

CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Dissertação de Mestrado

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

Leduc Hermeto de Almeida Fauth

Orientador
Dr. Pablo Diniz Batista

Rio de Janeiro, RJ

2017

Leduc Hermeto de Almeida Fauth

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

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Física com Ênfase em Instrumentação Científica.

CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Orientador: Dr. Pablo Diniz Batista

Rio de Janeiro, RJ

2017

Fauth, Leduc Hermeto de Almeida Fauth

Desenvolvimento de um sistema optoeletrônico para medida da rotação do plano de polarização da luz/ Leduc Hermeto de Almeida Fauth. - 2017

75 f. : il.

Dissertação de Mestrado – CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas , Rio de Janeiro, RJ, 2017.

Orientador: Dr. Pablo Diniz Batista

1. Cap. 1 - Introdução. 2. Cap. 2 - Sistema Optoeletrônico. 3. Cap. 3 - Resultados e Discussão. 4. Cap. 4 - Conclusão. I. Desenvolvimento de um sistema optoeletrônico para medida da rotação do plano de polarização da luz.

CDU 02:141:005.7

Dedico este trabalho
à minha família, em especial ao meu querido filho Caio.
Em memória de meu pai, Ledaç Amaro Dias Faulstich (1945-2015).

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Pablo Diniz Batista por aceitar este desafio com tamanho comprometimento e companheirismo. Aos meus eternos professores Edgar Monteiro e Arídio Schiappacassa pelo grande incentivo e apoio. Ao professor Alexandre Mello por sempre estar disposto a ajudar no que for preciso. À Valéria Vasconcelos pela enorme ajuda com os problemas relacionados ao Latex.

Agradeço à minha família por todo apoio nas horas em que precisei. Ao meu filho Caio, que muitas vezes me fez perder o foco neste trabalho, mas que de certa forma isso pode ter sido positivo. À Andrea Martins Paraizo pelo incentivo e, principalmente, por cuidar tão bem do nosso filho e me dar todo o suporte necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos do Instituto de Física da UFF, em especial ao amigo Vitor Lara por sempre ter me socorrido nos momentos de desespero e ao professor Dr. Paulo Acioly por me ajudar com as questões da óptica.

Agradeço à toda tripulação do Instituto de Pesquisas da Marinha, lugar onde sempre encontrei apoio e incentivo, em especial aos colegas de trabalho: Wilson Berilli, Rodrigo Ribeiro, Daniel Ferraz e Arnaldo Rodrigues por suas contribuições diretas neste trabalho.

À FAPERJ (E-26/110.997/2009) e ao CNPq (486742/2013-0) pelo apoio financeiro ao projeto.

*“Querer Tecnologia sem Ciência é o
mesmo que querer leite sem vaca”.
(Guido Beck - 1903-1988)*

RESUMO

Este trabalho apresenta detalhes de um sistema optoeletrônico para medidas de rotação do plano de polarização da luz. Para isso, 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. Este arranjo possibilita determinar a concentração de substâncias opticamente ativas em solução aquosa. O diferencial dessa proposta é que o caminho óptico pode ser facilmente modificado permitindo que diferentes comprimentos sejam investigados. O sistema experimental permite realizar medidas de intensidade luminosa tanto em DC como AC (utilizado um amplificador Lock-in MFLI da Zurich Instruments). O desempenho do sistema de medidas é investigado considerando a resolução e limite de detecção a partir da determinação da rotação óptica específica da sacarose. O sistema é caracterizado com uma resposta linear para a faixa de 0 a 400 mg/mL com uma resolução experimental capaz de discernir soluções de concentrações em intervalos de 1.12 mg/mL em regime AC. 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 Chaves: Medidor Óptico, Instrumentação Científica, Dryfilm, Polarização da Luz, Atividade Óptica, Polarimetria, Polarímetro, Sacarímetro, Lock-in, Open Source Hardware.

ABSTRACT

This work presents details of an optoelectronic system for rotation plane measurements of light polarization. For this, an electronic circuit was developed to measure light intensity using a photodetector in conjunction with other optical components. A sample holder was designed using a quartz lens attached to a cap and connected to a PVC pipe. This arrangement makes it possible to determine the concentration of optically active substances in aqueous solution. The differential of this proposal is that the optical path can be easily modified allowing different lengths to be investigated. The experimental system allows measurements of luminous intensity in both DC and AC (using a Lock-in amplifier MFLI from Zurich Instruments). The performance of the measurement system is investigated considering the resolution and limit of detection from the determination of specific optical rotation of sucrose. The measurement system is characterized with a linear response for the range of 0 to 400 mg/mL with an experimental resolution capable of discerning solutions of concentrations in intervals of 1.12 mg/mL in AC mode. This work is developed based on the paradigm of *open source hardware* and therefore all schemes can be available so that they can be used and improved by the scientific community.

Key-Words: Optical Meter, Scientific Instrumentation, Dryfilm, Light Polarization, Optical Activity, Polarimetry, Polarimeter, Saccharimeter, Lock-in, Open Source Hardware.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	Polarização da luz	3
Figura 1.2	Condição para a lei de Malus	4
Figura 1.3	Polarímetro	6
Figura 1.4	Formação de onda linearmente polarizada a partir de componentes circulares	8
Figura 1.5	Comportamento da luz ao atravessar uma substância racêmica	9
Figura 1.6	Comportamento da luz ao atravessar uma substância opticamente ativa	10
Figura 1.7	Ângulo de rotação causado pela atividade óptica	11
Figura 1.8	Iceland Spar Crystal	13
Figura 1.9	Polarímetro de Nörrenberg	15
Figura 1.10	Diagrama em blocos do amplificador Lock-in	18
Figura 2.1	Esquemático do circuito eletrônico do condicionador de sinais	22
Figura 2.2	Esquema elétrico do circuito condicionador de sinais	23
Figura 2.3	<i>Layout</i> da placa de circuito impresso	24
Figura 2.4	Segundo protótipo do condicionador de sinais	24
Figura 2.5	Protótipo final do condicionador de sinais	25
Figura 2.6	As três versões do circuito condicionado de sinais	26
Figura 2.7	Materiais utilizados para a fabricação da PCB	27
Figura 2.8	Sistema de medida DC	28
Figura 2.9	Sistema de medida AC	29
Figura 2.10	Plataforma web <i>LabOne</i> [®]	30
Figura 2.11	Sistema de medida AC otimizado	31

Figura 2.12	Porta amostra	32
Figura 2.13	Preparo das soluções	33
Figura 2.14	Materiais utilizados na produção das amostras	34
Figura 3.1	Caracterização DC sem Filtro	36
Figura 3.2	Caracterização DC com filtro	37
Figura 3.3	Caracterização AC	38
Figura 3.4	Representação da lei de Malus	39
Figura 3.5	Lei de Malus DC para sinais de pequenas amplitudes	41
Figura 3.6	Lei de Malus AC para sinais de pequenas amplitudes	43
Figura 3.7	Fenomeno da atividade óptica	44
Figura 3.8	Polarímetro DC	46
Figura 3.9	Polarímetro AC	48
Figura 3.10	Polarímetro AC otimizado	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Rotação Óptica Específica	12
----------	-------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LEPS	Laboratório de Eletrônica e processamento de sinais do CBPF
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
DIP	Dual Inline Package
USB	Universal Serial Bus
PCB	Printed Circuit Board
PCI	Placa de Circuito Impresso
PC	Personal Computer (Computador Pessoal)
Dryfilm	Filme fotosensível para produção de placas de circuito impresso
SMD	Surface Mount Device
AC	Alternating Current (Corrente Alternada)
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
ADC	Analog-to-digital converter (Conversor analógico-digital)
PVC	Polyvinyl Chloride (Policloreto de Vinila)
LPMA	Laboratório de Produção de Materiais Avançados do CBPF
IPqM	Instituto de Pesquisas da Marinha

SUMÁRIO

Lista de ilustrações	xiii
Lista de tabelas	xv
Sumário	xvii
1	INTRODUÇÃO 1
1.1	Polarização da Luz 1
1.2	Polarização Linear 2
1.3	Lei de Malus 3
1.4	Polarímetro 5
1.5	Rotação Específica e Atividade Óptica 7
1.6	Estado da Arte do Polarímetro 12
1.7	Amplificador Lock-In 17
1.8	Objetivo 19
2	SISTEMA OPTOELETRÔNICO 21
2.1	Condicionador de Sinais 22
2.2	Abordagem DC 27
2.3	Abordagem AC 28
2.4	Sistema AC Otimizado 30
2.5	Preparo das Amostras e Porta Amostra 31
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO 35
3.1	Calibração do Detector Óptico 35
3.2	Lei de Malus 39

3.3	Aplicação para o Sistema Optoeletrônico - Polarímetro	44
3.4	Sistema AC Otimizado	49
3.5	Rotação Óptica Específica para o Açúcar	51
4	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	56

APÊNDICES	67
-----------	----

APÊNDICE A	–	ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DO CONDICIONADOR DE SINAIS	68
APÊNDICE B	–	SUPORTE DE LENTE PARA O PORTA AMOS- TRA	70
APÊNDICE C	–	MONTAGEM DO PORTA AMOSTRA EM TUBO DE 10 CM	72
APÊNDICE D	–	MONTAGEM DO PORTA AMOSTRA EM TUBO DE 5 CM	74

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo introduzir os conceitos que serão abordados no desenvolvimento de uma técnica de medida da rotação do plano de polarização da luz a partir de um sistema optoeletrônico.

Primeiramente apresentaremos o conceito físico da polarização como uma das propriedades da luz, relevante para o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, discutiremos brevemente a polarização linear como um dos possíveis estados da luz. É relevante destacar que a lei de Malus é apresentada como uma primeira proposta para quantificar a interação da luz polarizada com a matéria. Uma aplicação destes conceitos consiste no desenvolvimento de um polarímetro tendo como objetivo determinar a atividade óptica de diversas substâncias de interesses. Finalmente apresentaremos o desenvolvimento histórico dessa técnica destacando três gerações de polarímetros, para em seguida, apresentar o objetivo e a organização em capítulos deste trabalho.

1.1 Polarização da Luz

A partir dos estudos de Maxwell pode-se entender a luz como uma onda eletromagnética composta por campos elétricos e magnéticos oscilantes, perpendiculares entre si e transversais à direção de propagação da onda. A direção de oscilação da componente elétrica define a direção de polarização da onda [1].

A natureza transversal da luz implica na existência de estados de polarização específicos para o campo eletromagnético. Estes estados podem ser manipulados de tal forma a favorecer uma direção preferencial de oscilação.

A polarização da luz é, portanto, um importante conceito básico de física, se tornando útil na compreensão de vários fenômenos naturais e suas aplicações. Por exemplo, alguns insetos utilizam luz polarizada do ambiente para a orientação [2]. Dentre as mais diversas formas de utilização da polarização estão: redução do brilho luminoso, análise do estresse, melhoramento da imagem do microscópio, caracterização do filme fino, astronomia, sacarinaemia e espectroscopia atômica [3].

Dentre as formas de se obter luz polarizada, podemos citar a polarização por dicroísmo, por reflexão, espalhamento e por birrefringência. Apesar das duas últimas serem formas mais elementares, neste trabalho utilizamos luz linearmente polarizada por dicroísmo, através de filmes polarizadores, por motivo de praticidade.

1.2 Polarização Linear

Alguns materiais, como filmes polarizadores (Polaroid), têm a capacidade de permitir a passagem da luz em apenas uma direção. Isto é possível devido a uma propriedade chamada dicroísmo, na qual se baseia em um alinhamento bem definido das moléculas do material, causando absorção da luz cujo campo elétrico oscila ao longo da direção de alinhamento e, praticamente, não absorvendo a luz com campo elétrico oscilante em direção perpendicular. Desta maneira é possível selecionar a direção de polarização da luz.

Podemos entender a luz não polarizada como uma soma de luzes polarizadas, aleatoriamente, em todas as direções, em que cada luz pode sempre ser decomposta em duas componentes ortogonais. De maneira simplificada, podemos descrever a luz não polarizada como sendo constituída por apenas duas componentes de luz linearmente polarizadas em direções perpendiculares entre si, em que cada uma representa a soma de todas as componentes da luz naquele eixo. Uma dessas direções pode ser convenientemente escolhida como sendo a direção de polarização, ou seja, a direção em que a absorção de luz pelo

polarizador é praticamente nula. Desta forma, conforme a Figura 1.1, ao incidirmos um feixe de luz não polarizada de intensidade I_0 em um filme polarizador, apenas passará um feixe de intensidade $I_0/2$ linearmente polarizado [4]. Isto se deve ao fato do polarizador absorver praticamente toda a componente ortogonal ao seu eixo de transmissão.

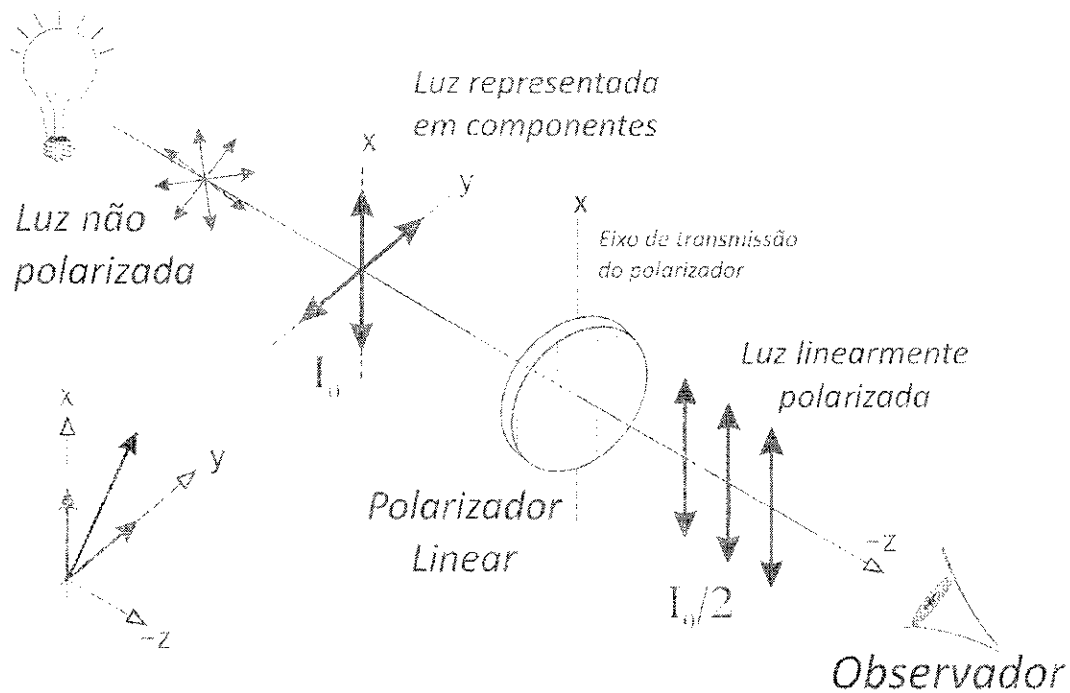


Figura 1.1 -- Luz despolarizada se tornando linearmente polarizada ao passar por um polarizador. A direção de polarização é dada pelo eixo de transmissão do polarizador, representado na figura pelo eixo x .

1.3 Lei de Malus

A lei de Malus leva o nome de seu descobridor, E.L. Malus (1775-1812), e trata da mudança da intensidade da luz, previamente polarizada, ao atravessar um polarizador, muitas vezes chamado de analisador. Apesar de ser bastante fácil de ser verificada experimentalmente, inclusive por meio de simulações, faremos aqui uma abordagem teórica simplificada para a lei de Malus [5,6].

A Figura 1.2 ilustra a lei de Malus a partir de um sistema de dois polarizadores em que os eixos de transmissão x do polarizador e x' do analisador formam um ângulo θ .

Um feixe luminoso, inicialmente despolarizado, atravessa o sistema a partir do primeiro polarizador até o observador.

Chamaremos de E a amplitude do campo elétrico do feixe incidente após atravessar o polarizador: $E_{\parallel} = E \cos(\theta)$ a componente paralela ao eixo de transmissão x' do analisador e $E_{\perp} = E \sin(\theta)$ a componente perpendicular ao eixo de transmissão x' do analisador.

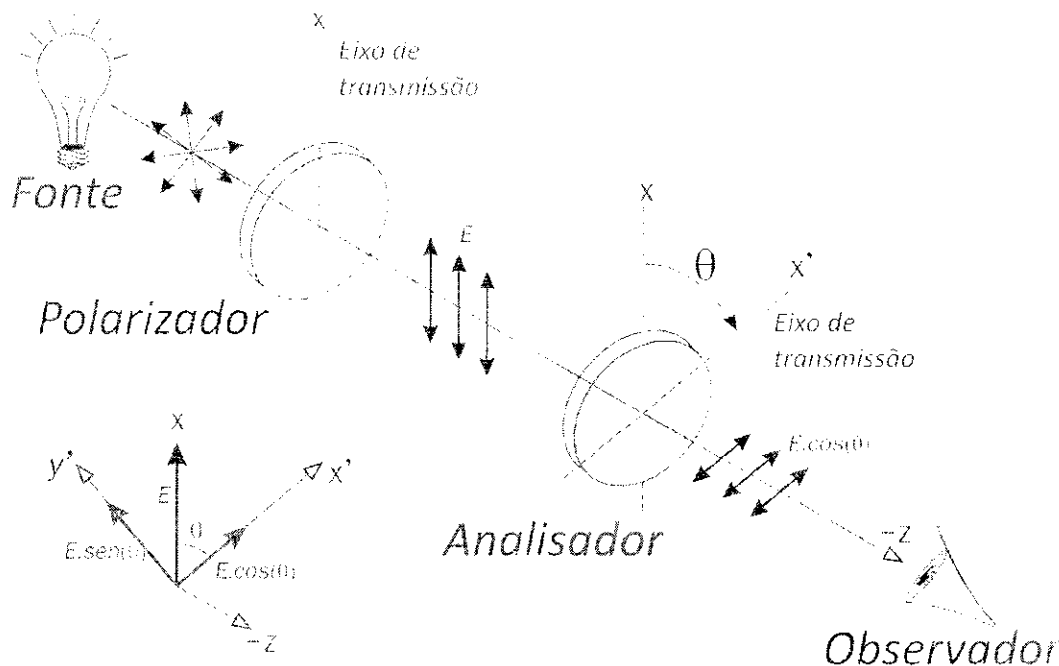


Figura 1.2 – Diagrama ilustrando as condições para a lei de Malus: Um feixe verticalmente polarizado chega ao analisador, cujo eixo de transmissão x' forma um ângulo θ com a direção da luz incidente. Apenas a componente $E_{\parallel} = E \cos(\theta)$ é transmitida através do analisador devido à mudança de polarização [3].

O analisador absorve $E_{\perp}$ e transmite $E_{\parallel}$; assim, o feixe transmitido tem uma amplitude de campo elétrico igual a $E_{\parallel} = E \cos(\theta)$ permanecendo linearmente polarizado na direção do eixo de transmissão x' do analisador. Como a intensidade de luz é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico ($I = E_{rms}^2 / (c\mu_0)$), a intensidade I da luz transmitida pelo analisador é dada pela lei de Malus e se aplica a quaisquer dois elementos polarizadores defasados de um ângulo θ [4,7]. Dividindo I/I_0 obteremos a lei do cosseno quadrado ou lei de Malus:

$$I = I_0 \cos^2(\theta) \quad (1.1)$$

1.4 Polarímetro

Existem basicamente duas técnicas para a medida da rotação do plano de polarização: a Polarimetria, através do polarímetro, é capaz de medir o ângulo de rotação do plano de polarização da luz quando esta passa através de um material, enquanto a Elipsometria, por meio de um elipsômetro, mede o ângulo de rotação do plano de polarização da luz após refletir em um material. Na verdade, Rothen inventou a palavra elipsometria para distinguir a medida da rotação do plano de polarização da luz por reflexão, da medida convencional de polarimetria [8]. Ambas as técnicas encontram aplicações em indústrias e vários campos da física, química, biologia e engenharias [8,9]. Apesar do sistema descrito neste trabalho poder ser utilizado para montar um elipsômetro, vamos tratar aqui apenas de técnicas de medidas polarimétricas.

