

## DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO PARA EXPERIMENTOS COM SENSORES ÓPTICOS BASEADOS NA RESSONÂNCIA DE PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4569

Maria Sonia Freire de Andrade - sonia.freire@academico.ifpb.edu.br  
Instituto Federal da Paraíba IFPB

Hélder Cavalcante Nascimento - helder.nascimento@ifpb.edu.br  
IFPB Instituto Federal de Tecnologia da Paraíba

CLEUMAR DA SILVA MOREIRA - cleumarmoreira@gmail.com  
Instituto Federal da Paraíba

Rossana Moreno Santa Cruz - rossana.cruz@ifpb.edu.br  
Instituto Federal da Paraíba

**Resumo:** *O uso de kits didáticos para auxiliar no processo de ensino-aprendizagem exemplifica uma íntima relação entre a teoria e a prática, tornando a aprendizagem mais dinâmica e interativa, despertando o interesse dos alunos e possibilitando uma melhor compreensão do conteúdo aplicado pelo professor. O uso da experimentação pode auxiliar o professor a instigar a curiosidade de seus alunos, o que pode facilitar a construção do conhecimento científico. Atualmente, o ensino em Engenharia Elétrica procura moldar-se às necessidades de uma melhor qualificação de ensino superior e, por se tratar de um curso da área de exatas, traz consigo inúmeros cálculos e fórmulas matemáticas, sendo muito afetado pela evasão dos estudantes. Por outro lado, uma das áreas de conhecimento em destaque são os estudos acerca dos sensores ópticos baseados no fenômeno da Ressonância de Plásmons de Superfície. Estes sensores caracterizam-se por ser miniaturizados, descartáveis e altamente sensíveis, possibilitando o sensoriamento remoto e o controle direto de interações biomoleculares, químicas e físicas. Dessa forma, uma alternativa à prática pedagógica dos professores que lecionam disciplinas relacionadas aos sensores ópticos baseados na ressonância de plásmons de superfície é o desenvolvimento de um kit didático para a aplicação da teoria vista em sala de aula, podendo aumentar a captação e retenção dos alunos para o curso, além de facilitar o entendimento dos assuntos por meio de experimentos. Nesse contexto, este*

"ABENGE 50 ANOS: DESAFIOS DE ENSINO, PESQUISA E  
EXTENSÃO NA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA"

18 a 20 de setembro  
Rio de Janeiro-RJ



51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia  
VI Simpósio Internacional de Educação em Engenharia

*trabalho propõe o desenvolvimento de um kit didático para a elaboração de experimentos voltados aos estudos de tais sensores, buscando proporcionar uma solução eficaz e acessível aos experimentos que possam ser propostos durante o curso de disciplinas relacionadas a essa área de conhecimento, tanto em nível de graduação como de pós-graduação.*

**Palavras-chave:** *kit didático, processo de ensino-aprendizagem, ressonância de plásmons de superfície, experimentos*

Realização:



Organização:



# DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO PARA EXPERIMENTOS COM SENSORES ÓPTICOS BASEADOS NA RESSONÂNCIA DE PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de kits didáticos em sala de aula exemplifica uma íntima relação entre a teoria e a prática, tornando a aprendizagem mais dinâmica e interativa, possibilitando aos alunos uma melhor compreensão ao conteúdo aplicado pelo professor. Nesta perspectiva, atualizar o conhecimento constantemente é primordial na formação dos alunos e o professor é a peça importante que contribuirá para esse processo (PIMENTA, 2013).

Atualmente, o ensino em Engenharia Elétrica procura moldar-se às necessidades de uma melhor qualificação de ensino superior e, por se tratar de um curso da área de exatas, traz consigo inúmeros cálculos e fórmulas matemáticas. Além disso, existe uma falha em não priorizar a compreensão de múltiplos fenômenos teóricos por meio da prática, ao invés de ressaltar apenas equações, fórmulas e cálculos. É necessário o estímulo da didática adotada pelos professores dentro das salas de aula para que os discentes sintam-se desafiados e, posteriormente, encorajados a aprender (PIMENTA, 2013).

A didática educacional consiste na construção de conhecimentos que possibilitem a mediação entre o que é preciso ensinar e o que é necessário aprender. Diante disto, existem alguns métodos de idealização de projetos que incentivam a busca ativa por soluções, utilização de ferramentas digitais e o uso da experimentação em sala de aula (PIMENTA, 2013). Deste modo, o ensino educacional permite modificar a forma de ensinar e transmitir os conhecimentos de uma maneira mais particularizada, específica, às vezes até mesmo dentro de um contexto cotidiano e de uma forma profunda, chegando a resultados e entendimentos satisfatórios, desafiando alunos e professores a quebrarem as barreiras de um ensino tradicional e promovendo o processo de assimilação dos conceitos científicos (SILVA; ABRANCHES, 2022).

O uso de kits didáticos no ensino vem sendo apresentado como uma ferramenta auxiliadora em sala de aula, despertando interesse entre os alunos. Dentro desse contexto, Vilela, Vasconcellos e Gomes (2007, p. 9) afirmam que “o uso do experimento como ferramenta didática não está limitado a sua presença concreta na sala de aula, pois tanto sua realização ao vivo, quanto a reconstrução histórica de experimentos clássicos podem contribuir para superar os obstáculos”.

