementos não se movessem. Vale ressaltar que esse aperto também era benéfico para a célula de fluxo, evitando que ocorressem vazamentos indesejados que prejudicassem as análises.

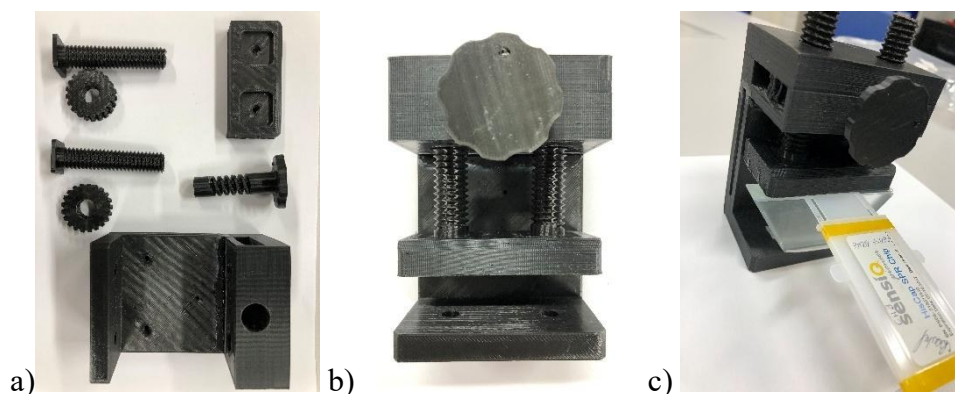


Figura 24 - Suporte multiprismatico. a) Suporte desmontado apresentando os parafusos com rosca infinita, roscas e modulo 1 da célula de fluido. b) Suporte montado. c) Suporte montado com prisma *dove* e cassete.

Suporte para motores de passo 28BYJ-48

Para garantir maior estabilidade aos motores de passo, responsáveis pela movimentação das hastes, foi confeccionado um suporte específico, ilustrado na Figura 25. A função desse suporte era manter os motores firmemente posicionados, evitando deslizamentos e movimentos em direções indesejadas.

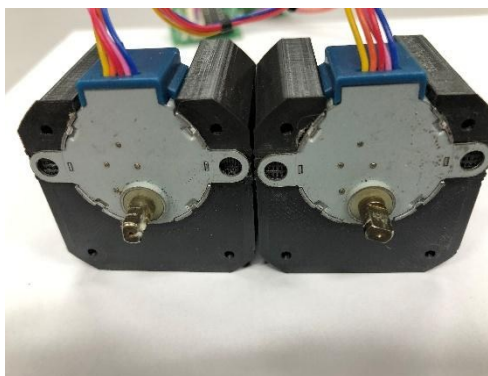


Figura 25 - Suporte para motores de passo.

Estrutura—fixa

A estrutura fixa foi projetada em cinco partes encaixáveis que, ao serem unidas, formavam um retângulo responsável por suportar todos os demais elementos do sensor. A Figura 26 demonstra em detalhe os encaixes utilizados nesta estrutura.

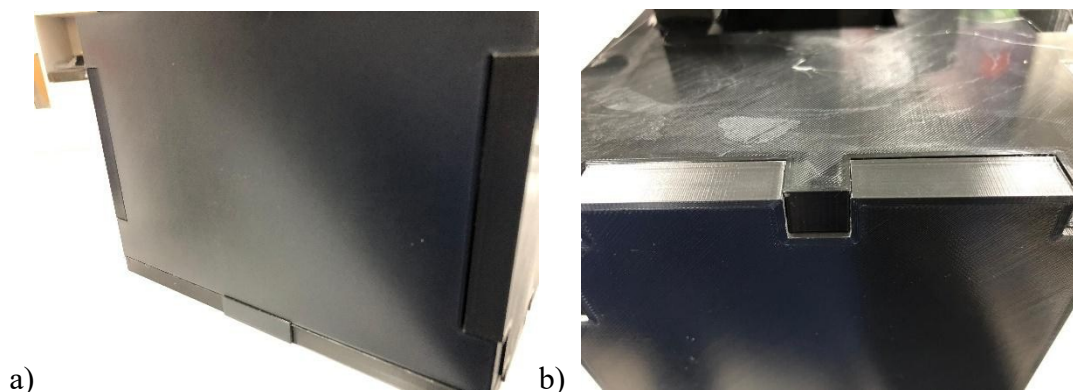


Figura 26 - Estrutura fixa com destaque para os encaixes de pressão.

As dimensões finais do conjunto montado eram de 150 mm de altura, 200 mm de largura e 130 mm de comprimento.

Célula de fluidos

A Figura 27 exibe a célula de fluxo em sua versão finalizada. Conforme mencionado, o segundo módulo deste componente foi impresso em PETG, devido à sua maior resistência à interação com líquidos.

As dimensões das partes eram as seguintes: o primeiro módulo apresentava 75 mm × 10 mm × 35 mm (Largura × Altura × Comprimento), e o segundo possuía 20 mm × 5 mm × 35 mm, contendo um ressalto de 1 mm de altura em seus 10 mm iniciais.

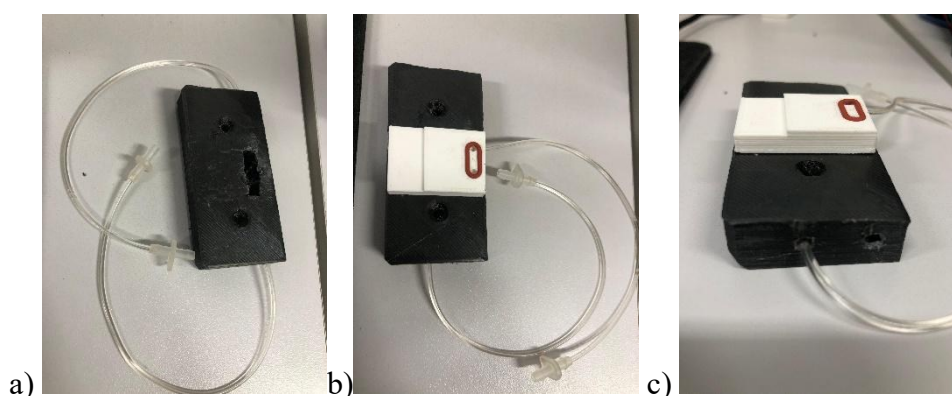


Figura 27 - Célula de fluido impressa em 3D. a) Célula de fluido na configuração para gases. b) Célula de fluido na configuração para líquidos. C) vista lateral para visualização da inserção dos dutos na célula.

Após a impressão da célula de fluxo, foram efetuados testes de vazamento. Em uma montagem inicial sem anel de vedação (*O-ring*), foi verificado um pequeno escape de fluido. Como o projeto já previa essa contingência, um *O-ring* foi então fabricado e instalado na célula. Com o anel de vedação em uso, novos testes foram realizados sob as condições de vazão ideais

para a aplicação — na ordem de microlitros por minuto. Nessas condições, a célula de fluxo apresentou vedação adequada, o que garantiu a viabilidade dos experimentos subsequentes.

Montagem final com elementos eletrônicos, ópticos e óptico-eletrônicos

A Figura 28 exibe a montagem final do sensor, com todas as partes devidamente acopladas. Destaca-se que o resultado físico obtido é fiel ao protótipo virtual desenvolvido no software 3D, com todos os componentes fixados conforme o projeto original.

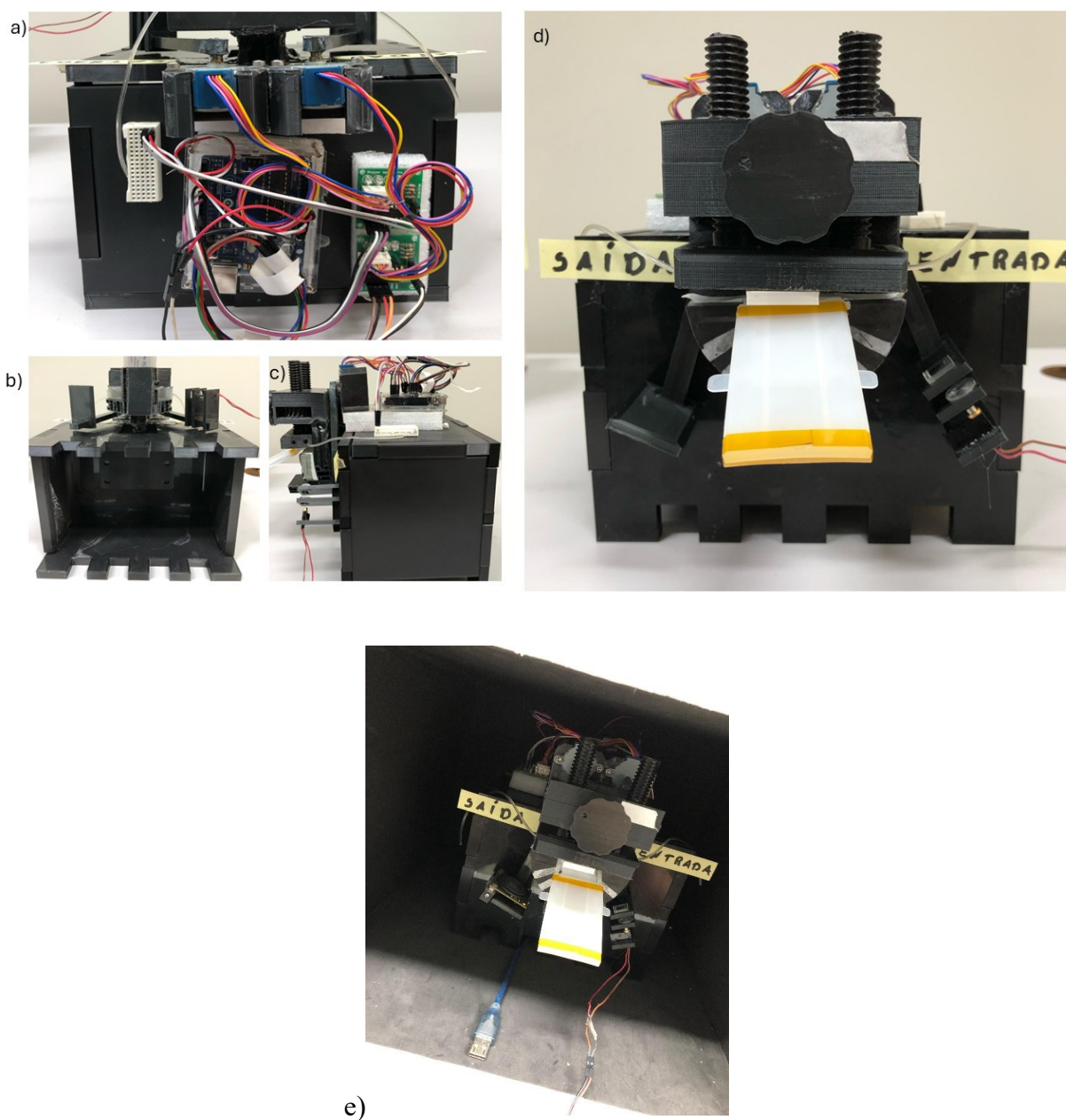


Figura 28 - a) vista da parte superior do sensor. b) vista interior. c) vista lateral. d) vista frontal. e) vista frontal dentro do case de proteção e transporte.

Por fim, o sensor completo possui dimensões gerais de 230 x 180 x 150 mm (Largura x Altura x Profundidade).

6.2 Experimento com soluções aquosas.

Após a montagem, iniciaram-se os experimentos. A câmera foi acoplada ao sensor e todo o conjunto foi confinado no case externo para isolamento da luz ambiente. O procedimento começou com os seguintes passos: primeiro, testou-se o funcionamento da câmera; em seguida, calibrou-se o sensor; e, por fim, realizou-se uma captura de referência com ar, a fim de estabelecer uma linha de base ($n \approx 1,00$) para as medições.

Em uma fase de otimização, foram realizados testes preliminares variando parâmetros como o ângulo da luz, as distâncias entre os componentes ópticos e a velocidade de movimento. Para padronizar os ensaios subsequentes, foi definida uma duração de análise de 40 segundos, com a distância entre o prisma e a câmera fixada em 25 mm e a distância entre o conjunto fonte de luz/lentes e o prisma em 10 mm.

odos os experimentos foram conduzidos utilizando tanto o prisma semicilíndrico quanto o de Dove, e aplicou-se um filtro de média móvel para a suavização das curvas resultantes. As aquisições de dados foram salvas nos formatos de vídeo (.AVI) e imagem (.PNG). As curvas RPS obtidas são apresentadas nas figuras a seguir.

