

CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

Rio de Janeiro

Notas Técnicas

CBPF-NT-006/18

maio 2018

Aparato experimental para medidas de atividade ptica da sacarose
usando um amplificador Lock-in

Leduc Hermeto de Almeida Fauth e Pablo Diniz Batista



Aparato experimental para medidas de atividade óptica da sacarose usando um amplificador Lock-in

Experimental apparatus for measurements of sucrose optical activity using a Lock-in amplifier

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

Resumo: Este trabalho apresenta a montagem de um polarímetro digital para medidas de atividade óptica em modo pulsado. Em termos de instrumentação científica, foi desenvolvido um circuito eletrônico para medir a intensidade luminosa usando um fotodetector em conjunto com outros componentes ópticos e um amplificador Lock-in. Além disso, um porta amostra foi projetado utilizando uma lente de quartzo acoplada em uma tampa e conectada a um tubo de PVC. O desempenho do sistema de medidas é investigado considerando a resolução e o limite de detecção a partir da determinação da rotação óptica específica da sacarose. Este trabalho foi 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, Lock-in, Open Source Hardware.

Abstract:

This work presents the assembly of a digital polarimeter for measurements of optical activity in pulsed mode. In terms of scientific instrumentation, an electronic circuit was developed to measure light intensity using a photodetector in conjunction with other optical components and a Lock-in amplifier. In addition, a sample port was designed using a quartz lens attached to a cap and connected to a PVC pipe. The performance of the measurement system is investigated considering the resolution and the limit of detection from the determination of the specific optical rotation of sucrose. This work was 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, Lock-in, Open Source Hardware.

*leduc@marinha.mil.br

†batista@cbpf.br

1. INTRODUÇÃO

Algumas substâncias possuem a capacidade de rotacionar o plano de polarização da luz. Este fenômeno foi observado em 1811 pelo físico francês Dominique F. Arago e ficou conhecido como Atividade Óptica [1]. Em 1822 o Astrônomo Inglês Sir John F. W. Herschel percebeu que o fenômeno da atividade óptica era devido à distribuição estrutural das moléculas da substância e poderia promover a rotação do plano de polarização da luz para a direita ou para a esquerda.

Esta orientação molecular se tornou um importante objeto de estudo, uma vez que compostos semelhantes podem apresentar características diferentes como cor, cheiro e sabor simplesmente devido à organização molecular [2]. Este fenômeno pode ser modelado usando as equações de propagação da luz circumentemente polarizada à direita e a esquerda ao longo da direção z [1]:

$$\vec{E}_D = \frac{E_0}{2} [\hat{i} \cos(k_D z - \omega t) + \hat{j} \sin(k_D z - \omega t)] \quad (1)$$

$$\vec{E}_L = \frac{E_0}{2} [\hat{i} \cos(k_L z - \omega t) + \hat{j} \sin(k_L z - \omega t)] \quad (2)$$

Admitindo ω constante, $k_D = k_0 n_D$ e $k_L = k_0 n_L$, em que n_D e n_L são os índices de refração para as rotações horárias e anti-horárias, respectivamente. A onda resultante linear é, então, a superposição das ondas circulares, em que o campo elétrico da onda resultante é dado por $\vec{E}_R = \vec{E}_D + \vec{E}_L$. A Figura 1 mostra o comportamento da luz ao atravessar uma substância que não apresenta atividade óptica. Neste caso, o plano de oscilação da luz se manteve ao longo do eixo y , pois os índices de refração n_D e n_L são iguais e, portanto, as ondas circulares permanecem em fase durante todo o processo.

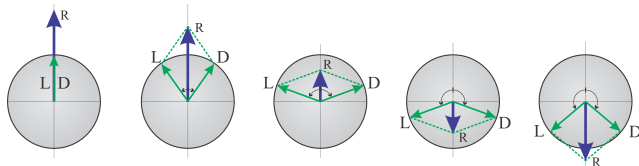


Figura 1: Representação da luz ao atravessar uma substância racêmica. As componentes circulares permanecem em fase e a onda resultante linear oscila em torno do mesmo eixo.