Por outro lado, os estudos acerca dos sensores ópticos baseados no fenômeno físico denominado Ressonância de Plásmons de Superfície (*Surface Plasmon Resonance* – SPR) vêm atraindo a atenção de cientistas e pesquisadores por suas características e benefícios: altamente sensíveis, leves, possibilitam multiplexação e sensoriamento remoto que permitem o controle direto de interações biomoleculares, reações biológicas e químicas (HOMOLA, 2006). Neste cenário, os sensores ópticos SPR têm se destacado como alternativa viável, devido à alta sensibilidade em detectar pequenas variações no índice de refração de substâncias e à capacidade de fornecer resultados confiáveis em um curto intervalo de tempo (MOREIRA, 2010; ZHENG et al., 2008). Diversas áreas que vão desde estudos farmacêuticos, diagnósticos clínicos, monitoramento de contaminantes ambientais e de segurança, controle na qualidade de alimentos (HU; YONG; SONG, 2016), monitoramento de interações biomoleculares (antígeno-anticorpo) (HOMOLA, 2006), substâncias químicas (moléculas, proteínas, DNA, RNA etc.), patógenos (vírus, bactérias,

células, protozoários, etc.) (OLIVEIRA, 2013), entre outras, estão utilizando os sensores SPR para a detecção de diferentes analitos (HU; YONG; SONG, 2016).

Dessa forma, alguns pontos significativos ao desenvolvimento de um kit didático para a aplicação da teoria de sensores SPR podem ser ressaltados, tais como: a melhoria da percepção dos discentes em relação às disciplinas relacionadas ao tema em estudo; o aumento da captação e retenção dos alunos para o(s) curso(s); a otimização e melhor aproveitamento do tempo dedicado à explicação da teoria por parte dos docentes, facilitando o entendimento do assunto pelos discentes, por meio de experimentos.

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um kit didático para a elaboração de experimentos voltados aos estudos de sensores ópticos baseados na Ressonância de Plásmons de Superfície, buscando proporcionar uma solução eficaz e acessível aos experimentos que possam ser propostos durante o curso de disciplinas relacionadas a essa área de conhecimento, tanto em nível de graduação como de pós-graduação. Além disso, a proposta representa uma das alternativas à prática pedagógica dos professores, através do uso de recursos didáticos aplicados em sala de aula para o processo de ensino-aprendizagem dos alunos, de forma motivadora, interativa e lúdica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Os desafios e possibilidades no ensino dos cursos de engenharia

Os cursos de engenharia estão entre os que possuem o maior índice de evasão. Um dos desafios enfrentados é o grau de dificuldade para a formação dos alunos, que apresentam um alto índice de desistências e reprovações por não conseguirem entender o conteúdo das disciplinas, tornando-se uma das principais causas de evasão. Sob o olhar do ensino, as reprovações estão associadas diretamente à aprendizagem e às metodologias usadas em sala de aula (KIECKOW; FREITAS; LIESENFELD, 2018).

Dessa forma, é preciso buscar um ambiente educacional construtivo, proporcionando aos estudantes experiências de aprendizagem com as quais os alunos possam explorar, pensar, interagir e aplicar conhecimentos (SILVA; ABRANCHES, 2022), no qual o professor desempenha um papel de mediador, facilitador e articulador do conhecimento e não apenas aquele que detém a informação. Portanto, é necessário um preparo para o desempenho adequado não apenas de conhecimentos específicos da área, como também de conhecimento no aspecto pedagógico, estratégias didáticas, teorias de aprendizagem, entre outros meios relevantes, indo além do modelo fragmentado e desconectado da educação tradicional (RIOS, 2015).

A metodologia de aula tradicional de ensino funciona da seguinte maneira: conhecimento → professor → alunos. Desta forma, para mudar o método de aula tradicional é preciso que os professores apliquem diferentes estratégias e abordagens, por exemplo o uso do laboratório, trabalho em equipe e desenvolvimento de projeto tornando a aula mais didática e prazerosa (BARBOSA; MOURA, 2014). Sendo assim, a didática é de suma importância para a sala de aula, pois deve proporcionar aos alunos o desenvolvimento de sua capacidade crítica e reflexiva, melhorando o ensino e impactando diretamente na diminuição da evasão e do tempo de permanência desses estudantes nos cursos de engenharia (RIOS, 2015).

### 2.2 O papel das atividades experimentais no ensino de engenharia

As atividades experimentais no ensino de engenharia podem contribuir para a melhoria da aprendizagem dos discentes através de aplicação de aulas práticas, de forma recorrente aos conteúdos expostos em sala de aula (BARBOSA; MOURA, 2014). O uso da

experimentação reveste-se em um papel de auxiliador da atividade docente, podendo auxiliar o professor a instigar a curiosidade de seus alunos, o que poderá facilitar a construção do conhecimento científico. Apesar de a realização de atividades experimentais exigir mais dedicação e preparação por parte do professor no processo de ensino-aprendizagem, verifica-se que somente aulas expositivas não são suficientes para despertar o interesse e a atenção dos alunos em sala de aula. Diante disto, podem ser utilizados alguns recursos: realização de exercícios, trabalhos individuais ou em grupo e a realização de atividades experimentais (SILVA, 2017).