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 e mais utilizado para se determinar a pureza óptica de um líquido, gás ou solução de um composto opticamente ativo [10].

A Figura 1.3 mostra o princípio básico de funcionamento de um polarímetro, no qual o plano de polarização é rotacionado por uma amostra de substância opticamente ativa. Para isso, são necessários dois polarizadores, uma fonte luminosa - preferencialmente monocromática¹ - além da amostra que deve ser posicionada entre os polarizadores. Os termos “polarizador” e “analisador” têm sido utilizados em sistemas ópticos há muito tempo para designar os polarizadores que apesar de serem idênticos, apresentam ligeira diferença em sua função. Tradicionalmente o primeiro converte a luz de entrada em luz linearmente polarizada, enquanto o segundo determina o ângulo de rotação do plano de polarização do feixe de luz depois de passar pela amostra [11].

¹ A rotação do plano de polarização depende do comprimento de onda da fonte luminosa, ou seja, pode-se obter um ângulo de rotação diferente para fontes luminosas diferentes em um mesmo experimento. Utilizar luz monocromática, portanto, torna-se mais conveniente.



Figura 1.3 – Rotação do plano de polarização da luz por uma substância opticamente ativa. A direção de rotação é uma característica da amostra, sendo a rotação para a direita do observador considerada positiva (Dextrogiro) e para esquerda negativa (Levogiro) [12].

O efeito pode ser observado visualmente² através de um anteparo posicionado após o analisador. Para isso, os polarizadores são mantidos “cruzados”, ou seja, defasados de 90° , para que a luminosidade no anteparo seja mínima. 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, sendo esta 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 até hoje para avaliar a quantidade de sacarose presente em uma amostra durante o processo de fabricação [13]. Por este motivo também encontramos o termo “Sacarímetro” para designar um polarímetro com esta finalidade. Sua aplicação na produção de substâncias se concentra tanto no controle do processo como no controle de qualidade [11, 15]. É utilizado na indústria farmacêutica, química,

² No caso de uma fonte luminosa no espectro visível, é claro.

usinas de açúcar, alimentícias, petrolíferas, etc. No campo da pesquisa é utilizado no desenvolvimento de novos produtos e estudos fundamentais [15–19]. 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 [20–22]. Na área da medicina, estudos recentes indicam o uso da polarimetria no auxílio ao diagnóstico de doenças como a Dengue [23]. Atualmente existem polarímetros acoplados a instrumentos da astrofísica gerando mais uma ampla área de pesquisa e desenvolvimento [24, 25].

1.5 Rotação Específica e Atividade Óptica

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 [26]. Em 1822 o Astrônomo Inglês Sir John F. W. Herschel (1792-1871) 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 – dextrorrotatória (do latim “dextro”, que significa direito) – ou para a esquerda – levorrotatório (do latim “levo”, que significa esquerdo). Esta orientação molecular se tornou um importante objeto de estudo, uma vez que compostos semelhantes (isômeros) podem apresentar características diferentes como cor, cheiro e sabor simplesmente devido a organização molecular diferente [27].

Algumas substâncias, como por exemplo o quartzo, o benzil ($C_6H_5CH_2$) e o bromato de sódio ($NaBrO_3$), apresentam atividade óptica apenas em forma de cristal. Por outro lado, alguns compostos orgânicos, como açúcar (sacarose), ácido tartárico ($C_4H_6O_6$) e terebentina ($C_{10}H_{16}$), são opticamente ativos em solução ou no estado líquido.

Em 1825 Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) propôs uma descrição fenomenológica da atividade óptica. Ele propôs que uma onda linearmente polarizada (R) pudesse ser representada como uma superposição de duas ondas circularmente polarizadas (D para a direita e L para a esquerda), como mostra a Figura 1.4.

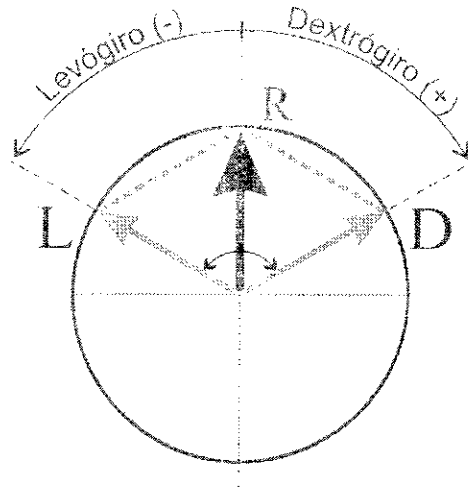


Figura 1.4 -- Representação das componentes circularmente polarizadas em verde e a resultante (linearmente polarizada) em azul.

Em que D e L representam as intensidades do campo elétrico $\vec{E}_D$ e $\vec{E}_L$ das componentes circularmente polarizadas à direita e esquerda, respectivamente, e R representa a intensidade do campo elétrico $\vec{E}_R$ da onda resultante linearmente polarizada.

Meios opticamente ativos apresentam birrefringência circular, ou seja, apresentam índices de refração diferentes para as rotações horárias (D) e anti-horárias (L), acarretando diferentes velocidades para as componentes circulares. Portanto, ao atravessar um meio opticamente ativo, as duas ondas circulares ficam defasadas e a onda linear resultante gira, mudando o seu eixo de vibração, como veremos a seguir.

Matematicamente podemos entender este fenômeno a partir das equações de propagação da luz circular D e L ao longo da direção z (direção de penetração no meio) [26]:

$$\vec{E}_D = \frac{E_0}{2} [\hat{i} \cos(k_D z - \omega t) + \hat{j} \sin(k_D z - \omega t)] \quad (1.2)$$

$$\vec{E}_L = \frac{E_0}{2} [\hat{i} \cos(k_L z - \omega t) - \hat{j} \sin(k_L z - \omega t)] \quad (1.3)$$

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 $\vec{E}_R = \vec{E}_D + \vec{E}_L$, que após algumas manipulações trigonométrica resulta em:

$$E_R = E_0 \cos\left[\frac{(k_D + k_L)z}{2}\right] \exp\left[j\cos\left(\frac{(k_D - k_L)z}{2}\right) + j\sin\left(\frac{(k_D - k_L)z}{2}\right)\right] \quad (1.1)$$

A Figura 1.5 mostra o comportamento da luz ao atravessar uma substância racêmica³ [28]. 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 as ondas circulares permanecem em fase durante todo o processo.

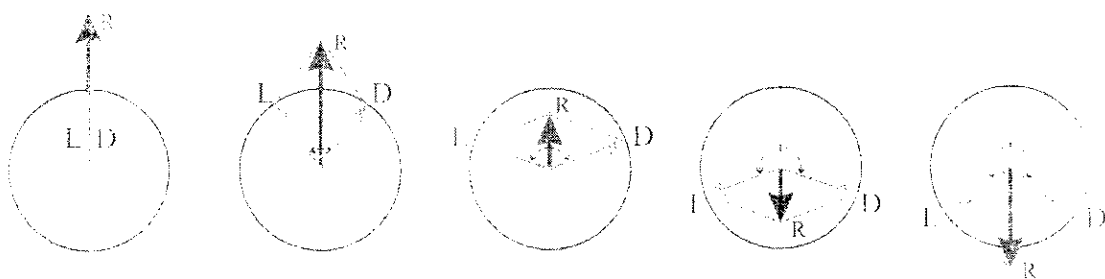


Figura 1.5 Representação do comportamento da luz ao atravessar uma substância racêmica. As componentes circulares permanecem em fase e a onda resultante linear permanece oscilando em torno do mesmo eixo.

Porém, para substâncias que apresentam atividade óptica, estes índices são diferentes, acarretando diferença de fase nas componentes circulares e conseqüente rotação do plano de polarização da luz, como mostra a Figura 1.6:

³ É uma mistura em quantidades iguais de dois enantiômeros de uma molécula quiral, cuja atividade óptica resultante não desvia o plano de polarização da luz nem para a esquerda (levógiro), nem para a direita (dextrógiro). É, portanto, um composto 50% levógiro e 50% de dextrógiro.

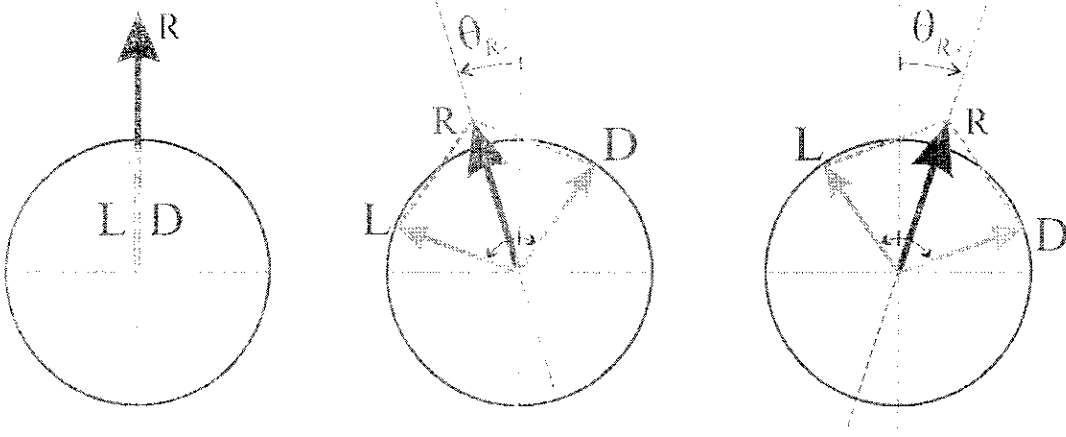


Figura 1.6 - Representação do comportamento da luz ao atravessar uma substância opticamente ativa. A onda resultante linear sofre rotação do seu plano de polarização para a esquerda ou direita dependendo dos índices de refração relativos às componentes circulares.

Se $n_D > n_L$ (ou $k_D > k_L$), R gira no sentido anti-horário ($-$), enquanto que 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, podemos dizer, a partir da equação 1.4, que o campo no ponto z faz um ângulo $\theta_R = -(\frac{k_D - k_L}{2}z)$ 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 [12]:

$$\theta_R = \frac{(n_L - n_D)\pi d}{\lambda} \quad (1.5)$$

Para $n_D > n_L$ a rotação é Levógira ($-$) e para $n_L > n_D$ a rotação é Dextrógira ($+$), como mostra a Figura 1.7.

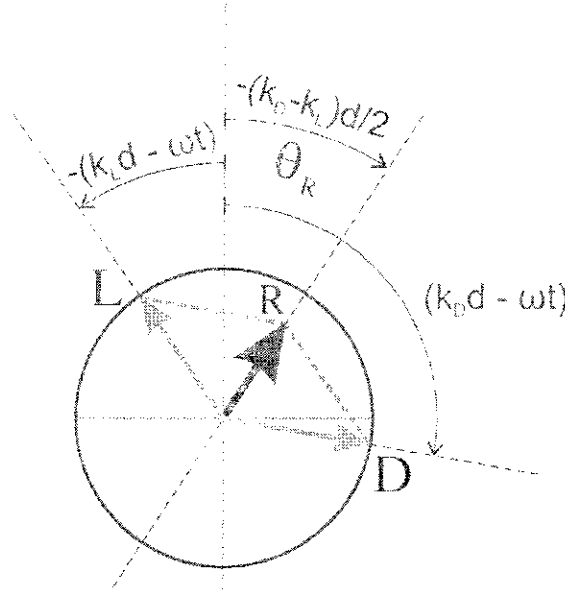


Figura 1.7 – Ângulo de rotação do plano de polarização da luz devido à atividade óptica do meio.

Fresnel idealizou um prisma de quartzo capaz de separar as componentes D e L de um feixe linearmente polarizado. O prisma de Fresnel, como ficou conhecido, mostrou que à medida que a luz penetra no meio o desvio angular das componentes aumenta. Desta maneira surgiu uma grandeza denominada “Poder rotatório específico” que quantifica o ângulo de rotação em função da distância de penetração no material (caminho óptico).

Nas soluções, o poder rotatório específico é tão pequeno que geralmente é especificado para caminhos ópticos de cerca de 10 cm. Outro aspecto relevante é a variação do ângulo de rotação com a concentração da solução, permitindo a análise da concentração de soluções de substâncias opticamente ativas, como veremos adiante. O poder de rotação também varia com a temperatura e comprimento de onda da luz. Este último fato justifica a utilização de luz monocromática na determinação de tal grandeza, tendo em vista a eliminação do efeito inconveniente da dispersão rotatória [26].

Como os índices de refração dependem da concentração (C), temperatura (T) e do comprimento de onda (λ) do meio, a equação 1.6 pode ser escrita de uma forma mais conveniente:

$$\theta_R = [\alpha]_{\lambda}^T C L \quad (1.6)$$

Desta maneira define-se o poder de rotação óptica específica em que $[\alpha]_{\lambda}^T$ é uma constante, medida em graus, denominada rotação óptica específica e relacionada a uma temperatura (T), um comprimento de onda (λ) e concentração (C) da amostra [12].

$$[\alpha]_{\lambda}^T = \frac{\theta_R}{CL} \quad (1.7)$$

Esta grandeza é geralmente referenciada para uma fonte luminosa de vapor de sódio (598 nm), temperatura de 20°C, caminho óptico em decímetros e concentração em g/mL [29].

A Tabela 1 mostra a rotação óptica para algumas substâncias nas condições específicas citadas acima. É interessante notar que ao modificar a estrutura molecular de uma substância podemos mudar sua propriedade de Dextrógira para Levógira, como é o caso do açúcar invertido, produzido a partir da sacarose.

Tabela 1 - Rotação óptica específica de algumas substâncias (a 20°C e comprimento de onda na faixa de 598 nm), segundo [29].

Substância Óptica	Solvente	Rotação Específica
Sacarose	Água	+67°
Glicose	Água	+52°
Açúcar Invertido	Água	-24°

O termo “invertido” decorre de uma característica física molecular da sacarose, em que uma molécula naturalmente Dextrógira se torna Levógira após o processo de hidrólise. Ou seja, o açúcar natural tem a capacidade de desviar o plano de polarização da luz para a direita, enquanto o açúcar invertido, apesar de apresentar estrutura molecular muito semelhante, desvia o plano de polarização da luz para a esquerda e por isso seu valor vem precedido do sinal negativo na Tabela 1.

1.6 Estado da Arte do Polarímetro

A Polarização da luz é um fenômeno há muito tempo presente na sociedade. Acredita-se que seu primeiro uso tenha sido no século VIII, quando os Vikings teriam utilizado uma

peça de cristal de calcita¹, como a da Figura 1.8, para auxílio à navegação pelo Sol em dias nublados, quando o uso de relógios solares é limitado. Os Vikings teriam aproveitado os efeitos de polarização do espalhamento da luz do Sol detectados pelo cristal, também conhecido como “Sunstone” [30–32]. Este cristal era comum em regiões da Islândia e por isso também é conhecido por “Iceland Spar Crystal” [33]. Embora não se tenha certeza da utilização deste cristal para tal fim, acredita-se ser uma hipótese bastante razoável e citada por muitos autores [30–32].



Figura 1.8 - Iceland Spar Crystal

Desde então, a humanidade passou cerca de 900 anos sem saber quase nada sobre o fenômeno observado no cristal de calcita. Apenas no século XVII, em experimentos utilizando um Iceland Spar, Erasmus Bartholinus e Christian Huygens descobriram propriedades incommuns no comportamento da luz durante um experimento de dupla refração, dando início a um conceito que mais tarde seria conhecido como “Polarização da Luz”. Hoje sabemos que este tipo de cristal pode gerar luz polarizada por birrefringência, po-

¹ Carbonato de Cálcio - $CaCO_3$

rém, na época, estas descobertas colocariam em cheque a teoria corpuscular de Newton e estagnariam os avanços na pesquisa sobre polarização por um século [12, 19, 34].

No começo do século XIX, a área da óptica física 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, resultando na modernização do conceito de Polarização da Luz [19, 33, 35].

Mais tarde, pesquisas importantes realizadas por Arago, Biot e Pasteur, sobre o poder de rotação óptico⁵ do plano de polarização por substâncias opticamente ativas, mostraram aplicações fundamentais em Química e Biologia [19]. Este e outros estudos despertaram o interesse no desenvolvimento de técnicas de medidas de polarização e consequentemente o desenvolvimento de instrumentos de medida (Polarímetros), criando assim o ramo da Polarimetria [35, 36].

Um desses avanços tecnológicos ocorreu ainda no século XIX, quando William Nicol criou um prisma a partir de modificações no Iceland Spar Crystal. O Prisma de Nicol⁶, como ficou conhecido, é considerado o primeiro polarizador da história e peça fundamental de um polarímetro. Este prisma se tornou tão importante graças a grande vantagem de propagar apenas um raio na direção do eixo de observação, evitando a inconveniente sobreposição de imagens que ocorria no Iceland Spar.

A parte final do século XIX foi marcada por descobertas significativas, principalmente sobre efeitos magneto-ópticos e eletro-ópticos de Faraday, Kerr e Pockels que enriqueceram enormemente a óptica da polarização. [19]. Além disso, a descoberta das equações

⁵ O poder de rotação óptico (ORP), atividade óptica ou birrefringência circular (CB) é uma propriedade percebida em muitos materiais quirais (naturais e sintéticos), capazes de girar o ângulo de polarização de um feixe linearmente polarizado.

⁶ Ao longo dos anos foram inventados e aperfeiçoados inúmeros polarizadores de cristal (por refração dupla). Dentre eles podemos citar as contribuições de Rochon (1811), Wollaston (1820) e Nicol (1828). Este último, uma solistificação dos primeiros, contribuiu para simplificar a construção dos polarímetros e elipsômetros da época, e por isso é tão famoso [19].

de Maxwell, em 1864, proporcionou a base teórica para a análise dos fenômenos de polarização em todo o espectro eletromagnético. A polarização é um exemplo de fenômeno que só pode ser compreendido através da interpretação da luz como uma onda eletromagnética [37].

Neste momento 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 e seu esquema está representado na Figura 1.9 [19].

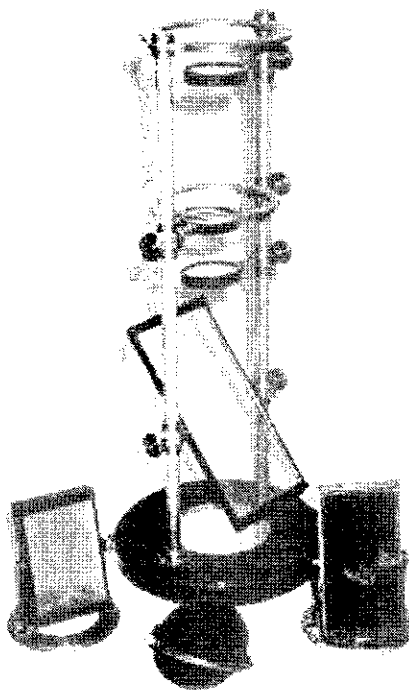


Figura 1.9 Polarímetro de Nörrenberg da década de 1920, quando foi comprado pelo departamento de física da *Hobart and William Smith Colleges*, em Geneva - Nova York.