Porém, para substâncias que apresentam atividade óptica, estes índices são diferentes, acarretando em uma mudança de fase nas componentes circulares e consequente a rotação do plano de polarização da luz, como mostra a Figura 2:

Se $n_D > n_L$ (ou $k_D > k_L$), R gira no sentido anti-horário ($-$), enquanto se $n_L > n_D$ (ou $k_L > k_D$), a rotação se dá no sentido horário ($+$). Os sentidos horário e anti-horário são definidos para um observador olhando na direção da fonte luminosa.

Mantendo esta convenção de sinais, pode-se dizer, a partir da equação 1, que o campo no ponto z faz um ângulo

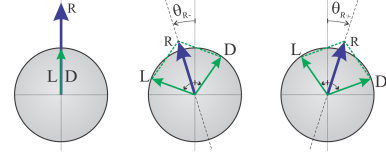


Figura 2: Representação da luz ao atravessar uma substância opticamente ativa. A onda resultante linear sofre rotação do seu plano de polarização para a esquerda ou para a direita dependendo dos índices de refração relativos às componentes circulares.

$\theta_R = -\left(\frac{k_D - k_L}{2}\right)z$ em relação a sua orientação original. Se o meio tiver uma espessura d , a fase relativa entre essas duas componentes sofrerá uma mudança e o ângulo através do qual o plano de vibração gira é dado pela equação de Fresnel [3]:

$$\theta_R = \frac{(n_L - n_D)\pi d}{\lambda} \quad (3)$$

Para $n_D > n_L$ a rotação é Levógira ($-$) e para $n_L > n_D$ a rotação é Dextrógira ($+$). Fresnel idealizou um prisma de quartzo capaz de separar as componentes D e L de um feixe linearmente polarizado e, portanto, à medida que a luz penetra no meio o desvio angular das componentes aumenta. Assim, foi proposto a grandeza denominada por "poder rotatório específico" utilizada para quantificar o ângulo de rotação em função caminho óptico.

Nas soluções, o valor dessa grandeza é tão pequeno que geralmente é especificada considerando caminhos ópticos de cerca de 10 cm. Outro aspecto relevante é a variação do ângulo de rotação com a concentração da solução, permitindo assim, uma análise da concentração de soluções de substâncias opticamente ativas. Como os índices de refração dependem da concentração (C), temperatura (T) e do comprimento de onda (λ) da fonte luminosa, a equação 3 pode ser escrita de uma forma mais conveniente:

$$\theta_R = [\alpha]_\lambda^T C L \quad (4)$$

Esta grandeza, medida em graus, é usualmente tabelada para uma fonte luminosa de vapor de sódio (598 nm), temperatura de 20°C, caminho óptico de um decímetros e concentração em g/mL [4]. A seguir será apresentada a montagem de um sistema para medidas de atividade óptica a partir de um polarímetro. O diferencial é a utilização de um amplificador do tipo Lock-in para medidas em modo pulsado. Em seguida, o desempenho deste instrumento é investigado usando amostras de sacarose diluída em água.

2. METODOLOGIA

O sistema experimental está dividido em duas partes como mostra a Figura 3. A parte óptica é composta por uma fonte de luz monocromática, um fotodetector, dois polarizadores

lineares e um *Chopper* que gira periodicamente ocasionando a interrupção da luz em uma frequência de até 3kHz.

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.

O polarizador é composto por uma lente (LPVISE100-A) de diâmetro 25,4 mm montada em um suporte de rotação manual (RSP05) de 1/2 polegada e resolução de dois graus, enquanto o analisador é composto por uma lente (LPVISE200-A) de diâmetro 50,8 mm em uma montagem de rotação de precisão (PRM2) de 2 polegadas. Esta conta com um micrômetro acoplado ao sistema giratório permitindo excursionar 14° com uma resolução de $0,028^\circ$.

