



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

FRANCISCO JOSIRAN DA SILVA

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA AUTOMATIZÁVEL  
PARA SENSOR BASEADO NA RESSONÂNCIA DE PLASMONS DE SUPERFÍCIE**

MOSSORÓ

2021

FRANCISCO JOSIRAN DA SILVA

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA AUTOMATIZÁVEL  
PARA SENSOR BASEADO NA RESSONÂNCIA DE PLASMONS DE SUPERFÍCIE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Controle e Automação

Orientador: Prof. Dr. Leiva Casemiro de Oliveira

MOSSORÓ

2021

© 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.

S  
586p      Silva, Francisco Josiran da.  
            PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA  
AUTOMATIZÁVEL PARA SENSOR BASEADO NA RESSONÂNCIA  
DE PLASMONS DE SUPERFÍCIE / Francisco Josiran da  
Silva. - 2021.  
            84 f. : il.

            Orientador: Leiva Casemiro Oliveira.  
            Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica, 2021.

            1. PPBIO. 2. Sensor óptico. 3. Ressonância de  
Plasmons de Superfície. 4. Instrumentação. 5.  
Eletrônica. I. Oliveira, Leiva Casemiro, orient.  
II. Título.

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.

**Francisco Josiran da Silva**

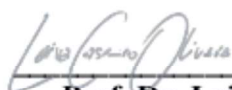
**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA  
PLATAFORMA AUTOMATIZÁVEL PARA SENSOR  
BASEADO DA RESSONÂNCIA DE PLASMONS DE  
SUPERFÍCIE**

Dissertação apresentada ao Mestrado do  
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

Defendido em: 28/01/2021

**BANCA EXAMINADORA**

LEIVA CASEMIRO Assinado de forma digital  
OLIVEIRA:016265 OLIVEIRA:01626591300  
91300 Dados: 2021.01.29  
15:24:32 -03'00'



**Prof. Dr. Leiva Casemiro Oliveira**  
Orientador (Presidente) – UFERSA

MARCUS VINICIUS Assinado digitalmente por MARCUS VINICIUS SILVERIO  
SILVERIO COSTA:02599398380  
COSTA:02599398380  
DN: CN=MARCUS VINICIUS SILVERIO COSTA,  
02599398380, OU=UFERSA - Universidade Federal Rural  
do Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR  
Razão: Eu sou o autor deste documento  
Localização: sua localização de assinatura aqui  
Data: 2021.01.29 20:43:39-03'00'  
Foxit Reader Versão: 10.1.0

**Prof. Dr. Marcus Vinicius Silverio**  
Examinador Interno – UFERSA

**Prof. Dr. Antonio Marcus Nogueira**  
Examinador Externo – UFCG

*Dedico esse trabalho à minha madrinha Maria José da Silva Torquato (in memorian), por sua capacidade de acreditar e investir em mim, seu cuidado e dedicação deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. À padrinho Onésimo Torquato de Araújo (in memorian), sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. Aos professores do Senai Italo Bologna Adelson (in memorian), Ananias (in memorian) e Fátima Rebolças (in memorian), por terem compartilhado vossos conhecimentos tempo e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe Maria Irene da Rosa, pelo o amor, educação, ensino e por sempre acreditar no meu potencial e contribuir para o meu crescimento pessoal e profissional. Agradeço aos meus irmãos José Maria da Silva Júnior e Josiranny Priscilla da Silva, que me impulsionaram todos os dias com palavras de apoio. À minha esposa Shirley Macielly e meu filho Otto Miguel, que não mediram esforços para me ajudar nessa etapa tão importante da minha vida e pelo amor incondicional.

Agradeço principalmente o Prof. Dr. Leiva Casemiro, por me apresentar a área de sensores baseados em SPR. Como também, por sempre me incentivar a aprender da melhor forma possível, acreditar e confiar no meu potencial e contribuir para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos, Jackson Sousa, João Victor, Elizeu Sandro, Anderson Melo, Júlio Cartier e Rosana Cibely que se colocaram à disposição para compartilhar minhas dores, tristezas e alegrias, por todas as conversas, como também, incentivo. Agradeço ainda aos meus colegas de mestrado que fiz durante essa trajetória.

## RESUMO

Sistemas de detecção de eventos biológicos são essenciais para o entendimento e monitoramento de interações moleculares. Dentre as tecnologias de detecção, comumente usadas, as baseadas em ressonância de Plasmons de Superfície (SPR) ganham destaque devido a sua alta sensibilidade. A instrumentação de sensores SPR exige componentes ópticos, eletrônicos, fluídicos e mecânicos, cuidadosamente posicionados para a correta excitação do fenômeno. Normalmente, estes componentes são rearranjados em posições fixas. Eventuais ajustes são realizados de maneira manual, de modo a ajustar o sensor para que funcionem sempre em uma mesma condição de uso. Além disso, muitos sensores contam com instrumentação volumosa e procedimentos caros, exigindo operadores bem treinados e infraestrutura avançada de laboratório para ajustes dos componentes. O biochip PPBIO possibilita o desenvolvimento de sensores SPR de forma prática, menos complexa, evita-se a necessidade de elementos mecânicos rotacionais. Todavia, as estruturas para esse biochip também são baseadas em componentes com posições fixas. Este trabalho busca realizar análises mais rápidas em relação a plataforma mecânica, otimizando o processamento e a aquisição de dados. Os resultados obtidos, por meio da análise entre a curva teórica e experimental, permitiram concluir que quanto mais acentuada e profunda a curva SPR melhor acoplamento óptico e, conseqüentemente, melhor o fenômeno SPR. Possibilitaram analisar a largura da curva SPR, concluindo-se que quanto mais acentuada, maior a precisão de detecção e melhor acoplamento óptico; e quanto menor a largura, melhor a sensibilidade, conseqüentemente, melhor o fenômeno SPR. Dessa forma, a plataforma automatizada, como contribuição científica, tem aplicação para operar no modo de interrogação angular, pois fornece um melhor alinhamento do acoplamento óptico. Tendo como uma das vantagens da plataforma, a não necessidade do uso sistemas rotacionais, a redução do efeitos térmicos capaz de evitar leves distorções no caminho óptico, gerando uma melhor resposta, estabilidade, sensibilidade com boa repetitividade e maior precisão da curva SPR.

**Palavras-chave:** PPBIO, sensor óptico, Ressonância de Plasmons de Superfície, instrumentação eletrônica.

## ABSTRACT

Biological event detection systems are essential for understanding and monitoring molecular interactions. Among the detection technologies, commonly used, those based on Surface Plasmon Resonance (SPR) stand out due to their high sensitivity. The instrumentation of SPR sensors requires optical, electronic, fluidic and mechanical components, carefully positioned for the correct excitation of the phenomenon. These components are normally rearranged in fixed positions. Any adjustments are made manually, in order to adjust the sensor so that they always work in the same condition of use. In addition, many sensors have bulky instrumentation and expensive procedures, requiring well-trained operators and advanced laboratory infrastructure for component adjustments. The PPBIO biochip makes it possible to develop SPR sensors in a practical, less complex way, avoiding the need for rotational mechanical elements. However, the structures for this biochip are also based on components with fixed positions. This work seeks to perform faster analysis in relation to the mechanical platform, optimizing data processing and acquisition. The results obtained, through the analysis between the theoretical and experimental curve, allowed to conclude that the more accentuated and deep the SPR curve, the better optical coupling and, consequently, the better the SPR phenomenon. They made it possible to analyze the width of the SPR curve, concluding that the more pronounced, the greater the detection precision and the better optical coupling; and the smaller the width, the better the sensitivity, consequently, the better the SPR phenomenon. Thus, the automated platform, as a scientific contribution, has application to operate in the angular interrogation mode, as it provides a better alignment of the optical coupling. Having one of the advantages of the platform, the temperature control, able to avoid slight distortions in the optical path.

**Keywords:** Surface Plasmons Resonance. optical sensor.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Elementos necessários para um sensor SPR na configuração ATR - Kretschmann	19
Figura 2	– a) Estrutura de prisma triangular equilátero tradicional. b) Estrutura de prisma de ângulo reto. . . . .	20
Figura 3	– a) Esquema 3D de uma configuração representativa para SPR com resolução de ângulo usando iluminação de tela e detecção de câmera frontal opticamente acoplada por um dispositivo descartável. b) Traçado de raio 2D do arranjo experimental mostrando o caminho da luz da tela para a câmera. . . . .	21
Figura 4	– Detalhes do caminho óptico percorrido pelos feixes luminosos. . . . .	22
Figura 5	– a) Dispersão dos feixes luminosos dentro do PPBIO para alinhamento correto de todos os elementos que compõem o <i>set-up</i> experimental. Desalinhamento vertical b) positivo e c) negativo dos elementos. d) Desalinhamento horizontal dos elementos. . . . .	22
Figura 6	– O Gráfico ilustra a variação do ângulo de ressonância em função da posição de entrada causada pela temperatura. . . . .	23
Figura 7	– a) Alteração do foco em função da posição de entrada causada por diferentes temperaturas. b) Desfoque no ponto de detecção causado pelo aumento da temperatura. . . . .	24
Figura 8	– Plataforma baseada no prisma PPBIO . . . . .	25
Figura 9	– Reflectômetro: S-splitter, $D_1$ , Fotodetector do sinal, MP ( $\theta$ ) - Motor de passo do estágio de rotação, MP(x) - Motor de passo de translação x MP(y) - Motor de passo para translação y MP(w) - Motor de passo para correção do fotodetector $D_1$ . . . . .	27
Figura 10	– Espectômetro desenvolvido por Laksono. . . . .	27
Figura 11	– a) Imagem do espectômetro. b) diagrama de blocos do espectômetro. . . . .	28
Figura 12	– Espectômetro adaptado para a configuração de Otto. . . . .	29
Figura 13	– Espectômetro de baixo custo. . . . .	29
Figura 14	– a) Diagrama de blocos. b) Espectômetro. . . . .	30
Figura 15	– Diagrama da estrutura do biossensor de ressonância de plasmon de superfície óptica baseado em varredura de ângulo usando laser. . . . .	30
Figura 16	– BIACORE T200 baseado em laboratório. . . . .	31

Figura 17 – Biossensor de ressonância de plasmons de superfície Modelo Reichert2SPR do fabricante Reichert, baseado em laboratório. . . . .	31
Figura 18 – Equipamentos portáteis Biosuplar 6 e o Spirit. analíticas. . . . .	32
Figura 19 – Rotação do prisma em torno no próprio centro. . . . .	32
Figura 20 – Nivelamento do goniômetro do detector em relação à mesa ótica. . . . .	33
Figura 21 – a) Sistema multicamadas na configuração de Kretschmann com 4 camadas. b) Ilustra a configuração das multicamadas em que (1) é o substrato óptico-prisma, (2) metal, (3) e (4) representam o analito e a amostra que o contém.	37
Figura 22 – Condição de ressonância . . . . .	39
Figura 23 – Refletividade para substâncias aquosas. Curva SPR teórica para o PPBIO manufaturado com vidro BK7 e camada de ouro com 50 nm operando no modo AIM. Detalhe para comportamento de $\theta_R$ em função da variação do índice de refração da substância em análise . . . . .	40
Figura 24 – Prisma polimérico elaborado por Moreira. Os valores empregados no projeto foram: $h = 3\text{mm}$ , $L = 26,72\text{mm}$ , $l = 17,84\text{mm}$ , $\alpha = 34^\circ$ , $\theta = 68^\circ$ . . . . .	40
Figura 25 – Restrições operacionais para a lente cilíndrica para focar os feixes luminosos. Os valores empregados no projeto foram: $T = 5\text{mm}$ , $R = 11,2\text{mm}$ , $J = 3,9\text{mm}$ e $\text{EBR} = 0,5\text{mm}$ . O espaço focal ( $f$ ) da lente usada é de 20mm para $\lambda = 587,6\text{nm}$ . . . . .	41
Figura 26 – Diagrama óptico do PPBIO, indicando distâncias, ângulos e elementos presentes no <i>set-up</i> AIM. . . . .	43
Figura 27 – Testes de esforços, folgas e movimentos dos suportes em acrílico do PPBIO e Lente Cilíndrica em MDF da Lente Colimadora. . . . .	44
Figura 28 – Fluxograma da metodologia do trabalho. . . . .	46
Figura 29 – Desenho da estrutura automatizada proposta com destaque para seu chassi. . . . .	47
Figura 30 – Detalhes para a disposição e design das estruturas desenvolvidas, com destaque para o suporte L. . . . .	47
Figura 31 – Projeto da tampa superior, detalhes das persianas e do cooler. . . . .	48
Figura 32 – IHM touch screen . . . . .	50
Figura 33 – Fluxograma do algoritmo com as rotinas de inicialização e tomadas de decisões . . . . .	51
Figura 34 – Laser Diodo 670 nm do fabricante Thorlabs . . . . .	52

Figura 35 – Plataforma completa: a) Botões de acionamentos dos suportes L e <i>cooler</i> ; b) Conjunto <i>Case</i> e a plataforma no interior do invólucro; c) Painel de instrumentos eletro-eletrônicos. . . . .	53
Figura 36 – Alinhamento óptico, detalhe do motor da câmera. . . . .	54
Figura 37 – Detalhe do alinhamento entre a câmera e o PPBIO. . . . .	54
Figura 38 – plataforma experimental automatizada para sensor SPR baseado no PPBIO. Indicação das partes automatizadas. Suportes L acoplados aos eixos para permitir a movimentação dos componentes. . . . .	55
Figura 39 – Digrama Interligação dos Botões . . . . .	56
Figura 40 – Digrama Interligação dos Motores . . . . .	56
Figura 41 – Digrama Interligação dos Sensores de Distância e a Tela Touch Screen. . . .	57
Figura 42 – Digrama Interligação do Sensor de Temperatura-Humidade e o Cooler. . . .	58
Figura 43 – Interface Touch Screen: a) Apresenta a tela de inicialização principal; a Figura b) Apresenta ao usuário os submenus: Sensores de distância, Temperatura, umidade e liga/desliga <i>cooler</i> manualmente; a Figura c) Apresenta ao usuário a distância em mm da Lente Colimadora e Cilíndrica, Prisma e a Câmera em relação a sua base e a Figura d) Apresenta a temperatura ambiente no interior do case. . . . .	58
Figura 44 – Painel de componentes eletrônicos composto por: Arduino <i>Master</i> e <i>Slave</i> , módulo relé dois canais, driver A4988, fonte de tensão ajustável e módulo regulador de tensão. . . . .	59
Figura 45 – Curvas SPR obtidas com a plataforma automatizada. Influência do desali- nhamento mecânico na resposta. Imagem SPR capturada ilustrando a correta excitação do fenômeno. . . . .	60
Figura 46 – Base Inferior da Plataforma . . . . .	69
Figura 47 – Borda A Case . . . . .	69
Figura 48 – Borda B Case . . . . .	70
Figura 49 – Laterais Case . . . . .	70
Figura 50 – Tampa Traseira Case . . . . .	71
Figura 51 – Pé Plataforma . . . . .	71
Figura 52 – Pé B Plataforma . . . . .	72
Figura 53 – Persiana Case . . . . .	72

Figura 54 – Piso Case . . . . .	73
Figura 55 – Suportes dos Motores . . . . .	73
Figura 56 – Suportes L Plataforma . . . . .	74
Figura 57 – Suportes Persiana Case . . . . .	74
Figura 58 – Suporte Lente Cilíndrica . . . . .	75
Figura 59 – Tampa Cooler Case . . . . .	75
Figura 60 – Tampa Frontal Case . . . . .	76
Figura 61 – Teto Case . . . . .	76
Figura 62 – Trilho da Tampa Frontal Case . . . . .	77
Figura 63 – Digrama Interligação do Motor de passo da câmera . . . . .	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos relacionados versus lacunas . . . . .	34
Tabela 2 – Tabela compoarativa entre as diferentes curvas SPR. . . . .	60



## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>AIM</i>	Modo de Interrogação Angular
<i>ATR</i>	<i>Attenuated Total Reflection</i>
<i>FWHM</i>	Largura da curva SPR (Full Width at Half Maximum)
<i>IR</i>	Índice de Refração
<i>LED</i>	Diodo emissor de luz (Light Emitting Diode)
<i>OP</i>	Pronto de Operação
<i>PPBIO</i>	Prisma Polimérico para aplicações BIOLógicas
<i>RIT</i>	Reflexão Interna Total
<i>RIU</i>	Refractive Index Unit
<i>SP</i>	<i>Surface Plasmons</i>
<i>SPR</i>	<i>Surface Plasmons Resonance</i>
<i>WIM</i>	Modo de Interrogação Espectral
$\beta_j$	Absorbância
$\varepsilon$	Permissividade
$\varepsilon_i$	Permissividade do meio i do arranjo multicamadas
$\varepsilon_0$	Permissividade do vácuo
$\lambda$	Comprimento de onda
$\lambda_{res}$ ou $\lambda_R$	Comprimento de onda plasmônico ou comprimento de onda de ressonância
$\mu$	Permeabilidade
$\omega$	Frequência angular
$\theta_{res}$ ou $\theta_R$	Ângulo plasmônico ou ângulo de ressonância
$C_r/C_r$	Comprimento do mínimo até o ponto médio da onda do lado direito e esquerdo
$d_i$	Espessura do meio i do arranjo multicamadas
$E$	Campo elétrico
$E_{ev}$	Campo evanescente
$K_{px}$	Componente horizontal do vetor de onda da luz incidente

$K_{sp}$	Vetor de onda dos plamons de superfície
$K_p$	Vetor de onda da luz incidente
$n_i$	Índice de Refração do meio $i$ do arranjo multicamadas
$q_j$	Admitância
$r(\lambda)$	Coefficiente de refletividade de Fresnel - WIM
$r(\theta)$	Coefficiente de refletividade de Fresnel - AIM
$S_\lambda$	Sensibilidade do sensor SPR operando no modo WIM
$S_\theta$	Sensibilidade do sensor SPR operando no modo AIM



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Desempenho geométrico e térmico do prisma PPBIO</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>25</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivo</b>	<b>26</b>
<b>1.4</b>	<b>Trabalhos relacionados</b>	<b>26</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>33</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>36</b>
<b>2.1</b>	<b>Aspectos teóricos sobre SPR</b>	<b>36</b>
<b>2.2</b>	<b>Análise de Fresnel</b>	<b>36</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise geométrico do sistema óptico baseado no PPBIO</b>	<b>39</b>
<b>2.4</b>	<b>Sensibilidade do sensor SPR</b>	<b>41</b>
<b>2.5</b>	<b>Resumo</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Estrutura Mecânica</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Instrumentação eletrônica</b>	<b>48</b>
3.2.1	Motores de passo	48
3.2.2	Sensores	49
3.2.3	Display	49
3.2.4	Sistemas embarcados	49
3.2.5	Elementos ópticos-eletrônicos para excitação da SPR	51
<b>3.3</b>	<b>Resumo</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Plataforma automatizada SPR (PA-SPR)</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Experimento</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE A – Desenhos</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE B – Lista de Entradas e Saídas</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE C – Diagrama de Interligação</b>	<b>82</b>

<b>APÊNDICE D – Artigo Publicado em Congresso</b> . . . . .	83
<b>ANEXOS</b> . . . . .	83

## 1 INTRODUÇÃO

Os sensores de Ressonância de Plasmon de Superfície (SPR) valem-se da geração de campos evanescentes devido a interação ressonante entre fótons e elétrons, quando uma interface metal/dielétrico é iluminada em condições específicas de ângulo, polarização, comprimento de onda, energia e tipo de metal (OLIVEIRA et al., 2019a). O comportamento ressonante desse acoplamento é governado tanto pelas características ópticas dos materiais quanto pelas condições de instrumentação usadas para o acoplamento óptico entre os fótons com a densidade de carga de elétrons livres, os denominados plasmons de superfície (SP). O campo evanescente, gerado na SPR, fica confinado à fronteira do metal e da substância em análise (amostra), sendo muito sensível a qualquer alteração nessa interface, tal como a adsorção de moléculas na superfície do metal.

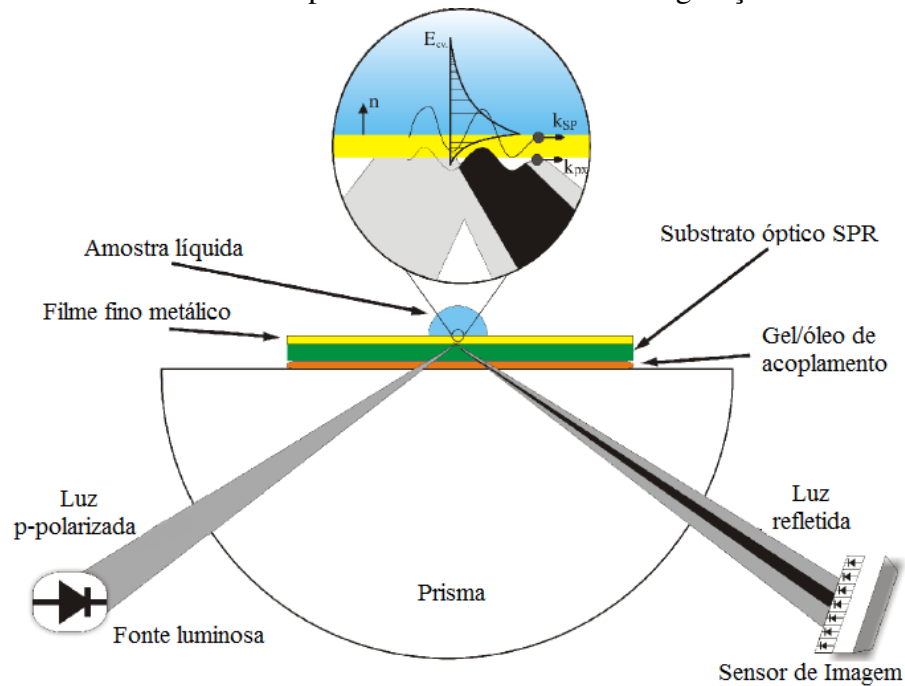
Os instrumentos projetados com base nos princípios da tecnologia de espectroscopia são caros, e a complicada preparação de amostras e profissionais treinados são necessários nas operações para detectar os analitos qualitativa e quantitativamente. Historicamente, o desenvolvimento de sensores SPR dar-se a partir da reflexão interna total atenuada (ATR, sigla em inglês para Attenuated Total Reflection) através de prismas-acoplados (KRETSCHMANN; KRÖGER, 1975). Em particular, a configuração ATR em prismas proposta por Kretschmann apresentou resultado eficaz passando a ser a abordagem mais utilizada em sensores SPR (HOMOLA, 2006).

Em síntese, a configuração de Kretschmann compreende um filme fino de metal posicionado entre dois meios dielétricos, iguais ou diferentes, colocados sobre um material opticamente transmissivo, o prisma, como ilustrado na Figura 1. Além do mais, a viabilidade, ou não, do uso de determinados materiais, que compõem a multicamada, são determinadas por algumas especificações técnicas pertinentes ao espectro de excitação, tipo de detector óptico, tipo de fonte de luz, dimensões, ângulos e geometria do caminho óptico.

A excitação dos Plasmons de Superfície (SP) dá-se por meio da incidência de luz p-polarizada na multicamada, ou seja, sob a condição de reflexão interna total (RIT). A luz com polarização tipo p possui campo elétrico paralelo e campo magnético perpendicular ao plano de incidência.

Uma vez que o ponto, sob iluminação no plano, não é preservado estacionário no decorrer da variação do ângulo de incidência, o resultado da refração faz com que o feixe não ilumine a região sensível quando o ângulo de incidência varia, ou seja, este tipo de problema de alinhamento poderá ser resolvido com a implementação da instrumentação automatizada,

Figura 1 – Elementos necessários para um sensor SPR na configuração ATR - Kretschmann



Fonte: Oliveira (2016).

afim de manter invariável o ponto na superfície metálica para determinado ângulo de incidência (CARVALHO *et al.*, 2003).

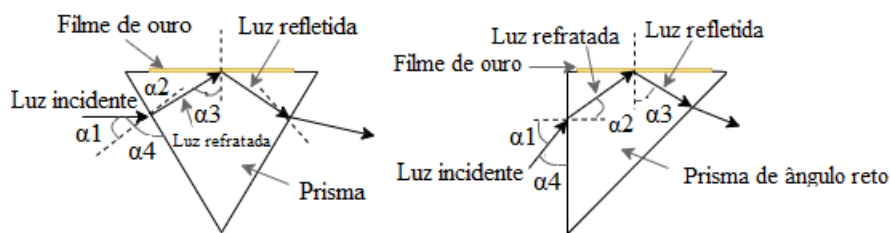
A instrumentação de um sensor SPR exige componentes ópticos, eletrônicos, fluídicos e mecânicos, cuidadosamente posicionados para a correta excitação do fenômeno.

