



UFU - Universidade Federal de Uberlândia
Física Licenciatura - INFIS

MARCOS GARCIA DE OLIVEIRA JÚNIOR

**Proposta para o estudo de polarização da luz no ensino médio através da
medida de rotação em soluções opticamente ativas**

UBERLÂNDIA-MG
2015

MARCOS GARCIA DE OLIVEIRA JÚNIOR

Proposta para o estudo de polarização da luz no ensino médio através da medida de rotação em soluções opticamente ativas

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Física Licenciatura da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para conclusão do curso.

Orientador: Prof.Dr. Djalmir Nestor Messias

**UBERLÂNDIA-MG
2015**

MARCOS GARCIA DE OLIVEIRA JÚNIOR

Proposta para o estudo da polarização da luz no ensino médio através da medida de sua rotação em soluções opticamente ativas

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Física da
Universidade Federal de Uberlândia,
como requisito parcial para a obtenção
do título de licenciado em Física.



Prof. Dr. Djalnir Nestor Messias (orientador)



Prof. Dr. Jader de Souza Cabral



Prof. Dr. Wellington Akira Iwamoto

08 de dezembro de 2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha amada mulher, amante e alma, Fabiana Dias, a meus pais Wanderléa e Marcos por concederem a mim a chance de existir, ao meu padrasto por sempre dar-me sorrisos quando vim a precisar e a meus irmãos, por me fazerem seguir a vida com passos dados juntos e guiados.

*“[...]Sábio é aquele que conhece os limites da
própria ignorância [...]”
Sócrates*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha amada, que acompanhou-me durante esses anos finais, dando recomeços, caminhos e passos, assim como novos ares para sentir. A você meu amor deixo a clara menção de trabalhos que hoje além de apenas um robby, um seguimento para afortunar nosso futuro e tornar eterno esse sorriso que sempre vem a trazer. A você meu amor que me trouxe o significado do que é amar e cuidar. A ti deixo os meus principais e longínquos agradecimentos.

A minha mãe Wanderléa, que junto a mim superou obstáculos, que me forçou a viver, que juntamente com brigas e cuidados, me fez redescobrir os objetivos, que me fez renascer, a ti dou a graça de caminhar sempre ao meu lado, de segurar a minha mão quando não podia levantar, a ela dou as minhas felicitações, a graça de um amor incondicional que tive a honra de precenciar.

Ao meu pai Marcos, por apoiar econômica e fisicamente, a transpor as distâncias, a estar ao meu lado nas decisões que atribuí, a me fazer continuar com o desejo próprio de lutar, de buscar ser feliz, ao senhor meu pai, a graça resta aqui além de palavras, mas, que possa sentir.

Ao meu Padrasto Gaspar por sempre trazer amor e recompensar a vontade de viver, a ser amigo, a me mostrar como brincar e como na vida todas as lacunas não de se preencher, e a você que foi aquele que pude claramente mostrar sobre o que é dar e receber.

Aos meus irmãos, Karine e Dário, primeiramente a minha Flor que sempre me faz ter vontade de cuidar, que fiz a primeira palavra falar, que sempre mostra seu carinho. Ao meu irmão por ter caminhado grande parte da minha vida me ensinando, me fortalecendo e até mesmo cuidando.

Agradeço a todos os meus professores por suportarem minha forma distinta de ser.

Ao meu orientador Djalmir por sua parceria e orientação me ter feito chegar aqui e cada vez mais aprender e ensinar, sobre tudo e o porque.

E a UFU por aqui me receber, me dar de seu caminho e sustento em busca constante de crescimento.

GARCIA, M. O. J., **Proposta para o estudo da polarização da luz no ensino médio através da medida de sua rotação em soluções opticamente ativas**, 2015. Páginas f. Monografia (graduação) – Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2015.

RESUMO

Medidas simples de rotação óptica podem ser sensivelmente melhoradas sem o uso de quaisquer equipamentos caros. Os dados com e sem uma amostra são adquiridos em simultâneo enquanto se roda manualmente o analisador. Nesse trabalho, medimos as rotações ópticas de polarização em um sistema de uma amostra de água com diferentes concentrações de açúcar. Um feixe de uma fonte de luz é dividida em dois feixes detectados por dois sensores de luz. O primeiro feixe passa através de um polarizador e de um analisador, o segundo feixe também passa através de uma amostra. As amostras foram soluções coloidais de água e açúcar. As concentrações de açúcar usadas tiveram uma variação de 0,03 g/ml até 0,18 g/ml. Devido à facilidade de encontrar a rotação óptica de polarização, nós propomos o uso desta técnica no ensino médio, a fim de estudar essa importante propriedade da luz.

Palavras Chave: rotação óptica, sacarose, polarização.

Garcia, m. O. J., **Proposal for the study of light polarization in secondary education through rotation in your measure solutions optically active**, 2015. Pages f. Monografia (graduação) – Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015. Uberlândia, 2015

ABSTRACT

Simple measures of optical rotation can be substantially improved without the use of any expensive equipment. The data with and without a sample are acquired simultaneously while manually rotating the analyzer. In this work, we measured the optical polarization rotation in a system of water samples with different concentrations of sugar. A beam laser is split into two beams detected by two light sensors. The first beam passes through a polarizer and an analyzer, the second beam also passes through a sample. The samples were a colloidal solution of water and sugar cane. The sugar concentration varied in the range of 0.03g / ml to 0.18g / ml. As an optical polarization rotation we propose the use of this technique in high school education in order to study this important property of light.

Keywords: optic rotatory, sucrose, polarization.

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1: Propagação de onda na vertical. Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-17/aula-17.html>>

Figura II.2: Propagação de onda na horizontal. Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-17/aula-17.html>>

Figura II.3: Criando uma onda polarizada em uma corda a partir de uma onda não polarizada com um filtro polarizador. Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica4/Aulas/Aula-17/aula-17.html>>

Figura II.4: Demonstração de polarização por absorção. Disponível em: <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504306&chapterid=2756>>

Figura II.5: Um feixe verticalmente polarizado incide em uma lâmina polarizadora com seu eixo de transmissão x' fazendo um ângulo θ com a vertical. Apenas a componente $E \cos \theta$ é transmitida através da segunda lâmina e o feixe transmitido está linearmente polarizado no eixo de transmissão x' . Se a intensidade transmitida pela segunda lâmina é $I_0 \cos^2 \theta$ (TIPLER, fig 31-28).

Figura II.6: Polarização por reflexão. Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica4/Aulas/Aula-17/aula-17.html>>

Figura II.7: Luz polarizada incidente no ângulo de polarização. Quando a luz incidente está polarizada com $E \rightarrow$ no plano de incidência, não há raio refletido. (TIPLER, fig 31-31).

Figura II.8: Reflexão Interna Total (disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/368623/>>)

Figura II.9: Polarização por espalhamento. Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-17/aula-17.html>>

Figura II.10: Polarização por birrefringência: Disponível em: <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-17/aula-17.html>>

Figura III.1: Atividade óptica apresentado pelo quartzo. (Hecht, fig. 8.47).

Figura III.2: Mãos esquerda e direita do cristal de quartzo. (Hecht, fig. 8.48). **Figura**

III.3: A sobreposição de um estado R e L em $z = 0$. (Hecht, fig. 8.49).

Figura III.4: A sobreposição de um estado R e L em $z = z'$ ($k_L > k_R$). (Hecht, fig. 8.50).

Figura IV.I a) e b): Funções por $\cos^2 \varphi$ e $\cos^2 (\varphi + \theta)$ apresentada contra o ângulo φ e $\cos^2 (\varphi + \theta)$ por $\cos^2 \varphi = 5^\circ$, $a/A = \sin 2\theta$. (Kraftmakher, Y. (2009). Measurement of small optics polarization rotations, p. 273)

Figura V.1: Modelo do Experimento

Figura V.2: Amostra 2 por ângulo

Figura V.3: Gráfico da Elipse da Amostra de 0,06 g/ml

Figura V.4: Figura V.2 com os eixos margens de a e A

Figura V.5: Gráfico concentração por ângulo

Figura V.6: Comprimento de onda e rotação óptica específica

LISTA DE TABELAS

Tabela V.1: Tabela de preços para montagem do aparato experimental

Tabela V.2: Tabela de concentrações

Tabela V.3: Dados de Tensão encontrado para os feixes refratados para cada ângulo de polarização.

Tabela V.4: Tabela dos valores de θ encontrados pela Eq. IV.1

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução.....	13
CAPÍTULO II – Polarização e Suas Características.....	14
II.1 – Polarização.....	14
<i>II.1.1 – Polarização por absorção.....</i>	<i>16</i>
<i>II.1.2 – Polarização por reflexão.....</i>	<i>18</i>
<i>II.1.3 – Polarização por espalhamento.....</i>	<i>20</i>
<i>II.1.4 – Polarização por birrefringência.....</i>	<i>21</i>
CAPÍTULO III – Atividade Óptica ou Rotação Óptica.....	23
III.1- Atividade Óptica.....	23
CAPÍTULO IV – Rotação óptica em meios como o açúcar.....	27
IV.1 –Construção do Experimento.....	27
<i>IV.1.1 – Uma abordagem diferente para a medida de atividade óptica.....</i>	<i>27</i>
CAPÍTULO V – Materiais E Métodos.....	31
V.1- Amostra.....	31
V.2- Preparação da Amostra.....	33
V.3- Resultado e Análise de Dados.....	33

CAPÍTULO VI - Conclusões.....	40
CAPÍTULO VII – Referências Bibliográficas.....	41
COMPLEMENTO 1 – EQ. IV.1	43

CAPÍTULO I

Introdução

A óptica desde o princípio da história da humanidade tem mostrado sua utilidade, através do sentido que as pessoas mais confiam, usando desde espelhos até grandes telescópios ou mesmo na aplicação médica de análise clínica, e vários outros aspectos de utilidade no cotidiano.

Desde o seu princípio em estudos nas ciências físicas, a óptica teve inúmeros pontos de transformação, seja como sua forma de ser analisada, a grande necessidade de entender o que vemos foi desde os primórdios o que mais incentivou o conhecimento humano, assim a óptica sempre foi um conteúdo amplamente estudado por todos os grandes racionalistas da história.