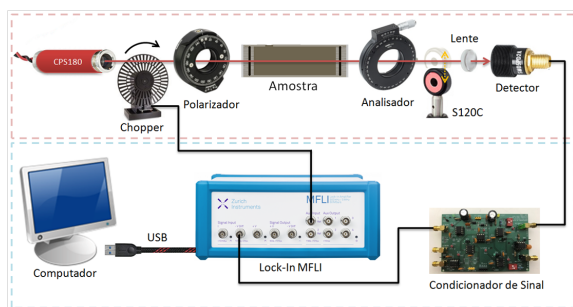


Figura 3: Aparato experimental para medidas de atividade ótica utilizando o Lock-in MFLI

O sistema conta ainda com um porta amostra para líquidos com extremidades transparentes à polarização da luz. Usamos um tubo de PVC com uma polegada de diâmetro, 10 cm de comprimento e com uma tampa em cada extremidade (ver Figura 4). A tampa é um suporte para janela de quartzo temperado uma vez que este material não modifica a polarização da luz.

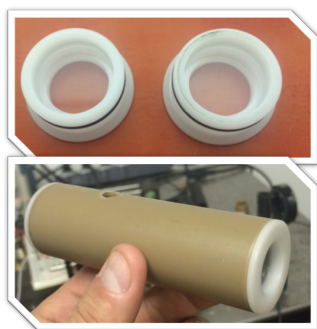


Figura 4: Esquema do tubo porta amostra para o polarímetro.

O corpo do suporte de lente foi fabricado em nylon tipo Technyl com um anel de borracha (O-Ring) para garantir a vedação, permitindo serem acoplados e removidos facilmente em tubos de diferentes comprimentos. As lentes de quartzo temperado foram coladas ao suporte com cola de 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. 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.

A parte eletrônica é composta por dois dispositivos eletrônicos. O primeiro é o condicionador de sinais, enquanto o segundo é um amplificador Lock-in MFLI digital da Zurich Instruments. A Figura 5 apresenta o condicionador de sinais formado por um conversor de corrente para tensão, um amplificador de instrumentação e um circuito isolador de saída [5]. 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.

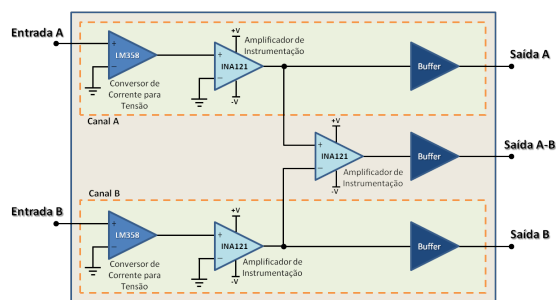


Figura 5: Diagrama em blocos do circuito eletrônico do condicionador de sinais, desenvolvido a partir do amplificador de instrumentação INA121

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.

O amplificador Lock-in é uma excelente ferramenta para medir sinais com pequenas amplitudes em sistemas imersos em ruído [6–21]. Neste caso, um Lock-in de 16 bits de resolução recebe um sinal do *Chopper* como referência e outro sinal do fotodetector através do condicionador de sinais. Está equipado com um servidor web interno e a plataforma *LabOne*®. Esta plataforma possibilita a comunicação através do navegador do PC por meio de uma conexão USB. Através desta plataforma é possível configurar os parâmetros do Lock-in e salvar os dados em formato ASCII ou gráfico.

A operação desses amplificadores tem como base a propriedade de ortogonalidade das funções senoidais. O trabalho de Clarkson et al traz no apêndice o tratamento matemático do Lock-in a partir de funções trigonométricas básicas [22]. A Figura 6 apresenta um diagrama de blocos deste instrumento mostrando sua operação em quatro estágios: ganho, circuito de referência, demodulador e filtro

passa-baixa.