Para excitação da ocorrência física, o Sistema Óptico ajusta o feixe de luz às condições ópticas essenciais de polarização, foco e posição de incidência para a qual se atinge a reflexão interna total (RIT). O Sistema Microfluídico do sensor SPR é incumbido pela entrega (sistema propulsor, i.e., bomba peristáltica) e confinamento (célula de fluxo) da amostra, que pode ou não conter o analito (substância sob análise), à superfície sensível do sensor. Nesse ponto, a substância sob análise entra em contato com o biorreceptor (no caso de um biossensor SPR) estagnado na superfície metálica, produzindo uma variação de índice de refração que pode ser detectado pelo transdutor óptico. O Sistema Multicamadas contém os materiais usados para a confecção do sensor, incluindo o par substrato/metal e uma camada bioespecífica (biorreceptor) que compartilha com as substâncias contidas no analito. Os biorreceptores podem ser: DNA, ácidos nucleicos, tecidos de animais ou plantas, células de animais ou plantas, enzimas, micróbios etc., enfim, uma Unidade de Aquisição, Controle, Processamento e Exibição (UACPE), é empregada para obtenção dos sinais e apresentação da resposta. O sistema de aquisição, tratamento e geração dos dados indica ao usuário se o analito foi detectado ou não e a quantidade

de analito na substância, além de informes sobre especificidade, força e rapidez com que ocorreu a reação analito-biorreceptor.

Muitos trabalhos científicos e de engenharia detalham o desenvolvimento de sensores com prismas triangulares (BRAHMACHARI; RAY, 2013), trapezoidais (TANABE; AL., 2017) e semicilíndricos (HERNÁNDEZ; AL., 2018; AKIMOTO; AL., 2000), que em geral exigem componentes rotacionais para excitação e detecção da ressonância, a Figura 2 ilustra o prisma triangular e o prisma de ângulo reto. Prismas específicos (HU, 2016) evitam o uso destes elementos rotacionais, mas podem exigir instrumentação complexa devido aos ângulos e organização dos elementos óptico-eletrônicos. Arranjos ópticos complexos usando prismas podem ser encontrados para o desenvolvimento de sensores SPR baseados em *smartphones* (LERTVACHIRAPAIBOON; AL., 2018).

Figura 2 – a) Estrutura de prisma triangular equilátero tradicional. b) Estrutura de prisma de ângulo reto.



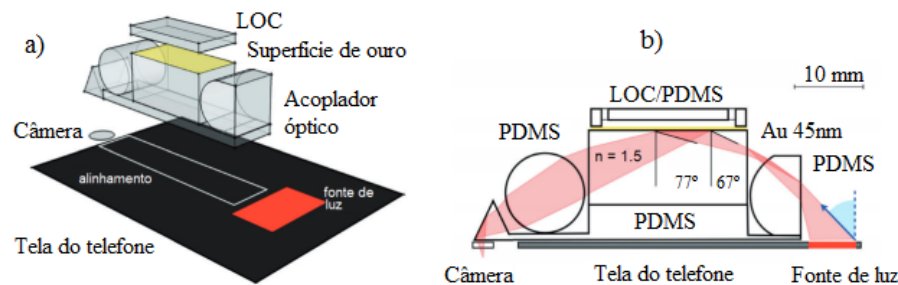
Fonte: Hu *et al.* (2016) adaptado.

Os prismas triangulares utilizados para a reflexão total interna apresentam problemas, pois requerem um sistema de rotação mecânica do prisma para a detecção automática do feixe refletido além do mais o feixe, ao entrar no prisma, sofre um ínfimo desvio em sua trajetória, e a proporção que o prisma gira esse desvio muda, acarretando que o feixe não atinja a interface no ponto desejado. A presença de pequenas inconsistências em sua superfície causa um aumento na largura angular da curva de ressonância, causando um aumento no erro de obtenção dos parâmetros físicos da interface (FONTANA *et al.*, 1990), (OTTO, 1968), (FONTANA, 1996), (BRUIJN *et al.*, 1990), (RICHARDS *et al.*, 1993).

Preechaburana *et al.* (2012), em seu trabalho, apresenta uma solução para problemas angulares, pois o biossensor dispensa o uso de sistemas rotativos ou goniômetros, não havendo necessidade de óleos / géis, o desgaste mecânico do sistema óptico é evitado, uma vez que não há contato físico entre o sistema óptico e o chip do sensor. De acordo com as imagens ilustradas na Figura 3, o primeiro sistema de detecção de ressonância de Plasmon de Superfície

(SPR) é baseado em um único dispositivo descartável, que é configurado para usar iluminação condicionada e detecção óptica de telefones celulares. No arranjo experimental, utilizado na Figura 3 a), a fonte de luz é fornecida por uma imagem exibida na tela do celular, no caso um retângulo vermelho, e uma moldura branca delinea o posicionamento do acoplador óptico.

Figura 3 – a) Esquema 3D de uma configuração representativa para SPR com resolução de ângulo usando iluminação de tela e detecção de câmera frontal opticamente acoplada por um dispositivo descartável. b) Traçado de raio 2D do arranjo experimental mostrando o caminho da luz da tela para a câmera.



Fonte: Preechaburana *et al.* (2012) adaptado.

### 1.1 Desempenho geométrico e térmico do prisma PPBIO

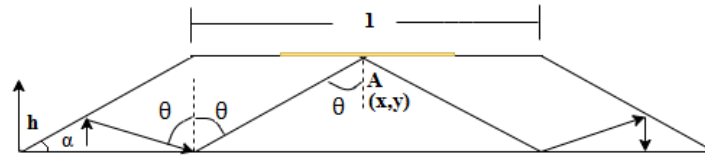
Projetado e desenvolvido por Moreira *et al.* (2009), o Prisma Polimérico para aplicações Biológicas (PPBIO), foi o primeiro biochip óptico SPR construído no Brasil. Com uma geometria trapezoidal bastante simples, o prisma polimérico não necessita de elementos internos, como, por exemplo, grades de difração ou elementos eletro-ópticos integrados, suas superfícies laterais são espelhadas para que haja a reflexão da luz incidente, possuindo uma camada metálica depositada na base superior, dispensando a utilização de gel ou óleo para o acoplamento da superfície acoplada. Suas particularidades geométricas trapezoidais, possibilita que o feixe de luz obtenha uma incidência perpendicular na área inferior do PPBIO. Outra vantagem do PPBIO é a não necessidade de algum elemento mecânico rotativo para variação do ângulo, ou seja, o PPBIO resolve os problemas rotacionais de incidência dos feixes luminosos de entrada.

O dimensionamento do PPBIO projetado por Moreira *et al.* (2009) e usado no *set-up*, implementado por Oliveira *et al.* (2013), conforme demonstrado na Figura 4, indica o caminho ideal do feixe de luz através do biochip.

O prisma em sua forma trapezoidal com altura ( $h$ ), contempla duas superfícies paralelas que possibilitam um trajeto óptico dos raios luminosos, raios estes que chegam e saem perpendicular à base inferior do prisma. O ângulo de inclinação das paredes laterais ( $\alpha$ ) é metade

do ângulo de incidência na superfície de medição ( $\theta$ ),  $\alpha = \theta/2$ , padronizando as dimensões do prisma. Para maiores informações indicamos a referência Oliveira *et al.* (2013).

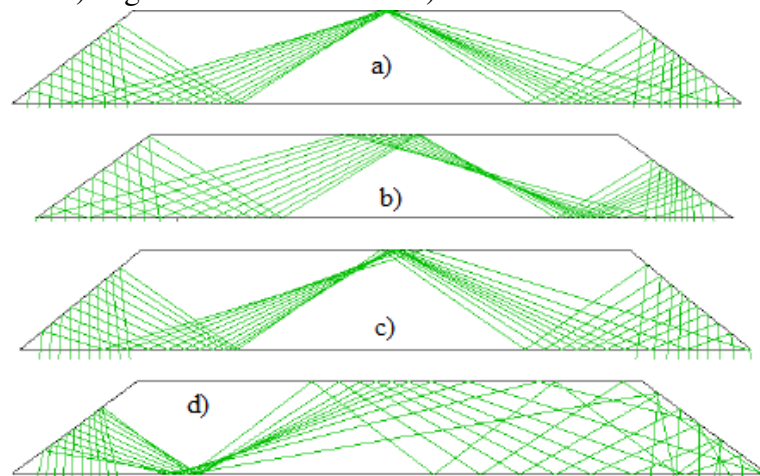
Figura 4 – Detalhes do caminho óptico percorrido pelos feixes luminosos.



Fonte: Moreira *et al.* (2009) Adaptado.

No modo de interrogação angular (quando o comprimento de onda da luz incidente é fixo e o ângulo de incidência é variado), quando o laser atingir a superfície lateral do prisma, considerando o correto alinhamento de todos os elementos, a dispersão dos feixes luminosos atinge corretamente a região sensível (*sensing spot*), como ilustrado na Figura 5a). Na situação de alinhamento correto, o espectro angular é obtido e a região sensível alinha-se precisamente ao foco dos feixes luminosos, dessa forma a iluminação ocorre de forma precisa. Desalinhamentos verticais positivos ou negativos (Figs. 5 b-c, respectivamente) ou desalinhamentos horizontais (Fig 5d) de algum dos elementos ocasionam má formação da imagem SPR e a dispersão dentro do prisma ocorre de forma desordenada, podendo ser ocasionada pela variação da posição horizontal ou vertical da lente cilíndrica.

Figura 5 – a) Dispersão dos feixes luminosos dentro do PPBIO para alinhamento correto de todos os elementos que compõem o *set-up* experimental. Desalinhamento vertical b) positivo e c) negativo dos elementos. d) Desalinhamento horizontal dos elementos.



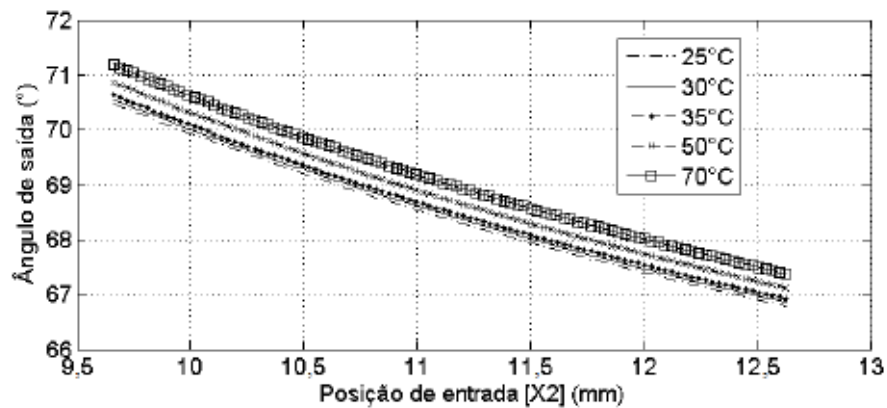
Fonte: Oliveira *et al.* (2017) .

Pesquisas minuciosas realizadas por Oliveira *et al.* (2017) sobre a geometria do prisma, sugerem a obrigatoriedade de caracterizar como a temperatura influenciará o caminho

óptico percorrido pelos feixes luminosos ao traspassarem o prisma. As temperaturas no *range* de 50° C e 70° C, nas quais os prismas são empregados, poderão alterar o ângulo de incidência ( $\theta$ ) que também modificará, e conseqüentemente, prejudicará a resposta SPR. (ZHANG *et al.*, 2008).

As conseqüências observadas por Oliveira *et al.* (2017) indicam os efeitos da temperatura sobre o prisma óptico, acarretando uma deformação que dilata/comprime do ponto central para as pontas, as modificações produzidas pela temperatura ocasionam alteração no caminho óptico e no foco Figura 7, mudando a condição de acoplamento óptico e medição da SPR.

Figura 6 – O Gráfico ilustra a variação do ângulo de ressonância em função da posição de entrada causada pela temperatura.



Fonte: Oliveira *et al.* (2017).

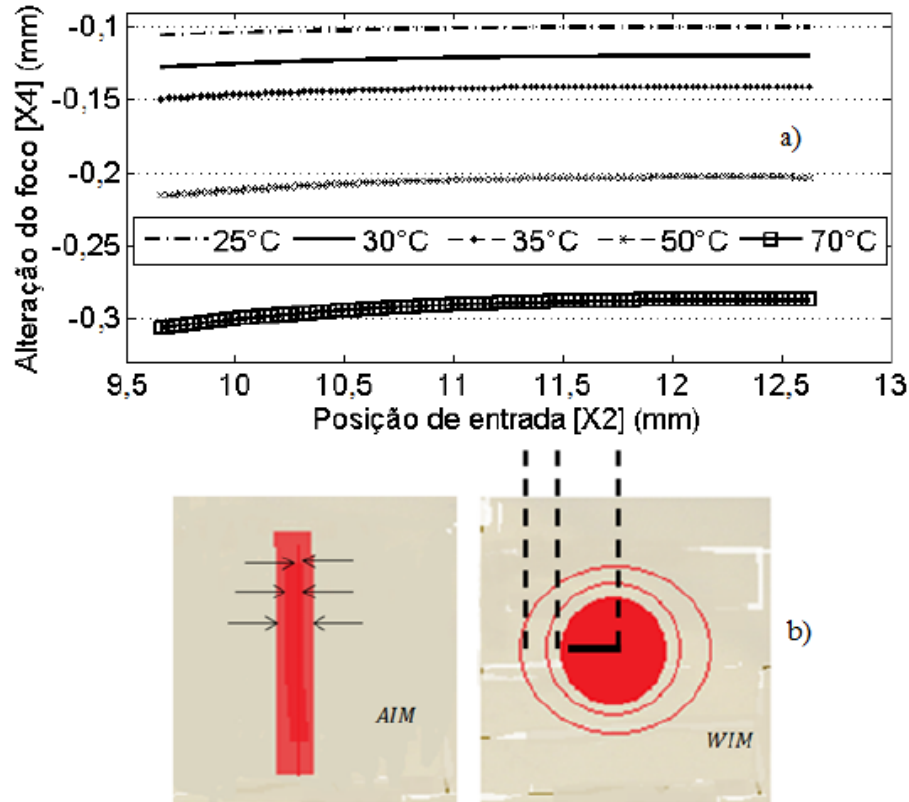
Utilizada para testes experimentais, a plataforma mecânica opera no modo AIM (quando o comprimento de onda da luz incidente é fixo e o ângulo de incidência é variado). Nesse tipo de plataforma, não há necessidade de elementos mecânicos rotativos, nem há necessidade da utilização de óleos/géis, problemas estes resolvidos pela utilização do PPBIO. O diagrama de blocos do modo AIM mostrado na Figura 8 a) apresenta os elementos ópticos-eletrônicos e a Figura 8 b) apresenta a plataforma montada, destacam-se os componentes eletro-ópticos empregados.

No entanto, os problemas de desgastes mecânicos do sistema óptico são inevitáveis. Problemas de alinhamento do acoplamento óptico em relação aos elementos do sensor, ou seja, a posição da linha focal nem sempre é mantida fixa sob os elementos do sensor. Isso é importante para o perfeito acoplamento do biossensor. A correta dispersão dos feixes luminosos no interior do PPBIO é representada na Figura 5 a).

O desempenho instrumental e a sensibilidade dos sensores (SPR) são impactados pelas variações de temperatura. Além dos deslocamentos óptico-mecânicos induzidos pela tem-



Figura 7 – a) Alteração do foco em função da posição de entrada causada por diferentes temperaturas. b) Desfoque no ponto de detecção causado pelo aumento da temperatura.



Fonte: Oliveira *et al.* (2017).

peratura, destaca-se as pequenas distorções no caminho óptico, o qual acarreta o desalinhamento no caminho óptico e borrões no foco.

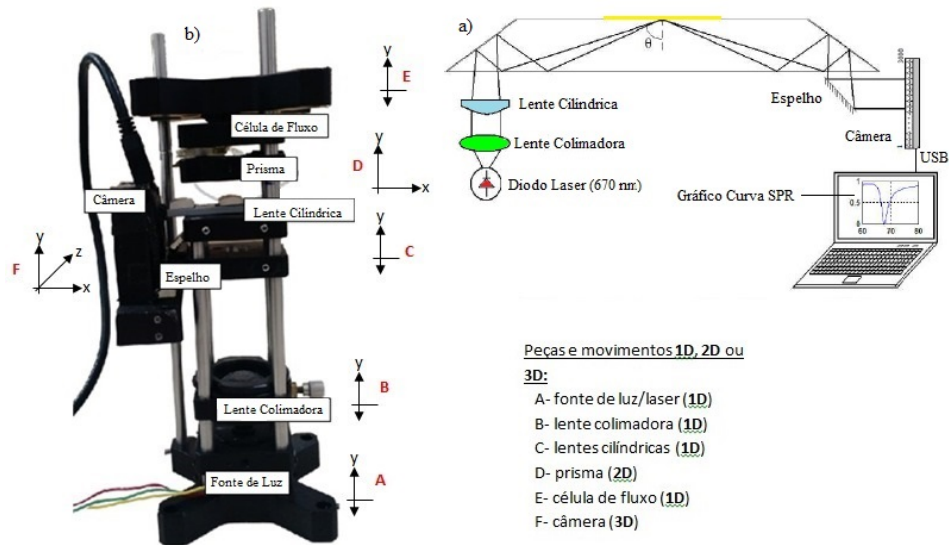
O desalinhamento entre as lentes colimadora e a lente cilíndrica impedem que o feixe colimado ao entrar no interior do PPBIO o foco esteja na posição esperada (centro do PPBIO, região sensível).

É imprescindível, para a colimação e a convergência dos feixes luminosos, o ajuste preciso da posição correta entre os elementos ópticos, o qual é de suma importância para o cálculo do caminho óptico, no entanto, a plataforma mecânica não possui instrumentos de medição para indicar a posição precisa dessas distâncias.

Transfigura-se a dificuldade em ajustar o feixe sob o ponto de teste na superfície do prisma para um certo ângulo de incidência, mesmo com o auxílio visual sobre o feixe, além disso, observa-se o contratempo de realizar o alinhamento mecânico, ajustar o range de operação câmera/sensor, problemas de eficiência da detecção e a baixa velocidade da análise da amostra devido as complexas operações manuais.

As mudanças no projeto, *design* e na estrutura da plataforma mecânica baseada no

Figura 8 – Plataforma baseada no prisma PPBIO



Fonte: Oliveira (2016) adaptado.

prisma PPBIO, possibilitarão a determinação e a correção do posicionamento do prisma para um determinado ângulo  $\theta$ , que apresentará uma melhora significativa na interferência da temperatura, garantindo um melhor caminho óptico da luz no interior do prisma e evitando o espalhamento dos feixes luminosos, com fácil manuseio e realização de testes mais rápidos e precisos.

## 1.2 Justificativa

É hábil saber que os instrumentos baseados em SPR usam um mecanismo óptico para medir o índice de refração perto de uma superfície do sensor. Os instrumentos SPR consistem basicamente de três unidades essenciais integradas em um único sistema: unidade óptica, unidade de manipulação de líquidos e a estrutura multicamadas. A instrumentação e a configuração utilizada para o desenvolvimento do sensor SPR têm uma interferência vital na qualidade da medição da interação. O sensor forma uma barreira física entre a unidade óptica (seção seca) e a célula de fluxo (seção úmida). Para detectar um evento biológico as ligações das biomoléculas se concentram na superfície do sensor e altera o índice de refração, além da necessidade de ajustes para que ocorra um melhor acoplamento. A plataforma automatizada tem a finalidade de permitir que cada elemento que compõem o sensor SPR, baseado no PPBIO, tenha seu grau de liberdade para ajustar-se de forma independente, adaptando-se aos numerosos usos acadêmicos, trazendo maior confiabilidade, produtividade, análise em tempo real com configuração vertical e horizontal para detectar precisamente a posição de pico plasmônico, oferecendo uma maior sensibilidade para medir menores interações e possibilitar a correção

geométrica, dado as condições experimentais, o ajuste dinâmico da posição das peças e o controle de temperatura dentro do invólucro da plataforma (*case*).

### 1.3 Objetivo

Desenvolver uma plataforma automatizada para sensor de ressonância de plasmons de superfície, de tal modo que seja possível realizar ajustes automáticos entre seus elementos ópticos, prisma e a célula de fluxo. Apresenta-se os objetivos específicos deste trabalho:

1. Projetar e Desenvolver uma plataforma para o sensor SPR, baseado no PPBIO;
2. Automatizar a plataforma do sensor SPR baseado no PPBIO;
3. Desenvolver o algoritmo de controle de posicionamento dos motores de passo;
4. Desenvolver um aplicativo para controlar a plataforma manualmente e remotamente;
5. Controlar e manter variável temperatura sob controle;
6. Testar, analisar e comparar os dados gerados da plataforma automatizada com os resultados gerados pela plataforma PPBIO.

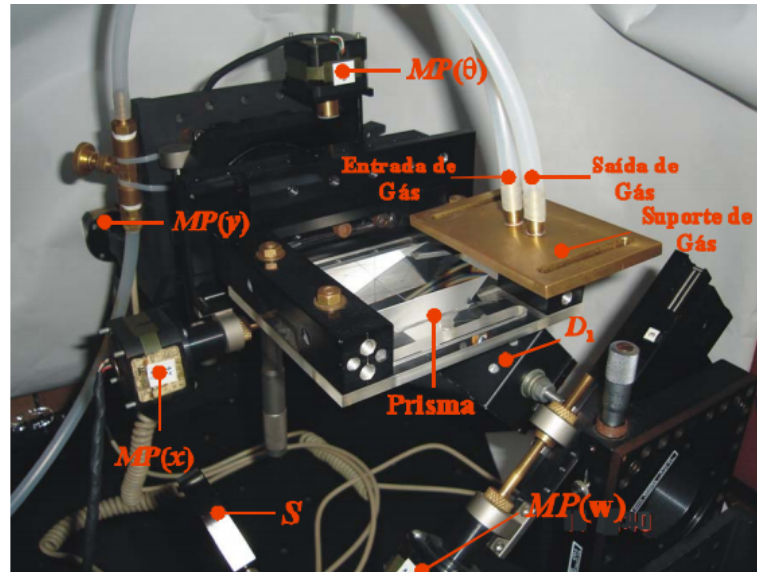
### 1.4 Trabalhos relacionados

Esta seção apresenta alguns trabalhos que utilizam técnicas para construção de Plataformas automatizadas para sensores de ressonância de plasmons de superfície.

O trabalho de Cavalcanti (2008) aborda o desenvolvimento e a implementação de um reflectômetro óptico controlado por computador e sua aplicação na caracterização de filmes de ouro, de paládio e de ouro/paládio. O sistema é formado por diversos componentes acionados por motores de passo, interface eletrônica e software de controle, permitindo a construção e a execução automática de experimentos, sendo sua principal característica o ponto de reflexão na superfície estacionária, independente do ângulo de incidência do feixe de luz, como ilustrado na Figura 9.

O trabalho de Ponte (2003), baseado na configuração de Krestschamann, explora a implementação de um espectômetro de plásmons de superfície para o desenvolvimento de sensores biológicos. Operando no modo de comprimento de onda fixo, com a componente do vetor de onda do feixe de luz incidente paralela à superfície sendo o parâmetro de varredura do sistema de medição.

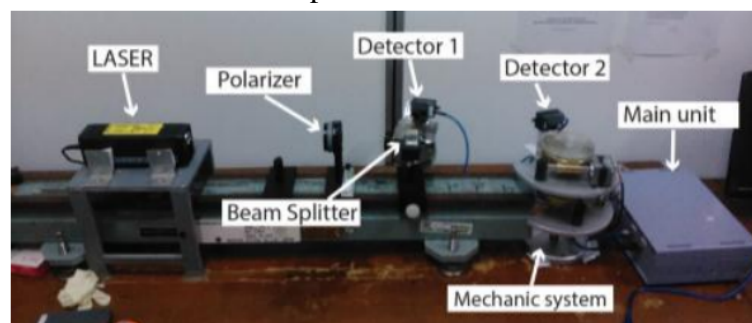
Figura 9 – Reflectômetro: S-splitter,  $D_1$ , Fotodetector do sinal, MP ( $\theta$ ) - Motor de passo do estágio de rotação, MP(x) - Motor de passo de translação x MP(y) - Motor de passo para translação y MP(w) - Motor de passo para correção do fotodetector  $D_1$



Fonte: Cavalcanti (2008).