Lembrando que a luz passou por diferentes formas de sua compreensão, como os gregos e Newton que descreviam a luz como partículas e Huygens que conseguiu explicar o fenômeno de difração usando a teoria do comportamento ondulatório da luz, essa na qual pode ser comprovada através dos estudos de Maxwell sobre o comportamento das ondas eletromagnéticas que até hoje é muito usado, mesmo tendo na mecânica quântica o entendimento de que a luz é as vezes onda as vezes partícula, assim descrita como onda-partícula.

A polarização, dentro da óptica, tem também sua aplicação clara no dia a dia, hoje, por exemplo, as telas de celulares, nas antenas de radio ou TV.

Sendo uma característica das ondas eletromagnéticas, a polarização, pode ser produzida por quatro fenômenos a partir de ondas não polarizadas: absorção, reflexão, espalhamento, birrefringência (também conhecido como dupla refração).

Nesse trabalho usando esse conhecimento através do comportamento das ondas eletromagnéticas se propagando em alguns meios materiais é que entenderemos o que foi chamado de rotação óptica ou atividade óptica e a sua aplicação de forma simplificada e barata dentre o cotidiano em sala de aula.

No capítulo II serão apresentadas cada uma dessas características e também suas aplicações.

Nos capítulos seguintes iremos apresentar o projeto teórico e prático relacionado ao trabalho de rotação óptica utilizando soluções de açúcar, assim como a repercussão dos resultados e suas determinadas conclusões.

CAPÍTULO II

POLARIZAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS

II.1 - Polarização

Uma onda eletromagnética é formada por campos elétricos e magnéticos que variam no tempo e no espaço, perpendicularmente um ao outro. A direção de polarização de uma onda eletromagnética é definida como a direção de oscilação do campo elétrico dessa mesma onda.

“A polarização é uma propriedade de todas as ondas eletromagnéticas. Ela é usada comumente na tecnologia atual. Por exemplo, as antenas de televisão inglesas e estadunidenses diferem quanto a orientação da polarização detectada, as inglesas são orientadas para detecção da componente vertical enquanto as americanas são orientadas na horizontal.” (Halliday et al., 2009, p. 13)

A polarização pode ser entendida usando o exemplo de uma corda vibrante. Em uma corda em equilíbrio ao longo do eixo Ox , os deslocamentos podem ocorrer ao longo do eixo Oy , como na **FIGURA II.1**.

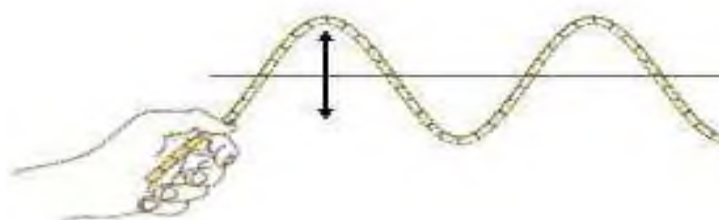


Figura II.1: Propagação de onda no eixo Oy

Nesse caso, a corda sempre fica contida no plano xy . No entanto, os deslocamentos também poderiam ocorrer ao longo do eixo Oz , como na **FIGURA II.2**.

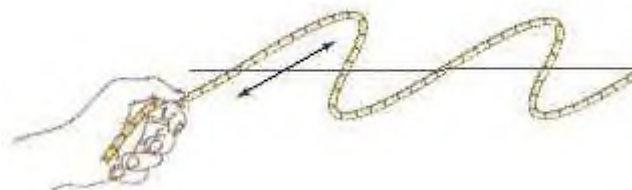


Figura II.2: Propagação de onda no eixo Oz

Para ondas mecânicas, podemos fazer um filtro polarizador, ou simplesmente polarizador, o qual deixa passar somente componentes da onda com polarização em determinada direção. Na **FIGURA II.3** a corda pode deslizar verticalmente através da fenda sem atrito, porém nenhum movimento horizontal pode ocorrer. Dizemos que esse filtro deixa passar ondas polarizadas na direção y , mas bloqueia aquelas na direção z .

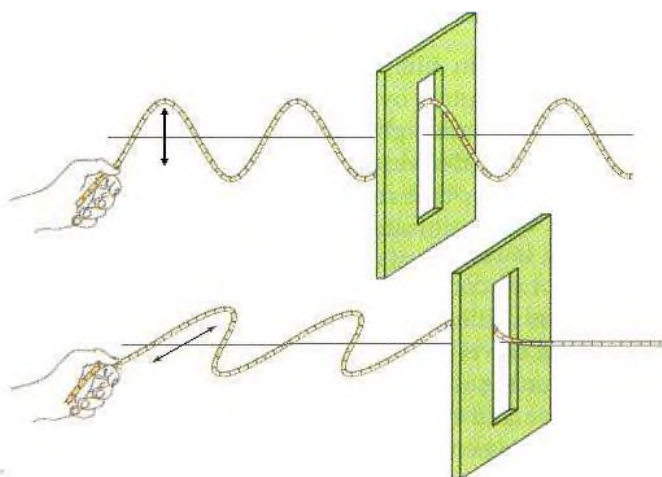


Figura II.3: Criando uma onda polarizada em uma corda a partir de uma onda não polarizada com um filtro polarizador

Assim as ondas não polarizadas podem tornar-se polarizadas utilizando um polarizador.

“As ondas eletromagnéticas produzidas por uma lâmpada elétrica, por exemplo, não são polarizadas ou podemos dizer que são polarizadas aleatoriamente. Isso quer dizer que a direção do campo elétrico muda aleatoriamente com o tempo, embora se mantenha perpendicular à direção de propagação da onda.” (Halliday et al. 2009, p. 14)

Como descrito no Capítulo I, há quatro fenômenos que produzem a polarização. E cada um deles será comentado brevemente agora.

II.1.1 POLARIZAÇÃO POR ABSORÇÃO

Vários cristais naturais, quando cortados em formatos apropriados, absorvem e transmitem luz diferentemente, dependendo da polarização da luz. Estes cristais podem ser usados para produzir luz linearmente polarizada. Em 1938, E.H. Land inventou uma lamina polarizadora comercial simples chamada de Polaróide. Este material contém longas cadeias de moléculas de hidrocarbonetos que são alinhadas quando a lâmina é esticada em uma direção durante do processo de produção. Estas cadeias tornam-se condutoras em frequências ópticas quando a lâmina é mergulhada em uma solução contendo iodo. Quando a luz incide com seu vetor campo elétrico paralelo as cadeias, correntes elétricas são geradas ao longo das cadeias e a energia da luz é absorvida, assim como as microondas são absorvidas pelos fios na **FIGURA II.4**.

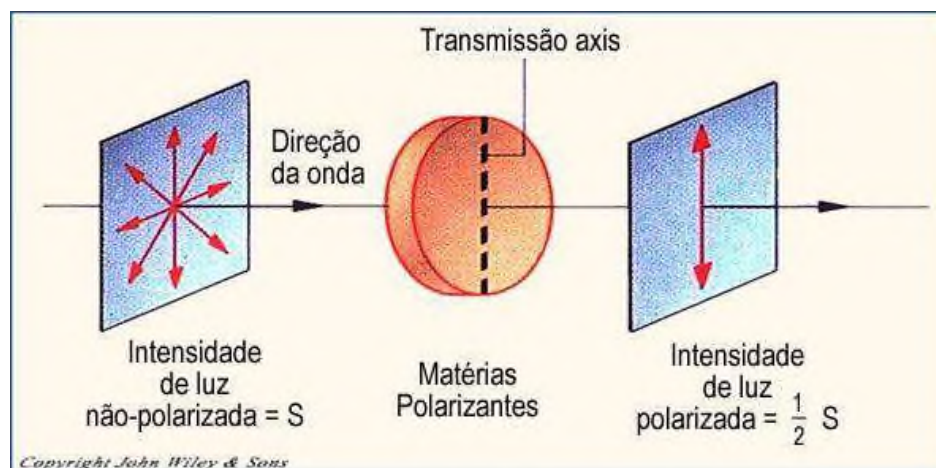


Figura II.4: Polarização por absorção

Considere um feixe de luz não polarizado incidente em uma lâmina polarizadora com seu eixo de transmissão ao longo da direção x , como mostrado na **FIGURA II.5**.

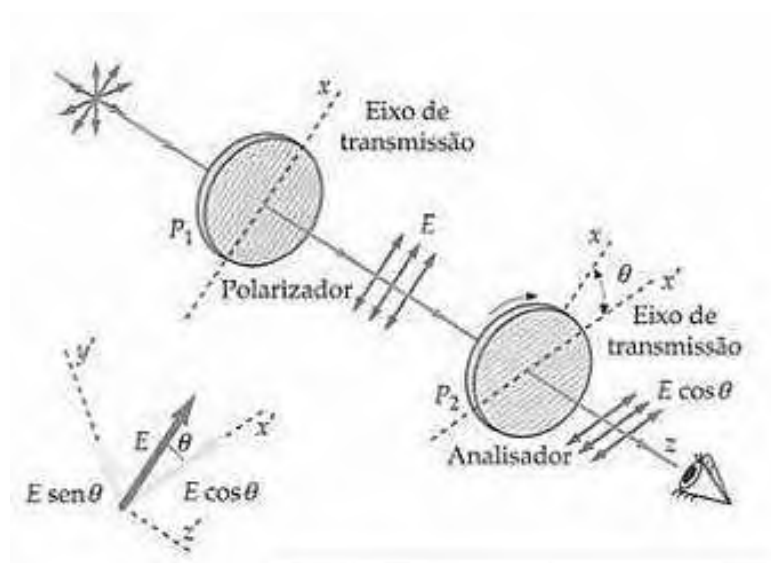


Figura II.5: Um feixe verticalmente polarizado incide em uma lâmina polarizadora com seu eixo de transmissão x' fazendo um ângulo θ com a vertical. Apenas a componente $E \cos \theta$ é transmitida através da segunda lâmina e o feixe transmitido está linearmente polarizado no eixo de transmissão x' .