Nesta época, assim como o polarímetro de Nörrenberg, diversos instrumentos semelhantes foram desenvolvidos. Uma série de polarímetros rudimentares semelhantes a este

podem ser encontrados no *site* do departamento de física do Kenyon College [38].

Os primeiros polarímetros utilizavam a luz do sol como fonte e o olho humano como detector. O uso de fontes com espectros mais sintonizados, como fontes de vapor de Mercúrio e vapor de Sódio, só foi relatado a partir de 1866 e ampliou as possibilidades de estudo na área, pois as amostras podem apresentar níveis de absorção diferentes de acordo com o comprimento de onda da luz. Além disso, a necessidade de utilização de luz monocromática nos polarímetros prende-se com o fato da rotação óptica variar com o comprimento de onda [36]. Esta variação está na base da construção de um outro tipo de aparelho, os espectropolarímetros, que não serão abordados aqui. Uma revisão do estado da arte dos polarímetros visuais, denominada “Polarímetro Universal”, foi publicada em 1925 por Skinner [39].

A partir de 1930 os sistemas eletroeletrônicos entraram em cena para melhorar o sistema de medida, como mostram os trabalhos de Brode e Jones [40]. 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 [41].

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 [29]. 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 de susceptibilidade a erros de fadiga ocular [29]. O ganho de precisão e simplicidade de trabalho é, portanto, muito considerável [29, 42]. Outra característica relevante é a possibilidade de utilizar fontes luminosas fora do espectro visível, desde que o detector seja compatível.

O Fotopolarímetro encontrou aplicação, inclusive, na área de astronomia, para observação de estrelas [24]. 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 Sacarímetros⁷ em laboratórios comerciais, atingindo precisão angular de 5×10^{-4} graus [11].

Podemos então classificar os instrumentos de polarimetria em três gerações: a primeira referente aos polarímetros visuais; a segunda referente aos fotopolarímetro 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 [10]. Pouca quantidade de amostra implica em menor rotação angular devido a um menor caminho óptico percorrido pela luz (equação 1.4) e, portanto, exigem sistemas de detecção mais sensíveis. Embora existam outros métodos de medida, o Lock-in é utilizado frequentemente em sistemas de medidas de precisão [43, 44].

1.7 Amplificador Lock-In

O amplificador Lock-in é uma excelente ferramenta para medir sinais (AC de pequenas amplitudes) em sistemas imersos em ruído, comumente presente em laboratórios que desenvolvem pesquisas em física e áreas afins [45–60]. Existem inúmeras maneiras para visualizar a operação desses instrumentos científicos. Entretanto, pode-se dizer que todos estão baseados de alguma maneira em detectores sensíveis a fase (*Phase Sensitive Detectors*). Assim, 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 [61].

A Figura 1.10 apresenta um diagrama de blocos deste instrumento mostrando sua operação em quatro estágios: ganho, circuito de referência, demodulador e filtro passa-baixa.

⁷ Polarímetro, inventado por Biot, específico para análise de açúcares, [17].

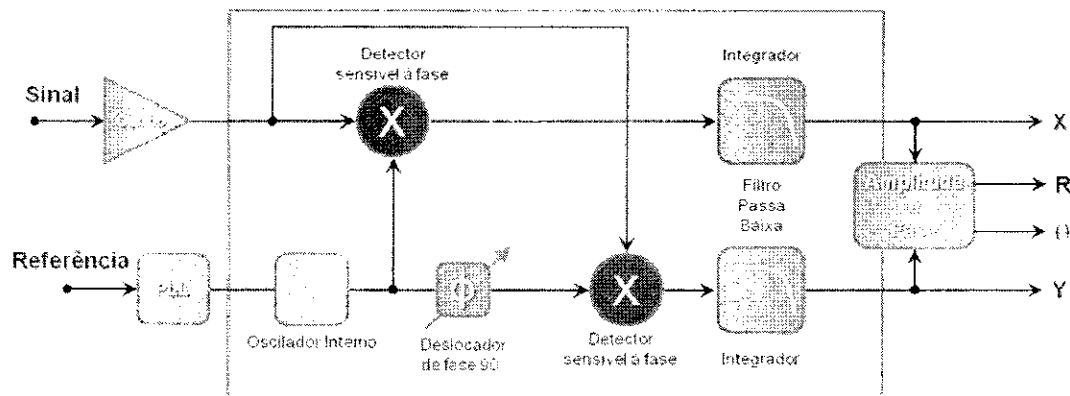


Figura 1.10 Diagrama em blocos do funcionamento de um amplificador Lock-in.

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 (fornecido por um oscilador interno ou uma fonte externa), 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.

Quando o sinal está em fase com o sinal de referência a tensão (R) é máxima. Porém, sinais de mesma frequência, mas fora de fase, causam uma rotação no vetor (R). Projetando este vetor (R) em dois eixos ortogonais obteremos duas componentes: uma em fase com o sinal (X) e outra (Y) defasada de um ângulo θ , como veremos a seguir.

Para um sinal de referência senoidal e uma forma de onda na entrada $U_{in}(t)$, a saída DC $U_{out}(t)$, pode ser calculada para um amplificador analógico a partir da seguinte expressão:

$$U_{out}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sin(2\pi f_{ref}s + \varphi) U_{in}(s) ds \quad (1.8)$$

Em que a fase (φ) pode ser ajustada para zero no Lock-in. Se o tempo de integração (T) é grande o suficiente⁸ para remover valores indesejados como ruídos, a saída pode ser

⁸ Muito maior que o período do sinal.

dada por:

$$U_{av.}(t) = \frac{1}{T} V_{sig} \cos(\theta) \quad (1.9)$$

Em que V_{sig} é a amplitude do sinal na frequência de referência e θ é a diferença de fase entre o sinal e a referência. Nota-se que com o avanço da tecnologia na área de processamento de sinais digitais surgiram amplificadores do tipo Lock-in com um segundo detector. Nesse caso, esses instrumentos implementam a mesma operação matemática descrita anteriormente com a diferença de que o sinal de referência é defasado de 90° . Dessa forma, têm na saída duas grandezas: $X = V_{sig} \cos(\theta)$, denominada por componente em fase e $Y = V_{sig} \sin(\theta)$, conhecida por componente em quadratura. Essas duas grandezas representam o sinal como um vetor em relação ao sinal de referência. Em seguida, calculando a parte real do vetor (R), a dependência de fase é removida como mostra a equação abaixo:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1.10)$$

Além disso, a fase pode ser obtida por:

$$\tan(\theta) = \frac{Y}{X} \quad (1.11)$$

Assim podemos obter a amplitude (R), a fase (θ), bem como as componentes X e Y . No entanto, para este trabalho é suficiente a medida do módulo (R), pois o sinal não sofre defasagem durante o experimento ($\theta = 0$).

1.8 Objetivo

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um sistema que permita explorar técnicas de medida do estado de polarização da luz. Para isso são utilizadas técnicas de instrumentação para a construção de um medidor óptico que sirva para integrar a parte de detecção de um fotopolarímetro digital de terceira geração. O trabalho teve como base o estudo das técnicas de medida da polarização da luz, desenvolvimento de circuitos

eletrônicos e medidas de sinais de pequenas amplitudes com o auxílio de um amplificador Lock-in. Esta abordagem se justifica no sentido de construir um equipamento sensível o suficiente para medir soluções de baixas concentrações, como por exemplo glicose, em que o primeiro passo é o desenvolvimento deste polarímetro.

A escolha e o direcionamento deste trabalho se devem ao fato do mesmo estar inserido no grupo de pesquisa do LEPS⁹ onde se procura manter uma linha de pesquisa contínua, aproveitando ao máximo os trabalhos desenvolvidos anteriormente. Neste sentido, podemos destacar os recentes trabalhos do grupo na parte de instrumentação científica, como por exemplo uma fonte de corrente programável para um diodo laser [62]; uma placa de aquisição de dados (Javanês) [63]; uma técnica de medida de espessura de filmes finos utilizando elipsometria e polarizadores fixos [61]. Por fim, se tornou oportuno o desenvolvimento de um sistema de medida óptica com aplicação em polarimetria com a perspectiva de integrar os diversos trabalhos, consolidar o conhecimento e abrir novos horizontes e possibilidades para futuros desenvolvimentos.

O capítulo 2 desta dissertação apresenta a metodologia e materiais utilizados neste trabalho; o capítulo 3 apresenta os resultados experimentais e o capítulo 4 apresenta a conclusão e perspectivas futuras para este projeto.

⁹ Laboratório de Eletrônica e Processamento de Sinais do CBPF.

CAPÍTULO 2

SISTEMA OPTOELETRÔNICO

Este trabalho foi desenvolvido em algumas etapas. Inicialmente foi proposto um circuito eletrônico em placas de *protoboard* para condicionar o sinal de um fotodiodo. A segunda etapa foi desenvolver uma placa de circuito impresso para o protótipo do condicionador de sinais. A placa de dupla face foi integralmente idealizada, esquematizada, produzida e montada no LEPS em caráter de protótipo. A estratégia adotada foi a de fabricar a versão final da placa em empresas comerciais somente após o protótipo estar funcionando, visando, com isso, minimizar erros de projeto e economizar recursos financeiros. A terceira etapa consistiu na montagem de um sistema óptico em conjunto com o condicionador de sinais para ajustes e caracterização. Por fim, como aplicação para este sistema optoeletrônico, foi desenvolvido um polarímetro funcionando em regime DC e AC. Este instrumento de medida ainda é o instrumento mais simples e utilizado para se determinar a pureza óptica de um líquido, gás ou solução de um composto opticamente ativo e por isso foi utilizado para medir o desvio angular do plano de polarização da luz em amostras de açúcar [10]. A seguir, será descrito em detalhe o sistema Optoeletrônico.

A parte eletrônica do sistema é composta por dois dispositivos eletrônicos. O primeiro é um condicionador de sinais, enquanto o segundo um medidor de sinal elétrico. Este pode ser um multímetro, uma placa de aquisição de dados ou um amplificador Lock-in.

2.1 Condicionador de Sinais

A Figura 2.1 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 [65–68]. 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 medida diferencial entre os sinais de duas amostras, permitindo a comparação relativa entre elas e ainda a amplificação desta diferença.

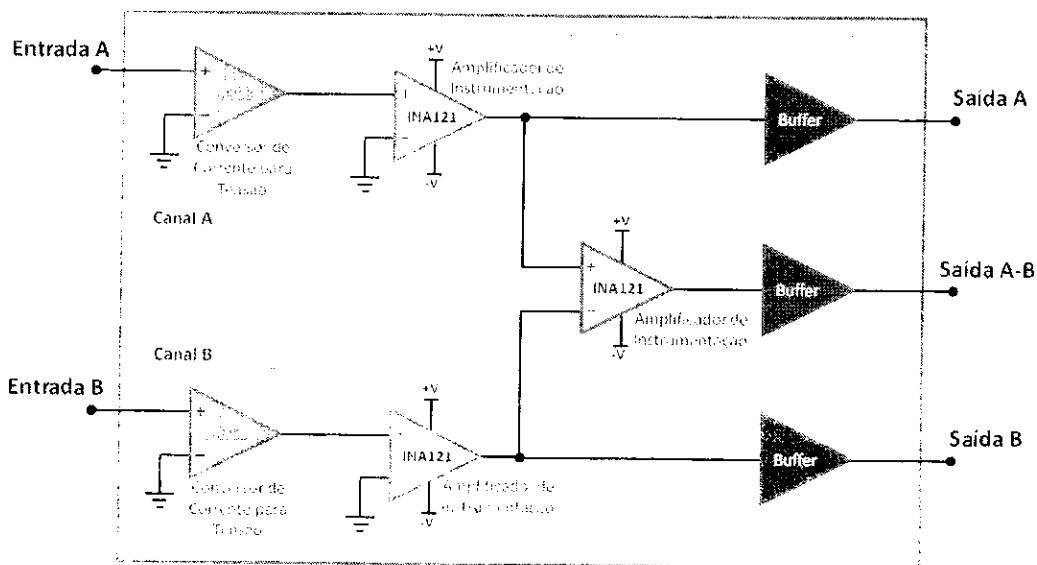


Figura 2.1 – Esquemático do circuito eletrônico do condicionador de sinais, desenvolvido a partir do amplificador de instrumentação INA121.

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 [65,66]. 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. Este condicionador de sinais foi desenvolvido para trabalhar em regime DC e AC em que a frequência de operação é limitada pelos componentes do circuito. No decorrer deste capítulo serão apresentadas duas abordagens para o sistema de medida da rotação do plano de polarização da luz, porém, antes disso, falaremos sobre

o processo de fabricação dos protótipos do condicionador de sinais.

A Figura 2.2 mostra o esquema elétrico do circuito do condicionador de sinais, disponível em maior escala no Apêndice A



Figura 2.2 – Esquema elétrico do circuito condicionador de sinais.

A partir do esquemático do circuito foram produzidas duas versões do protótipo pelo método do *dryfilm* antes do circuito final. Este trabalho de produção de placas de circuito impresso está melhor descrito em uma Nota Técnica publicada em março de 2017 [69].

A Figura 2.3 mostra as duas faces do *layout* da placa de circuito impresso desenhado a partir do esquemático do circuito através do programa *Altium Designer* [70].

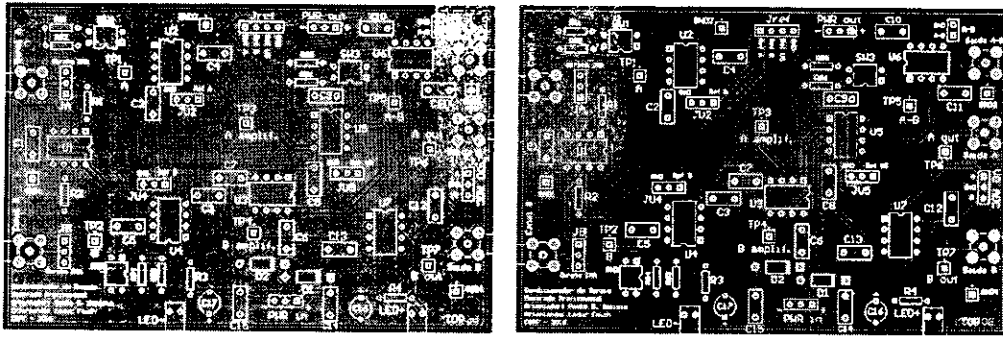


Figura 2.3 - Terceira versão do *layout* da placa de circuito impresso para o condicionador de sinais.

A Figura 2.4 mostra o resultado final para o segundo protótipo do condicionador de sinais desenvolvido no LEPS a partir da técnica do *dryfilm*. Para esta versão foram corrigidos alguns erros de projeto da versão anterior, permitindo a sua utilização nos experimentos do projeto.

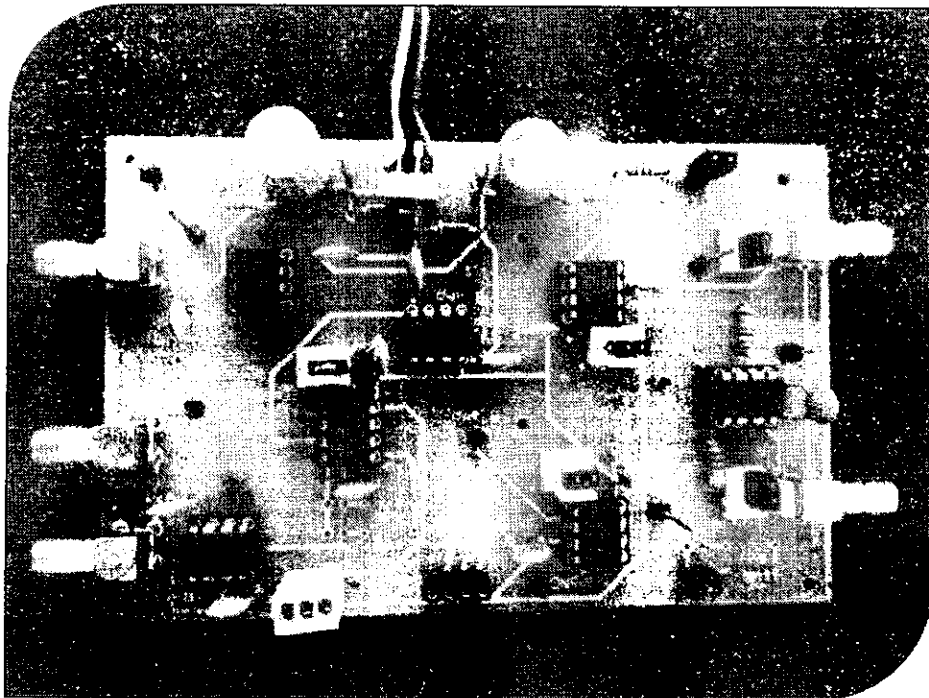


Figura 2.4 - Protótipo da placa do circuito condicionador de sinal desenvolvida no LEPS do CBPF usando a técnica do *dryfilm*.

A versão final está apresentada na Figura 2.5. É inegável a diferença de qualidade de

placas produzidas por empresas comerciais em comparação às placas produzidas pelo método do *dryfilm*. No entanto, acreditamos que esta metodologia possibilite a minimização dos erros de projetos ao mesmo tempo em que economiza tempo e recursos financeiros no desenvolvimento de projetos eletrônicos.

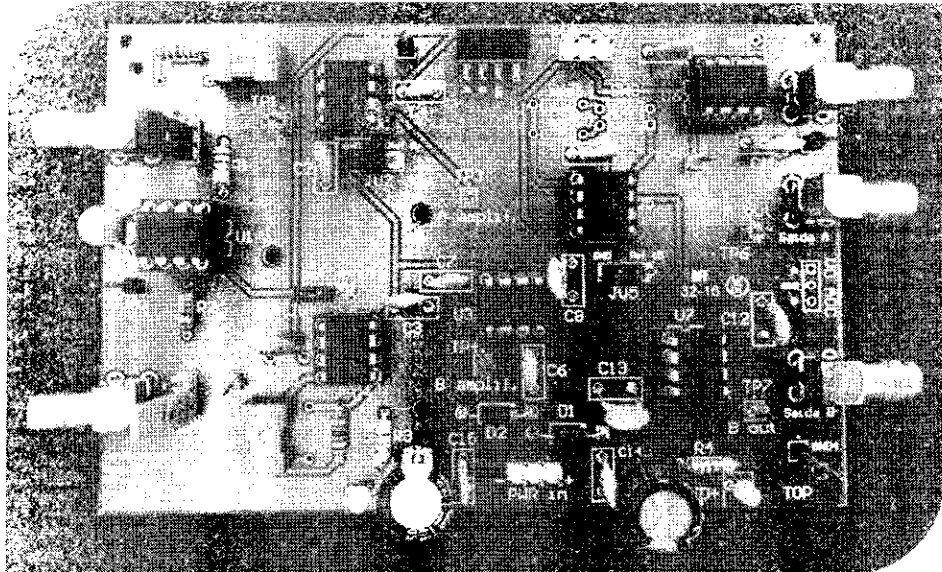


Figura 2.5 Versão final da placa do condicionador de sinais fabricada comercialmente.

Esta metodologia de produção de PCB permite identificar e corrigir erros de projeto inerentes à pesquisa científica com baixo custo envolvido. A Figura 2.6 mostra as três versões da placa do circuito condicionador de sinais. As duas primeiras versões foram produzidas no CBPF pelo método do *dryfilm*, enquanto a última versão foi produzida por empresa comercial, porém, todas as placas tiveram seus componentes montados manualmente no CBPF.