Laksono *et al.* (2018) desenvolveu um sistema que consiste em instrumento de sistema mecânico, sensor de potência de laser e interface de usuário. O sistema mecânico usa um design de engrenagem anti-folga que foi capaz de melhorar o ângulo de resolução angular do laser de incidência até  $0,01^\circ$ . Foi utilizado o sistema de aquisição de detector a laser e um controlador de motor de passo, utilizando Arduino Uno. Além disso, empregou a interface de usuário do *LabView* como o instrumento virtual para facilitar a medição da amostra e para transformar a gravação de dados diretamente na forma digital, conforme ilustração da Figura 10.

Figura 10 – Espectrômetro desenvolvido por Laksono.

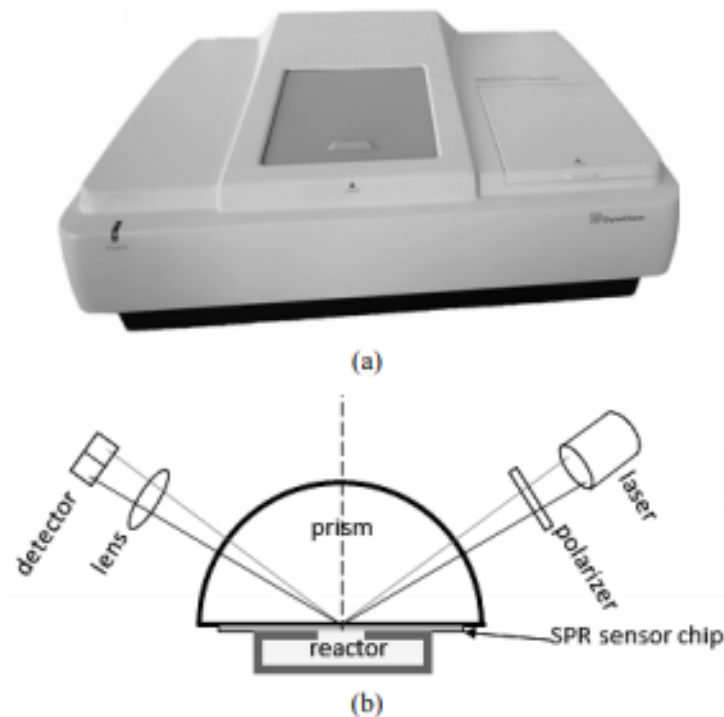


Fonte: Laksono *et al.* (2018).

Wang *et al.* (2016)relata em seu trabalho um espectrômetro de smartphone para aplicações de biossensor colorimétrico. O espectrômetro depende de uma célula de amostra com um substrato de grade a ela integrado, flash de diodo emissor de luz e câmera acoplados no smartphone. A viabilidade do espectrômetro de smartphone é demonstrada para detecção de

glicose e troponina I cardíaca humana, como lustrado na Figura 11.

Figura 11 – a) Imagem do espectômetro. b) diagrama de blocos do espectômetro.



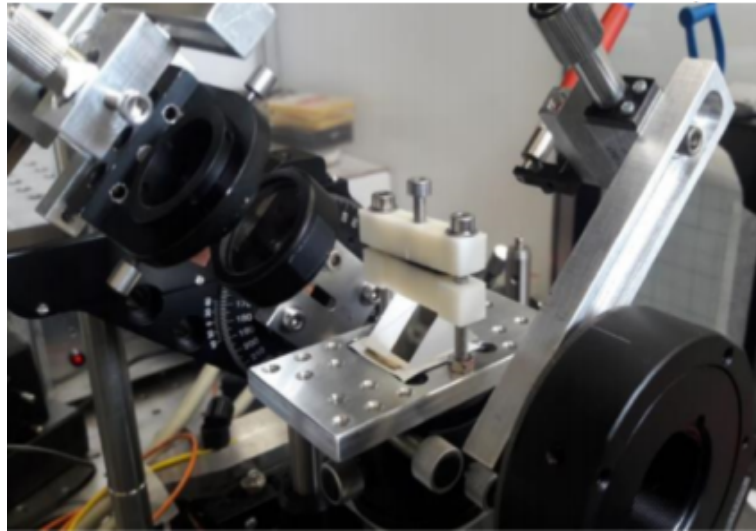
Fonte: Wang *et al.* (2016).

Oliveira *et al.* (2019b) propôs um sistema automatizado para a excitação de Plasmon de Superfície no Modo de Interrogação Angular, ilustrado na Figura 12. Tendo como principal objetivo o desenvolvimento de um equipamento no formato de elipsômetro para a medir a ressonância de plasmon nas configurações tradicionais com prisma (Configuração de Kretschmann e Configuração de Otto). Além disso, é proposto a automação do sistema, otimizando, desta forma, a aquisição e o processamento de dados.

Terceros *et al.* (2016) apresenta a implementação de um sistema mecânico que permite o posicionamento angular da rede de difração de um espectrômetro óptico, permitindo a ampliação de sua faixa espectral 13. Circuitos eletrônicos foram desenvolvidos para um micro servomotor controlado por um microcontrolador. Este microcontrolador PIC interage com um módulo *bluetooth* (HC-06) que permite a comunicação sem fio com o software de controle instalado em um *laptop*. O software desenvolvido permite a aquisição e o processamento em tempo real dos dados do espectrômetro, calibração e controle sem fio do posicionamento do microservomotor com resolução de 0,3nm

Zhou *et al.* (2017) projetaram e fabricaram um espectrômetro de ressonância de plasmon de superfície modulada em ângulo (SPR) com alta resolução para detecção de índice

Figura 12 – Espectrômetro adaptado para a configuração de Otto.



Fonte: Oliveira *et al.* (2019b).

Figura 13 – Espectrômetro de baixo custo.

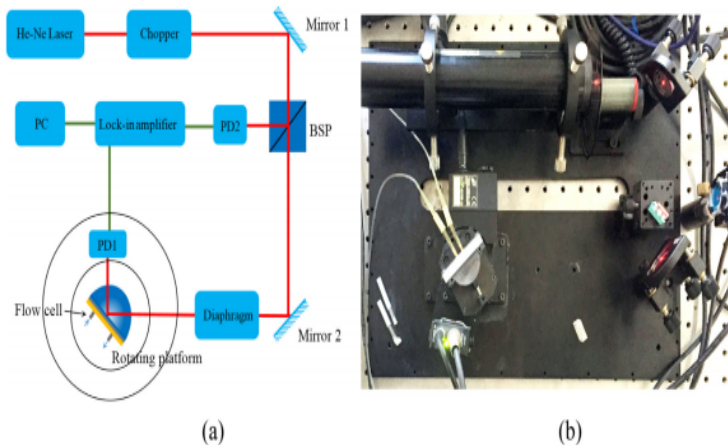


Fonte: Terceros *et al.* (2016).

de refração Figura 14. O espectrômetro SPR apresentado é baseado em uma configuração Kretschmann de cinco camadas. Para aumentar a sensibilidade e a resolução do espectrômetro SPR, introduziram um feixe de referência no sistema, que melhorou a estabilidade do sistema em quase uma ordem de magnitude. Simulação numérica e estudo experimental são apresentados e os resultados mostraram que uma sensibilidade de 85 graus / RIU (Unidade de Índice de refração) e uma boa repetibilidade (desvio padrão = 3,7 106 RIU) foram alcançados.

Hu *et al.* (2016) desenvolveram um sistema de detecção para um biossensor de ressonância de plasmon de superfície óptica de varredura de ângulo (SPR), projetado com um gerador de linha de laser, no qual um polarizador P é embutido para utilizar como uma fonte de excitação para produzir a onda de plasmon de superfície. Neste sistema, o feixe de emissão do gerador de linha a *laser* é controlado para realizar a varredura de ângulo usando

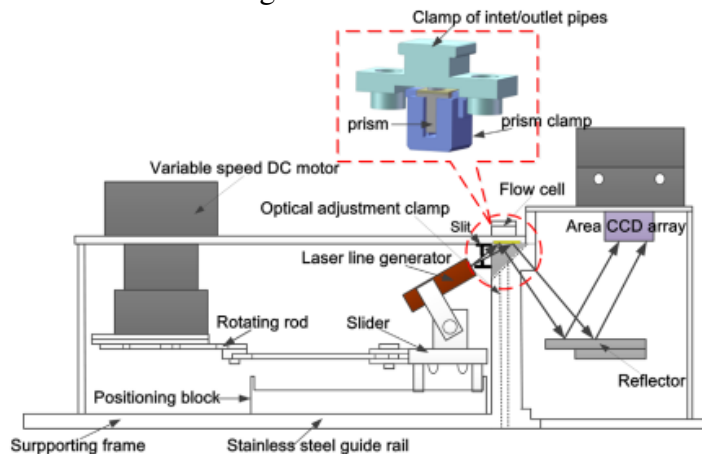
Figura 14 – a) Diagrama de blocos. b) Espectômetro.



Fonte: Zhou *et al.* (2017).

um motor de corrente contínua (DC) de velocidade variável. O feixe de luz refletido do prisma, depositado com um filme de Au de 50 nm, é então capturado usando o *array* CCD de área, que foi controlado por um computador pessoal (PC) por meio de uma interface de barramento serial universal (USB).

Figura 15 – Diagrama da estrutura do biossensor de ressonância de plasmon de superfície óptica baseado em varredura de ângulo usando laser.



Fonte: Hu *et al.* (2016).

A comercialização de instrumentos SPR cresceu nas últimas duas décadas. Um enorme progresso foi feito no estabelecimento de uma variedade de instrumentos SPR, desde instrumentos SPR de laboratório de alto desempenho, até dispositivos SPR em miniatura portáteis de fácil utilização e sistemas de imagem SPR de alto rendimento. Comercializados por diferentes fabricantes, categorizados em SPR de laboratório, portátil e de imagem. Os principais recursos de cada instrumento também são destacados na Tabela 1. Diferentes instrumentos podem ser adequados e comercializados para aplicações específicas conforme ilustrado nas Figuras 16, 17 e

18.

Figura 16 – BIACORE T200 baseado em laboratório.



Fonte: Biacore (2020).

Figura 17 – Biossensor de ressonância de plásmons de superfície Modelo Reichert2SPR do fabricante Reichert, baseado em laboratório.

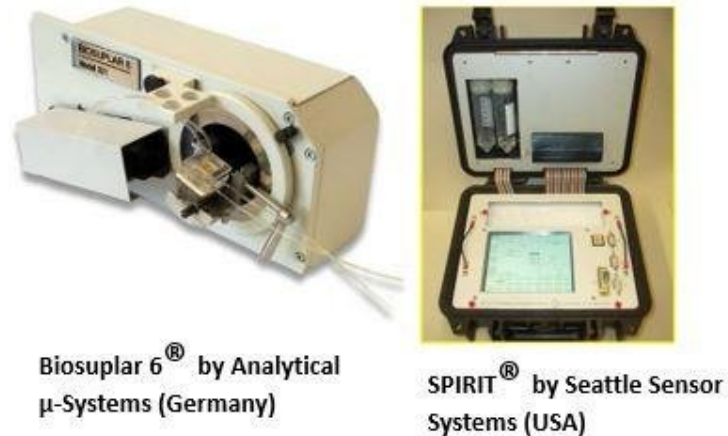


Fonte: directindustry (2020).

A plataforma automatizável proposta neste trabalho, apresenta algumas vantagens em comparação ao trabalho de Cavalcanti (2008), que apresentou a construção de um espectrômetro de plásmons de superfície automatizado para operação no infravermelho, para aplicações na caracterização de superfícies ópticas, filmes finos, e processos envolvendo reações de superfície para o desenvolvimento de sensores. Para esse espectrômetro foi desenvolvido um procedimento analítico que permite determinar a translação a ser realizada na superfície para um dado ângulo de incidência, de forma a manter estacionário o ponto da superfície sob iluminação. No entanto outro problema consiste em determinar a correção de posicionamento do prisma para um dado ângulo de rotação de forma que o ponto de iluminação permaneça estacionário sobre a superfície.



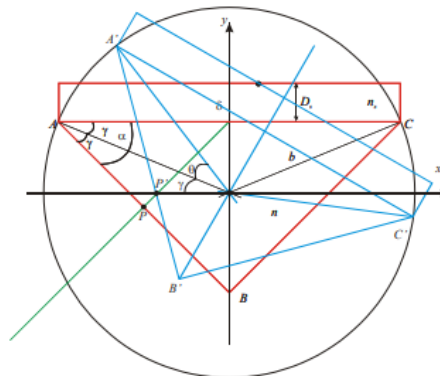
Figura 18 – Equipamentos portáteis Biosuplar 6 e o Spirit. analíticas.



Fonte: Couture *et al.* (2013) adaptado.

A plataforma automatizável trouxe vantagens, melhorias, soluções simples e eficazes para os problemas rotacionais por meio do PPBIO, este biossensor opera no modo AIM, evitando o uso de sistemas rotacionais, sistemas compostos por prisma triangulares possuem um sistema de rotação complexa, ilustrado na imagem 19, para solucionar esses problemas rotacionais a plataforma propôs um sistema simples e eficaz composto por quatro eixos individuais no qual o usuário pode realizar o ajuste dos seus instrumentos, por meio de botões de forma rápida e fácil. O sistema de controle de temperatura contribuiu para a redução dos efeitos da térmicos evitando a deformação do PPBIO que dilatava/Comprimia-se do ponto central para as extremidades que alterava o caminho óptico mudando a condição de acoplamento óptico e a medição da SPR.

Figura 19 – Rotação do prisma em torno no próprio centro.

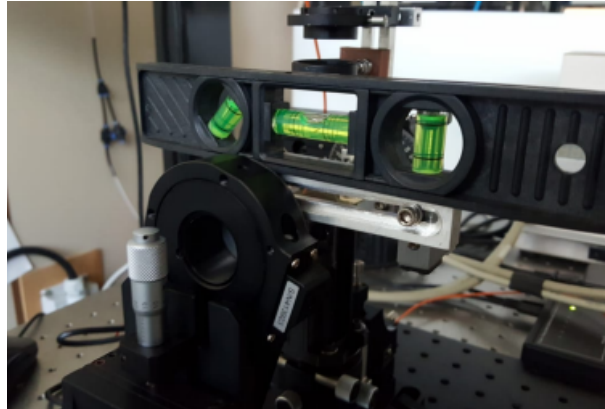


Fonte: Cavalcanti (2008).

O trabalho de Oliveira *et al.* (2019b) desenvolveu um equipamento no formato de elipsômetro para a medição da ressonância de plasmon nas configurações tradicionais com prisma (Configuração de Kretschmann e Configuração de Otto). Este equipamento é composto

por goniômetros é necessário definir o ângulo de posição inicial do goniômetro da fonte de luz e do detector. O goniômetro da fonte deve ser posicionado normal à mesa ótica e o goniômetro do detector posicionado tangente à mesa, ou seja, é necessário um complexo sistema de rotação mecânica e alinhamento ilustrado na imagem 20, outro problema é que quando o feixe entrar no prisma, sofre um infinitesimal desvio em sua trajetória, e conforme o prisma gira esse desvio muda, acarretando que o feixe não atinja a interface no ponto desejado. A vantagem plataforma automatizável em relação ao trabalho Oliveira *et al.* (2019b) é que este sistema utiliza o biossensor PPBIO, dispensa o uso de sistemas com goniômetros, não havendo necessidade de óleos / géis, o desgaste mecânico do sistema óptico é evitado, uma vez que não há contato físico entre o sistema óptico e o chip do sensor.

Figura 20 – Nivelamento do goniômetro do detector em relação à mesa ótica.



Fonte: Oliveira *et al.* (2019b).

Perante o levantamento realizado, este trabalho trata os ruídos provenientes do processo de instrumentação de sensores SPR por meio do correto alinhamento óptico e de temperatura, gerando uma melhor resposta, estabilidade, sensibilidade com boa repetitividade e maior precisão, sem degradar a cinética das reações. Na Tabela 1 são listados os trabalhos citados de forma resumida. Nessa tabela são apresentadas as referências, métodos aplicados, objetivos, sensor e a aplicação na ressonância de plasmons de superfície.

## 1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro abordou a parte introdutória, apresentando informações sobre o tema, juntamente com a motivação e os objetivos deste estudo. O segundo capítulo, Fundamentação teórica, aborda e apresenta a base de conhecimento e os principais conceitos para a realização deste trabalho à luz de importantes

Tabela 1 – Trabalhos relacionados versus lacunas

Autor	Ajuste	Modo de Operação	Principais Características
Cavalcanti (2008)	Automático	SPR-WIM	O ponto de reflexão na superfície estacionário, independente do ângulo de incidência do feixe de luz.
Ponte (2003)	Automático	SPR-WIM	Operar no modo de comprimento de onda fixo, com a componente do vetor de onda do feixe de luz incidente paralela a superfície sendo o parâmetro de varredura do sistema de medição.
Laksono <i>et al.</i> (2018)	Automático	SPR-WIM	Reduzir o tempo de medição e erros de registro de dados causados por erro humano. Além disso, os resultados do teste também concluíram que a medição do sistema é repetível e precisa.
Wang <i>et al.</i> (2016)	Automático	SPR-WIM	Desenvolver um sistema de detecção para biosensores SPR, de varredura de ângulo, e projetar um gerador de linha de laser no qual um polarizador P é embutido para utilizar como uma fonte de excitação para produzir a onda de plasmon de superfície.
Oliveira <i>et al.</i> (2019b)	Automático	SPR-WIM	desenvolver um equipamento no formato de elipsômetro para a medir a ressonância de plasmon nas configurações tradicionais com prisma (Configuração de Kretschmann e Configuração de Otto).
Terceros <i>et al.</i> (2016)	Automático	SPR-WIM	implementar um sistema mecânico que permite o posicionamento angular da rede de difração de um espectrômetro.
Zhou <i>et al.</i> (2017)	Automático	SPR-WIM	projetar e fabricar um espectrômetro de ressonância de plasmon de superfície (SPR) modulada em ângulo com alta resolução de detecção para detecção de índice de refração.
Hu <i>et al.</i> (2016)	Automático	SPR-WIM	desenvolver um sistema de detecção para um biossensor de ressonância de plasmon de superfície óptica de varredura de ângulo (SPR) e projetar um gerador de linha de laser no qual um polarizador P é embutido para utilizar como uma fonte de excitação para produzir a onda de plasmon de superfície.
Josiran (2020)	Automático	SPR-AIM	desenvolver uma plataforma automatizada para sensor baseado na ressonância de plasmons de superfície.

autores/pesquisadores, já mencionados. O terceiro capítulo, intitulado Materiais e métodos, demonstra todo o desenvolvimento da plataforma, estrutura física, eletrônica e software do projeto.

O quarto capítulo, Resultado parciais, traz os resultados e testes realizados com o protótipo desenvolvido. No quinto capítulo, Cronogramas de atividades, são expostas as atividades, tarefas que são desenvolvidas e o cronograma de execução.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Aspectos teóricos sobre SPR

O SPR foi classificado como uma ótima ferramenta para monitorar interações biomoleculares em variados campos de aplicações, mostrando alta sensibilidade em tempo real e capacidade de detecção sem marcadores desde o seu primeiro uso como sensor de detecção de gás em 1983. (LIEDBERG *et al.*, 1983). Geralmente, são empregados dois modos de interrogação nos biosensores SPR: um, em que ângulo de incidência é mantido constante com uma condição de acoplamento variando e dependendo do comprimento de onda, denominado modo de interrogação de comprimento de onda (WIM) e, o outro, no qual o comprimento de onda de luz incidente é fixo e o ângulo de incidência é variado, conhecido como modo de interrogação angular (AIM). (HOMOLA, 2003), (HOMOLA; PILIARIK, 2006).

Normalmente, a configuração de reflexão atenuada (ATR), conhecida como configuração de Raether (1988), empregada essencialmente para a caracterização de filmes finos, foi utilizada um prisma de vidro clássico e uma fonte de luz monocromática para estimular SPs em uma película de ouro de 50 nm. (CARVALHO *et al.*, 2003; LIEDBERG *et al.*, 1983)). A partir do primeiro biossensor SPR, diversos dispositivos comerciais e não comerciais de SPR tornaram-se propostos para inúmeros campos de aplicação, tais como, indústrias de monitoramento ambiental, indústrias farmacêuticas e médicas. (HU *et al.*, 2009; KUMBHAT *et al.*, 2010; MYSZKA; RICH, 2000). Algumas propostas, com a finalidade de reduzir o tamanho e o custo, tentaram agregar o aparato biossensorial SPR, como o uso de: prismas fundamentados em polímeros, usando *spreets* (CHINOWSKY *et al.*, 2003; CHINOWSKY *et al.*, 2007; ELKIND *et al.*, 1999), ou não embalados (LOUREIRO *et al.*, 2009; LOUREIRO *et al.*, 2011; MOREIRA *et al.*, 2010; THIRSTRUP *et al.*, 2004), padronizados (CENNAMO *et al.*, 2013) e microestruturados (DASH; JHA, 2014) fibras ópticas, equipamentos à base de silício (GHOSH; RAY, 2015; PATSKOVSKY *et al.*, 2003) e equipamentos fundamentado em nano partículas (ATAR *et al.*, 2015; RIVERO *et al.*, 2012; SENER *et al.*, 2011; WILLETS; DUYNE, 2007).

### 2.2 Análise de Fresnel

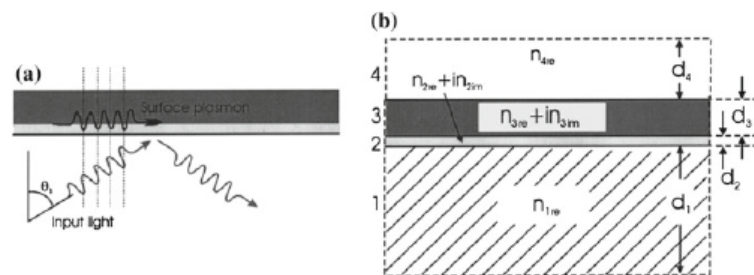
O conjunto de equações de Fresnel em sua representação matricial é a ferramenta adequada para analisar as excitações ópticas e as características dos sensores SPR, sendo essencial

para determinar a sensibilidade do biosensor SPR para os modos WIM e AIM. Permite o cálculo dos coeficientes de reflexão e transmissão de uma onda óptica, incidente sobre um conjunto de várias interfaces e meios, com um determinado ângulo de incidência entre dois meios com diferentes índices de refração (complexos). Nesta ocasião as equações são utilizadas em um sistema de multicamadas, compostas por 4 camadas com diferentes índices de refração, conforme ilustrado na Fig.21 a) e b) . (YEH *et al.*, 1988), (ABELÉS, 1950). Os diferentes meios são descritos da seguinte maneira:

- Meio 1, Prisma: É um material óptico com um alto índice de refração  $n_{1re}$  e uma espessura  $d_1$ , tido como sendo infinito;
- Meio 2, Metal: É Uma película de metal fino, com um índice de refração complexo conhecido  $n_2 = n_{2re} + in_{2im}$  A espessura  $d_2$  é muito menor que o comprimento de onda da luz incidente;
- Meio 3, Analito: É uma camada líquida, que é normalmente uma solução aquosa, com um conhecido índice de refração  $n_3$ . sendo a espessura é  $d_3$ , julgada como infinita.
- Meio 4: Caracteriza-se por representar o analito e a mostra que o abrange.

Essas grandezas ópticas variam conforme o comprimento de onda se altera.

Figura 21 – a) Sistema multicamadas na configuração de Kretschmann com 4 camadas. b) Ilustra a configuração das multicamadas em que (1) é o substrato óptico-prisma, (2) metal, (3) e (4) representam o analito e a amostra que o contém.



Fonte: Oliveira *et al.* (2017).

A camada 3 é a camada de detecção e compreendem as variáveis desconhecidas, na qual ocorrem as interações químicas.

Sucintamente, o método de cálculo da matriz de transferência é utilizado para calcular a reflexão, absorção e a transmissão de um feixe de luz p-polarizado quando colide sobre uma estrutura multicamadas plana, conforme Figura 21.

