

## Montagem de um sistema optoeletrônico para medida da rotação do plano de polarização da luz

*Assembly of an optoelectronic system to measure the rotation of the plane of polarization of light*

Leduc Hermeto de Almeida Fauth\*

*Instituto de Pesquisas da Marinha  
Rua Ipirú, 2 - Ilha do Governador,  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil, CEP: 21931-090 e  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Rua Dr. Xavier Sigaud,  
150 - Urca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP:22290-180*

Pablo Diniz Batista†

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Rua Dr. Xavier Sigaud,  
150 - Urca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP:22290-180  
Submetido: 01/10/2017      Aceito: 08/05/2018‡*

**Resumo:** Este trabalho apresenta detalhes de um sistema optoeletrônico para medida de rotação do plano de polarização da luz. Foi desenvolvido um circuito eletrônico para medir a intensidade luminosa usando um fotodetector em conjunto com outros componentes ópticos. Um porta amostra foi projetado utilizando uma lente de quartzo acoplada em uma tampa e conectada a um tubo de PVC. O diferencial dessa proposta é que o caminho óptico pode ser facilmente modificado permitindo que diferentes comprimentos sejam estudados. Este arranjo possibilita determinar a concentração de substâncias opticamente ativas em solução aquosa. O desempenho do sistema de medidas é investigado considerando a sensibilidade e o limite de detecção. Este trabalho é desenvolvido tendo como base o paradigma *open source hardware* e, portanto, toda a documentação estará disponível para que possa ser utilizada e aprimorada pela comunidade científica.

**Palavras chave:** Atividade Óptica, Polarímetro, *Open Source Hardware*

**Abstract:** This work presents details of an optoelectronic system to measure the rotation of the plane of polarization of light. An electronic circuit was developed to measure light intensity using a photodetector and other optical components. A sample holder was designed using a quartz lens attached to a cap and attached to a PVC pipe. The differential of this proposal is that the optical path can be easily modified allowing different lengths to be studied. This arrangement makes it possible to determine the concentration of optically active substances in aqueous solution. The performance of the measurement system is investigated considering the sensitivity and the limit of detection. Finally, this work is developed based on the open source hardware paradigm and, therefore, all the documentation will be available so that it can be used and improved by the scientific community.

**Keywords:** Optical Activity, Polarimeter, Open Source Hardware.

---

\*Electronic address: [leduc@marinha.mil.br](mailto:leduc@marinha.mil.br)

†Electronic address: [batista@cbpf.br](mailto:batista@cbpf.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Em linhas gerais, um polarímetro é um instrumento utilizado para determinar a rotação do plano de polarização da luz ao passar por uma amostra e, mesmo sendo bastante antigo ainda é o equipamento mais simples utilizado para se determinar a pureza óptica de um líquido, gás ou solução de um composto opticamente ativo [1]. A Figura 1 mostra o princípio básico de funcionamento de um polarímetro, no qual o plano de polarização é rotacionado por uma amostra de substância opticamente ativa.

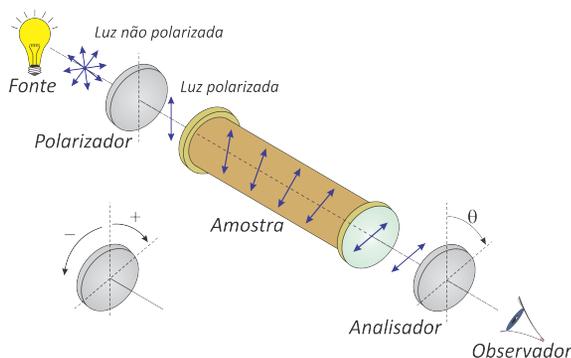


Figura 1: Rotação do plano de polarização da luz por uma substância opticamente ativa

Para isso, são necessários dois polarizadores, uma fonte luminosa preferencialmente monocromática, além da amostra que deve ser posicionada entre os polarizadores. O primeiro polarizador converte a luz de entrada em luz linearmente polarizada, enquanto o segundo, chamado de analisador, determina o ângulo de rotação do plano de polarização do feixe de luz depois de passar pela amostra [2].