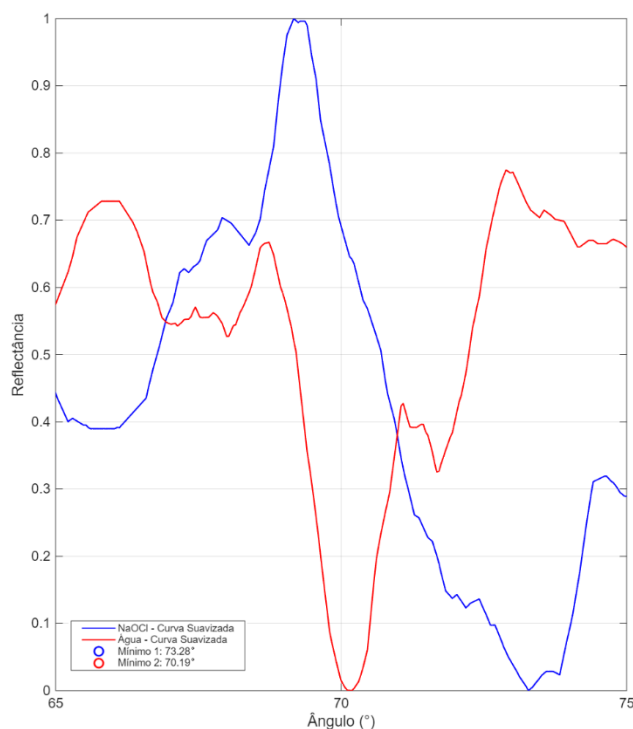


Figura 29 - Curva RPS para água e NaOCl com o prisma semicilíndrico tendo como ponto de destaque sua ressonância para água em 70,19° e NaOCl em 73,28°.

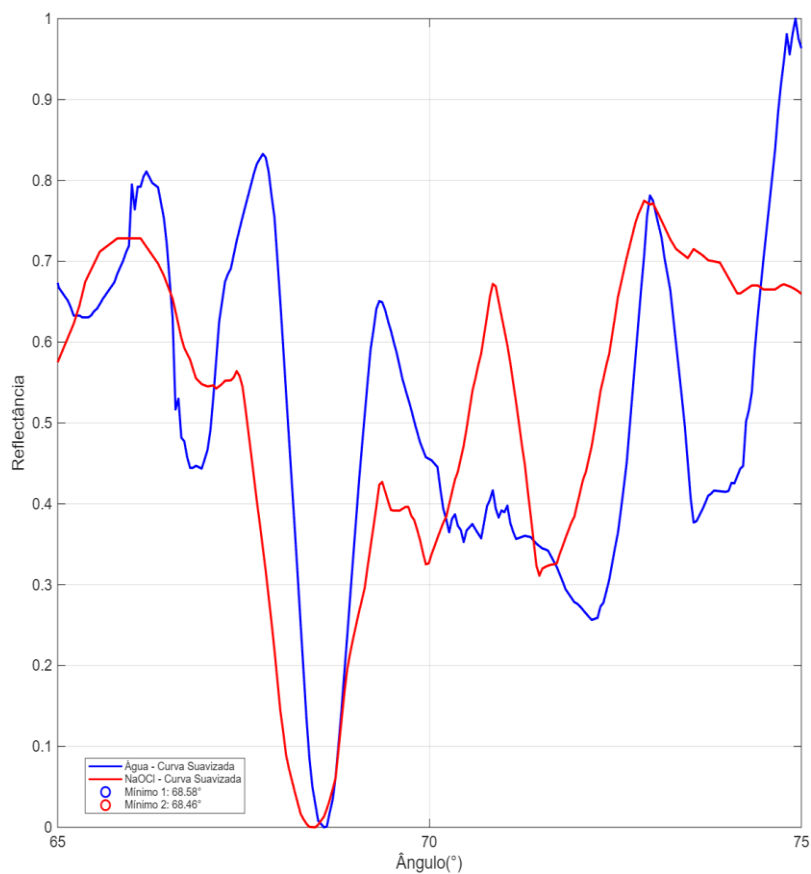


Figura 30 - Curva RPS para água e NaOCl com o prisma *dove*, tendo como ponto de destaque sua ressonância para água em 68,58° e NaOCl em 68,46°.

A Figura 31 exibe a curva RPS obtida para a água por meio do método de análise de fotografias. Para a elaboração dessa curva, utilizou-se o algoritmo em sua segunda configuração, um método desenvolvido com o intuito principal de permitir a visualização da imagem exata correspondente ao momento de ressonância.

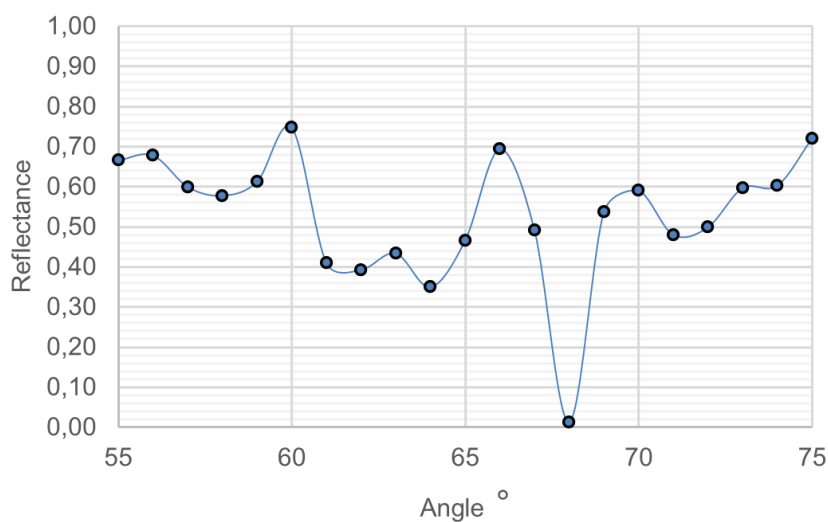


Figura 31 - Curva RPS para água valendo-se da análise fotográfica, ao qual foram registradas 20 fotos para elaboração do gráfico, em destaque o ponto de ressonância em 68°.

De forma complementar à análise, a Figura 32 exibe a imagem capturada no momento exato da ressonância para a água. Esse fenômeno é caracterizado visualmente pela formação da tradicional faixa escura no feixe de luz refletido.



Figura 32 - Fotografia do momento de ressonância para água, em destaque a linha mais “escura” característica do fenômeno RPS.

6.3 Experimentos com soluções gasosas

O experimento com gases seguiu a mesma metodologia aplicada aos líquidos, consistindo nas etapas de calibração, aquisição de dados (vídeos e fotos) e processamento das capturas pelo algoritmo.

Os gases analisados foram o ar atmosférico (utilizado como referência) e a fumaça, esta última gerada pela carbonização de madeira de pinus. O objetivo foi verificar se o sensor seria capaz de detectar a presença de uma mistura gasosa distinta do ar. A fumaça é um aerossol complexo, composto por partículas de fuligem e diversos gases, incluindo dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO), que alteram o índice de refração do meio.

Devido à ausência de uma bomba específica para gases, o confinamento foi realizado preenchendo-se completamente o case externo com o gás a ser analisado. No caso da fumaça, aguardou-se o momento em que a nuvem de gás encobriu todo o interior do sensor. As curvas RPS resultantes para o ar e a fumaça são apresentadas nas figuras a seguir.

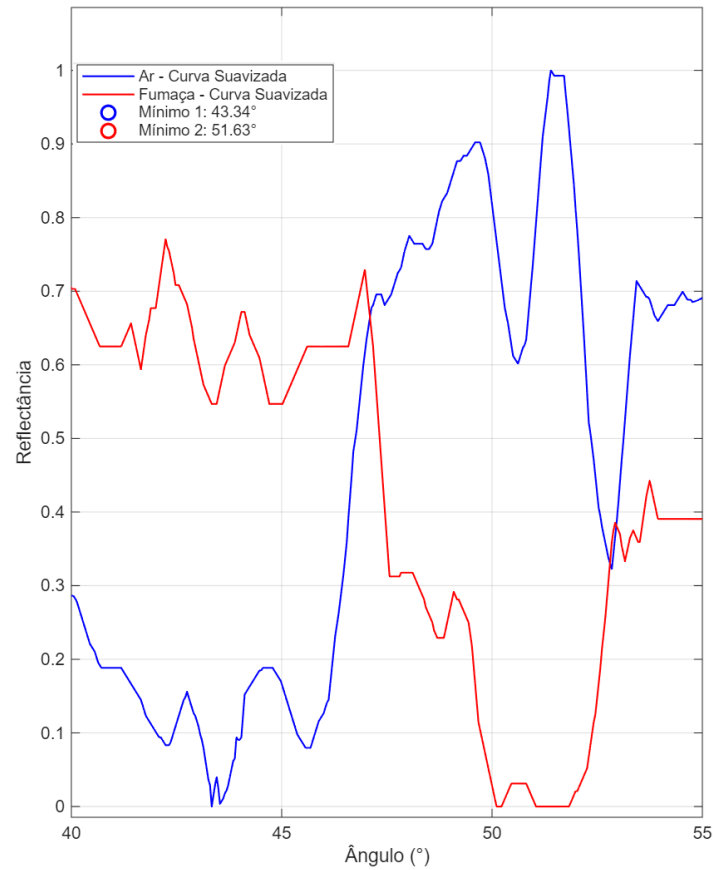


Figura 33 - Curva RPS para o ar e fumaça com prisma semicilíndrico com ponto de ressonância para o ar em 43,34° e para fumaça em 51,63°.

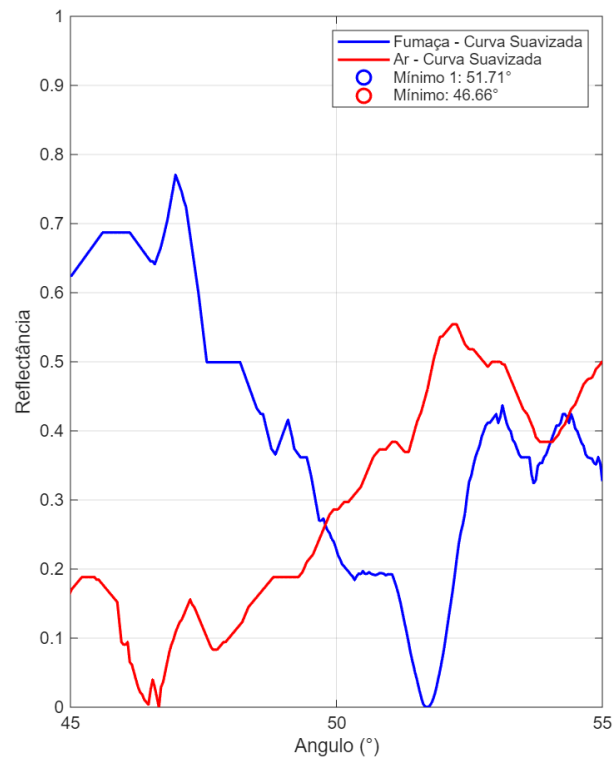


Figura 34 - Curva RPS para o ar e fumaça com prisma *dove* com ponto de ressonância em 46,66° para o ar e 51,71° para a fumaça.

Na Figura 35, pode-se visualizar a curva RPS para o ar com o método de análise por fotografias.