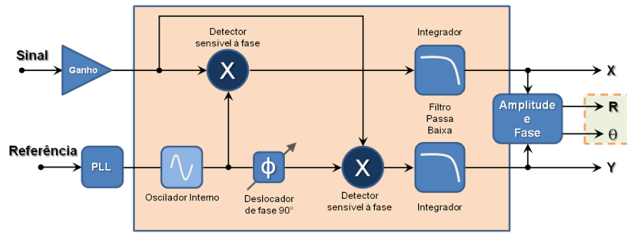


Figura 6: Diagrama em blocos do funcionamento de um amplificador Lock-in.

Quando um sinal senoidal com frequência f_1 é multiplicado por outro sinal senoidal de frequência f_2 (diferente de f_1) e integrado ao longo do tempo, o resultado é zero. Por outro lado, quando f_1 é igual a f_2 e as duas funções estão em fase, o valor médio é proporcional ao produto das amplitudes. Na prática, um amplificador Lock-in recebe um sinal de entrada, multiplica esse valor por um sinal de referência, e integra o resultado por um tempo determinado, usualmente na ordem de milissegundos ou segundos. O resultado é um sinal DC, em que a contribuição de qualquer sinal com frequência diferente do sinal de referência é atenuado para aproximadamente zero.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 7 mostra a resposta do fotodetector para frequência de 500 Hz para diferentes potências óticas. É apresentado a tensão em função do tempo para destacar a estabilidade do sistema de medidas. Como esperado, o sistema apresenta uma resposta linear entre a tensão e a potência ótica.

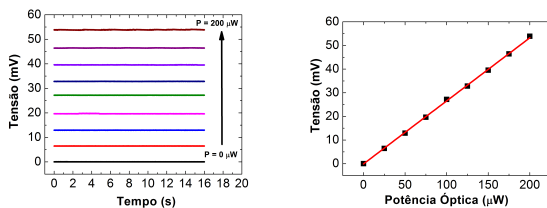


Figura 7: Calibração do fotodetector considerando uma frequência de 500 Hz

A Figura 8 apresenta a tensão em função do ângulo do analisador em rotações de 30 em 30° para seis potências óticas com uma frequência de 500 Hz. Os resultados mostram que o sistema de medidas é estável para medidas de baixas amplitudes. Na medida em que a potência de entrada é reduzida acerca da metade, o sistema apresenta apenas uma leve perda de desempenho, indicada pelo discreto aumento da barra de erro para potências inferiores a 3 μW .

A Figura 9 apresenta o comportamento da potência ótica considerando sete soluções de água com açúcar, além de uma amostra de água pura. Os resultados indicam uma sensibilidade de aproximadamente 0,0575° para cada 1 mg/mL. Porém, devido à resolução do analisador (2°), a sensibilidade experimental é de aproximadamente 35 mg/mL.

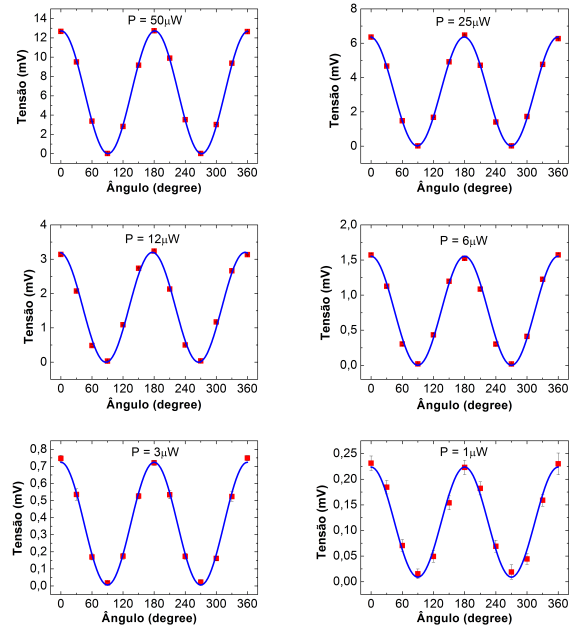


Figura 8: Medida da potência ótica em função do ângulo do analisador para diferentes potências óticas selecionado na entrada do aparato experimental

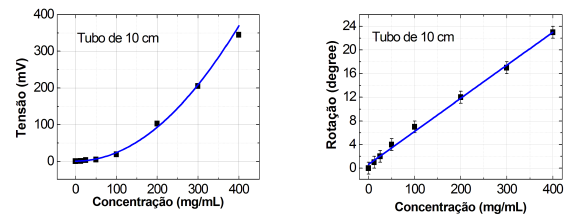


Figura 9: Em (a) temos a tensão em função da concentração da amostra e em (b) o ângulo de rotação ótica em função da concentração amostra.