O fenômeno pode ser observado visualmente através de um anteparo posicionado após o analisador. Para isso, os polarizadores são ajustados com uma defasagem de  $90^\circ$  eliminando a luminosidade no anteparo. Após a inserção da amostra ocorre a rotação do plano de polarização da luz e um ponto luminoso aparece no anteparo. Girando o analisador até que a luminosidade volte a ser mínima saberemos o ângulo de desvio do plano de polarização causado pela amostra. Este ângulo é uma grandeza diretamente proporcional à concentração da amostra.

Esta técnica pode ser empregada no controle de qualidade de substâncias opticamente ativas, como fármacos, sacarose, glicose, etc. Por exemplo, o açúcar refinado é composto de cerca de 99% de sacarose, sendo assim, as usinas de açúcar utilizam o polarímetro para medir a quantidade de sacarose presente em uma amostra durante o processo de fabricação [3].

Na área biomédica utiliza-se a polarimetria para estudos

sobre a composição do esmalte do dente, cáries e estimativa de idade, inclusive com aplicação forense [4–6]. Na área da medicina, estudos recentes indicam o uso da polarimetria no auxílio ao diagnóstico de doenças como a Dengue [7]. Na área da astrofísica, polarímetros são acoplados a instrumentos de observação gerando mais uma ampla área de pesquisa e desenvolvimento [8, 9].

## 2. ESTADO DA ARTE

No começo do século XIX, a área da óptica daria um salto enorme no entendimento da Polarização. Thomas Young, E. L. Malus e Sir David Brewster demonstraram o comportamento ondulatório e as condições para obter luz polarizada. Nesta altura, já se admitia a hipótese da luz como sendo uma onda transversal cujo plano de vibração de suas componentes poderiam girar em torno do eixo de propagação. Foi então que Jean Baptiste Biot realizou experimentos para demonstrar a rotação deste plano, chamado de plano de Polarização da Luz, conceito aproveitado por Augustin Jean Fresnel para estudar a atividade óptica de substâncias [10–12].

Mais tarde, pesquisas importantes realizadas por Arago, Biot e Pasteur, sobre o poder de rotação óptico do plano de polarização por substâncias opticamente ativas, mostraram aplicações fundamentais em Química e Biologia [12]. Este e outros estudos despertaram o interesse no desenvolvimento de técnicas de medidas de polarização e conseqüentemente o desenvolvimento de instrumentos de medida, criando assim o ramo da Polarimetria [11, 13].

A partir do final do século XIX o cenário era favorável ao desenvolvimento da instrumentação dos polarímetros. Malus se tornou pioneiro quando montou um aparato no qual a luz solar era refletida por uma placa de vidro no ângulo de polarização para incidir sobre uma segunda placa de vidro "polarizante" que podia ser girada para variar o ângulo entre o primeiro e o segundo plano de incidência, inventando, então, o primeiro Polariscópio ou Polarímetro da história. Um dispositivo semelhante, baseado na invenção original de Malus, foi construído em 1863 por Nörrenberg [12].

A partir de 1930 os sistemas eletroeletrônicos entraram em cena para melhorar o sistema de medida, como mostram os trabalhos de Brode e Jones [14]. Dentre as vantagens do método fotoelétrico sobre o método visual, podemos destacar o ganho na precisão e a possibilidade de investigar substâncias com baixos índices de transmissão de luz (alta absorção), inviáveis aos métodos visuais [15].

Os primeiros Polarímetros fotoelétricos ou fotopolarímetros só foram possíveis devido à relação direta entre a intensidade luminosa da fonte - geralmente uma lâmpada de Sódio - e a corrente gerada na fotocélula (detector). O desenvolvimento de filtros polarizadores (Polaroid) contribuiu significativamente para a melhoria do sistema, apresentando, inclusive, vantagens sobre o prisma de Nicol [16]. Além disso, a determinação da rotação do plano de polarização causada por uma solução opticamente ativa requer geralmente a medida do ângulo de polarização com um erro não superior a  $0,1^\circ$ . Com bons dispositivos visuais "Half Shadow", é possível trabalhar dentro deste limite, mas os instrumentos são necessariamente complicados e caros, sofrendo também

‡URL: <http://batistapd.com>; URL: <http://cbpf.br>

de susceptibilidade a erros de fadiga ocular [16]. O ganho de precisão e simplicidade de trabalho é, portanto, muito considerável [16, 17]. Outra característica relevante é a possibilidade de utilizar fontes luminosas fora do espectro visível, desde que o detector seja compatível.