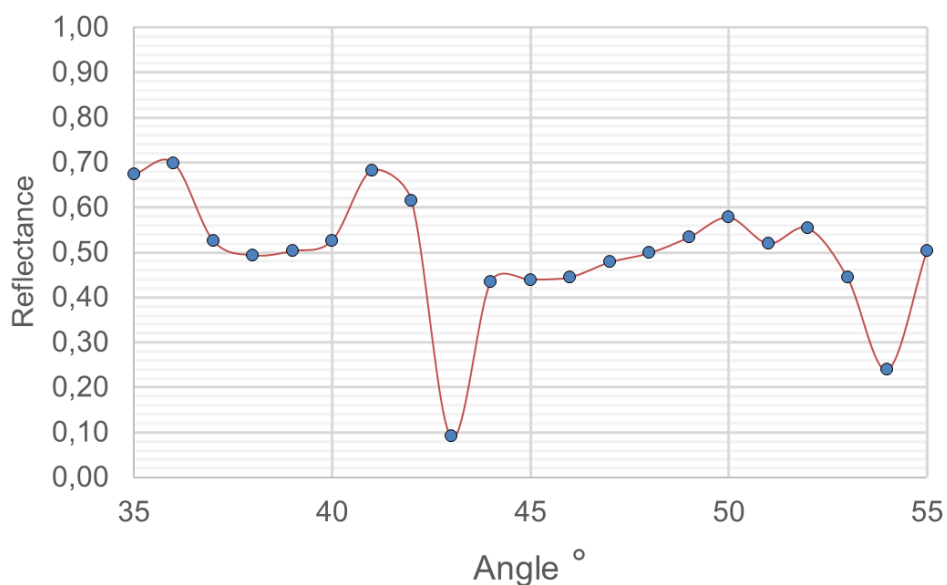


Figura 35 - Curva RPS para o ar valendo-se da análise fotográfica, ao qual foram registradas 20 fotos para elaboração do gráfico, em destaque o ponto de ressonância em 43°.

De forma análoga à medição da água, a Figura 36 exibe a imagem capturada no ponto de ressonância para o ar. O fenômeno é novamente evidenciado pela característica faixa escura que se destaca na fotografia.

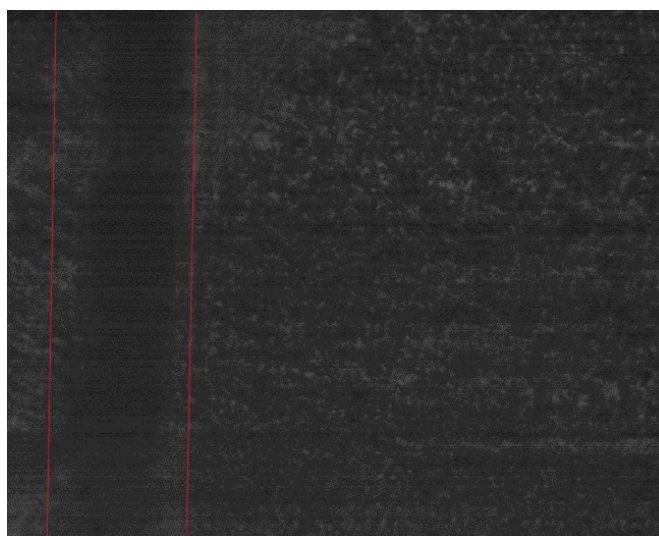


Figura 36 - Fotografia do momento de ressonância para o ar, em destaque a linha mais “escura” característica do fenômeno RPS.

Após a plotagem das curvas RPS experimentais, os principais parâmetros de cada curva foram extraídos e compilados nas Tabelas 5 e 6. Essas tabelas destacam os valores do ângulo de ressonância (θ_r), da Largura à Meia Altura (FWHM), das curvaturas à esquerda (CL) e à direita (CR), além da assimetria da curva e da energia sob a ressonância. O FWHM, em particular, é um indicador da nitidez do fenômeno e foi calculado medindo-se a largura da curva na metade de sua profundidade máxima.

Tabela 5 – Ressonância medida nas curvas geradas para a água, solução de NaOCl, ar e fumaça com prisma semicilíndrico.

Semicilíndrico	Água	NaOCl	Ar	Fumaça
θ_r	70,19°	73,28°	43,34°	51,63°
FWHM	3,68	1,37	8,81	6,32
CL	70,73	69,48	37,97	47,32
CR	74,41	70,85	46,78	53,64
Assimetria	0,13	9,02	1,18	2,50
Energia	26,26	28,01	2,78	2,50

Tabela 6 - Ressonância medida nas curvas geradas para a água, solução de NaOCl, ar e fumaça com prisma *dove*.

Dove	Água	NaOCl	Ar	Fumaça
θ_r	68,58°	68,46°	46,66°	51,71°
FWHM	0,98	1,6	8,57	5,13
CL	68,11	67,68	43,25	47,99
CR	69,09	69,28	51,82	53,12
Assimetria	2,41	0,28	0,40	2,50
Energia	67,55	25,89	8,31	1,27

Na análise comparativa entre os prismas semicilíndrico e de Dove, observou-se que ambos apresentaram respostas distintas quanto aos parâmetros de ressonância. Tais características influenciam diretamente a performance do sensor RPS.

No caso do prisma semicilíndrico, o ângulo de ressonância (θ_r) mostrou-se mais elevado para a água e para o NaOCl, atingindo 70,19° e 73,28°, respectivamente. Em meios com menor índice de refração, como o ar, o valor reduziu significativamente para 43,34°. Essa variação mais ampla indicava que o prisma semicilíndrico possuía maior sensibilidade global às mudanças do meio, tornando-o particularmente eficiente na detecção de pequenas variações. Já o prisma de Dove apresentou valores de ângulo mais uniformes entre a água (68,58°) e o NaOCl (68,46°), o que denotava um comportamento mais estável, embora com menor dispersão.

A Largura à Meia Altura (FWHM) foi outro parâmetro determinante. O prisma semicilíndrico apresentou curvas mais largas, especialmente para o ar (8,81) e a fumaça (6,32), o que sugeria uma resposta de ressonância mais difusa. Por outro lado, o prisma de Dove obteve valores mais reduzidos, com destaque para a água (0,98) e o NaOCl (1,6), evidenciando uma maior definição do vale de ressonância e, consequentemente, maior precisão na identificação do seu ponto mínimo. Essa diferença também se refletiu nos limites da curva (CL e CR), que no semicilíndrico foram mais espaçados, enquanto no de Dove mostraram-se mais próximos, corroborando a nitidez de suas curvas.

No que se refere à simetria, o prisma semicilíndrico apresentou um comportamento mais irregular. Na solução de NaOCl, por exemplo, a assimetria atingiu 9,02, contrastando com o valor de apenas 0,28 obtido com o prisma de Dove para o mesmo meio. Essa discrepância indicava que o semicilíndrico podia sofrer maiores distorções na forma da curva, enquanto o de Dove garantia maior regularidade.

A energia de ressonância também reforçou essa diferenciação. O prisma Dove apresentou valores mais expressivos em líquidos (ex: 67,55 para a água), enquanto o semicilíndrico permaneceu em uma faixa mais moderada (26,26 para a água). Isso sugeria que o prisma de Dove era capaz de gerar sinais de maior intensidade em ambientes líquidos, favorecendo aplicações que demandam forte contraste.

Dessa forma, pode-se afirmar que o prisma semicilíndrico se destaca pela maior sensibilidade a variações no índice de refração, revelando-se adequado para situações que visam captar pequenas mudanças no meio, ainda que com a limitação de apresentar curvas de ressonância mais largas e, por vezes, assimétricas. O prisma de Dove, por sua vez, mostrou-se superior na definição, simetria e intensidade das curvas, o que o torna mais indicado para medições que exigem maior estabilidade e precisão, sobretudo em meios líquidos. A escolha entre os dois, portanto, depende diretamente da aplicação: enquanto o semicilíndrico é mais eficiente para amplificar a sensibilidade, o de Dove garante maior robustez e precisão na resposta do sensor.

6.5 Teste vibracional

Com o objetivo de validar a simulação de vibrações, foram realizadas medições empíricas. O procedimento iniciou-se com o acoplamento de um acelerômetro MEMS triaxial (ADXL345) à estrutura do sensor S2LG, próximo ao eixo do motor de passo. Em seguida, os dados de aceleração foram capturados por meio de um sistema de aquisição baseado em

Arduino, com um ADC de 16 bits e taxa de amostragem de 2500 Hz, enquanto o motor 28BYJ-48 era acionado no modo de meio-passo. Os dados foram então processados com a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para se obterem os espectros de vibração, os quais foram finalmente correlacionados com os padrões previstos na simulação matemática.

A análise comparativa, cujos dados estão resumidos na Tabela 7, permitiu validar o modelo, confirmando que o motor 28BYJ-48, de fato, apresentava um deslocamento suave que minimizava as vibrações mecânicas.

Tabela 7 - Comparação entre vibrações medidas pelo acelerômetro.

Motor de Passo	Aceleração RMS - Eixo X (m/s^2)	Aceleração RMS - Eixo Y (m/s^2)	Aceleração RMS - Eixo Z (m/s^2)	Simulação Predita (m/s^2)	Observações
28BYJ-48	0.12 ± 0.02	0.15 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.11	Menor vibração, ideal para RPS

Na Figura 37, verifica-se a aceleração vibracional ocorrida durante a análise de água, e na Figura 38, o espectro da frequência de aceleração (FTT).

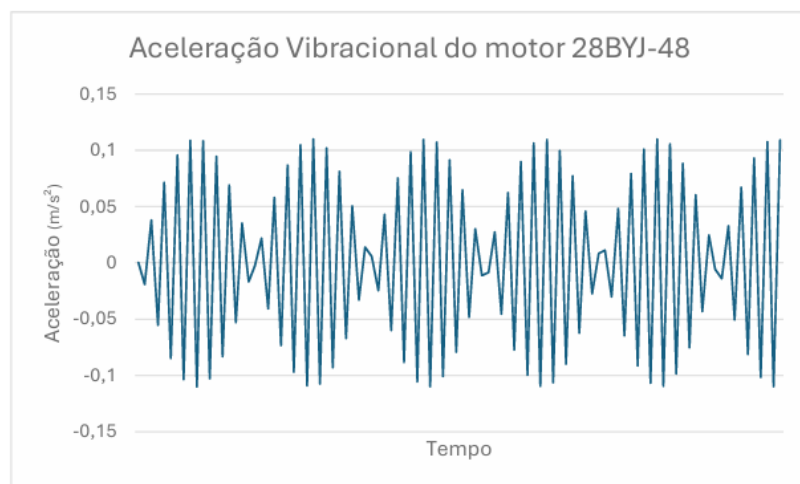


Figura 37 – Aceleração vibracional ao longo de um ciclo experimental de medições para água.

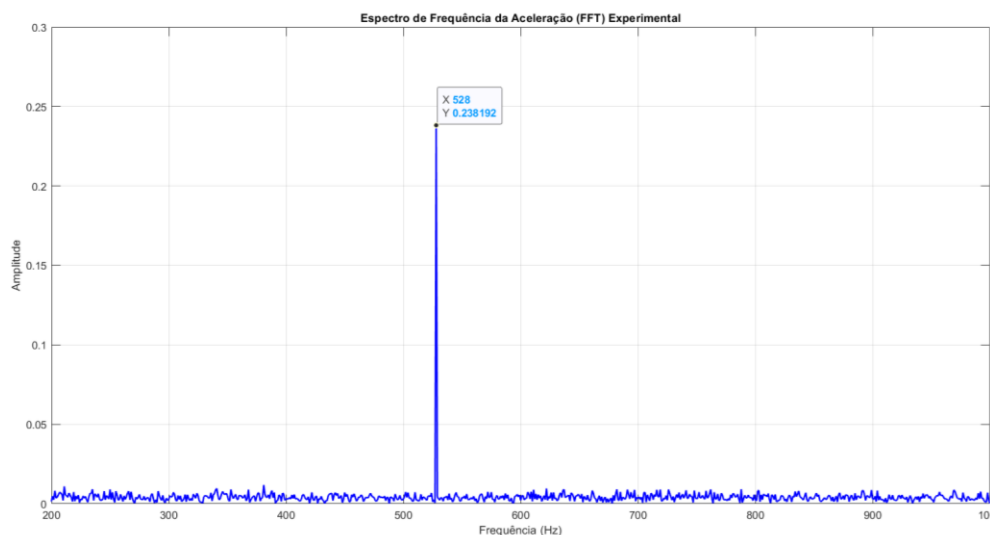


Figura 38 - Medição do Espectro de frequência experimental (FFT) com água.

A análise comparativa revela que o espectro de frequência experimental (FFT) é condizente com o resultado simulado. Esse fato válido a hipótese de que, mesmo em operação real, as vibrações do sistema se apresentaram de forma previsível e com uma resposta predominantemente monofrequencial. O resultado elucida, portanto, que a excitação periódica gerada pelos passos do motor é a principal fonte da vibração observada, conforme havia sido previsto no modelo de simulação.