Para elaborar a matriz de transferência, a admissão  $q_j$  (absorbância), e o desloca-

mento de fase da camada  $\beta_j$  (admitância), são obtidos para cada camada.

$$q_j = \frac{\sqrt{n_j^2(\lambda) - (n_{MAT}(\lambda)\text{sen}(\theta_1))^2}}{n_j^2(\lambda)} \quad (2.1)$$

$$\beta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_j^2(\lambda) - (n_{MAT}(\lambda)\text{sen}(\theta_1))^2} \quad (2.2)$$

Na Equação 2.1 e 2.2  $n_j = n_{jre} + in_{jim}$  ( $i = \sqrt{-1}$ ),  $n_j$  com  $j = 2,3$  sendo o índice da refração do meio  $j$  com  $n_{MAT} = n_{1re}$ ; o ângulo  $\theta_j$  é o ângulo da incidência do feixe de luz no meio  $j$ ;  $d_j$  indica a espessura da camada e  $\lambda$  indica o comprimento de onda da luz incidente. O feixe de luz que incide passa por inúmeras reflexões até atingir a última camada, portanto, todas elas deverão ser levadas em consideração no cálculo de refletividade e transmissão totais. A matriz de transferência que representa o deslocamento de uma onda, propagando do meio  $j$  para  $j+1$ , pode ser determinada como:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(\beta_j) & (i\text{sen}(\beta_j))/q_j \\ -iq_j\text{sen}(\beta_j) & \cos(\beta_j) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A equação 2.4 descreve a matriz de transferência total,  $M_{tot}$ , (produto), calculada como uma função das matrizes individuais  $M_j$  para cada meio, como:

$$M_{tot} = \prod_{j=2}^{m-1} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

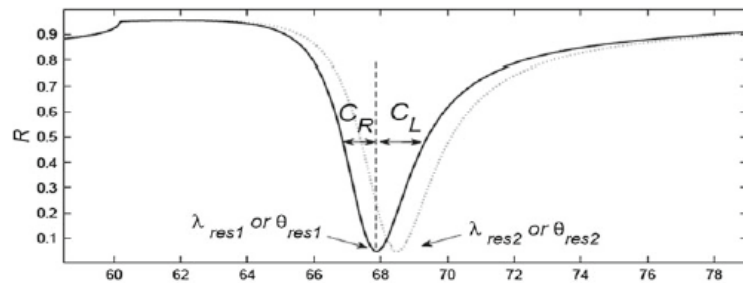
O coeficiente de refletividade total  $R$  e o coeficiente de transmissão  $T$ , os chamados coeficientes de Fresnel, de uma estrutura multicamadas compostas de  $m$  camadas, são obtidos por meio da equação 2.4, é conhecida por:

$$R = \frac{(m_{11} + m_{12}q_m)q_1 - (m_{21} + m_{22})q_m}{(m_{11} + m_{12}q_m)q_1 + (m_{21} + m_{22})q_m} \quad (2.5)$$

$$T = \frac{2q_m}{(m_{11} + m_{12}q_m)q_1 + (m_{21} + m_{22})q_m} \quad (2.6)$$

Dessa maneira, o identificador óptico captura a luz refletida  $r$ , denominada de curva SPR, ocorre quando o mínimo da refletividade ( $\theta_{res}$  no AIM e  $\lambda_{res}$  no WIM) define a condição de ressonância, conforme ilustrado na Figura 22 e que exemplifica uma superfície assimétrica curva de ressonância de plasma, obtida com base no estudo de Fresnel. O deslocamento de  $\lambda_{res1}$  para  $\lambda_{res2}$  no WIM ou de  $\theta_{res1}$  para  $\theta_{res2}$  no AIM demonstra uma mudança do índice de refração da camada 3. A largura da curva em FWHM é calculado como  $C_R + C_L$ , em que  $C_R$  e  $C_L$  são as distâncias em graus para (AIM) ou nanômetros para (WIM), entre a mínima ressonância e as bordas direita e esquerda do curva, respectivamente.

Figura 22 – Condição de ressonância



Fonte: Oliveira *et al.* (2017).

Aplicando a Análise de Fresnel Oliveira *et al.* (2019a) e Abelès (1950) para o espectro angular do PPBIO, é possível obter as curvas SPRs, por meio de dois modos básicos de operação fornecidas pelo sensor baseado no PPBIO.

*Angular Interrogation Mode* (AIM): o comprimento de onda da luz incidente é fixo. O ângulo de incidência é variado e consequentemente as condições de acoplamento.

*Wavelength Interrogation Mode* (WIM): o ângulo de incidência é mantido constante. A condição de acoplamento depende e varia com os comprimentos de onda.

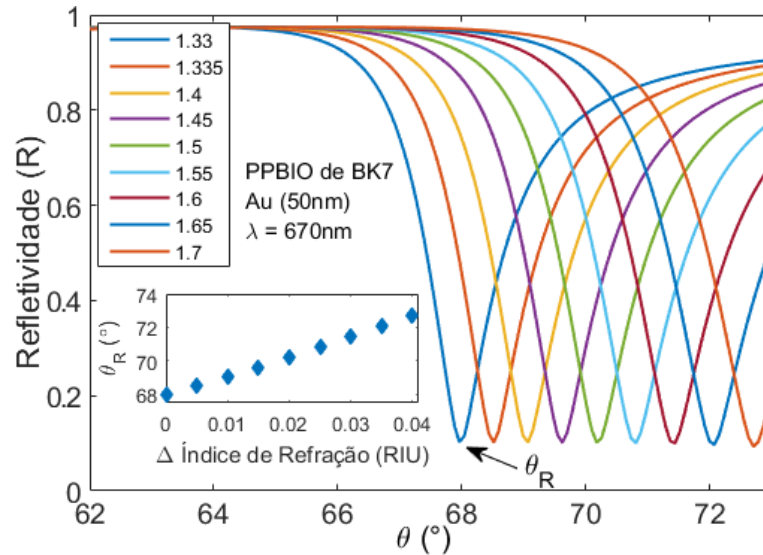
A Figura 23 ilustra o comportamento do sensor SPR com PPBIO manufaturado de vidro BK7 e camada de ouro com 50 nm operando no modo AIM. O espectro angular é usado para definir o ponto de operação para o par substrato/metal, orientando o alinhamento geométrico da configuração experimental e o ajuste da relação pixel vs. ângulo.

### 2.3 Análise geométrico do sistema óptico baseado no PPBIO

Aplicou-se, na plataforma automatizada, o projeto implantado e desenvolvido por Moreira (2010), o PPBIO com lentes externa. A princípio, Moreira (2010) realizou o dimensionamento do prisma, como ilustra a Figura 24, este possui uma forma trapezoidal devido à



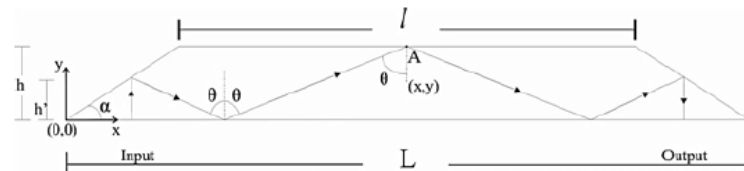
Figura 23 – Refletividade para substâncias aquosas. Curva SPR teórica para o PPBIO manufaturado com vidro BK7 e camada de ouro com 50 nm operando no modo AIM. Detalhe para comportamento de  $\theta_R$  em função da variação do índice de refração da substância em análise



Fonte: Oliveira *et al.* (2017) adaptado.

imprescindibilidade de se ter duas superfícies paralelas que possibilitassem um caminho óptico dos raios luminosos, raios estes que chegam e saem perpendicular à base inferior do prisma, assegurando assim, uma maior facilidade de instrumentação. O distanciamento entre essas superfícies paralelas, a altura do prisma ( $h$ ), não deve ultrapassar 3 mm, e o ângulo de inclinação das paredes laterais ( $\alpha$ ), para colocar o ponto de detecção em (A) para um determinado ângulo de incidência na superfície de medição, dever ser ( $\theta$ ),  $\alpha = \theta/2$ . Com base nessas informações, os comprimentos podem ser determinados pelas equações 2.7 e 2.8:

Figura 24 – Prisma polimérico elaborado por Moreira. Os valores empregados no projeto foram:  $h = 3\text{mm}$ ,  $L = 26,72\text{mm}$ ,  $l = 17,84\text{mm}$ ,  $\alpha = 34^\circ$ ,  $\theta = 68^\circ$



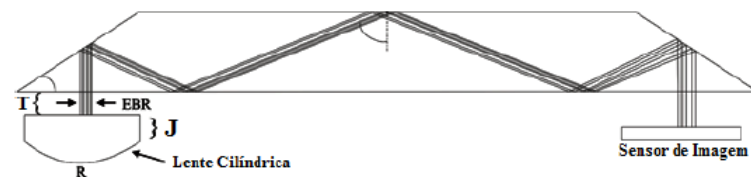
Fonte: Moreira (2010).

$$l = 2 \left[ \frac{h}{2 \tan(\alpha)} + \frac{h}{2 \tan(90 - \alpha)} + h \tan(2\alpha) \right] \quad (2.7)$$

$$l = \left[ 1 - \frac{3}{\tan(\alpha)} \right] \quad (2.8)$$

No *design* elaborado por Moreira (2010) apenas uma lente foi aplicada, sendo esta inserida junto aos feixes de entrada no prisma. Observou-se o caminho óptico percorrido pela luz, com início na fonte luminosa e término ao tocar o sensor de imagem, usado no conjunto sinal que compõe a instrumentação do sensor SPR baseado no prisma. O intervalo em que a lente se localiza da base inferior do prisma (T), o raio de curvatura (R), sua espessura (J) e sua distância focal (f), ilustradas Figura 25, foram analisados. Para o modelo AIM, os valores ideais descobertos foram: T=5 mm, R=11,2 mm, J=3,9 mm e f=15 mm. No modo WIM averiguou-se somente a abertura do feixe de luz (EBR), assim, determinou-se que quanto maior o valor de EBR maior será o foco no centro da superfície de medição.

Figura 25 – Restrições operacionais para a lente cilíndrica para focar os feixes luminosos. Os valores empregados no projeto foram:  $T = 5\text{mm}$ ,  $R = 11,2\text{mm}$ ,  $J = 3,9\text{mm}$  e  $\text{EBR} = 0,5\text{mm}$ . O espaço focal (f) da lente usada é de 20mm para  $\lambda = 587,6\text{nm}$ .



Fonte: Moreira (2010).

## 2.4 Sensibilidade do sensor SPR

A sensibilidade dos sensores SPR é uma importante ferramenta utilizada para monitorar ângulo ou comprimento de onda em relação ao índice de refração ou espessura do filme de uma camada fina. A detectividade e a sensibilidade são importantes na utilização da verificação da qualidade da multicamada em um ponto de operação estabelecido em sensores baseados em SPR. A sensibilidade exprime a eficácia do sistema SPR em detectar as variações do índice de refração na superfície do metal, com a detectividade é possível medir a qualidade da resposta da instrumentação óptico-eletrônica usada no sensor SPR, independente do modo de operação. Além disso é possível comparar diretamente as respostas dos sensores dos modos AIM e WIM.

A detectividade pode ser usada como um parâmetro de calibração para o sensor SPR baseado no biochip polimérico (PPBIO). A avaliação, em termos da óptica geométrica para o

arranjo da montagem experimental, presente na Figura 26, permite o cálculo de "campo de visão do prisma", (Field of View - FoV). O FoV é um parâmetro que representa a abertura angular do feixe de luz que atinge o sensor de imagem do transdutor SPR. Na abordagem AIM, o FoV permite a resolução angular do sensor SPR por:

$$(V_{\theta}^*) = \frac{FoV}{DP} \quad (2.9)$$

$$(FoV) = 2 \tan^{-1} \left( \frac{CI}{DF} \right), \quad (2.10)$$

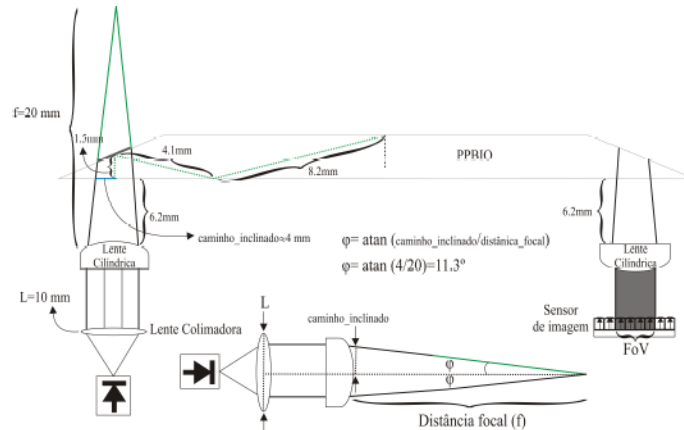
Em que **DP** é a densidade de pixels do sensor de imagem; **CI**(caminho inclinado) indica o tamanho do lado inclinado do PPBIO e **DF** representa a distância focal da lente cilíndrica. As possíveis diferenças entre os valores da  $(v_{\theta}^*$  e  $v_{\theta})$  são compensadas por software, por meio de algoritmos de pré-processamento, procedimentos de geração de curvas SPR e extração de parâmetros de interesse. (SOUSA *et al.*, 2014).

Outra maneira de calibrar a detectividade do sensor SPR é modificando o ponto de operação, considerando o conhecimento dos valores das resoluções instrumentais  $(v_{\lambda})$  e  $(v_{\theta})$ . No modo WIM a detectividade amplifica com o aumento do comprimento de onda, por isso, mesmo um detector com grandes amplitudes de resolução instrumental em  $(v_{\lambda})$  pode fornecer uma resposta adequada para  $D_{\lambda}$  quando um comprimento de onda adequado é utilizado, ou seja,  $\lambda$  com valores considerados. Já a detectividade AIM possui comportamento contrário, ou seja, diminui com o aumento do comprimento de onda. (MOREIRA *et al.*, 2016). Desse modo, para compensar um imprevisto na baixa qualidade do sensor de imagem empregado, comprimentos de ondas curtos podem ser utilizados. A calibração do sensor em um ou outro modo pode ser feita selecionando OPs (Ponto de Operação) de modo que o parâmetro  $\mu$  (Parâmetro adimensional para calibração), expresso pela equação, seja mantido próximo de 1.

$$\mu = D_{\lambda}/D_{\theta} = (S_{\lambda}/S_{\theta})((v_{\theta})/(v_{\lambda})), \quad (2.11)$$

Além disso, o parâmetro  $\mu$  pode ser utilizado para ajustar o comprimento de onda, curto ou longo, para compensar a baixa qualidade de qualquer detector de imagem empregado. (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Figura 26 – Diagrama óptico do PPBIO, indicando distâncias, ângulos e elementos presentes no *set-up* AIM.



## 2.5 Resumo

Alguns fundamentos teóricos dos biosensores SPR foram apresentadas neste capítulo tais como: definições, características, condições de ressonância, modos de operação, análise geométrica do sistema óptico. O biochip óptico PPBIO, desenvolvido por Moreira (2010), apresentou e acrescentou vantagens à tecnologia SPR, além de possuir baixo custo, é descartável, evita elementos rotativos, a sensibilidade dos sensores SPR – usando acopladores de prisma ATR, é maior do que a dos dispositivos SPR baseados em dispositivos que utilizam acopladores de grade de difração e possibilita a análise de vários elementos sensores. (THIRSTRUP *et al.*, 2004).

O próximo capítulo apresentará os materiais e os métodos utilizados para a construção da plataforma automatizada, enquanto o capítulo 4 apresentará os resultados com a plataforma construída.

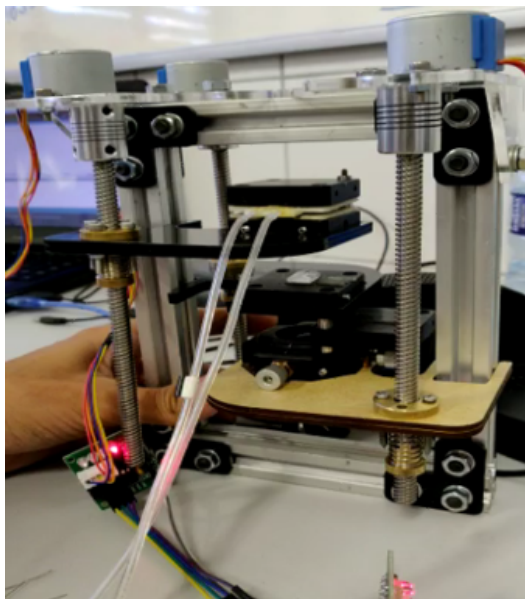
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descreve-se o processo de implementação deste projeto, em que serão detalhados todos os componentes de hardware da plataforma Automatizada para sensor de ressonância de plasmons de superfície e serão listados os componentes utilizados para a integração dos mesmos com o *firmware* desenvolvido.

A primeira etapa (definições) do projeto iniciou por meio de reuniões, nesses encontros, deliberou-se que seria projetada e desenvolvida uma plataforma automatizada com base na plataforma mecânica, definiu-se sua estrutura física, as dimensões e os tipos de materiais que a tornasse o mais leve possível, portátil, de fácil operação e de baixo custo.

Após a etapa de definições e *brainstorming*, iniciou-se o processo de design da estrutura mecânica e em paralelo a compra de materiais (perfil alumínio). Conforme o avanço do design, foi expedido a solicitação para confecção dos suportes L em MDF na impressora a *laser*; com a chegada do perfil alumínio V-slot, iniciou-se o processo de construção e montagem da estrutura mecânica com os suportes; em seguida, foram realizados testes de esforços, folgas, movimentos e alinhamentos; de acordo com os resultados dos testes, as peças em MDF foram aprovadas e, após solicitação, a impressão de novas peças em acrílico na impressora *laser* foi realizada, conforme ilustrado na imagem 27. Quando algum elemento era reprovado realizava-se novos estudos e adaptações, até que o conjunto estivesse em perfeito alinhamento.

Figura 27 – Testes de esforços, folgas e movimentos dos suportes em acrílico do PPBIO e Lente Cilíndrica em MDF da Lente Colimadora.



Fonte: Próprio Autor.

A etapa de desenvolvimento do algoritmo foi realizada na sequência, após toda a parte mecânica concluída, com o desenvolvimento do código de programação, processo de especificação e aquisição dos materiais. À medida que os materiais (sensores, drivers, módulos) chegavam, os testes eram realizados com o algoritmo e o desenvolvimento continuou até a conclusão dos testes.

A última etapa foi concluída com os testes dos componentes eletrônicos, que foram instalados e acondicionados em um painel, feito isso, realizou-se os testes de continuidade e de malhas e o comissionamento, concluindo assim, todas as etapas da construção da plataforma automatizada. Na Figura 28 é apresentado o fluxo de processos desenvolvidos neste trabalho.

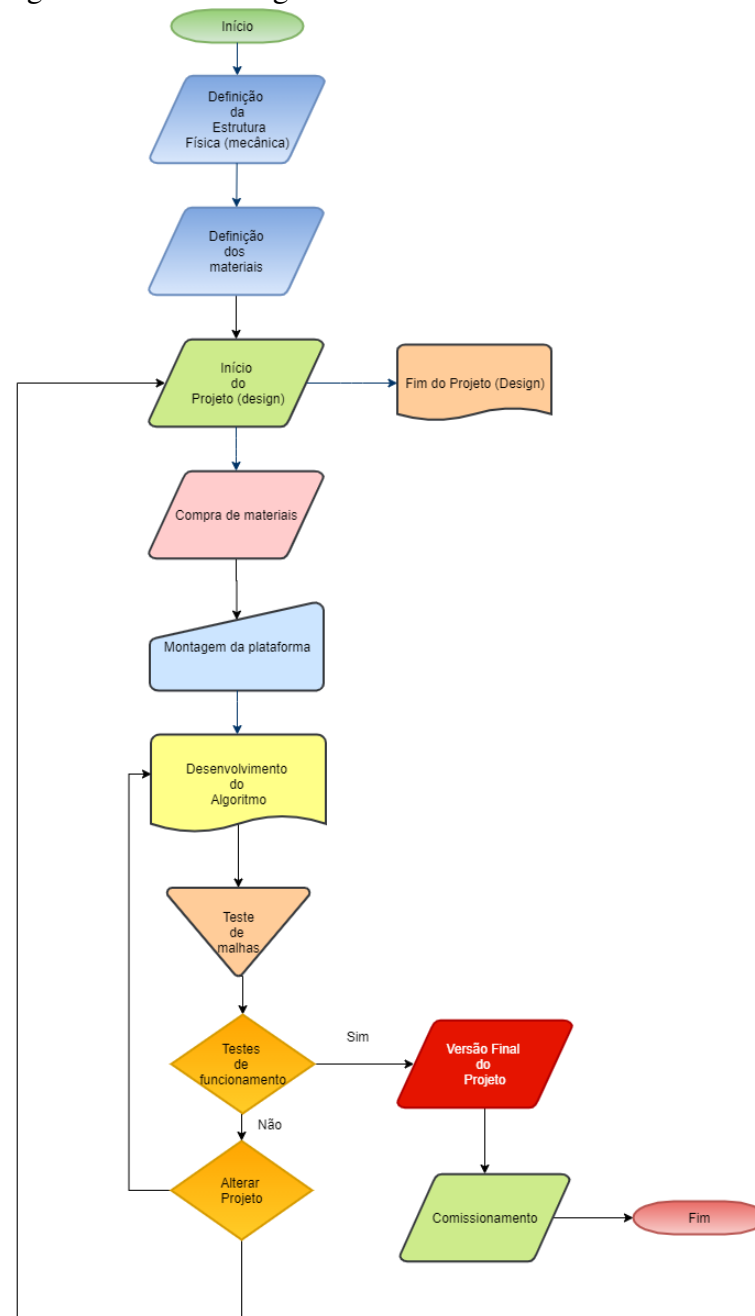
### 3.1 Estrutura Mecânica

Para o projeto da plataforma foram identificados os parâmetros principais de alinhamento para a excitação da SPR no modo AIM com PPBIO.

A plataforma automatizada deve realizar movimentos com as peças nos eixos coordenados para manter os parâmetros da óptica geométrica estabelecidos. A Figura 29 apresenta o desenho da plataforma proposta. A estrutura baseia-se em chassi de forma retangular, no qual os suportes para os motores e eixos (na parte superior) e a base de sustentação (na parte inferior) são acoplados aos rolamentos para guiar os fusos (Fig 30). O chassi também organiza e guia os suportes individuais de cada peça, os quais podem ser movimentados individualmente ou em grupos. Assim, cada peça é acoplada em um suporte L que se encaixa a um eixo vertical do chassi, cujo movimento é controlado por motores. A estrutura é completamente fechada e em suas paredes laterais são fixados os circuitos eletrônicos de controle da estrutura.

Perfil de alumínio estrutural V-slot 20x20, padrão *open build*, foi utilizado para garantir maior precisão mecânica, robustez e estabilidade do chassi. Os suportes L foram projetados e construídos na impressora a *laser* Storm 600 comercializada pela empresa GWeike. Para acomodar os motores, usaram-se suportes em acrílico de 3mm garantindo leveza. Para movimentar as peças contendo os elementos óptico-eletrônicos, empregaram-se fusos trapezoidais de aço inox, com diâmetro e passo de 8mm. Para garantir a boa movimentação das peças, um sistema de castanhas antifolgas em bronze foi empregado, evitando possíveis folgas nos fusos. Em toda estrutura (mecânica, suportes de acrílico e *case*) empregou-se parafusos e porcas em aço inox para fixação, o motivo desta escolha foram suas características de resistência a corrosão por ser um elemento fácil de limpar, sua superfície lisa e sem poros ajuda a impedir o acúmulo de

Figura 28 – Fluxograma da metodologia do trabalho.

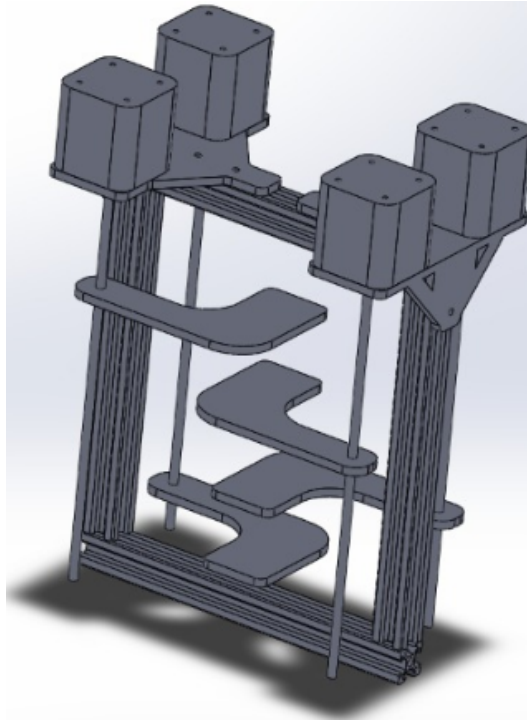


Fonte: Próprio Autor.

microrganismos.

