



MARIA SONIA FREIRE DE ANDRADE

**DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL COM
SENSORES ÓPTICOS BASEADOS NA RESSONÂNCIA DE
PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE**

**João Pessoa - PB
Outubro de 2023**

MARIA SONIA FREIRE DE ANDRADE

**DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL COM
SENSORES ÓPTICOS BASEADOS NA RESSONÂNCIA DE
PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Avançado

Rossana Moreno Santa Cruz, Dra., IFPB
Orientadora

Cleumar da Silva Moreira, Dr., IFPB
Coorientador

João Pessoa - PB, Outubro de 2023
©Maria Sonia Freire de Andrade - sonia.freire@academico.ifpb.edu.br

DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL COM SENSORES ÓPTICOS BASEADOS NA RESSONÂNCIA DE PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 13/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ROSSANA MORENO SANTA CRUZ
Data: 16/12/2023 06:17:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rossana Moreno Santa Cruz, Dra., IFPB
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 CLEUMAR DA SILVA MOREIRA
Data: 20/12/2023 09:58:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cleumar da Silva Moreira, Dr., IFPB
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 ADEMAR GONCALVES DA COSTA JUNIOR
Data: 16/12/2023 10:24:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ademar Gonçalves da Costa Junior, Dr., IFPB
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 ALFREDO GOMES NETO
Data: 16/12/2023 11:20:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alfrêdo Gomes Neto, Dr., IFPB
Examinador 2


Edgard de Macedo Silva, Dr., IFPB
Examinador 3

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

A554d	<p>Andrade, Maria Sonia Freire de. Desenvolvimento de aparato experimental com sensores ópticos baseados na ressonância de plásmons de superfície / Maria Sonia Freire de Andrade. – 2023. 44 f. : il.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Orientadora: Profª. Dra. Rossana Moreno Santa Cruz,.</p> <p>1. Engenharia elétrica – Ensino. 2. Prática pedagógica. 3. Ressonância Plásmons de Superfície. 4. Fibra Óptica Polimérica. 5. Sensores opticos I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.3:37.091.3</p>
-------	---

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos que me apoiaram diretamente ou indiretamente na busca da finalização do curso, em especial a minha família.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente à Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo da minha vida.

Agradeço aos meus pais Sueli Freire e José Targino pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Obrigada aos meus irmãos Simone Freire, Selma Freire, Sérgio Freire e Sthefany Freire e sobrinha Sanny de Oliveira, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Obrigada à minha tia Cilene Freire pela contribuição valiosa.

Agradeço ao meu namorado Edmar de Moura que sempre esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico.

Meus agradecimentos aos meus colegas Francisco de Assis e Hélder Nascimento, companheiros de trabalhos que me ajudaram na finalização do curso.

Obrigada aos meus amigos e colegas que torceram por mim para a conclusão do curso.

Sou grata pela confiança depositada na minha proposta de pesquisa pela minha professora Dra. Rossana Moreno Santa Cruz, orientadora do meu trabalho. Obrigada também, pelo suporte, pelas suas correções, incentivos e por me manter motivada durante todo o processo na finalização do curso.

A meu coorientador professor Dr. Cleumar da Silva Moreira, pelo suporte, pelas suas correções e incentivos.

Também quero agradecer ao Instituto Federal da Paraíba – IFPB e a todos os professores do meu curso pela elevada qualidade do ensino oferecido.

A todos que direta e indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“A teoria sem a prática vira verbalismo, assim como a prática sem a teoria, vira ativismo. No entanto, quando se une a prática com a teoria tem-se práxis, a ação criadora e modificadora da realidade.”

Paulo Freire

RESUMO

O uso de um aparato experimental 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 discentes possibilitando uma melhor compreensão ao conteúdo aplicado pelo docente. 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 equações matemáticas, sendo muito afetado pela evasão. 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. Esses sensores caracterizam-se por serem 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 docentes de disciplinas relacionadas aos sensores ópticos SPR é o desenvolvimento de um aparato experimental para a aplicação da teoria vista em sala de aula, podendo aumentar a captação e retenção dos discentes para o curso, além de facilitar o entendimento dos assuntos por meio de experimentos. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um aparato experimental 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 os cursos de Graduação e Pós-graduação em Engenharia Elétrica nas disciplinas como Comunicações Ópticas e Sensores e Biossensores Ópticos.

Palavras-chave: Aparato Experimental. Ensino-aprendizagem. Ressonância Plásmons de Superfície. Fibra Óptica Polimérica. Instrumentação Eletrônica.

ABSTRACT

The use of an experimental apparatus 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 an experimental apparatus 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 an experimental apparatus 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 Undergraduate and Postgraduate courses in Electrical Engineering in disciplines such as Optical Communications and Optical Sensors and Biosensors.

Keywords: Experimental Apparatus. Teaching-learning. Surface Plasmon Resonance. Polymeric Optical Fiber. Electronic Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuração proposta por Otto (a) e Kretschmann (b) para observação do SPR	22
Figura 2. Modelo de três camadas sobrepostas em estudo.....	24
Figura 3. Diagrama representativo de um biossensor SPR	26
Figura 4. Configurações para sensores SPR em fibras ópticas.	27
Figura 5. Sistema de bombeamento de fluidos.	36
Figura 6. Controlador de corrente LDC205C	37
Figura 7. Controlador de temperatura TED200C.	38
Figura 8. Laser HL6750MG.....	39
Figura 9. Lente colimadora C230TMD-B.....	40
Figura 10. Detector da câmera de linha CCD LC1-USB 2.0.....	41
Figura 11. <i>Setup</i> experimental no Modo Interrogação Angular	44
Figura 12. Ilustração do sensor SPR em fibra óptica polimérica.....	46
Figura 13. Controle de varredura de média	47
Figura 14. Procedimento de suavização de caixa	48
Figura 15. Diagrama ilustrativo de um <i>setup</i> experimental no modo AIM.....	51
Figura 16. Espectrômetro compacto LR1.....	54
Figura 17. Representação ilustrativa do <i>setup</i> experimental no modo WIM.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação dos sensores baseados em fibra óptica	29
Quadro 2. Comparação entre a fibra óptica polimérica e a fibra óptica de vidro	31
Quadro 3. Etapas da sequência didática aplicada	34
Quadro 4. Listagem de materiais básicos para a execução do sistema fluídico.....	35
Quadro 5. Listagem de materiais utilizados para elaboração do aparato experimental.	42
Quadro 6. Especificações da fibra óptica polimérica.....	45
Quadro 7. Descrição dos materiais utilizados no experimento.....	65

LISTA DE SIGLAS

- AIM – *Angular Interrogation Mode* (Modo de Interrogação Angular)
- ATR – *Attenuated Total Reflection* (Reflexão Total Atenuada)
- CC – *Constant Current* (Corrente Constante)
- CCD – *Charge-coupled Device* (Dispositivo de Carga Acoplada)
- CP – *Constant Power* (Potência Constante)
- IFPB – *Federal Institute of Paraíba* (Instituto Federal da Paraíba)
- HID – *Human Interface Device* (Dispositivo de Interface Humana)
- LD – *Laser Diode* (Diodo Laser)
- MQW – *Multi-Quantum Well* (Poço Multi-Quântico)
- POF – *Polymer Optical Fiber* (Fibra Óptica Polimérica)
- PMMA – *Polymethylmetracylate* (Polimetilmetacrilato)
- RoHS – *Restriction of Certain Hazardous Substances* (Restrição de Certas Substâncias Perigosas)
- SMA – *Simple Moving Average* (Média Móvel Simples)
- SPR – *Surface Plasmon Resonance* (Ressonância de Plásmons de Superfície)
- SPW – *Surface Plasmon Wave* (Onda de Plásmons de Superfície)
- SPLICCO – *Spectrometer and Line Camera Control* (Controle de espectrômetro e câmera de linha)
- SRAM – *Static Random Access Memory* (Memória estática de acesso aleatório)
- TEC – *Thermoelectric Cooler* (Resfriador Termoelétrico)
- TTL – *Transistor-Transistor Logic* (Transistor-Transistor Lógica)
- WIM – *Wavelength Interrogation Mode* (Modo de Interrogação Espectral)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 OS DESAFIOS E POSSIBILIDADES NO ENSINO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA.....	17
2.2 O PAPEL DAS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE ENGENHARIA	19
2.3 CONTEXTO HISTÓRICO SOBRE FENÔMENO DA RESSONÂNCIA DE PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE.....	20
2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO RESSONÂNCIA DE PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE	22
2.5 SENSORES E BIOSSENSORES ÓPTICOS SPR.....	25
2.6 SENSORES SPR BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA.....	27
2.7 FIBRA ÓPTICA POLIMÉRICA E FILME FINO METÁLICO.....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 METODOLOGIA DE ENSINO UTILIZADA NA APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA ADOTADA PARA ESSA PESQUISA.....	33
3.2 APRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA FLUÍDICO.	35
3.3 APRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES ÓPTICOS UTILIZADOS NO APARATO EXPERIMENTAL	36
3.3.1 Controlador de Corrente LDC205C	37
3.3.2 Controlador de Temperatura TED200C.....	38
3.3.3 Laser HL6750MG	39
3.3.4 Lente Colimadora C230TMD-B	39
3.3.5 Detector da Câmera de Linha CCD LC1-USB 2.0	40
3.4 APARATO EXPERIMENTAL	41

3.5 UTILIZAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	44
3.6 TESTES COM O SOFTWARE SPLICCO	46
4. RESULTADO E DISCUSSÕES.....	49
4.1 MODO DE INTERROGAÇÃO ANGULAR.....	49
4.1.1 Laser HL6750MG	49
4.1.2 Câmera de Linha LC1-USB 2.0.....	50
4.1.3 Procedimento Experimental.....	51
4.2 MODO DE INTERROGAÇÃO ESPECTRAL.....	52
4.2.1 Lâmpada Dicroica	53
4.2.2 Espectrômetro Compacto LR1.....	54
4.2.3 Procedimento Experimental.....	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	57
5.2 TRABALHO PUBLICADO DURANTE O MESTRADO	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA FLUÍDICO.	65
APÊNDICE B - ROTEIRO UTILIZADO NA APLICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS NO APARATO EXPERIMENTAL.....	67

1. INTRODUÇÃO

O uso da experimental em sala de aula exemplifica uma íntima relação entre a teoria e a prática, tornando a aprendizagem mais dinâmica e interativa, possibilitando aos discentes uma melhor compreensão ao conteúdo aplicado pelo docente. Nesta perspectiva, atualizar o conhecimento constantemente é primordial na formação dos discentes e o docente 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. Por se tratar de um curso da área de exatas, traz consigo inúmeros cálculos e equações matemáticas. Para tanto, existe uma falta em 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 docentes dentro das salas de aulas para que os discentes sintam-se desafiados e, posteriormente, encorajados a aprender (ASSIS, 2002). Entretanto, há uma grande carência de profissionais com aptidão para desenvolver atividades específicas nas diversas áreas de ensino (SILVA, CECÍLIO 2007).

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 incentivem a busca ativa por soluções, utilização de ferramentas digitais e o uso da experimentação em sala de aula (PIMENTA, 2013). Desse 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 discentes e docentes a quebrarem as barreiras de um ensino tradicional promovendo o processo de assimilação dos conceitos científicos (SILVA, 2007).

Por outro lado, são relatadas algumas das principais dificuldades no ensino apontadas pelos docentes, pouco tempo disponível para a realização das atividades experimentais; a indisciplina dos discentes; a precariedade de materiais; a falta de espaço e laboratório e também a falta de recursos humanos

apropriados no ensino (BUENO, 2008). Dessa forma, é preciso encontrar soluções para diminuir essas dificuldades. Uma dessas soluções são os recursos didáticos que pressupõem novas possibilidades de relacionar educação e tecnologia como ferramentas pedagógicas para a formação dos indivíduos.

Entretanto, o uso da experimental no ensino vem sendo apresentado como uma ferramenta auxiliadora em sala de aula despertando interesse entre os discentes. Dentro desse contexto, Vilela; Vasconcellos e Gomes (2007, p. 9) afirma 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”.

Nesse contexto, esta pesquisa científica propõe o desenvolvimento de um aparato experimental para a elaboração de experimentos voltados aos estudos de sensores ópticos baseados na ressonância de plásmons de superfície (*Surface Plasmon Resonance* - SPR) obtendo uma solução eficaz, acessível e rápida aos experimentos que possam ser propostos durante o curso de disciplinas relacionadas a essa área de conhecimento, como as disciplinas de Comunicações Ópticas, ofertada na Graduação e Pós-graduação em Engenharia Elétrica e a disciplina de Sensores e Biossensores Ópticos, ofertada na Pós-graduação em Engenharia Elétrica do IFPB.

Os estudos acerca dos sensores ópticos baseados em 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 (RAETHER, 1988). Geralmente, as pesquisas científicas na área de sensoriamento buscam solucionar problemas relacionados a técnicas de detecção de doenças que muitas das vezes exigem algum tempo para análise, prolongando dias ou semanas, além do custo elevado, uma vez que necessita de profissionais treinados para o manuseio de uma instrumentação complexa (HU; ZHAO; SONG, 2016).

Neste cenário, os sensores 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 (BILRO; ALBERTO; SÁ; PINTO; ROGÉRIO, 2011; JORGENSON; YE, 1993). Diversas áreas que vão desde estudos farmacêuticos; diagnósticos clínicos; monitoramento de contaminantes ambientais e de segurança, controle na qualidade de alimentos (KRETSCHMANN; KRÖGER, 1975), monitoramento de interações biomoleculares antígeno-anticorpo (HOMOLA; ZHENG; et al, 2008), substâncias químicas (moléculas; proteínas; DNA; RNA; etc.), patógenos (vírus; bactérias; células; protozoários; etc.) (MOREIRA, 2010), entre outras, estão utilizando os sensores SPR para a detecção de diferentes analitos (KRETSCHMANN; KRÖGER, 1975).