Resumo do capítulo 5

Ao longo deste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos na pesquisa. Inicialmente, foi detalhado o protótipo do sensor, cuja estrutura foi fabricada em impressora 3D com filamentos de PLA. Deu-se destaque à sua célula de fluxo modular, ressaltando que o módulo destinado a líquidos foi impresso em PETG para evitar possíveis danos ao componente. Em seguida, foram apresentadas as curvas RPS e analisados seus padrões morfológicos. Por fim, a seção abordou os resultados vibracionais do sensor.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou o desenvolvimento de um novo sensor RPS com arquitetura rotacional, destinado à medição de líquidos e gases. A estrutura foi confeccionada por meio de impressão 3D com materiais poliméricos (PLA e PETG) e, entre suas características distintivas, destacam-se a portabilidade e a capacidade de operar com diferentes geometrias prismáticas (semicilíndrica ou trapezoidal).

Na configuração final, o sensor operou em uma faixa angular entre 35° e 75° . O principal destaque recaiu sobre a célula de fluxo, que foi responsável tanto pelo confinamento das substâncias analisadas quanto pelo acoplamento do arranjo multicamadas, que totalizou seis camadas. Adicionalmente, o sensor demonstrou a capacidade de gerar curvas RPS para quatro substâncias distintas: ar, água, fumaça (da queima de madeira de pinus) e uma solução de NaClO. A obtenção dessas curvas foi viabilizada pelo desenvolvimento de um algoritmo em MATLAB, capaz de interpretar as imagens e os vídeos capturados. As curvas experimentais apresentaram valores dentro da faixa esperada pela simulação, entre 40° e 55° para o ar e entre 65° e 75° para os líquidos.

A morfologia das curvas foi avaliada por meio das medições de FWHM, assimetria e energia. O parâmetro FWHM, que caracteriza a qualidade da ressonância, indicou um bom desempenho do sensor, pois os valores obtidos com o S2LG ficaram na faixa de 5 a 20, considerada adequada pela literatura.

Por fim, a estabilidade da movimentação do sensor foi assegurada por um estudo vibracional, o qual comprovou, através de análises de FFT, que a vibração presente no sistema era oriunda apenas do deslocamento dos passos do motor e que seu comportamento era harmônico e previsível.

Tendo alcançado todos os objetivos propostos, os quais se baseiam na concepção de um sensor RPS de fácil instrumentação e automação, com geometria bem definida e capaz de operar com diferentes fluidos, líquidos e gasosos, é possível dar maior enfoque à sua inovação.

A principal inovação do sensor S2LG reside em sua acessibilidade. Embora existam diversas configurações de sensores RPS, os modelos capazes de analisar múltiplos tipos de fluidos são, em sua maioria, restritos e de difícil acesso. Ao combinar o uso de um cassete

comercial padrão com a impressão 3D — uma tecnologia amplamente difundida e de fácil replicação —, este trabalho demonstra que a popularização e a disseminação de sensores RPS versáteis são perfeitamente viáveis.

A metodologia de produção do sensor demonstrou-se simples, eficiente e de baixo custo. O custo de fabricação do protótipo foi, um valor significativamente inferior ao de equipamentos comerciais. Esse fator, aliado às métricas de desempenho satisfatórias, indica que sua reprodução em maior escala é tanto técnica quanto economicamente viável. Em suma, a aplicabilidade do sensor foi comprovada por meio de testes empíricos com diferentes substâncias, os quais resultaram na obtenção de curvas de ressonância consistentes. Tais resultados validam a eficácia da metodologia de projeto, fabricação e análise proposta neste trabalho.

Os desafios enfrentados durante o desenvolvimento do projeto manifestaram-se em diversas etapas, desde a montagem e automação até a análise de dados. No que se refere à montagem, houve a necessidade de adequar a estrutura a componentes pré-existentes com geometrias definidas. Essa limitação impôs restrições ao projeto geral do equipamento e exigiu atenção especial às partes móveis, consideradas elementos cruciais para assegurar tanto a inovação quanto a aplicabilidade do sensor.

Na etapa de automação, o principal desafio esteve relacionado à escolha dos motores de passo, que deveriam apresentar movimentação suave, livre de travamentos ou vibrações, além de serem compatíveis com o Arduino. Outro ponto relevante foi o desenvolvimento do algoritmo de controle, que, devido ao uso de botões físicos e à alternância entre diferentes faixas de varredura, precisou ser projetado para sempre iniciar a movimentação a partir de um ponto fixo (35° ou 55°). Sem essa restrição, havia o risco de o sistema executar movimentos em faixas angulares indesejadas.

Na análise de dados, os maiores obstáculos surgiram durante a captura das imagens e a execução dos algoritmos. Por se tratar de um fenômeno óptico, diversos registros precisaram ser descartados em razão de interferências, como movimentações no sensor, excesso de luminosidade ambiente, instabilidade da base e, sobretudo, bolhas de ar geradas pela bomba durante a injeção de líquidos.

Os problemas relacionados aos algoritmos ocorreram, principalmente, devido ao grande volume de dados. Como os vídeos eram compostos por muitos quadros em alta resolução, o

software utilizado para análise e tratamento dos dados exigiu elevado uso da memória do computador, tornando-se necessário limpar a memória do sistema antes de cada nova análise. Durante os testes, foi verificado que a inserção sequencial de mais de três vídeos resultava em respostas inconsistentes. É importante destacar que todos os desafios mencionados foram devidamente corrigidos ou contornados, conforme apresentado ao longo do trabalho, garantindo o funcionamento satisfatório do sensor S²LG.

7.1 Trabalhos futuros

Ao final da dissertação, foram observados alguns pontos que podem ser destacados para estudos futuros. Sugere-se a integração de novos componentes de hardware para aumentar a autonomia e a capacidade de monitoramento do sensor, como bateria, display e sensores de posição, vibração, temperatura e umidade. Poderiam ser desenvolvidos também novos algoritmos para a calibração, o posicionamento e o movimento dos motores, assim como para o controle do laser diretamente pelo Arduino, além da implementação de novas estratégias de rotação com dois ou três estágios de movimento.

Outra melhoria seria o projeto de uma placa eletrônica dedicada para o controle dos motores de passo, com o objetivo de simplificar a montagem e mitigar possíveis erros de sincronização. O design do case externo poderia ser aperfeiçoado para maior praticidade no transporte, com a inserção de alças ou adaptações que confirmem uma funcionalidade semelhante à de uma maleta. Adicionalmente, a criação de um software dedicado com interface gráfica para a análise dos dados em tempo real permitiria o monitoramento contínuo do experimento, podendo integrar funcionalidades como a exibição da captura da câmera e a geração de sensogramas.

Por fim, uma melhoria significativa, seria a ampliação do número de substâncias analisadas, a fim de tornar a aplicação do sensor mais abrangente, e o acoplamento de uma bomba de gás específica à célula de fluxo, para superar uma das principais limitações observadas na análise de gases.

Apêndice A - Peças do sensor em visualização 3d

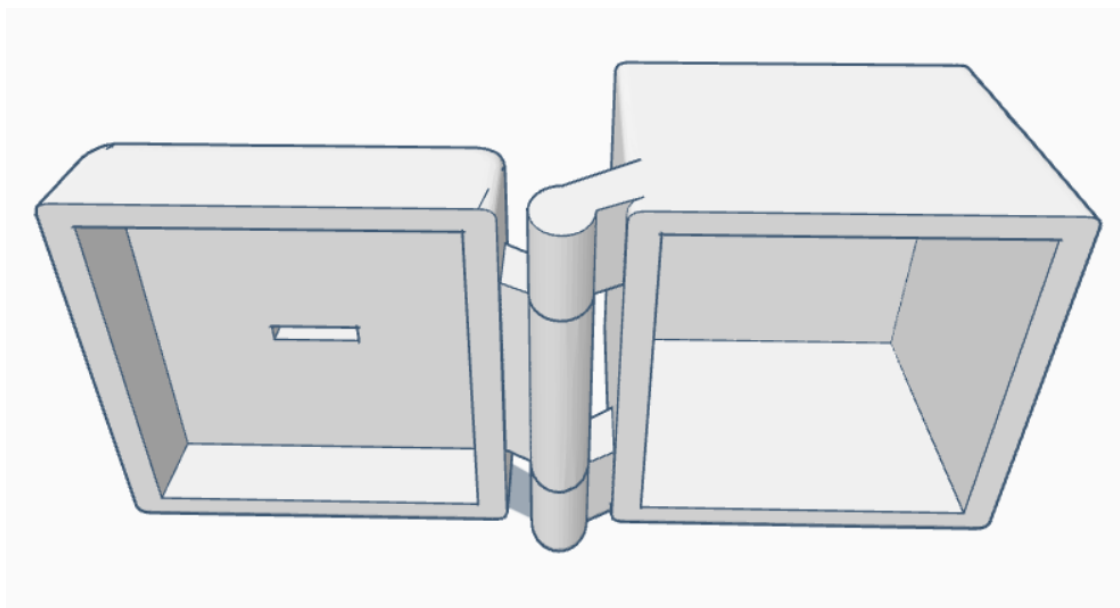


Figura A1 - Case externo.

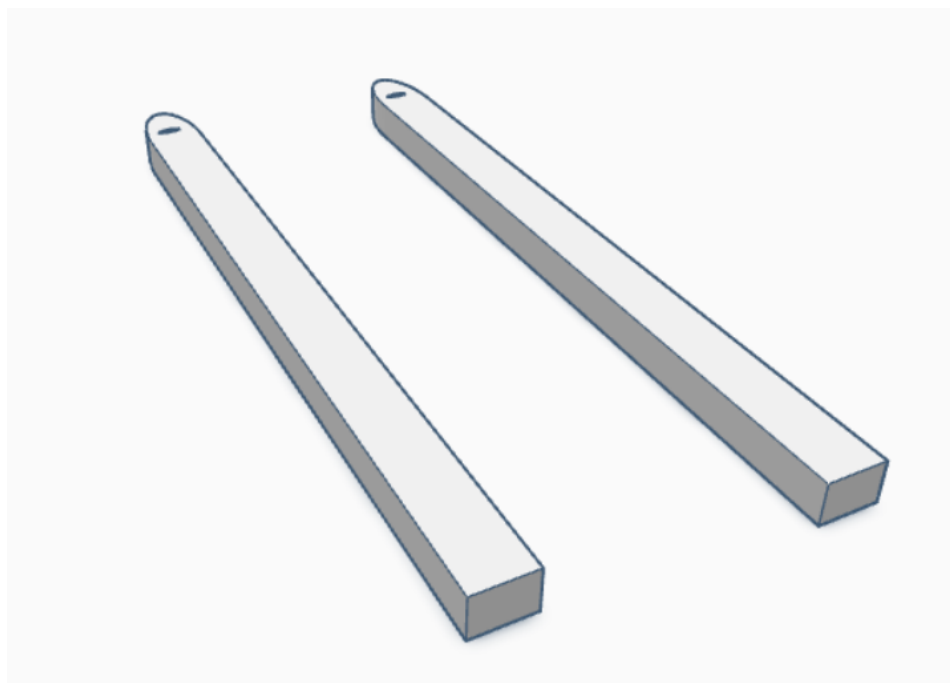


Figura A2 – Hastes moveis.

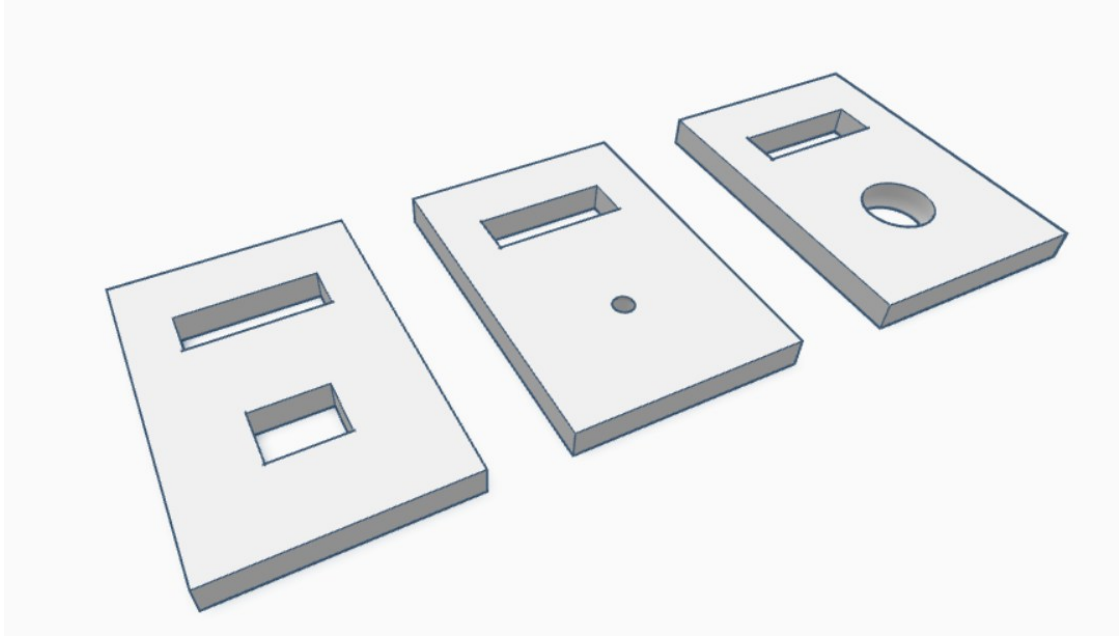


Figura A3 - Suporte para diodo e lentes.