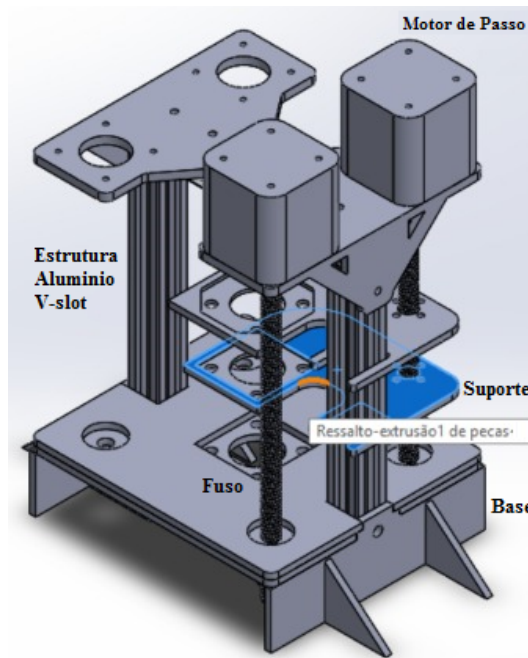
Para solucionar os problemas de temperatura e interferências do meio externo foi projetado um case em acrílico preto que possui dimensões 25 cm de largura, 35cm de comprimento e 25 cm de altura. Afim de evitar possíveis interferência de incidência de luz interna, foi projetado duas camadas de persianas, sendo a persiana superior sentido oposto da persiana inferior, permitindo que o fluxo de ar passe entre as alhetas, porém, impedindo a entrada de luz no ambiente interno. A Figura 31 apresenta os elementos que constituem a tampa superior do

Figura 29 – Desenho da estrutura automatizada proposta com destaque para seu chassi.



Fonte: Próprio autor

Figura 30 – Detalhes para a disposição e design das estruturas desenvolvidas, com destaque para o suporte L.



Fonte: Próprio autor

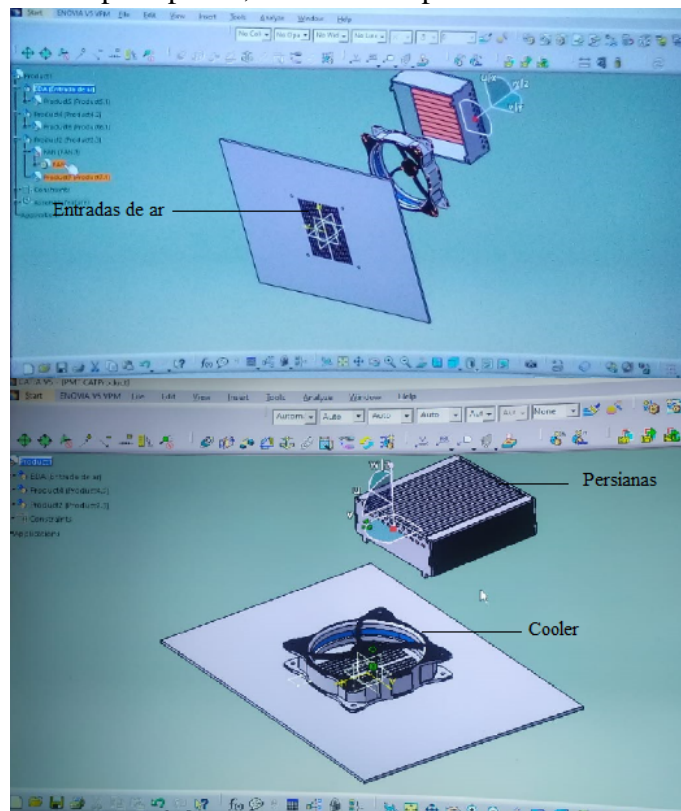
*case* da plataforma com destaque para as persianas ortogonais e o *cooler*.

O *design* do suporte L para movimentar a câmera nos eixos X, Y e Z, passou por diversas etapas de projetos, testes e discussões até o protótipo final, a princípio idealizou-se



o projeto de um suporte com dois fusos trapezoidais, mas para este suporte com dois fusos o projeto necessitaria de uma complexa estrutura com correias e engrenagens, além da necessidade de mais espaço tornando a estrutura mais volumosa sendo descartado. O suporte L da câmera em especial é composto por duas camadas em acrílico, acondiciona a estrutura de trilhos, suporte guia para fixação e movimentação da câmera e um motor de passo com rosca sem-fim. Os movimentos no eixo (Y) é realizado por meio de um motor de passo localizado no suporte superior da estrutura mecânica, o responsável para os movimentos no eixo (Z) é o motor de passo localizado na parte inferior no suporte L e os movimentos no eixo (X) é realizado manualmente pelo operador, mais detalhes na imagem da Figuras 36 e 37.

Figura 31 – Projeto da tampa superior, detalhes das persianas e do cooler.



Fonte: Próprio autor

## 3.2 Instrumentação eletrônica

### 3.2.1 Motores de passo

Para realizar os movimentos no eixo Y e Z utilizou-se de motores de passo, que giram em um ângulo fixo a cada pulso de entrada. O rotor geralmente é formado por um ímã fixo

com vários polos e um estator com diversos enrolamentos, uma das características dos motores de passo são que eles giram com uma dada velocidade independente da carga, desde que a carga não exceda o torque do motor. Para a plataforma utilizamos o motor de passo 28BYJ-48. Possui excelente torque, unipolar, tensão alimentação de 5V e redução de 1/64, isto exprime que é possível dar uma volta completa com 4096 passos, ou seja, apenas  $\approx 0,088^\circ$  por passo, como detalhado abaixo.

Especificações:

Modelo: 28BYJ-48	Diâmetro do eixo: 5mm
Driver: ULN2003	Ângulo do Passo: $5,625^\circ / 64 \approx 0,088^\circ$
Tensão: 5VDC	Frequência: 100Hz
Número de fase: 4	Resistência DC: $50 \Omega \pm 7\%$ (25 °C)
Número de vias: 5	Torque: 34,3 mN.m
Caixa de Redução: 1/64	Peso: 40g

### 3.2.2 Sensores

Conforme foi mencionado na seção 1.1 foi analisado que a temperatura influenciará o caminho óptico percorrido pelos feixes luminosos ao atravessarem o prisma. Para isso, utilizar-se-á um sensor de temperatura e um *cooler*, afim de manter a temperatura ideal e o comportamento dos prismas na faixa de temperaturas de 25°C, 30°C e 35°C, que são próximas à temperatura ambiente. Para informar ao usuário qual a distância de cada suporte em relação a base, foi utilizado sensor de distância a *laser* VL53L0X, que pode medir distâncias com alto grau de precisão, tem interface I2C e funciona com uma tensão entre 3 e 5V.

### 3.2.3 Display

Afim de mostrar ao usuário os status das distâncias de cada suporte, a temperatura ambiente no interior do *case*, utilizou-se um *display touch screen* LCD TFT 2.5" para realizar a função de IHM (*interface human machine*).

### 3.2.4 Sistemas embarcados

Para controlar as peças motorizadas foi desenvolvido um algoritmo no Visual Studio Code. No projeto utilizou-se dois Arduinos Mega, que são uma plataforma microcontrolada baseada no Atmega 2560 que possui 54 pinos digitais de entrada/saída, dos quais 15 podem

Figura 32 – IHM touch screen .



Fonte: Próprio autor

ser utilizados como saídas PWM, 16 entradas analógicas, 4 portas seriais assíncronas (UART), um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação externa, um cabeçalho ICSP e um botão de reset.

O principal fator na escolha da plataforma Arduino foi devido à grande disponibilidade de portas e a fácil comunicação com diversos *drivers* como o *wifi*, *bluetooth* ou fator crucial de ter-se utilizado de dois microcontroladores foi devido à alta requisição de memória/processamento imposta tanto pelo código do *display touch screen*, quanto pelo código de controle dos motores, botões e sensores, além de atender todos os requisitos técnicos de implementação para o projeto.

Os testes dos movimentos no eixo Y, foram utilizados botões físicos que controla os motores de passo. No algoritmo foi implementada a rotina de controle de temperatura, quando esta atinge a temperatura setada irá acionar um *cooler*, afim de manter a temperatura ambiente ideal no interior do invólucro.

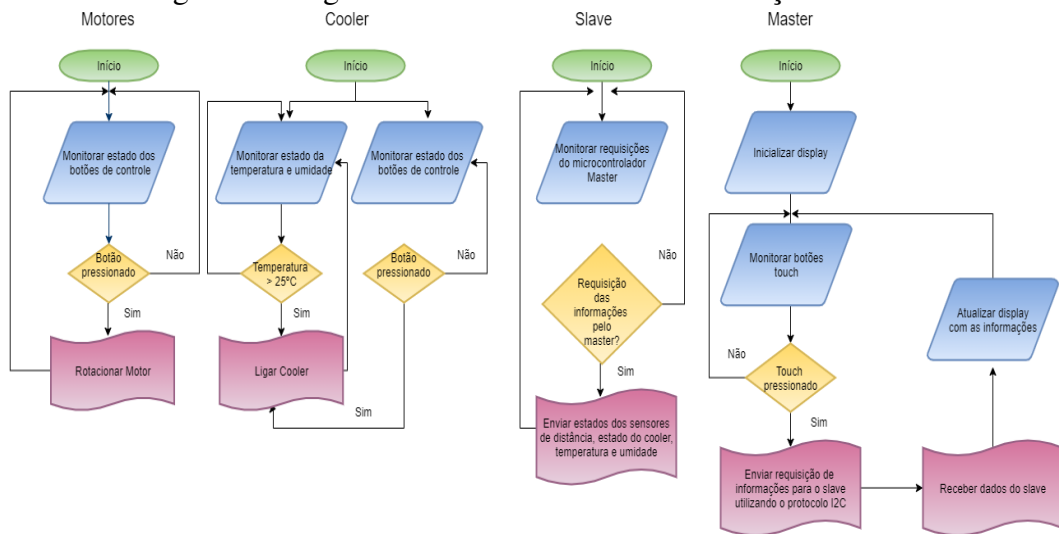
Para o posicionamento de cada instrumento instalado em cada suporte L, o mapeamento é realizado por meio de um sensor de distância a *laser*, que medirá precisamente a distância, exibindo-a no *display*, que comunica-se com arduino Mega *master* por meio do protocolo I2C, permitindo assim fixar parâmetros para cada tipo de material a ser analisado.

Para validar o algoritmo e da plataforma realizou-se tanto os testes de fábrica quanto os testes de campo, no qual o operador inicializou o sistema com todos os suportes (PPBIO, Câmera, Cilíndrica e Colimadora), o mais próximo possível da base da plataforma, primeiramente movimentou-se o suporte do PPBIO até o topo da plataforma em seguida movimentou-se o suporte da câmera, lente cilíndrica e a lente colimadora, observou-se que a uma dada distância em relação à sua base a luz emitida pelo *laser* tornava-se espessa então realizava-se a leitura

da distância dos suportes em relação a base da plataforma por meio do *display*, realizou-se um novos ajustes sempre observando a luz emitida pelo *laser* até que a mesma tornou-se mais ínfima, mantendo a luz emitida pelo diodo *laser* nesse estado/posição realizou-se a medição de energia da luz, obtendo a curva SPR, conforme ilustrado na figura 45

Na Figura 33 ilustra o fluxograma do algoritmo com suas rotinas de inicialização e tomada de decisão.

Figura 33 – Fluxograma do algoritmo com as rotinas de inicialização e tomadas de decisões



Fonte: Próprio autor

### 3.2.5 Elementos ópticos-eletrônicos para excitação da SPR

No *set-up* AIM emprega-se um feixe de luz quase monocromático com largura ínfima, centralizado em um valor fixo de comprimento de onda a depender da multicamada. A plataforma dispõe-se de um diodo laser 670 nm Thorlabs, duas lentes cilíndricas plano-convexas LJ1960L1 da Thorlabs e um espelho para contribuir a instrumentação do caminho óptico. Empregou-se neste projeto como sensor de imagem, a câmera CMOS DCC1645C distribuída pela empresa Thorlabs com resolução 1280x1024 e 10 bits por pixel, estes com tamanho de  $\mu\text{m}^2$ , a. Célula de fluxo, lente colimadora, polarizador (quando a fonte de luz não for polarizada). A Figura 38, ilustra o sensor SPR com os elementos ópticos (lentes, polarizador e prisma), bem como seus elementos eletrônicos (sensor de imagem), elementos mecânicos, que se conectam com todos os elementos, constituindo o instrumento óptico, e os elementos fluídicos (células de fluxo e microbomba).

Figura 34 – Laser Diodo 670 nm do fabricante Thorlabs



Fonte: Próprio autor

### 3.3 Resumo

Neste capítulo apresentamos o projeto, a construção, a montagem e os materiais para o desenvolvimento da plataforma. Os desenhos foram desenvolvidos por meio dos softwares SolidWorks e Catia (Dassault Systems).

O ajuste da altura dos suportes L das Lentes Colimadora e Cilíndrica, do Prisma e da Câmera, em relação a base, foram realizados por meio de motores de passo, controlado por meio de botões.

A princípio idealizou-se utilizar dois motores de passo para movimentar no eixo Y o suporte da câmera, mas a estrutura para tal movimento ficaria complexa necessitando instalar dois fusos trapezoidais, além de um sistema de engrenagens e correias, a solução encontrada foi de utilizar apenas um fuso trapezoidal com um suporte em acrílico desenvolvido especificamente para movimentar a câmera no eixo Z.

Os sensores de distância VL53LOX informam a posição individualmente de cada suporte L em (mm) em relação a base e disponibiliza essa informação no *display touch* de 2.5".

A aplicação de dois microcontroladores foi necessária para melhorar a performance no processamento e memória das requisições do sistema.

O *display* funciona como uma IHM e apresenta ao usuário as informações de temperatura, umidade, distância em (mm) e controle de acionamento manual do *cooler*. O controle de temperatura é realizado por meio de um sensor de temperatura o DHT 22, em conjunto com o *cooler* realiza o arrefecimento no interior do *case*.

O Desenvolvimento do projeto da automação do sistema fluídico ficará para os projetos futuros ficando para esta primeira etapa apenas o desenvolvimento da plataforma.

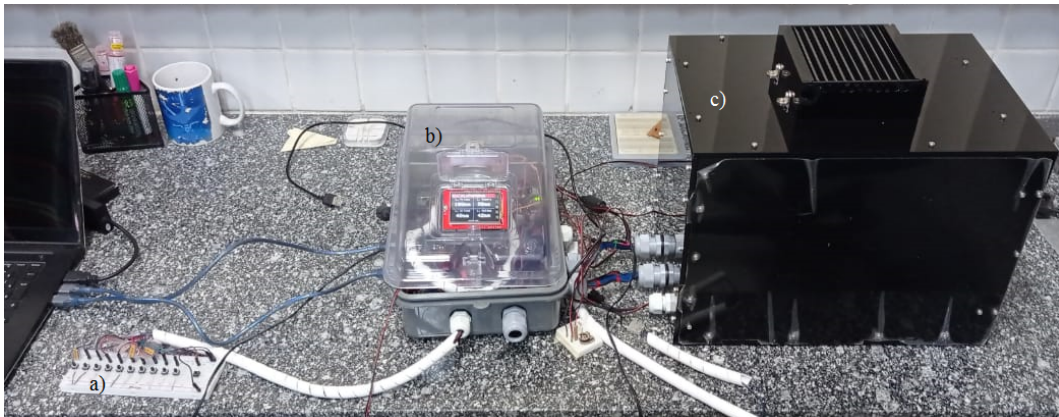
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos deste trabalho. São abordados os aspectos da estrutura física (mecânica), sensores, softwares e os componentes principais aplicados neste projeto.

### 4.1 Plataforma automatizada SPR (PA-SPR)

A plataforma automatizada desenvolvida neste projeto possibilitou o estudo do fenômeno físico Ressonância Plasmônica, em particular, a Ressonância de Plasmon de Superfície no modo AIM. A plataforma foi construída com um custo aproximadamente de R\$ 3.000,00, o case construído em acrílico apresenta dimensões (Largura x Comprimento x Altura, respectivamente) de 25x35x26 (cm), peso 3,8 (kg), o painel com os equipamentos eletro-eletrônicos possui dimensões de 20x30x14 (cm) peso aproximado 0,6 (kg) e a plataforma automatizada construída possui dimensões de 22x26x23 (cm) peso 2,1 (kg), tornando-a de fácil de transportação. A Imagem ilustrada na Figura 35 apresenta toda a estrutura física com seus respectivos componentes.

Figura 35 – Plataforma completa: a) Botões de acionamentos dos suportes L e *cooler*; b) Conjunto *Case* e a plataforma no interior do invólucro; c) Painel de instrumentos eletro-eletrônicos.

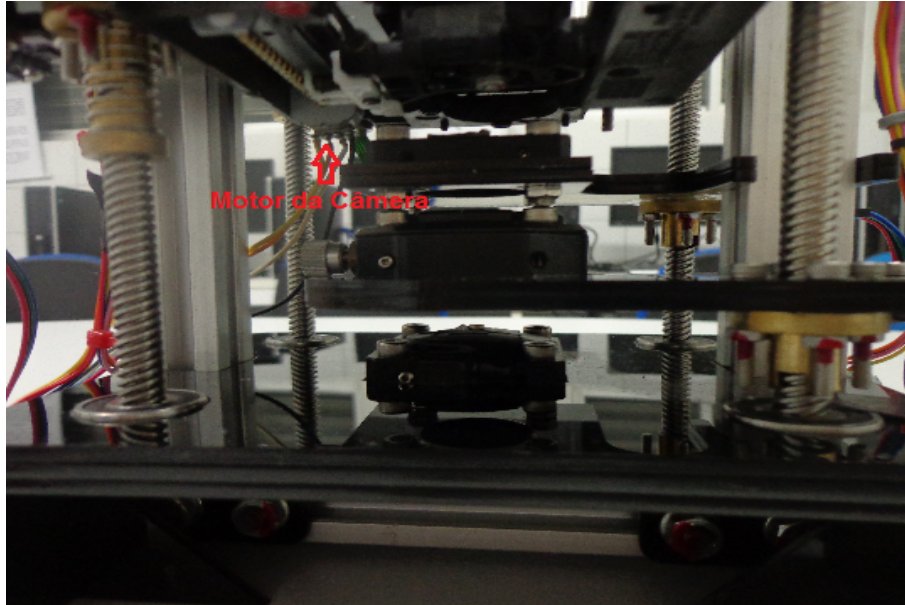


Fonte: Próprio Autor.

De modo geral, após montada toda a estrutura em alumínio estrutural V-slot, tipo *open build*, montados os suportes L, foram inseridos quatro hastes lisas nos orifícios para fixação dos instrumentos localizados nos suportes L, para o devido alinhamento dos suportes L na base da plataforma, foram instalados quatro rolamentos do tipo radiais para auxiliar e garantir o alinhamento, reduzir o esforço e a força exercida pelos motores de passo. Os detalhes do alinhamento óptico realizado pode ser visualizado por meio da imagem na Figura 36 que ilustra

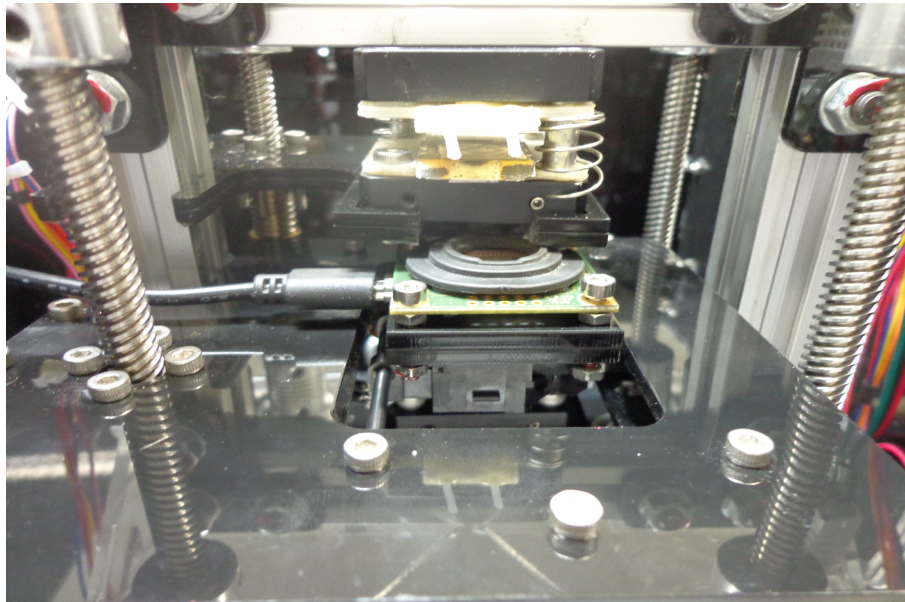
com detalhes o laser, a lente colimadora e a lente cilíndrica, percebe-se também o sistema anti-folga e o motor com eixo sem-fim acoplado, que movimenta a câmera. A Figura 37 ilustra a câmera devidamente alinhada ao prisma e a célula de fluxo.

Figura 36 – Alinhamento óptico, detalhe do motor da câmera.



Fonte: Próprio Autor.

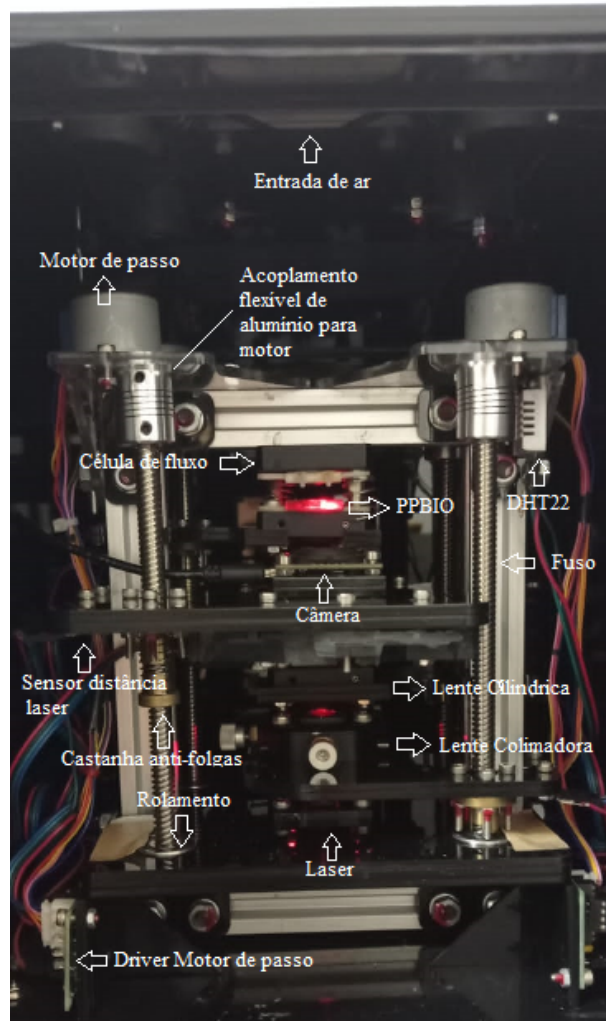
Figura 37 – Detalhe do alinhamento entre a câmera e o PPBIO.



Fonte: Próprio Autor.

A plataforma realiza o ajuste posicional movendo as peças com precisão de 1 mm. Fixada a posição da fonte de luz, a ordem de movimento, para obtenção do máximo acoplamento (maior profundidade/contraste da curva SPR), segue a sequência: Lente colimadora→Lente

Figura 38 – plataforma experimental automatizada para sensor SPR baseado no PPBIO. Indicação das partes automatizadas. Suportes L acoplados aos eixos para permitir a movimentação dos componentes.



Fonte: Próprio Autor.

