DOI: 10.48011/asba.v2i1.1450

Projeto e desenvolvimento de uma plataforma automatizada para sensor baseado na ressonância de plasmons de superfície

Francisco Josiran da Silva * **Leiva Casemiro Oliveira** *

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN Brasil

Abstract: Systems for biological event detection are essential for understanding and monitoring bio-chemical interactions. Among the commonly used detection technologies, those based on surface plasmon resonance (SPR) are highlighted due to high sensitivity results. The instrumentation of SPR sensors requires optical, electronic, fluidic and mechanical components, that are carefully diposed for the correct excitation of the phenomenon. These components are normally rearranged in fixed positions. Any adjustments are made manually, so that the sensor always works in the same condition of use. Besides, many sensors have bulky instrumentation and expensive routly procedures, requiring well-trained operators and advanced laboratory infrastructure for the component adjustments. The PPBIO biochip enable practical and less complex SPR sensors development. However, the structure for this biochip are also based in fixed position for the components. This work proposes the development of an automated SPR sensor platform, allowing quicly easily and precisely components manipulation. The PPBIO biochip was used to demonstrate the automation and functioning of the SPR sensor, operating in the angular interrogation mode.

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 plamons de superfície (SPR) ganham destaque devido sua à 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 e menos complexa. Todavia, as estruturas para esse biochip também são baseadas em componentes com posições fixas. Esse trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma automatizada de sensores SPR, permitindo a manipulação dos componentes de maneira rápida, fácil e precisa. O biochip PPBIO foi utilizado para demonstrar a automação e funcionamento do sensor SPR operando no modo de interrogação angular.

Keywords: SPR sensor, automation, biosensor, intelligent instrumentation
Palavras-chaves: sensor SPR, automação, biossensor, instrumentação inteligente

1. INTRODUÇÃO

Sensores baseados na Ressonância de Plasmons de Superfície (SPR, sigla em inglês para *Surface Plasmons Resonance*) são soluções bem estabelecidas para estudar interações moleculares em tempo-real, sem a necessidade de marcadores, (Homola, 2006) sendo usados na indústria farmacêutica, no controle de qualidade de substâncias (Oliveira et al., 2014), na descoberta de drogas, no diagnóstico de doenças e em ciências da vida (Carvalho et al., 2003). Os sensores SPR valem-se da geração de campos evanescentes devido à 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., 2019).

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 (PS). O campo evanescente gerado na SPR fica confinado à fronteira do metal e da substância em análise (amostra), sendo muito sensível à qualquer alteração nessa interface, tal como a adsorção de moléculas na superfície do metal.

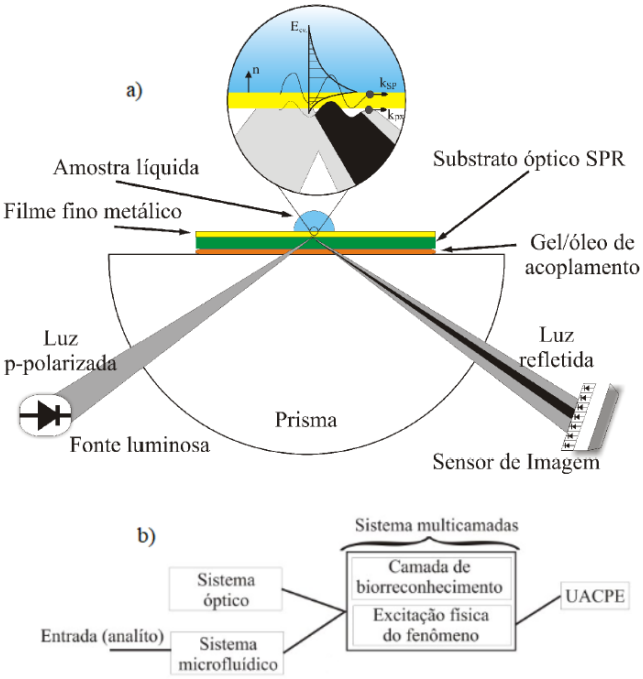

Figura 1. a) Indicação dos elementos que constituem uma configuração ATR típica usando prisma. b) Digrama de blocos de um (bio)sensor SPR.

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 and Kröger, 1975). Em particular, a configuração ATR em prismas proposta por Kretschmann passou 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 1a.