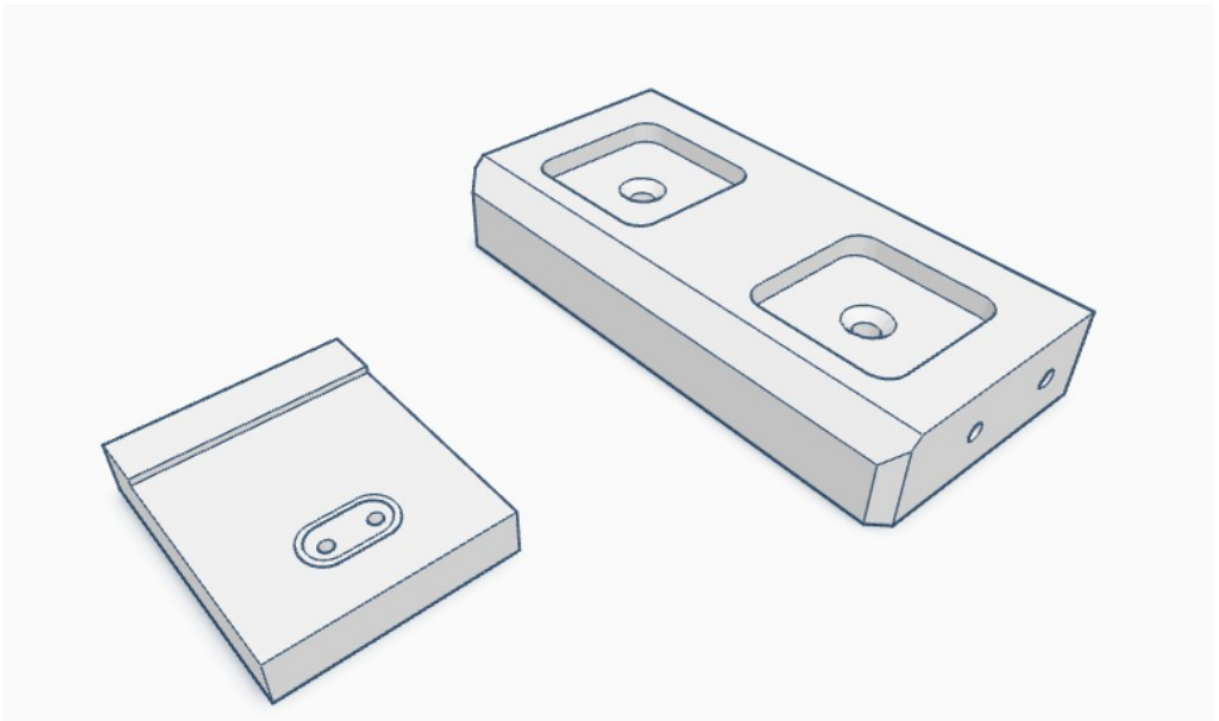


Figura A4 - Célula de fluido.

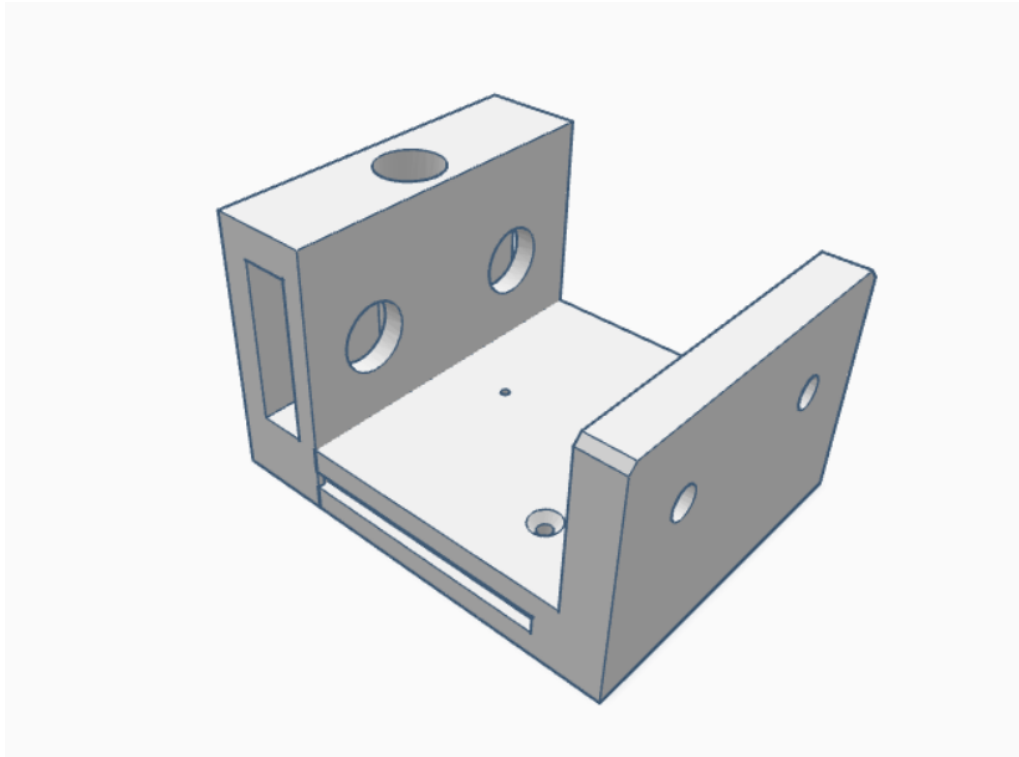


Figura A5 - Suporte para célula de fluido e prismas.

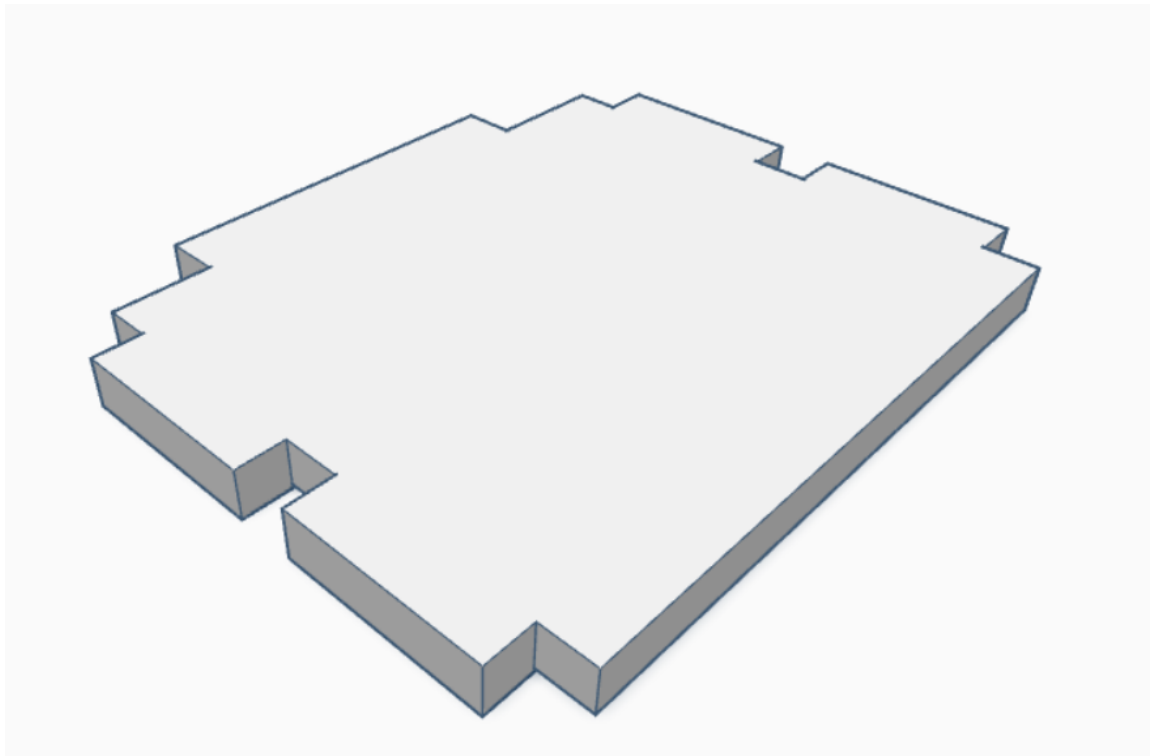


Figura A6 - Parte lateral da estrutura fixa.

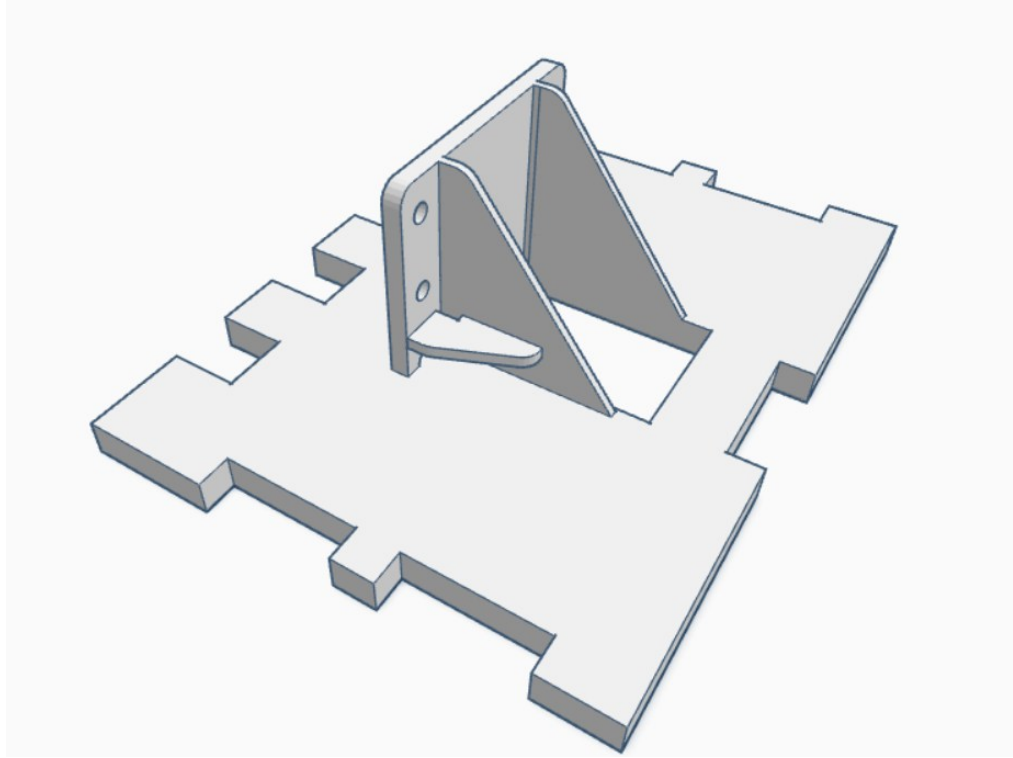


Figura A7 - Parte frontal da estrutura fixa.