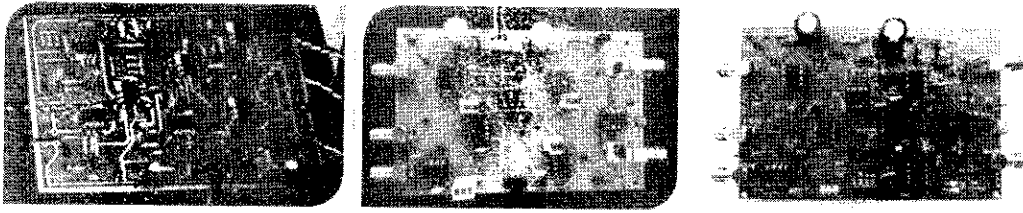


Figura 2.6 – As três versões do circuito condicionador de sinais.

A Figura 2.7 mostra os materiais envolvidos em todo o processo de produção de PCB. Estes materiais podem ser divididos em dois grupos: materiais permanentes - laminadora, furadeira e luminária; e materiais de consumo - *dryfilm*, água oxigenada 200 volumes, ácido muriático, barrilha leve, soda cáustica, brocas, lâmpada de luz negra, luvas de proteção, spray enegrecedor e solução alcoólica de breu ou outro tipo de verniz. Além dos itens da foto também podemos acrescentar aos materiais de consumo a placa revestida de cobre e o laser filme para a impressão do fotolito. Apesar de ser prescindível, ter uma impressora a laser dedicada ao projeto é recomendável.

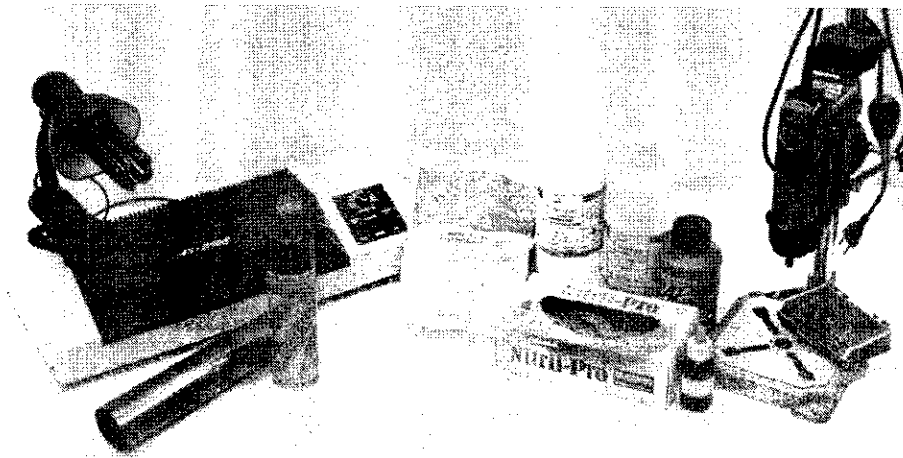


Figura 2.7 – Materiais utilizados para a fabricação de PCB pela técnica do *dryfilm*.

2.2 Abordagem DC

O sistema experimental para medidas DC está dividido em duas partes como mostra a Figura 2.8. 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. Este dispositivo pode ser utilizado para medir sinais contínuos e pulsados de até 1us (1 GHz). 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, porém, podendo ser recolhido sem afetar o sistema. Todos estes componentes ópticos são fabricados pela Thorlabs [71].

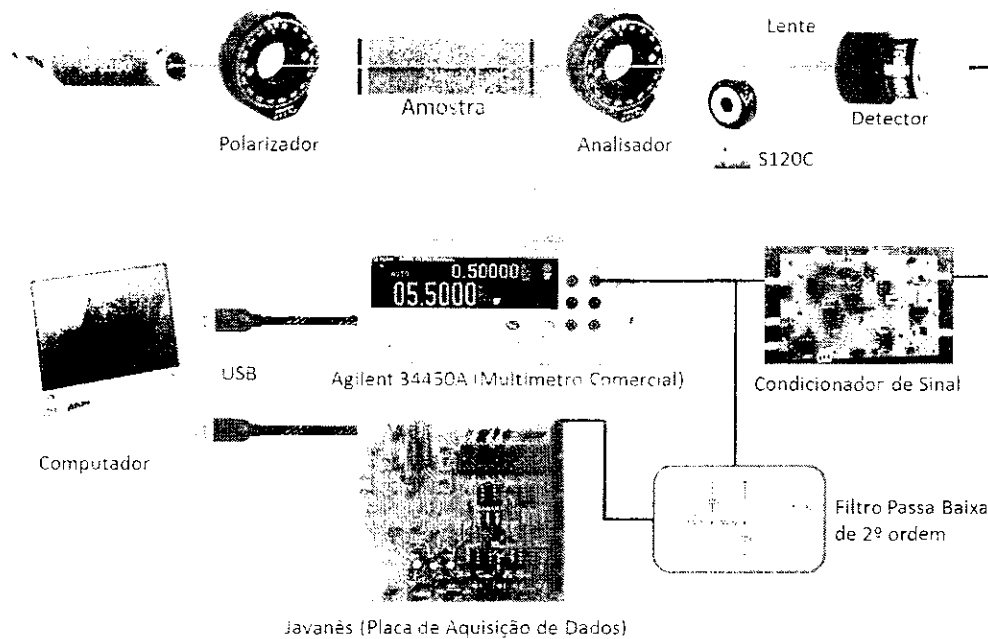


Figura 2.8 Aparato DC para medição da rotação do plano de polarização da luz.

A parte eletrônica é composta por dois circuitos eletrônicos. O primeiro é o condicionador de sinais, enquanto o segundo é o sistema de aquisição de dados (Javanês) desenvolvido no LEPS [63]. 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.

2.3 Abordagem AC

A partir de poucas modificações no sistema DC apresentamos o sistema experimental para medidas AC como mostra a Figura 2.9. Para a parte óptica a única diferença é o *Chopper* utilizado para pulsar o feixe laser. Este componente é composto por um disco de metal furado que gira periodicamente ocasionando a interrupção da luz em uma frequência de até 3kHz. Além dessa abordagem existem outros métodos que podem ser utilizados, tais como: pulsar eletronicamente o laser, usar moduladores fotoelásticos¹ etc.

¹ (<http://www.hindsinstruments.com/wp-content/uploads/PEM-Technical-Overview.pdf>)

No entanto, a escolha da frequência não é significativa para este trabalho e assim optamos por uma frequência arbitrária de 500 Hz.

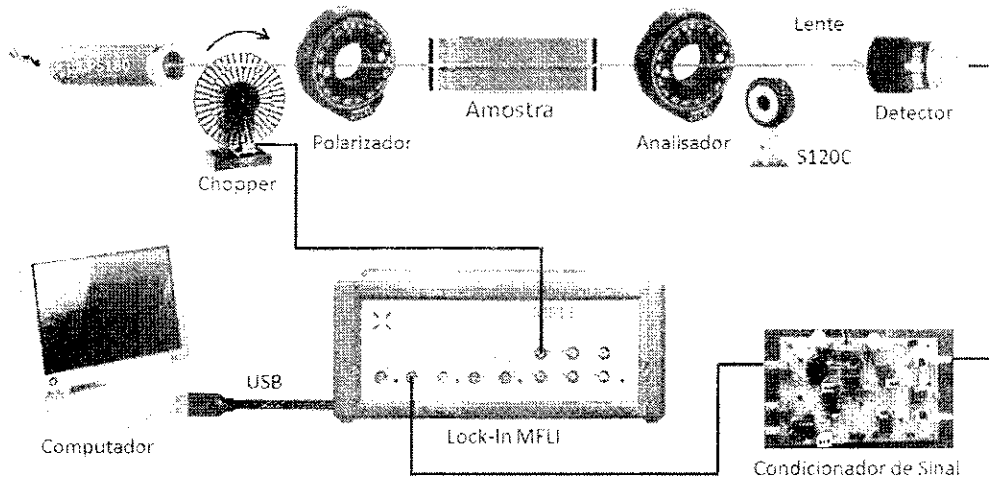
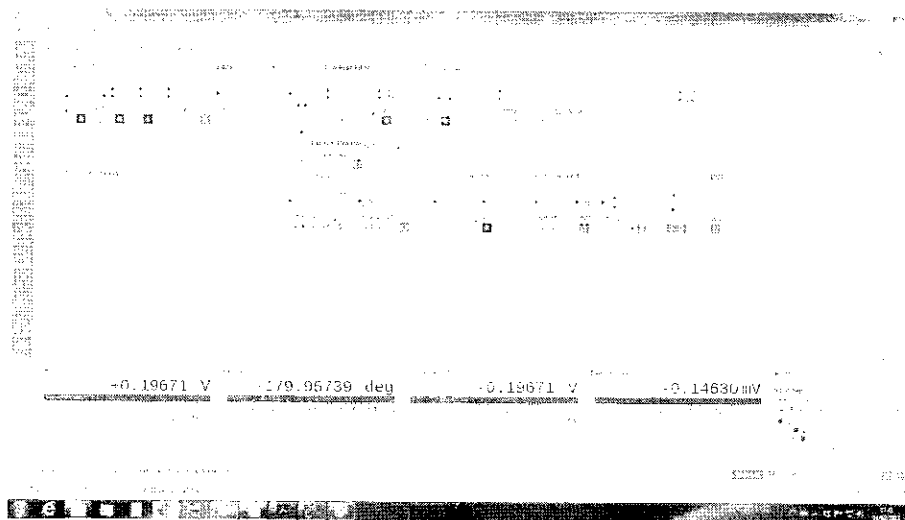
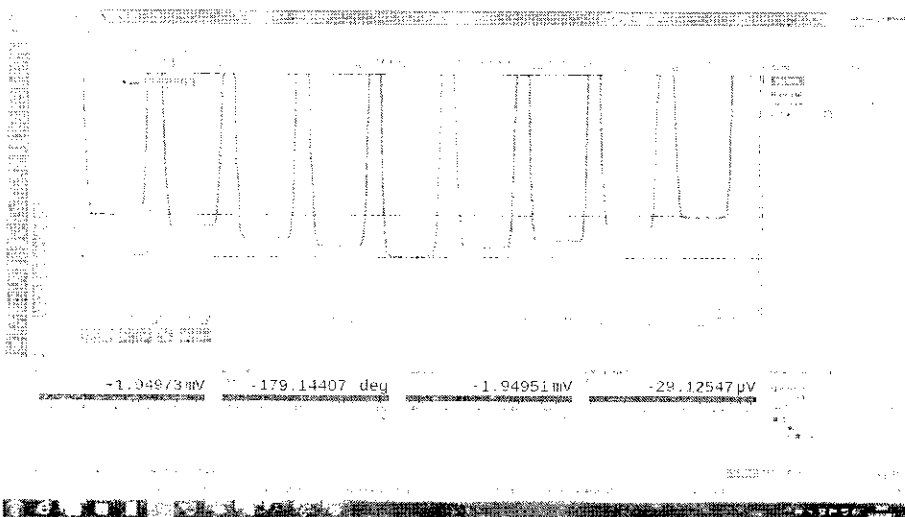


Figura 2.9 – Aparato AC para medição da rotação do plano de polarização da luz.

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. Este Lock-in de 16 bits de resolução recebe o sinal do *Chopper* como referência para a medida AC, operando na faixa de até 500 kHz. Além disso, vem com um servidor web interno com a plataforma *LabOne*[®] como mostra a Figura 2.10. Esta plataforma possibilita a comunicação através do navegador do PC por meio de uma conexão USB.



(a)



(b)

Figura 2.10 Plataforma web *LabOne*[®] para comunicação do Lock-in MFLI com o PC. Em a) temos a interface de configuração enquanto em b) a interface de aquisição de dados.

Através desta plataforma é possível configurar os parâmetros do Lock-in e ainda salvar os dados em formato ASCII ou gráfico. Os resultados obtidos serão apresentados nos próximos capítulos.

2.4 Sistema AC Otimizado

Além desses dois sistemas, apresentamos na Figura 2.11 a versão final do sistema de medida AC otimizado em termos de resposta do sistema e estabilidade.

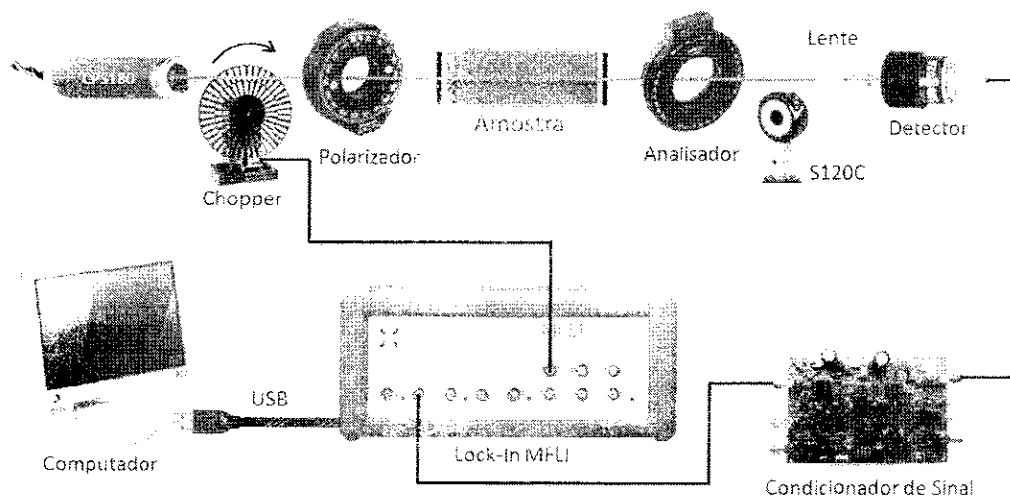


Figura 2.11 – Aparato de medida AC otimizado, com analisador de maior precisão e a placa final do condicionador de sinais.

Este sistema é uma atualização do aparato de medida para abordagem AC, em que o protótipo da placa do condicionador de sinais foi substituído por sua versão final produzida comercialmente. O polarizador de análise foi substituído por um polarizador óptico linear composto por uma lente (LPVISE200-A) de diâmetro 50,8 mm em uma montagem de rotação de precisão para óptica (PRM2) de 2 polegadas, ambos fabricados pela Thorlabs. Esta montagem conta com um micrômetro acoplado ao sistema giratório permitindo excursionar 14° com uma resolução de $0,028^\circ$. A lente polarizadora do sistema atual é de mesmo tipo do anterior, diferindo apenas em tamanho.

2.5 Preparo das Amostras e Porta Amostra

O desafio de construir um polarímetro está também na confecção de um porta amostra para líquidos com extremidades transparentes que não afetem a polarização da luz. A solução encontrada foi utilizar um tubo de PVC² comercial com aproximadamente uma polegada de diâmetro, 10 cm de comprimento e com uma tampa em cada extremidade. Cada tampa, na verdade, é um suporte para janela de quartzo temperado, como apresentado na Figura 2.12. O quartzo temperado não modifica a polarização da luz, servindo

² PVC é a sigla inglesa de “Polyvinyl chloride” que em português significa Policloreto de polivinila (ou policloreto de vinil). Trata-se de um plástico também conhecido como vinil.

para este propósito.

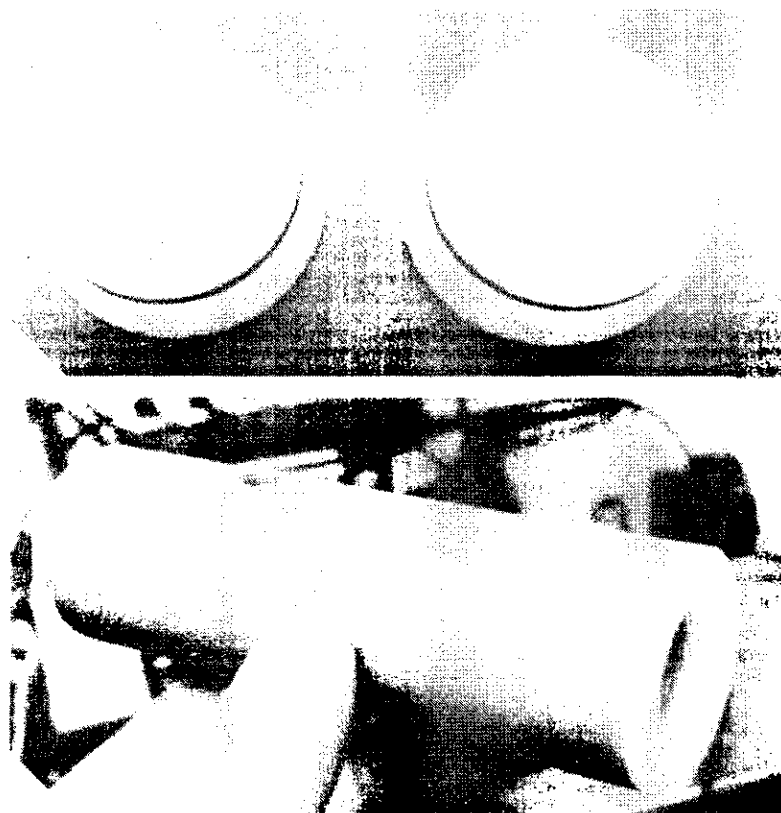


Figura 2.12 Esquema do tubo porta amostra para o polarímetro.

O corpo do suporte de lente foi fabricado em Technyl³ com um O-Ring para garantir a vedação, permitindo serem acoplados e removidos facilmente em tubos de diferentes comprimentos. O projeto deste suporte foi feito em colaboração com o Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) e está disponível nos Apêndices B, C e D. 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 preparadas conforme o esquema da

³ O Technyl (marca registrada da Rhodia) é o nome comercial de família de polímeros, cuja estrutura química é baseada na poliamida porém reforçada com fibras minerais e/ou sintéticas (como a fibra de vidro) e aditivos químicos específicos, visando diminuir o peso específico e principalmente aumentar a resistência mecânica.

Figura 2.13 no Laboratório de Produção de Materiais Avançados (LPMA) do CBPF. 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.

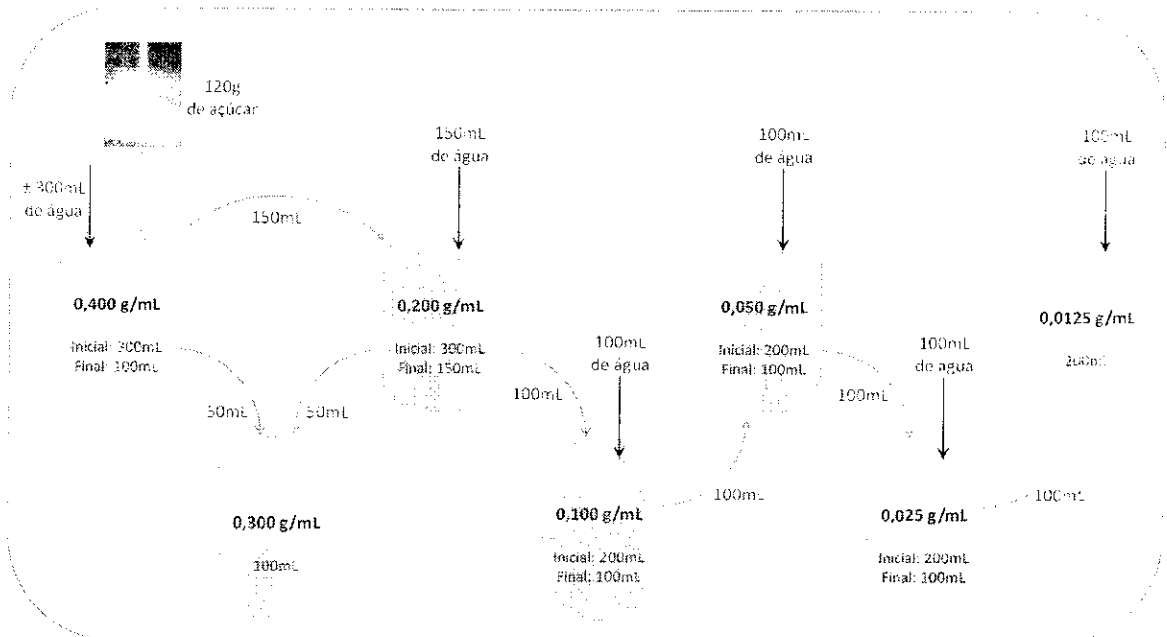


Figura 2.13 - Esquema de preparo das soluções de amostras.