A instrumentação de um sensor SPR exige componentes ópticos, eletrônicos, fluídicos e mecânicos, cuidadosamente posicionados para a correta excitação do fenômeno. O diagrama de blocos da Figura 1b apresenta os sistemas presentes nos (bio)sensores SPR. Para excitação óptica dos PS, o Sistema Óptico ajusta um feixe de luz às condições ópticas essenciais de polarização, foco e posição de incidência para a qual se atinge a ATR. O Sistema Microfluídico é responsável pela entrega (sistema propulsor - microbomba) e confinamento (célula de fluxo) da amostra, que pode ou não conter o analito (substância sob análise), à superfície sensível do sensor. O Sistema Multicamadas contém os materiais usados para a confecção do sensor, incluindo o par substrato/metal e uma camada bioespecífica (biorreceptor) para interagir com as substâncias contidas no analito.

Muitos trabalhos científicos e de engenharia detalham o desenvolvimento de sensores com prismas triangulares (B. and R., 2013), trapezoidais (Tanabe and et al., 2017) e semicilíndricos (Hernández and et al., 2018; Akimoto and et al., 2000), que em geral exigem componentes rotacionais para excitação e detecção da ressonância. 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 and et al., 2018).

O prisma PPBIO (Moereira and et al., 2009) é uma solução promissora para o desenvolvimento de sensores SPR com baixa complexidade de instrumentação. Como ilustrado nas Figuras 2a-b, tem dimensões reduzidas (22×10×3 mm) e sua forma trapezoidal possibilita que os feixes luminosos cheguem e saiam perpendicular à base inferior do prisma, evitando partes rotacionais. As paredes inclinadas refletem a luz em um ângulo de 68° e a camada metálica é depositada sob sua superfície superior evitando gel/óleo para acoplamento. Tais características reduzem significativamente custos com instrumentação. Para mais detalhes sobre o PPBIO, indicam-se as referências (Oliveira et al., 2013, 2016, 2012).

No modo angular (AIM), emprega-se uma feixe de luz quase monocromática com largura ínfima, centralizada em um valor fixo de comprimento de onda a depender da multicamada. Lentes e espelhos entregam a fonte de luz ao prisma. Uma câmera CCD é utilizada para capturar o

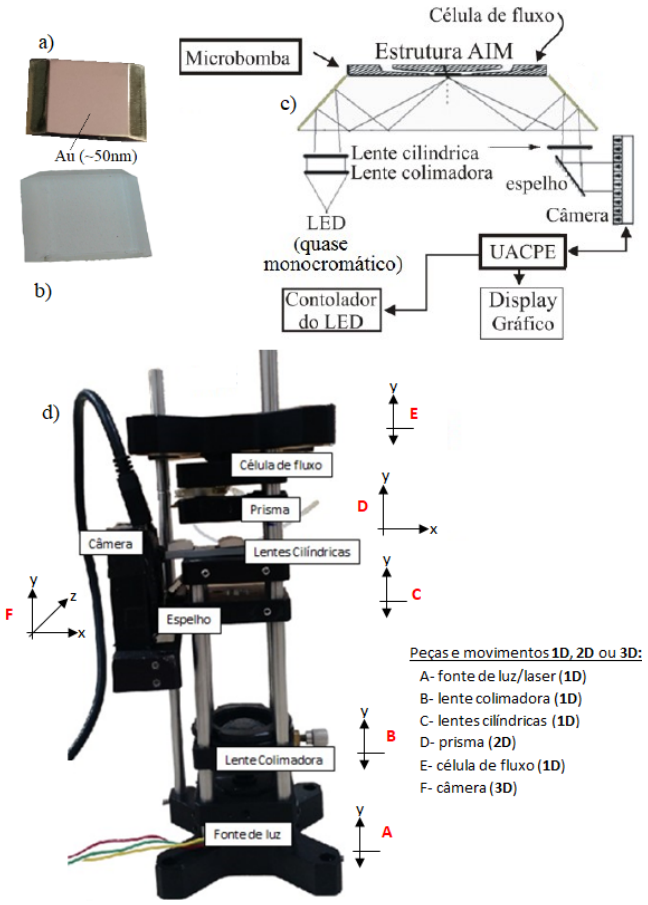

Figura 2. Imagens do PPBIO a) com e b) sem camada metálica. c) Disposição dos elementos usados na excitação do fenômeno SPR usando o PPBIO. d) Montagem experimental do sensor SPR baseado no PPBIO para o modo de interrogação angular. Destaque para os movimentos necessários para ajuste de cada elemento.