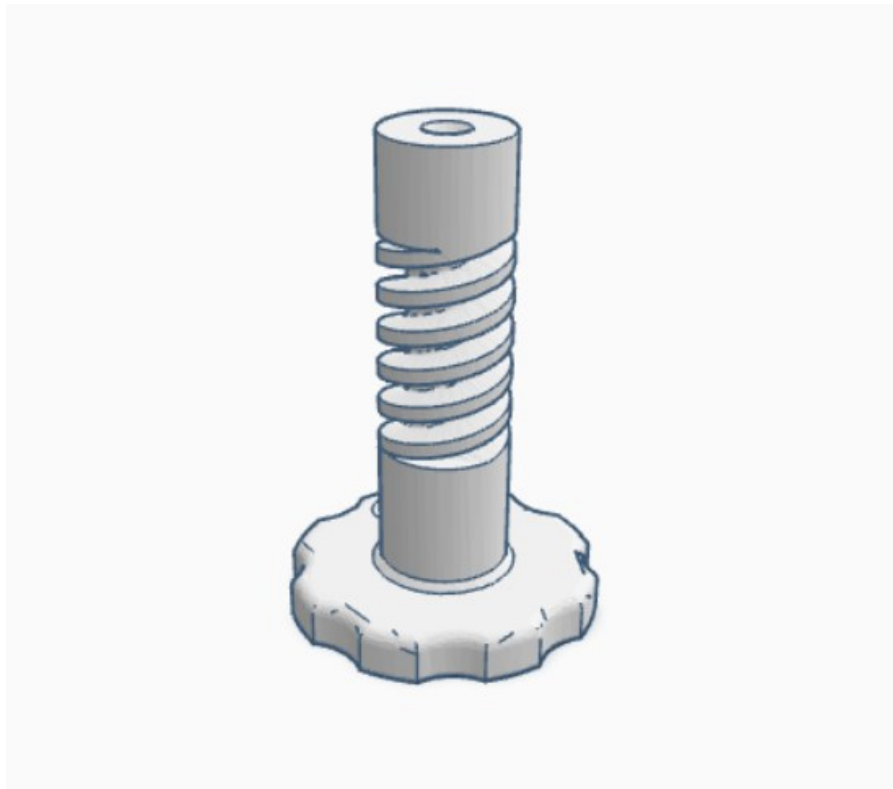


Figura A8 - Parafuso de rosca infinita frontal.

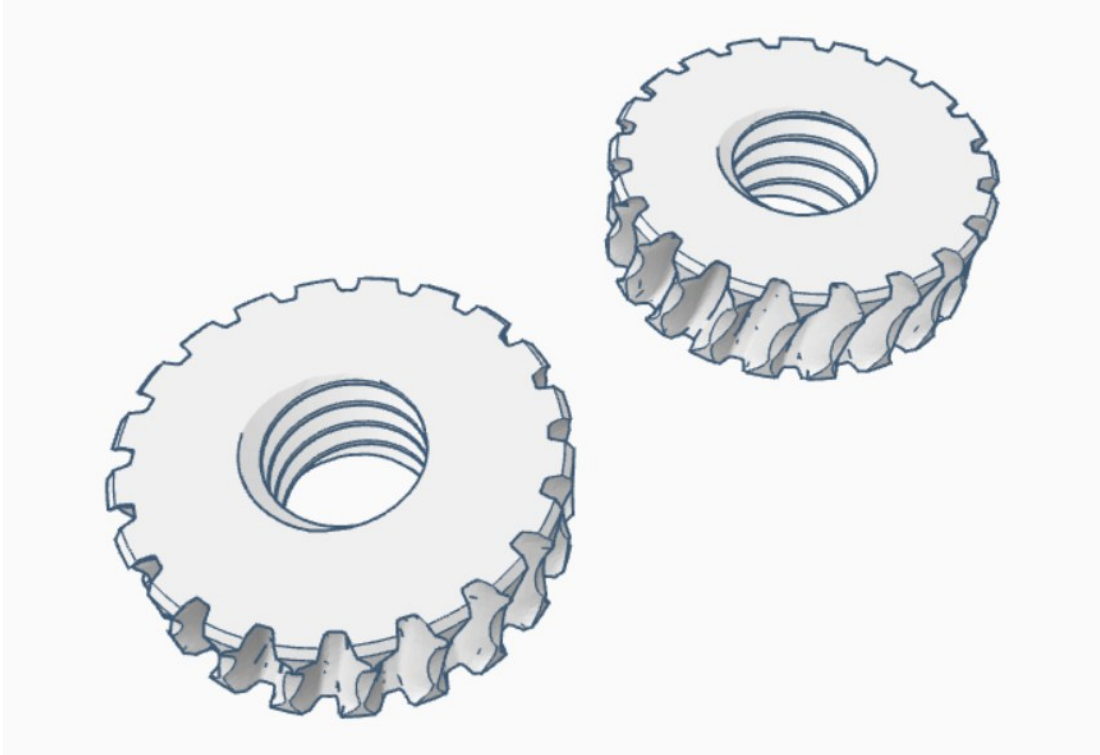


Figura A9 - Conjunto de roscas infinitas para aperto dos parafusos.

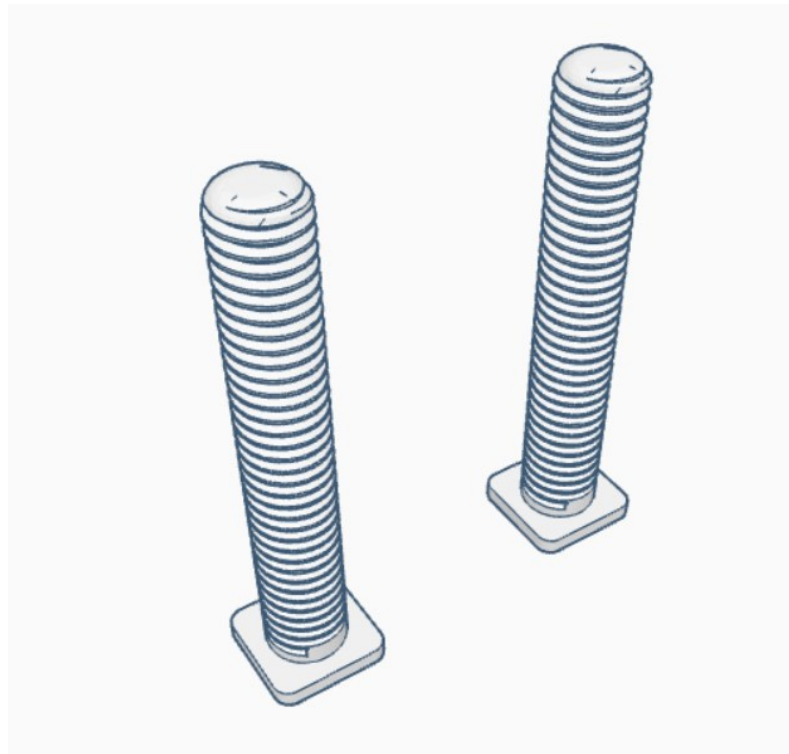


Figura A10 - Parafuso de rosca infinita para aperto da célula de fluido.

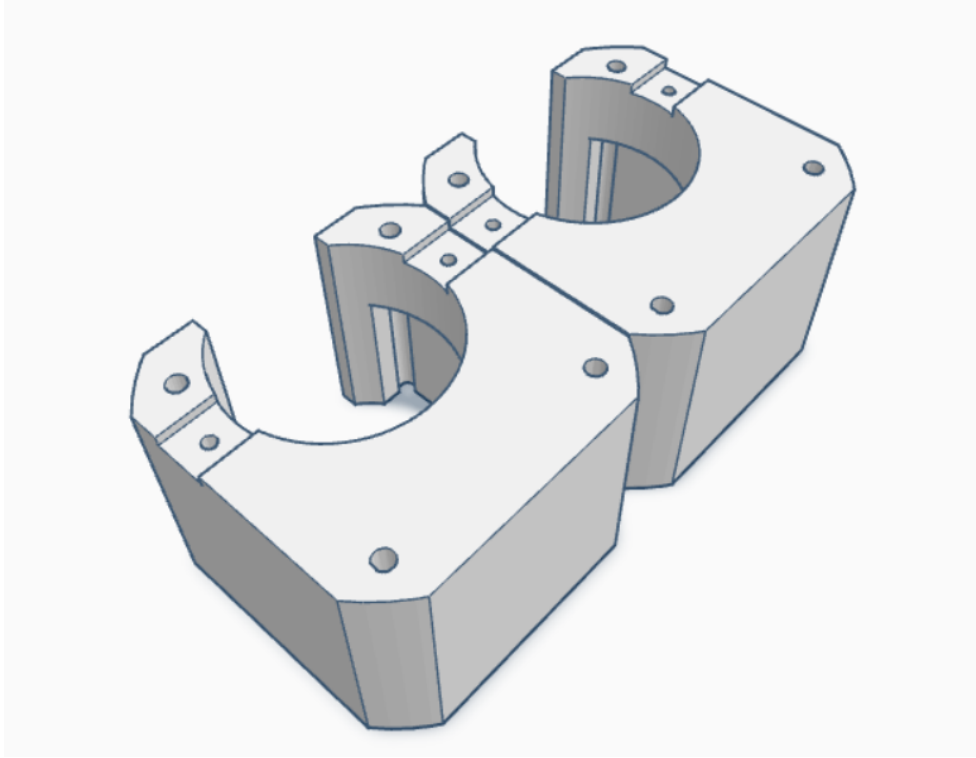


Figura A11 - Suporte para motores de passo.

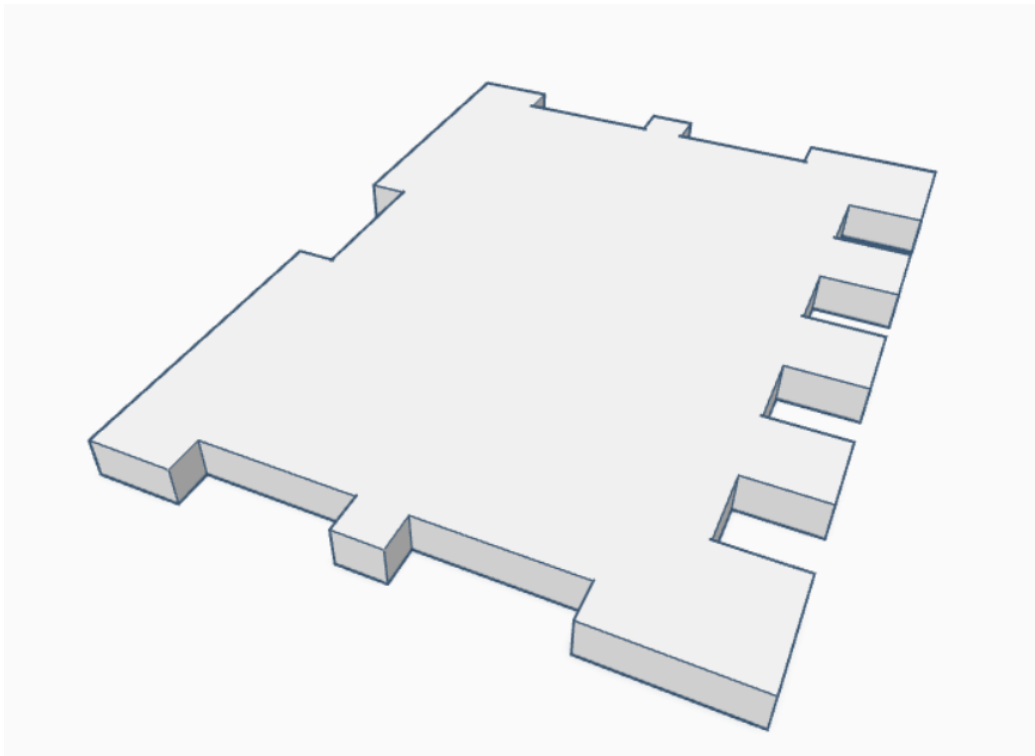


Figura A12 - Parte traseira da estrutura fixa.