Dessa forma, podem ser ressaltados alguns pontos significativos ao desenvolvimento do aparato experimental para a aplicação da teoria de sensores SPR:

1. Melhoria da percepção dos discentes em relação às disciplinas relacionadas ao tema em estudo;
2. Aumento da captação e retenção dos discentes para o(s) curso(s);
3. Satisfação dos discentes com o ambiente de sala de aula/laboratório;
4. Auxílio aos discentes dos cursos de Mestrado e Graduação em Engenharia Elétrica, de forma a proporcionar o contato entre a prática/teoria;
5. 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;
6. A própria inexistência de aparatos experimentais na área.

Assim, o desenvolvimento do aparato experimental para a elaboração de experimentos envolvendo os sensores SPR representa uma das alternativas para a prática pedagógica dos docentes, através do uso de equipamentos didáticos aplicados em sala de aula para o processo de ensino-aprendizagem dos discentes, de forma motivadora; interativa e lúdica, permitindo que os discentes possam se familiarizar melhor com a(s) disciplina(s). Além disso, de acordo com (MORAES, 1998), as aulas experimentais podem operar como um contraponto das aulas teóricas, sendo um poderoso catalisador no processo de aquisição de novos conhecimentos, no sentido de que a vivência de uma experiência facilita a fixação do conteúdo.

1.2 OBJETIVOS

Para resolver o problema desta pesquisa, apresenta-se a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos dentro do que foi previamente trabalhado no decorrer do curso.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste em desenvolver um aparato experimental para a elaboração de experimentos com sensores ópticos SPR, a ser utilizado pelos docentes e discentes dos cursos de Graduação em Sistemas de Telecomunicações e Engenharia Elétrica e também pela Pós-graduação em Engenharia Elétrica do IFPB, Campus João Pessoa.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar um levantamento bibliográfico sobre SPR e áreas afins;
- ✓ Estudar a importância do desenvolvimento de aparatos experimentais no processo de ensino-aprendizagem nos cursos de Engenharia Elétrica;
- ✓ Desenvolver um aparato experimental a ser aplicado na área de sensores SPR;
- ✓ Elaborar experimentos a serem executados com o aparato experimental;
- ✓ Estimular os discentes na prática experimental, contribuindo para o desenvolvimento de habilidades comportamentais, tais como: atitude; comunicação; pensamento crítico e empatia.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido nos seguintes capítulos, os quais descrevem as etapas e os procedimentos aplicados para alcançar os objetivos propostos da pesquisa.

Capítulo 1 - Introdução: apresentada a temática em estudo do presente trabalho por meio dos seguintes tópicos: (I) Objetivo geral e (II) Objetivos específicos.

Capítulo 2 - Fundamentação teórica: apresenta um levantamento bibliográfico do tema, incluindo as fontes que foram consultadas, como bancos de dados de periódicos, artigos científicos, jornais, livros e apostilas, empregados para fomentar a discussão e conseqüentemente a validação do trabalho, dividindo-se nas seguintes seções: (I) Os desafios e possibilidades no ensino do curso de Engenharia Elétrica; (II) O papel das atividades experimentais no ensino de Engenharia; (III) Contexto histórico sobre o fenômeno da Ressonância de Plásmons de Superfície; (IV) Princípio de funcionamento da Ressonância de Plásmons de Superfície; (V) Sensores e biossensores ópticos SPR; (VI) Sensores SPR baseados em fibra óptica e (VII) Fibra óptica polimérica e filme fino metálico.

Capítulo 3 - Materiais e métodos: neste capítulo, são detalhados a plataforma do aparato experimental e apontamentos para a realização de testes experimentais. Essa unidade encontra-se dividida em cinco seções: (I) Metodologia de ensino utilizada na aplicação da sequência didática adotada para essa pesquisa; (II) Apresentação dos componentes do sistema fluídico; (III) Apresentação dos componentes ópticos utilizados no aparato experimental; (IV) Aparato experimental; (V) Utilização do aparato experimental e (VI) Testes com o software SPLICCO.

Capítulo 4 - Resultados e discussão: exibe a proposta de experimento a ser executado no aparato experimental. Essa unidade está dividida nas seguintes seções: (I) Modo de Interrogação Angular; (II) Laser HL6750MG; (III) Câmera de linha LC1-USB 2.0; (IV) Procedimento experimental; (V) Modo de interrogação espectral; (VI) Lâmpada dicróica; (VII) Espectrômetro compacto LR1 e (VIII) Procedimento experimental.

Capítulo 5 - Considerações finais: neste último capítulo, são apresentadas as considerações finais obtidas na construção do aparato experimental em estudo. Essa unidade encontra-se dividida em duas seções: (I) Trabalhos futuros e (II) Trabalho publicado durante o mestrado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica que serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho, com destaque para os seguintes tópicos: Os desafios e possibilidades no ensino do curso de Engenharia Elétrica; O papel das atividades experimentais no ensino de Engenharia; Contexto histórico sobre o fenômeno da Ressonância de Plásmons de Superfície; Princípio de funcionamento da Ressonância de Plásmons de Superfície; Sensores e biossensores ópticos SPR; Sensores SPR baseados em fibra óptica; Fibra óptica polimérica e filme fino metálico.

2.1 OS DESAFIOS E POSSIBILIDADES NO ENSINO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Os cursos de Engenharia estão entre os cursos que possuem o maior índice de evasão. Um dos desafios enfrentados é o grau de dificuldade para a formação dos discentes, 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 (KIECKOW; FREITAS; LIESENFELD, 2018).

Sob o olhar do ensino, as reprovações estão associadas diretamente à aprendizagem e às metodologias usadas em sala de aula. Dessa forma, é preciso buscar um ambiente educacional construtivo proporcionando aos discentes experiências de aprendizagem nas quais os alunos possam explorar; pensar; interagir e aplicar conhecimentos (SILVA; ABRANCHES, 2022).

Alguns autores apontam a importância das aulas práticas no ensino:

As aulas práticas têm como principais funções despertar e manter o interesse dos alunos, a compreensão de conceitos básicos, desenvolver a capacidade de resolver problemas e fazer com que o estudante se envolva em investigações científicas de forma que possa ampliar suas habilidades (KRASILCHIK, 1987).

Entretanto, o docente 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 do conhecimento no aspecto pedagógico; estratégias didáticas; teorias de aprendizagem; e entre outros meios relevantes indo além no modelo fragmentado e desconectado da educação tradicional (RIOS, 2015).

A metodologia de aula tradicional de ensino funciona da seguinte maneira: o docente é considerado figura central e único detentor do conhecimento que, por sua vez, é repassado aos estudantes em aulas expositivas. O discente é reduzido a espectador em sala de aula para apenas memorizar e reproduzir os saberes. Dessa forma, para mudar esse método de aula tradicional é preciso que os docentes 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).

Neste cenário, alguns autores argumentam a importância dos recursos didáticos a serem trabalhados em sala de aula.

Para favorecer a superação de algumas das visões simplistas predominantes no ensino de ciências é necessário que aulas experimentais contemplem discussões teóricas que se estendam além de definições, fatos, conceitos ou generalizações, pois o ensino de ciências, a nosso ver, é uma área muito rica para se explorar diversas estratégias metodológicas, no qual a natureza e as transformações nela ocorridas estão à disposição como recursos didáticos, possibilitando a construção de conhecimentos científicos de modo significativo (RAMOS; ANTUNES; SILVA, 2010, p. 8).

A didática dos docentes, por sua vez, representa a arte de ensinar ou transmitir conteúdos através de recursos disponíveis nesse ambiente de aprendizagem composto por meios e atitudes dos componentes que os compõem docentes, através de sua didática, os discentes, e os meios com os quais é possível promover a arte do ensino (AEBLI, 1973).

Sendo assim, a prática experimental é de suma importância para a sala de aula, pois deve proporcionar aos discentes o desenvolvimento de sua capacidade crítica e reflexiva, melhorando o ensino e impactando diretamente na diminuição da evasão e do tempo de permanência desses discentes nos cursos de Engenharia, que é elevado (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). Dessa forma, o uso da experimentação reveste-se em um papel de auxiliador da atividade experimental, podendo auxiliar o docente a instigar a curiosidade de seus discentes, o que poderá facilitar a construção do conhecimento científico (CARNEIRO; VIEIRA; GONZAGA; SANTOS; OLIVEIRA, 2019). Proporcionando aos discentes situações de investigação e pensamento científico contextualizado, torna-se o processo de ensino-aprendizagem um momento rico e participativo (SILVA, 2017). Nesse contexto, a realização de atividades experimentais exige mais dedicação e preparação por parte do docente, para que as práticas de campo estejam relacionadas ao que está sendo apresentado em sala de aula (VICTORETTE; OLIVEIRA; MENDONÇA; NOLL; RODRIGUES, 2006).

De acordo com o postulado das Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino de Graduação em Engenharia, descreve-se que:

O formador precisa ter formação generalista, humanista, crítica e reflexiva, capacitada a absorver e desenvolver novas tecnologias e seus aspectos políticos, econômicos, sociais, ambientais e culturais, com visão ética e humanística, para atender as demandas da sociedade (GAMA, 2002, p.89)

No processo de ensino-aprendizagem, verifica-se que aulas expositivas não são suficientes para despertar o interesse e a atenção dos discentes em sala de aula. Nessa perspectiva, alguns autores afirmam que “o ideal é articular as diferentes abordagens de acordo com a situação de ensino” (MELO; ARAÚJO 2019, p.26). Portanto, as atividades experimentais podem contribuir para uma ferramenta relevante que permite ao docente constatar e problematizar o conhecimento prévio dos seus discentes, estimular a pesquisa, a investigação e a busca da solução de problemas (RONQUI; SOUZA; FREEITAS, 2009).

O uso de atividades experimentais nas aulas proporciona aos discentes 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 (VONLINSINGEN, 2010).

Alguns autores, relatam diversos benefícios das práticas experimentais, conforme o trecho destacado:

A partir da realização de atividades experimentais, é possível verificar diversos benefícios no processo de aprendizagem, dentre eles: a participação ativa do aluno no desenvolvimento de tarefas, que o permitirá melhor assimilar os conteúdos teóricos apresentados em sala de aula e despertar o interesse do aluno na identificação de processos e fenômenos científicos, passando por cálculos para o alcance dos resultados (SILVA, 2017).

Independentemente do tipo de experimento realizado, o que deve ser valorizado é o grau de problematização que o experimento apresenta. Dessa forma, as atividades práticas ou experimentos visam propiciar aos discentes situações de investigação e pensamento científico contextualizado, o que faz do processo de ensino-aprendizagem um momento rico e participativo.

2.3 CONTEXTO HISTÓRICO SOBRE FENÔMENO DA RESSONÂNCIA DE PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE

A primeira descoberta do fenômeno de Ressonância de Plásmons de Superfície (*Surface Plasmon Resonance* - SPR) foi notada pelo físico Robert Williams Wood em 1902, ao observar uma luz policromática refletida por uma superfície metálica, apresentando faixas escuras no espectro da luz difratada para certos ângulos de incidência e a magnitude da refletância correspondente que era reduzida (SOMMERFELD, 1909), o que poderia ser observado ao iluminar um feixe de luz policromático em uma grade de difração metálica (MORENO, 1990).

No ano de 1907, Ze-neck demonstrou que as ondas eletromagnéticas de superfície ocorrem entre as fronteiras de dois meios (RITCHIE, 1957). Em 1909, Sommerfeld, constatou que a amplitude de campo das ondas de superfícies introduzidas por Ze-neck decaem exponencialmente com a altura acima da

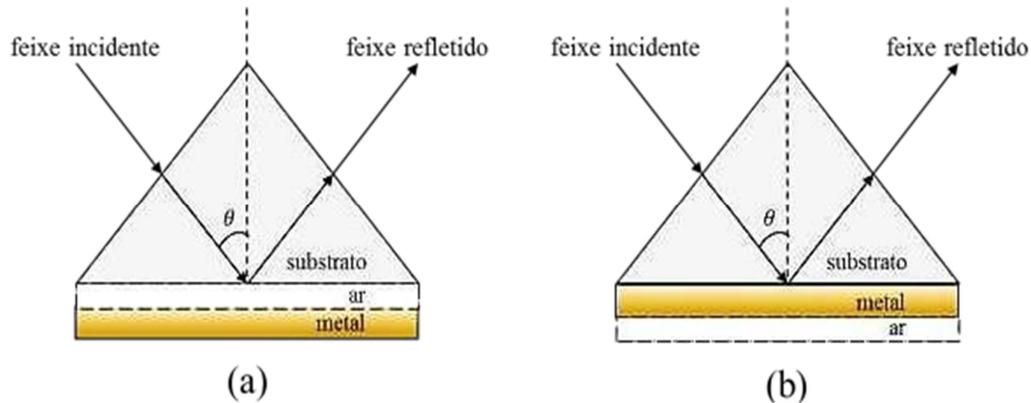
interface entre dois meios e é inversamente proporcional à distância horizontal até a fonte dipolo (TURBADAR, 1959). Ritchie, em 1957, provou a hipótese de Zenneck chamando essas ondas eletromagnéticas de excitação de plásmons de superfície (OTTO, 1968). Ele examinou a distribuição ângulo de um elétron que perdeu energia para oscilações de plásmons em um filme fino metálico infinito e considerando o efeito de finitude do filme, provando a hipótese de Zenneck e chamando as ondas eletromagnéticas de excitação de plásmons de superfície (OTTO, 1968).

Em 1958, Thurbadar verificou uma queda de refletividade quando utilizou uma fonte p -polarizada em filmes finos de alumínio que estavam depositados em uma placa de vidro, em que foi variada a espessura de filme fino de alumínio com diferentes ângulos de incidência do feixe de luz (SCHASFOORT; LOKATE; BEUSINK; PRUIJN; ENGBERS, 2008). Otto em 1968, conseguiu explicar os resultados de Thurbadar e demonstrou que a queda de refletividade acontecia pela interação entre os fótons incidentes e as oscilações longitudinais presentes na superfície do metal, denominadas plásmons de superfície (CAMARA, 2015).