ângulo em que ocorre a ressonância. A Figura 2c apresenta a disposição dos elementos supracitados e que compõem o sensor baseado no PPBIO. No *set-up* experimental proposto por (Oliveira et al., 2013) estes componentes são rearranjados em posições fixas, ver Figura 2d. Os movimentos de cada peça estão indicados na figura. Apenas o prisma e a câmera exigem movimentos em mais de uma dimensão. O ajuste vertical (eixo-y) é realizado para entrega correta do feixe de luz incidente. O prisma também devem se ajustar horizontalmente (eixo-x) para alinhamento entre a região sensível e a célula de fluxo. A câmera possui o ajuste de profundidade (eixo-z) para correta captura da luz refletida (imagem SPR).

Tais ajustes são realizados de maneira manual, em que operador bem treinado é necessário para realizar essa tarefa. Além disso, para cada nova condição de uso (mudança de ambiente, troca do tipo de PPBIO, mudança na fonte de luz e substância analisada) um novo reajuste faz-se necessário. Não obstante, sempre após a substituição de uma peça há a necessidade de um novo alinhamento. Caso a iluminação da região sensível (*sensing spot*) não for preservada, a dispersão dos feixes no PPBIO não será obtida adequadamente quando o ângulo de incidência variar. Este tipo de problema de alinhamento pode ser resolvido com a implementação da instrumentação automatizada, a fim de manter invariável a posição do *sensing spot* na superfície metálica para determinado ângulo de incidência.(Oliveira et al., 2019).

Diante do exposto, esse trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma automatizada para sensores SPR baseados no PPBIO, a qual permita a movimentação individual ou em bloco dos componentes, de maneira rápida, fácil e precisa. A instrumentação permite a movimentação dos elementos por meio de um software embarcado. Com o uso de um sistema microcontrolado, a plataforma controla a temperatura interna da estrutura, bem como possibilita o controle remoto das partes do sensor.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

O dimensionamento do PPBIO projetado por (Moereira and et al., 2009) e usado no *set-up* implementado por (Oliveira et al., 2013) encontra-se na Figura 3, onde ilustra a geometria do prisma do biochip e o caminho ideal do feixe de luz através do biochip.

O dimensionamento do 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 (α) é metade do ângulo de incidência na superfície de medição (θ), $\alpha = \theta/2$, padronizando as dimensões do prisma. Para maiores indicamos a ref. (Oliveira et al., 2013).

Sendo D_{X2_min} e D_{X2_max} as distâncias da entrada no prisma, do primeiro e do último feixe de luz no ponto X4 (*sensing spot*), o espectro angular do caminho óptico da luz no interior do prisma vai de 62° a 73°, de acordo com a equação 1 (Oliveira et al., 2013):

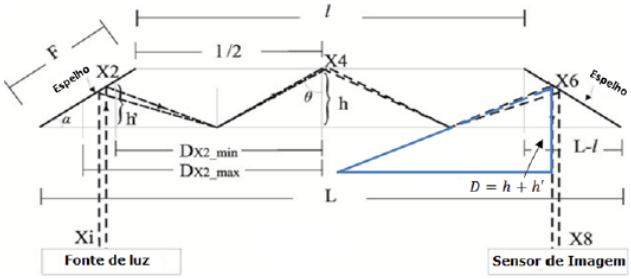

Figura 3. Detalhes da trilha óptica percorrida pelos feixes luminosos. Apresentado (em azul) para o espaço percorrido (D) da base inferior até tocar o ponto focal (X4). Os valores das medidas apresentadas na imagem são: F = 5,36mm; D_{X2_min} = 9,66mm; D_{X2_max} = 12,62mm; h' = 0,5 - 2,5mm; h = 3mm; L = 26,72mm; l = 17,84mm; α = 34°; e θ = 68°.

$$\theta_{min} = tan^{-1}\left(\frac{D_{X2_min}}{h'_{max} + h}\right), \theta_{max} = tan^{-1}\left(\frac{D_{X2_max}}{h'_{min} + h}\right) \quad (1)$$

Aplicando a Análise de Fresnel (Oliveira et al., 2019; Abelès, 1950) para o espectro angular do PPBIO, é possível obter as curvas SPRs fornecidas pelo sensor baseado no PPBIO. A Figura 4 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 ajuste da relação pixel vs. ângulo.