O uso de atividades experimentais nas aulas proporciona aos estudantes um ambiente onde eles possam testar as suas hipóteses, indagações e curiosidades, além de fazer uso da criatividade para resolver possíveis situações-problema durante a prática (SILVA; ABRANCHES, 2022; SILVA, 2017). Portanto, as atividades experimentais podem constituir uma ferramenta relevante que permite ao professor constatar e problematizar o conhecimento prévio dos seus alunos, estimular a pesquisa, a investigação e a busca da solução de problemas. Em síntese, independentemente do tipo de experimento realizado, o que deve ser valorizado é o grau de problematização que o experimento apresenta. Desta forma, as atividades práticas ou experimentos visam propiciar aos estudantes situações de investigação e pensamento científico contextualizado, o que faz do processo de ensino e aprendizagem um momento rico e participativo.

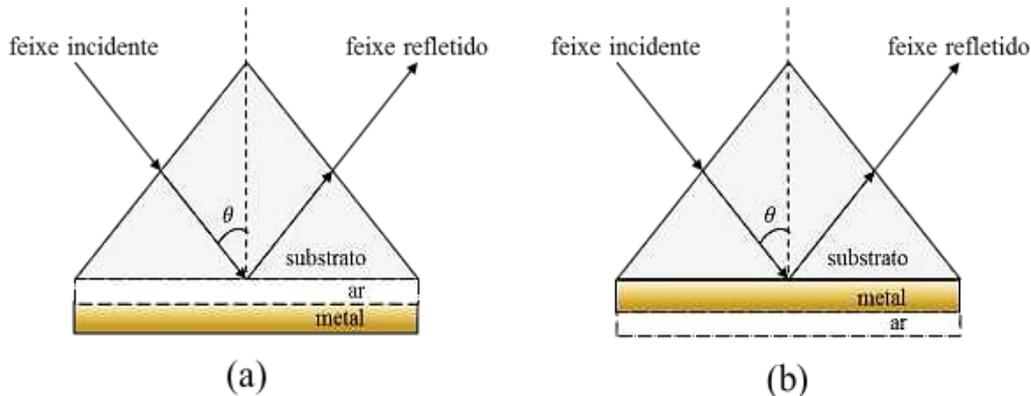
### 2.3 Ressonância de plásmons de superfície

A descoberta do fenômeno de Ressonância de Plásmons de Superfície ocorreu em 1902, pelo físico Robert Williams Wood, ao observar uma luz policromática refletida por uma superfície metálica, apresentando faixas escuras no espectro da luz difratada para certos ângulos de incidência e reduzindo a magnitude da reflectância correspondente, o que poderia ser observado ao iluminar um feixe de luz policromático em uma grade de difração metálica (ENOCH; BONOD, 2012). Porém, as primeiras investigações experimentais sobre a ressonância de plásmons de superfície foram realizadas por Otto, em 1968, e Kretschmann, em 1975, aprimorou a configuração experimental que compreende um filme fino de metal posicionado entre dois meios dielétricos iguais ou diferentes sobre um material opticamente transmissivo (KRETSCHMANN; KRÖGER, 1975; YUAN; DING; GUO, 2011).

Diante disso, o desenvolvimento de sensores SPR surgiu a partir das configurações de Otto e Kretschmann associadas ao fenômeno de Reflexão Total Atenuada (*Attenuated Total Reflection* - ATR). Posteriormente, a configuração de Kretschmann passou a ser a mais utilizada, em que o acoplamento da luz ao metal ocorre diretamente por meio de substratos ópticos como os prismas (KRETSCHMANN; KRÖGER, 1975). As configurações propostas por Otto e Kretschmann para observação do fenômeno SPR são mostradas na Figura 1.

O fenômeno SPR refere-se à excitação da Onda de Plásmons de Superfície (*Surface Plasmon Wave* - SPW), que se fundamenta na Reflexão Total Atenuada, obtida por meio de depósito ou revestimento de uma fina camada metálica com elevada condutividade (presente em metais como ouro ou prata) sobre um substrato óptico, como fibra óptica, grade de difração, prisma, entre outros, formando a chamada região sensora (SHARMA; JHA; GUPTA, 2007).

Figura 1 – Configuração proposta por Otto (a) e Kretschmann (b) para observação do fenômeno SPR.



Fonte: Adaptado de MOREIRA (2010).

Existem algumas condições necessárias para a excitação dos plásmons de superfície, são elas: (1) O feixe luminoso deve estar *p*-polarizado; (2) A espessura do metal tem que ser ligeiramente menor que o comprimento de onda do feixe incidente; (3) Faz-se necessário um substrato óptico para o acoplamento fóton-plásmons, a fim de garantir a igualdade entre os vetores de onda dos fótons com os plásmons de superfície, e assim, contribuir para a elevação da magnitude do vetor de onda em ambas as partículas; (4) O feixe luminoso terá que sofrer reflexão interna total (THIRSTRUP et al. 2004).

Desta forma, a onda SPW acontece por meio do acoplamento entre a onda eletromagnética e a oscilação coletiva dos elétrons livres (ou de condução) de um metal, que é estimulada por uma onda luminosa de comprimento de onda específico. Assim, a interação entre a luz e o metal faz com que ocorra a excitação dos plásmons de superfície na direção da propagação eletromagnética paralela à superfície do metal, o que é observado para determinados comprimentos de onda, portanto, a excitação provocada pela luz incidente produz o deslocamento dos elétrons livres na superfície metálica, havendo a transferência de energia, em que parte da luz é absorvida, dando origem ao efeito SPR (THIRSTRUP et al. 2004).