Na década de 70, instrumentos mais sofisticados, dotados de fotomultiplicadoras e detecção síncrona a 400 Hz, foram desenvolvidos com propósito de servirem de padrão na calibração de Sacarímetros em laboratórios comerciais, atingindo precisão angular de  $5 \times 10^{-4}$  graus [18].

Dentro deste contexto histórico percebemos que os polarímetros podem ser classificados em três gerações: a primeira referente aos polarímetros visuais; a segunda referente aos fotopolarímetros utilizando luz contínua; e a terceira englobando os fotopolarímetros em conjunto com um sistema de detecção mais sensível, como por exemplo o sistema de detecção síncrona a partir de um amplificador Lock-in. Esta evolução se deve em razão do aprimoramento dos sistemas de medida em busca de melhor resolução, uma vez que polarímetros de primeira e segunda geração possuem o inconveniente de exigir uma quantidade relativamente grande de amostra (da ordem de mg), o que pode se tornar um inconveniente [1]. Pouca quantidade de amostra implica em menor rotação angular devido a um menor caminho óptico percorrido pela luz e, portanto, exigem sistemas de detecção mais sensíveis.

### 3. METODOLOGIA

O sistema experimental para medidas está dividido em duas partes como mostra a Figura 2. A parte eletrônica é composta por um condicionador de sinais e um sistema de aquisição de dados. O Multímetro comercial Agilent 34450A também é utilizado em conjunto para comparar os resultados. Ambos os dispositivos estão conectados ao computador através de uma porta USB. Um programa de computador desenvolvido em linguagem C controla a aquisição de dados dos dispositivos e salva em arquivo texto.

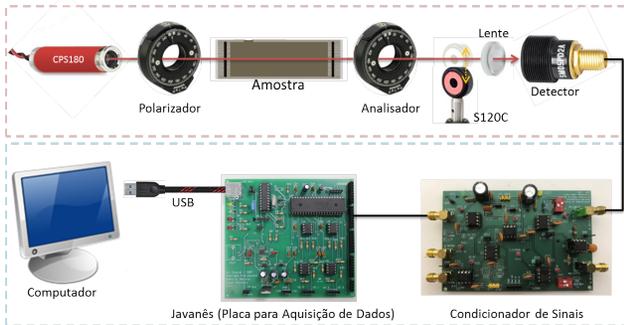


Figura 2: Aparato experimental para medição da rotação do plano de polarização da luz.

O sistema de aquisição de dados é controlado pela placa apresentada no diagrama em blocos da Figura 3. Nesta, temos um microcontrolador principal, PIC18F45K20 responsável pela comunicação com todos os periféricos, inclusive com o segundo microcontrolador, PIC18F14K50, que

comunica com um computador através de um circuito conversor do padrão USB para RS-232.

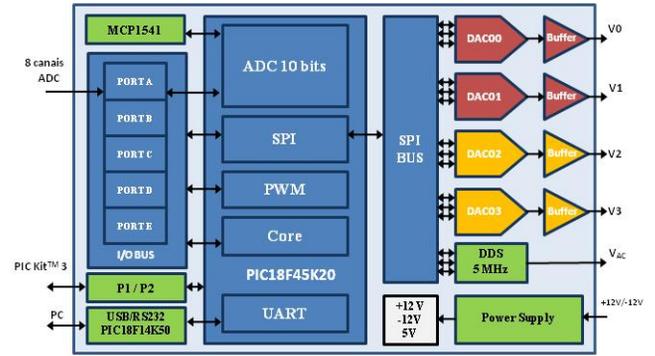


Figura 3: Diagrama em blocos da placa de controle e aquisição de dados tendo o microcontrolador PIC18F45K20 como o responsável por acessar todos os periféricos. O PIC18F14K50 disponibiliza a comunicação com o PC por meio da porta USB.