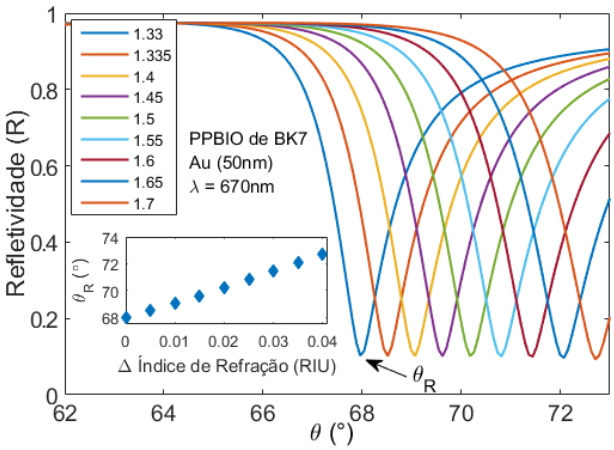

Figura 4. Refletividade para substâncias aquosas. Curva SPR teórica para o PPBIO manufaturado com vidro BK7 e camada de ouro com 50 nm operando no modo AIM. Detalhe para comportamento de θ_R em função da variação do índice de refração da substância em análise.

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 célula de fluxo alinha-se precisamente ao foco dos feixes luminosos. Desalinhamentos verticais positivos ou negativos (Figs. 5b-c respectivamente) ou desalinhamentos horizontais (Fig 5d) de algum dos elementos oca-

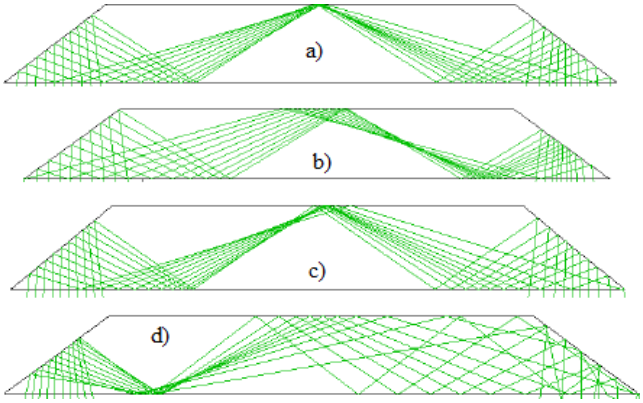

Figura 5. a) Dispersão dos feixes luminosos dentro do PPBIO para alinhamento correto de todos os elementos que compõem o *set-up* experimental. Desalinhamento vertical b) positivo e c) negativo dos elementos. d) Desalinhamento horizontal dos elementos.

sionam má formação da imagem SPR e a dispersão dentro do prisma ocorre de forma desordenada.

A necessidade de realinhamento das peças pode ocorrer devido a condições ambientais, como a variação térmica durante a execução experimento. O comportamento térmico do prisma nas temperaturas ambientes (25°C, 30°C e 35°C), e em temperaturas elevadas de 50°C e 70°C (comum em aplicações específicas, ver de Lima Junior et al. (2012), foi analisado. Observando que o prisma PPBIO dilata/comprime do ponto central para as extremidades, as modificações na posição X4 produzirão focos borrados contribuindo para desalinhamento entre o *sensing spot*, célula de fluxo e câmera, conforme indicado na Figura 6.

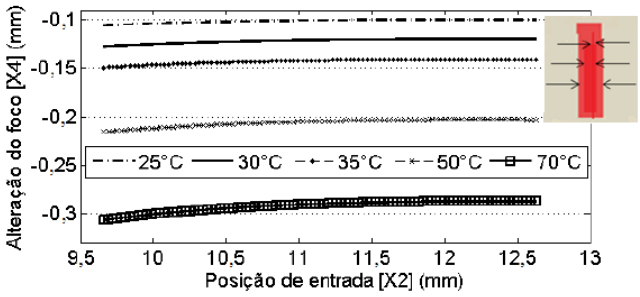

Figura 6. Efeito do aumento da temperatura causando borramento na região do *sensing spot*. Detalhe para perda de foco da fonte luminosa.

A variação de temperatura também afeta a posição de saída dos feixes ao serem refletidos pela face inclinada do prisma (X6), ver Figura 7. A posição de saída está diretamente relacionada com a posição em que os feixes atingem o sensor de imagem (X8), alterando o valor do ângulo de ressonância medido pelo sensor de imagem.