As primeiras investigações 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 colocados sobre um material opticamente transmissivo ou prisma (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, sendo que o acoplamento da luz ao metal ocorre por meio de substratos ópticos como os prismas (KRETSCHMANN; KRÖGER, 1975). A configuração proposta por Otto e Kretschmann para observação do fenômeno SPR é apresentada na Figura 1.

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



Fonte: (SHARMA; JHA; GUPTA, 2007).

2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO RESSONÂNCIA DE PLÁSMONS DE SUPERFÍCIE

A Ressonância de Plásmons de Superfície - SPR é uma tecnologia de detecção baseada em óptica, para a monitorização em tempo real das interações de união entre duas ou mais moléculas, ou seja, é uma oscilação ressonante dos elétrons de condução na interface entre o material dielétrico e o metal, estimulado pela luz incidente e utilizado no desenvolvimento de sensores (KANSO; CUENOT; LOUARN, 2008).

O fenômeno SPR refere-se à excitação da Onda de Plásmons de Superfície (*Surface Plasmon Wave* - SPW), que se fundamenta na Reflexão Total Atenuada (*Attenuated Total Reflection* - ATR), 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 e entre outros formando a chamada região sensora (HOMOLA, 2006).

Existem algumas condições necessárias para a excitação dos plásmons de superfície, são elas (RAJAN; CHAND; GUPTA, 2006), (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 (THIRSTRUP; et al; OLIVEIRA, 2004), (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

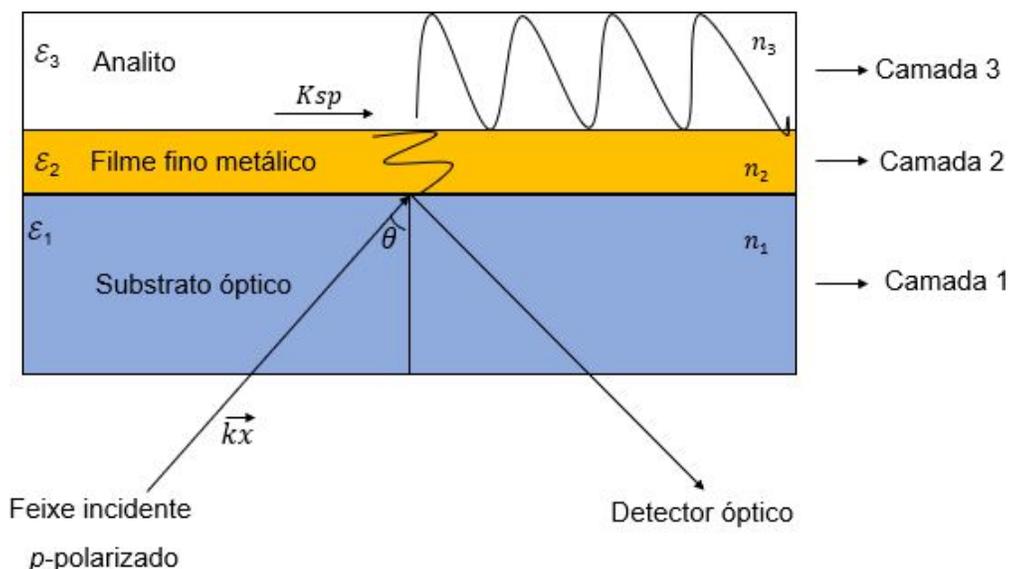
de superfície, e assim, contribuir para a elevação da magnitude do vetor de onda em ambas as partícula (THIRSTRUP; et al, 2004), (4) O feixe luminoso terá que sofrer reflexão interna total.

Dessa 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 estimulado por uma onda luminosa de comprimento de onda específico. Para tanto, 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, ou seja, 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 à Ressonância de Plásmons de Superfície - SPR (THIRSTRUP; et al, 2004). A partir das Equações de Maxwell, a constante de propagação (K_{sp}) da Onda de Plásmons de Superfície é descrita pela Equação (1):

$$K_{sp} = \frac{\omega}{c} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}} \right) \quad (1)$$

Na Equação (1), ω é a frequência do feixe de luz incidente, c é a velocidade da luz, ε_2 e ε_3 são as constantes dielétricas do metal e do meio dielétrico, respectivamente. Para uma melhor explicação do fenômeno SPR, a Figura 2 ilustra o modelo de três camadas sobrepostas, portanto, igualando-se à componente tangencial do vetor de onda k_x da luz incidente que está sendo confinada e propagada no substrato óptico, com o número de onda (K_{sp}) da onda SPW presente na interface do filme fino metálico e analito, onde o campo elétrico vibra na mesma amplitude e frequência que os plásmons de superfície, chegando à magnitude máxima, e decaindo de forma evanescente em ambos os meios.

Figura 2. Modelo de três camadas sobrepostas em estudo.



Fonte: Adaptado de (INCE; NARAYANASWAMY, 2006).

Considera-se ainda que a luz incidente propaga-se na camada 1 com ângulo de incidência θ em relação à normal à interface, maior que o ângulo crítico, ou seja, o ângulo no qual um raio de luz incidente é refratado e sai paralelo à superfície. Assim, ϵ_1 é a permissividade da camada 1 (HOMOLA, 2006). Portanto, na Equação (2), é descrita a condição clássica do acoplamento máximo entre o feixe incidente e os plásmons de superfície igualando-se as duas componentes k_x e k_{sp} .

$$K_{sp} = k_x \cdot \left(\frac{\omega}{c}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{\epsilon_2 \cdot \epsilon_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}}\right) = \sqrt{\epsilon_1} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2)$$

No momento quando o vetor da onda do feixe luminoso iguala-se ao vetor da onda dos plásmons de superfície, o resultado é um acoplamento ressonante. Portanto, a ressonância pode ser comprovada com a redução da intensidade da luz refletida, que pode ser monitorada através do ângulo de ressonância ou comprimento de onda ressonante (MALHOTRA; TURNER, 2003). O fenômeno SPR ocorre para um ângulo de incidência θ_{SP} particular, dado pela Equação (3):

$$\theta_{sp} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1}{n_1} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}} \right) \quad (3)$$

Na Equação (3), n_1 corresponde ao índice de refração do substrato óptico do meio 1, ε_2 é o valor da permissividade neste meio, representando a camada de metal contendo parte real e parte imaginária e ε_3 é a permissividade da camada 3, correspondente ao analito (MALHOTRA; TURNER, 2003).

2.5 SENSORES E BIOSSENSORES ÓPTICOS SPR

De acordo com a literatura, é possível determinar algumas características e desempenhos dos sensores e biossensores ópticos SPR como propriedades funcionais; qualidade do sensor; alta sensibilidade; refletividade; estabilidade; tempo de resposta e outros parâmetros correlacionados com suas aplicações (OLIVEIRA; PEREIRA, 2016).

Os sensores ópticos baseados no fenômeno SPR são dispositivos que detectam um determinado dielétrico 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. Esse sinal pode ser visualizado convertendo a onda luminosa em um sinal mensurável através de um detector óptico (NAZARETH, 2020).

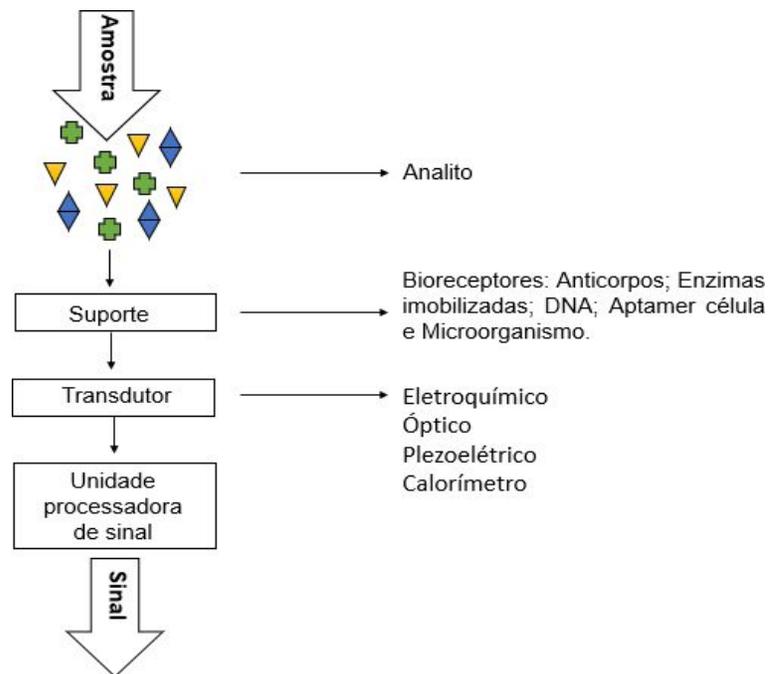
Os biossensores são dispositivos analíticos constituídos por um elemento biológico acoplado a um transdutor para converter um sinal biológico em um sinal elétrico. Diante disso, estudos voltados aos biossensores SPR envolvem algumas áreas de conhecimento como bioquímica; imunologia; óptica; eletroquímica; ciência dos materiais; semicondutores e entre outras áreas em que podem ser utilizados, por exemplo, para detectar anticorpos e enzimas, que são reconhecidos e interagem com o analito, alterando seu índice de refração e, conseqüentemente, a constante de propagação dos plásmons de superfície (HERNÁNDEZ-MONZÓN; et al, 2004).

Os biossensores ópticos SPR são compostos por três componentes: o elemento de reconhecimento; transdutor de sinal e processador de sinal, que transmite e exhibe os resultados (CENNAMO; et al, 2015):

- ✓ O elemento de reconhecimento detecta um sinal do ambiente na forma de um analito, por meio do material biológico ou bioquímico através de tecido; microrganismos; organelas; receptores celulares; enzimas; anticorpos; ácidos nucleicos; etc);
- ✓ Em seguida, o transdutor de sinal converte o sinal biológico em uma saída elétrica, através de um meio eletroquímico ou óptico, tendo em vista que a escolha do material depende do tipo de resposta biológica;
- ✓ Por último, há o processador de sinal que coleta os dados para o estudo.

Na Figura 3, é mostrado o diagrama representativo de um biossensor para estudos de SPR.

Figura 3. Diagrama representativo de um biossensor SPR.



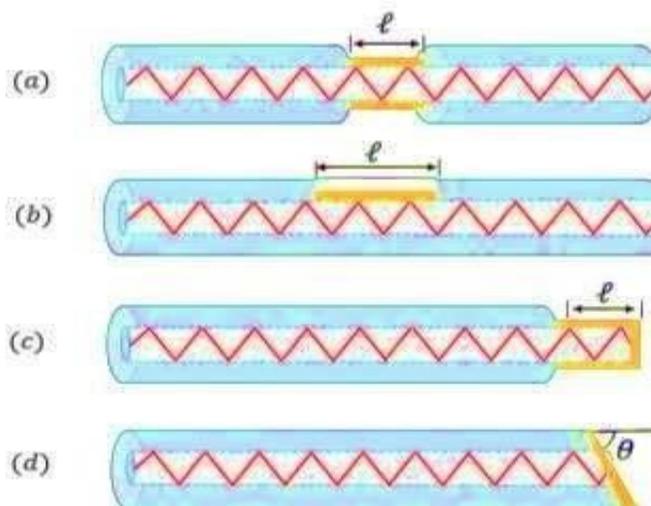
Fonte: Adaptado de (HOMOLA, 2006).

2.6 SENSORES SPR BASEADOS EM 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 (KÁSSIO; et al., 2009). Desse 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; cientes e de fácil operação, estruturas miniaturizadas (SZUNERITS; MAALLOULI; WIJAYA; VILCOT; BOUKHERROUB, 2013), possibilidade de detecção e análise em tempo real, por exemplo, adeteção e o monitoramento de agentes patológicos (vírus e bactérias), o monitoramento de contaminantes em alimentos e a detecção de biomarcadores de câncer (BUNCH; VERBRIDGE; ALDEN; ZANDE; PARPIA; CRAIGHEAD; MCEUEN, 2008).

A fim de melhorar o desempenho do sensor SPR, existem algumas características concernentes às fibras ópticas como, por exemplo, a redução de tamanho e peso. Dessa forma, elas oferecem fácil manuseio e acesso remoto e, em vista disso, na literatura existem algumas configurações para a fabricação da região sensora com fibras ópticas, proporcionando uma maior absorção de moléculas orgânicas e biológicas (RAETHER, 1988; OLIVEIRA, 2013). Na Figura 4, são mostradas algumas configurações de sensor SPR com fibras ópticas.

Figura 4. Configurações para sensores SPR em fibras ópticas.



Fonte: (ZENNECK, 1907).

Na Figura 4, é ilustrada a configuração da região sensora de comprimento l , (a) região sensora em toda a circunferência da porção central da fibra; (b) região sensora em uma das faces da fibra; (c) região sensora em uma das extremidades da fibra; (d) região sensora em uma das extremidades e com um ângulo específico.

Além disso, ao controlar o número de camadas depositadas sobre o filme fino metálico, é possível controlar a resposta e a sensibilidade desses sensores. Diante disso, uma maior aderência do analito e uma proteção para os filmes finos metálicos contra corrosão, oxidação e interações químicas podem alterar a resposta desses sensores (SILVA, 2017; JORGENSON; YEE, 1993).

Estudos voltados à pesquisa de sensoriamento com fibra óptica mostraram resultados relevantes e aprimorados quando empregado o fenômeno SPR, por sua característica e aplicação em detecções de analitos biológicos; químicos; físicos; monitoramento ambiental e diagnósticos médicos (FEBBO, 2016) e também por serem rápidos, usar design óptico simplificado, capacidade de sensoriamento remoto e capturar pequeno volume de amostra para detecção (BASTOS, 2016).

O princípio de funcionamento de sensores SPR baseados em fibra óptica sucede pela incidência luminosa em uma das extremidades da fibra, proveniente de uma fonte óptica poli ou monocromática. A interação da luz com os elétrons do metal resulta em uma modificação do sinal óptico guiado até um sistema de detecção de luz para ser medido. A luz pode ser medida na extremidade oposta da mesma fibra, percorrer o caminho de volta e ser medida na mesma extremidade ou ainda ser medida na saída de uma fibra diferente (MORENO; JIMÉNEZ; CONDE; CÁMARA, 1990).