Após o primeiro polarizador o feixe incide em uma segunda lâmina polarizadora, o analisador, cujo eixo de transmissão faz um ângulo θ com o eixo x . Se E é a amplitude do campo elétrico do feixe incidente, a componente paralela ao eixo de transmissão é $E_{||} = E \cos \theta$, e a componente perpendicular ao eixo de transmissão é $E_{\perp} = E \sin \theta$. A lâmina absorve $E_{\perp}$ e transmite $E_{||}$ e, assim, o feixe transmitido tem uma amplitude de campo elétrico igual a $E_{||} = E \cos \theta$ e está linearmente polarizado na direção do eixo de transmissão. Como a intensidade de luz é proporcional ao quadrado da magnitude da amplitude do campo elétrico, a intensidade I da luz transmitida pela lâmina é dada por:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (\text{Eq. II.1})$$

“Onde I_0 é a intensidade do feixe incidente. A **EQUAÇÃO II.1** é conhecida como **Lei de Malus** devido o seu descobridor, E.L. Malus (1775-1812)”. Ela se aplica a quaisquer dois elementos polarizadores cujos eixos de transmissão fazem um ângulo θ entre eles.

(Tipler et al. Vol. 2, 6th Edition, p.371)

II.1.2 POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO

Quando a luz não polarizada é refletida em uma superfície plana separando dois meios transparentes, tal com o ar e vidro ou ar e água, a luz refletida é parcialmente polarizada. “*O grau de polarização depende do ângulo de incidência e da razão entre as velocidades da onda nos dois meios*” (Tipler et al. Vol. 2, 6th Edition, p.373). Para certo ângulo de incidência, chamado de ângulo de polarização θ_p , a luz refletida é completamente polarizada. No ângulo de polarização, os raios refletido e refratado são perpendiculares entre si. David Brewster (1781-1868), descobriu este fato experimental em 1812. O ângulo de polarização é por isso conhecido como ângulo de Brewster.

A **FIGURA II.6** mostra a luz incidindo no ângulo de polarização θ_p para o qual a luz refletida é completamente polarizada.

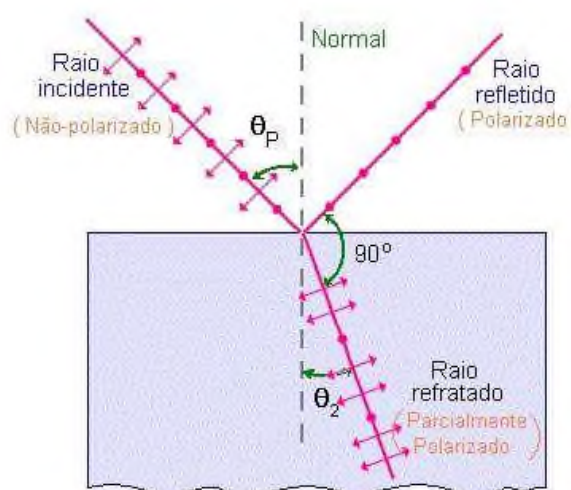


Figura II.6: Polarização por reflexão.

Podemos relacionar o ângulo de polarização aos índices de refração dos meios utilizando a lei de Snell (a lei da refração). Se n_1 é o índice de refração do primeiro meio e n_2 é o índice de refração do segundo meio, a lei da refração fornece

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{Eq. II.2})$$

Onde θ_2 é o ângulo de refração. Da **FIGURA II.6**, podemos ver que a soma do ângulo de reflexão e do ângulo de refração é 90° . Como o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência, temos

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$$

Então,

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin(90^\circ - \theta_p) = n_2 \cos \theta_p$$

Ou,

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{ÂNGULO DE POLARIZAÇÃO}).$$

Apesar de a luz refletida estar completamente polarizada para este ângulo de incidência, a luz transmitida está apenas parcialmente polarizada (porque apenas uma fração da luz incidente é refletida). Essa declaração se dá pelo coeficiente de Fresnel:

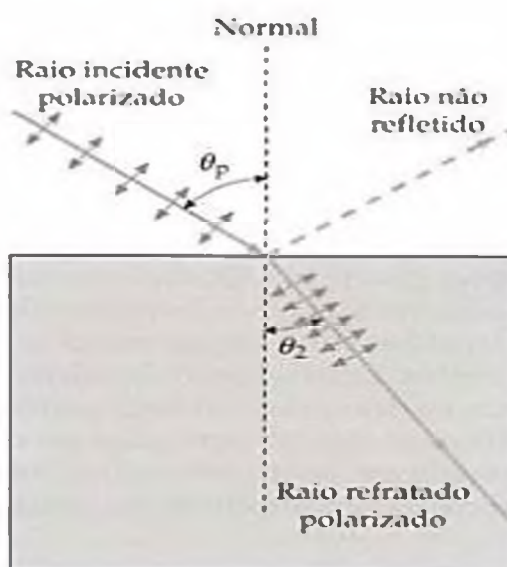


Figura II.7: Luz polarizada incidente no ângulo de polarização. Quando a luz incidente está polarizada com $\vec{E}$ no plano de incidência, não há raio refletido.

Se a luz incidente estiver polarizada com o campo elétrico no plano de incidência, não existirá luz refletida quando o ângulo de incidência for θ_p como mostrado na **FIGURA II.7** (Tipler et al. Vol. 2, 6th Edition, p.373). Isso acontece devido a continuidade do campo magnético $\vec{B}$ e $\vec{E}$ na interface.

Podemos destacar também a reflexão interna total que analisando a luz quando passa de um meio de maior índice de refração (n_1) para outro meio de menor índice de refração (n_2), pode ocorrer a reflexão interna total. Se $n_1 > n_2$, para ângulos $\theta_1 \geq \theta_c$ o raio transmitido deixa de existir e toda a luz é refletida na superfície que separa os meios.

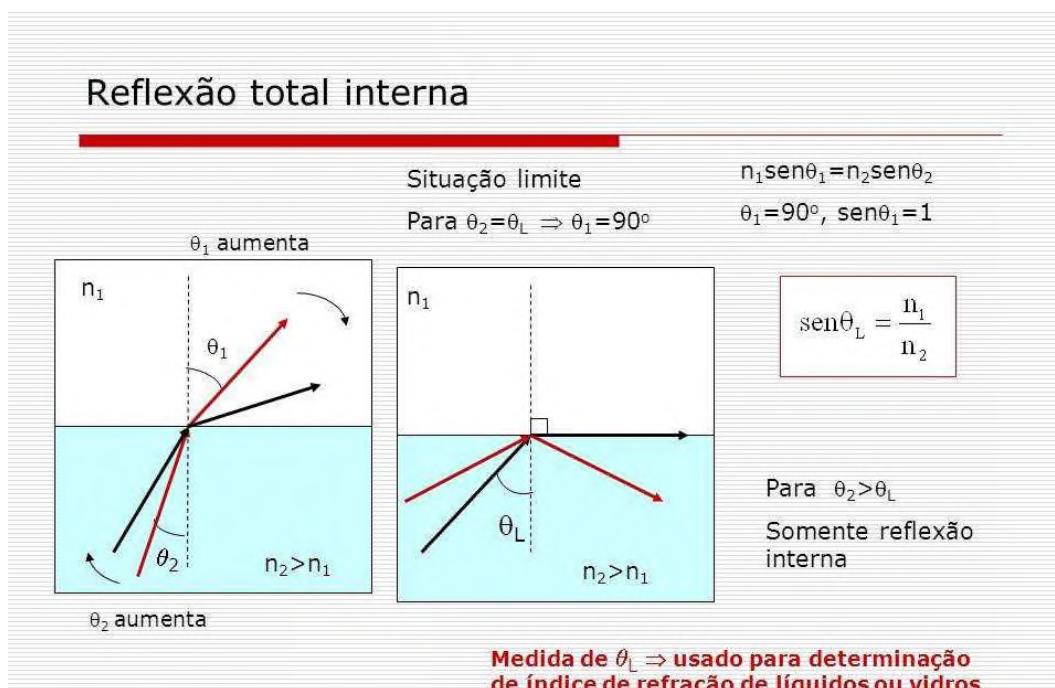


Figura II.8: Reflexão Interna total

II.1.3 POLARIZAÇÃO POR ESPALHAMENTO

O fenômeno de absorção e irradiação é chamado de **espalhamento**. O espalhamento pode ser demonstrado passando um feixe de luz através de um recipiente contendo água à qual uma pequena quantidade de leite em pó foi adicionada. As partículas de leite espalham a luz, tornando o feixe visível. De maneira semelhante, feixes de laser podem se tornar visíveis introduzindo pó de giz ou partículas de fumaça no ar para espalhar a luz. Um exemplo familiar de espalhamento de luz é o realizado pelas moléculas de ar, que tende a espalhar mais comprimentos de onda curtos do que os longos, conferindo ao céu sua coloração azulada.

Podemos pensar, as cargas de um átomo espalhador como antenas do tipo dipolo elétrico que irradiam ondas com intensidades máximas nas direções perpendiculares ao eixo da antena e intensidades nulas na direção ao longo do eixo da antena. A **FIGURA II.9** mostra um feixe de luz não polarizada que inicialmente viaja ao longo do eixo z, incidindo em uma partícula na origem.

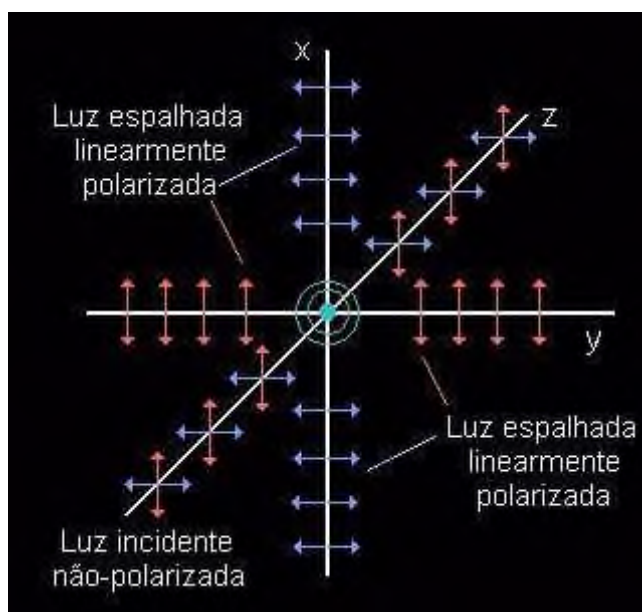


Figura II.9: Polarização por espalhamento.