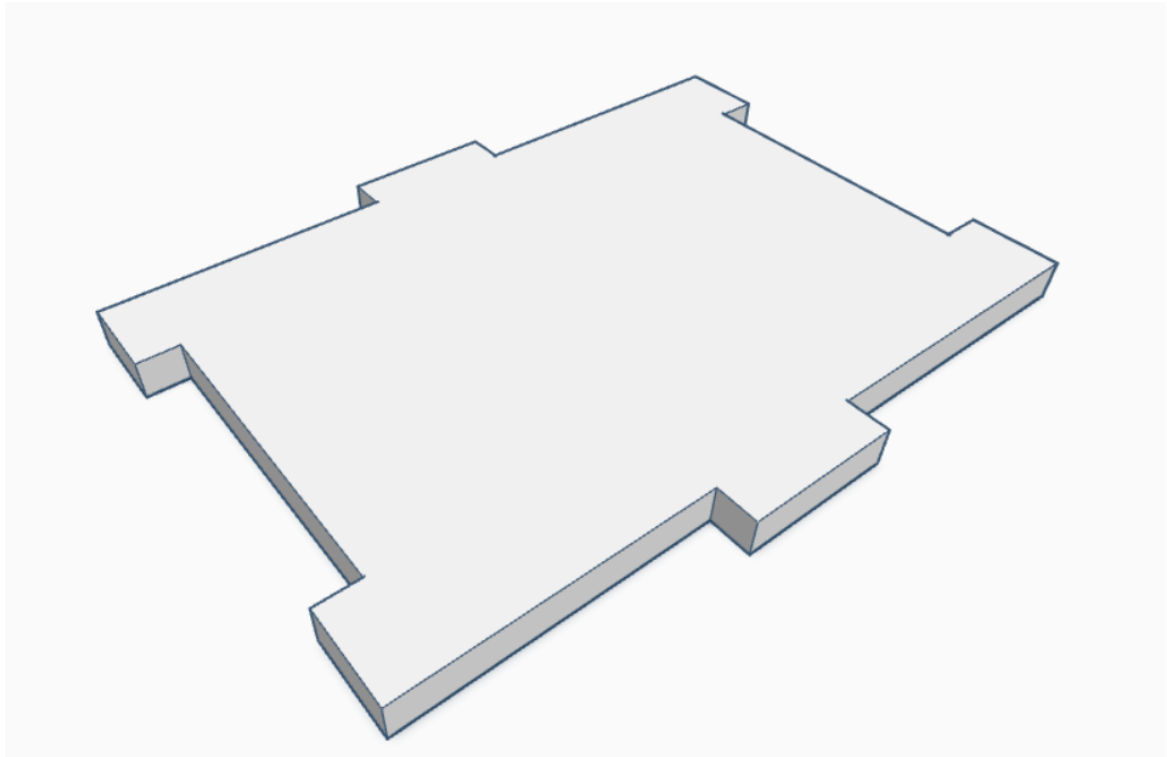


Figura A13 - Parte superior da estrutura fixa.

Apêndice B - Código utilizado para movimentação dos motores de passo implementado no Arduino UNO.

O código desenvolvido para o microcontrolador Arduino tem como finalidade o controle sincronizado de dois motores de passo, empregados na movimentação mecânica do sensor RPS rotacional. A estratégia de controle foi implementada utilizando a biblioteca padrão Stepper.h, que facilita o acionamento dos motores por meio da definição do número de passos por revolução e dos pinos digitais responsáveis pelo sinal de controle.

Inicialmente, foram definidos os parâmetros fundamentais para o funcionamento do sistema, tais como o número de passos por revolução dos motores (200 passos/revolução), a configuração dos pinos utilizados para conexão com os drivers dos motores, bem como os pinos associados aos três botões físicos de acionamento. Cada botão foi programado para executar um movimento angular específico, representando diferentes faixas de varredura do sensor.

Na função de inicialização (setup()), os pinos dos botões são configurados como entradas digitais e os dois motores recebem uma definição de velocidade de 60 rotações por minuto (RPM).

Durante a execução contínua do programa, por meio da função loop(), o sistema monitora constantemente o estado lógico dos botões. Quando um dos botões é pressionado, aciona-se a função moverEspelhado(), que realiza a movimentação do segundo motor. O termo “espelhado” refere-se à lógica implementada: enquanto o motor 1 gira no sentido horário, o motor 2 gira no sentido anti-horário.

A função moverEspelhado() recebe como parâmetro o ângulo de rotação desejado, que é convertido em número de passos com base na razão $\frac{\text{graus}}{360}$. Essa quantidade de passos é então aplicada a ambos os motores, com direções opostas, utilizando comandos de passo único (step(1) e step(-1)).

O botão 1 foi programado para executar uma rotação correspondente a 20 graus, representando o movimento entre as posições angulares de 35° a 55°; o botão 2 realiza um deslocamento também de 20 graus, simulando a varredura de 55° a 75°; e o botão 3 realiza um deslocamento fino de apenas 1 grau, permitindo ajustes precisos na orientação do sensor.

```

#include <Stepper.h>
const int stepsPerRevolution = 200;
Stepper motor1(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11);
Stepper motor2(stepsPerRevolution, 4, 5, 6, 7);
const int botao1 = 2;
const int botao2 = 3;
const int botao3 = 12;
void setup() {
  pinMode(botao1, INPUT);
  pinMode(botao2, INPUT);
  pinMode(botao3, INPUT);
  motor1.setSpeed(60); // RPM
  motor2.setSpeed(60);
}
void loop() {
  if (digitalRead(botao1) == HIGH) {
    moverEspelhado(20); // 35° a 55°
    delay(300);
  }
  else if (digitalRead(botao2) == HIGH) {
    moverEspelhado(20); // 55° a 75°
    delay(300);
  }
  else if (digitalRead(botao3) == HIGH) {
    moverEspelhado(1); // 1 grau
    delay(300);
  }
}
void moverEspelhado(float graus) {
  int passos = (graus / 360.0) * stepsPerRevolution;

  for (int i = 0; i < passos; i++) {
    motor1.step(1); // sentido horário
    motor2.step(-1); // sentido anti-horário
  }
}

```

Figura B1 - Código para controle dos movimentos do S²lg sensor.

Apêndice C – Código para simulação de vibrações dos motores de passo

Inicialmente, são definidos os parâmetros físicos estimados do sistema, incluindo a massa equivalente (0,03 kg), a rigidez (100 N/m), o coeficiente de amortecimento viscoso (0,2 Ns/m) e a força de excitação (0,01 N). A frequência de excitação foi assumida como 512 Hz, valor coerente com a operação em regime do motor analisado. Com base nesses valores, calcula-se a frequência angular, que é utilizada nas equações de resposta harmônica.

Em seguida, são calculados a frequência natural do sistema e o fator de amortecimento. A frequência natural, obtida por meio da raiz quadrada da razão entre rigidez e massa, representa a tendência do sistema vibrar na ausência de excitações externas. Já o fator de amortecimento fornece uma medida da dissipação de energia ao longo do tempo, sendo determinante para caracterizar se o sistema é subamortecido, criticamente amortecido ou superamortecido.

A resposta do sistema é calculada com base na teoria clássica da vibração forçada com amortecimento. Para isso, determinam-se a amplitude e a fase do movimento, levando em consideração os efeitos conjugados da excitação, rigidez e amortecimento. A equação de resposta em aceleração considera a amplitude ajustada pela frequência angular e a defasagem entre a força aplicada e a resposta do sistema, fornecendo uma representação precisa da oscilação induzida.

Uma vez obtida a resposta no tempo, o código realiza a geração de um gráfico que apresenta o perfil da aceleração ao longo do tempo, permitindo visualizar a oscilação em milissegundos. Em complemento, é realizada a análise espectral da resposta utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a qual permite identificar as frequências predominantes presentes na aceleração do sistema. O espectro de frequência é apresentado em um segundo gráfico, com zoom na faixa útil de 0 a 2000 Hz, evidenciando os picos de frequência que caracterizam a resposta dinâmica do motor.

```

1      % Parâmetros físicos estimados
2      m = 0.03;           % massa [kg]
3      k = 100;            % rigidez [N/m]
4      c = 0.2;            % amortecimento [Ns/m]
5      F0 = 0.01;          % força de excitação [N]
6      f = 512;            % frequência de excitação [Hz]
7      omega = 2*pi*f;     % frequência angular [rad/s]
8
9      % Tempo de simulação
10     Fs = 50000;          % taxa de amostragem [Hz]
11     T = 1/Fs;            % intervalo de amostragem
12     t = 0:T:0.05;        % tempo [s]
13     L = length(t);       % número de pontos
14
15     % Frequência natural e amortecimento
16     omega_n = sqrt(k/m); % frequência natural [rad/s]
17     zeta = c / (2*sqrt(k*m)); % fator de amortecimento
18
19     % Amplitude e fase
20     X = F0 / sqrt((k - m*omega^2)^2 + (c*omega)^2);
21     phi = atan2(c*omega, k - m*omega^2);
22
23     % Resposta em aceleração
24     a = -X * omega^2 * cos(omega*t - phi); % [m/s^2]
25
26     % -----
27     % Gráfico da aceleração no tempo
28     % -----
29     figure;
30     plot(t*1000, a, 'r', 'LineWidth', 1.5);
31     xlabel('Tempo [ms]');
32     ylabel('Aceleração [m/s^2]');
33     title('Resposta em Aceleração do Motor 28BYJ-48');
34     grid on;
35
36     % -----
37     % FFT da aceleração
38     % -----
39     Y = fft(a);
40     P2 = abs(Y/L);        % espectro de dois lados
41     P1 = P2(1:L/2+1);     % espectro de um lado
42     P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
43
44     f_axis = Fs*(0:(L/2))/L; % eixo de frequência
45
46     % Gráfico do espectro de frequência
47     figure;
48     plot(f_axis, P1, 'b', 'LineWidth', 1.5);
49     xlabel('Frequência [Hz]');
50     ylabel('Amplitude');
51     title('Espectro de Frequência da Aceleração (FFT)');
52     xlim([0 2000]); % zoom na faixa útil
53     grid on;
54

```

Figura C1 - Algoritmo implementado no matlab para realizar simulação de vibração em motores de passo.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A. et al. **New trends in instrumental design for surface plasmon resonance-based biosensors.** *Biosensors and Bioelectronics*, v. 26, n. 5, p. 1815-1824, 2011.
- ABREU, F. F. G. da S. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo.** 2015. 235 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.
- ALMEIDA, R. M. S. F. et al. **A critical analysis on the sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensors with graphene.** *Nanomaterials*, v. 12, n. 15, p. 2562, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/15/2562>. Acesso em: 1 out. 2025.
- ARAÚJO, G. A. S. et al. **Particle swarm optimizer for the surface plasmon resonance effect on metal gratings.** *Applied Optics*, v. 62, p. 6120-6130, 2023.
- BIOSENSORES SPR. SensiQ Technologies, Inc. Disponível em: <http://www.sensiqttech.com/>. Acesso em: 21 nov. 2023.
- BOLDUC, O. R. et al. **High-resolution surface plasmon resonance sensors based on a dove prism.** *Talanta*, v. 77, n. 5, p. 1680-1687, 2009.
- BORN, M.; WOLF, E. **Principles of Optics.** 7. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- BUTT, M. A. et al. **Surface Plasmon Resonance-Based Biodetection Systems: Principles, Progress and Applications—A Comprehensive Review.** *Biosensors*, v. 15, n. 1, p. 35, 2025.
- CARVALHO, A. A. de et al. **SPR: uma nova ferramenta para biossensores.** *Química Nova*, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 97-104, jan. 2003.
- CHINOWSKY, T. M. et al. **Performance of the spreeta 2000 integrated surface plasmon resonance affinity sensor.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 91, n. 1-3, p. 266-274, 2003.
- COSTA, J. C. W. A. et al. **Análise de um sensor plasmônico acoplado a arranjo periódico de nanopartículas tipo core-shell.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (SBrT), 34., 2016, Santarém. *Anais [...]*. Santarém: SBrT, 2016. p. 1-5.
- COSTA, J. C. W. A. **Análise de um sensor baseado em ressonância de superfície de plasma acoplado a um arranjo periódico de nanopartículas metálicas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.
- D'AGATA, R.; SPOTO, G. **Exploiting the design of surface plasmon resonance interfaces for better diagnostics: A perspective review.** *Talanta*, v. 266, p. 125033, 2024.