Por fim, a Figura 2.14 mostra os materiais utilizados no preparo das amostras tendo como base o esquema apresentado.

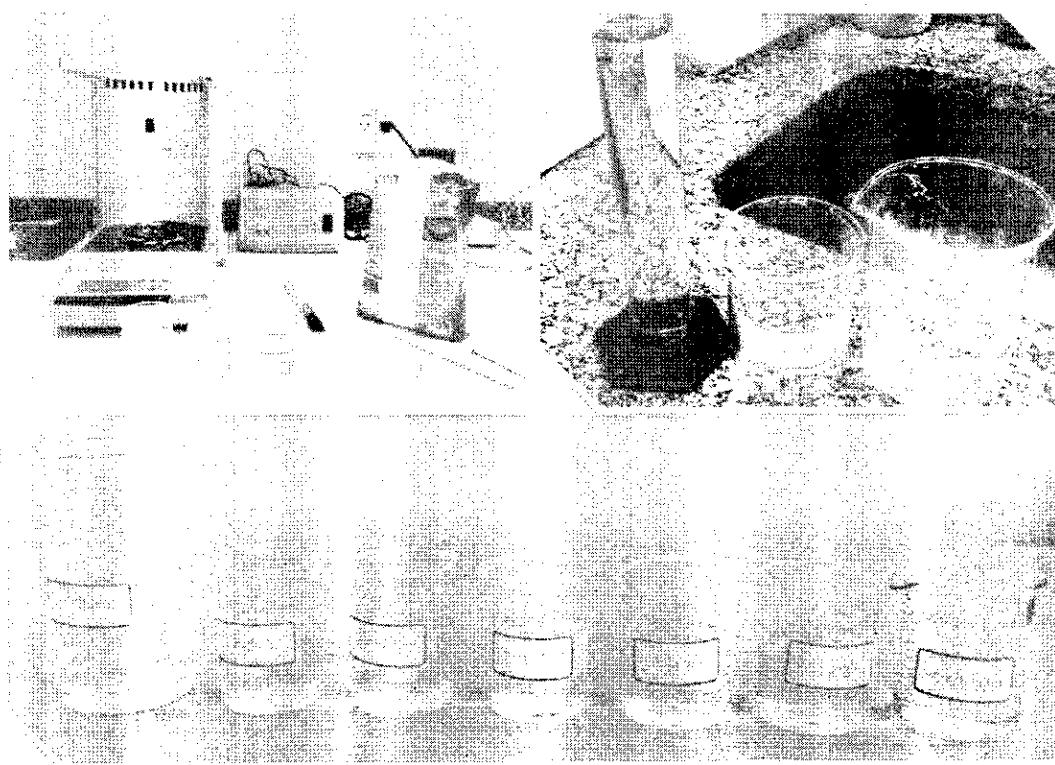


Figura 2.14 – Materiais utilizados na produção das amostras.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os dados obtidos com os sistemas em abordagem DC e AC. Os primeiros testes tiveram como objetivo caracterizar ou calibrar os sistemas, analisando a resposta elétrica em função de um estímulo óptico. Em seguida foi verificada a resposta dos sistemas em função da mudança do ângulo de um polarizador e os resultados comparados com a Lei de Malus. Esta análise foi investigada também para baixas potências ópticas. Por último são mostrados os dados dos sistemas de medida na aplicação de um Polarímetro a partir da análise de sete amostras de água com açúcar. A análise da rotação óptica específica da sacarose é discutida no final.

3.1 Calibração do Detector Óptico

Nesta seção apresentaremos os resultados obtidos durante a caracterização do condicionador de sinais utilizando o sistema optoeletrônico, sem amostra, com as abordagens DC e AC. Neste sentido investigaremos o comportamento do sinal de saída do sistema de detecção em função da potência óptica aplicada.

A Figura 3.1 apresenta a resposta dos fotodetectores em função da potência óptica aplicada nos dois canais do condicionador de sinais utilizando a abordagem DC. No canto inferior direito de cada gráfico 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 obtém-se a medida utilizando o detector (SM05PD2A), através da placa de aquisição de dados (Javanês) e do multímetro digital 34450A da marca Agilent como referência. Para efeito de comparação, foram utilizados dois detectores (SM05PD2A), um para cada canal da placa do condicionador de sinais, os quais foram nomeados de “X” e “Y”.

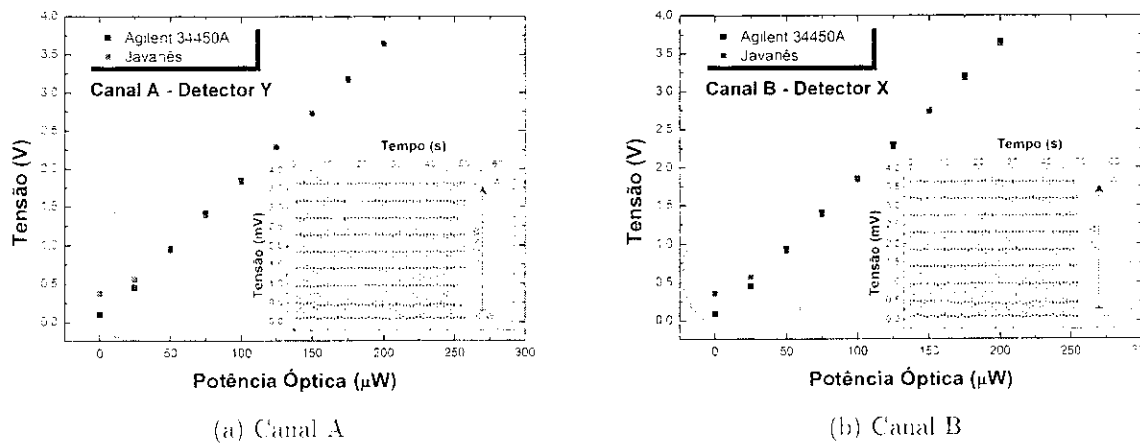


Figura 3.1 Caracterização óptica do condicionador de sinais referentes aos canais A e B.

Observa-se um comportamento linear em quase toda a região de potência óptica investigada, tendo uma visível perda da linearidade e aumento do erro para potências inferiores a $50 \mu W$ (círculo verde) quando medida com o Javanês. Os resultados também apresentaram grande flutuação, indicando a necessidade de melhoria na estabilidade do Javanês.

Como tentativa de resolver este problema foi adicionado um filtro passa baixa RC de segunda ordem e frequência de corte 16 Hz posicionado entre a saída do condicionador de sinais e a entrada do ADC do Javanês. Os resultados estão apresentados na Figura 3.2.

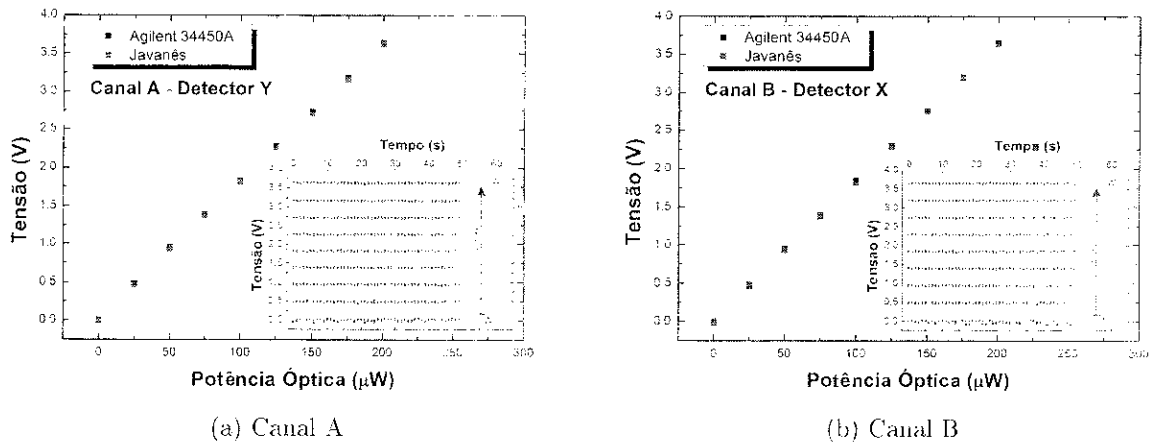
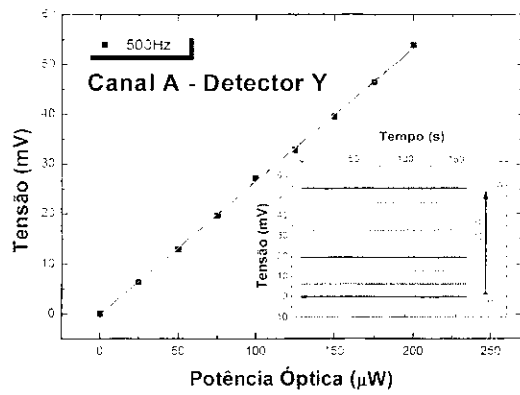


Figura 3.2 Caracterização óptica do condicionador de sinais, com filtro RC, referentes aos canais A e B.

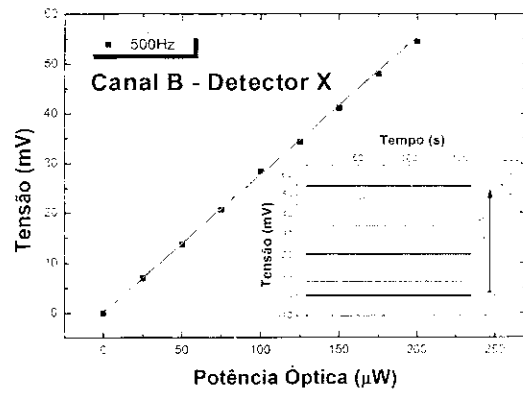
Nota-se uma clara melhora na estabilidade e diminuição do erro, não só na região crítica, mas em toda a faixa de potência óptica medida pelo Javanês. Os resultados obtidos pelo Agilent não apresentaram alterações significativas, pois este equipamento já possui filtros internos que compensam as oscilações do sistema.

Para efeito de comparação, podemos dizer que o desempenho de medida foi muito semelhante para os dois equipamentos e o comportamento do sistema de detecção é linear com a potência óptica aplicada. Concluímos que nesta configuração de medida ambos os canais apresentam uma sensibilidade de aproximadamente $18,75 \text{ mV}/\mu\text{W}$. A comparação dos resultados dos dois canais e detectores mostra a grande similaridade da fabricação dos componentes envolvidos.

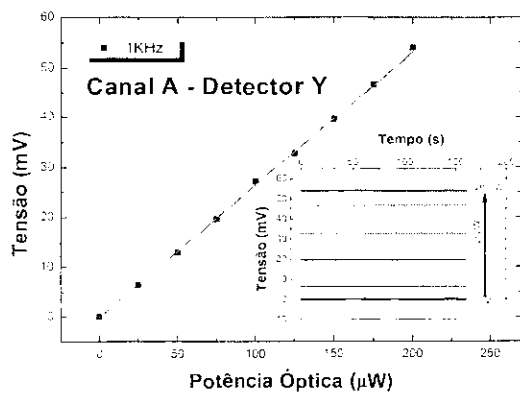
A Figura 3.3 apresenta a resposta dos fotodetectores em função da potência óptica aplicada utilizando a abordagem AC. O procedimento é análogo ao anterior, apenas diferenciado pelo fato da luz estar sendo pulsada por um *chopper* e as medidas tomadas com o Lock-in MFLI.



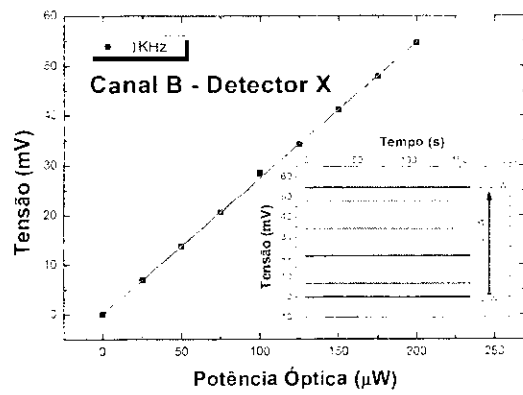
(a) 500 Hz



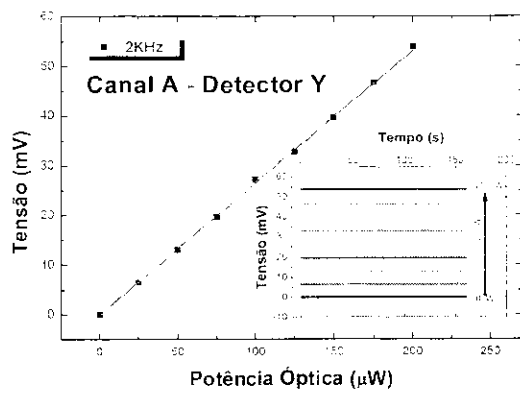
(b) 500 Hz



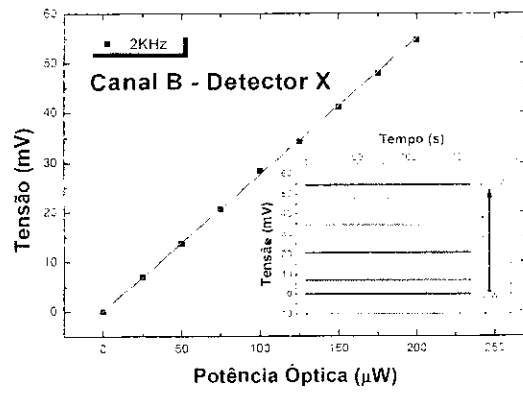
(c) 1 kHz



(d) 1 kHz



(e) 2 kHz



(f) 2 kHz

Figura 3.3 Relação da potência óptica aplicada e a tensão de saída do sistema para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em abordagem AC.

Como esperado, obtivemos resposta linear e grande similaridade nos resultados para ambos os canais em toda faixa de frequência analisada. Além disso, a potência óptica se manteve estável durante todo o procedimento, como mostra o quadro no canto inferior direito de cada gráfico.

Podemos assim concluir que o sistema de medida AC não depende da frequência da luz pulsada. Sendo assim, adotaremos arbitrariamente a frequência de 500 Hz para os próximos testes em abordagem AC.

3.2 Lei de Malus

Tendo em vista o objetivo de utilizar o sistema experimental como polarímetro, nesta seção utilizaremos o aparato de medida DC para verificar a lei de Malus [34].

A Figura 3.4 mostra a resposta do sistema em função do ângulo do analisador. O procedimento consiste em variar o ângulo de zero a 360° em intervalos de quatro graus, monitorando a tensão de saída do sistema.

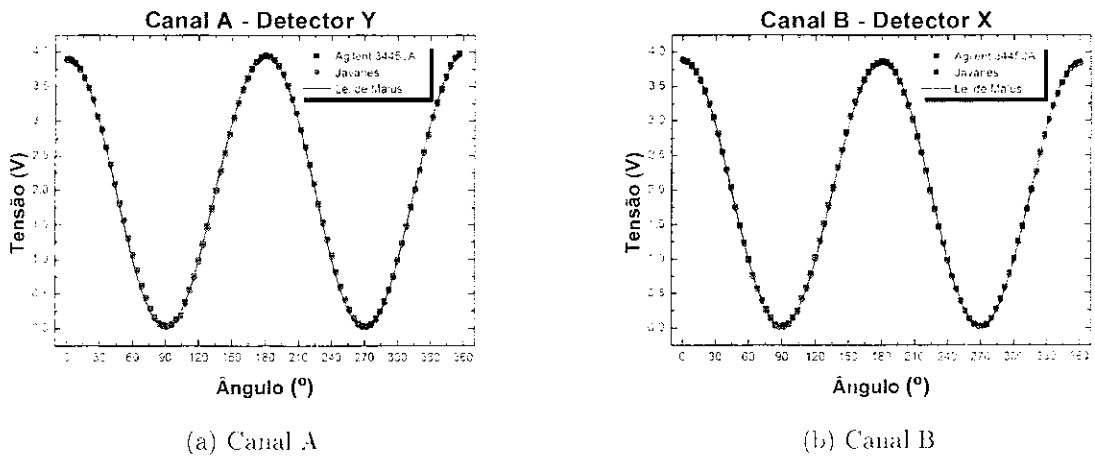


Figura 3.4 Representação da lei de Malus para abordagem DC em intervalos de 4° para os canais A e B.

Os resultados mostram concordância entre as medidas feitas com o Agilent e o Javanés para os dois canais, uma vez que quase não se pode distinguir os pontos referentes a cada medida em ambos os instrumentos. Além disso, a curva azul representa um ajuste cossenoidal quadrático que simula a lei de Malus para os parâmetros do experimento.

Prosseguiremos, então, buscando o limite de detecção do sistema óptico para medida de polarização em abordagem DC. Para isso, reduziremos gradativamente a máxima potência óptica de entrada da luz através do ângulo do primeiro polarizador, aproveitando a característica do diodo laser já possuir polarização natural [72]. Na verdade, esse procedimento é a reprodução do experimento anterior para a lei de Malus, só que para seis diferentes potências ópticas de entrada (1, 3, 6, 12, 25 e 50 μW). O objetivo é investigar o comportamento do sistema em uma região de pouca luminosidade. Utilizaremos apenas um canal e um detector para este procedimento.

A Figura 3.5 apresenta a tensão em função do ângulo para as seis potências ópticas de entrada, na medida em que o ângulo do analisador gira de zero a 360° em intervalos de 30° .