Existem alguns fatores de sensores ópticos que afetam o sinal identificado em diferentes graus como, por exemplo, o tamanho; a forma; a cor; a presença de incrustações e arranhões na superfície óptica do sensor, índice de refração e dependência com o comprimento de onda da luz incidente (NORRIS, 1989). Os sensores SPR baseados em fibra óptica oferecem algumas vantagens importantes para detecções, por exemplo, na transmissão de sinais ópticos a grandes distâncias e são seguros para monitoramento, fazendo destas algumas propriedades inerentes ao sensor (YU; IRUDAYARAJ, 2007; INAUDI; GLISIC, 2005).

Também mostram vantagens na detecção de pequeno volume de amostra, usam design óptico simplificado e possuem capacidade para sensoriamento remoto (UDD, 1995). Para resumir as potencialidades dos sensores em fibra óptica, no Quadro 1, é apresentado um conjunto de vantagens e desvantagens associadas aos sensores SPR.

Quadro 1. Classificação de vantagens e desvantagens dos sensores baseados em fibra óptica.

Vantagens	Desvantagens
Apropriados para utilização em ambientes explosivos	Custo geralmente elevado da maior parte dos componentes
Têm isolamento elétrico	Fragilidade e dificuldade de conexões das fibras ópticas
São imunes à corrosão	
Tolerantes a altas temperaturas	
Apresentam sensibilidade a diversas grandezas físicas	
Permitem transmissão do sinal ao longo de grandes distâncias face à reduzida atenuação	
Estabilidade ao longo do tempo	

Fonte: Adaptado de (ZUBIA; ARRUE, 2001; HENRIQUES, 2013).

Portanto, os sensores em fibra óptica têm tido grande importância na inovação dos sistemas de monitoramento em diversas áreas tecnológicas, apresentando benefícios no desenvolvimento em sensores que permitem a rapidez e eficiência em sensores elétricos tradicionais (FERNANDES, 2016).

2.7 FIBRA ÓPTICA POLIMÉRICA E FILME FINO METÁLICO

A fibra óptica de plástico ou fibra óptica de polímero (*Polymer Optical Fiber* – POF) é uma fibra óptica que transmite luz através do núcleo da fibra. O desenvolvimento de novas tecnologias para a fibra óptica polimérica tem dado maior prestígio a aplicações de curta distância tais como: redes locais; eletrônica de veículos; automação industrial; sensores (na medicina e indústria), iluminação; sinais e entre outros (SMITH, 1995).

Nas últimas décadas, as fibras ópticas de plástico têm revelado diversas vantagens em suas propriedades e ganhado popularidade, não só no campo das

telecomunicações, mas em especial na utilização como substrato de sensores ópticos, portanto, as fibras ópticas poliméricas podem ser consideradas como um condutor óptico em forma de fio com pouca espessura por onde a luz pode ser conduzida no seu interior e servem como um complemento das fibras de vidro em ligações de curta distância, pois são mais fáceis de manusear, mais flexíveis e econômicas (CHOPRA; PAULON; DUTTA, 2004).

Por causa desses méritos, foram desenvolvidas aplicações variadas com as POFs, sendo comercializadas desde para um uso simples de transmissão de luz, até para sensores e cabos de telecomunicações. As fibras ópticas poliméricas apresentam as seguintes vantagens: apresentam custo mais baixo; são leves; possuem maior flexibilidade e elasticidade à flexão; choque e vibração; têm imunidade à interferência eletromagnética; são de fácil manipulação e acoplamento, por possuírem dimensões maiores em relação às de sílica, dentre outras vantagens (LISSBERG, 1970).

Entretanto, as fibras ópticas poliméricas também possuem algumas desvantagens, por exemplo: maiores perdas durante a transmissão; reduzido número de fabricantes; falta de conhecimento das suas propriedades mesmo entre técnicos do ramo; potencial de utilização ainda pouco explorado e pouca resistência para temperaturas muito elevadas (BISWAS; SHALEV; SHTEIN, 2013). No Quadro 2, é feita uma comparação em função de algumas características das fibras ópticas poliméricas e das fibras ópticas de vidro.

Quadro 2. Comparação entre a fibra óptica polimérica e a fibra óptica de vidro.

Características	Fibra Óptica Polimérica	Fibra Óptica de Vidro
Custos dos componentes	Potencialmente baixo	Mais caro
Perdas	Alta-média (para curtas distâncias)	Média-baixa (para longas distâncias)
Conexões	Fácil para conectar e requer pequeno treinamento ou ferramentas especiais	Demanda mais tempo e requer ferramentas especiais e treinamento
Manipulação	Fácil	Requer treinamento e cuidado
Flexibilidade	Flexível	Frágil
Abertura numérica	Alta (0,4)	Baixa (0,1 - 0,2)
Largura de banda	Alta (11 GBPS acima de 100 metros)	Larga (40 GBPS)
Equipamento de teste	Custo baixo	Caro
Custo do sistema	Baixo	Alto

Fonte: Adaptado de (BISWAS; SHALEV; SHTEIN, 2013).

O filme fino metálico é uma camada de material com espessura entre nanômetros e micrômetros que é depositada sobre um material (substrato) para alterar suas propriedades superficiais (BIDAN, 1992). Portanto, a utilização de filme fino pode ser aplicada no desenvolvimento de células solares; dispositivos ópticos; transdutores; sensores e biossensores (CENNAMO; et al., 2016). Existem algumas propriedades básicas dos filmes finos, tais como, a composição; a fase cristalina; a sua orientação; a espessura e a microestrutura, que são controladas pelas condições de deposição. Desta forma, na produção de filmes finos, são depositados materiais no substrato utilizando a evaporação térmica, a decomposição química e/ou a evaporação de materiais utilizando radiações de espécies energéticas ou de fótons (POLISHUK, 2006).

Para tanto, os sensores de filme fino são constituídos por duas estruturas, o substrato e o metal depositado, em que as suas dimensões variam desde os nanômetros até aos micrômetros de espessura. Portanto, o filme fino é feito de materiais depositados com as técnicas descritas anteriormente e que tem início através de um processo de nucleação aleatório seguido por nucleação e crescimento em etapas (LOURENÇO, 1998).

Na utilização de filmes finos existem algumas vantagens, como por exemplo, as suas dimensões reduzidas; que possibilitam, em laboratório, o fabrico de sensores específicos para aplicações muito particulares e permite desperdiçar menos amostra e material precioso (KANT; TABASSUM; GUPTA, 2016). Também os filmes finos apresentam algumas desvantagens, como por exemplo, a impossibilidade de reduzir o tamanho dos sensores a determinados limites impostos pela tecnologia atual e a fraca estabilidade intrínseca associada aos filmes finos, devido à presença de um íntimo contato entre dois materiais com propriedades muito diferentes (substrato e metal) (KANT; TABASSUM; GUPTA, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são detalhadas as características no processo de elaboração do aparato experimental, tais como: Metodologia de ensino utilizada na aplicação da sequência didática adotada para essa pesquisa; Apresentação dos componentes do sistema fluídico; Apresentação dos componentes ópticos utilizados no aparato experimental; Aparato experimental; Utilização do aparato experimental e Testes com o software SPLICCO.

O presente trabalho pode ser classificado como uma pesquisa experimental, que tem o intuito de fortalecer cada vez mais o ensino prático na Instituição (GIL, 2010).

3.1 METODOLOGIA DE ENSINO UTILIZADA NA APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA ADOTADA PARA ESSA PESQUISA

A proposta da sequência didática serviu de estratégia educacional para aprimorar a aprendizagem, definindo passos e etapas de forma sequencial. A execução das atividades buscou abranger todas as etapas no desenvolvimento da metodologia deste trabalho, incluindo a montagem dos subsistemas de transmissão e recepção de sinais e a construção do sistema de bombeamento das amostras (analitos). 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. No Quadro 3, são mostradas as etapas da sequência didática.

Quadro 3. Etapas da sequência didática aplicada.

Etapas da sequência didática	Descrição	Tempo de planejamento
Estudos voltados à Ressonância de Plásmons de Superfície para elaboração do aparato experimental	A pesquisa bibliográfica compreendeu o processo metodológico de investigação utilizado no desenvolvimento e a elaboração do aparato experimental delimitada aos estudos da Ressonância de Plásmons de Superfície e suas aplicações. O levantamento bibliográfico baseou-se em publicações de artigos, revistas e trabalhos afins.	2 semanas
Testes dos equipamentos ópticos disponíveis no laboratório de Fibras Ópticas (IFPB)	A segunda etapa da sequência didática enfatizou a realização de testes dos equipamentos ópticos disponíveis no Laboratório de Fibras Ópticas (IFPB). A realização desses testes teve por finalidade verificar a qualidade, o desempenho e a resistência de cada um dos equipamentos a ponto de não prejudicar a execução da montagem do <i>setup</i> .	1 semana
Estratégias para confecção do sistema de bombeamento de fluido	Foram planejadas estratégias para confecção do Sistema de Bombeamento de Fluídico. Para amenizar as dificuldades encontradas no laboratório por falta de equipamentos, foram utilizados materiais simples, baratos e fáceis de se adquirir, os quais garantem um suporte básico e eficaz na confecção do sistema de bombeamento. Então, foi preciso adquirir alguns materiais para dar início à construção do aparato experimental. Para isso, foram comprados: Seringas de 60 ml, torneiras de 3 vias e mangueira pneumática de 4 mm.	2 semanas

Confecção do aparato experimental	A confecção do aparato experimental consiste nos estudos de SPR no Modo de Interrogação Angular (<i>Angular Interrogation Mode</i> - AIM) que é caracterizado pela utilização de uma fonte monocromática como diodo laser, um sensor óptico e uma câmera CCD (<i>Charge Coupled Device</i>) como detector óptico.	1 mês
-----------------------------------	--	-------

Fonte: Próprio autor.

3.2 APRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA FLUÍDICO

Foi realizado um estudo bibliográfico sobre o uso do sistema fluídico na aquisição em experimentos de SPR no Modo de Interrogação Angular (*Angular Interrogation Mode* - AIM), a fim de produzir um produto educacional inovador com o uso dessa tecnologia. A construção do sistema fluídico foi realizada com materiais de fácil aquisição, sendo a maior parte desses materiais de baixo custo, que podem ser encontrados em farmácias e lojas de material de construção. No Quadro 4, é mostrada a listagem dos materiais necessários à realização deste sistema.

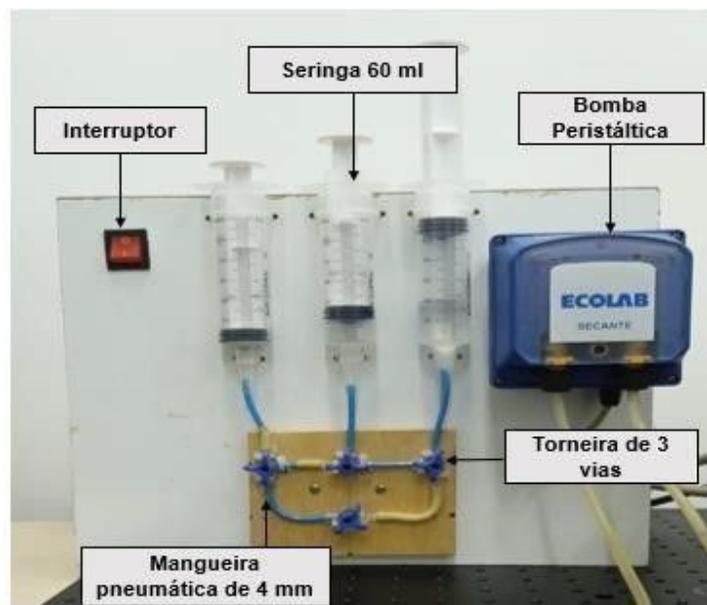
Quadro 4. Listagem de materiais básicos para a execução do sistema fluídico.

Materiais utilizados	Dimensões	Quantidade	Preço (R\$)
Botão interruptor	-----	1	-----
Seringa de 60 ml	17,50 cm x 5,50 cm	3	18,00
Bomba peristáltica	-----	1	-----
Torneira de 3 vias	13,50 cm x 14,50 cm	4	8,00
Mangueira pneumática de 4 mm	4 mm (D)	300 cm	5,00
Suporte de madeira	22,00 cm x 28,00 cm	1	-----
	17,00 cm x 20,00 cm	1	-----
Total	-----	-----	31,00

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que muitos desses itens é de fácil acesso, conforme dito anteriormente. Alguns elementos listados no Quadro 4 (botão interruptor, bomba peristáltica e suporte de madeira) estavam disponíveis no (IFPB) e não precisaram ser comprados. Contudo, de forma opcional, esta pesquisa teve um investimento extra de aproximadamente R\$ 31,00 para tornar a montagem organizada e versátil para quem for utilizá-la. Vale ressaltar que este sistema foi construído especificamente para fins desta pesquisa. Na Figura 5, é mostrado o sistema fluídico presente no aparato experimental com todos os seus componentes básicos.

Figura 5. Sistema de bombeamento de fluidos.



Fonte: Próprio autor.

3.3 APRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES ÓPTICOS UTILIZADOS NO APARATO EXPERIMENTAL

Nesta subseção são apresentadas as principais características e funções dos componentes ópticos e equipamentos usados na montagem do aparato experimental proposto.

3.3.1 Controlador de Corrente LDC205C

O controlador de corrente (LDC205C) é um controlador que indica a corrente desejada oferecendo recursos que garantem desempenho excepcional nos testes experimentais, uma vez que permite controlar e ajustar o nível de corrente que passa pela fonte de luz (laser) podendo ser acionado nos dois modos: corrente constante (*Constant Current – CC*) ou potência constante (*Constant Power - CP*). O modo de corrente constante é usado quando o ruído for mais baixo e a velocidade de resposta for mais alta. Já o modo de potência constante é usado para estabilizar ativamente a potência de saída do laser, que é ajustada por um circuito de realimentação (THORLABS Inc.). Na Figura 6, é ilustrado o controlador de corrente LDC205C usado no *setup*.