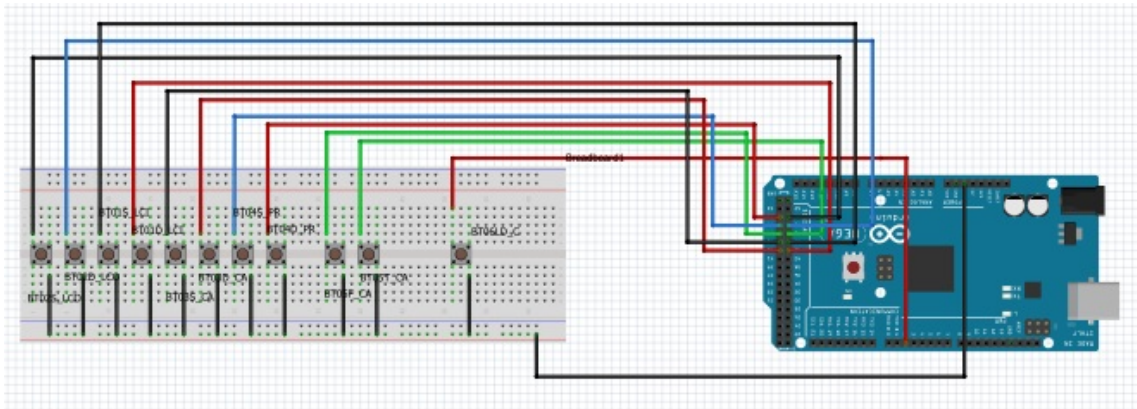
cilíndrica→PPBIO→Câmera. Esse ajuste posicional é realizado por meio de botões interligados ao microcontrolador, conforme diagrama de interligações da Figura 39. A distância da posição ajustada em (mm) em relação à base pode ser visualizada por meio da IHM no *display touch screen* na Figura 43 c).

Após pressionar os botões, esses acionam e controlam os motores de passo, que estão interligados ao microcontrolador, juntamente aos seus respectivos drivers, e alimentados por fontes de tensões de 5v, conforme ilustrado no diagrama de interligação – Figura 40.

Conforme o usuário realiza os ajustes posicionais dos suportes das lentes colimadora, cilíndrica, câmera e prisma, por meio dos motores de passo, os sensores de distância a *laser* calculam as distâncias dos suportes L à base da plataforma e informa ao usuário a distância na IHM, por meio do *display touch 2.5"*. Os sensores de distância são alimentados por meio da

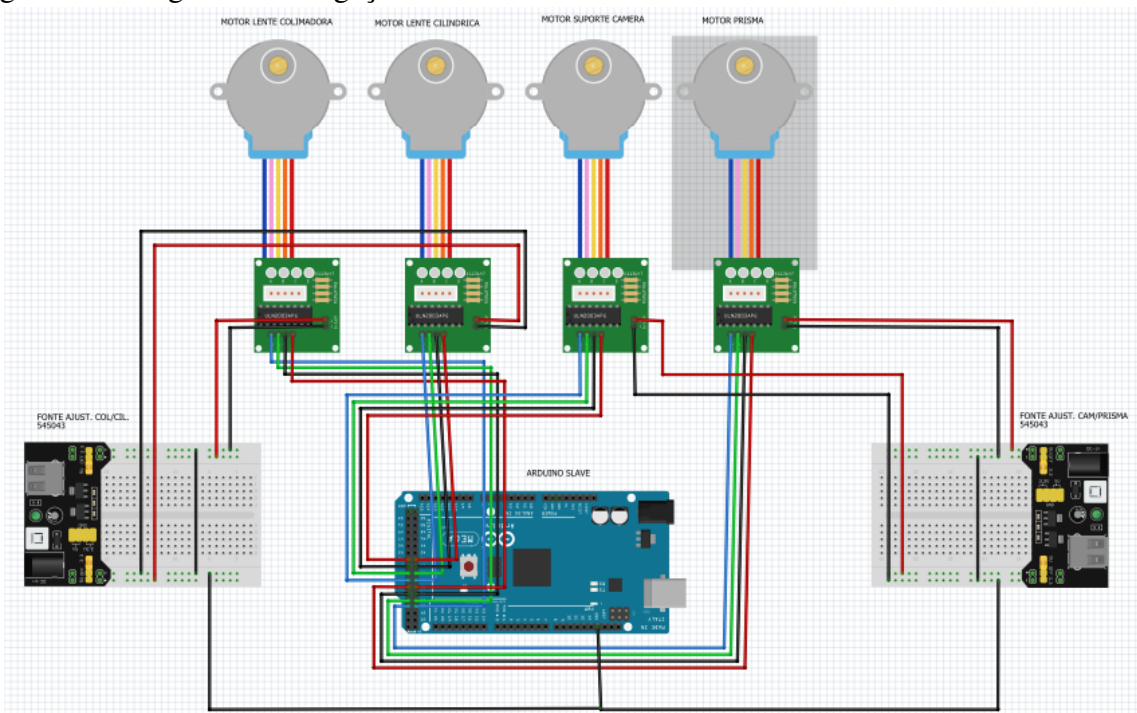


Figura 39 – Digrama Interligação dos Botões



Fonte: Próprio Autor

Figura 40 – Digrama Interligação dos Motores

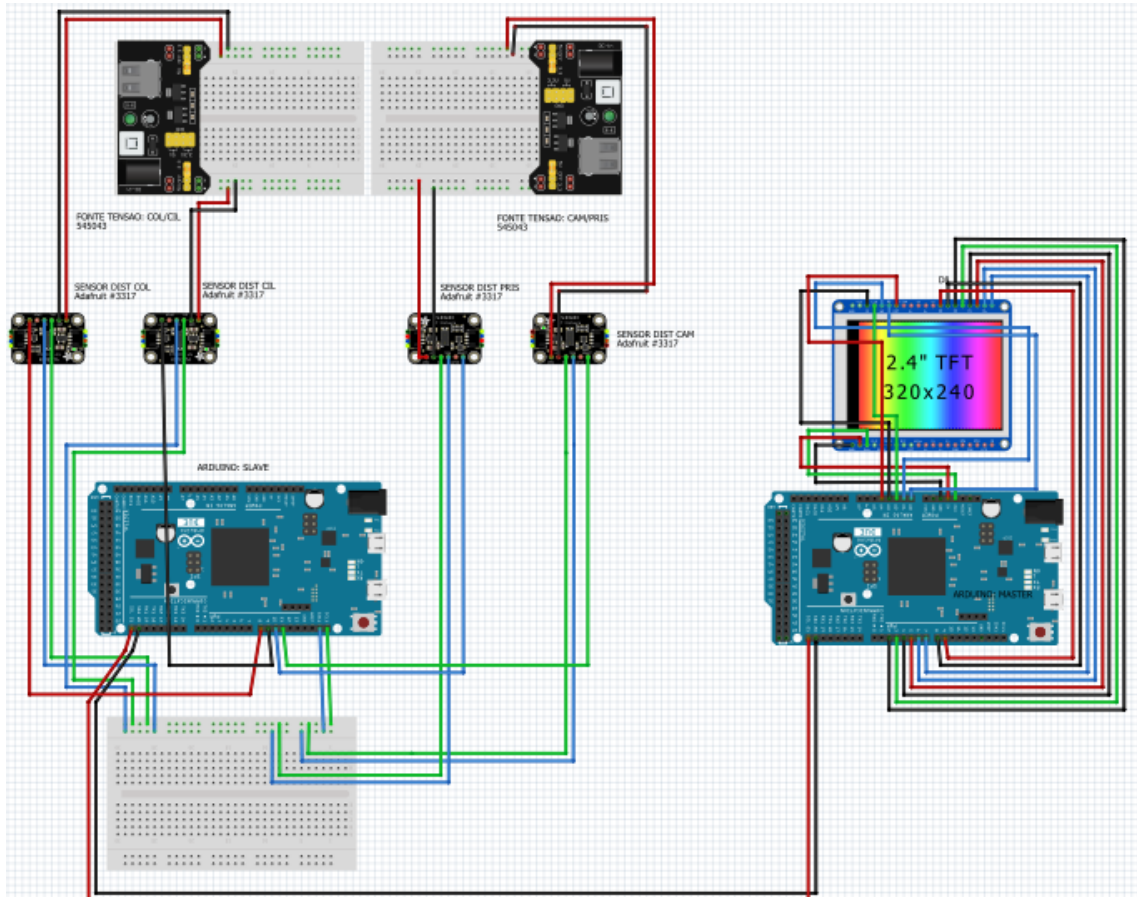


Fonte: Próprio Autor

fonte reguladora de tensão, operam a uma tensão de 5V se comunicam por meio do protocolo de comunicação I2C ao microcontrolador. O diagrama de interligação dos sensores é ilustrado na Figura 41.

Em uma análise realizada por Moreira *et al.* (2008) foi indicado um impacto significativo gerado pelas distorções instrumentais causada pela temperatura, o autor propõe o desenvolvimento de um projeto instrumental que fosse robusto à temperatura, no entanto, era primordial, para um desempenho perfeito, que fosse realizado o controle da temperatura da fonte de luz (*laser*), controle de temperatura do analito e uso de materiais com baixa temperatura

Figura 41 – Diagrama Interligação dos Sensores de Distância e a Tela Touch Screen.

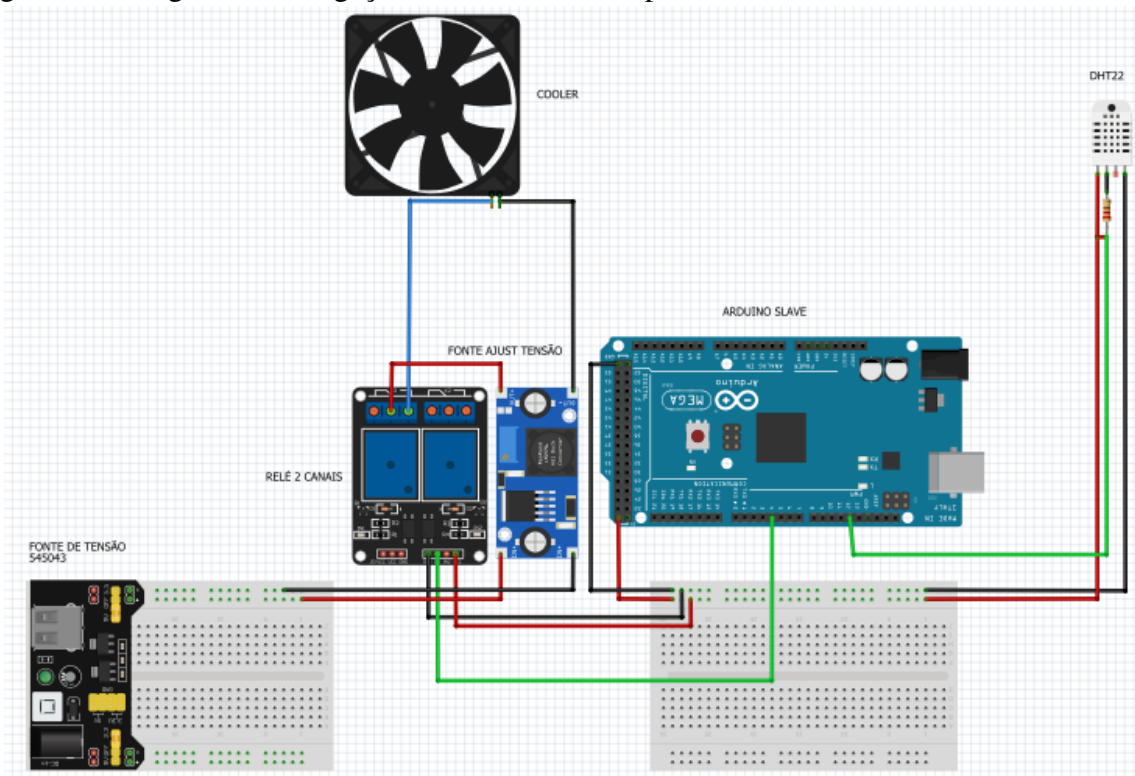


Fonte: Próprio Autor

dos coeficientes de expansão térmica para todos os componentes ópticos. Tendo em vista que foi realizado o alinhamento óptico/arranjo mecânico de todos entre o *laser*, lentes, PPBIO e câmera, realizou-se o controle de temperatura, por meio de um sensor de temperatura DHT22, este detecta o aumento de temperatura, caso seja igual ou maior a temperatura de trabalho o *cooler* é acionado. O sistema está interligado ao microcontrolador *slave*, o DHT22 é alimentado por uma tensão de 5v. Para alimentar o *cooler*, que trabalha com uma tensão de 12v, foi instalado uma fonte de tensão ajustável DC/DC, recebendo 5v proveniente do arduino *slave*, elevando para 12v. O módulo relé funciona como contato seco, ou seja, *on/off*, sendo também alimentado pelo arduino *slave*, trabalhando com a tensão de 5v. A Figura 42 ilustra o diagrama de interligação do sistema de controle de temperatura.

A IHM, desenvolvida por meio do *display touch* de 2.5", permitiu uma interação mais amigável com o usuário, possibilitando o acesso a informações importantes, como temperatura -umidade e o ajuste posicional dos suportes, sua aplicação foi possível utilizando um arduino mega como *master*, que por meio do protocolo de comunicação I2C, comunica-se com o arduino

Figura 42 – Diagrama Interligação do Sensor de Temperatura-Humidade e o Cooler.



Fonte: Próprio Autor

*slave*, que, por sua vez, coleta as informações e apresenta ao usuário, seu diagrama de interligação por de ser visualizado na Figura 43.

Figura 43 – Interface Touch Screen: a) Apresenta a tela de inicialização principal; a Figura b) Apresenta ao usuário os submenus: Sensores de distância, Temperatura, umidade e liga/desliga *cooler* manualmente; a Figura c) Apresenta ao usuário a distância em mm da Lente Colimadora e Cilíndrica, Prisma e a Câmera em relação a sua base e a Figura d) Apresenta a temperatura ambiente no interior do case.

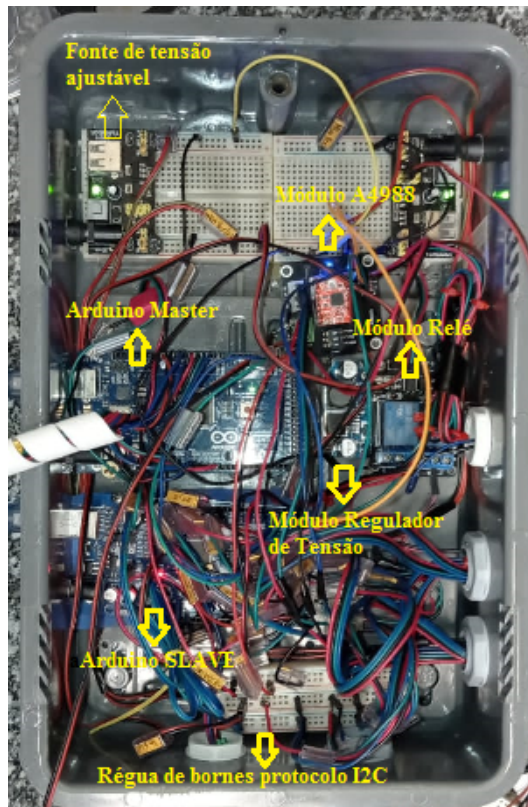


Fonte: Próprio Autor.

Para acomodar os microcontroladores, o módulo relé, a fonte reguladora de tensão, a

fonte de tensão e o *driver* A4988, foi montado um painel com todos os equipamentos eletrônicos (hardwares), o painel apresentou robustez para proteger contra eventuais contra-tempos e facilitando o transporte, conforme ilustrado na Figura 44.

Figura 44 – Painel de componentes eletrônicos composto por: Arduino *Master* e *Slave*, módulo relé dois canais, driver A4988, fonte de tensão ajustável e módulo regulador de tensão.



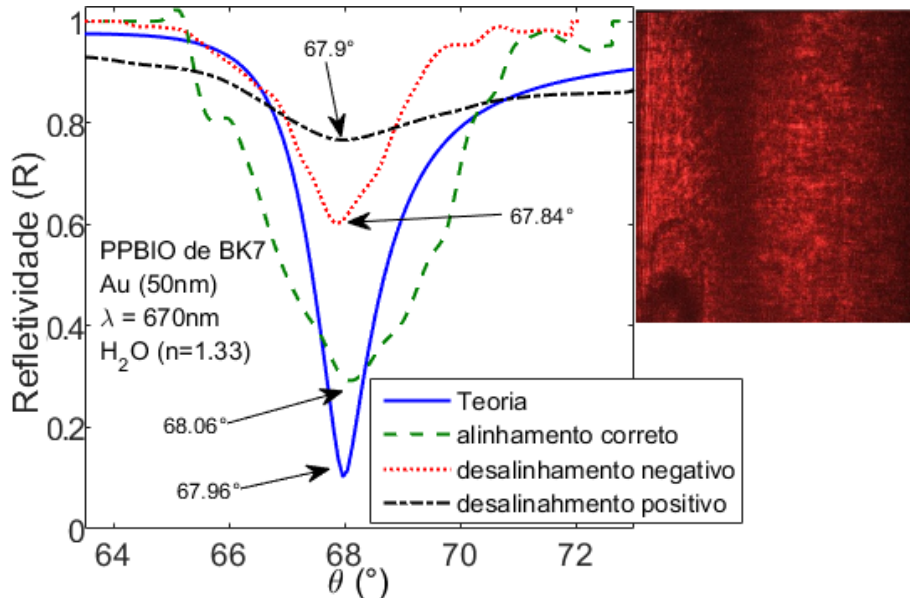
Fonte: Próprio Autor.

## 4.2 Experimento

Para testar a plataforma, realizou-se experimentos com solução de água deionizada e degaseificada, efetivados sob diferentes condições de alinhamentos. A Figura 45 apresenta as curvas SPR experimentais obtidas após o gotejamento da solução na superfície sensível do PPBIO. A temperatura dentro da plataforma foi mantida em 25.40°C. Para a obtenção da curva SPR, realizou-se a calibração do sensor, normalizando a resposta do mesmos para o ar ( $R_{Ar}$ ) e para a água ( $R_{Água}$ ) da forma:  $SPR = R_{Água} \setminus R_{Ar}$ .

Com o alinhamento correto, a curva SPR se aproxima da curva teórica. Vale mencionar que as distorções de profundidade, largura e posição do mínimo entre a curva experimental de correto alinhamento e a curva teórica se devem a características inerentes ao processo de

Figura 45 – Curvas SPR obtidas com a plataforma automatizada. Influência do desalinhamento mecânico na resposta. Imagem SPR capturada ilustrando a correta excitação do fenômeno.



Fonte: Próprio Autor.

fabricação do PPBIO, por exemplo, a rugosidade e a birrefringência (OLIVEIRA *et al.*, 2019a). A imagem SPR capturada indica a posição de ressonância, definida pela linha escura no centro da imagem. Em seguida, desligou-se o controle de temperatura e desalinhamentos verticais positivos (+6 mm) e negativos (-6 mm) entre a lente cilíndrica e o PPBIO, foram provocados. Observa-se um menor valor de profundidade da curva SPR, característico de uma excitação com baixo acoplamento óptico.

A análise morfológica da curva SPR gerada a partir da imagem SPR é sumarizada na tabela 2. Os parâmetros da largura (Larg.) e assimetria (Assimet.) obtidos por meio da distância entre a borda da esquerda (*CL*) e a borda da direita (*CR*) através das equações  $CR + CL$  e  $CR/CL$ , são respectivamente.

Tabela 2 – Tabela comparativa entre as diferentes curvas SPR.

Curva	$\theta_R(^{\circ})$	Larg. $\theta(^{\circ})$	Prof.	Assimet.	Energia
Teórica	67.96	1.39	0.10	0.80	913
Alinh. correto	68.06	3.3	0.28	1.02	926
Desal. negativo	67.84	1.85	0.6	1.14	1055
Desal. positivo	67.9	4.23	0.76	0.4	1140

Ao comparar as curvas teórica e experimental observou-se que quão mais acentuada a profundidade melhor o acoplamento óptico, e conseqüentemente, melhor o fenômeno SPR é obtido. Para a largura observou-se que quanto menor a largura, melhor a sensibilidade

(HOMOLA, 2006). Para as curvas SPR com os valores de energia baixo, demonstram boa excitação do fenômeno SPR, pois a energia dos fótons foi abundantemente absorvida pelos plasmons, gerando assim uma curva com maior profundidade/contraste.

Os experimentos realizados ficaram limitados a apenas um prisma PPBIO, os demais prismas disponíveis em laboratório estavam com a camada metálica em péssimas condições, devido ao uso excessivo e apresentaram birrefringência (decomposição do feixe luminoso em duas componentes). Para tentar sanar ou reduzir o efeito birrefringente, realizou-se a técnica do recozimento (*annealing*), procedimento executado para desordenar as cadeias internas do polímero e eliminar a birrefringência, porém os resultados apresentados não foram satisfatórios devido a falta de equipamento específico para este tipo de procedimento.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Uma plataforma para automatizar o movimento e o posicionamento dos elementos óptico-eletrônicos que compõem o sensor SPR baseado no PPBIO foi projetada, desenvolvida e construída.

Para o posicionamento dos elementos ópticos, foram desenvolvidas peças em acrílico que permitiu a plataforma automatizada apresentar uma melhora significativa na precisão do posicionamento dos componentes. A interferência da temperatura foi amenizada com o controle térmico, garantindo um melhor caminho óptico da luz no interior do prisma e evitando o espalhamento dos feixes luminosos. O *case/invólucro* apresentou-se como uma ótima solução contra interferência externa, seja ela por meio de luz ou movimentos, proporcionando maior facilidade para estabilizar o *dry cell*. A curva SPR obtida apresentou uma melhor distribuição angular do feixe luz, quando os elementos se encontram corretamente alinhados/posicionados.

A não presença de partes rotacionais, sua dimensão reduzida, a movimentação individual ou em bloco dos elementos e o controle térmico da plataforma possibilitam a implementação de algoritmos inteligentes para autocalibração mecânica, a partir das condições de operação e eventuais necessidades de compensação de efeitos térmicos. Tais algoritmos ajustam o posicionamento das peças a partir da obtenção de uma maior profundidade/contraste da curva SPR, ou seja, da qualidade do acoplamento óptico.

Tais vantagens não são facilmente encontradas nos instrumentos comerciais existentes. (MARQUART, 2020). A automação de movimentos está presente, em geral, no *autosampler* (amostrador), integrado àquelas plataformas SPR que o possuem, sendo os ajustes óptico-eletrônicos para excitação da SPR tradicionalmente realizados de forma manual. (CHUNG *et al.*, 2005), (SCHASFOORT; MCWHIRTER, 2008).

Os experimentos ficaram restritos devido à falta de prismas PPBIO em laboratório. Os prismas disponíveis em laboratório apresentaram birrefringência e a camada metálica em más condições devido ao uso excessivo, impossibilitando que novos experimentos fossem exercidos para uma análise qualitativa e quantitativa.

Por fim, menciona-se que novos experimentos serão realizados com a automatização da movimentação da célula de fluxo. A célula de fluxo confina e entrega o analito a região metálica-sensível, permitindo a obtenção de sensorgramas (evolução temporal) dos parâmetros da curva SPR.

Para continuidade da pesquisa, torna-se factível abordar em trabalhos futuros:

- Programação de código aberto (C#, Python, Java etc) é uma atividade importante para permitir a inclusão do filtro em outros sensores,;
- Melhorar a alimentação por meio de um projeto de um circuito que permita reduzir a utilização de fontes de alimentação externa;
- Permitir que a plataforma se auto-ajuste por meio das imagens geradas pela câmera reduzindo a intervenção humana reduzindo qualquer tipo de erro de operação.
- O aplicativo *blynk*, para controlar remotamente via *wifi*, visando uma interface mais amigável e de fácil manipulação, posteriormente será desenvolvido um *app*, com um conjunto de comandos que podem ser utilizados pelo usuário para controlar um dado experimento a partir da execução via *wifi* de qualquer lugar;
- Os motores de passo 28BYJ-48 apresentou baixo torque ocasionado pelo peso da instrumentação, para melhoria da plataforma sugerimos a substituição dos motores dos passo 28BYJ-48 por motores NEMA 17 este apresenta uma melhor relação torque vs precisão;
- Realizar a confecção do circuito impresso dos componentes elétricos/eletrônicos e botões;
- Projetar em impressora 3D ou à *laser* caixa de junção/case para acondicionar os componentes elétricos/eletrônicos;
- Automatizar o sistema fluído.