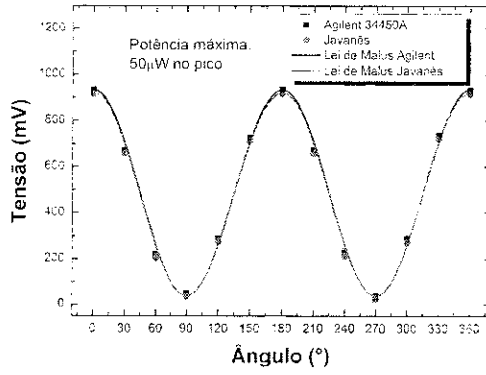
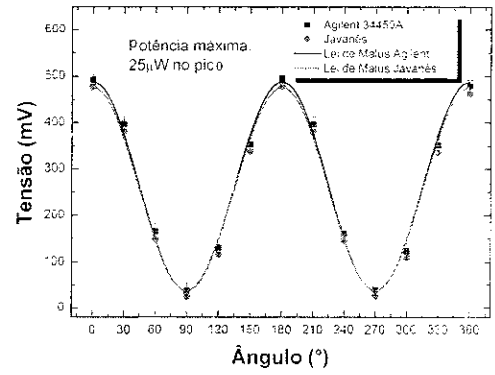
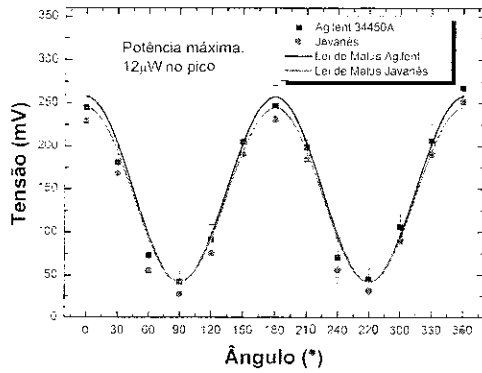
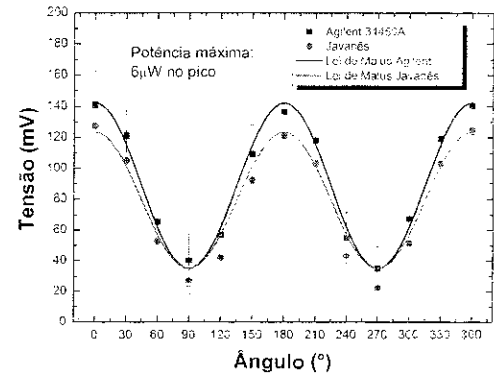
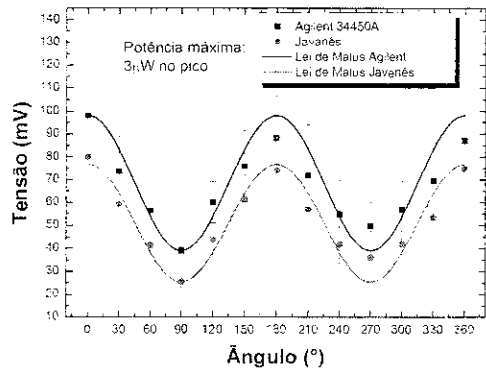
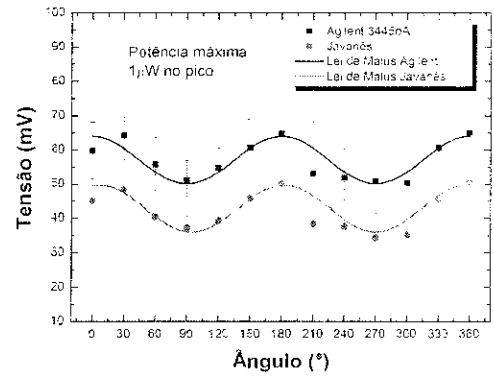
(a) 50 μW (b) 25 μW (c) 12 μW (d) 6 μW (e) 3 μW (f) 1 μW

Figura 3.5 -- Representação da lei da Malus DC para sinais de pequenas amplitudes.

Os resultados mostram a queda do desempenho do sistema na medida em que a potência óptica de entrada é reduzida. Isto fica evidente com o aumento da barra de erro (desvio padrão) em função do ruído. Neste sentido, podemos dizer, por simples análise visual dos gráficos, que o sistema em abordagem DC não foi adequado para medidas utilizando potências ópticas de entrada inferiores a $25 \mu W$.

Essa mesma metodologia é repetida para a abordagem AC com o intuito de comparar o desempenho para os dois sistemas em condições iguais.

A Figura 3.6 apresenta a tensão em função do ângulo para as seis potências ópticas de entrada, com o sistema operando em uma frequência de 500 Hz, ajustada no *Chopper*.

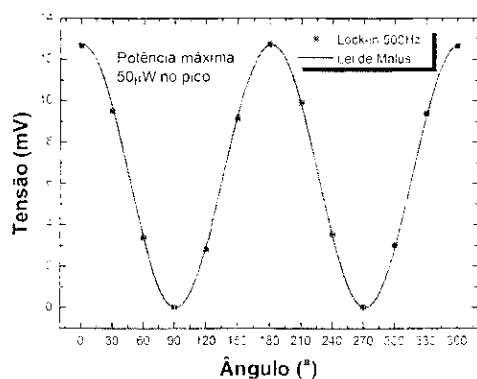
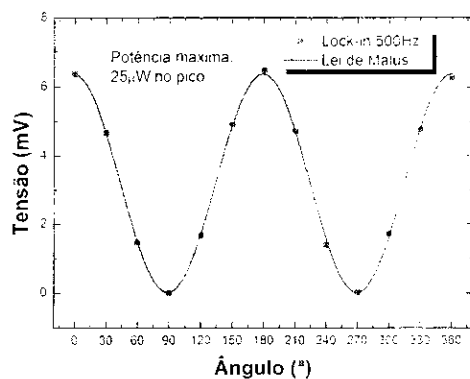
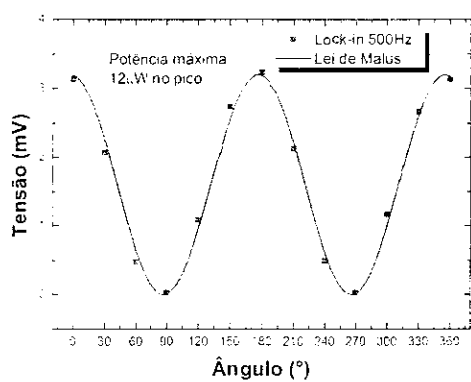
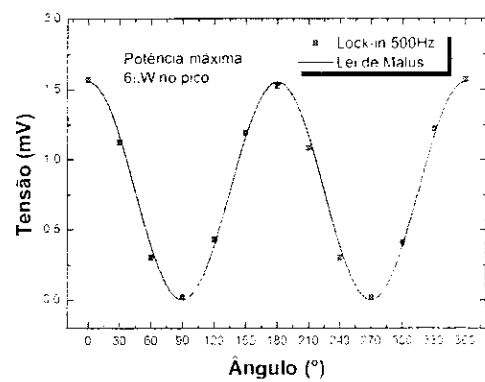
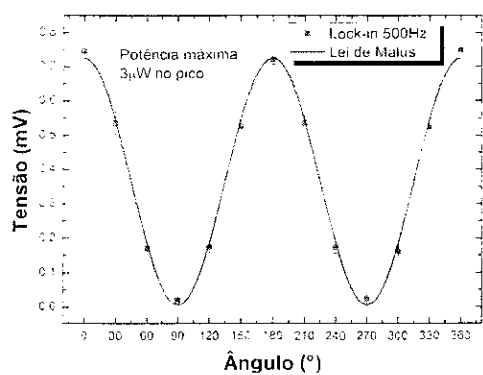
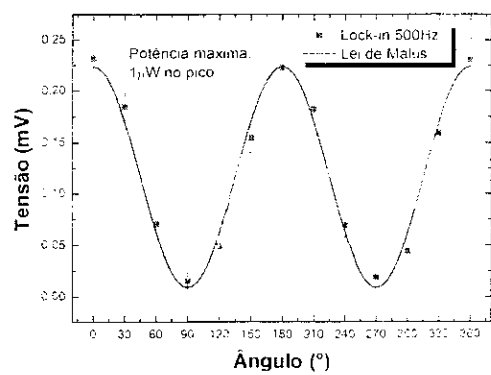
(a) 50 μW (b) 25 μW (c) 12 μW (d) 6 μW (e) 3 μW (f) 1 μW

Figura 3.6 Representação da lei da Malus AC para sinais de pequenas amplitudes.

O sistema AC se mostrou 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 $3 \mu W$. Neste sentido, concluímos, por simples análise visual dos gráficos, que o sistema em abordagem AC não foi adequado para medidas utilizando potências ópticas de entrada inferiores a $3 \mu W$.

3.3 Aplicação para o Sistema Optoeletrônico - Polarímetro

Após a caracterização do sistema, prosseguiremos para a montagem do polarímetro. Para isso, posicionamos os polarizadores cruzados (defasados de 90°) e introduzimos amostras de água com açúcar entre eles. A Figura 3.7 mostra o fenômeno da rotação do plano de polarização por uma solução opticamente ativa.

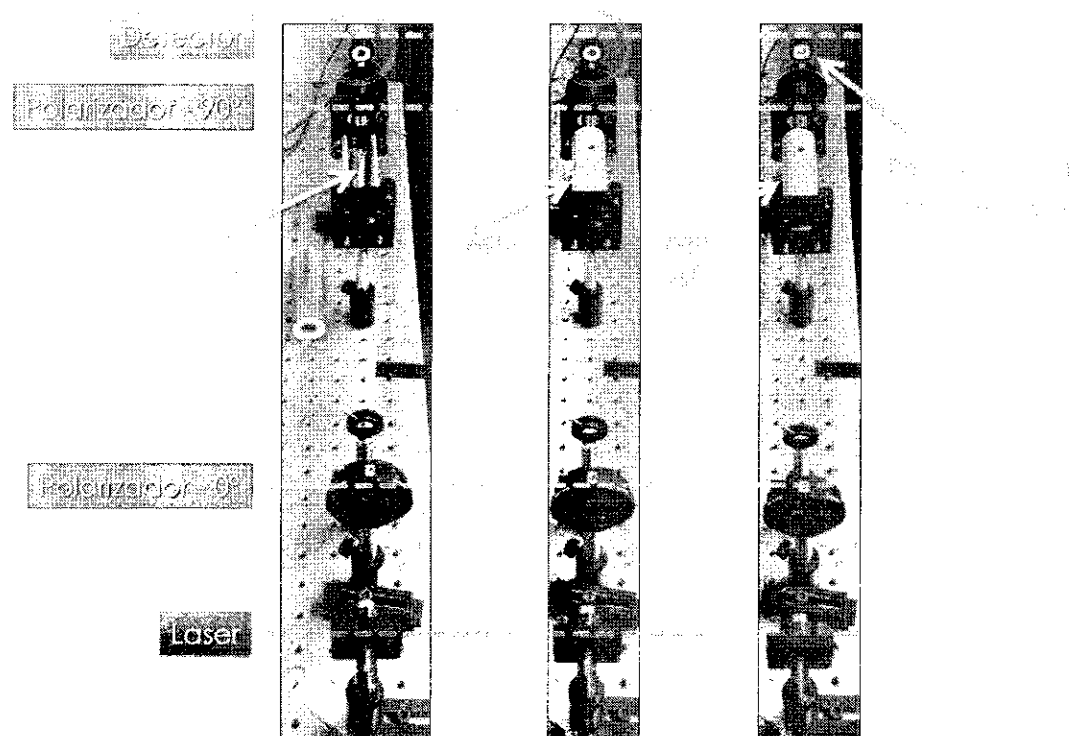


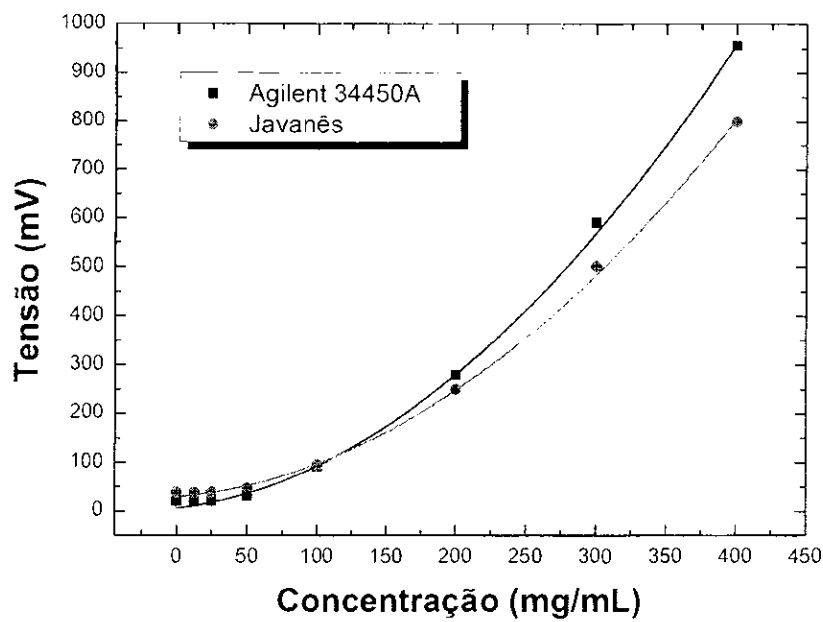
Figura 3.7 – Fenômeno da rotação do plano de polarização da luz causado por uma solução de água e açúcar.

Quando não há rotação do plano de polarização, a luz é bloqueada no segundo polarizador, fato que ocorre sem a presença de amostra ou com amostra de água pura. Já na

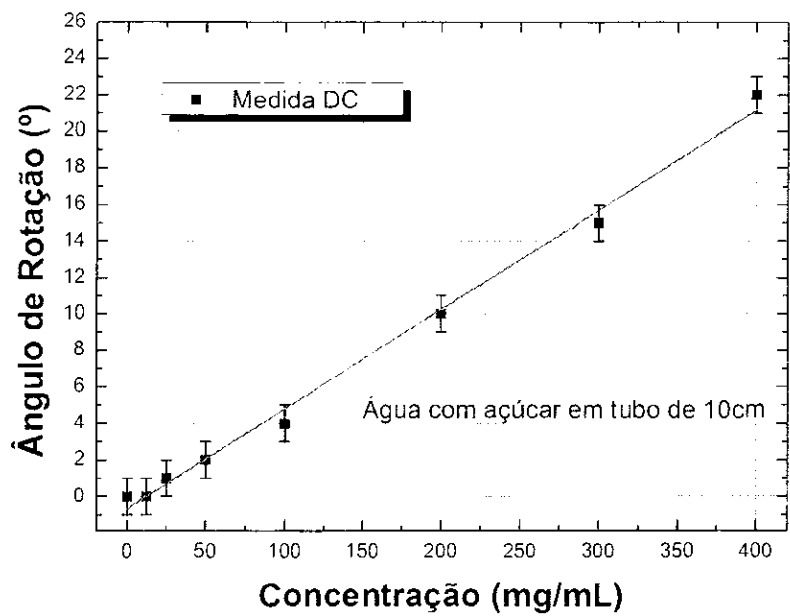
presença de substâncias opticamente ativas, como o açúcar, o desvio causado no plano de polarização faz com que uma parte da luz atravesse o segundo polarizador e chegue ao detector. O Açúcar refinado é composto de mais de 99% de sacarose, uma conhecida, talvez a mais comum, substância opticamente ativa [13].

A intensidade luminosa que passa pelo segundo polarizador (ou analisador) está diretamente relacionada com a concentração de açúcar na amostra. Podemos girá-lo até obter a mínima intensidade luminosa e assim descobrir o ângulo de desvio causado pela amostra. Este ângulo também é proporcional à concentração de açúcar na solução. Desta maneira, podemos obter informação da concentração de açúcar ao determinar o ângulo de desvio.

A Figura 3.8 apresenta o comportamento da potência óptica em abordagem DC para sete soluções de água com açúcar, além de uma amostra de água pura.



(a)



(b)

Figura 3.8 -- Resultados obtidos utilizando o polarímetro em abordagem DC. Em (a) temos a Tensão em função da concentração da amostra. Em (b) temos o ângulo de rotação óptico em função da concentração amostra.

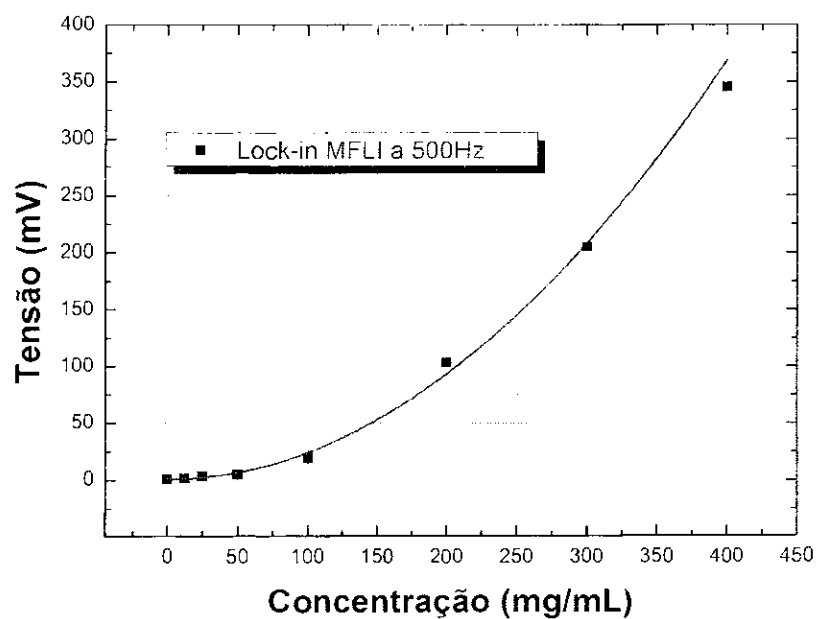
Analisando o gráfico (a), não observamos uma relação linear entre tensão e concentração da solução, mas sim uma relação cossenoidal quadrática por causa da lei de Malus. Todavia, como esperado, foi observada em (b) uma relação linear do do ângulo de rotação do plano de polarização em função da concentração da solução. A partir da relação linear do gráfico podemos obter uma sensibilidade de aproximadamente $0,0525^\circ$ para cada 1 mg/mL. Porém, como a resolução angular do analisador é de apenas 2° , a nossa resolução experimental é de aproximadamente 38 mg/mL. Ou seja, o sistema pode funcionar como um polarímetro DC para investigar a concentração de substâncias opticamente ativas de 38 em 38 mg/mL. Os dois equipamentos de medida DC apresentaram desempenhos semelhantes e satisfatórios se analisarmos cada instrumento separadamente.

Esse mesmo procedimento experimental é repetido para o polarímetro em abordagem AC com a luz sendo pulsada pelo *chopper* a 500 Hz.

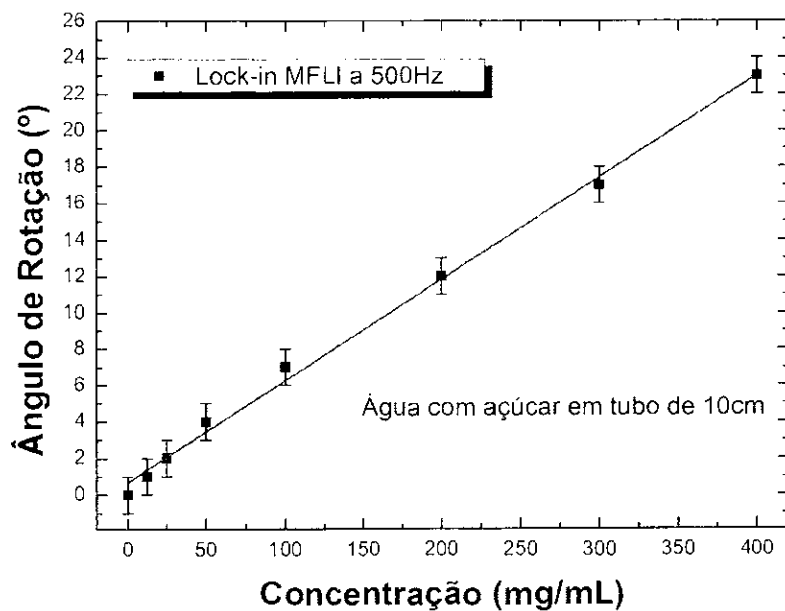
A Figura 3.9 apresenta o comportamento da potência óptica em abordagem AC para sete soluções de água com açúcar, além de uma amostra de água pura.

Os resultados obtidos foram semelhantes ao apresentado anteriormente na abordagem DC, observando-se discreta melhora na sensibilidade de aproximadamente $0,0575^\circ$ para cada 1 mg/mL. Porém, pelo mesmo motivo anterior, a sensibilidade experimental foi de aproximadamente 35 mg/mL.