O campo elétrico no feixe de luz tem componentes nas direções x e y perpendiculares à direção de movimento do feixe de luz. Estes campos provocam oscilações das cargas no interior da molécula no plano $z=0$, e nenhuma oscilação ao longo da direção z . Estas oscilações podem ser pensadas como uma superposição de uma oscilação ao longo do eixo x e outra ao longo do eixo y , e cada uma dessas oscilações produz radiação de dipolo. Portanto, a oscilação ao longo do eixo x não produz radiação ao longo do eixo x , o que significa que a luz irradiada ao longo deste eixo é produzida apenas pelas oscilações ao longo do eixo y . Conseqüentemente, a luz irradiada ao longo do eixo x está polarizada com seu campo elétrico paralelo ao eixo y (Tipler et al. Vol. 2, 6th Edition, p.374).

II.1.4 POLARIZAÇÃO POR BIRREFRIGÊNCIA

Birrefringência é um fenômeno complicado que ocorre na calcita e em outros cristais não-cúbicos e em alguns plásticos tensionados, como o celofane. A maioria dos materiais é **isotrópica**, isto é, a velocidade da luz através no material é independente de sua polarização. Devida à sua estrutura microscópica, materiais birrefringentes são **anisotrópicos**. A velocidade da luz depende da polarização e da direção de propagação da luz. Quando um raio de luz incide em tais materiais, ele pode ser separado em dois raios chamados de *raio ordinário* e *raio extraordinário*. Estes raios são polarizados em direções mutuamente perpendiculares, e viajam com velocidades diferentes. Dependendo da orientação relativa entre o material e o feixe de luz incidente, os dois raios também podem viajar em direções diferentes.

Há uma direção particular em um material birrefringente na qual ambos os raios se propagam com a mesma velocidade. Esta direção é chamada de **eixo óptico** do material. Quando a luz incide em um

ângulo com relação ao eixo óptico, como mostrado na **FIGURA II.9**, os raios viajam em direções diferentes e saem separados no espaço. Se o material é girado, o raio extraordinário gira no espaço em torno do raio ordinário.

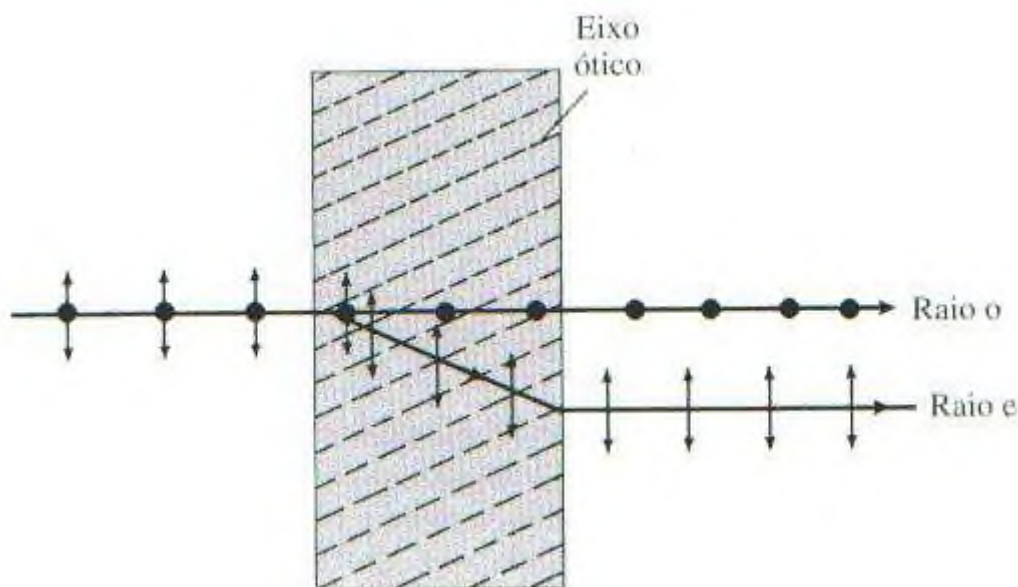


Figura II.10: Polarização por Birrefringência

Se a luz incide em uma placa birrefringente perpendicularmente à face do cristal e perpendicularmente ao eixo óptico, os dois raios viajam na mesma direção, mas com velocidades diferentes. O número de comprimentos de onda nos dois raios dentro da placa é diferente porque os comprimentos de onda ($\lambda = v/f$) dos raios diferem. Os raios saem com uma diferença de fase que depende da espessura da placa e do comprimento de onda da luz incidente. Em uma **placa de quarto de onda**, a espessura é tal que existe uma diferença de fase de 90° entre as componentes das ondas de um comprimento de onda em particular quando eles saírem. Em uma **placa de meia onda**, as componentes saem com uma diferença de fase de 180° .

CAPÍTULO III

III.1 ATIVIDADE ÓPTICA

A maneira pela qual a luz interage com substâncias materiais pode produzir uma grande quantidade de informações valiosas sobre suas estruturas moleculares. O processo a ser analisado em seguida, embora de interesse específico no estudo de Óptica, teve e continua a ter efeitos de longo alcance nas ciências da química e da biologia.

Em 1811, o físico francês Dominique F.J. Arago observou pela primeira vez um fenômeno bastante fascinante agora conhecido como **atividade óptica**. Foi então que ele descobriu que o plano de vibração de um feixe de luz linearmente polarizado foi submetido a uma rotação contínua, uma vez que propagado ao longo do eixo óptico de uma placa de quartzo, **FIGURA III.1**.

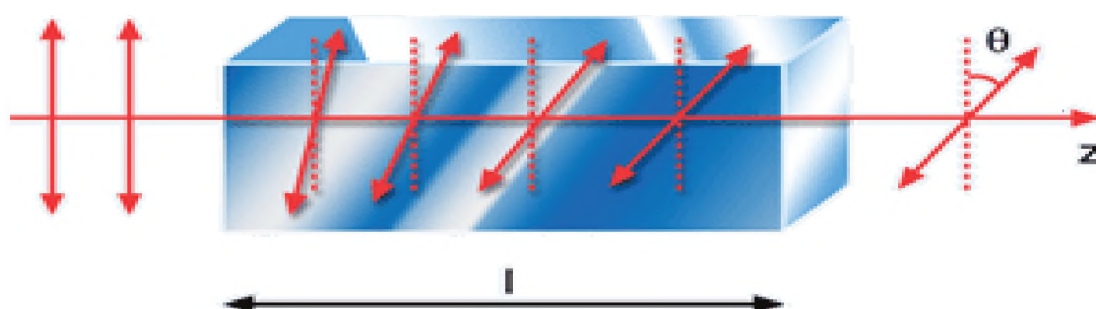


Figura III.1: Atividade óptica apresentado pelo quartzo.

Mais ou menos na mesma época, Jean Baptiste Biot (1774-1862) viu esse mesmo efeito ao usar ambas as formas vaporosas e líquidas de várias substâncias naturais, como aguarrás (essência da terebintina, uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, com faixa de destilação compreendida entre 151 e 240°C. É utilizada principalmente como solvente e também na fabricação de ceras, graxas e tintas.).

Qualquer material que faz com que o campo elétrico E' de uma onda plana incidente linear gire é dito ser opticamente ativo. Além disso, como Biot encontrou, é preciso distinguir entre a rotação feita entre o sentido horário e antihorário. Se, enquanto vista no sentido da fonte, o plano de vibração parece ter girado no sentido horário, a substância é referida como dextro-rotatório, ou d-rotatório (do latim dextro, o que

significa direita). Alternativamente, se $\overline{E}$ parece ter sido deslocado no sentido contrário, o material é levorotatório, ou l-rotatório (do latim levo, ou seja, esquerda).

Em 1822 o astrônomo Inglês Sir John F. W. Herschel (1792-1871) reconheceu que o comportamento d-rotatório e l-rotatório no quartzo, na verdade, correspondem a duas estruturas cristalográficas diferentes. Embora as moléculas sejam idênticas (SiO_2), cristais de quartzo podem ser certo (no sentido de direito) ou canhoto, dependendo da disposição daquelas moléculas, **FIGURA III.2**.

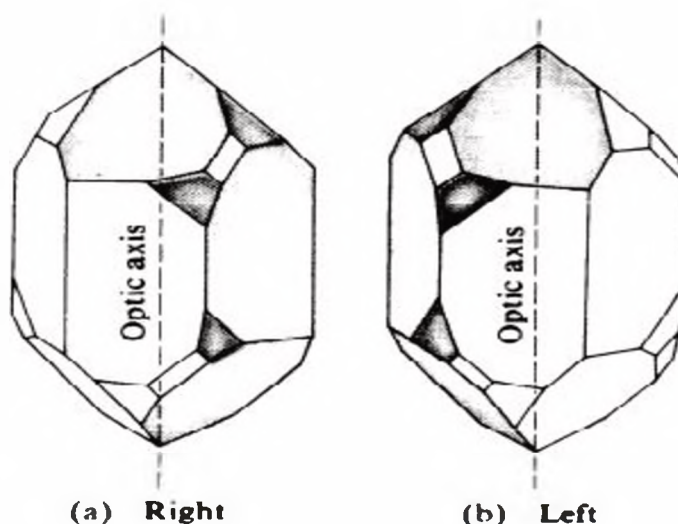


Figura III.2: lado esquerdo e direito do cristal de quartzo

As aparências externas destas duas formas são as mesmas em todos os aspectos, excepto que um é a imagem no espelho da outra; diz-se então que elas são enantiomorfos^{*1} uma da outra.