## REFERÊNCIAS

- ABELÈS, F. La théorie générale des couches minces. **Journal de Physique et le Radium**, Revue Générale de l'Electricité, v. 11, n. 7, p. 307–309, 1950.
- ABELÉS, F. Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoïdales dans les milieux stratifiés. **AnPh**, v. 12, n. 5, p. 706–782, 1950.
- AKIMOTO, T.; AL. et. Effect of incident angle of light on sensitivity and detection limit for layers of antibody with surface plasmon resonance spectroscopy. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 15, p. 355–362, 2000.
- ATAR, N.; EREN, T.; YOLA, M. L.; WANG, S. A sensitive molecular imprinted surface plasmon resonance nanosensor for selective determination of trace triclosan in wastewater. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 216, p. 638–644, 2015.
- BRAHMACHARI, K.; RAY, M. Effect of prism material on design of surface plasmon resonance sensor by admittance loci method. **Frontiers of Optoelectronics**, Springer, v. 6, n. 2, p. 185–193, 2013.
- BRUIJN, H. E. de; KOOYMAN, R. P.; GREVE, J. Determination of dielectric permittivity and thickness of a metal layer from a surface plasmon resonance experiment. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 29, n. 13, p. 1974–1978, 1990.
- CARVALHO, R. M. d.; RATH, S.; KUBOTA, L. T. Spr: Uma nova ferramenta para biossensores. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 26, n. 1, p. 97–104, 2003.
- CAVALCANTI, G. O. **Reflectômetro controlado por computador e sua aplicação na detecção de hidrogênio com filmes finos de paládio e ouro/paládio**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- CENNAMO, N.; VARRIALE, A.; PENNACCHIO, A.; STAIANO, M.; MASSAROTTI, D.; ZENI, L.; D'AURIA, S. An innovative plastic optical fiber-based biosensor for new bio/applications. the case of celiac disease. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 176, p. 1008–1014, 2013.
- CHINOWSKY, T.; QUINN, J.; BARTHOLOMEW, D.; KAISER, R.; ELKIND, J. Performance of the spreeta 2000 integrated surface plasmon resonance affinity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 91, n. 1-3, p. 266–274, 2003.
- CHINOWSKY, T. M.; SOELBERG, S. D.; BAKER, P.; SWANSON, N. R.; KAUFFMAN, P.; MACTUTIS, A.; GROW, M. S.; ATMAR, R.; YEE, S. S.; FURLONG, C. E. Portable 24-analyte surface plasmon resonance instruments for rapid, versatile biodetection. **Biosensors and Bioelectronics**, Elsevier, v. 22, n. 9-10, p. 2268–2275, 2007.
- CHUNG, J.; KIM, S.; BERNHARDT, R.; PYUN, J. C. Application of spr biosensor for medical diagnostics of human hepatitis b virus (hhbv). **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 111, p. 416–422, 2005.
- COUTURE, M.; ZHAO, S. S.; MASSON, J.-F. Modern surface plasmon resonance for bioanalytics and biophysics. **Physical Chemistry Chemical Physics**, Royal Society of Chemistry, v. 15, n. 27, p. 11190–11216, 2013.

DASH, J. N.; JHA, R. Spr biosensor based on polymer pcf coated with conducting metal oxide. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 26, n. 6, p. 595–598, 2014.

ELKIND, J.; STIMPSON, D.; STRONG, A. A.; BARTHOLOMEW, D.; MELENDEZ, J. Integrated analytical sensors: the use of the tispr-1 as a biosensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 54, n. 1-2, p. 182–190, 1999.

FONTANA, E. Analysis of optical surfaces by means of surface plasmon spectroscopy. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, IEEE, v. 45, n. 2, p. 399–405, 1996.

FONTANA, E.; PANTELL, R. H.; STROBER, S. Surface plasmon immunoassay. **Applied Optics**, Optical Society of America, v. 29, n. 31, p. 4694–4704, 1990.

GHOSH, S.; RAY, M. Analysis of silicon based surface plasmon resonance sensors with different amino acids. **Silicon**, Springer, v. 7, n. 4, p. 313–322, 2015.

HERNÁNDEZ, D.; AL. et. Prism-based surface plasmon resonance for dual-parameter sensing. **IEEE SENSORS JOURNAL**, v. 18, n. 10, p. 1–5, 2018.

HOMOLA, J. Present and future of surface plasmon resonance biosensors. **Analytical and bioanalytical chemistry**, Springer, v. 377, n. 3, p. 528–539, 2003.

HOMOLA, J. **Surface Plasmon Resonance Sensors**. [S.l.]: Springer, 2006. v. 44.

HOMOLA, J.; PILIARIK, M. Surface plasmon resonance (spr) sensors. In: **Surface plasmon resonance based sensors**. [S.l.]: Springer, 2006. p. 45–67.

HU, C.; GAN, N.; CHEN, Y.; BI, L.; ZHANG, X.; SONG, L. Detection of microcystins in environmental samples using surface plasmon resonance biosensor. **Talanta**, Elsevier, v. 80, n. 1, p. 407–410, 2009.

HU, J.; CAO, B.; WANG, S.; LI, J.; WEI, W.; ZHAO, Y.; HU, X.; ZHU, J.; JIANG, M.; SUN, X. *et al.* Design and fabrication of an angle-scanning based platform for the construction of surface plasmon resonance biosensor. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 78, p. 1–7, 2016.

HU, J. e. a. Design and fabrication of an angle-scanning based platform for the construction of surface plasmon resonance biosensor. **Optics and Lasers in Engineering**, n. 78, p. 1–7, 2016.

KRETSCHMANN, E.; KRÖGER, E. Reflection and transmission of light by a rough surface, including results for surface-plasmon effects. **JOSA**, Optical Society of America, v. 65, n. 2, p. 150–154, 1975.

KUMBHAT, S.; SHARMA, K.; GEHLOT, R.; SOLANKI, A.; JOSHI, V. Surface plasmon resonance based immunosensor for serological diagnosis of dengue virus infection. **Journal of pharmaceutical and biomedical analysis**, Elsevier, v. 52, n. 2, p. 255–259, 2010.

LAKSONO, F.; SUPARDIANNINGSIH, M. A.; ABRAHA, K. Development of low cost and accurate homemade sensor system based on surface plasmon resonance (spr). In: **J. Phys.: Conf. Ser.** [S.l.: s.n.], 2018. v. 1011, p. 012043.

LERTVACHIRAPAIBOON, C.; AL. et. A smartphone-based surface plasmon resonance platform. **Anal. Methods**, v. 10, p. 4732–4740, 2018.

- LIEDBERG, B.; NYLANDER, C.; LUNSTRÖM, I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing. **Sensors and actuators**, Elsevier, v. 4, p. 299–304, 1983.
- LOUREIRO, F.; NETO, A. B.; LIMA, A.; MOREIRA, C.; TEJO, F. Molecular transport and mutual diffusion measurement method in a micro-fluidic system, based on surface plasmon resonance spectroscopy. **Procedia Chemistry**, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 1099–1102, 2009.
- LOUREIRO, F. C.; NETO, A. B.; MOREIRA, C. S.; LIMA, A. M.; NEFF, H. A method for determining the mutual diffusion coefficient of molecular solutes based on surface plasmon resonance sensing. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 154, n. 2, p. 129–136, 2011.
- MARQUART, A. **SPRpages home**. 2020. Acessado em: 31.05.2020. Disponível em: <<https://www.sprpages.nl/instruments>>.
- MOREIRA, C.; LIMA, A.; NEFF, H.; THIRSTRUP, C. Temperature-dependent sensitivity of surface plasmon resonance sensors at the gold–water interface. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 134, n. 2, p. 854–862, 2008.
- MOREIRA, C. d. S. Projeto e realização de um biochip óptico para aplicações biológicas baseado no princípio de ressonância de plásmons de superfície [thesis]. **Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande**, 2010.
- MOREIRA, C. d. S.; OLIVEIRA, L. C.; FISCHER, R.; MEDEIROS, E. S.; LIMA, A. M. N.; NEFF, H. Polymer-based surface plasmon resonance biochip: construction and experimental aspects. **Research on Biomedical Engineering**, SciELO Brasil, v. 32, n. 1, p. 92–103, 2016.
- MOREIRA, C. S.; LIMA, A.; NEFF, H.; NETO, A.; LOUREIRO, L.; FILHO, C. A. D. S.; JUNIOR, L. H. L. Biossensores: Tecnologia e aplicações. In: **V Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação [online]**. [S.l.: s.n.], 2010.
- MOREIRA, C. S.; NETO, A. G. B.; LIMA, A. M.; THIRSTRUP, C.; NEFF, H. Exchangeable low cost polymer biosensor chip for surface plasmon resonance spectroscopy. **Procedia Chemistry**, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 1479–1482, 2009.
- MYSZKA, D. G.; RICH, R. L. Implementing surface plasmon resonance biosensors in drug discovery. **Pharmaceutical science & technology today**, Elsevier, v. 3, n. 9, p. 310–317, 2000.
- OLIVEIRA, L.; MOREIRA, C.; THIRSTRUP, C.; MELCHER, E.; LIMA, A.; NEFF, F. A surface plasmon resonance biochip that operates both in the angular and wavelength interrogation modes. **IEEE TIM**, v. 62, p. 1223–1232, 2013.
- OLIVEIRA, L. C. **Construção e caracterização de sensores SPR: influência da camada metálica e do substrato dielétrico**. [S.l.]: Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- OLIVEIRA, L. C.; LIMA, A. M. N.; THIRSTRUP, C.; NEFF, H. F. **Surface plasmon resonance sensors: a materials guide to design and optimization**. [S.l.]: Springer, 2017.
- OLIVEIRA, L. C.; LIMA, A. M. N.; THIRSTRUP, C.; NEFF, H. F. **Surface Plasmon Resonance Sensors: A Materials Guide to Design, Characterization, Optimization, and Usage**. [S.l.]: Springer, 2019. v. 70.

OLIVEIRA, T. A. d. *et al.* **Elipsômetro automatizado para medição da ressonância de plasmon de superfície por angulação ótica e integração com labview®**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

OTTO, A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. **Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei**, Springer, v. 216, n. 4, p. 398–410, 1968.

PATSKOVSKY, S.; KABASHIN, A. V.; MEUNIER, M.; LUONG, J. H. Silicon-based surface plasmon resonance sensing with two surface plasmon polariton modes. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 42, n. 34, p. 6905–6909, 2003.

PONTE, D. Ferreira da. **Espectrômetro de plásmons de superfície no infravermelho para o desenvolvimento de biosensores**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

PREECHABURANA, P.; GONZALEZ, M. C.; SUSKA, A.; FILIPPINI, D. Surface plasmon resonance chemical sensing on cell phones. **Angewandte Chemie International Edition**, Wiley Online Library, v. 51, n. 46, p. 11585–11588, 2012.

RAETHER, H. Surface plasmons on smooth surfaces. In: **Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings**. [S.l.]: Springer, 1988. p. 4–39.

RICHARDS, J.; GARABEDIAN, R.; GONZALEZ, C.; KNOESEN, A.; SMITH, R.; SPENCER, R.; COLLINS, S. Surface-plasmon excitation using a polarization-preserving optical fiber and an index-matching fluid optical cell. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 32, n. 16, p. 2901–2906, 1993.

RIVERO, P. J.; URRUTIA, A.; GOICOECHEA, J.; ARREGUI, F. Optical fiber humidity sensors based on localized surface plasmon resonance (lspr) and lossy-mode resonance (lmr) in overlays loaded with silver nanoparticles. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 173, p. 244–249, 2012.

SCHASFOORT, R. B.; MCWHIRTER, A. Spr instrumentation. In: **Handbook of surface plasmon resonance**. [S.l.]: RSC Publishing, Cambridge, 2008. p. 35–80.

SENER, G.; UZUN, L.; SAY, R.; DENIZLI, A. Use of molecular imprinted nanoparticles as biorecognition element on surface plasmon resonance sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 160, n. 1, p. 791–799, 2011.

SOUSA, T. A. de; OLIVEIRA, L.; LOUREIRO, F.; LIMA, A. M.; NEFF, H. Evaluating the signal processing chain employed in surface plasmon resonance biosensing. In: **IEEE. 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings**. [S.l.], 2014. p. 1606–1611.

TANABE, I.; AL. *et.* Far- and deep-ultraviolet surface plasmon resonance sensors working in aqueous solutions using aluminum thin films. **Scientific Reports**, v. 17, n. 5934, p. 1–7, 2017.

TERCEROS, I.; ORMACHEA, O.; URQUIDI, O.; VILLAZÓN, A. Desarrollo de un espectrómetro de bajo costo con una rejilla ajustable y control electrónico inalámbrico. **Revista Politécnica**, v. 37, n. 1, p. 113–113, 2016.

- THIRSTRUP, C.; ZONG, W.; BORRE, M.; NEFF, H.; PEDERSEN, H.; HOLZHUETER, G. Diffractive optical coupling element for surface plasmon resonance sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 100, n. 3, p. 298–308, 2004.
- WANG, Y.; LIU, X.; CHEN, P.; TRAN, N. T.; ZHANG, J.; CHIA, W. S.; BOUJDAY, S.; LIEDBERG, B. Smartphone spectrometer for colorimetric biosensing. **Analyst**, Royal Society of Chemistry, v. 141, n. 11, p. 3233–3238, 2016.
- WILLETS, K. A.; DUYNE, R. P. V. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing. **Annu. Rev. Phys. Chem.**, Annual Reviews, v. 58, p. 267–297, 2007.
- YEH, P. *et al.* **Optical waves in layered media**. [S.l.]: Wiley New York, 1988. v. 95.
- ZHANG, Y.-Y.; LAI, J.-C.; YIN, C.; WANG, Q.-H.; LI, Z.-H. The influences of the probe beam divergence on the performance of imaging surface plasmon resonance sensors. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 46, n. 9, p. 635–642, 2008.
- ZHOU, X.; CHEN, K.; LI, L.; PENG, W.; YU, Q. Angle modulated surface plasmon resonance spectrometer for refractive index sensing with enhanced detection resolution. **Optics Communications**, Elsevier, v. 382, p. 610–614, 2017.