A partir da análise dos resultados obtidos para os sistemas DC e AC pode-se dizer que ambos obtiveram êxito na aplicação proposta, apresentando desempenho e sensibilidade semelhantes. Entretanto, podemos melhorar o desempenho com alguns ajustes no sistema, como veremos a seguir.



(a)

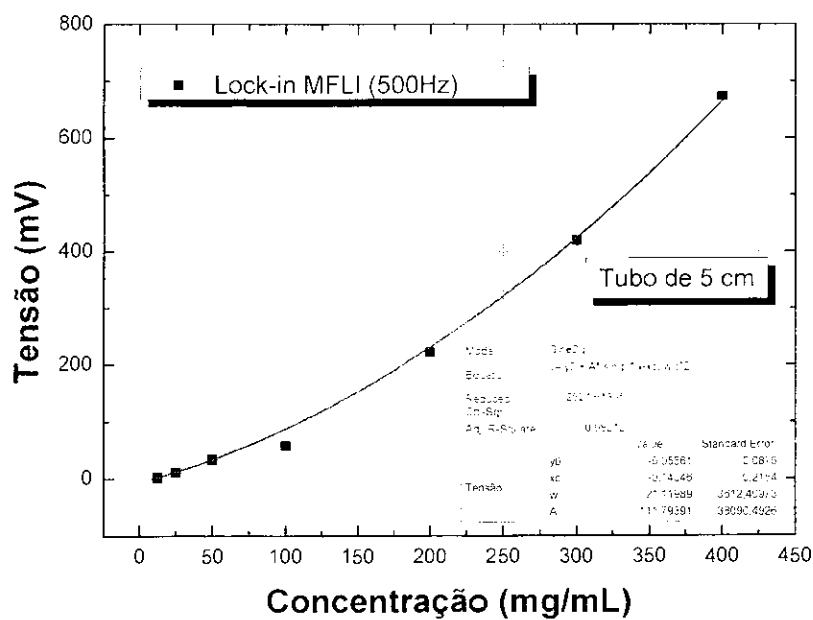


(b)

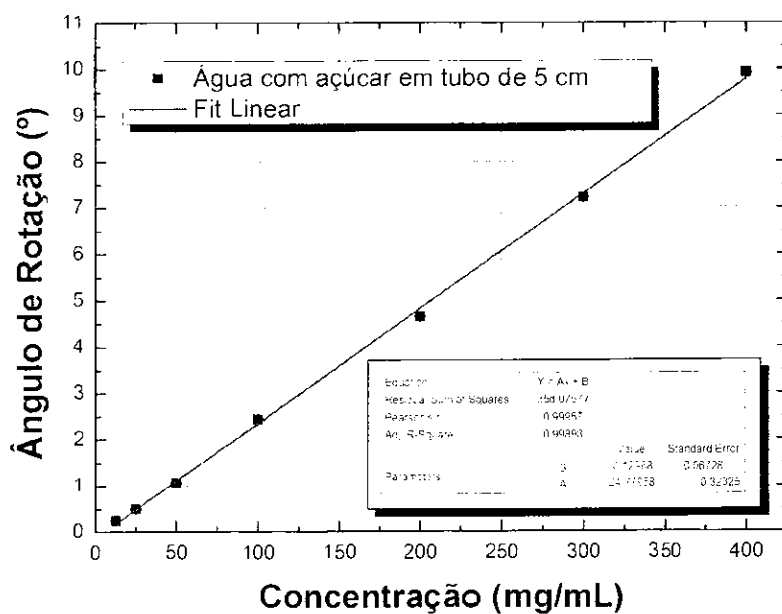
Figura 3.9 Resultados obtidos utilizando o polarímetro em abordagem AC. Em (a) temos a Tensão em função da concentração da amostra. Em (b) temos o ângulo de rotação óptico em função da concentração amostra.

3.4 Sistema AC Otimizado

Este sistema é uma evolução do sistema AC anterior e foi concebido para melhorar a resolução experimental, como veremos a seguir. O limite de detecção do novo sistema AC foi testado para um tubo porta amostra com a metade do tamanho (5 cm) com o intuito de diminuir o caminho óptico e avaliar a sensibilidade do sistema para uma situação de maior dificuldade de medida. As tampas do porta amostra foram desenvolvidas de tal maneira que permitissem facilmente a troca entre tubos de mesmo diâmetro. Desta forma, foi repetida a metodologia e procedimentos da abordagem AC. Os resultados estão expostos na Figura 3.10.



(a)



(b)

Figura 3.10 – Resultados obtidos utilizando o polarímetro em abordagem AC para a metade do caminho óptico. Em (a) temos a resposta da Tensão para diferentes concentrações. Em (b) temos a rotação óptica referente a cada amostra.

Ao reduzir à metade o caminho óptico reduzimos 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. Neste sentido, o sistema AC' se mostrou bastante estável em uma condição que o sistema DC' não conseguiria medir.

O resultado obtido na análise da tensão em função da concentração foram ainda melhores se comparados à medida AC' para 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.

Os resultados mostraram, mais uma vez, uma relação linear do desvio angular com a concentração, apresentando baixo erro devido à troca da montagem de rotação do analisador. A montagem atual apresenta resolução angular de 0.028° enquanto a montagem anterior chegava a apenas 2° .

A partir da reta da Figura 3.9 (b) obtém-se uma sensibilidade de aproximadamente 0.025° para cada 1 mg/mL, implicando na resolução experimental de aproximadamente 1.12 mg/mL - mais de 30 vezes mais sensível do que o sistema anterior.

3.5 Rotação Óptica Específica para o Açúcar

Para finalizar, obtivemos a rotação óptica específica do açúcar a partir da equação 1.6, reescrevendo-a de uma maneira mais conveniente:

$$\theta_R = [\alpha]_\lambda^T L C' \quad (3.1)$$

Em que $[\alpha]_\lambda^T$ é dado em grau, L em decímetros e C' em g/mL. Podemos dizer que $[\alpha]_\lambda^T L = \alpha$ e reescrever a equação 3.1:

$$\theta_R = \alpha C' \quad (3.2)$$

Em que α é a inclinação da reta da Figura 3.9 (b), sendo verificado o valor de 56.77° , que dividido pelo caminho óptico ($L = 1$ dm) nos dá uma rotação óptica específica ($[\alpha]_\lambda^T$)

de: $+56,77^\circ$, o que significa uma rotação dextrógira (+). Este valor 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. Isto, por sua vez, depende da concentração da amostra, da temperatura, do comprimento do tubo (caminho óptico), e do comprimento de onda da fonte de luz do polarímetro. Por isso, 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 [29]. 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 $56,7^\circ$ [73].

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 [74]. 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 [75].

CAPÍTULO 4

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.

Apresentamos uma técnica para a fabricação de placas de circuito impresso de até duas faces a partir do *dryfilm*. Este procedimento permite fabricar protótipos de boa qualidade com grande rapidez e baixo custo, portanto, pode ser utilizado em projetos de instrumentação científica. A utilização desta técnica permitiu também a rápida verificação de erros e necessidades no circuito sem grandes prejuízos. Durante este trabalho foram produzidos dois protótipos do condicionador de sinais pelo método do *dryfilm* antes da versão final, fabricada utilizando os serviços oferecidos por empresas comerciais nacionais.

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. Esta característica torna este circuito um medidor de potência óptica com resposta linear em regime DC e AC (até 20 kHz), podendo ser utilizado, inclusive, para outras aplicações. A limitação de frequência se deve aos circuitos integrados e ganhos utilizados, porém, com a devida substituição podem alcançar frequências maiores.

A lei de Malus foi utilizada para comparar os sistemas DC e AC. Os resultados mostraram que o sistema em regime AC tem maior resolução que o DC devido ao melhor desempenho de medida quando submetido a sinais de pequenas amplitudes.

A integração dos sistemas ópticos e eletrônicos para o desenvolvimento do polarímetro apresentou grande desempenho na determinação das concentrações de soluções de açúcar, tanto em regime DC quanto AC. No entanto, essa técnica possui o inconveniente de exigir uma quantidade relativamente grande de amostra (da ordem de mg), o que às vezes não é disponível [10]. Por outro lado, medir o ângulo de rotação para pouca quantidade de solução exige uma maior resolução do sistema, devido ao menor caminho óptico que implica um menor ângulo de rotação. Nesse sentido, a utilização da abordagem AC em conjunto com o Lock-in se mostrou mais eficiente quando submetido a amostras com a metade do caminho óptico (tubo de 5 cm) com o sistema AC otimizado. Desta maneira, acredita-se na utilização do Lock-in para medida de quantidades ainda menores (baixa concentração e ou pequeno caminho óptico). Espera-se, então, que o polarímetro desenvolvido neste trabalho seja o primeiro passo para construir um sistema de medida óptica preciso o suficiente para quantificar outros tipos de substâncias, como a glicose, já que vários trabalhos utilizam sistemas polarimétricos para este fim [76–80].

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.

Como perspectiva futura esperamos desenvolver um sistema de automatização para determinar o ângulo de rotação a partir do efeito Faraday. Outra opção, é linearizar a resposta do sensor a partir de uma rede neural implementada em microcontrolador evitando assim o ajuste manual para a medida angular [81,82]. Além disso, a fonte de luz será substituída por sistema desenvolvido recentemente que permite que o laser seja pulsado eletricamente [62].

Os circuitos integrados LM358 e INA121 podem ser trocados respectivamente pelos TL082 e INA217, sem a necessidade de alteração no projeto, com perspectiva de aumentar a frequência de operação para mais de 100 kHz.

A parte de alimentação do circuito condicionador de sinais apresenta o inconveniente de necessitar de fonte simétrica. Com isso, pretende-se alimentar todo o circuito com

apenas 5 V a partir do circuito integrado RP0505D, da RECOM. Este circuito integrado transforma os 5 V da USB ou outra fonte¹ em tensões de ± 5 V, -5 V e GND.

O amplificador Lock-in pode ser implementado em sistemas microcontrolados utilizando *dsPIC*[®] [49]. A exigência deste tipo de *hardware* é dada pela necessidade de amostrar os sinais do sensor e da referência simultaneamente para a implementação do Lock-in. Além disso, o condicionador de sinais foi proposto de tal forma a servir como primeiro passo para desenvolver a parte analógica de um amplificador Lock-in. Desta maneira pretende-se futuramente desenvolver um Lock-in a partir do *dsPIC*[®], para baixas frequências, utilizando o circuito do condicionador de sinais, integrando assim o sistema de medida com a aquisição de dados em um *hardware* único.

Esse desenvolvimento será em breve compartilhado a partir do paradigma de *open source hardware* [83-96]. Nesse sentido, todas as etapas para a produção das placas de circuito eletrônicos apresentados ao longo desse trabalho serão disponibilizadas em breve por meio da internet. O principal argumento apresentado dentro dessa concepção é que 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.

¹ Tomada do carregador de celular com saída USB, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- [1] Nussenzveig, H. M. (2014). **Curso de Física Básica** (5th ed., Vol. 2). Sao Paulo: Blucher.
- [2] Abayaratne, C. P., & Bandara, V. (2017). **A low-cost polarimeter for an undergraduate laboratory to study the polarization pattern of skylight**. American Journal of Physics, 85(3), 232-238. doi:10.1119/1.4971159.
- [3] Benenson, R. E. (2000). **Light polarization experiments with a diode laser pointer**. The Physics Teacher, 38(1), 44. doi:10.1119/1.880421.
- [4] D., Halliday, R., Resnick, & J., Walker. (2013). **Fundamentals of Physics Extended** (10th Edition). Wiley.
- [5] Tavares, A. D., Sosman, L. P., Fonseca, R. J., L. A. C. P. Da Mota, Muramatsu, M., Wetter, N. U., & Frejlich, J. (2008). **Using a photo-resistor to verify irradiance inverse square and Malus' laws**. AIP Conference Proceedings. doi:10.1063/1.2926855.
- [6] Dumitrascu, I., Dumitrascu, L., & Dorohoi, D. (2007). Virtual Experiments for Light Polarisation Study. AIP Conference Proceedings. doi:10.1063/1.2733198.
- [7] Tipler, P. A. (2006). **Física para cientistas e engenheiros: eletricidade e magnetismo, ótica** (6th ed., Vol. 2).
- [8] Vedam, K. (1998). **Spectroscopic ellipsometry: A historical overview**. Thin Solid Films, 313-314, 1-9. doi:10.1016/s0040-6090(97)00762-1.

- [9] Arwin, H. (1998). **Spectroscopic ellipsometry and biology: Recent developments and challenges**. *Thin Solid Films*, 313-314, 764-774. doi:10.1016/S0010-6090(97)00993-0.
- [10] Lima, V. L. E. (1997). **Os fármacos e a quiralidade: uma breve abordagem**. *Química Nova*, 20(6), 657-663.
- [11] Tompkins, H. G., & Irene, E. A. (2005). **Handbook of ellipsometry**. Norwich, NY: William Andrew Pub.
- [12] Mason, S. F. (2009). **Molecular optical activity and the chiral discriminations**. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 978-0521105637.
- [13] Carlini, N., Szanto, E., Seale, W., Jorge, F., Souza, F., Bechtold, L. & 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.
- [14] Olson, B. (1973). **A Precision Photoelectric Azimuthal Polarimeter**. *Optical Engineering*, 12(3). doi:10.1117/12.7971640.
- [15] de Assis Martorano, S. A., do Carmo, M. P., & Marcondes, M. E. R. (2014). **A História da Ciência no Ensino de Química: o ensino e aprendizagem do tema cinética química**. *História da Ciência e Ensino: construindo interfaces*. ISSN 2178-2911. 9, 19-35.
- [16] Machado, J. B., Boff, V., Dallegrave, A., Mendez, A. S. L., & Garcia, C. V. (2011). **Desenvolvimento de método analítico por polarimetria para doseamento de manitol em matéria-prima e solução injetável aplicado à indústria farmacêutica**. *Rev. Bras. Farm.*, 92(3), 203-207.
- [17] O., Bagatin, F. I., Simplicio, S. D., Santin, & O. S., Filho. (2005). **Rotação de Luz Polarizada por Moléculas Quirais: Uma Abordagem Histórica com Proposta de Trabalho em Sala de Aula**. *Química Nova na Escola*, v21 - a07.

- (<http://www.qnesc.sbq.org.br/online/qnesc21/v21a07.pdf>) (acesso em março de 2017).
- [18] Flores, J. L., Montoya, M., Garcia-Torales, G., & Alvarez, A. G. (2005). **Polarimeter with linear response for measuring optical activity in organic compounds**. *Novel Optical Systems Design and Optimization VIII*. doi:10.1117/12.617975.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Hall, J. S. (1948). **A photoelectric polarimeter**. *The Astronomical Journal*, 54, 39. doi:10.1086/106153.
- [25] Luna, H. G. (1985). **Polarimetric observations of IOTA and Theta 2 Orionis**. *Astrophysical Letters*, 24, 211-216.
- [26] Hecht, E. (2017). **Optics** (5th ed., Global Edition). Harlow: Pearson Education Limited.

- [27] 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.
- [28] Wilkinson, A. (1997). **Compendium of chemical terminology: iupac recommendations**. Oxford: Blackwell Science. ISBN: 0-86542-684-8
- [29] Willey, E. J. (1943). **A Photoelectric Polarimeter**. *Journal of Scientific Instruments*, 20(5), 71-75. doi:10.1088/0950-7671/20/5/302.
- [30] Hegedüs, R., Akesson, S., Wehner, R., & Horváth, G. (2007). **Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies**. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2080), 1081-1095. doi:10.1098/rspa.2007.1811.
- [31] Ropars, G., Gorre, G., Floch, A. L., Enoch, J., & Lakshminarayanan, V. (2011). **A depolarizer as a possible precise sunstone for Viking navigation by polarized skylight**. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 468(2139), 671-684. doi:10.1098/rspa.2011.0369.
- [32] Roslund, C., & Beckman, C. (1994). **Disputing Viking navigation by polarized skylight**. *Applied Optics*, 33(21), 475-1. doi:10.1364/ao.33.004754.
- [33] 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.
- [34] Kahr, B., & Claborn, K. (2008). **The Lives of Malus and His Bicentennial Law**. *ChemPhysChem*, 9(1), 43-58. doi:10.1002/ephc.200700173.
- [35] Lyle, R. E., & Lyle, G. G. (1964). **A brief history of polarimetry**. *Journal of Chemical Education*, 41(6), 308. doi:10.1021/ed041p308.
- [36] Da Piedade, M. E. (1993). **Polarimetria**. *Boletim da Sociedade Portuguesa de Química*, 48, 36-38.

- [37] Fowles, G. R. (1989). **Introduction to modern optics**. New York: Dover Publications.
- [38] Department of Physics - Kenyon College - (**PDF**) (acesso em março de 2017).
- [39] Skinner, C. A. (1925). **A Universal Polarimeter***. Journal of the Optical Society of America, 10(4), 491. doi:10.1364/josa.10.000491.
- [40] 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.
- [41] Rudolph, H. (1955). **Photoelectric Polarimeter Attachment**. Journal of the Optical Society of America, 45(1), 50. doi:10.1364/josa.45.000050.
- [42] 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.
- [43] Chen, K., Chu, Y., & Chen, J. (2012). **Applying the phase difference property of polarization angle for measuring the concentration of solutions**. Optics & Laser Technology, 44(1), 251-254. doi:10.1016/j.optlastec.2011.06.027.
- [44] Chou, C., Huang, Y., Feng, C., & Chang, M. (1997). **Amplitude Sensitive Optical Heterodyne and Phase Lock-in Technique on Small Optical Rotation Angle Detection of Chiral Liquid**. Japanese Journal of Applied Physics, 36(Part 1, No. 1A), 356-359. doi:10.1143/jjap.36.356.
- [15] 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.
- [46] 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.

- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] MICROCHIP. AN1115 - **Implementing Digital Lock-In Amplifiers Using the dsPIC DSC**. (PDF) (acesso em março de 2017).
- [50] Dorrington, A., & Kummeyer, R. (2002). **A simple microcontroller 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.
- [51] 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.2011.2172.
- [52] Armen, G. B. (2008). **Phase sensitive detection: the lock-in amplifier**. Department of Physics and Astronomy, The University of Tennessee.
- [53] Wolfson, R. (1991). **The lock-in amplifier: A student experiment**. American Journal of Physics, 59(6), 569-572. doi:10.1119/1.16824.
- [54] 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.
- [55] Oguz, Osman, (2002). **A Lock-In Amplifier for Fluorescent Light Detection**. Master's Thesis. University of Tennessee. .
- [56] 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.

- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Vitor Amadeu Souza (2014). **Controlador PID para diodo laser em modo pulsado usando DSC**. Dissertação de Mestrado Profissional em Física com ênfase em Instrumentação - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.
- [63] Edgar Monteiro da Silva (2015). **Sistema eletrônico para a produção e caracterização de sensores de pH baseado em dispositivos semicondutores do tipo EGFET**. Dissertação de Mestrado Profissional em Física com ênfase em Instrumentação - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.
- [64] Ivana Mara Gomes Andersen Cavalcanti (2016). **Sistema experimental para medidas de espessura de filmes finos de Hidroxiapatita usando Elipsometria com Polarizadores Fixos**. Dissertação de Mestrado Profissional em Física com ênfase em Instrumentação - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

- [65] TEXAS INSTRUMENTS, LM158-N, LM258-N, LM358-N, LM2904-N Low Power Dual Operational Amplifier. Data Sheet March 2017.
- [66] BURR-BROWN. INA121 FET-Input, Low Power Instrumentation Amplifier. Data Sheet 2009.
- [67] THORLABS, SM05PD2A – Mounted Si Photodiode. SpecSheet 2012. (<https://www.thorlabs.com/drawings/25110332e285b83b-D4F9D4DF-5056-0103-793E22A69AC0523A/SM05PD2A-SpecSheet.pdf>).
- [68] MICROCHIP, AN1494 - Using MCP6491 Op. Amps for Photodetection Applications, (PDF).
- [69] FAUTH, Leduc H. de A., MONTEIRO, Edgar, BATISTA, Pablo D. (2017). **Faça você mesmo: Placas de circuito impresso de dupla face usando método fotográfico**. CBPF. Notas Técnicas. v. 7, n. 1, p. 9–17, 2017. doi: 10.7437/NT2236-7640 2017.01.002.
- [70] <http://www.altium.com/> (acesso em março de 2017).
- [71] <https://www.thorlabs.com> (acesso em março de 2017).
- [72] Camparo, J. C. (1985). **The Diode Laser in Atomic Physics**. Contemporary Physics. 26(5), 443-477. doi:10.1080/00107518508210984.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.