- DEVANARAYANAN, S.; MANJULADEVI, R.; GUPTA, B. D. **Surface plasmon resonance sensor based on a new opto-mechanical scanning mechanism.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 227, p. 643-648, 2016.
- DIONNE, J. A. et al. **Planar metal plasmon waveguides: Frequency-dependente dispersion, propagation, localization and loss beyond the free electron model.** *Physical Review B*, v. 72, n. 7, p. 075405, 2005.
- DOROZINSKY, G. et al. **Influence of technological factors on sensitivity of analytical devices based on surface plasmon resonance.** *Journal of Sensor Technology*, v. 5, n. 2, p. 54-61, 2015.
- ECONOMOU, E. N. **Surface plasmons in thin films.** *Physical Review*, v. 182, n. 2, p. 539-554, 1969.
- ENGLEBIENNE, P. et al. **Principles of Surface-Plasmon Resonance.** In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMEDICAL SPECTROSCOPY: FROM MOLECULES TO MEN, 1., 2002, Cardiff. *Proceedings [...]*. Cardiff, UK, 2002.
- FAROOQ, M. U. et al. **High-performance plasmonics nanostructures in gas sensing: a comprehensive review.** *Medical Gas Research*, v. 15, n. 1, p. 1-9, mar. 2025.
- FELISARDO, G. N. dos; GALRÃO, D. G. **Uso do Arduino como ferramenta de prototipagem para desenvolvimento de dispositivos automáticos: uma revisão.** *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 8, n. 1, p. 11-26, 2023.
- FENG, D. et al. **Rotating angle modulation method for improving the measurement performance of LRSPR sensor.** *IEEE Sensors Journal*, v. 21, n. 13, p. 14876-14882, 2021.
- FREESTONE, I. et al. **The lycurgus cup - a roman nanotechnology.** *Gold Bulletin*, v. 40, n. 4, p. 270-277, 2007.
- GABRIELSON, T. B. **Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors.** *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 40, n. 5, p. 903-909, 1993.
- GOMES, P. A. P.; OLIVEIRA, C. A. S. **A novel simulator for agile and graphical modeling of surface plasmon resonance based sensors.** *Scientific Reports*, v. 13, p. 1-14, 2023.
- GRAHAM, D. et al. **A differential surface plasmon resonance sensor.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 159, n. 1, p. 33-38, 2011.
- GUPTA, B. D. **Sensing through surface plasmon resonance technique.** In: GEDDES, C. D. (ed.). *Reviews in Plasmonics 2016*. Springer, 2017. p. 39-53.
- HECHT, E. **Optics.** 5. ed. Pearson Education, 2017.
- HOMOLA, J. et al. **Surface plasmon resonance sensors: review.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 54, n. 1-2, p. 3-15, 1999.

HOMOLA, J. (ed.). **Surface Plasmon Resonance Based Sensors**. Nova York: Springer Science & Business Media, 2006.

HOMOLA, J. **Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species**. *Chemical Reviews*, v. 108, n. 2, p. 462-493, 2008.

HUANG, C. J. et al. **Phase-sensitive surface plasmon resonance biosensors: methodology, instrumentation and applications**. *Annalen der Physik*, v. 524, n. 11, p. 663-682, 2012.

IUPAC. **Compendium of Chemical Terminology**. Versão online. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/goldbook.B00663>. Acesso em: out. 2023.

JIANRONG, C. (ed.). **Recent Advances in Mechanical Engineering Design**. EUA: Springer, 2021.

KARASSIK, I. J. et al. **Pump Handbook**. EUA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2007.

KOTHANDARAMAN, C. P.; RUDRAMOORTHY, R. **Fluid Mechanics and Machinery**. EUA: New Academic Science, 2011.

LAKSONO, H. et al. **Development of low cost and accurate homemade sensor system based on Surface Plasmon Resonance (SPR)**. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1011, p. 012056, 2018.

LEE, S. (ed.). **Encyclopedia of Chemical Processing**. EUA: CRC Press, 2005.

LI, H. et al. **Design and experiment study of solution refractive index sensor based on TFBG-SPR**. In: PROCEEDINGS OF SPIE, 2013, Bellingham. *Anais [...]*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering, v. 8914, 2013.

LIANG, Y. et al. **Surface plasmon resonance instrument as a refractometer for liquids and ultrathin films**. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 149, n. 1, p. 212-220, 2010.

LIEDBERG, B.; NYLANDER, C.; LUNDSTRÖM, I. **Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing**. *Sensors and Actuators*, v. 4, p. 299-304, 1983.

LINMAN, M. J.; ABBAS, A.; CHENG, Q. **Interface design and multiplexed analysis with surface plasmon resonance (SPR) spectroscopy and SPR imaging**. *Analyst*, v. 135, n. 11, p. 2759-2767, 2010.

LIU, S. et al. **Surface plasmon resonance chemical sensor composed of a microstructured optical fiber for the detection of an ultra-wide refractive index range and gas-liquid pollutants**. *Optics Express*, v. 29, n. 25, p. 40734-40747, 2021.

LUO, Y. et al. **High-sensitivity dual u-shaped PCF-SPR refractive index sensor for the detection of gas and liquid analytes**. *Journal of the Optical Society of America A*, v. 41, p. 595-605, 2024.

MOREIRA, C. da S. **Projeto e realização de um biochip óptico para aplicações biológicas baseado no princípio de ressonância de plásmons de superfície**. 2010. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

MOTT, R. L. **Machine Elements in Mechanical Design**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2014.

NANOSPR. **NanoSPR Devices**. Disponível em: <https://nanospr.com>. Acesso em: mar. 2024.

NANOSPR103 - LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE SPECTROMETER. **NanoSPR**. Disponível em: <https://nanospr.com/nanospr103-localized-surface-plasmon-resonance-spectrometer/>. Acesso em: jul. 2023.

NANOSPR77 - DUAL CHANNEL ELECTROCHEMICAL SURFACE PLASMON RESONANCE SPECTROMETER. **NanoSPR**. Disponível em: <https://nanospr.com/nanospr77-dual-channel-electrochemical-surface-plasmon-resonance-spectrometer/>. Acesso em: jul. 2023.

NANOSPR8 - EIGHT CHANNEL ELECTROCHEMICAL SURFACE PLASMON RESONANCE SPECTROMETER. **NanoSPR**. Disponível em: <https://nanospr.com/nanospr8-eight-channel-electrochemical-surface-plasmon-resonance-spectrometer/>. Acesso em: jul. 2023.

NEFF, C. et al. **Optical properties and instrumental performance of thin gold films near the surface plasmon resonance**. *Thin Solid Films*, v. 496, n. 2, p. 688-697, 2006.

NGUYEN, H. H. et al. **Surface Plasmon Resonance: A Versatile Technique for Biosensor Applications**. *Sensors*, v. 15, n. 5, p. 10481–10510, 2015.

NÓBREGA, J. F. R. da et al. **Caracterização e mitigação da influência da temperatura na fonte de luz de biossensores de ressonância de plásmons de superfície baseados em smartphones**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO (CBA), 23., 2020, Evento Virtual. *Anais [...]*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Automática, 2020.

OLIVEIRA, C. A. S. **Sistema computacional para biossensores baseado na ressonância de plasma de superfície**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

OLIVEIRA, C. A. S. et al. **A surface plasmon resonance biochip that operates both in the angular and wavelength interrogation modes**. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 62, n. 5, p. 1223–1232, 2013.

OLIVEIRA, C. A. S. **Construção e caracterização de sensores SPR: Influência da camada metálica e do substrato dielétrico**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

OLIVEIRA, C. A. S. et al. **Surface Plasmon Resonance Sensors: A Materials Guide to Design, Characterization, Optimization, and Usage**. 2. ed. Springer, 2019.

OUELLET, E. et al. **Simultaneous monitoring of adsorbate-induced changes in the thickness and refractive index of thin films using imaging surface plasmon resonance**. *Langmuir*, v. 24, n. 4, p. 1473-1479, 2008.

PAC. **Glossary for chemists of terms used in biotechnology (IUPAC Recommendations 1992)**. *Pure and Applied Chemistry*, v. 64, n. 1, p. 143-168, 1992.

PAIVA, J. **Leis de reflexão da luz**. *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 3, p. 204, 2014.

PILIARIK, M.; HOMOLA, J. **Surface plasmon resonance (SPR) sensors: Approaching their limits?** *Optics Express*, v. 17, n. 19, p. 16505-16517, 2009.

RANTA, S. et al. **SPR-based sensing of physiological analytes using a tunable laser: Towards wearable applications**. In: PLASMONICS IN BIOLOGY AND MEDICINE XXI, 2024, San Francisco. *Proceedings* [...]. SPIE, v. 12860, 2024. p. 8-15.

REATHER, H. **Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings**. Berlin: Springer-Verlag, 1988.

RICH, R. L.; MYDLARZ, S. C. **A survey of the year 2009 commercial optical biosensor literature**. *Journal of Molecular Recognition*, v. 24, n. 6, p. 892-914, 2011.

RIEDEL, T. et al. **Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensors: Advantages and Limitations of Label-Free Detection of Biomolecules**. In: YAN, M.; RAMSTRÖM, O. (ed.). *Label-Free Biosensor Methods in Drug Discovery*. Humana Press, 2016. p. 19-48.

RODRIGUES, E. M. S. et al. **Desenvolvimento e caracterização de sensores a fibra óptica plástica para refratometria baseados em modulação de amplitude**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SAMBLES, J. R.; BRADBURY, G. W.; YANG, F. **Optical excitation of surface plasmons: an introduction**. *Contemporary Physics*, v. 32, n. 3, p. 173-183, 1991.

SANTIAGO, J. G. C. **Caracterização de fibras ópticas microestruturadas para aplicação em sensores baseados na ressonância de plásmons de superfície**. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2018.

SATHIYAMOORTHY, K. et al. **Modified two prism SPR sensor configurations to improve the sensitivity of measurement**. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 191, p. 73-77, 2013.

SCHASFOORT, R. B. M. (ed.). **Handbook of Surface Plasmon Resonance**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2017.

SHIN, Y. B. et al. **A new palm-sized surface plasmon resonance (SPR) biosensor based on modulation of a light source by a rotating mirror.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 150, n. 1, p. 1-6, 2010.

SHMELEVA, L. G.; SUPRUN, A. D. **Influence of initial temperature of water analyte on the readings of optical sensors based on surface plasmon resonance.** *Journal of Modern Optics*, v. 71, n. 11, p. 1021-1028, 2024.

SHUKLA, S. et al. **Surface plasmon resonance biosensors based on Kretschmann configuration: basic instrumentation and applications.** *Journal of Sensors*, v. 2022, Artigo ID 7681188, 2022.

SILVA, D. A. da. **Análise numérica de sensor de ressonância plasmônica de superfície baseado em grafeno na faixa de terahertz.** 2022. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

SOUSA, M. J. F. de et al. **Evaluating the signal processing chain employed in surface plasmon resonance biosensing.** In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (I2MTC), 2014, Montevideo. *Proceedings [...]*. Montevideo: IEEE, 2014. p. 1606-1611.

SOUZA, L. A. S. de. **Desenvolvimento de um sistema eletrônico de aquisição e processamento para biossensores.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

TETSUO, S. et al. **Planar near-infrared surface plasmon resonance sensor with Si prism and grating coupler.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 144, n. 2, p. 295-300, 2010.

THIRSTRUP, C. et al. **Diffraction optical coupling element for surface plasmon resonance sensors.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 100, n. 3, p. 298-308, 2004.

TOBISKA, P.; HOMOLA, J. **Advanced data processing for SPR biosensors.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 107, n. 1, p. 162-169, 2005.

TSUKAGOSHI, T. et al. **Compact surface plasmon resonance system with Au/Si Schottky Barrier.** *Sensors*, v. 18, n. 2, p. 399, 2018.

TURNER, A. P. F. et al. **Direct Monitoring of Formaldehyde Vapour and Detection of Ethanol Vapour Using Dehydrogenase-Based Biosensors.** *Analyst*, v. 121, p. 1769-1773, 1996.

UGURAL, A. C. **Mechanical Design: An Integrated Approach.** Boston: McGraw-Hill, 2004.

VALA, M. et al. **High-performance compact SPR sensor for multi-analyte sensing.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 148, n. 2, p. 544-549, 2010.

VORUGANTI, S. K. et al. (ed.). **Advances in Applied Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICAMER 2019.** Singapura: Springer, 2020.

WANG, D. et al. **Recent Advances in Surface Plasmon Resonance Imaging: A Review.** *Sensors*, v. 19, n. 7, p. 1515, 2019.

WATKINS, N. D. et al. **A differential surface plasmon resonance sensor.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 159, n. 1, p. 33-38, 2011.

XIE, J. et al. **Low-Vibration Stepper Motors for Optical Systems: A Comparative Study.** *Optical Engineering*, v. 60, n. 5, p. 055102, 2021.

YAMAMOTO, M.; KOBAYASHI, M.; YAMADA, M. **A waveguide-coupled surface-plasmon sensor for an aqueous environment.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 21, n. 1, p. 75-79, 1994.