A Figura 4 apresenta a nossa proposta para o condicionador de sinais formado por um conversor de corrente para tensão, um amplificador de instrumentação científica e um circuito isolador de saída [19]. O circuito disponibiliza dois canais que podem ser utilizados de forma independente ou a partir da diferença entre eles através de um terceiro conector de saída. Esta funcionalidade possibilita a medição diferencial entre os sinais de duas amostras, permitindo a comparação relativa entre elas e ainda a amplificação desta diferença.

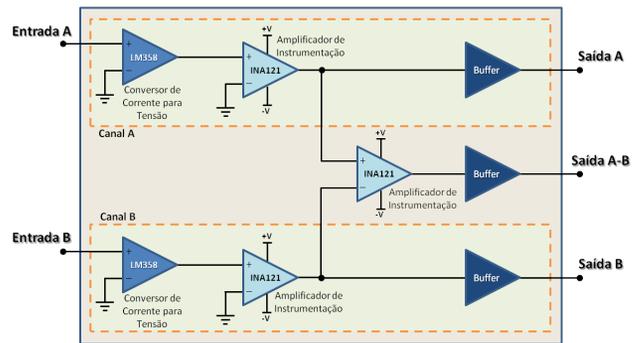


Figura 4: Esquemático do circuito eletrônico do condicionador de sinais, desenvolvido a partir do amplificador de instrumentação INA121

O primeiro estágio utiliza um amplificador operacional LM358 para converter um sinal de corrente em tensão, enquanto no segundo o sinal é amplificado por um amplificador de instrumentação INA121. O ganho do sistema é ajustado através de um único resistor. Finalmente, a última etapa consiste em um circuito isolador de saída, a partir de um amplificador operacional de ganho unitário, com a função de isolar o sinal de saída do próximo equipamento.

A parte óptica é composta por uma fonte de luz monocromática, um fotodetector, dois polarizadores lineares e uma lente convergente. O detector é um fotodiodo de Silício (SM05PD2A) com maior responsividade entre 610

nm e 830 nm. A fonte de luz é um diodo laser (CPS180) com feixe circular de 1 mW de potência óptica e comprimento de onda de 635 nm. Além disso, uma lente biconvexa de distância focal de 20 mm (LB1212) está acoplada ao sistema de medida, permitindo concentrar o feixe de luz no centro do detector.

Finalmente são utilizados dois polarizadores ópticos lineares compostos por: duas lentes (LPVISE100-A) de diâmetro 25,4 mm montadas em suportes de rotação manual (RSP05) de 1/2 polegada e resolução de dois graus. Um medidor de potência óptica (S120C) é montado de tal forma a permitir sua utilização quando necessário para efeitos de comparação.

O principal desafio para construir um polarímetro está fabricação de um porta amostra para líquidos com extremidades transparentes que não afetem a polarização da luz. A solução encontrada é utilizar um tubo de PVC comercial com aproximadamente uma polegada de diâmetro, 10 cm de comprimento e com uma tampa em cada extremidade. Cada tampa é um suporte para janela de quartzo temperado, como apresentado na Figura 5. O quartzo temperado não modifica a polarização da luz.



Figura 5: Esquema do tubo porta amostra para o polarímetro.

O corpo do suporte de lente foi fabricado em Technyl com um O-Ring para garantir a vedação, permitindo serem acoplados e removidos facilmente em tubos de diferentes comprimentos. As lentes de quartzo temperado foram coladas no suporte com silicone. Após a montagem das tampas no tubo, um furo no cano permite o envase da solução com o auxílio de uma seringa e sua retirada pode ser feita removendo o suporte de uma das extremidades.