Todas as substâncias enantiomorfas transparentes são opticamente ativas. Além disso, quartzo de fundição e quartzo fundido, nenhuma das quais é cristalina, não são opticamente activos. Evidentemente, a atividade óptica de quartzo está associada com a distribuição estrutural das moléculas como um todo. Existem muitas substâncias, tanto orgânicas e inorgânicas, por exemplo, benzilo e NaBrO_3 ^{*2}, que como o quartzo, exibem atividade óptica apenas na forma de cristal. Em contraste, muitos compostos orgânicos que ocorrem naturalmente, tais como o açúcar, o ácido tartárico, e terebentina, são opticamente activos em solução ou no estado líquido. Um material ativo mostra birrefringência circular; ou seja, ele possui dois índices de refração, um para R-estados (n_R) e um para L-estados (n_L) (Estados nos quais indicam a direção de rotação, para a direita ou para esquerda, ou melhor sentido horário ou anti-horário). Ao percorrer uma espécime opticamente ativa, as duas ondas circulares ficam fora de fase, e a onda linear resultante parece ter rodado. Podemos ver como isso é possível analiticamente usando as **Eqs. (III.1) e (III.2)**.

^{*1} (são isômeros cujas moléculas se comportam como objeto e imagem. A mistura de dois enantiomorfos em proporções equimolares ou equimoleculares é chamada de racêmico. Aumentando o número de átomos de carbono assimétricos, temos um maior número de moléculas

especialmente diferentes.) *2 (Bromato de sódio é um forte agente oxidante, normalmente usado como auxiliar de pintura e tingimento, permanentes para cabelos, agente químico, ou solvente de ouro em mineração quando usado brometo de sódio)

Sejam E_R e E_L duas ondas circularmente polarizadas (se propagando na direção z) representadas por:

$$\vec{E}_R = \frac{E_0}{2} [\hat{i} \cos(k_R z - \omega t) + \hat{j} \sin(k_R z - \omega t)] \quad \text{Eq. III.1}$$

e

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

Representando as ondas circularmente polarizadas à direita e à esquerda, respectivamente. Desde que ω seja constante, $k_R = k_0 n_R$ e $k_L = k_0 n_L$. A onda resultante é dada por $\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L$, onde:

$$\vec{E} = E_0 \hat{i} \cos \omega t \quad \text{Eq. III.3}$$

tem polarização linear. Este resultado pode ser entendido a partir da **FIGURA III.3**.

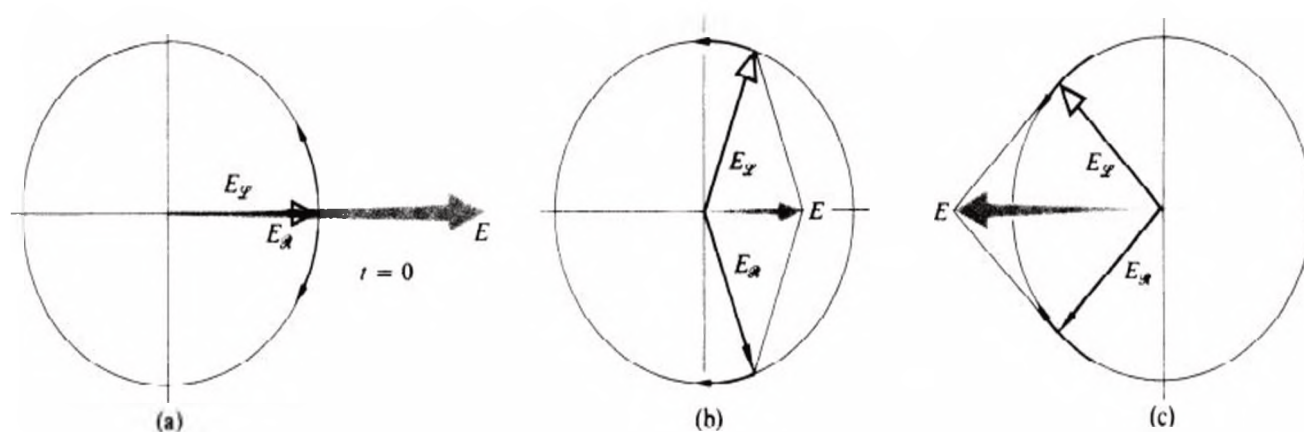


Figura III.3: A superposição de um estado R e L em $z=0$ (Hecht, fig. 8.49)

Nota-se que, em qualquer ponto ao longo do caminho, os dois componentes têm a mesma dependência do tempo e, portanto, estão em fase. Isto apenas significa que em qualquer lugar ao longo do eixo z a resultante é polarizada linearmente (**FIGURA III.4**), embora sua orientação é certamente uma função de z .

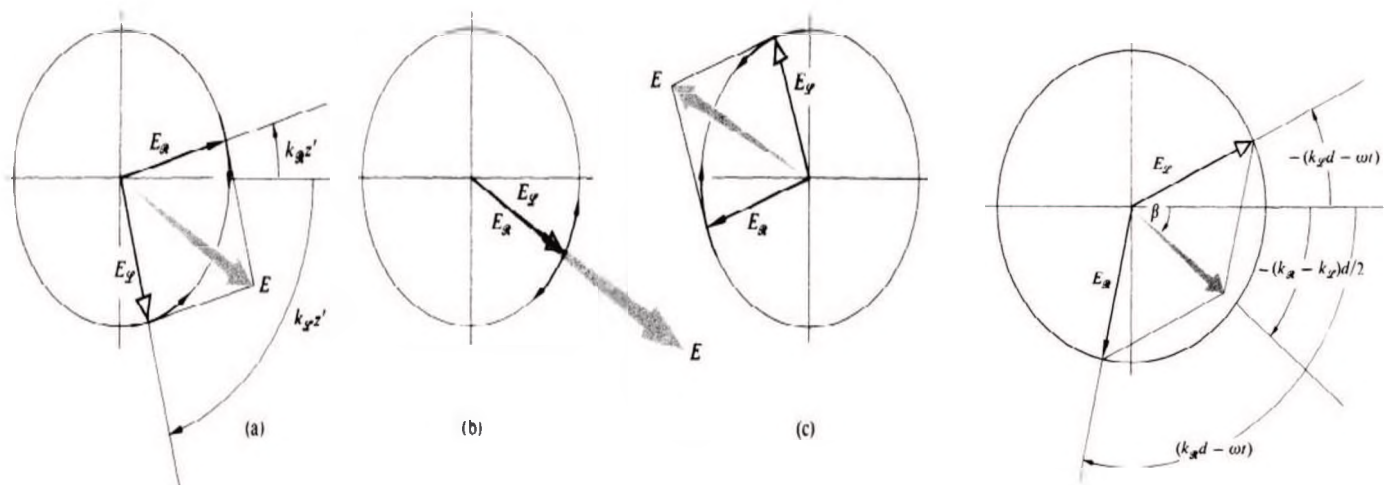


Figura III.4: A superposição de um estado R e L em $z = z'$ ($k_l > k_R$)

Tradicionalmente o ângulo através do qual a rotação de $\vec{E}$ é definida, será positivo quando a rotação acontece no sentido horário.

CAPÍTULO IV

Rotação óptica em meios como o açúcar

Neste capítulo será apresentada em maiores detalhes uma abordagem experimental simples para a medida de rotação da polarização da luz. Sua simplicidade permitirá que a mesma seja aplicada no ensino médio, ou universitário, para um maior aprofundamento do entendimento desta importante propriedade da luz. Além disso, existem poucos trabalhos sobre o estudo da polarização da luz no ensino médio. Logo, esta iniciativa foi feita na tentativa de trazer o mundo experimental da ciência para o ambiente escolar.

Com isso o aparato que será usado, é de fácil aquisição devido a facilidade de acesso e pelos baixos preços dos mesmos, com isso no capítulo V se encontra uma tabela informando em média os valores do materiais usados para montar o aparato experimental.

IV.1 Construção do experimento

A mais simples medição do poder rotatório é a seguinte. A amostra é posicionada entre um polarizador e um analisador. Lembrando que um polarizador pode ser obtido em telas de celulares velhos não mais usados. Um feixe de luz passa através do sistema e é detectado visualmente ou por um sensor de luz. Sem uma amostra, o analisador está configurado para obter uma transmitância luminosa mínima, ou seja, os polarizadores estão cruzados. A mesma operação é feita com a amostra. Neste caso, devido à rotação da polarização, a intensidade de luz já não está mais no mínimo. O analisador deve então ser rotacionado até alcançar a intensidade mínima novamente. Este ângulo de rotação é igual à rotação da polarização devida à amostra. No entanto o valor de variação dos ângulos não importa, desde que consigamos um valor máximo e mínimo na detecção da intensidade da luz polarizada, o valor dos ângulos em si não importa como será feita sua variação.

Uma desvantagem deste método é bem conhecida. No primeiro feixe que será medido, o sinal é proporcional ao $\cos^2 \varphi$, onde φ é o ângulo entre as orientações do polarizador e o analisador. Este ângulo deverá ser 90° , mas a resolução limitada das medições pode causar um erro a este valor. Na segunda medida ou no segundo feixe, o sinal é proporcional à $\cos^2 (\varphi + \theta)$, onde θ é a rotação óptica para a amostra. Nas imediações do ângulo de 90° , o sinal é proporcional a θ^2 , e para pequenos θ as condições de medição podem se tornar muito desfavoráveis.