Utilizando a teoria eletromagnética, a constante de propagação ( $k_{sp}$ ) da onda de plásmons de superfície é descrita pela Equação (1):

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \left( \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s}} \right). \quad (1)$$

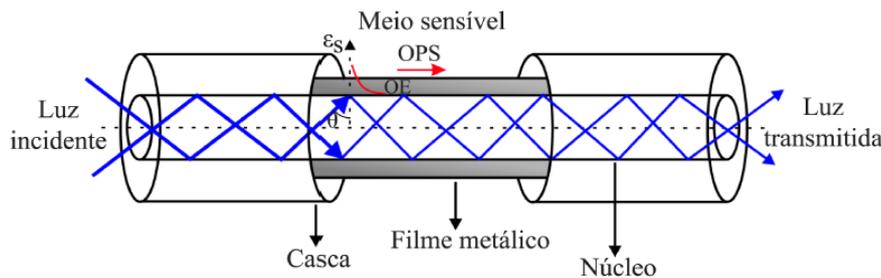
Pela Equação (1),  $\omega$  é a frequência do feixe de luz incidente,  $c$  é a velocidade da luz,  $\epsilon_m$  e  $\epsilon_s$  são as constantes dielétricas do metal e do meio dielétrico, respectivamente.

Considerando  $\epsilon_m < 0$  e  $\epsilon_s > 0$ , para uma determinada frequência, a constante de propagação para o plásmon de superfície ( $k_{sp}$ ) é maior que a constante de propagação para luz se propagando em um meio dielétrico ( $k_s$ ). Uma das condições para haver a excitação dos plásmons de superfície é que as duas constantes de propagação sejam iguais. Por isso, é necessário aumentar a constante de propagação ( $k_s$ ), o que pode ser feito utilizando uma onda evanescente para excitar os plásmons de superfície. Para gerar essa onda evanescente é necessário utilizar um acoplador com alta constante dielétrica, como prismas, grades de difração ou guias de onda, como, por exemplo, a fibra óptica.

Os pesquisadores propõem o uso das fibras ópticas para investigação no desenvolvimento de sensores ópticos por sua sensibilidade para medições nas áreas física, química e biológica (LIMA, 2009). Deste modo, as aplicações dos sensores SPR em fibra óptica podem ser mencionadas, por suas inúmeras relevâncias e aspectos em equipamentos, como mais leves (portáteis), com menores custos, eficientes e de fácil operação, estruturas miniaturizadas, possibilidade de detecção e análise em tempo real, por exemplo, a detecção e o monitoramento de agentes patológicos (vírus e bactérias), o monitoramento de contaminantes em alimentos e a detecção de biomarcadores de câncer (MELO, 2019; MELO et al, 2023).

Portanto, a fibra óptica é um tipo de guia de onda que vem sendo frequentemente utilizado como acoplador para excitar os plásmons de superfície (KLANTSATAYA et al., 2017). Quando o feixe de luz incide em uma das extremidades da fibra óptica com um ângulo maior que o ângulo crítico e menor que 90°, ocorre a reflexão interna total, assim, o feixe de luz é confinado no interior da fibra, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Sensor SPR baseado em fibra óptica, usando a configuração de Kretschmann para excitação de plásmons de superfície na interface metal-dielétrico.



Fonte: (MELO, 2019).

Em uma configuração básica de sensor SPR baseado em fibra óptica, a casca é removida em uma porção central da fibra, e a parte descascada é recoberta por um filme fino metálico. Quando a luz é emitida em uma das extremidades da fibra, é gerada uma onda evanescente na interface núcleo-metal, excitando os plásmons de superfície na interface metal-dielétrico. A constante de propagação ( $k_{OE}$ ) da onda evanescente é descrita pela Equação (2) (GUPTA; VERMA, 2009):

$$k_{OE} = \left(\frac{\omega}{c}\right) \sqrt{\varepsilon_c} \text{sen}(\theta). \quad (2)$$

Na Equação (2),  $\varepsilon_c$  representa a constante dielétrica do núcleo da fibra óptica e  $\theta$  é o ângulo de incidência do feixe de luz. O aumento da constante dielétrica do núcleo acarreta o aumento da constante de propagação da onda evanescente (OE), podendo atingir o mesmo valor da constante de propagação da onda de plásmons de superfície, satisfazendo a condição da ressonância de plásmons de superfície. Essa condição é dada pela Equação (3):

$$k_{oe} = k_{sp} \rightarrow \left(\frac{\omega}{c}\right) \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}}\right) = \sqrt{\varepsilon_c} \left(\frac{\omega}{c}\right) \text{sen}(\theta). \quad (3)$$