As amostras líquidas utilizadas são soluções de água com açúcar em diferentes concentrações: 400; 300; 200; 100; 50; 25 e 12,5 mg/mL preparadas conforme o esquema da Figura 6. O método da diluição foi empregado no preparo das amostras com o intuito de diminuir o erro na concentração de cada amostra. Desta forma, prepara-se uma solução de concentração 400 mg/mL misturando 120 g de açúcar com água deionizada até atingir 300 mL de solução. Em seguida, as outras soluções são obtidas por diluição conforme o esquema.

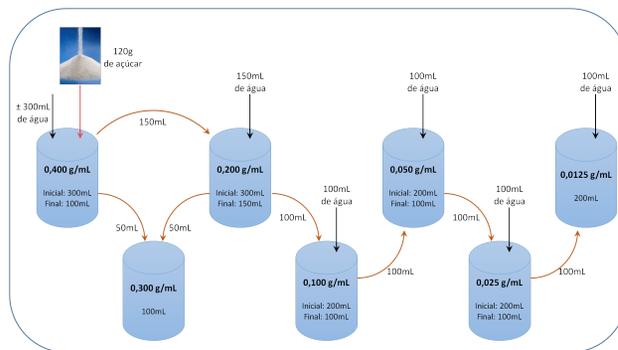


Figura 6: Esquema de preparo das soluções de amostras.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 7 apresenta a resposta do fotodetector em função da potência óptica aplicada em um dois canais do condicionador de sinais. No canto inferior direito apresentamos a estabilidade da medida ao longo do tempo. O procedimento consiste em variar a potência óptica do sistema de 200  $\mu W$  para zero em intervalos de 25  $\mu W$ . Utilizamos o detector auxiliar (S120C) conectado ao PC para monitorar esta grandeza. Após o ajuste da potência óptica, o detector auxiliar é recolhido e obtêm-se a medida utilizando o detector (SM05PD2A), através da placa de aquisição de dados e do multímetro digital.

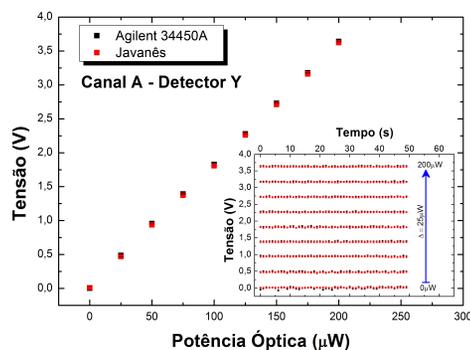


Figura 7: Caracterização óptica do condicionador de sinais.

O desempenho de medida é semelhante para os dois equipamentos e o comportamento do sistema de detecção é linear com a potência óptica aplicada. Os resultados mostram uma sensibilidade de aproximadamente 18,75 mV/ $\mu W$ . O desvio padrão relativo a cada medida é tão insignificante que não pode ser notado no gráfico.

A Figura 8 mostra a resposta do sistema em função do ângulo do analisador (Lei de Malus). O procedimento consiste em variar o ângulo de zero a 360° em intervalos de quatro graus, monitorando a tensão de saída do sistema. Além disso, a curva azul representa um ajuste cossenoidal quadrático que simula a lei de Malus para os parâmetros do experimento. O desvio padrão relativo a cada medida é tão insignificante que não pode ser notado no gráfico.

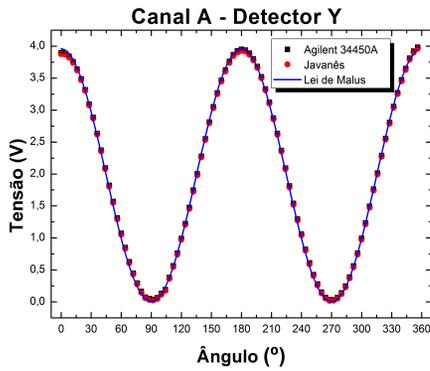


Figura 8: Lei de Malus com ângulos em intervalos de 4°.

A Figura 9 mostra a tensão em função do ângulo na medida em que o ângulo do analisador gira de zero a 360° em intervalos de 30° considerando seis diferentes potências ópticas. A ideia é verificar o desempenho do sistema à medida em que a potência óptica máxima (pico) é reduzida. Os resultados mostram a queda do desempenho do sistema conforme a potência óptica de entrada é reduzida. Isto fica evidente pelo aumento do desvio padrão em potências ópticas menores.