IV.1.1 Uma abordagem diferente para a medida de atividade óptica

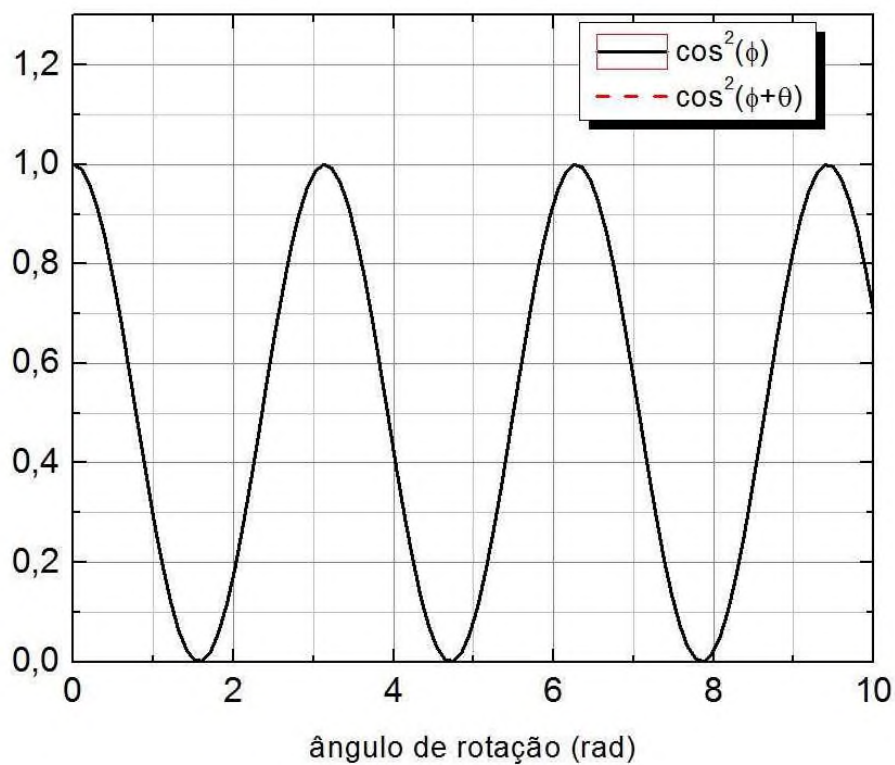
Usando uma abordagem desenvolvida por **Yaakov Kraftmakher** (Department of Physics, Bar-Ilan University, Ramat-Gan 52900, Israel) é possível melhorar sensivelmente a qualidade de medidas simples de atividade óptica. Neste trabalho utilizamos esta abordagem pois a mesma pode ser feita sem o uso de quaisquer equipamentos caros. Os dados com e sem uma amostra são adquiridos em simultâneo enquanto se roda o analisador. Não é necessário, na análise, determinar o ângulo de rotação do analisador. Para fazer esta medida simultânea o feixe, de uma fonte de luz, é dividido em dois através de um divisor de feixes (vidro grosso, por exemplo). Neste caso, um dos feixes passa pela amostra, sofrendo o efeito da atividade óptica da mesma, enquanto o outro passa por fora da amostra, servindo assim de referência. Posteriormente eles serão detectados por dois fotodetectores. A análise dos dados obtidos por esta abordagem é similar à utilizada em alguns polarímetros automatizados, onde o deslocamento de fase θ entre os dois sinais é medido utilizando um amplificador lock-in ou um medidor de fase eletrônico. A resolução das medições pode ser melhorada através da representação gráfica de $I_{\text{amostra}} \propto \cos^2(\varphi + \theta)$ versus $I_{\text{referência}} \propto \cos^2 \varphi$. Este gráfico funciona como uma composição vetorial (onde $I_{\text{referência}}$ faz o papel da componente x e I_{amostra} da componente y) e é uma elipse, mesmo se o movimento do analisador não for uniforme, Figura IV.1

$$\text{Sen } 2\theta = a / A^*.$$

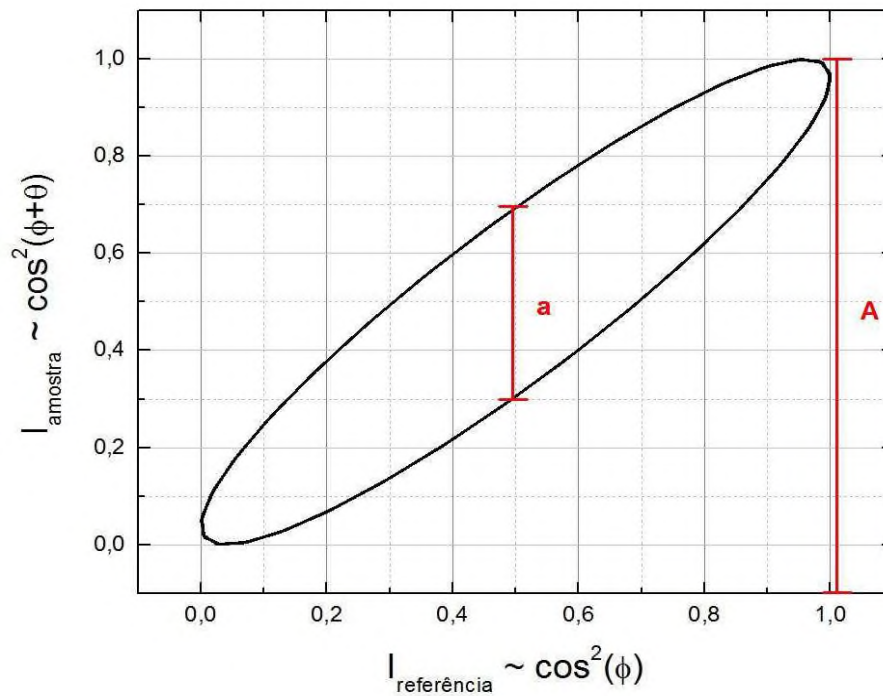
Eq. (IV.1)

[*Complemento 1 página 43>](#)

Independente das amplitudes dos dois sinais. Da mesma forma, $\text{sen } 2\theta = b/B$, onde b e B são os valores correspondentes ao longo do eixo X . Como em uma escola não há goniômetro, é uma ótima forma de trabalhar para medir ângulos de rotação de polarização. As informações sobre a posição atual do analisador estão disponíveis de uma forma mais adequada para o nosso propósito. Como já foi mencionado pode se ligar o polarizador destacando seu eixo óptico no qual pode ser descoberto colocando sobre outro polarizador e vendo qual a direção onde irá passar mais ou menos intensidade de luz, marcando ali o eixo óptico do polarizador e o colocando como um indicador em um material previamente demarcado por ângulos, esse que pode ser feito por um transferidor, isso caso queira observar que a variação angular não dependerá na quantidade de pontos feitos, ou seja, não importa se medirá 20 ou 100 graus, desde que consiga um valor máximo e mínimo da intensidade que será medida por um multímetro ligado a detectores que receberão os feixes divididos, esses detectores podem ser adquiridos em lojas de eletrônicos com preços muito baixos, que também estarão na tabela de preços do capítulo V.



a)



b)

Figura IV.1 a e b: Funções por $\cos^2 \phi$ e $\cos^2 (\phi + \theta)$ apresentada contra o ângulo ϕ e $\cos^2 (\phi + \theta)$ por $\cos^2 \phi = 5^\circ$, $a/A = \sin 2\theta$ (Kraftmakher,

Y. (2009). *Measurement of small optics polarization rotations*, p. 273)

Desde que $\cos^2 \varphi = (1 + \cos 2\varphi) / 2$, a mudança de fase entre os dois sinais é o dobro da rotação óptica a ser determinada. Trabalhando com esta identidade trigonométrica é que encontraremos a relação que nos dará a variação de fase θ entre o feixe que passa e o que não passa pela amostra.

Para a **FIGURA IV.1a** utilizamos uma diferença de fase de 0,1 rad, o que equivale a aproximadamente 6° . Seguindo o procedimento descrito no Apêndice 1, podemos calcular o ângulo de rotação da polarização, teta, através da relação:

$$\text{Sen } 2\theta = a / A. \quad \text{Eq. (IV.1)}$$

Onde **a** e **A** estão definidos na **FIGURA IV.1b**. É importante enfatizar que os valores de I_{amostra} e $I_{\text{referência}}$ devem ser normalizados a 1 para que a análise se torne o mais simples possível.

O ângulo de rotação óptica θ depende diretamente da concentração da substância opticamente ativa e do percurso da luz dentro desta substância. Esta relação não é exatamente linear, mas para as condições deste experimento (baixa concentração de açúcar, baixa intensidade de luz) podemos assumir que θ é dado por: $\theta = \alpha c l$, Eq. (IV.2)

onde **c** representa a concentração da solução em **g/ml** e **l** é o comprimento da amostra em **cm**. Valores da rotação óptica específica α são dadas supondo que a concentração em gramas por mililitro, e o comprimento em centímetros. A rotação óptica específica refere-se a um determinado comprimento de onda e da temperatura, geralmente, 589 nm (linha D de sódio) e 20 °C. A rotação óptica diminui fortemente com o do comprimento de onda; este fenômeno é chamado de dispersão rotativa óptica.

Materiais e Métodos

V.1 Aparato experimental

O aparato construído no laboratório pode ser substituído por materiais bem mais simples como foram mencionados no capítulo IV.

Material	Preço
Laser monocromático simples	R\$ 5,00

Dois detectores	R\$ 10,00 com R\$ 5,00 em média cada
Um vidro Grosso como divisor de feixe	Pode ser encontrado em restos de reformas
Açúcar	Em casa
Polarizadores	Usando telas de celulares não mais usadas é uma boa pedida
Amostra	Um recipiente qualquer que suporte algum volume, desde que haja transparência nos seus extremos, pode ser construído em casa.
Multímetro para detecção	Encontrados geralmente na própria escola
Total	Caso todos os outros sejam adquiridos, se especula um valor no máximo de 20 Reais se variando os preços de região para região onde irá se adquirir os materiais que devem ser comprados.

No experimento um feixe de comprimento de onda com média de 632,8 nm é emitido por um laser de helio-neônio e em seguida, com a ajuda de um divisor de feixe (placa de acrílico)–dividido em dois feixes, que passam por um polarizador. Um dos feixes passa pela amostra de água com açúcar enquanto outro feixe passa direto sem percorrer a amostra. Ambos os feixes atravessam outro polarizador (analisador) no mesmo ponto para evitar efeitos de não homogeneidade no mesmo. O analisador está montado em uma estrutura que permite girá-lo perpendicularmente à direção do feixe incidente. Após passarem pelo analisador serão direcionados a detectores e o valor da sua tensão será lida em um osciloscópio (Tektronix TDS-2024b) ligado a esses detectores (esta leitura também pode ser feita diretamente em um multímetro).

Esses valores foram obtidos fazendo um cálculo do valor médio de três medidas para cada ângulo de uma determinada concentração.