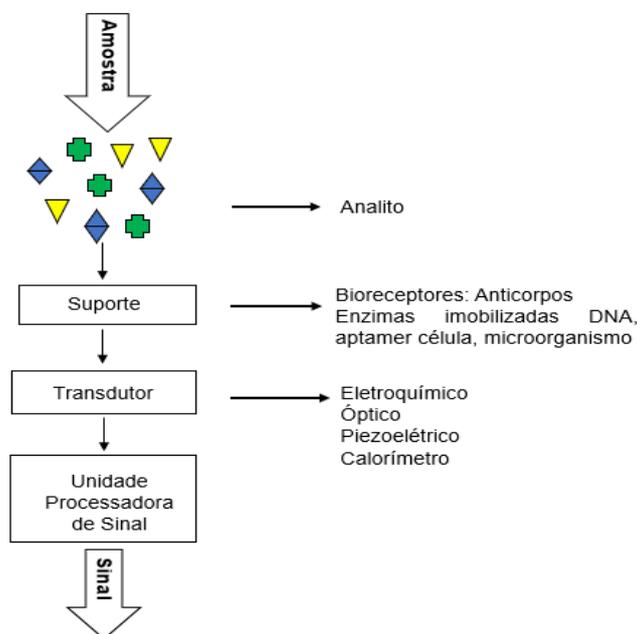
A excitação dos plásmons de superfície na interface metal-dielétrico resulta na máxima transferência de energia da onda evanescente para a onda de plásmons de superfície, reduzindo a intensidade da luz refletida no interior da fibra, provocando um afundamento no espectro da potência transmitida em um determinado comprimento de onda ou ângulo de ressonância (KANT; TABASSUM; GUPTA, 2016).

## 2.4 Sensores e biossensores ópticos SPR

Os sensores ópticos SPR são dispositivos que detectam um determinado analito alterando na sua curva característica o ponto mínimo de refletividade, representando a resposta a um estímulo físico ou químico de maneira específica, produzindo um sinal para medição ou monitoramento de estudo, que pode ser visualizado convertendo a onda luminosa em um sinal mensurável por um detector óptico (MOREIRA, 2010).

Os biossensores são dispositivos analíticos constituídos por um elemento biológico acoplado a um transdutor para converter um sinal biológico em um sinal elétrico. Diante disso, estudos voltados aos biossensores SPR envolvem algumas áreas de conhecimento, como bioquímica, óptica, eletroquímica, entre outras, para detectar, por exemplo, biorrecognition como anticorpos e enzimas (OLIVEIRA, 2013). Os biossensores ópticos SPR são compostos por três componentes: a) elemento de reconhecimento, responsável por detectar um sinal do ambiente, na forma de analito; b) transdutor de sinal, que converte o sinal detectado em uma saída elétrica; c) processador de sinal, que coleta, transmite e exhibe os resultados. Na Figura 3, é mostrado o diagrama de um biossensor SPR.

Figura 3 – Diagrama de um biossensor SPR.



Fonte: Adaptado de MOREIRA (2010).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas de realização do trabalho incluem, além dos estudos teóricos voltados aos sensores ópticos SPR, a montagem dos subsistemas de transmissão e recepção de sinais e a construção do sistema de bombeamento das amostras (analitos).

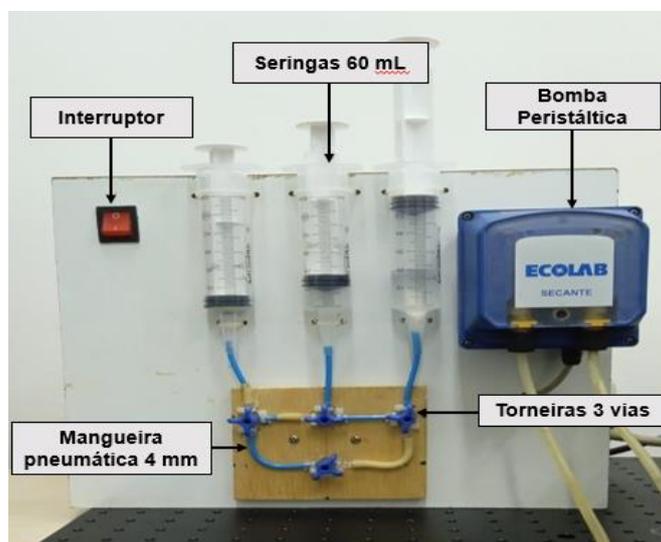
### 3.1 Construção do sistema de bombeamento

A construção do sistema de bombeamento foi realizada com componentes de baixo custo, que podem ser encontrados em farmácias e lojas de material de construção. Foram utilizados: 01 botão interruptor, 03 seringas de 60 ml, 01 bomba peristáltica, 04 torneiras de 3 vias e 01 mangueira pneumática de 4 mm.

A seringa de 60 ml tem como função injetar e extrair líquidos de até 60 ml de volume. Foram utilizadas seringas de plástico por serem descartáveis e mais seguras quanto aos riscos de contaminação. O intuito das 03 seringas é o de usar até 03 amostras diferentes, por exemplo, água, álcool e acetona, na realização de um experimento. Já a bomba peristáltica serviu para a transferência e dosagem de líquidos a uma determinada vazão, seja ela em litros/hora ou ml/minuto. O transporte do fluido é feito por tubos que podem ser compostos por diferentes materiais dependendo da compatibilidade química do líquido a ser bombeado. Desta forma, os tubos são comprimidos e descomprimidos por roletes gerando um movimento peristáltico, permitindo um deslocamento unidirecional do líquido.