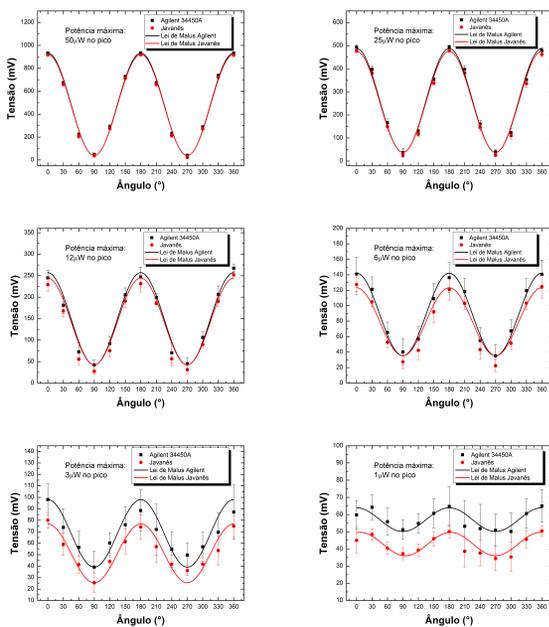
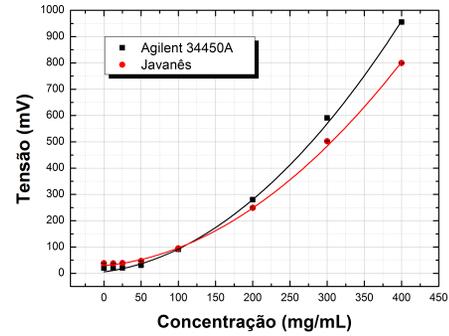


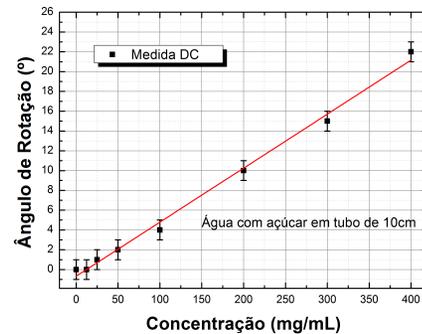
Figura 9: Lei de Malus para diferentes potências óticas: 1, 3, 6, 12, 25 e 50  $\mu W$

Finalmente, para a montagem do polarímetro os polarizadores são cruzados (defasados de 90°). A Figura 10(a) mostra o comportamento da potência óptica para sete soluções de água com açúcar e uma amostra apenas com água. Não é observado uma relação linear entre tensão e concentração da solução, mas sim uma relação cossenoidal por causa da lei de Malus.

Por outro lado, a Figura 10(b) mostra uma relação linear do ângulo de rotação do plano de polarização em função



(a)



(b)

Figura 10: Em (a) temos a tensão no fotodetector em função da concentração da amostra. Em (b) temos o ângulo de rotação óptica em função da concentração da amostra.

da concentração da solução. A partir da relação linear obtêm-se uma sensibilidade de aproximadamente 0,0525° para cada 1 mg/mL. Porém, como a resolução angular do analisador é de apenas 2°, a resolução experimental é de aproximadamente 38 mg/mL.

### 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema optoeletrônico para medidas da rotação do plano de polarização da luz, composto por componentes ópticos e eletrônicos.

O porta amostra foi desenvolvido com material de baixo custo, com exceção da janela de quartzo. No entanto, o custo da aquisição deste componente não superou o preço de um tubo comercial para polarímetro. Além disso, o porta amostra deste trabalho apresenta funcionalidades que a versão comercial não seria capaz de realizar, como a possibilidade de ajuste do caminho óptico.

O condicionador de sinais é composto por um circuito de conversão de corrente para tensão em conjunto com um amplificador de instrumentação, permitindo controlar o ganho do sistema de medida. O polarímetro desenvolvido neste trabalho é o primeiro passo para construir um sistema de medida óptica preciso o suficiente para quantificar outros tipos

de substâncias [20–24].