Enquanto gira manualmente o polarizador, o primeiro sinal adquirido foi ligado ao canal 1 do osciloscópio (tektronix tds-2024b) e está relacionado ao feixe que não passou pela amostra. O segundo sinal foi ligado a canal 2 do osciloscópio (tektronix tds-2024b. Osciloscópio (tektronix tds-2024b) exibe o segundo sinal em relação ao primeiro. Como esperado, com o osciloscópio ajustado na função xy (onde cada canal

fornece a coordenada x ou y) o gráfico visto foi uma elipse, assim pode se analisar os valores de a e b retirando os valores na amostra normalizada, e com isso encontrar o valor de θ da Eq. IV.1

V.2. Preparação da Amostra

A amostra foi preparada utilizando 500 ml de água em uma cubeta longa de 30 cm, as amostras foram medidas de forma que pudesse ser divididas por esse volume de água, foi utilizado açúcar refinado (99,8 % de sacarose.). Mais informações disponíveis em: (http://www.quimica.net/emiliano/artigos/2005nov_qnc_sugar.pdf. Acesso 27 de outubro de 2015).

O açúcar foi medido em uma balança analítica com sensibilidade 0,00001 g, assim os valores medidos para serem diluídos na água são respectivamente: 15,03513 g; 30,04504 g; 45,07012 g; 59,99541 g; 75,01514 g e 90,05035 g.

Esses valores foram medidos com base a obter os valores das concentrações descritas na TABELA

V.1.

Tabela V.2: Tabela de concentrações

AMOSTRA	CONCENTRAÇÕES (g/ml)
1	0,03007 $\pm$ 0,00001 g/ml
2	0,06009 $\pm$ 0,00001 g/ml
3	0,09014 $\pm$ 0,00002 g/ml
4	0,11999 $\pm$ 0,00002 g/ml
5	0,15003 $\pm$ 0,00003 g/ml
6	0,18010 $\pm$ 0,00004 g/ml

V.3 Resultados e Análise dos Dados

Usando o programa Origin®, e usando a função grid lines, pôde-se dividir o gráfico em um plano dividido em quadriláteros e assim torna-se mais simples capturar os valores de $\square$. No entanto, sendo o gráfico normalizado o valor de A sempre será 1, logo o valor da equação $\sin 2\theta = a/A$, dependerá exclusivamente do valor máximo e mínimo de **a**. Na **FIGURA V.2** apresentamos o comportamento das tensões médias medidas nos fotodetectores em função do ângulo de rotação, para a amostra de 0,03 g/ml.

Uma curva semelhante foi obtida para as demais concentrações. Pode-se ver neste gráfico uma defasagem entre o sinal da amostra e o sinal de referência. Cada curva foi calculada à partir da média sobre 3 medidas.

Na **FIGURA V.2** apresentamos o comportamento das tensões médias medidas nos fotodetectores em função do ângulo de rotação, para a amostra de 0,03 g/ml. Curvas semelhantes foram obtidas para as demais concentrações. Pode-se ver neste gráfico uma defasagem entre o sinal da amostra e o sinal de referência devido à ação da atividade óptica na amostra. Cada curva foi calculada à partir da média sobre 3 medidas de tensão.

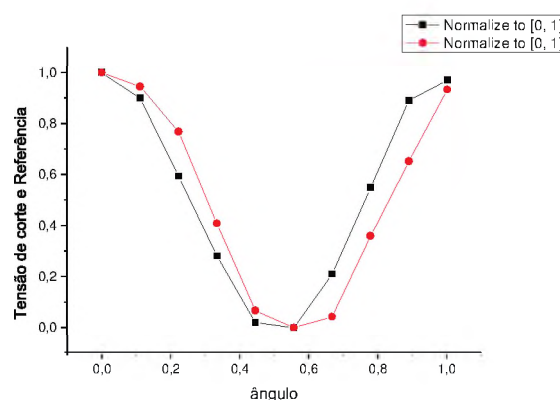


Figura V.2: Amostra 2 e Referência por ângulo

Os dados para as demais Tensões estão na **Tabela V.3**

Tabela V.3: Dados de Tensão encontrado para os feixes refratados para cada ângulo de polarização.

Ângulo entre o polarizador e analisador	Amostra 1 (V)	Amostra 2 (V)	Amostra 3 (V)	Amostra 4 (V)	Amostra 5 (V)	Amostra 6 (V)	Amostra Referência (V)
0,0° ± 0,5°	5,520 ±0,001	3,380 ±0,001	2,360 ±0,001	1,510 ±0,001	1,360 ±0,001	1,040 ±0,001	0,169 ±0,001
20,0° ± 0,5°	4,960 ±0,001	3,040 ±0,001	1,540 ±0,001	0,997 ±0,001	0,800 ±0,001	0,540 ±0,001	0,160 ±0,001
40,0° ± 0,5°	3,896 ±0,001	2,010 ±0,001	1,140 ±0,001	0,542 ±0,001	0,314 ±0,001	0,240 ±0,001	0,131 ±0,001
60,0° ± 0,5°	1,825 ±0,001	0,957 ±0,001	0,538 ±0,001	0,320 ±0,001	0,100 ±0,001	0,067 ±0,001	0,072 ±0,001
80,0° ± 0,5°	0,160 ±0,001	0,082 ±0,001	0,068 ±0,001	0,043 ±0,001	0,001 ±0,001	0,000 ±0,001	0,016 ±0,001
100,0° ± 0,5°	0,057 ±0,001	0,013 ±0,001	0,009 ±0,001	0,007 ±0,001	0,081 ±0,001	0,115 ±0,001	0,005 ±0,001
120,0° ± 0,5°	1,650 ±0,001	0,719 ±0,001	0,596 ±0,001	0,436 ±0,001	0,436 ±0,001	0,521 ±0,001	0,012 ±0,001
140,0° ± 0,5°	3,060 ±0,001	1,860 ±0,001	1,270 ±0,001	0,960 ±0,001	0,960 ±0,001	0,744 ±0,001	0,064 ±0,001

160,0° ± 0,5°	4,490 ±0,001	3,010 ±0,001	2,030 ±0,001	1,120 ±0,001	1,200 ±0,001	0,822 ±0,001	0,112 ±0,001
180,0° ± 0,5°	5,010 ±0,001	3,280 ±0,001	2,210 ±0,001	1,330 ±0,001	1,400 ±0,001	0,960 ±0,001	0,158 ±0,001

Deste gráfico, constrói-se a elipse de rotação de fase, como pode ser visto na Figura V3

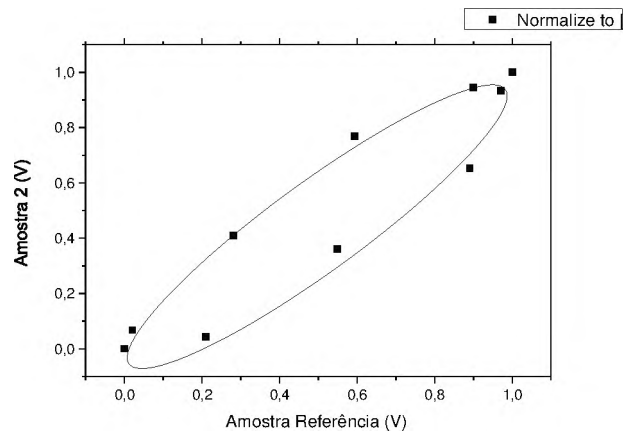


Figure V.3: Gráfico da Elipse da Amostra de 0,06 g/ml

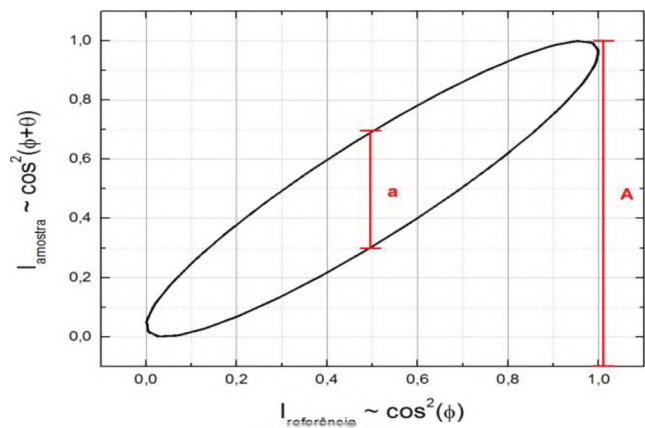


Figure V.4: Figura V.2 com os as margens de a e A

Essa análise para encontrar os valores de **a** pode ter uma discrepância de 20% na análise de quem a faz.

Usando agora a ferramenta Screen Reader, Do Origin®, e analisando próximo ao ponto máximo e mínimo de **a** e subtraindo um pelo outro, poderemos encontrar o valor de θ para cada concentração da amostra. Na **TABELA V.3** encontram os valores de θ para cada amostra.

Tabela V.4: Tabela dos valores de teta encontrados pela Eq. IV.1

AMOSTRA	ÂNGULO θ
$0,03007 \pm 0,00001$ g/ml	$4,8 \pm 1,0^\circ$
$0,06009 \pm 0,00001$ g/ml	$11,4 \pm 2,3^\circ$
$0,09014 \pm 0,00002$ g/ml	$13,2 \pm 2,6^\circ$
$0,11999 \pm 0,00002$ g/ml	$16,8 \pm 3,4^\circ$
$0,15003 \pm 0,00003$ g/ml	$19,1 \pm 3,8^\circ$
$0,18010 \pm 0,00004$ g/ml	$25,5 \pm 5,1^\circ$

Na FIGURA V.3 demonstra a relação entre a concentração e o ângulo encontrado, e através dela pode se retirar os dados necessários para entender o comportamento dos feixes.