A torneira de 3 vias tem como função controlar o direcionamento do fluxo das soluções das três linhas distintas, sendo duas linhas de infusão e uma linha de acesso venoso. Esta linha é utilizada para o monitoramento da pressão. A mangueira pneumática de 4 mm serve de vedação para impedir a passagem de líquidos, gases ou sólidos particulados (pó) de um meio para outro, possibilitando o transporte seguro de determinado fluido para todos os componentes de um sistema. O tubo é feito de poliuretano, um material dinâmico e flexível que não perde suas propriedades diante da exposição a fatores externos como o aumento ou a diminuição de temperatura. Na Figura 4, é mostrado o sistema de bombeamento de fluidos, com destaque para os componentes utilizados.

Figura 4 – Sistema de bombeamento de fluidos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Montagem do kit didático

O kit didático proposto utilizou os seguintes equipamentos e componentes ópticos: controladores de corrente e temperatura para fontes luminosas, lasers e lentes colimadoras na transmissão, um sistema de bombeamento de fluidos e uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*) como detector óptico.

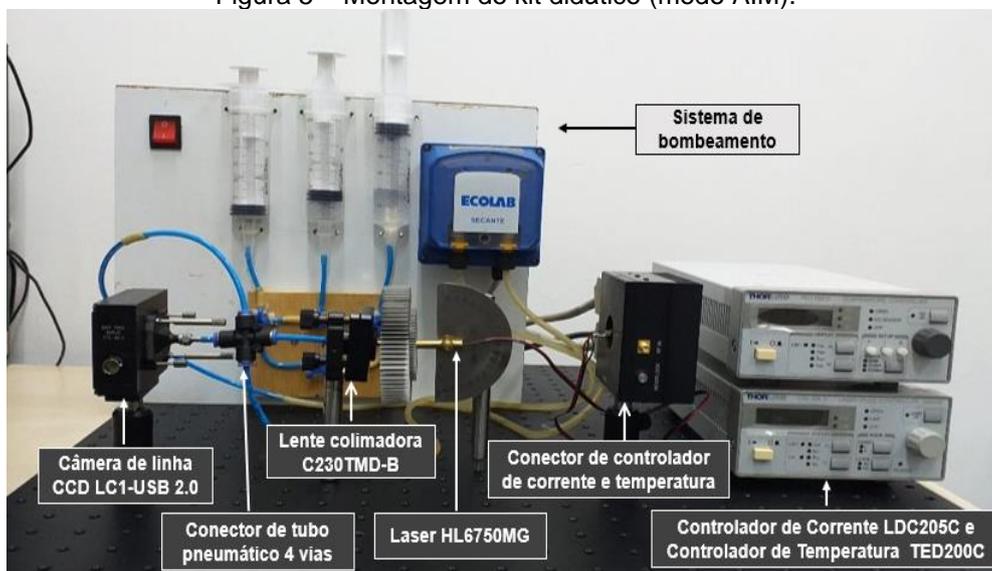
Os controladores de corrente e temperatura são necessários ao bom funcionamento e estabilidade de fontes luminosas do tipo laser, uma vez que estas apresentam maior

sensibilidade às variações de temperatura. Assim, o controlador de corrente serve para controlar e indicar a corrente apropriada para a realização de um experimento, dependendo do laser utilizado. Já o controlador de temperatura tem como função controlar a temperatura adequada para a operação de um determinado laser.

Apesar de os lasers serem fontes de luz diretivas, o feixe emitido pela sua saída ainda tende a sofrer dispersão. Uma forma de contornar este problema é o uso de lentes colimadoras na saída do laser, cuja função é tornar o feixe de luz paralelo a partir de uma certa distância de posicionamento da lente em relação ao laser (geralmente, equivalente a sua distância focal) e para um determinado ângulo de abertura do feixe. Como o laser utilizado no transmissor óptico possui um comprimento de onda fixo, o kit didático foi desenvolvido para operar no modo de interrogação angular (*Angular Interrogation Mode - AIM*) (KANT; TABASSUM; GUPTA, 2016).

O modo AIM investiga as mudanças de índice de refração das diferentes amostras por meio de um ângulo de ressonância, para o qual a refletividade da curva SPR tende a zero. Sendo assim, uma maneira de se obter esse ângulo é utilizar como detector óptico uma câmera CCD. Os dados são obtidos em pixels e depois convertidos para ângulo utilizando um pacote de programas chamado SPLICCO GUI (THORLABS Inc.), desenvolvido para uso em conjunto com câmeras de linha. Este software pode ser usado para adquirir medições de transmitância e absorvância, a partir das imagens (sinais refletidos pelo biochip SPR) capturadas pela câmera CCD. Estes dados são então repassados ao sistema de aquisição para processamento e visualização. Na Figura 5, pode-se observar o kit didático montado para o modo de interrogação angular.

Figura 5 – Montagem do kit didático (modo AIM).



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4 USO EXPERIMENTAL DO KIT DIDÁTICO

Para o kit didático desenvolvido neste trabalho, o objetivo principal de um experimento é obter a curva SPR a partir das medições de absorvância e transmitância obtidas com o software SPLICCO no modo de interrogação angular. O *setup* requerido para

este experimento envolve poucos componentes ópticos, que podem ser montados em mesas ópticas com largura e comprimento inferiores a 1 m. As principais características desses componentes são descritas a seguir.