Esse desenvolvimento é compartilhado a partir do paradigma de *open source hardware*, portanto, toda a documentação estará disponível em (<http://batistapd.com>), porque tornar a instrumentação científica disponível pode facilitar que a mesma possa ser modificada por outros grupos de pesquisas e, dessa forma, espera-se que com o tempo esse projeto de pesquisa possa ser aprimorado [25–38].

## Agradecimento

Os autores desse trabalho agradecem à FAPERJ (E-26/110.997/2009) e ao CNPq (486742/2013-0) pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

- 
- [1] Lima, V. L. E. (1997). **Os fármacos e a quiralidade: uma breve abordagem**. Química Nova, 20(6), 657-663.
- [2] Tompkins, H. G., & Irene, E. A. (2005). **Handbook of ellipsometry**. Norwich, NY: William Andrew Pub.
- [3] Carlin, N., Szanto, E., Seale, W., Jorge, F., Souza, F., Bechtold, I., & Gasques, L. (2005). **Birrefringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 27(3). doi:10.1590/s0102-47442005000300008.
- [4] Sousa, F. B., Vianna, S. S., & Santos-Magalhaes, N. S. (2006). **A new approach for improving the birefringence analysis of dental enamel mineral content using polarizing microscopy**. Journal of Microscopy, 221(2), 79-83. doi:10.1111/j.1365-2818.2006.01547.x.
- [5] Medeiros, R. D., Soares, J., & Sousa, F. D. (2012). **Natural enamel caries in polarized light microscopy: differences in histopathological features derived from a qualitative versus a quantitative approach to interpret enamel birefringence**. Journal of Microscopy, 246(2), 177-189. doi:10.1111/j.1365-2818.2012.03609.x.
- [6] Kasetty, S., Rammanohar, M., & Ragavendra, T. R. (2010). **Dental Cementum in Age Estimation: A Polarized Light and Stereomicroscopic Study**. Journal of Forensic Sciences, 55(3), 779-783. doi:10.1111/j.1556-4029.2010.01363.x.
- [7] Anwar, S., & Firdous, S. (2016). **Optical Diagnosis Of Dengue Virus Infected Human Blood Using Mueller Matrix Polarimetry**. (Óptica e Espectroscopia), 121(2), 348-352. doi:10.1134/S0030400X16080208.
- [8] Hall, J. S. (1948). **A photoelectric polarimeter**. The Astrophysical Journal, 54, 39. doi:10.1086/106153.
- [9] Luna, H. G. (1985). **Polarimetric observations of IOTA and Theta 2 Orionis**. Astrophysical Letters, 24, 211-216.
- [10] Brosseau, C. (2010). **Polarization and Coherence Optics: Historical Perspective, Status, and Future Directions**. Progress in Optics, 149-208. doi:10.1016/s0079-6638(10)05408-9.
- [11] Lyle, R. E., & Lyle, G. G. (1964). **A brief history of polarimetry**. Journal of Chemical Education, 41(6), 308. doi:10.1021/ed041p308.
- [12] Azzam, R. (2011). **The intertwined history of polarimetry and ellipsometry**. Thin Solid Films, 519(9), 2584-2588. doi:10.1016/j.tsf.2010.12.072.
- [13] Da Piedade, M. E. (1993). **Polarimetria**. Boletim da Sociedade Portuguesa de Química, 48, 36-38.
- [14] Brode, W. R., & Jones, C. H. (1941). **A Recording Spectrophotometer and Spectropolarimeter\***. Journal of the Optical Society of America, 31(12), 743. doi:10.1364/josa.31.000743.
- [15] Rudolph, H. (1955). **Photoelectric Polarimeter Attachment**. Journal of the Optical Society of America, 45(1), 50. doi:10.1364/josa.45.000050.
- [16] Willey, E. J. (1943). **A Photoelectric Polarimeter**. Journal of Scientific Instruments, 20(5), 74-75. doi:10.1088/0950-7671/20/5/302.
- [17] Gillham, E. J. (1957). **A high-precision photoelectric polarimeter**. Journal of Scientific Instruments, 34(11), 435-439. doi:10.1088/0950-7671/34/11/302.
- [18] Olson, B. (1973). **A Precision Photoelectric Azimuthal Polarimeter**. Optical Engineering, 12(3). doi:10.1117/12.7971640.
- [19] MICROCHIP, AN1494 - Using MCP6491 Op. Amps for Photodetection Applications, (PDF).
- [20] Cote, G., Fox, M., & Northrop, R. (1992). **Noninvasive optical polarimetric glucose sensing using a true phase measurement technique**. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 39(7), 752-756. doi:10.1109/10.142650.
- [21] Feng, C., Huang, Y., Chang, J., Chang, M., & Chou, C. (1997). **A true phase sensitive optical heterodyne polarimeter on glucose concentration measurement**. Optics Communications, 141(5-6), 314-321. doi:10.1016/s0030-4018(97)00209-5.
- [22] Lin, J., Chen, K., & Su, D. (2004). **Improved method**