Figura 6. Controlador de corrente LDC205C.



Fonte: (THORLABS Inc.).

O controlador de corrente (LDC205C) apresenta algumas características retiradas do *datasheet* THORLABS Inc.):

- Visor LED de 5 dígitos;
- Ruído extremamente baixo (LDC201CU 0,2 μ A);
- Entrada e saída de controle analógico;
- Proteção confiável de diodo laser;
- Opera com todas as polaridades do diodo laser e fotodiodo;
- Apresenta sete modelos com faixas de corrente de laser de 20 mA a 4 A;

- Certificado de calibração e relatório de teste incluído.

3.3.2 Controlador de Temperatura TED200C

O controlador de temperatura (TED200C) é um controlador de precisão projetado para acionar elementos resfriadores termoelétricos (*Thermoelectric Cooler* – TEC) com correntes de até ± 2 A. Na Figura 7, é mostrado o Controlador de temperatura TED200C. Ele suporta quase todos os sensores de temperatura comuns e pode ser adaptado a diferentes cargas térmicas (THORLABS Inc.).

Figura 7. Controlador de temperatura TED200C.



Fonte: (THORLABS Inc.).

Características do controlador de temperatura TED200C retiradas do *datasheet* (THORLABS Inc.):

- Sensores compatíveis: termistores, AD590/AD592, LM335;
- Saída TEC (baixo ruído): ± 2 A / 12 W;
- Estabilidade de temperatura: $\leq 0,002$ °C;
- Modo de operação de temperatura constante;
- Limite de corrente TEC ajustável;
- Detecção de sensor de temperatura incorreto ou ausente e conexão TEC aberta;
- Compatível com as diretrizes restrição de certas substâncias perigosas (*Restriction of Certain Hazardous Substances* - RoHS).

3.3.3 Laser HL6750MG

O laser (HL6750MG) é um diodo laser (*Laser diodo - LD*), AlGaInP de banda de 0,68 μm com uma estrutura poço multi-quântico (*Multi-quantum Well - MQW*), adequado como fonte de luz para vários outros tipos de equipamentos ópticos (THORLABS Inc.). Na Figura 8, é apresentado o Laser HL6750MG usado no experimento.

Figura 8. Laser HL6750MG.



Fonte: (THORLABS Inc.).

Características do laser (HL6750MG) retiradas do *datasheet* (THORLABS Inc.):

- Potências de saída de 0,2 mW a 3 W;
- Compatível com Thorlabs Diodo Laser e Controladores TEC;
- Comprimentos de onda centrais disponíveis de 375 nm a 4,60 μm ;
- Alta potência de saída: 50 mW (CW);
- Modo longitudinal único;
- Embalagem pequena: ϕ 5,6 mm;
- Saída de luz visível: $\lambda_p = \text{nm}$ típico;
- Baixa corrente de operação: 75 mA típico;
- Baixa tensão de operação: 2,3 V típico.

3.3.4 Lente Colimadora C230TMD-B

A lente colimadora (C230TMD-B) é uma lente asférica, que possui um design mais plano, ao contrário das lentes tradicionais esféricas, que têm uma curvatura gradual. Na Figura 9, é ilustrado a Lente Colimadora C230TMD-B.

Desse modo, a lente colimadora esférica possui o material da lente distribuído de forma igual por toda a sua extensão, facilitando o foco ou a colisão com a luz, melhorando a qualidade da iluminação (THORLABS Inc.).

Figura 9. Lente Colimadora C230TMD-B.



Fonte: (THORLABS Inc.).

Características da lente colimadora (C230TMD-B) retiradas do *datasheet* (THORLABS Inc.).

- Lentes esféricas de vidro moldado;
- Foca e colima a luz sem introduzir a lente esférica;
- Revestimento de banda larga para 600 - 1050 nm ou 650 - 1050 nm.

3.3.5 Detector da Câmera de Linha CCD LC1-USB 2.0

O dispositivo de carga acoplada (*Charge Coupled Device* - CCD) é uma câmera LC1-USB 2.0 projetada para uso geral em laboratório, usada para calcular a média; suavizar; encontrar picos; bem como, salvar e recuperar conjuntos de dados. A câmera CCD é ideal para uma variedade de aplicações em controle de processos da indústria, óptica, biologia, espectroscopia e imagens de reflexão. Portanto, a câmera CCD da Thorlabs tem várias vantagens em relação a outras semelhantes, incluindo sua alta resolução linear óptica, o que permite que o sistema desenvolvedor use as câmeras para capturar imagens bidimensionais (2D) movendo o objeto perpendicularmente à linha de varredura (THORLABS Inc.). Na Figura 10, é mostrado o Detector da Câmera de Linha CCD usado no aparato experimental.

Figura 10. Detector da Câmera de Linha CCD LC1-USB 2.0.



Fonte: (THORLABS Inc.).

Características da câmera de linha CCD (LC1-USB 2.0) retiradas do *datasheet* (THORLABS Inc.).

- Matriz CCD linear de silício de 3000 pixels (tamanho do pixel de 7 μm x 200 μm);
- Zoom; absorvância; transmitância e medições de diferença relativa;
- Conversor A/D de 12 bits para alta intensidade de resolução;
- Alta taxa de varredura (até 190 varreduras/segundo);
- Tempo de integração óptica ajustável de 1 μs a 200 ms;
- USB2.0 (480 Mb/s) e USB1.1 (12 Mb/s) compatível;
- Sem recursos de software de requisitos de energia externa;
- Medição de espectro em tempo real;
- Rotinas de ajuste Gaussiano;
- Rotinas em tempo real definidas pelo usuário;
- Compatível com windows 2000/XP/Vista.

3.4 APARATO EXPERIMENTAL

A montagem do aparato experimental se deu em duas etapas: a primeira etapa foi a construção do sistema de bombeamento de fluido visto na Figura 5. A segunda etapa consistiu na montagem do *setup* com todos os componentes ópticos necessários à elaboração do aparato. No Quadro 5, é mostrada a listagem dos materiais necessários na realização do aparato experimental e o custo estimado de cada um, o que serve de base para a montagem de um *setup* semelhante em laboratório.

Quadro 5. Listagem de materiais utilizados para elaboração do aparato experimental.

Materiais utilizados	Valores
Sistema fluídico	em torno de R\$ 750,00
Controlador de corrente LDC205C	em torno de R\$ 13.000,00
Controlador de temperatura TED200C	em torno de R\$ 13.000,00
Suporte para montagem de laser com controlador de corrente e temperatura	em torno de R\$ 8.000,00
Laser HL6750MG	em torno de R\$ 1.000,00
Lente colimadora C230TMD-B	em torno de R\$ 1.000,00
Câmera CCD	em torno de R\$ 5.000,00
Postes, hastes e outros acessórios	em torno de R\$ 2.000,00
Total	R\$ 43.750,00

Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, foram fixados em uma mesa óptica todos componentes através de postes com parafusos. Essa fixação é necessária para que não ocorra nenhum problema no momento da realização dos testes, já que o alinhamento óptico é essencial para a obtenção dos resultados.

A proposta da construção do sistema de bombeamento serve para realizar o transporte de fluido para o substrato óptico. Para isso, foi realizada uma ligação entre a mangueira pneumática de 4 mm, conector de tubo pneumático em forma cruzada de 4 vias e bomba peristáltica que forneceu a energia necessária para ocorrer o bombeamento do fluido. Logo após, foram acoplados os 2 (dois) controladores. O de Corrente (LDC205C) auxiliou no controle e indicação da corrente apropriada para a realização do experimento. Já o controlador de Temperatura (TED200C) teve como função controlar a temperatura adequada para a operação. Para isso, foi usado um suporte que serve para acoplar o laser aos controladores, que tem como objetivo fazer a ligação dos controladores de Corrente (LDC205C) e Temperatura (TED200C) estabelecendo os sinais de comunicação e alimentação elétrica para o laser.

O laser acoplado ao suporte é o componente (HL6750MG) que emite luz monocromática no comprimento de onda $\lambda = 685 \text{ nm}$. Após a configuração do laser e sabendo que seu feixe se torna divergente ao longo da distância, é necessária a óptica de colimação, tornando os feixes paralelos entre si e restringindo o feixe luminoso na entrada da fibra óptica. Para isso, foi utilizada

uma Lente Colimadora (C230TMD-B) que dispõe das seguintes especificações: abertura numérica $NA = 0,55$, distância focal = 4,51 mm e faixa de operação entre 600-1050 nm. A lente facilitou no processo de colimação do feixe de luz, melhorando o foco e a emissão da luz transmitida pelo laser (HL6750MG).

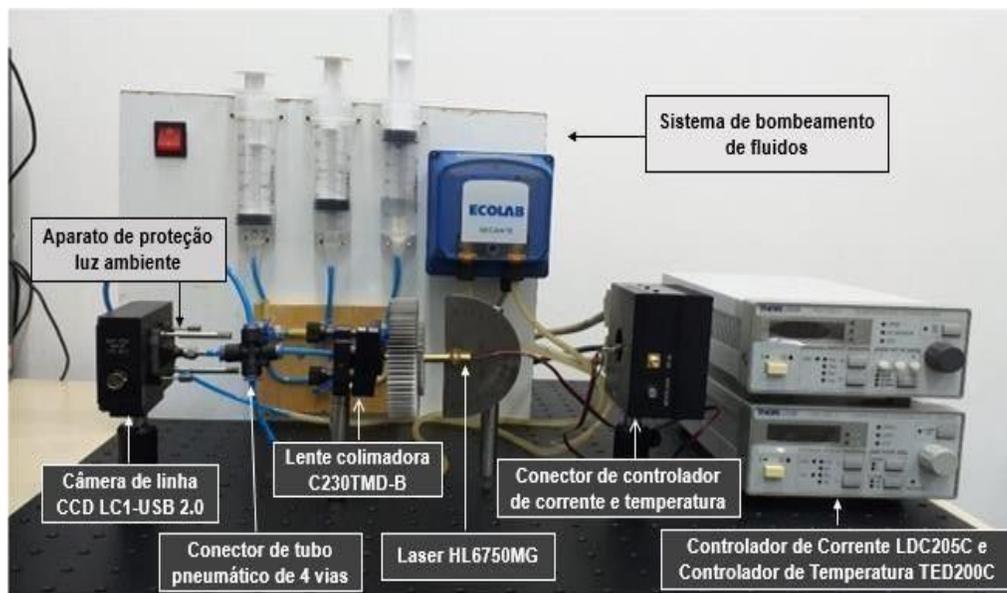
De maneira geral, apesar dos lasers serem fontes de luz diretivas, o feixe emitido pela sua saída tende a sofrer dispersão. Uma forma de contornar esse problema é fazer uso de lentes colimadoras, cuja função é tornar o feixe de luz paralelo a partir de uma certa distância de posicionamento da lente em relação ao laser (geralmente, equivalente à sua distância focal) para um determinado ângulo de abertura do feixe.

Em seguida, foi posicionado o conector de tubo pneumático em forma cruzada de 4 vias para fazer a conexão entre diferentes seções de tubos e mangueiras utilizadas para a condução de ar. Esse tipo de conector tem como vantagem a fácil manipulação ao retirar e colocar as mangueiras, sem a necessidade do uso de ferramentas.

O aparato experimental foi desenvolvido para operar, inicialmente, no Modo de Interrogação Angular – AIM, juntamente com os sensores SPR a serem testados. Sendo assim, uma maneira de se obter esse ângulo é utilizar como detector óptico uma câmera CCD, cujas principais funções são capturar e transferir a imagem para o sistema de memória do dispositivo em formato eletrônico. Os dados são obtidos em *pixels* e convertidos para os valores correspondentes em ângulo.

Por fim, a câmera é acoplada a um computador para calcular médias, suavizar e encontrar os pontos máximos e mínimos das curvas, salvar e recuperar o sinal enviado pelo laser, possibilitando assim a visualização correta dos resultados. Para não prejudicar os testes experimentais, por conta da luz do ambiente, foi feito um aparato de proteção construído na impressora 3D e fixado na câmera CCD para que não houvesse nenhuma interferência na realização dos testes. Esse foi um dos pontos importantes para a realização do aparato experimental. Na Figura 11, pode-se observar o aparato experimental proposto com todos os equipamentos necessários à montagem do *setup*.

Figura 11. *Setup* experimental no Modo de Interrogação Angular.



Fonte: Próprio autor.

3.5 UTILIZAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental proposto foi desenvolvido para o uso com sensores SPR baseados em fibra óptica. O sensor proposto possui geometria simples e fácil manipulação, podendo operar tanto no Modo de Interrogação Angular – AIM e como no Modo de Interrogação Espectral – WIM. Dessa forma, sugere-se o uso de uma fibra óptica polimérica por apresentar uma fácil remoção da casca composta por um polímero fluorinado. O material do núcleo da fibra é de PMMA (*Polimetilmetacrilato*). Esse polímero deve ser removido para possibilitar o contato da luz proveniente do núcleo com os elétrons do metal que o recobre. 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. No Quadro 6, estão dispostas as características desta fibra.

Quadro 6. Especificações da fibra óptica polimérica.

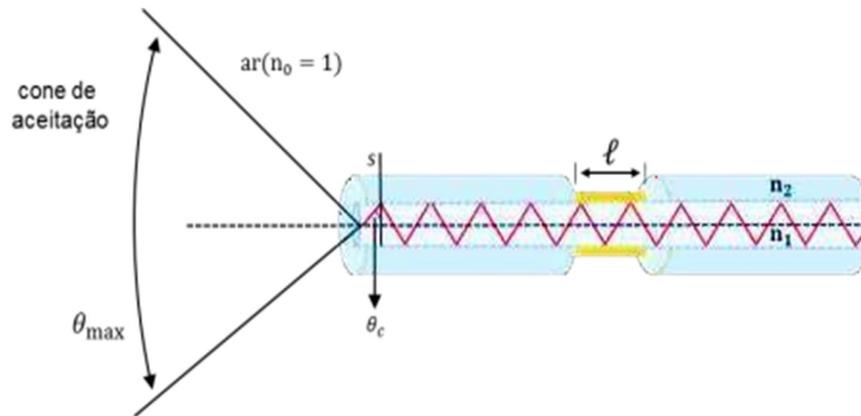
Fibra óptica polimérica	Diâmetro (mm)
Casca	0,04
Núcleo	1,96
Abertura numérica (AN) = 0,5	

Fonte: Adaptado de [58].