3. PROJETO DA PLATAFORMA AUTOMATIZADA

Para o projeto da plataforma, foram identificados os parâmetros principais de alinhamento para a excitação da SPR com PPBIO. A Figura 8 apresenta o diagrama de óptica geométrica, indicando distâncias, ângulos, posições, além das características construtivas do sistema. Os elementos

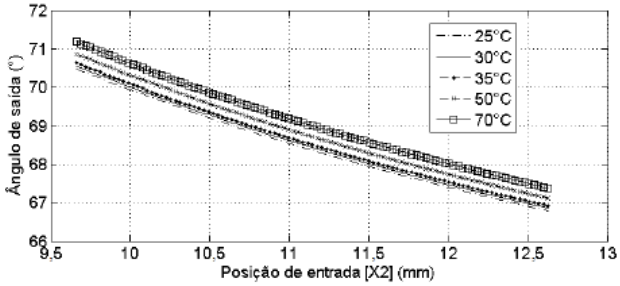

Figura 7. Gráficos da variação do ângulo de ressonância em função da posição de entrada para diferentes temperaturas.

empregados na análise geométrica foram as lentes cilíndrica LJ190L1 (para foco) e esférica plano-convexa LA1951 (para colimação dos feixes de luz); o diodo *laser* L670P005 de 670±10nm e a câmera CMOS DCC1645C. Todos os elementos são comercializados pela empresa Thorlabs.

A análise geométrica do *set-up* fornece o "Campo de Visão do Prisma"(*Field Of View* - FoV) que representa a abertura angular do feixe luminoso que atinge o sensor de imagem do sensor SPR operando no modo AIM. O campo de visão do prisma é expresso pela equação (2) e é fundamental para o alinhamento de todos os elementos e escolha do sensor de imagem:

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

em que ***CI***(caminho inclinado) indica o tamanho do lado inclinado do PPBIO e ***DF*** representa a distância focal da lente cilíndrica.

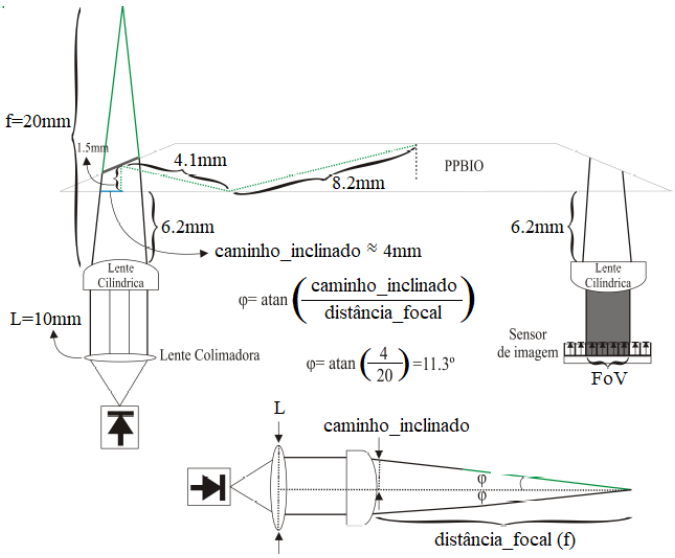

Figura 8. Diagrama de óptica geométrica usado para identificação dos parâmetros de alinhamento para excitação da SPR usando o PPBIO. O cálculo do Campo de Visão (FoV) do PPBIO. Esquema indicando distâncias, ângulos e elementos presentes no *set-up* AIM.

A plataforma automatizada deve realizar movimentos com as peças nos eixos coordenados para manter os parâmetros da óptica geométrica estabelecidos. A Figura 9 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 (Fig 9a). 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 será completamente fechada e em suas paredes laterais são fixados os circuitos eletrônicos de controle da estrutura.

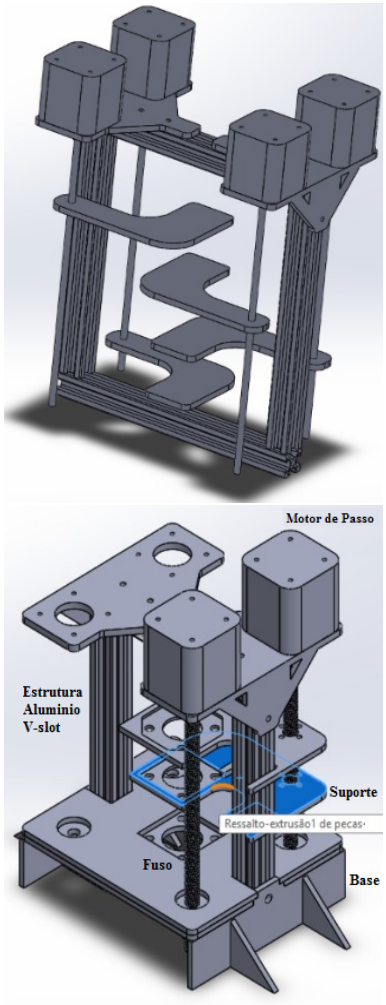

Figura 9. a) Desenho da estrutura automatizada proposta com destaque para seu chassi. b) Detalhes para a disposição e design das estruturas desenvolvidas, com destaque para o suporte L.