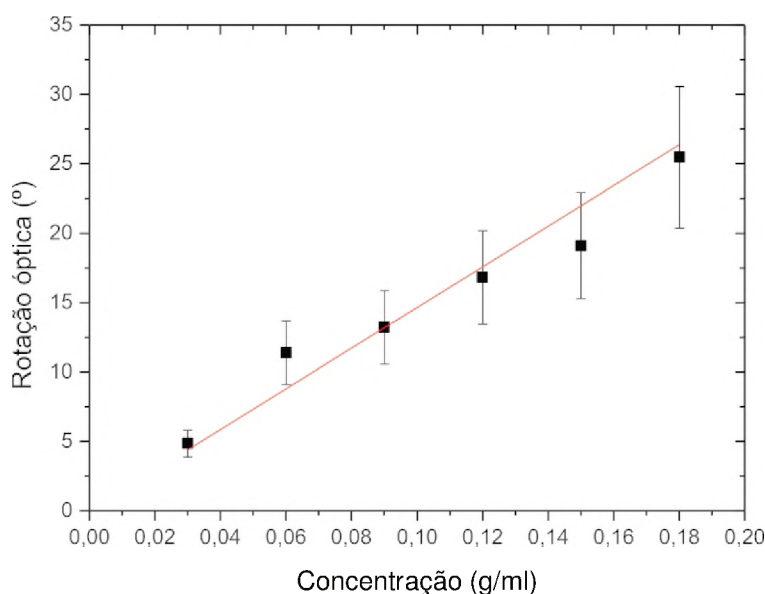


Figure V.5: Gráfico concentração por ângulo

Como esperado o comportamento visto foi aproximadamente linear, corroborando a equação iv.2. O valor da inclinação da curva de ajuste encontrada foi de $\alpha = 141,1 \pm 0,2^\circ \text{ ml/g}$. Assim, como o valor do comprimento da cubeta, l , foi de 3 dm ou 30 cm, o valor encontrado foi de $\alpha = 49 \pm 8^\circ \text{ ml/gdm}$. De acordo com Yaakov [ref] o valor de α para este comprimento de onda, 633 nm, é em torno de 60° ml/gdm e comparando este valor com aquele que encontramos verificamos um erro relativo de 18,62 %. Para um

comprimento de onda de 660 nm, Yaakov [ref] encontrou $[\alpha] = 51,7 \pm 1,4^\circ \text{ ml/gdm}$ para uma cubeta de 10 cm. Os valores encontrados para $[\alpha]$ podem também ser comparados àqueles descritos por Mahurin et al [ref dentro do artigo do yaakov] usando a relação $[\alpha] = 2,17 \times 10^7 / ([\alpha]^2 - [\alpha_0]^2)$, onde $[\alpha_0] = 131 \text{ nm}$, **FIGURA V.6** abaixo.

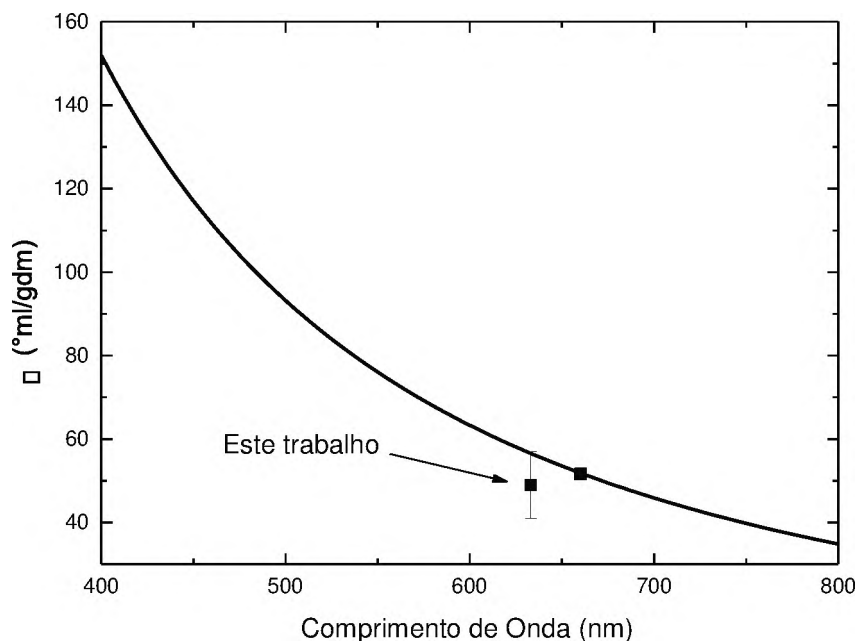


Figure V.6: Rotação óptica específica por comprimento de onda

Assim, através deste experimento, encontramos o coeficiente de rotação óptica específica da polarização da luz, para o comprimento de onda de 633 nm. Esperamos que os procedimentos e resultados demonstrados aqui possam contribuir para aguçar a curiosidade científica, especialmente, em professores e alunos do ensino médio.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

Embora todo o esforço para se alcançar valores iguais aos da literatura, todo o trabalho realizado, unindo instrumentos disponíveis assim como adaptações para simplificação de métodos, o resultado esperado demonstra que métodos simples podem ser aplicados no ensino médio e com excelente resultados. Por outro lado, até agora a polarização da luz não tem recebido a devida atenção nas escolas de ensino médio. Assim, através da abordagem aqui apresentada esperamos trazer uma forma nova de trabalhar com a luz, para levar a diversão e criatividade para dentro de sala de aula, pois com métodos cada vez mais elaborados e vinculados a realidade atual, talvez, o ensino básico de educação adquira novos caminhos e por fim encontre o rumo que a educação sempre buscou, o verdadeiro aprendizado e sua praticidade.

CAPÍTULO VII

Referências

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. Fundamentos de Física. Vol. 4. 8 ed. Editora LTC, 2009

TIPLER, Física, Vol 2, 6ª Edição, LTC, 2009.

SEARS, ZEMANSKY, Física, Vol 4, 12ª Edição, Pearson, 2009.

HECHT, Optics, Vol 1, 4th Edition, Adelphi University, 2002.

YAAKOV KRAFTMAKHER, Measurement of small optical polarization rotations. – Department Of Physics, Bar-Ilan University, Ramat-Gan, Israel, 2009.

BAXTER L 1956 On the properties of polarization elements as used in optical instruments. III. Angular aperture functions of a positive dichroic film polarizer *J. Opt. Soc. Am.* **46** 435–42

COLICCHIA G 2004 A simple device for exploring optical activity *Phys. Teach.* **42** 478–80

FOXCROFT G E 1968 Optical activity *Phys. Educ.* **3** 233–7

FREIER G AND EATON B G 1975 Optical activity demonstration *Am. J. Phys.* **43** 939

GRAHAM-SMITH F, KING T A AND WILKINS D 2007 *Optics and Photonics: An Introduction* 2nd edn (Chichester: Wiley) Griffith R C 1967 A rotating polarizer for Faraday rotation measurements *Appl. Opt.* **6** 772

HECHT E 1998 *Optics* 3rd edn (Reading, MA: Addison-Wesley)

HILL J W 1973 An overhead projection demonstration of optical activity *J. Chem. Educ.* **50** 574

HULTSCH R A 1982 A demonstration of optical activity *Phys. Teach.* **20** 476

HUNTE C, GIBBS P AND SINGH U 2001 An optical technique for studying phase transitions *Am. J. Phys.* **69** 91–2

JENKINS F A AND WHITE H E 1981 *Fundamentals of Optics* 4th edn (Auckland: McGraw-Hill)

MAHURIN S M, Compton R N and Zare R N 1999 Demonstration of optical rotatory dispersion of sucrose *J. Chem. Educ.* **76** 1234–36

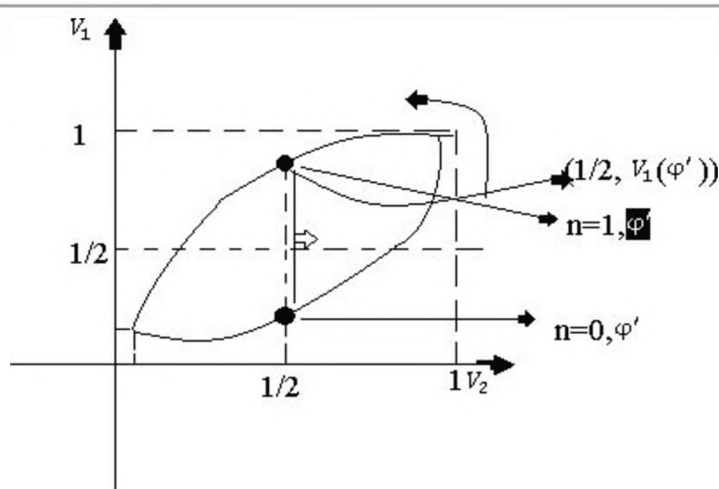
PYE D 2001 *Polarised Light in Science and Nature* (Bristol: Institute of Physics Publishing) Suits J C 1971 Magneto-optical rotation and ellipticity measurements with a spinning analyzer *Rev. Sci. Instrum.* **42** 19–22

TENQUIST D W, WHITTLE R M AND YARWOOD J 1970 *University Optics* vol 2 (London: Iliffe).

REALIZANDO EXPERIMENTOS DIDATICOS COM O SISTEMA DE SOM DE UM PC, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 1, p. 117 - 123, (2004). Disponível em: <www.sbfisica.org.br>. Acesso em 11 de novembro de 2015.

ERNEST S. GRIFFITH, New York, New York University, London, University Of London, 1967.

COMPLEMENTO 1- EQUAÇÃO IV.1



$$V_1 = A \cos^2(\varphi + \theta) = \frac{A}{2} + \frac{A}{2} \cos(2\varphi + 2\theta)$$

Quando $V_2 = \frac{B}{2} \Rightarrow \cos 2\varphi' = 0$

$$V_2 = B \cos^2(\varphi) = \frac{B}{2} + \frac{B}{2} \cos 2\varphi$$

$$\Rightarrow 2\varphi' = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$$

$$\Rightarrow \varphi' = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{2}$$

$$\begin{aligned} \text{Logo } V_1 &= \frac{A \cos(2\varphi' + 2\theta)}{2} + \frac{A}{2} = \frac{A}{2} + \frac{A}{2} \cos\left[2\left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{2} + 2\theta\right] = \\ &= \frac{A}{2} + \frac{A}{2} \left\{ \cos\left[\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi\right] \cos 2\theta - \sin\left[\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi\right] \sin 2\theta \right\} \end{aligned}$$

$$V_1(\varphi') = \frac{A}{2} \mp \frac{A \sin 2\theta}{2} = \frac{A}{2} - \frac{A \sin 2\theta}{2}$$

$$V(\varphi') - V(\varphi'') = a$$

$$\frac{A}{2} - \frac{A \sin 2\theta}{2} - \left(\frac{A}{2} + \frac{A \sin 2\theta}{2}\right) = 2 \frac{A \sin 2\theta}{2} = a$$

$$A \sin 2\theta = a \Rightarrow \mathbf{\sin 2\theta = \frac{a}{A}}$$