Na fabricação do sensor óptico em estudo, o polímero da casca deve ser removido para possibilitar o contato da luz proveniente do núcleo com os elétrons do metal que o recobre. Deve ser retirado cerca de 1 cm de casca na região central da fibra, para a deposição do metal. Dessa forma, é necessário o uso de algumas ferramentas: desencapador; alicate; caneta de corte em 90 graus da extremidade da fibra e um kit para polimento. Esses procedimentos têm por finalidade preparar a fibra para a deposição do material metálico proporcionando a interação dos fótons incidentes com os plásmons de superfície (SILVA, 2017).

Vale ressaltar que as dimensões e o comprimento de onda de operação precisam ser adequados, ou seja, o ângulo de ressonância θ deve estar situado na faixa angular guiada pela fibra, caso contrário, não será possível o acoplamento de energia entre a luz guiada pela fibra e os plásmons de superfície. Também é necessário levar em conta na fabricação do sensor óptico, os parâmetros de abertura numérica da fibra e o índice de refração do núcleo. Na Figura 12, é ilustrado um sensor SPR em fibra óptica polimérica. Observa-se o comprimento da região de detecção, l na região central da fibra e a casca removida, no sentido longitudinal, deixando o núcleo exposto e, sobre esta superfície, faz-se a deposição de uma camada fina de metal. Este tipo de configuração é utilizada por permitir um fácil acoplamento entre a fonte luminosa e o detector óptico.

Figura 12. Ilustração do sensor SPR em fibra óptica polimérica.



Fonte: (SILVA, 2017).

Essa fibra óptica possui um perfil de índices de refração, que tem como características o índice de refração fixo do núcleo (n_1) maior que o índice de refração da casca (n_2) que é confinada no núcleo da fibra pela reflexão interna total. O cone de aceitação na face da fibra óptica, visto na Figura 12, é dependente da abertura numérica (AN) da fibra, definindo o ângulo máximo de aceitação do feixe luminoso que determina a propagação da energia luminosa ao longo do núcleo. No entanto, se a superfície do filme metálico estiver danificada ou exibir alguma rugosidade, o campo próximo da onda de superfície é convertido em ondas de propagação de campo distante e causa difusão. A posição angular do SPR é extremamente dependente da qualidade e da limpeza da superfície do sensor. Esta propriedade torna o SPR altamente adequado em aplicações para sensores e biossensores ópticos. Através da configuração de um sensor SPR, é possível calcular a intensidade refletida em função do ângulo interno que reproduz a extinção dos plásmons. Isso pode ser obtido através da relação aplicada no modelo de três camadas visto na Figura 2.

3.6 TESTES COM O SOFTWARE SPLICCO

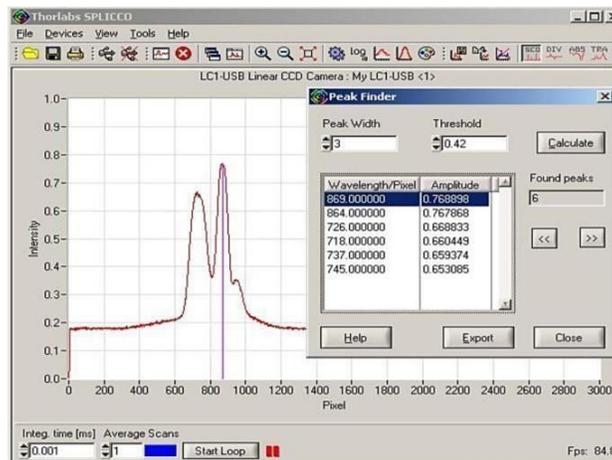
Para fazer a análise dos testes do aparato experimental, é preciso o uso do programa comercial SPLICCO. O programa SPLICCO é capaz de adquirir medições de transmitância e absorvância, a partir das imagens captadas pela câmera CCD, desta forma, os dados são gravados, é gerado o gráfico da curva experimental com os pontos obtidos. Assim, é permitida a visualização simultânea (ou posterior com a utilização dos dados gravados) dos resultados

do experimento. Dessa forma, pôde-se atestar a qualidade das medidas realizadas, e o quanto as mesmas estão próximas dos modelos teóricos que embasam este trabalho. Essas imagens consistem em capturas do sinal refletido pelo biochip SPR, que são repassadas ao sistema de aquisição para processamento e visualização. Este sistema atua filtrando, regenerando e amplificando o sinal, além de calcular a concentração da substância a ser identificada (THORLABS, Inc.).

O programa apresenta uma interface gráfica interativa e de fácil manuseio totalmente dedicado ao *setup* experimental, de acordo com as características dos equipamentos utilizados no aparato e as configurações do experimento, tais como: calcular média; localizador de pico; suavização; transformação Gaussiana; e entre outras funções. Logo após, são destacadas as análises dos dados oferecidas pelo programa SPLICCO.

Média: funciona como uma varredura de sinais muito ruidosos ou fracos formando um conjunto de dados calculados e obtendo uma média final dos sinais transmitidos. Na Figura 13, é mostrado o controle de varredura da média.

Figura 13. Controle de varredura de média.

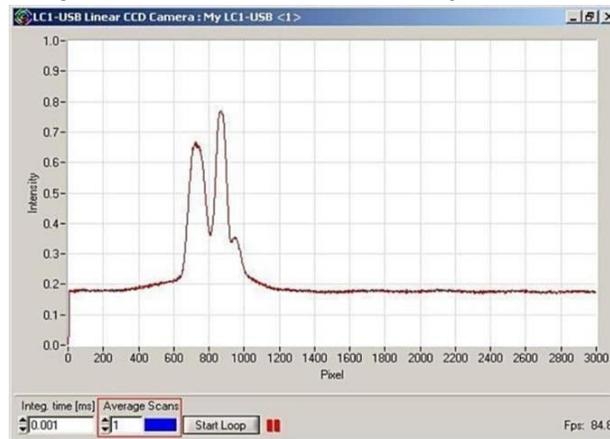


Fonte: (THORLABS, Inc.).

Localizador de pico: oferece a possibilidade de encontrar picos em uma medição real. A função de localização de pico permite procurar os máximos locais, que são apresentados em um gráfico semelhante a uma função delta com a intensidade relativa dos máximos. Desta forma, é uma maneira muito conveniente de comparar vários picos em tempo real.

Suavização: a suavização é um método de filtragem chamado suavização de área móvel, também conhecido como suavização de caixa. Esse tipo de suavização é comparável a um filtro passa-baixa, suprimindo o ruído de frequências altas. Dessa forma, a suavização serve para minimizar os ruídos dos sinais transmitidos. Na Figura 14, é apresentado o procedimento de suavização de caixa.

Figura 14. Procedimento de suavização de caixa.



Fonte: (THORLABS, Inc.).

Transformação Gaussiana: o software é capaz de exibir os dados de medição como a distribuição gaussiana de melhor ajuste. É um método que gera um histograma simétrico com a variabilidade igual à distribuição normal. Ou seja, acontece quando o processo é padronizado e os dados são estáveis, permitindo variações pequenas. O pico dos dados fica ao centro do gráfico, e suas variações vão decrescendo de maneira simétrica dos dois lados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na aplicação do fenômeno SPR, muitos experimentos podem ser propostos, dependendo do aspecto que precisa ser pesquisado: análise dos parâmetros de desempenho do sensor, análise das propriedades ópticas dos materiais, medições de reflectância; transmitância e/ou absorvância; obtenção do ângulo ou comprimento de onda de ressonância da curva SPR, validação ou calibração do sensor, dentre outros. Através da proposta do aparato experimental no Modo de Interrogação Angular - AIM, visto na Figura 8, é possível propor experimentos a serem executados com o auxílio do aparato experimental, além disso, é fácil de ajustar e manusear, de forma que experimentos utilizando outros modos de interrogação, por exemplo, o Modo de Interrogação Espectral - WIM, sejam realizados substituindo-se o laser por uma lâmpada dicróica e a câmera CCD por um espectrômetro (KANT; TABASSUM; GUPTA, 2016). A seguir, são descritos alguns experimentos que podem ser realizados com o auxílio do aparato experimental proposto, utilizando os modos de investigação AIM e WIM.

4.1 MODO DE INTERROGAÇÃO ANGULAR

O modo de interrogação angular (AIM) é uma forma de investigar o desempenho de um sensor SPR, para isso, é utilizado um feixe luminoso monocromático (fonte diodo laser, normalmente). O comprimento de onda é variado e o ângulo de incidência é mantido constante. A excitação da onda dos plásmos de superfície é limitada a centenas de nanômetros, conforme o comprimento de onda. O ponto de operação do sensor neste modo de interrogação é o ângulo de ressonância. Para detectar a ocorrência do fenômeno SPR no modo AIM, utiliza-se, geralmente, uma câmera CCD para capturar o sinal refletido.

4.1.1 Laser HL6750MG

A fonte de luz utilizada deve ser monocromática e *p*-polarizada. Um laser de AlGaInP com 50 mW de potência (ver Figura 8), operando no comprimento

de onda de 685 nm pode ser utilizado, de acordo com os componentes e equipamentos usados na montagem do aparato experimental (ver Figura 11). 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.

4.1.2 Câmera de Linha LC1-USB 2.0

O detector óptico empregado no modo de interrogação angular é a câmera de linha LC1-USB 2.0 (*Charge Coupled Device* – CCD). O detector apresenta alta sensibilidade, sendo possível a detecção e a obtenção de curvas de:

- Transmitância;
- Reflectância;
- Absorbância;
- Energia; potência e fótons.

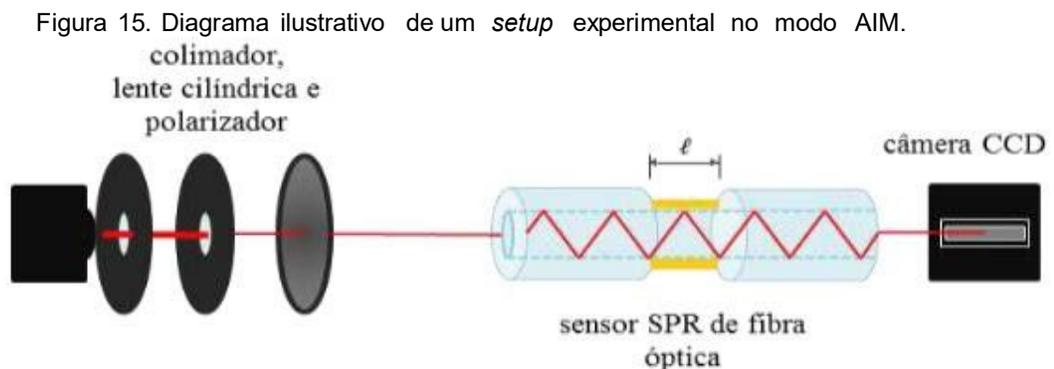
O dispositivo apresenta o tempo de integração que representa a sensibilidade da câmera CCD à luz recebida. Os pixels CCD agem como baldes de luz, reunindo fótons. A exibição do tempo de integração é representada em milissegundos. Para fontes muito brilhantes, tempos de integração baixos são necessários, enquanto que para fontes fracas, tempos de integração mais longos devem ser usados. Os tempos de integração mais altos resultam em picos mais altos nos dados de medição.

O detector possui um conector USB (ver Figura 10), que tem como finalidade proteger a entrada da câmera conectada a uma fibra de entrada que permite o banco óptico para leitura. Posteriormente, os dados ópticos passam pelo filtro e é feita a focalização da luz através de um espelho de colimação para entrar na grade de difração da câmera CCD, difratando a luz e direcionando para o espelho para focar os espectros de primeira ordem. Após estes procedimentos, os dados ópticos são transferidos para o detector fazendo a conversão do sinal óptico para o sinal digital. Cada pixel do detector corresponde ao comprimento de onda que a luz atinge, e assim, a câmera CCD transmite o sinal digital para o software.

4.1.3 Procedimento Experimental

O *setup* proposto para investigação experimental no modo AIM é mostrada na Figura 11. O espectro é caracterizado pela distribuição da fonte luminosa (laser HL6750MG, Figura 8). O laser utilizado no transmissor óptico possui um comprimento de onda fixo.

Conforme dito anteriormente, 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 absorbância, 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. Um diagrama ilustrativo de um *setup* experimental funcionando no modo AIM, é mostrado na Figura 15.



Fonte: (SILVA, 2017).

4.2 MODO DE INTERROGAÇÃO ESPECTRAL

O modo de interrogação espectral (WIM) é uma outra forma de investigar o desempenho de um sensor SPR, sendo utilizado um feixe luminoso policromático (lâmpada dicróica ou um diodo de luz branca, normalmente). Neste modo, o comprimento de onda é variado e o ângulo de incidência é mantido constante. A excitação da onda dos plásmons de superfície é limitada acentenas de nanômetros, conforme o comprimento de onda. Para detectar a ocorrência do fenômeno SPR no modo WIM, utiliza-se, geralmente, um espectrômetro para capturar o sinal refletido (SCHASFOORT; TUDOS, 2008).