O limite de detecção deste aparato é testado para um tubo porta amostra com a metade do tamanho (5 cm) com o intuito de diminuir o caminho ótico e avaliar a sensibilidade do sistema para uma situação de maior dificuldade de medida. Os resultados estão expostos na Figura 10. Ao reduzir a metade o caminho ótico reduzimos também o desvio angular causado pela amostra, dificultando consideravelmente a medida, como pode ser verificado no fato do desvio angular máximo cair de 23° para 10°, aproximadamente.

Curiosamente, o resultado obtido na análise da tensão em função da concentração foram ainda melhores se comparados a medida com o tubo de 10 cm, pois mostra claramente a diferença do nível de tensão para amostras de baixa concentração. Isto se deve principalmente a otimização do sistema de medidas através de ajustes de alinhamento dos fotodetectores e ganho 100 para o Lock-in.

A partir da reta da Figura 10 (b) obtém-se uma sensibilidade de aproximadamente 0,025° para cada 1 mg/mL, implicando na resolução experimental de aproximadamente 1,12 mg/mL. Para finalizar, é possível obter a rotação ótica específica do açúcar a partir da equação 4, reescrevendo-a de

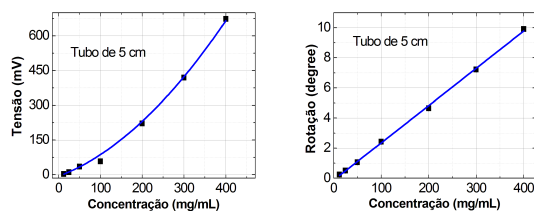


Figura 10: Resultados obtidos utilizando um caminho óptico de 5 cm. Em (a) temos a resposta da tensão para diferentes concentrações. Em (b) temos a rotação óptica referente a cada amostra.

uma maneira mais conceviniente considerando que $[\alpha]_{\lambda}^T L = \alpha$.

$$\theta_R = \alpha \cdot C \quad (5)$$

em que α é a inclinação da reta da Figura 9-(b). Neste caso, é obtido o valor de $56,77^\circ$, que dividido pelo caminho óptico ($L = 1$ dm) nos dá uma rotação óptica específica de: $+56,77^\circ$. Este restultado reflete o valor médio das rotações de cada concentração do gráfico e, obviamente, apresenta um valor diferente da rotação calculada para apenas uma concentração.

A magnitude da rotação causada pela amostra depende do número de moléculas opticamente ativas que a luz encontra na amostra. Vale ressaltar que as condições ambientais do laboratório no momento do experimento eram: temperatura aproximada de 20°C , tubo de 1 dm e comprimento de onda do laser 635 nm.

Cada composto opticamente ativo tem uma rotação específica característica. A rotação óptica específica para a sacarose é de aproximadamente 67° quando utilizada sob fonte luminosa de sódio (598 nm) a temperatura de 20°C [4]. Atribuímos a divergência no resultado ao diferente comprimento de onda da luz utilizado no experimento.