#### 4.1 Fonte de luz

A fonte de luz utilizada deve ser monocromática e  $p$ -polarizada. Um laser de AlGaInP com 50 mW de potência, operando no comprimento de onda de 685 nm pode ser utilizado, de acordo com os componentes e equipamentos usados na montagem do kit didático (ver Figura 5). Caso a fonte de luz não seja  $p$ -polarizada, o uso de um polarizador entre o laser e a lente colimadora se faz necessário, para atender à condição de polarização adequada do feixe de luz, possibilitando o aparecimento da onda de plásmons (ou efeito SPR) na superfície do metal (ver Figura 2).

#### 4.2 Substrato óptico e filme fino metálico

O kit didático proposto foi desenvolvido para uso com sensores SPR baseados em fibra óptica. Desta forma, sugere-se o uso de uma fibra óptica polimérica de 2 mm de diâmetro total (núcleo com diâmetro igual a 1,96 mm e casca com espessura de 40  $\mu\text{m}$ ). O material do núcleo da fibra é de PMMA (Polimetilmetacrilato) e a casca é composta por um polímero fluorinado. Este polímero deve ser removido para possibilitar o contato da luz proveniente do núcleo com os elétrons do metal que o recobre. Deve ser removido cerca de 1 cm de casca na região central da fibra, para a deposição do metal. A fibra óptica de PMMA sugerida possui baixo custo e suas dimensões facilitam o manuseio durante o processo de remoção da casca, bem como durante a deposição do metal, que geralmente ocorre por meio de uma máquina de pulverização catódica. A espessura da camada metálica depositada depende do comprimento de onda de operação. Para o caso do laser citado anteriormente, a espessura que garante 100% de acoplamento está em torno de 50 nm.

#### 4.3 Detector óptico

O detector óptico utilizado na montagem do kit didático foi uma câmera CCD, por ser mais prática a obtenção dos resultados, uma vez que a curva de transmitância pode ser obtida de uma só vez, o contrário do que aconteceria se fosse utilizado um fotodiodo polarizado reversamente, em que os dados seriam obtidos ponto a ponto.

#### 4.4 Demais componentes ópticos e equipamentos

Conforme já discutido, o sistema de bombeamento funciona de forma a permitir o teste de até 3 analitos diferentes, tornando o kit didático um sistema versátil. Vale ressaltar que os componentes e equipamentos foram escolhidos mediante a disponibilidade nos laboratórios da Instituição e, quando não disponíveis, foram pesquisados e escolhidos os materiais adequados e de fácil aquisição. Também vale salientar que melhorias ainda precisam ser realizadas, como, por exemplo, confeccionar uma célula de fluxo eficiente, com a qual se pode fixar melhor o chip SPR no sistema microfluídico, para um melhor desempenho do sensor e, conseqüentemente, a obtenção de resultados mais precisos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs o desenvolvimento de um kit didático para a elaboração de experimentos voltados aos estudos de sensores ópticos SPR, buscando proporcionar uma

solução eficaz e acessível aos experimentos que possam ser propostos durante o curso de disciplinas relacionadas a essa área de conhecimento, tanto em nível de graduação como de pós-graduação.

O principal experimento a ser realizado com o kit didático no estágio atual de desenvolvimento, é a investigação do efeito SPR no modo angular, utilizando fontes luminosas monocromáticas e fibras ópticas como elementos sensores baseados na configuração de Kretschmann. Este experimento consiste em uma forma eficiente de introduzir aos estudantes os conceitos fundamentais da teoria SPR e seu emprego em sensores e biossensores ópticos.

Além disso, o *setup* é fácil de ajustar, de forma que experimentos utilizando outros modos de interrogação (por exemplo, o modo de interrogação espectral – *Wavelength Interrogation Mode* – WIM) (KANT; TABASSUM; GUPTA, 2016) podem ser realizados, substituindo-se o laser por uma lâmpada halógena e a câmera CCD por um espectrômetro.

Apesar de ainda em andamento, este trabalho buscou apresentar uma alternativa à prática pedagógica dos professores dos cursos de Engenharia Elétrica, através do uso de recursos didáticos aplicados em sala de aula, para contribuir com o processo de ensino-aprendizagem dos alunos. Espera-se que a adesão do kit didático pelas disciplinas ofertadas no referido curso possibilite aos discentes uma experiência motivadora, interativa e lúdica, eliminando as lacunas deixadas pela teoria e ampliando o conhecimento desses discentes na área supracitada.

## REFERÊNCIAS

BARBOSA, Eduardo Fernandes; MOURA, Dácio Guimarães de. Metodologias ativas de aprendizagem no ensino de engenharia. In: XIII International Conference on Engineering and Technology Education. **Proceedings**, v. 13, p. 110-116, 2014. Disponível em: <http://copec.eu/intertech2014/proc/works/25.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2023.

ENOCH, Stefan; BONOD, Nicolas. **Plasmonics From Basics to Advanced Topics**, v. 167. França: Springer Series in Optical Sciences, 2012.

GUPTA, Banshi D.; VERMA, Rajneesh Kumar. Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: Principle, probe designs, and some applications. **Journal of Sensors**, 2009.

HOMOLA, Jiri. **Surface Plasmon Resonance Based Sensors**. v. 4. Berlin: Springer, 2006.

HU, Tao; ZHAO, Yong; SONG, An-ning. Fiber optic SPR sensor for refractive index and temperature measurement based on MMF-FBG-MMF structure. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 237, p. 521-525, 2016.