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* Storm600 comercializada pela empresa G-Weike. 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.

4. RESULTADOS

A plataforma desenvolvida é apresentada na Figura 10. Possui dimensões reduzidas 23×24×17 cm, partes em alumínio e acrílico, confeccionadas de acordo com as especificações experimentais de geometria óptica do PPBIO.

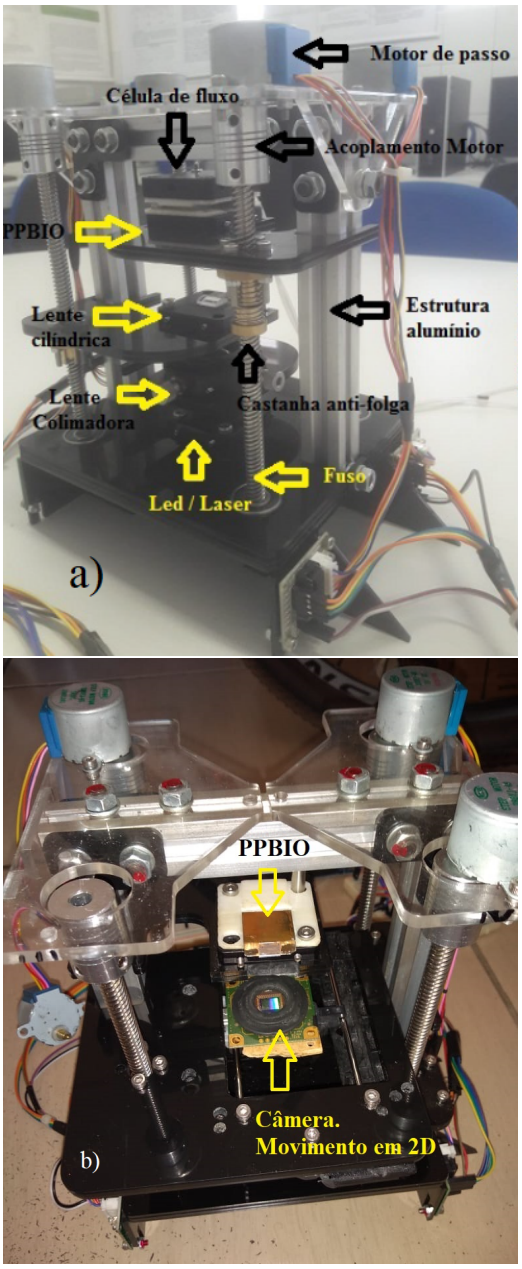

Figura 10. a) Plataforma experimental automatizada para sensor SPR baseado no PPBIO. Indicação das partes automatizadas. Suportes L acoplados aos eixos para permitir a movimentação dos componentes. b) Detalhe para o PPBIO e câmera com movimentação com 2 graus de liberdade.

A automatização inclui um sistema microcontrolado a partir de Atmega 2560 Arduino, com módulo Wifi e *bluetooth* (ESP 8266) permitindo a comunicação sem fio entre o software de controle e as partes automatizadas (suportes L). Foram utilizados os motores de passo 28BYJ-48, com torque de 34,3 mN, unipolar, tensão alimentação de 5V,

driver de controle ULN2003 e redução de 1/64, capaz de dar uma volta completa com 4096 passos, equivalente à resolução de ângulo de passo de 0,08°. Para posicionamento com precisão das peças, o sensor de distância a *laser* VL53L0X foi colocado em cada suporte L. Para manter a temperatura interna controlada, foi instalado o sensor de temperatura DHT 22/*cooler*, e um algoritmo específico foi embarcado para ajustar as peças de acordo com a temperatura de trabalho. O controle de cada peça também pode ser feito por meio de botões presentes na própria plataforma.

Para acondicionar o microcontrolador, módulo *wifi*, módulo relé, regulador de tensão, drive A4988, foi montado um painel, dando praticidade no transporte, proteção aos hardwares, como ilustrado na Figura 11.