4.2.1 Lâmpada Dicróica

A fonte dicróica têm um filamento de tungstênio como uma lâmpada incandescente comum, o bulbo é preenchido com gás halógeno, geralmente bromo ou iodo que permite à lâmpada brilhar mais intensamente. A fonte de luz halógena proporciona uma luz branca nítida com uma reprodução de cor excelente, o que torna essa lâmpada ideal para muitas aplicações. Sua potência varia de 42 W a 127 W. Dependendo do projeto específico da lâmpada, os benefícios das dicróicas incluem a economia de energia, vida mais longa, luz mais branca, melhor controle do feixe e fontes mais compactas. Essas características, associadas ao modelo do *biochip*, possibilitam o aparecimento da onda de plásmons (ou efeito SPR) na superfície do metal.

4.2.2 Espectrômetro Compacto LR1

O detector óptico empregado no modo de interrogação espectral é o espectrômetro compacto (*compact spectrometer* - LR1). O detector apresenta alta sensibilidade com as seguintes características (ASEQ INSTRUMENTS):

- Alcance do detector: 200 - 1100 nm;
- Pixels: 3648;
- Tamanho do pixel: 8 μm x 200 μm ;

- Profundidade do poço de pixels: 100.000 elétrons;
- Relação sinal-ruído: 300:1;
- Resolução A/D: 14 bits;
- Conector de fibra óptica: SMA 905 a 0,22 de abertura numérica, conectado a um cordão de fibra óptica de dimensões compatíveis de fibra óptica.

O dispositivo apresenta um conector de média móvel simples (*Simple Moving Average - SMA*), que tem por finalidade proteger a entrada do espectrômetro conectado. O espectrômetro LR1 possui memória estática de acesso aleatório (*Static Random Access Memory - SRAM*). A memória é capaz de armazenar 64 espectros coletados. A coleta de dados consiste em três estágios: exposição, leitura e transferência para a memória SRAM integrada. A leitura e transferência de dados leva 10 ms.

O espectrômetro apresenta três modos de disparo disponíveis: a) Os dados são adquiridos após obter o comando do computador sem disparo externo. Os eventos de coleta de dados são especificados. Os eventos de coleta de dados são separados por quantidade igual especificada de varreduras em branco. A varredura em branco é idêntica à varredura de coleta de dados real, exceto que os dados não são armazenados na memória integrada do dispositivo; b) Os dados são adquiridos após o disparo externo (opcional em LR1). Especificações do disparo externo: pulso de transistor-transistor lógica (*Transistor-Transistor Logic - TTL*), amplitude: 5 V, duração mínima: 1 us. Este modo de disparo pode ser usado para detectar a resposta temporal do sistema em algum evento sincronizado com o disparo externo ; c) Cada espectro é coletado após o disparo externo (opcional em LR1). Na Figura 16, é mostrado o espectrômetro compacto LR1 em estudo.

Figura 16. Espectrômetro compacto LR1



Fonte: (ASEQ INSTRUMENTS).

Antes que o sinal óptico seja lido, o mesmo passa por um filtro restringindo a radiação óptica em regiões de comprimentos pré-determinados. Logo após a passagem dos dados ópticos capturados pelo filtro, é feita a focalização da luz, que é direcionada para o espelho de colimação do espectrômetro. No plano do detector, é ligada uma coleção de lentes para melhorar a eficiência do detector, e assim diminuir os efeitos da luz dispersa.

Após estes procedimentos, os dados ópticos são transferidos para o detector fazendo a conversão do sinal óptico para digital pelo software. A conexão LR1 é reconhecida pelo sistema operacional Windows como dispositivo de interface humana (*Human Interface Device* – HID) incluído na configuração padrão. É por isso que não há necessidade de instalar nenhum driver especial para usar o espectrômetro LR1 (ASEQ INSTRUMENTS). O sistema operacional reconhece o dispositivo após o espectrômetro ser conectado à porta USB.

Por meio do uso do espectrômetro, pode-se obter as seguintes curvas e diversos parâmetros, tais como:

- Transmitância;
- Reflectância;
- Absorbância;
- Fotometria;
- Visualização rápida de fluorescência;
- Energia; potência e fótons;
- Irradiação relativa;

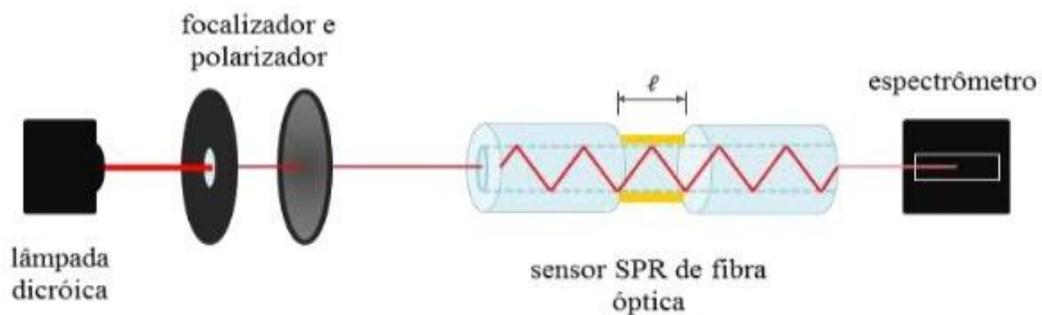
- Cor, e entre outros.

4.2.3 Procedimento Experimental

A montagem do *setup* no modo de interrogação espectral utiliza uma fonte luminosa (Figura 16) facilmente encontrada em comércios populares de eletrônicos. Com os devidos ajustes no aparato experimental, o espectro é caracterizado pela distribuição da fonte luminosa substituindo-se o laser (HL6750MG) por uma lâmpada dicróica. A lâmpada possui uma faixa de operação nos comprimentos de onda entre 500 nm e 1000 nm. A distância total para a medição do experimento é de aproximadamente 30 cm considerando a saída do feixe luminoso até a entrada do espectrômetro. O detector utilizado é o espectrômetro compacto LR1 (ver Figura 16).

Na investigação no modo WIM, são empregados os mesmos componentes ópticos e as mesmas posições de cada elemento na mesa óptica (ver Figura 11), apenas será substituído o laser por uma lâmpada dicróica e a câmera CCD por um espectrômetro, conforme dito anteriormente. Sabendo-se que a luz branca da lâmpada possui um feixe altamente divergente, é necessário focalizar a saída do feixe na entrada da fibra óptica. Para isso, é inserida uma íris no ambiente de testes para limitar o feixe de luz, e em seguida, é preciso um focalizador e polarizador (para que apenas feixes *p*-polarizados incidam na região sensora). Com isso, garante-se que o ponto focal do feixe na entrada de uma das extremidades da fibra seja acoplado na extremidade do detector óptico. Um diagrama ilustrativo deste experimento é mostrado na Figura 17.

Figura 17. Representação ilustrativa do *setup* experimental no modo WIM.



Fonte: (SILVA, 2017).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs a construção do aparato experimental para a elaboração de experimentos usando um sensor em fibra óptica polimérica como substrato para o acoplamento dos fótons-plásmons. O principal objetivo do aparato é a investigação do efeito SPR no modo de interrogação angular utilizando fontes luminosas monocromáticas e fibras ópticas como elementos sensores baseados na configuração de Kretschmann.

O experimento proposto em estudo consiste em uma forma eficiente de introduzir aos discentes os conceitos fundamentais da teoria SPR e seu emprego em sensores e biossensores ópticos, buscando proporcionar uma solução eficaz e acessível aos experimentos que possam ser realizados pelos docentes e discentes dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica, com o intuito de auxiliar na aprendizagem dos conceitos teóricos estudados, de forma a proporcionar ao discente o contato prático/experimental do conhecimento científico.

O aparato experimental desenvolvido torna-se uma ferramenta de grande valia, que possibilita ao docente trabalhar um método diferenciado onde ele poderá relacionar a parte teórica com a parte prática, possibilitando trabalhar os conteúdos de disciplinas como Comunicações Ópticas e Sensores e Biossensores Ópticos de um modo que despertará no discente um maior interesse. Vale salientar outras vantagens do aparato experimental proposto: o fato de ser instrumentado e de possuir hardware e software para coleta de dados em tempo real. Além disso, o aparato apresenta uma alternativa ainda mais didática de exposição do conteúdo programático. Com esse aparato experimental é possível a realização de diversos trabalhos, exercícios, simulações e aplicações. O *setup* é fácil de ajustar, de forma que experimentos utilizando outros modos de interrogação (por exemplo, o Modo de Interrogação Espectral) podem ser realizados, substituindo-se o laser por uma lâmpada halógena e a câmera CCD por um espectrômetro.

Apesar de algumas melhorias ainda precisarem ser realizadas, este trabalho buscou apresentar uma alternativa à prática pedagógica dos docentes do curso de Engenharia Elétrica, através do uso de recursos didáticos aplicados

em sala de aula, para contribuir com o processo de ensino-aprendizagem dos discentes. Espera-se que a adesão do aparato experimental 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.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A seguir são enumeradas algumas possibilidades para realização de trabalhos futuros relacionados:

- (I) Aprimorar o *setup* experimental para se obter melhores resultados na realização de experimentos em SPR;
- (II) Fabricação do sensor óptico polimérico em estudo;
- (III) Realização de testes nos modos AIM e WIM.

5.2 TRABALHO PUBLICADO DURANTE O MESTRADO

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, o seguinte trabalho foi submetido e aceito pelo congresso de nível nacional, sendo este:

- Artigo publicado no *51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE)*, que aconteceu entre os dias 18 a 20 de setembro na cidade do Rio de Janeiro. Trabalho submetido na modalidade de pôster, com o título “*Desenvolvimento de kit didático para experimentos com sensores ópticos baseados na Ressonância de Plásmons de Superfície*”.

REFERÊNCIAS

AEBLI, Hans. **Prática de Ensino**: formas fundamentais de ensino elementar, médio e superior. Petrópolis: Vozes, 1973.

ASSIS, Wayne Santos de. **Utilização de recursos multimídia no ensino de concreto armado e protendido**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ASEQ INSTRUMENTS. Acesso em:
<https://www.docplayer.net/62964650-Lr1-compact-spectrometer.html>.

BASTOS, Talita Paes de. **Redes de bragg em fibra óptica: análise de encapsulamentos em resposta à vibração e temperatura**. Monografia –Curso de Bacharel em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa, 2016.

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. Acesso em: <http://copec.eu/intertech2014/proc/works/25.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2023.

BILRO, Lúcia; ALBERTO, Nélia Jordão; SÁ, Luís Miguel; PINTO, João de Lemos; ROGÉRIO, Nogueira. Análise analítica de fibras ópticas de plástico com polimento lateral como sensor de curvatura e índice de refração. **Journal of Lightwave Technology**. p. 864-870, 2011.

BISWAS, Shaurjo; SHALEV, Olga & SHTEIN, Max. Técnicas de crescimento e padronização de filmes finos para compostos orgânicos moleculares pequenos usados em aplicações de dispositivos eletrônicos. Artigo. **Revisão Anual de Engenharia Química e Biomolecular**, 2013.

BIDAN, Gérard. **Polímeros Conjugados Eletrocondutores: Novas Matrizes Sensíveis para a Construção de Sensores Químicos ou Eletroquímicos**. Tese de mestrado. Sensores e Atuadores B: Químico, 1992.

BUENO, Regina de Souza Marques; KOVALICZN, Rosilda Aparecida. O ensino de ciências e as dificuldades das atividades experimentais. Artigo - **Programa de Desenvolvimento Educacional**, 2008.

BUNCH, Scott; VERBRIDGE, Scott; ALDEN, Jonathan S; ZANDE, Arend Mvan der; PARPIA, Jeevak M; CRAIGHEAD, Harold G Craighead; MCEUEN, Paul P. Membranas atômicas impermeáveis de folhas de grafeno. **Nano Letters**, vol.8 , p.2458-2462, 2008.

CARNEIRO, Laríttisa; VIEIRA, Daniel; GONZAGA, Fátima; LIMA, Ana Paula. **Uma reflexão acerca da contribuição das aulas práticas no processo de ensino aprendizagem em fenômenos dos transportes.** In: XLVII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e II Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE, Fortaleza-CE, 2019.

CAMARA, Alexandre de Resende. **Biossensor e dispositivo eletro- óptico em fibras ópticas especiais.** Tese. Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2015.

CENNAMO, Nunzio; et al. An easy way to realize SPR aptasensor: A multimode plastic optical fiber platform for cancer biomarkers detection. **Talanta**, v. 140, p. 88-95, 2015.

CENNAMO, Nunzio, et al. Um sistema de sensor óptico completo baseado em uma plataforma SPR e uma célula de fluxo termo-estabilizada para aplicações bioquímicas. **Sensors**, 2016.

CHOPRA, KL; PAULSON, PD; DUTTA, V. Células solares de película fina: uma visão geral. **Progress in Photovoltaics**, vol.12, p.69-92, 2004.

FEBBO, Maurino de. **Método de interrogação de fibra óptica para detecção de intrusão.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciências, Escola de Engenharia São Carlos, 2016.

FERNANDES, Cindy Stella. **Desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica para monitoramento estrutural.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016. Acesso em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/7802>.

FURTADO, Aline Furtado. O desafio do ensino de engenharia frente aos problemas econômicos, energéticos e a sustentabilidade. **Revista Triângulo**, Uberaba-MG, v. 6, n. 1, 2015. Acesso em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaeletronica/index.php/revistatriangulo/article/view/376>. Acesso em: 4 maio 2023.

GAMA, Sinval Zaidam. **Novo perfil do engenheiro eletricitista no início do século XXI.** Rio de Janeiro, 2002. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HERNÁNDEZ-MONZÓN, David, et al. Optical Fiber Surface Plasmon

Resonance Sensor With Multiple Resonance Peaks. **Appl Opt**, v. 43, n. 6, p. 1216-1220, 2004.

HENRIQUES, Thiago dos Santos. **Análise da Influência da Fibra Óptica Polimérica inserida em Blocos de Argamassa**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

HOMOLA, Jiri. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. **Chemical reviews**, v. 108, p. 462-93, 2008.

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

HOMOLA, Jiri et al. Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors Methods and Applications. Artigo. Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors Methods and Applications. **Series Ed.: Wolfbeis, OS**, p. 1612-7617, 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.