Para efeito de comparação mais efetiva, encontramos o trabalho de Saxon et al, o qual propõe experimento semelhante utilizando laser de He-Ne, cujo comprimento de onda é de 632,8 nm. O trabalho estima o valor para a rotação

óptica da sacarose para uma fonte laser de He-Ne a partir de dados experimentais da literatura. O valor estimado para a sacarose foi de $55,66^\circ$, entretanto o resultado experimental do trabalho apresentou rotação de $56,7^\circ$ [23]. O trabalho de Patterson et al desenvolve um polarímetro de baixo custo utilizando um laser de 654 nm e porta amostra de 1 dm de comprimento, obtendo a rotação óptica específica de aproximadamente 54° para a sacarose [24]. O trabalho não especifica a temperatura na qual foi feita a medida, apenas define como sendo temperatura ambiente. Já o trabalho de Lisboa et al utiliza um laser em torno de 637 nm e porta amostra de 1 dm em temperatura de 20°C , obtendo rotação específica de $56,3^\circ$ para a Sacarose [25].

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema optoeletrônico para medidas da rotação do plano de polarização da luz em modo pulsado, composto por componentes ópticos e eletrônicos. Destaca-se a utilização de um amplificador Lock-in para medidas de sinais com pequenas amplitudes. Para isso, foi desenvolvido um condicionador de sinais 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. Este sistema de medidas foi investigado considerando uma luz pulsada com frequência de 500 Hz. Finalmente, o desenvolvimento desse sistema de medidas será compartilhado a partir do paradigma *open source hardware* [26–28]. Todas as etapas para a produção das placas de circuito eletrônicos serão disponibilizadas. 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.

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] Hecht, E. (2017). **Optics** (5th ed., Global Edition). Harlow: Pearson Education Limited.
 - [2] Saxon, C., Brindley, S., Jervis, N., Jones, G. R., Morgan, E. D., & Ramsden, C. A. (2002). **The World's First Pastarimeter: An Analogous Demonstration of Polarimetry Using Pasta Fusilli**. J. Chem. Educ, 79(10), 1214.
 - [3] Mason, S. F. (2009). **Molecular optical activity and the chiral discriminations**. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 978-0521105637.
 - [4] Willey, E. J. (1943). **A Photoelectric Polarimeter**. Journal of Scientific Instruments, 20(5), 74-75. doi:10.1088/0950-7671/20/5/302.
 - [5] MICROCHIP, AN1494 - Using MCP6491 Op. Amps for Photodetection Applications, \textbf{(PDF)}.
 - [6] ALBUQUERQUE, Marcelo P., RESENDE, Leonardo C., GONZALEZ Jorge L., NUNES, Rafael A. A., BOCHNER, Maurício (2011). **Introdução ao Amplificador Lock-In e Prototipação em Hardware Reconfigurável**. CBPF, Notas Técnicas, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2011. doi: 10.7437/NT2236-7640.2011.01.001.
 - [7] Clarkson, P., Esward, T. J., Harris, P. M., Smith, A. A., & Smith, I. M. (2010). **Software simulation of a lock-in ampli-**