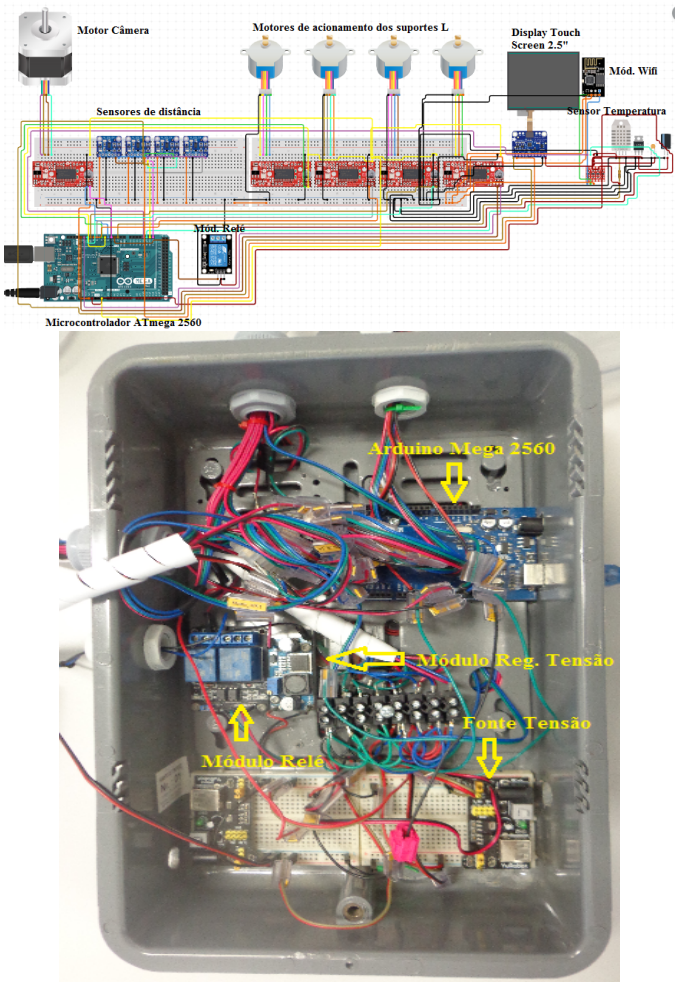

Figura 11. Diagrama de interligação dos componentes eletrônicos com: microcontrolador, fonte de tensão, módulo regulador de tensão e módulo relé. Destaque para a fotografia do condicionamento dos componentes.

Para ajuste das peças, uma interface com *display Touch Screen* foi idealizada. A Figura 12 ilustra a interface. Na interface o usuário também é informado sobre as distâncias em mm de cada suporte L (movimento das peças: lente colimadora, lente cilíndrica, prisma e câmera), bem como a temperatura ambiente no interior da plataforma.

Para testar a plataforma, experimentos com solução de água deionizada e degaseificada foram realizados para

Figura 12. *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.

diferentes alinhamentos. A Figura 13 apresenta as curvas SPR experimentais obtidas após o gotejamento da solução na superfície sensível do PPBIO. A temperatura dentro da plataforma foi mantida em 23°C. Para a obtenção da curva SPR realiza-se calibração do sensor normalizando a resposta do mesmos para o ar (R_{Ar}) e para a água ($R_{\text{Água}}$) da forma: $SPR = R_{\text{Água}} \backslash R_{Ar}$.

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 cilíndrica→PPBIO→Câmera.

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 fabricação do PPBIO exemplo da rugosidade e da birrefringência (Oliveira et al., 2019). 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 m) e negativos (-6 mm) entre a lente cilíndrica e o PPBIO foram provocados. Observa-se um menor valor de profundidade da cruva SPR, característico de uma exicitação com baixo acoplamento óptico.

A análise morfológica da curva SPR gerada a partir da imagem SPR é sumarizada na 4. Os parâmetros da largura *Larg.* e assimetria *Assimet.*, obtidos por meio da distância entre a borda da esquerda (C_L) e a borda da direita (C_R) através das equações $CR{+}CL$ e CR/CL, respectivamente.