INAUDI, D., GLISIC, B. (2005). Development of distributed strain and temperature sensing cables. **In: International Conference On Optical Fiber Sensors**, 17. Brugges. Proceedings. SPIE: International Society for optical engineering.

INCE, R.; NARAYANASWAMY, R. Analysis of the performance of interferometry, surface plasmon resonance and luminescence as biosensors and chemosensors. **Analytica chimica acta**, v. 569, n. 1, p. 1-20, 2006.

JORGENSEN, R. C.; YEE, S. S. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 12, n. 3, p. 213-220, 1993.

KANSO, M.; CUENOT, Stéphane; LOUARN, G. Sensitivity of optical fiber sensor based on surface plasmon resonance: modeling and experiments. **Plasmonics**, v. 3, n. 2-3, p. 49-57, 2008.

KÁSSIO, M. G. Lima; et al. **Sensores ópticos com detecção no infravermelho próximo e médio**. Artigo, 2009.

KANT, Ravi; TABASSUM, Rana; GUPTA, Banshi Dhar. Fiber optic SPR- based uric acid biosensor using uricase entrapped polyacrylamide gel. **IEEE Photonics Technology Letters: A Publication of the IEEE Laser and Electro-Optics**

Society, v. 28, p. 2050-2053, 2016.

KIECKOW, Flávio; FREITAS, Denizard Batista; LIESENFELD, Janaina. 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.

KRASILCHIK, Myriam. **Professor e o currículo das ciências**. São Paulo: EPU/USP, 1987.

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

LOURENÇO, Maria José Vitoriano. **Novo Instrumento para a medição rigorosa da condutibilidade térmica de materiais fundidos a alta temperatura**. Tese de Doutorado. Instituto de Ciência Aplicada e Tecnologia da Universidade de Lisboa, Portugal, 1998.

LISBERG, Ph. Aplicações ópticas de filmes finos dielétricos. **Rep Prog Física**. Artigo. Vol.33, 1970. Erca da Contribuição Das Aulas Práticas No Processo de Ensino-aprendizagem Em Fenômeno Dos Transportes. In: XLVII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e II Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABANGE, Fortaleza – CE, 2019.

MALHOTRA, Bansi Dhar; TURNER, Anthony (Ed.). **Advances in biosensors: perspectives in biosensors**. Elsevier, 2003.

MELO, Telmo Gabriel de Jesus Torres de. ARAÚJO, Jalberth Fernandes de. Kit didático para auxiliar o ensino e aprendizagem sobre o transistor de efeito de campo. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 04, Ed. 10, Vol. 08, p. 16, outubro de 2019.

MORAES, Roque. O significado da experimentação numa abordagem construtivista: O caso do ensino de ciências. In: BORGES, R. M. R.; MORAES, R. (Org.) **Educação em Ciências ns séries iniciais**. Porto Alegre: Sagra Luzzato, p. 29-45, 1998.

MORENO, M. C.; JIMÉNEZ, M.; CONDE, C. P.; CÁMARA, C. Optical Sensing of pH in Low Ionic Strength Waters. *Anal.Chim.* Artigo p. 230. **1990**.

NAZARETH, João Júlio Dornas de Oliveira, et al. Artigo. Biossensor: Uma Evolução Biotecnológica no Diagnóstico Precoce do Câncer. **Brazilian Journal of Surgery and Clinical Research – BJSCR**.

NORRIS, J. O. W. 1989. Current Status and Prospects for the Use of Optical Fibres in Chemical Analysis. **A Review. Analyst (London)**, **114 (11):1359-72**.

OLIVEIRA, Sérgio Campello. Sensor Óptico em Fibra Multimodo Baseado em Ressonância de Plásmons de Superfície. **2004**.

OLIVEIRA, Ana Elisa; PEREIRA, Arnaldo César. **Biossensores e a industria alimentar**. Artigo. 2016.

OLIVEIRA, Catarina Peres. **Desenvolvimento de uma camada de reconhecimento biológico de ligação universal para utilização em imunoensaios**. Orientador: Maria Norberta Correia de Pinho. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Técnico Lisboa, Portugal, 2013.

OTTO, Andreas. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. **Zeitschrift für Physik**, vol. 216, n.4, p. 398-410, 1968.

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.

POLISHUK, Paul. Ramificação de Fibras Ópticas Plásticas. **Plastic Optical Fiber Trade Organization (POFTO)**. Artigo, 2006.

RAMOS, Luciana da Silva; ANTUNES, Fabiano; SILVA, Lenice Heloísa de Arruda. **Concepções de professores de Ciências sobre o ensino de Ciências**. Revista da SBEnBio, n. 03, p.8, outubro de 2010.

RAJAN, Jha; CHAND, Subhash; GUPTA, Banshi Dhar. Fabrication and characterization of a surface plasmon resonance based fiber-optic sensor for bittering component-Naringin. **Sensors and actuators. B, Chemical**, v. 115, n. 1, p. 344-348, 2006.

RAETHER, Heinz. **Surface Plasmons**. Springer-Verlag, Berlin, 1988.

RAETHER, Heinz. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings. **Berlin, Germany; Springer Tracts in Modern Physics**, p. 111, 1988.

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.

RITCHIE, RH. Plasma losses by fast electrons in thin films. **The physical review**, v. 106, n. 5, p. 874-881, 1957.

RONQUI, Ludimilla; SOUZA, Marco Rodrigo de; FREITAS, Fernando Jorge Coreia de. **A importância das atividades práticas na área de biologia**. Revista científica da Faculdade de Ciências Biomédicas de **Cacoal – FACIMED**. 2009. Cacoal – RO.

SILVA, Leandro Palis; CECÍLIO, Sálua. A mudança no modelo de ensino e de formação na engenharia. **Educação em revista**, n. 45, p. 61-80, 2007.

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.

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. Acesso em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/88294> Acesso em: 06 abr 2023.

SILVA, Michela Carvalho de. **Educação inclusiva**. Porto Alegre. SAGAH, 2017.

SILVA, Maria Laís Félix. **Estudo e desenvolvimento de sensor em fibra óptica polimérica baseada na ressonância de plásmons de superfície**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, 2017.

SOMMERFELD, A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. Artigo. **Annalen der physik**, vol. 333, p. 665-736, 1909.

SCHASFOORT, Richard B.M; LOKATE, Angelique M.C; BEUSINK, J. Bianca; PRUIJN, Ger J.M; ENGBERS, Gerard H.M. **Measurement of the analysis cycle: scanning SPR microarray imaging of autoimmune diseases**. Cambridge: RCS Publishing, 2008.

SCHASFOORT, Richard B.M. and TUDOS, Anna J., Eds. (2008) Handbook of Surface Plasmon Resonance. **RSC Publishing, ISBN: 978-0-85404-267-8**. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.1039/9781847558220>.

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.

SMITH, D. **Thin Film Deposition: Principles and Practice**. McGraw-Hill, Inc., Nova York, 1995.

SZUNERITS, Sabine; MAALLOULI, Nazek; WIJAYA, Edy; VILCOT, Jean- Pierre; BOUKHERROUB, Rabah. Avanços recentes no desenvolvimento de interfaces de ressonância de plasmon de superfície (SPR) baseadas em grafeno. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, vol. 405, p.1435-1443, 2013.

TURBADAR, T. Complete absorption of light by thin metal films. **Proceedings of the Physical Society**, v. 73, n. 1, p. 40, 1959.

THIRSTRUP, C. et al. Diffractive optical coupling element for surface plasmon resonance sensors. v. 100, p. 298-308, 2004.

THORLABS, Inc. [US]. Acesso em: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LDC205C>.

THORLABS, Inc. [US]. Acesso em:

<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=TED200C>.

THORLABS, Inc. [US]. Acesso em:
<https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroupid=5260&pn=HL6750MG>.

THORLABS, Inc. [US]. Acesso em:
<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=C230TMD-B>.

THORLABS, Inc. [US]. Acesso em:
<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LC1-USB&pn=LC1-USB#10685>.

THORLABS, Inc. [US]. Acesso em:
https://www.thorlabs.com/software_pages/ViewSoftwarePage.cfm?Code=SPLICCO.

UDD, Eric. Uma visão geral dos sensores de fibra óptica. **A revisão de instrumentos científicos**. Artigo. vol. 66, p. 4015-4030, 1995.

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.

VICTORETTE, A.; OLIVEIRA, E.; MENDONÇA, F. K.; NOLL, V.; RODRIGUES, S. G. **Pesquisa e desenvolvimento de um kit didático para o ensino de amplificadores operacionais**. Anais do xxxiv congresso brasileiro de ensino de engenharia, 2006.

VONLINSINGEN, Luana. **Ciências Biológicas e os PCNs**. Artigo - Centro Universitário Leonardo da Vinci – Indaial, Grupo UNIASSELVI, 2010.

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

YU, Chenxu; IRUDAYARAJ, Joseph. **Multiplex Biosensor Using Gold Nanorods**. Artigo. Anal. Chem. vol.79, p.572-579, 2007.

ZENNECK, J. (1907). Über die Fortpflanzung ebener elektromagnetischer Wellen langs einer ebenen Leiterfläche und ihre Beziehung zur drahtlosen Telegraphie. **Annalen Der Physik**, vol.328, p.846-866.

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

ZUBIA, Joseba & ARRUE, Jon. Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications. **Optical Fiber Technology**, 2001.

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA FLUÍDICO

A montagem do aparato foi realizada sobre dois suportes de madeira que serviu de suporte para a construção do aparato experimental e podem ser encontradas em lojas de materiais de construção. Entretanto, todos os materiais utilizados para a construção do sistema de bombeamento foram fixados nos suportes utilizando parafusos e abraçadeiras para que não houvesse perigo de soltar. No Quadro 7, é mostrado a descrição de cada item utilizado na construção do sistema fluídico.

Quadro 7. Descrição dos materiais utilizados no experimento.

Descrição do item	Imagem
<p>Botão interruptor: o botão interruptor utilizado serve como uma função de ligar/desligar no momento do funcionamento do sistema de bombeamento, tornando a ação mais rápida e fácil. Desta forma, a principal função do interruptor foi de bloquear a passagem da energia elétrica de um ponto ao outro, pelo qual se interrompe de forma reversível a passagem de um sinal em um circuito elétrico.</p>	
<p>Seringa de 60 ml: a seringa de 60 ml tem como função injetar e extrair líquidos de até 60 ml de volume. Portanto, foram utilizadas seringas de plástico por serem descartáveis e apresentar menor custo e mais seguras quanto aos riscos de contaminação. O intuito das 3 (três) seringas é de usar até 3 substâncias diferentes, por exemplo, água, álcool e acetona, para realização de um experimento.</p>	

<p>Bomba peristáltica: a bomba peristáltica serve de suporte para a transferência das substâncias, 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 da bomba peristáltica são comprimidos e descomprimidos por roletes gerando um movimento peristáltico, permitindo um deslocamento unidirecional do líquido.</p>	
<p>Torneira de 3 vias: a torneira de 3 vias tem como função conectar e 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 na conexão do acesso intravenoso para o monitoramento invasivo da pressão. Para tanto, o formato da torneira em “T” aponta setas indicativas, uma das vias é conectada ao cateto intravenoso da seringa e as outras duas vias do dispositivo são utilizadas na liberação do fluido.</p>	
<p>Mangueira pneumática de 4 mm: 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. Para tanto, as mangueiras pneumáticas são ligações que possibilitam 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.</p>	

APÊNDICE B - ROTEIRO UTILIZADO NA APLICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS NO APARATO EXPERIMENTAL

ROTEIRO EXPERIMENTAL

1º Experimento: Modo de Interrogação Angular

OBJETIVOS

- Realizar medições com sensor SPR com filme metálico de ouro;
- Verificar as seguintes métricas de desempenho do sensor: sensibilidade; figura de mérito e sinal-ruído.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- ✓ Laser HL6750MG;
- ✓ Câmera CCD;
- ✓ Componentes ópticos e equipamentos;
- ✓ Sensor SPR de fibra óptica.

PROCEDIMENTOS

- Fixe o sistema de bombeamento na mesa óptica;
- Fixe bem os controladores de corrente e temperatura para fontes luminosas;
- Fixe o laser HL6750MG a uma distância de 12 cm da lente colimadora C230TMD-B para que fique em uma posição perpendicular ao mesmo;
- Coloque a lente colimadora C230TMD-B a uma distância de 3 cm do laser;
- Conecte o tubo pneumático 4 vias a uma distância de 5 cm da lente colimadora;
- Conecte a câmera CCD a uma distância de 4 cm do tubo pneumático 4 vias;

- Após conecte a câmera CCD a um computador para ter acesso ao software;
- Ligue o laser e faça passar o feixe luminoso pela fenda simples, utilize o anteparo para verificar se o padrão de difração formada está nítido e simétrico;
- Execute o programa SPLICCO para visualização dos dados e gráficos obtidos no experimento.

A.2 Experimento 2: Modo de Interrogação Espectral

OBJETIVOS

- Executar simulações com sensor SPR com filme metálico de ouro;
- Realizar uma análise comparativa dos sensores simulados nos modos AIM e WIM com as seguintes métricas de desempenho do sensor: sensibilidade; figura de mérito e sinal-ruído.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- ✓ Lâmpada dicróica;
- ✓ Espectrômetro;
- ✓ Componentes ópticos e equipamentos;
- ✓ Sensor SPR de fibra óptica.

PROCEDIMENTOS

- Fixe o sistema de bombeamento na mesa óptica;
- Fixe bem os controladores de corrente e temperatura para fontes luminosas;
- Fixe a lâmpada dicróica a uma distância de 12 cm do laser, tomando cuidado para que ela fique em uma posição perpendicular ao mesmo;
- Conecte o espectrômetro compacto LR1 a uma distância de 4 cm do tubo pneumático 4 vias;

- Após conecte o software para espectrômetro compacto LR1;
- Ligue o laser e faça passar o feixe luminoso pela fenda simples, utilize o anteparo para verificar se o padrão de difração formada está nítido e simétrico;
- Execute o programa para visualização dos dados e gráficos obtidos no experimento.