KANT, Ravi; TABASSUM, Rana; GUPTA, Banshi D. Fiber Optic SPR-Based Uric Acid Biosensor Using Uricase Entrapped Polyacrylamide Gel. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 28, n. 19, p. 2050–2053, 2016.

KIECKOW, Flávio; FREITAS, Denizard Batista de; LIESENFELD, Janaína. O ensino e a aprendizagem na engenharia: realidade e perspectivas / Teaching and learning in

engineering: reality and perspectives. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 1, p. 347-356, 2018.

KLANTSATAYA, Elizaveta, et al. Plasmonic fiber optic refractometric sensors: From conventional architectures to recent design trends. **Sensors**, v. 17, n. 1, 2017.

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

LIMA, Kássio M. G., et al. Sensores ópticos com detecção no infravermelho próximo e médio. **Quím. Nova**. v. 32, n. 6, p. 1635-1643, 2009.

MELO, Arthur Aprígio de. **Estudo computacional e caracterização de biochip em fibra óptica baseado na ressonância de plásmons de superfície**. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, João Pessoa, 2019.

MELO, Arthur Aprígio de, et al. Evaluating the Use of Surface Plasmon Resonance-Based Sensing for Colorectal Mucosa Cancer Detection. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. v. 72, p. 1-8, 2023.

MOREIRA, Cleumar da Silva. **Projeto e realização de um biochip óptico para aplicações biológicas baseado no princípio de ressonância de plásmons de superfície**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

OLIVEIRA, Catarina Peres de. **Desenvolvimento de uma camada de reconhecimento biológico de ligação universal para utilização em imunoenaios**. Dissertação (Mestrado). IST Técnico Lisboa, Lisboa, 2013.

PIMENTA, Selma Garrido, et al. A construção da didática. no GT Didática – análise de seus referenciais. **Revista Brasileira de Educação**, v. 18, n. 52, p. 143-162, 2013.

RIOS, Terezinha Azerêdo. É possível formar professores sem a didática? In: **Didática e Prática de Ensino: diálogos sobre a Escola, a Formação de Professores e a Sociedade**. São Paulo: USP, EdUECE, v. 4, p. 643-653, 2015.

SHARMA, Anuj K.; JHA, Rajan; GUPTA, B. D. Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review. In: **IEEE Sensors Journal**. v. 7, n. 8, p. 1118-1129, 2007.

SILVA, Cláudia Maria Bezerra da; ABRANCHES, Sérgio Paulino. Educação em engenharia: desafios, experiências de inovação e diretrizes. In: VIII Congresso Nacional de Educação. **Anais**. Campina Grande: Realize Editora, 2022. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/88294> Acesso em: 06 abr 2023.

SILVA, Edson Diniz da. **A importância das atividades experimentais na educação**. Monografia. Universidade Cândido Mendes, AVM – Faculdade Integrada, Pós-

Graduação *Lato Sensu*, Rio de Janeiro, 2017.

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

THORLABS, Inc. [US]. Disponível em:

[https://www.thorlabs.com/software\\_pages/ViewSoftwarePage.cfm?Code=SPLICCO](https://www.thorlabs.com/software_pages/ViewSoftwarePage.cfm?Code=SPLICCO).

Acesso em: 20 abr. 2023.

VILELA, Mariana Lima; VASCONCELLOS, Déborah Vidal; GOMES, Maria Margarida. Reflexões sobre abordagens didáticas na interpretação de experimentos no ensino de ciências. **Revista da SBEnBIO**. n. 1, p. 8-10. Santa Catarina: 2007.

YUAN, Yinquan; DING, Liyun; GUO, Zhenqiang. Numerical investigation for SPR-based optical fiber sensor. In: **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 157, n. 1, p. 240-245, 2011.

ZHENG, Rong-Sheng, et al. Surface plasmon resonance sensors based on polymer optical fiber. In: **1st Asia Pacific Optical Fiber Sensors Conference**. IEEE, 2008.

## DEVELOPMENT OF A DIDACTIC KIT FOR EXPERIMENTS WITH SURFACE PLASMON RESONANCE SENSORS

**Abstract:** *The use of didactic kits to help in the teaching-learning process exemplifies an intimate relationship between theory and practice, making learning more dynamic and interactive, arousing students' interest and enabling a better understanding of the content applied by the teacher. The use of experimentation can help the teacher to instigate the curiosity of his students, which can facilitate the construction of scientific knowledge. Currently, teaching in Electrical Engineering seeks to adapt to the needs of a better qualification in education. Furthermore, as it is an exact sciences course, it brings with it numerous calculations and mathematical formulas, being greatly affected by student evasion. On the other hand, one of the highlighted areas of knowledge has been the studies about optical sensors based on the Surface Plasmon Resonance phenomenon. These sensors are characterized by being miniaturized, disposable and highly sensitive, enabling remote sensing and direct control of biomolecular, chemical, and physical interactions. In this way, an alternative to the pedagogical practice related to SPR optical sensors subjects is the development of a didactic kit for the application of the theory seen in the classroom, which may increase the enrollment and retention of students to the course, in addition to facilitating the understanding of theory through experiments. In this context, this work proposes the development of a didactic kit for the elaboration of experiments aimed at the study of such sensors, seeking to provide an effective and accessible solution to the experiments that may be proposed during the classes related to this area of knowledge, both at undergraduate and graduate levels.*

**Keywords:** *didactic kit, teaching-learning process, surface plasmon resonance, experiments.*