## APÊNDICE A – DESENHOS

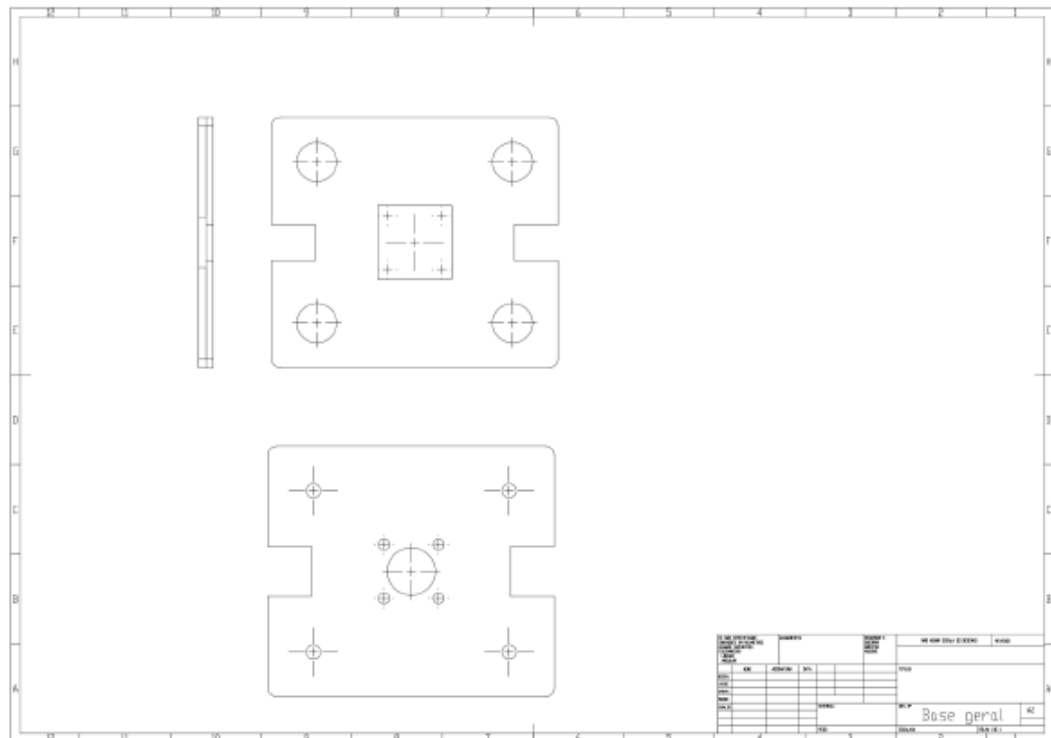


Figura 46 – Base Inferior da Plataforma

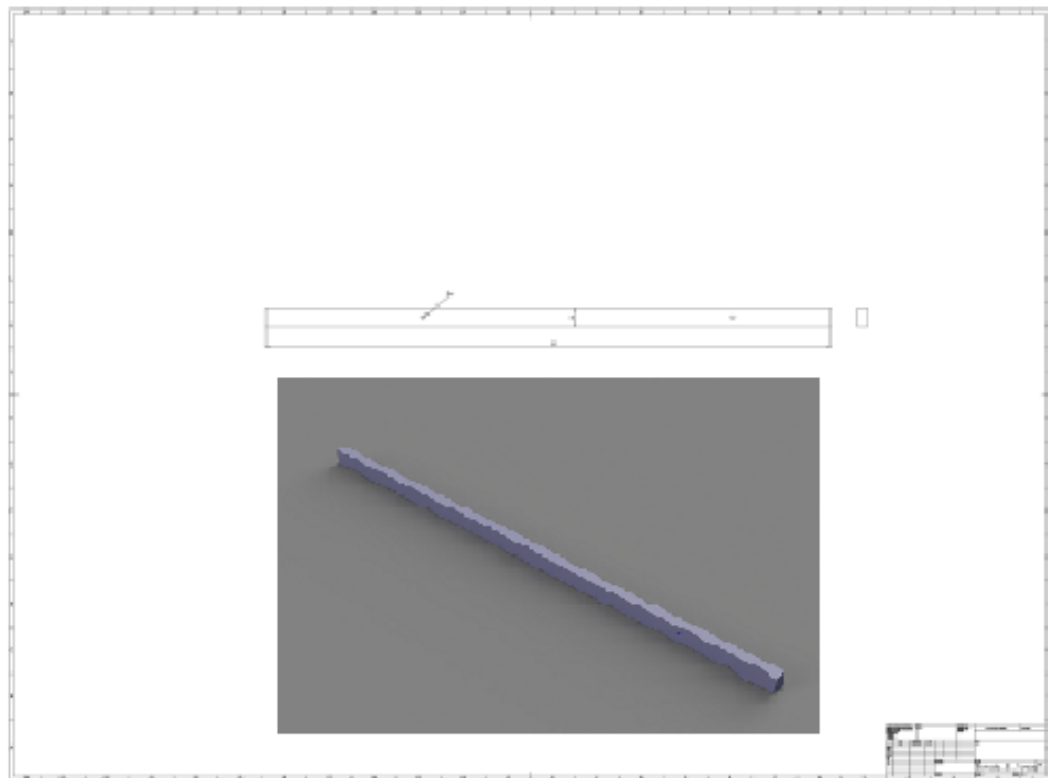


Figura 47 – Borda A Case

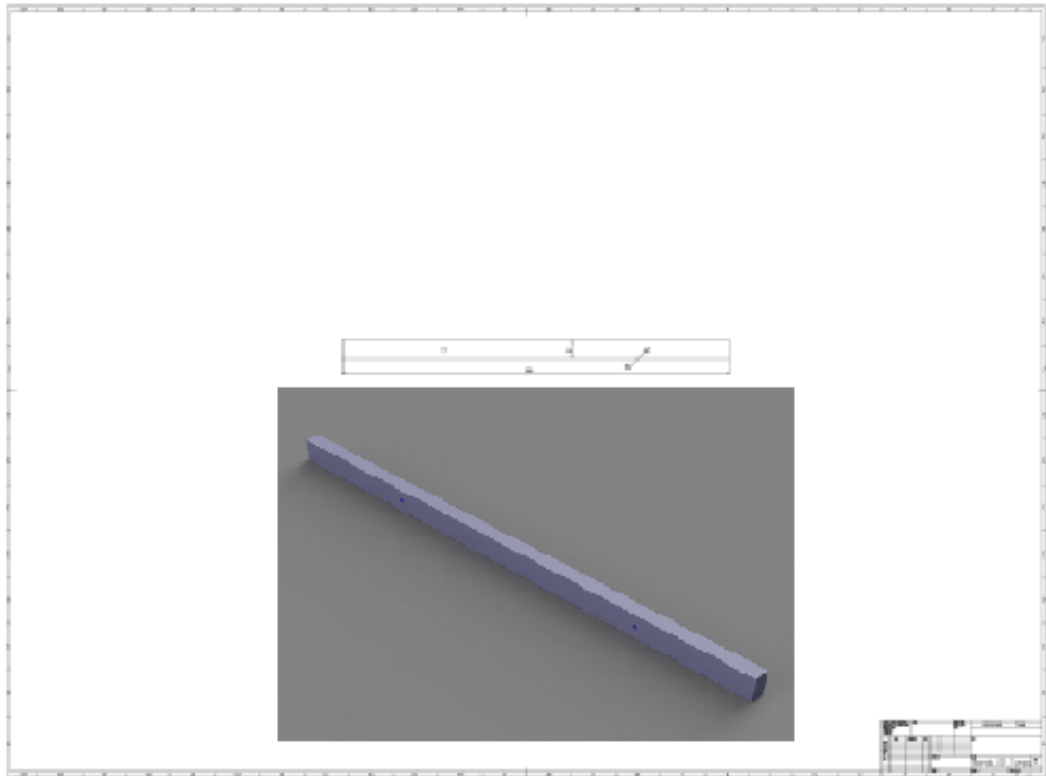


Figura 48 – Borda B Case

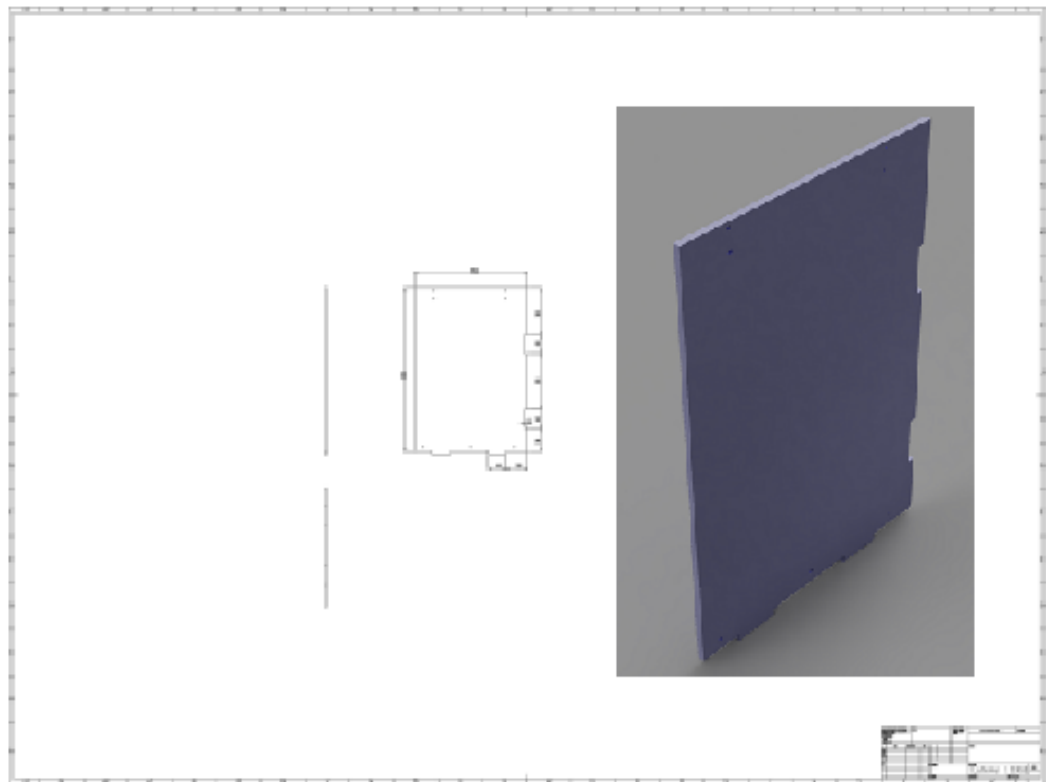


Figura 49 – Laterais Case

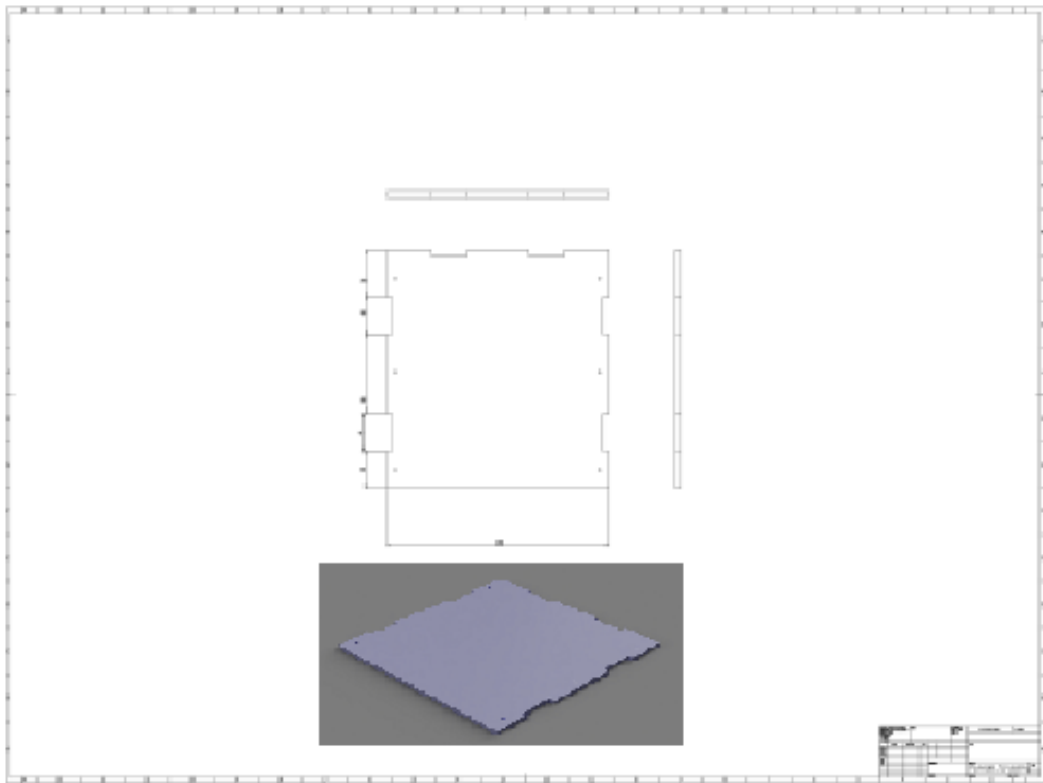


Figura 50 – Tampa Traseira Case

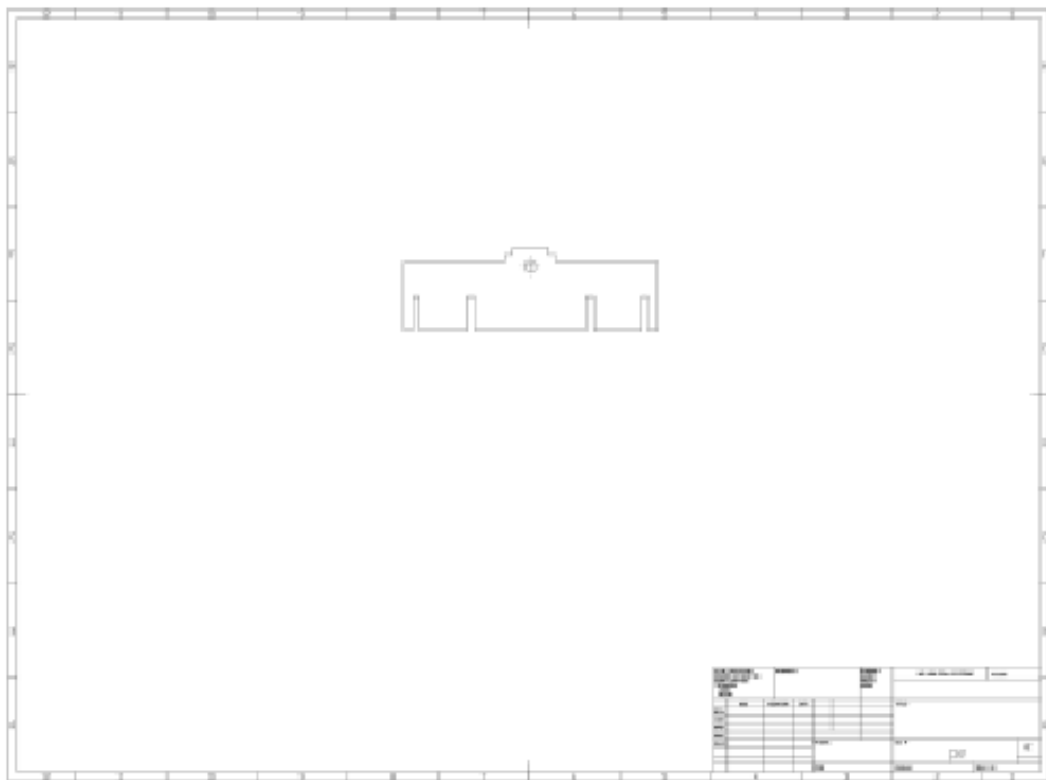


Figura 51 – Pé Plataforma



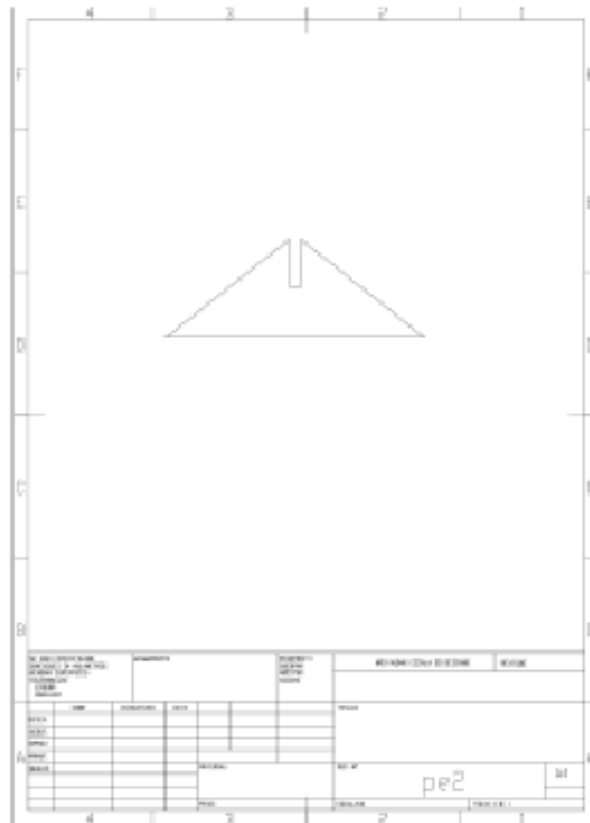


Figura 52 – Pé B Plataforma

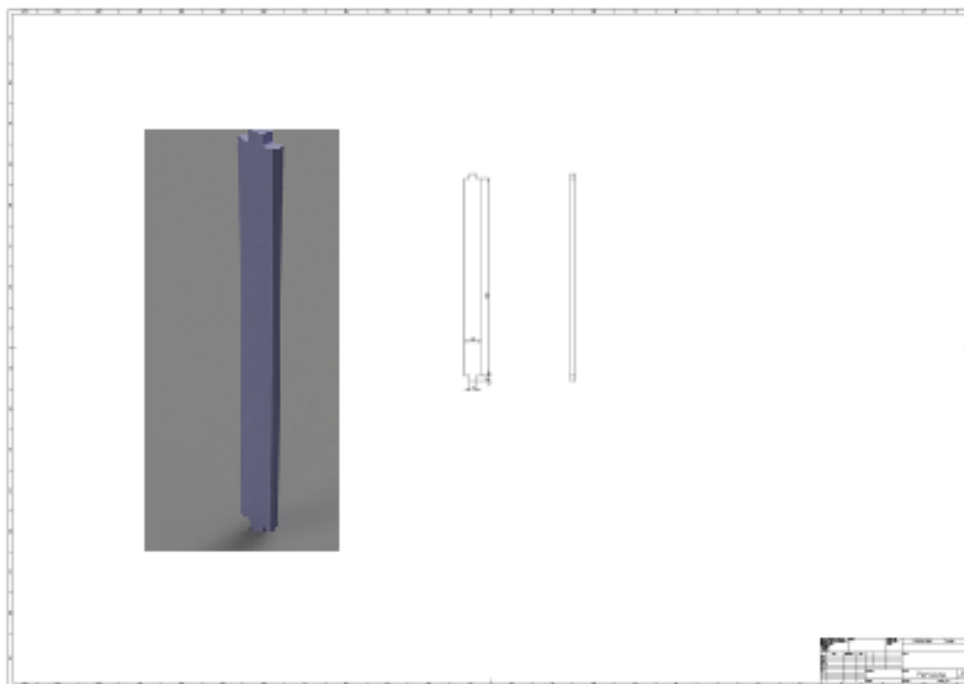


Figura 53 – Persiana Case



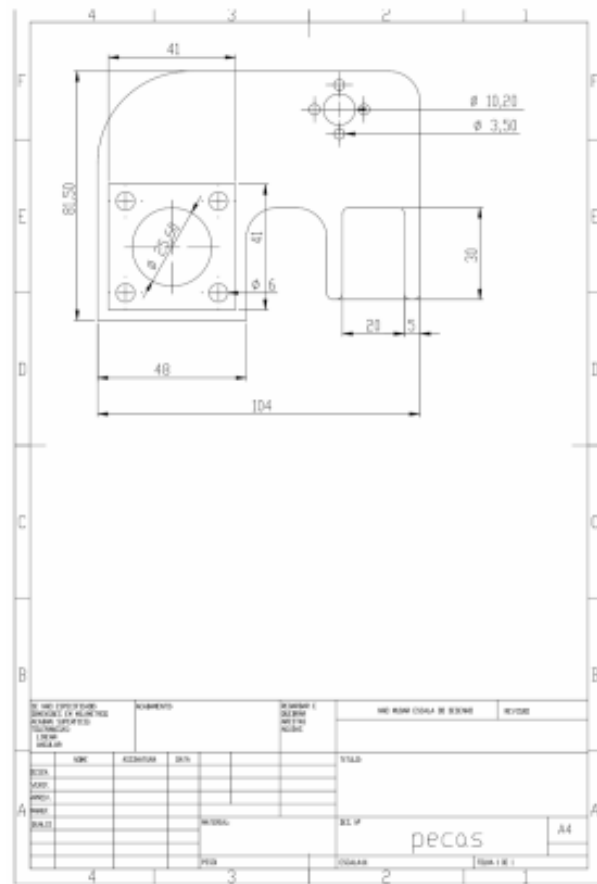


Figura 56 – Suportes L Plataforma

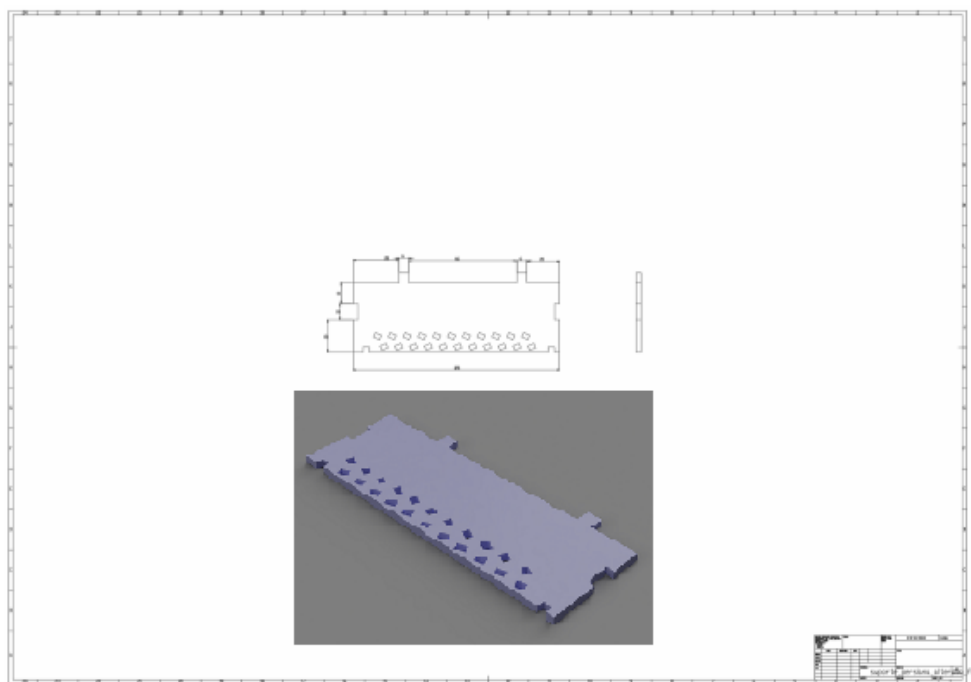


Figura 57 – Suportes Persiana Case



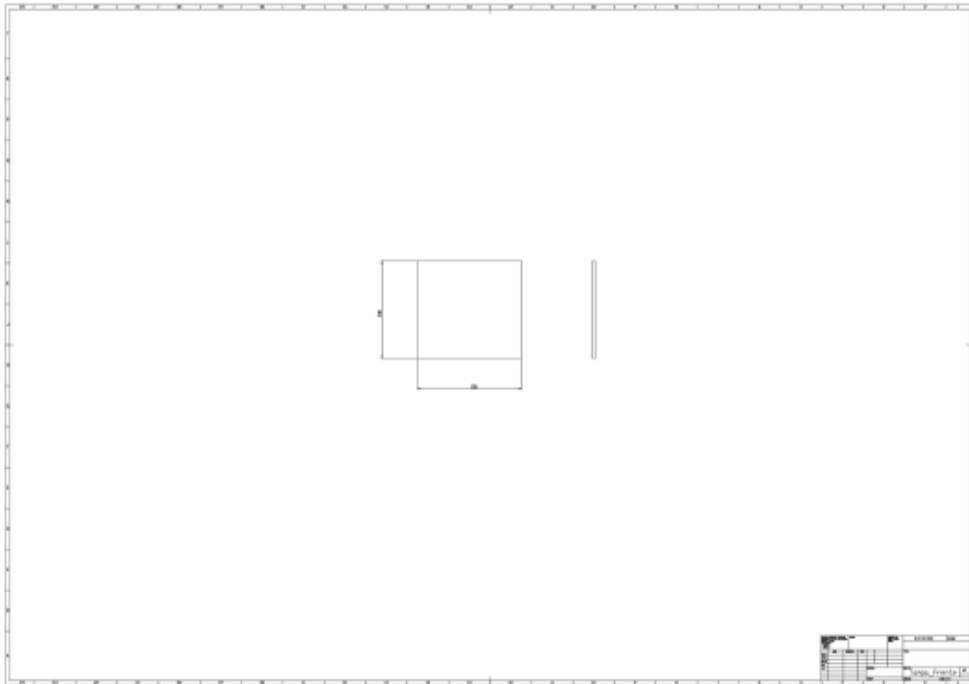


Figura 60 – Tampa Frontal Case

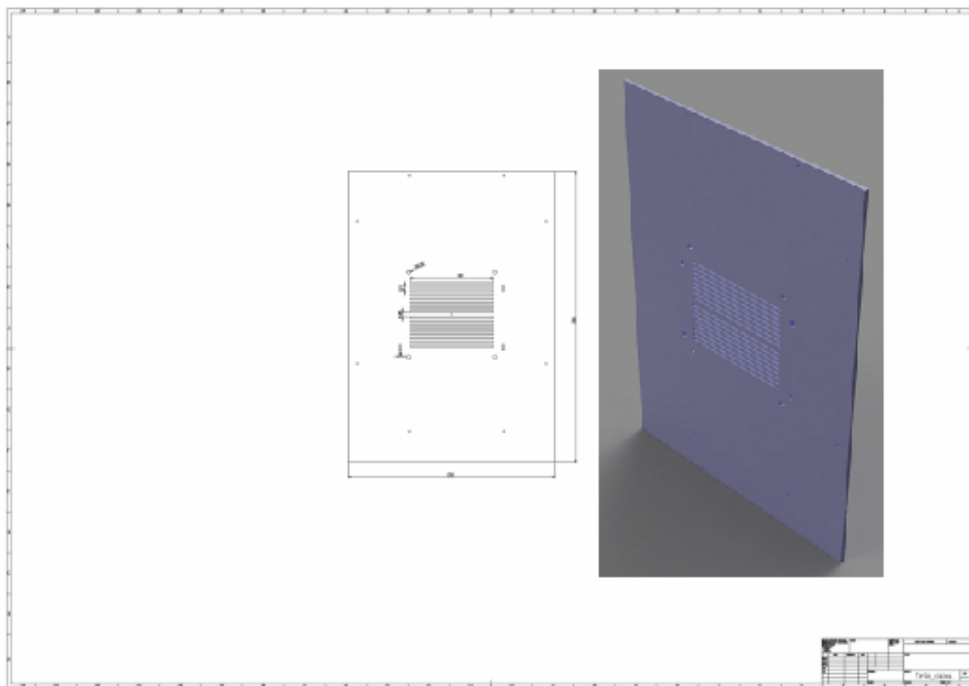


Figura 61 – Teto Case

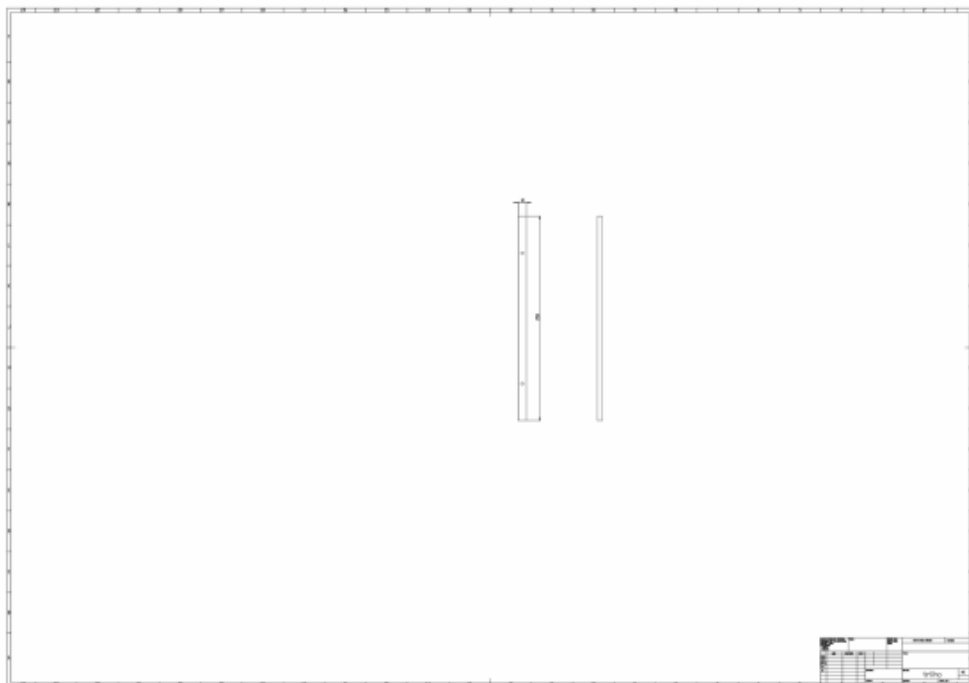



Figura 62 – Trilho da Tampa Frontal Case

## APÊNDICE B – LISTA DE ENTRADAS E SAÍDAS

	<b>LISTA</b>					<b>LI-001</b>					
	CLIENTE: <b>UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ARIDO</b>										FOLHA: <b>1 de 6</b>
	PROGRAMA: <b>Pós Graduação em Engenharia Elétrica</b>										CODIGO DE PROJETO : <b>PLATAFORMA-01</b>
	AREA: <b>CONTROLE</b>										DIAG. DE REDE:
<b>UFERSA-MOS</b>		TITULO: <b>LISTA DE ENTRADAS E SAÍDAS MICROCONTROLADOR</b>									
FIRMA PROJETISTA: FRANCISCO JOSIRAN										Nº OSP : <b>01</b>	
Nº INTERNO: -			RESP. TECNICO: FRANCISCO JOSIRAN			CONTRATO Nº:			RUBRICA:		
NOME ARQUIVO : Microsoft® Excel 2003 / LI-LISTA DE ENTRADAS E SAIDAS_PLATAFORMA.xls					CREA Nº: 061762536-0-CE						
<b>ÍNDICE DE REVISÕES</b>											
<b>REV.</b>	<b>DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS</b>										
<b>0</b>	<b>EMISSÃO ORIGINAL</b>										
	REV. 0	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H	REV. I	
DATA	06/08/20										
PROJETO	PLATAF										
EXECUÇÃO	JOSIRAN										
VERIFICAÇÃO	JOSIRAN										
APROVAÇÃO	JOSIRAN										
AS INFORMAÇÕES DESTES DOCUMENTOS SÃO PROPRIEDADE DE JOSIRAN, SENDO PROIBIDA A UTILIZAÇÃO FORA DA SUA FINALIDADE.											
FORMULÁRIO PERTENCENTE A FRANCISCO JOSIRAN DA SILVA											

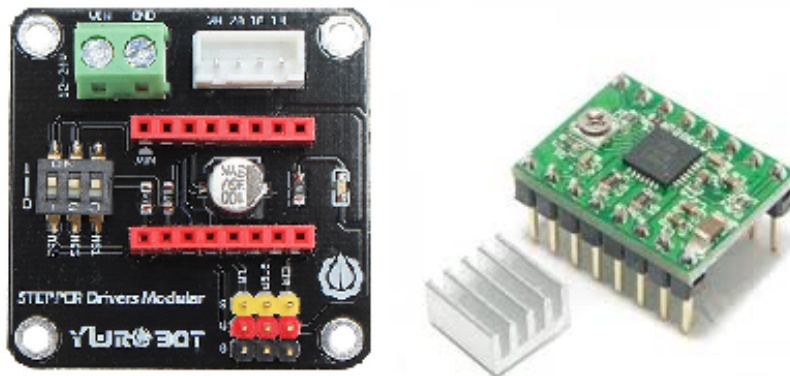
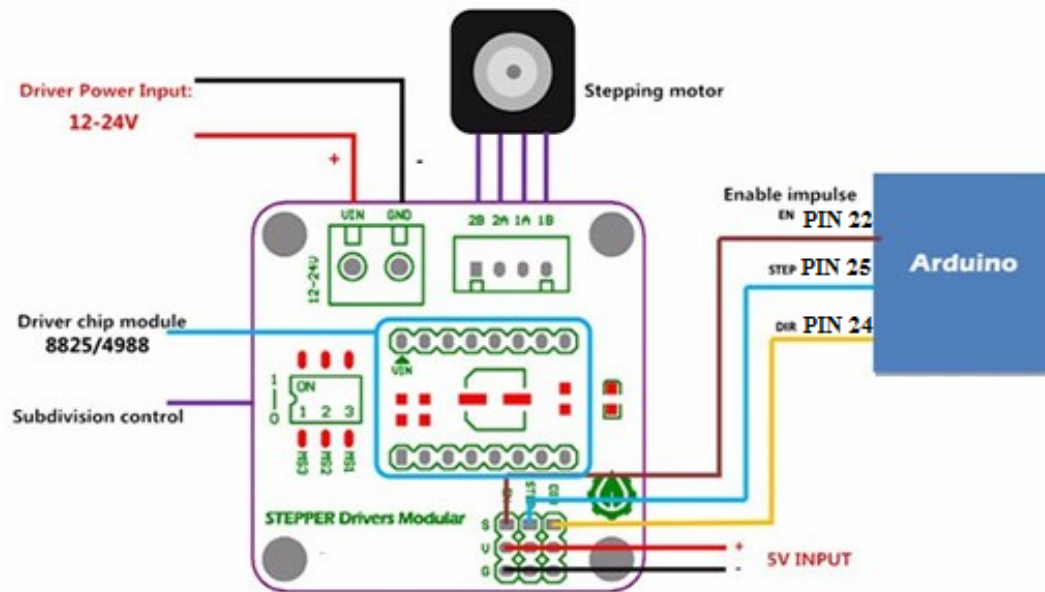








## APÊNDICE C – DIAGRAMA DE INTERLIGAÇÃO



OBS:

Este módulo precisa de dois conjuntos de alimentação.

Tensão do motor de passo: 12-24v.

Tensão de alimentação de alimentação de lógica: 5v.

Há uma porta no terminal de controle.

EN: é ativar o impulso (Ativo Baixo).

STEP: é a entrada de impulso de passo.

DIR: é impulso de direção.

Figura 63 – Diagrama Interligação do Motor de passo da câmera

**APÊNDICE D – ARTIGO PUBLICADO EM CONGRESSO**

Congresso Brasileiro de Automática 2020 DOI:<https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1450>