Ao compararmos as curvas teórica e experimental observou-se que quão mais acentuada a profundidade melhor o aco-

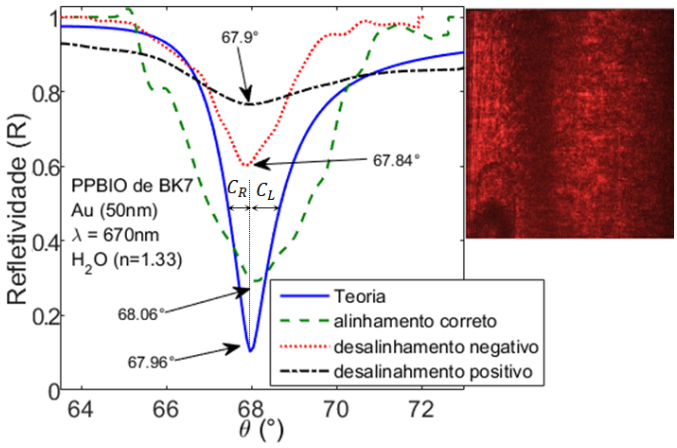

Figura 13. Curvas SPR obtidas com a plataforma automatizada. Influência do desalinhamento mecânico na resposta. Imagem SPR capturada ilustrando a correta excitação do fenômeno.

plamento óptico, e consequentemente, 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.

Tabela 1. Tabela compoarativa entre as diferentes curvas SPR.

Curva	$\theta_R(°)$	Larg. $\theta(°)$	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

5. CONCLUSÕES

Uma plataforma para automatizar o movimento e 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. A curva SPR obtida apresentou uma melhor distribuição angular do feixe luz, quando os elementos encontram-se 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 possibilita 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. A plataforma também disponibiliza o acesso remoto para controle posicional dos elementos.

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.

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.

REFERÊNCIAS

Abelès, F. (1950). La théorie générale des couches minces. *Journal de Physique et le Radium*, 11(7), 307–309.

Akimoto, T. and et al. (2000). Effect of incident angle of light on sensitivity and detection limit for layers of antibody with surface plasmon resonance spectroscopy. *Biosensors and Bioelectronics*, 15, 355–362.

B., K. and R., M. (2013). Effect of prism material on design of surface plasmon resonance sensor by admittance loci method. *Front. Optoelectron.*, 6(2), 185–193.

Carvalho, R.M.d., Rath, S., and Kubota, L.T. (2003). Spr: Uma nova ferramenta para biossensores. *Química Nova*, 26(1), 97–104.

de Lima Junior, L., Schelp, L., Oliveira, L., Neto, A.B., Lima, A., and Neff, H. (2012). A fiber optical thermometer for high power transformer monitoring utilizing the thermo-optical phase transition of vo2. In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 1387–1390. IEEE.

Hernández, D. and et al. (2018). Prism-based surface plasmon resonance for dual-parameter sensing. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 18(10), 1–5.

Homola, J. (2006). *Surface Plasmon Resonance Sensors*, volume 44. Springer.

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

Kretschmann, E. and Kröger, E. (1975). Reflection and transmission of light by a rough surface, including results for surface-plasmon effects. *JOSA*, 65(2), 150–154.

Lertvachirapaiboon, C. and et al. (2018). A smartphone-based surface plasmon resonance platform. *Anal. Methods*, 10, 4732–4740.

Marquart, A. (2020). Sprpages home. URL `https://www.sprpages.nl/instruments`. Acessado em: 31.05.2020.

Moereira, C. and et al. (2009). Exchangeable low cost polymer biosensor chip for surface plasmon resonance spectroscopy. *Procedia Chem*, 1479–1482.

Oliveira, L., Lima, A., Melcher, E., Jr., L.C.L., Neto, A.B., Moreira, C., and Neff, H. (2012). Biosensor spr, com substrato polimérico, usando fontes monocromáticas e policromáticas para aplicações biológicas. In *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, 1–8.

Oliveira, L., Moreira, C., Neff, H., and Lima, A. (2016). A prism-based polymeric surface plasmon resonance

biochip for angular and spectral modes. *Procedia Eng.*, 168, 1350–1353.

Oliveira, L., Moreira, C., Thirstrup, C., Melcher, E., Lima, A., and Neff, F. (2013). A surface plasmon resonance biochip that operates both in the angular and wavelength interrogation modes. *IEEE TIM*, 62, 1223–1232.

Oliveira, L.C., Pereira, E.G., Oliveira, R.C., Lima Jr, L.H., Morais, M.R., Lima, A.M., and Neff, H. (2014). Sensor spr para deteçÃo de adulteração em biocombustível. In *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizont*, 1725–1730.

Oliveira, L.C., Lima, A.M.N., Thirstrup, C., and Neff, H.F. (2019). *Surface Plasmon Resonance Sensors: A Materials Guide to Design, Characterization, Optimization, and Usage*, volume 70. Springer.

Tanabe, I. and et al. (2017). Far- and deep-ultraviolet surface plasmon resonance sensors working in aqueous solutions using aluminum thin films. *Scientific Reports*, 17(5934), 1–7.