-
- [76] 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.
 - [77] 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.
 - [78] 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.
 - [79] 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.
 - [80] 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.
 - [81] Medrano-Marques, N., & Martin-Del-Brio, B. (2001). **Sensor linearization with neural networks**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48(6), 1288-1290. doi:10.1109/41.969414.
 - [82] Yang, Z., & Jia, H. (2013). **Improving the accuracy of optical rotation measurement based on optical null methods by curve-fitting**. Review of Scientific Instruments, 84(5), 053104. doi:10.1063/1.4804596.
 - [83] PEARCE, J.M. **Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware**. Science, Vol: 337, 14 September 2012.
 - [84] 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.

-
- [85] HARNETT,C. **Open Source Hardware for Instrumentation and Measurement**. IEEE, Instrumentation & Measurement Magazine, (2011).
- [86] 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.
- [87] CHRISTIAN,W.; ESQUEMBRE,F.; BARBATO,L. **Open Source Physics**. Science, Vol: 334, 25 November 2011.
- [88] PEARCE,J.M. **Commentary: Open-source hardware for research and education**. Physics Today, 66, (11), 8, 2013. doi: 10.1063 PT.3.2160.
- [89] ANZALONE,G.C.; GLOVER,A.G.; PEARCE,J.M. **Open-Source Colorimeter**. Sensors, 2013, 13, 5338-5346.doi:10.3390/s130405338.
- [90] KELLEY,C.D. et al. **An Affordable Open-Source Turbidimeter**. Sensors, 2014, 14, 7142-7155; doi:10.3390/s140407142.
- [91] 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.
- [92] RORDEN,C.;HANAYIK, T. **StimSync: Open-source hardware for behavioral and MRI experiments**. Journal of Neuroscience Methods, 227, 2014, pp. 90–99.
- [93] URBAN,P.L. **Open-Source Electronics As a Technological Aid in Chemical Education**., J Chem. Educ. 2014, 91, pp. 751752.
- [94] WIJNEN,B.;HUNT,E.J.;ANZALONE,G.C. JM Pearce **Open-Source Syringe Pump Library**. PLOS ONE, September 2014,v. 9,n. 9.
- [95] 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.

- [96] BONACCORSI, A.; ROSSI, C. **Why Open Source software can succeed**, Research Policy, 32, 2003, pp. 1243-1258.

APÊNDICES

APÊNDICE A

ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO
ELETRÔNICO DO CONDICIONADOR DE
SINAIS

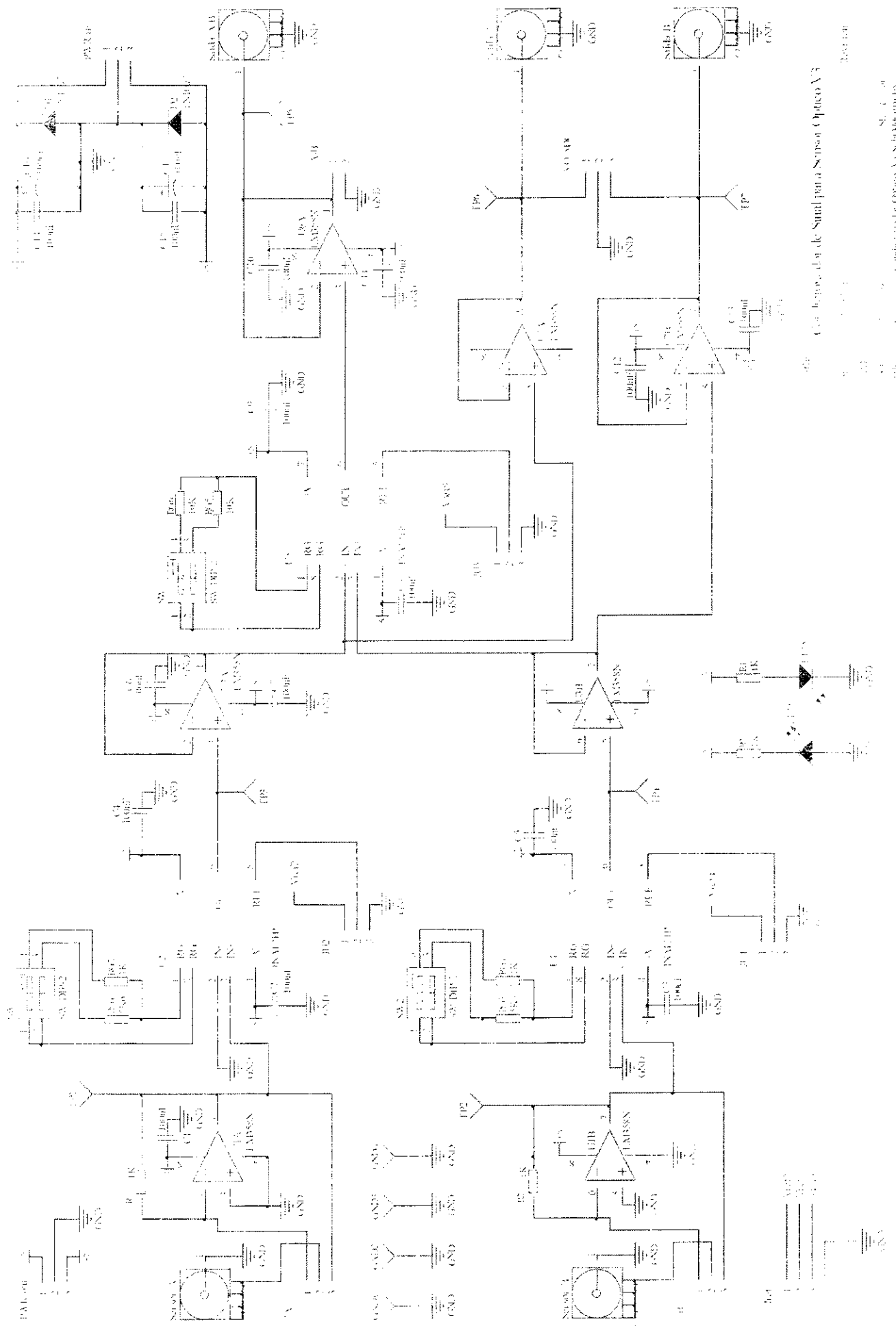


Fig. 1. Circuito de Sinal para a Tela (Optico A3)

1000

1000

1000

1000

1000

1000

1000

1000

1000

1000

1000

1000

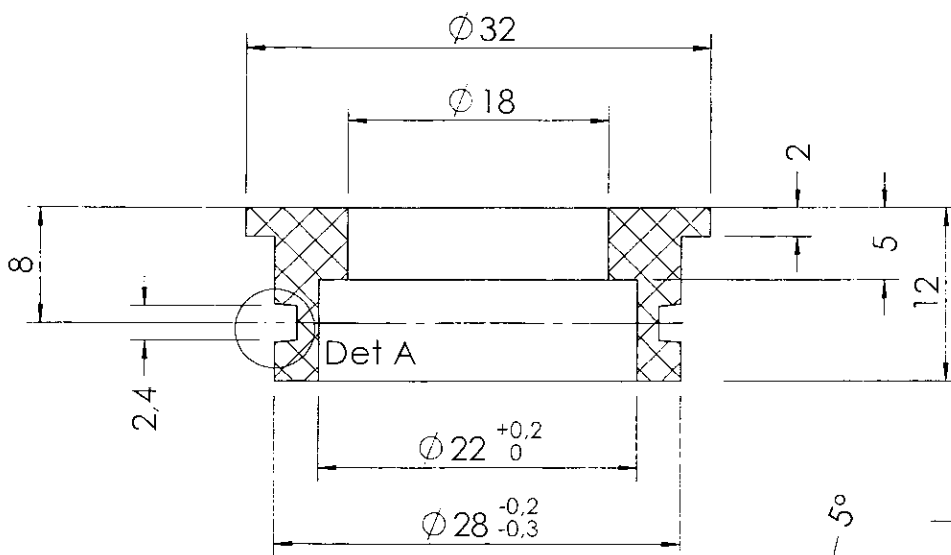
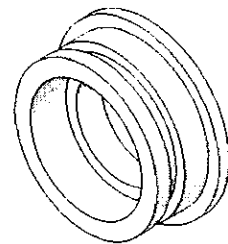
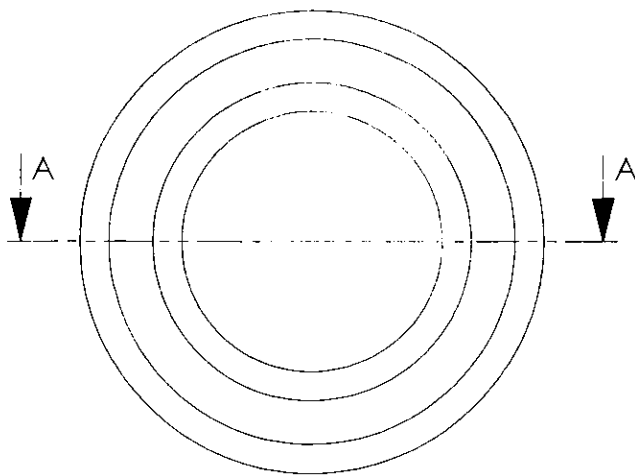
APÊNDICE B

SUPORTE DE LENTE PARA O PORTA

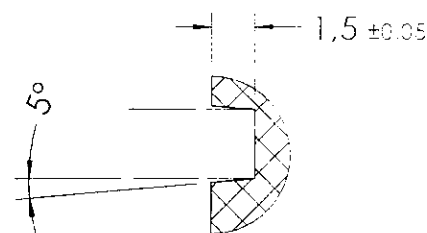
AMOSTRA

APÊNDICE C

MONTAGEM DO PORTA AMOSTRA EM TUBO DE 10 CM



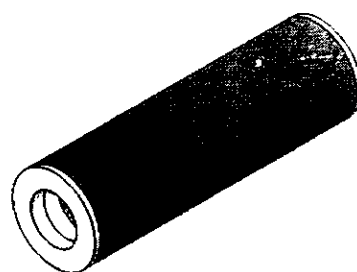
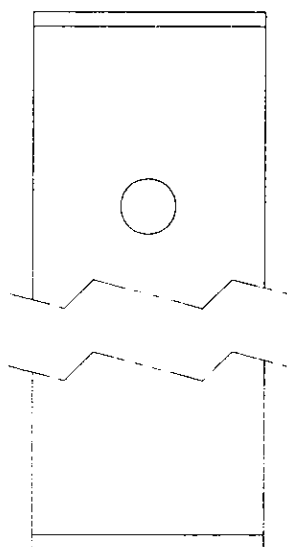
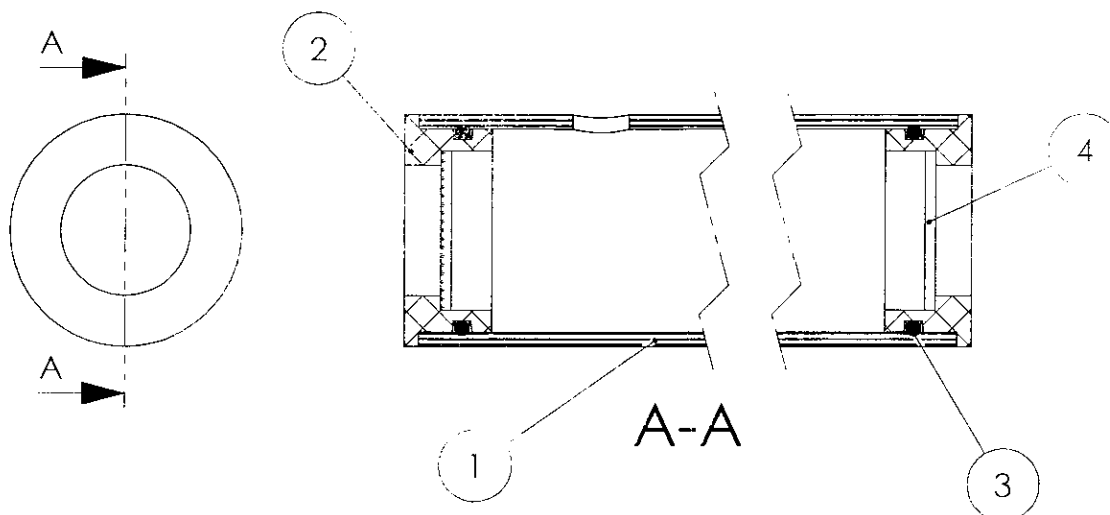
CORTE A-A



Det A (4 : 1)

OBS.: 1) ACABAMENTO SUPERFICIAL GERAL $R_a = 3 \pm 0,2 \mu m$;
2) SUAVIZAR CANTOS VIVOS.

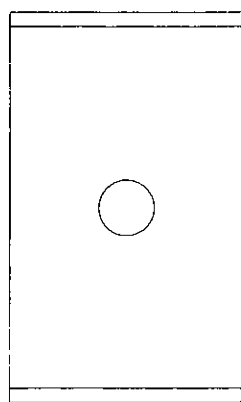
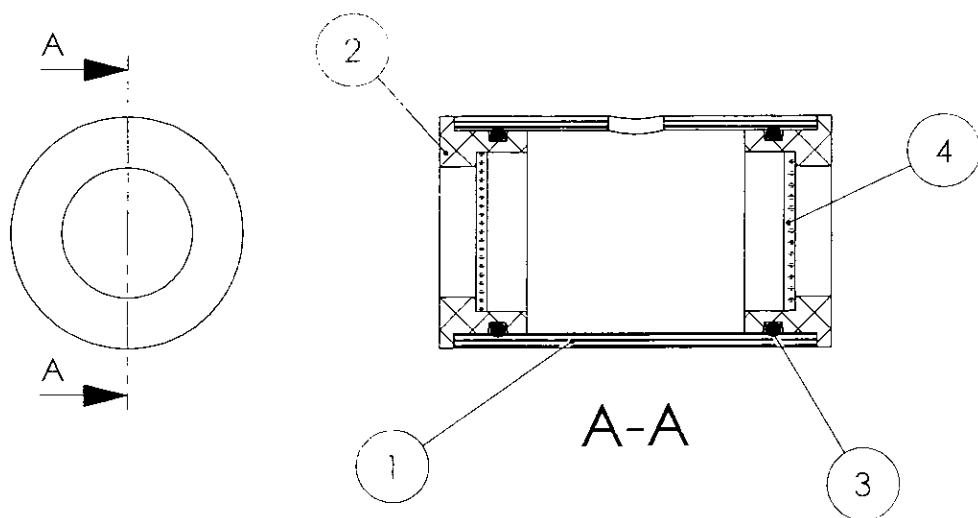
TOLERÂNCIA LONGITUDINAL DIN 7168									TOLERÂNCIA ANGULAR DIN 7168					
DIMENSÃO	> 0,5	> 3	> 6	> 30	> 120	> 315	> 1000	> 2000	DIMENSÃO	COMPRIMENTO DO LADO CURTO				
GRÁU	≤ 3	≤ 6	≤ 30	≤ 120	≤ 315	≤ 1000	≤ 2000	≤ 4000	GRÁU	≤ 10	> 10 ≤ 50	> 50 ≤ 120	> 120	
MÉDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	FINO/MÉDIO	±1°	±30'	±20'	±10'	
2								2	TECNIL					
ITEM	DENOMINAÇÃO							QUANT.	MATERIAL			ARQUIVO		
	INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA								VISTO			DATA		
	É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE DESENHO								PROJETADO			07/06/2014		
								DESENHADO			VILSON		13/06/2014	
								REVISADO						
								APROVADO						
								REVISÃO						
PALAVRA CHAVE 1:	-													
PALAVRA CHAVE 2:	-													
PALAVRA CHAVE 3:	-													
ESCALA 2:1	TÍTULO							PÁG. 1/1	SUBSTITUI O					
COTAS EM mm	SUPORTE DA LENTE							CÓDIGO	SUBSTITUIDO PELO					
									ARQUIVO SUPORTE.DRW					



4	Lente	2	Quartzo Temperado	COMERCIAL
3	O-RING 25,0 X 1,75mm	2	Nitrilica (NBR)	COMERCIAL
2	SUPORE DA LENTE	2	TECNIL	SUPORE.DRW
1	TUBO 100 mm	1	PVC	TUBO.DRW
ITEM	DENOMINAÇÃO	Quant.	MATERIAL	ARQUIVO
	INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA		PROJETADO	VISTO
	É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES DESENHOS		DESENHADO	LEDUC
	PALAVRA CHAVE 1: -		REVISADO	VILSON
	PALAVRA CHAVE 2: -		APROVADO	
PALAVRA CHAVE 3: -		REVISÃO		
ESCALA	TÍTULO	PÁG.	SUBSTITUI O	
1:1		1 / 1	SUBSTITUIDO PELO	
COTAS EM mm		CÓDIGO	ARQUIVO	
	SUPORE DE LENTE PARA POLARÍMETRO		MONTAGEM.DRW	

APÊNDICE D

MONTAGEM DO PORTA AMOSTRA EM
TUBO DE 5 CM



4	Lente	2	Quartzo Temperado	COMERCIAL	
3	O'RING 25,0 X 1,75mm	2	Nitrilica (NBR)	COMERCIAL	
2	SUPORE DA LENTE	2	TECNIL	SUPORE.DRW	
1	TUBO 50 mm	1	PVC	TUBO.DRW	
ÍTEM	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	ARQUIVO	
	INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA			VISTO	DATA
			PROJETADO	LEDUC	07/06/2016
	É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES DESENHOS		DESENHADO	VILSON	13/06/2016
PALAVRA CHAVE 1: -			REVISADO		
PALAVRA CHAVE 2: -			APROVADO		
PALAVRA CHAVE 3: -			REVISÃO		
ESCALA 1:1	TÍTULO SUPORE DE LENTE PARA POLARÍMETRO		PÁG. 1 / 1	SUBSTITUI O	
COTAS EM mm			CÓDIGO	SUBSTITUIDO PELO	
				ARQUIVO	MONTAGEM.DRW

“Desenvolvimento de um Sistema Optoeletrônico para Medida da Rotação do Plano de Polarização da Luz”

Leduc Hermeto de Almeida Fauth

Tese apresentada no Centro Brasileiro de
Pesquisas Físicas, fazendo parte da Banca
examinadora os seguintes Professores:

Pablo Diniz Batista – CBPF

Tobias Heimfartk – UFFS

Luiz Carlos Sampaio Lima – CBPF

Odilon Divino Damasceno Couto Júnior – Unicamp

Herman Pessoa Lima Júnior - CBPF

Rio de Janeiro, 19 de maio de 2017