- for measuring small optical rotation angle of chiral medium. *Optics Communications*, 238(1-3), 113-118. doi:10.1016/j.optcom.2004.04.029.
- [23] Lo, Y., & Yu, T. (2006). **A polarimetric glucose sensor using a liquid-crystal polarization modulator driven by a sinusoidal signal**. *Optics Communications*, 259(1), 40-48. doi:10.1016/j.optcom.2005.08.061.
- [24] Yeh, Y. (2008). **Real time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer**. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(9), 666-670. doi:10.1016/j.optlaseng.2008.04.008.
- [25] PEARCE, J.M. **Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware**, *Science*, Vol: 337, 14 September 2012.
- [26] FISHER, D.K.; GOULD, P.J. **Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research**, *Modern Instrumentation*, 2012, 1, 8-20.
- [27] HARNETT, C. **Open Source Hardware for Instrumentation and Measurement**, *IEEE, Instrumentation & Measurement Magazine*, (2011).
- [28] PURDON, P.L. et al., **An open-source hardware and software system for acquisition and real-time processing of electrophysiology during high field MRI**, *Journal of Neuroscience Methods*, 175, 2008, pp. 165–186.
- [29] CHRISTIAN, W.; ESQUEMBRE, F.; BARBATO, L. **Open Source Physics**, *Science*, Vol: 334, 25 November 2011.
- [30] PEARCE, J.M. **Commentary: Open-source hardware for research and education**, *Physics Today*, 66, (11), 8, 2013, doi: 10.1063/PT.3.2160.
- [31] ANZALONE, G.C.; GLOVER, A.G.; PEARCE, J.M. **Open-Source Colorimeter**, *Sensors*, 2013, 13, 5338-5346. doi:10.3390/s130405338.
- [32] KELLEY, C.D. et al. **An Affordable Open-Source Turbidimeter**, *Sensors*, 2014, 14, 7142-7155; doi:10.3390/s140407142.
- [33] KOENKA, I.J.; SÁIZ, J.; HAUSER, P.C. **Instrumentino: An open-source modular Python framework for controlling Arduino based experimental instruments**, *Computer Physics Communications*, 185, 2014, pp. 2724–2729.
- [34] RORDEN, C.; HANAYIK, T. **StimSync: Open-source hardware for behavioral and MRI experiments**, *Journal of Neuroscience Methods*, 227, 2014, pp. 90–99.
- [35] URBAN, P.L. **Open-Source Electronics As a Technological Aid in Chemical Education**, *J Chem. Educ.* 2014, 91, pp. 751–752.
- [36] WIJNEN, B.; HUNT, E.J.; ANZALONE, G.C. **JM Pearce Open-Source Syringe Pump Library**, *PLOS ONE*, September 2014, v. 9, n. 9.
- [37] VAN DER BIJ, E. et al. **How to create successful Open Hardware projects**, *Topical Workshop on Electronics for Particle Physics*, 2013, 23–27 september 2013, Perugia, Italy.
- [38] BONACCORSI, A.; ROSSI, C. **Why Open Source software can succeed**, *Research Policy*, 32, 2003, pp. 1243–1258.