- fier with application to the evaluation of uncertainties in real measuring systems.** Measurement Science and Technology, 21(4), 045106. doi:10.1088/0957-0233/21/4/045106.
- [8] Bengtsson, L. E. (2012). **A microcontroller-based lock-in amplifier for sub-milliohm resistance measurements.** Review of Scientific Instruments, 83(7), 075103. doi:10.1063/1.4731683.
- [9] Li, G., Zhou, M., He, F., & Lin, L. (2011). **A novel algorithm combining oversampling and digital lock-in amplifier of high speed and precision.** Review of Scientific Instruments, 82(9), 095106. doi:10.1063/1.3633943.
- [10] MICROCHIP, AN1115 - **Implementing Digital Lock-In Amplifiers Using the dsPIC DSC.** \textbf{(PDF)} (acesso em março de 2017).
- [11] Dorrington, A., & Kunemeyer, R. (2002). **A simple micro-controller based digital lock-in amplifier for the detection of low level optical signals.** Proceedings First IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications 2002. doi:10.1109/delta.2002.994680.
- [12] Aguirre, J., Medrano, N., Calvo, B., & Celma, S. (2011). **Lock-in amplifier for portable sensing systems.** Electronics Letters, 47(21), 1172. doi:10.1049/el.2011.2472.
- [13] Armen, G. B. (2008). **Phase sensitive detection: the lock-in amplifier.** Department of Physics and Astronomy, The University of Tennessee.
- [14] Wolfson, R. (1991). **The lock in amplifier: A student experiment.** American Journal of Physics, 59(6), 569-572. doi:10.1119/1.16824.
- [15] Scofield, J. H. (1994). **Frequency domain description of a lock in amplifier.** American Journal of Physics, 62(2), 129-133. doi:10.1119/1.17629.
- [16] Oguz, Osman, (2002). **A Lock-In Amplifier for Fluorescent Light Detection.** Master's Thesis, University of Tennessee. .
- [17] Sonnaillon, M. O., & Bonetto, F. J. (2005). **A low-cost, high-performance, digital signal processor-based lock-in amplifier capable of measuring multiple frequency sweeps simultaneously.** Review of Scientific Instruments, 76(2), 024703. doi:10.1063/1.1854196.
- [18] Alonso, R., Villuendas, F., Borja, J., Barrag N, L. A., & Salinas, I. (2003). **Low-cost, digital lock-in module with external reference for coating glass transmission/reflection spectrophotometer.** Measurement Science and Technology, 14(5), 551-557. doi:10.1088/0957-0233/14/5/303.
- [19] Spears, B. K., & Tufillaro, N. B. (2008). **A chaotic lock-in amplifier.** American Journal of Physics, 76(3), 213-217. doi:10.1119/1.2835055.
- [20] Fu, S., Sakurai, A., Liu, L., Edman, F., Pullerits, T., Öwall, V., & Karki, K. J. (2013). **Generalized lock-in amplifier for precision measurement of high frequency signals.** Review of Scientific Instruments, 84(11), 115101. doi:10.1063/1.4827085.
- [21] Li, Gang, et al (2013). **A method to remove odd harmonic interferences in square wave reference digital lock-in amplifier.** Review of Scientific Instruments, 84(2), 025115. doi:10.1063/1.4792596.
- [22] Clarkson, P., Esward, T. J., Harris, P. M., Smith, A. A., & Smith, I. M. (2010). **Software simulation of a lock-in amplifier with application to the evaluation of uncertainties in real measuring systems.** Measurement Science and Technology, 21(4), 045106. doi:10.1088/0957-0233/21/4/045106.
- [23] Darveau, S. A., Mueller, J., Vaverka, A., Barta, C., Fitch, A., Jurzenski, J., & Gindt, Y. (2004). **A modular laser apparatus for polarimetry, nephelometry, and fluorimetry in general chemistry.** J. Chem. Educ, 81(3), 401.
- [24] Patterson, L. H., Kihlstrom, K. E., & Everest, M. A. (2015). **Balanced polarimeter: A cost-effective approach for measuring the polarization of light.** American Journal of Physics, 83(1), 91-94. doi:10.1119/1.4896747.
- [25] Lisboa, P., Sotomayor, J., & Ribeiro, P. (2010). **A New Cost-Effective Diode Laser Polarimeter Apparatus Constructed by Undergraduate Students.** Journal of Chemical Education, 87(12), 1408-1410. doi:10.1021/ed100530f.
- [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] BONACCORSI, A.; ROSSI, C. **Why Open Source software can succeed,** Research Policy, 32, 2003, pp. 1243-1258.

Notas Técnicas é uma publicação de trabalhos técnicos relevantes, das diferentes áreas da física e afins, e áreas interdisciplinares tais como: Química, Computação, Matemática Aplicada, Biblioteconomia, Eletrônica e Mecânica entre outras.

Cópias desta publicação podem ser obtidas diretamente na página web <http://revistas.cbpf.br/index.php/nt> ou por correspondência ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brasil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>

Notas Técnicas is a publication of relevant technical papers, from different areas of physics and related fields, and interdisciplinary areas such as Chemistry, Computer Science, Applied Mathematics, Library Science, Electronics and Mechanical Engineering among others.

Copies of these reports can be downloaded directly from the website <http://notastecnicas.cbpf.br> or requested by regular mail to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brazil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>