# Polarização Linear, Lei de Malus e Atividade Óptica

*Nesta prática, iniciaremos o estudo da área da óptica usualmente denominada óptica física. Inicialmente, discutiremos o conceito de polarização da luz e os tipos de polarização existentes. Em seguida, apresentaremos as principais propriedades de ondas linearmente polarizadas, alguns métodos usados para se obter este tipo de polarização. Finalmente,ilustraremos o fenômeno conhecido como birrefringência circular, que confere a alguns materiais a capacidade de induzir a rotação da polarização de um feixe de luz linearmente polarizado.*

**Sempre que surgir uma dúvida quanto à utilização de um instrumento, o aluno deverá consultar o professor, o monitor ou o técnico do laboratório para esclarecimentos.**

**Importante: Neste experimento será utilizado um laser. Cuidado para não direcioná-lo para seu próprio olho ou para o olho dos demais em sala!!!**

## I. Descrição da luz como onda eletromagnética

A luz é uma onda eletromagnética, e como tal envolve oscilações de campos elétricos e magnéticos que se propagam ao longo de uma dada direção do espaço. As ondas eletromagnéticas são transversais, o que significa que a direção de oscilação dos campos é perpendicular à direção de propagação. Além disso, para satisfazer as leis do eletromagnetismo (equações de Maxwell), o vetor campo elétrico e o vetor campo magnético também devem ser perpendiculares. Quando uma onda eletromagnética se propaga longe da sua fonte, ela pode ser representada como uma onda plana, ou seja, se propaga em uma direção específica com os vetores campo elétrico e magnético oscilando em uma plano perpendicular a direção de propagação. A figura 1a ilustra o exemplo de uma onda eletromagnética plana.

Existem duas grandezas vetoriais importantes para especificar o modo de propagação de uma onda eletromagnética: o vetor de propagação $\vec{k}$ e o vetor de um dos campos (elétrico ou magnético) sendo comumente usado o vetor do campo elétrico $\vec{E}$. O módulo do vetor de propagação é determinado pela velocidade de propagação da onda no meio ($V = c/n$) e pela freqüência angular da oscilação dos campos, sendo dado por $k = (n/c)\omega$. Nesta prática estamos interessados somente nas propriedades relacionadas à direção dos campos e, portanto, consideraremos daqui em diante onda planas de freqüência angular $\omega$ e vetor de propagação $\vec{k}$.

Uma onda eletromagnética plana se propagando na direção $z$ ($\vec{k} = k\hat{z}$) com campo elétrico oscilando no plano $xy$ pode ser representada por:

$$\vec{E} = E_{ox}\cos(kz - \omega t)\hat{x} + E_{oy}\cos(kz - \omega t + \phi)\hat{y} \tag{1}$$

Na equação 1, a onda eletromagnética foi representada como uma superposição de duas ondas (ou componentes): uma cujo campo elétrico aponta na direção $\hat{x}$, e outra cujo campo elétrico aponta no eixo $\hat{y}$. Note que a diferença de fase entre as duas componentes pode ser qualquer, ou seja, não há restrição sobre as fases para que a equação 1 seja uma solução válida das equações de Maxwell.

Se não existir diferença de fase entre as oscilações das componentes $x$ e $y$ do campo elétrico, ou seja, $\phi = 0$ (ou um múltiplo de $\pi$), o campo elétrico aponta sempre na mesma direção. Diz-se então que a luz é *linearmente polarizada* e a direção de polarização da onda é a direção de oscilação do campo elétrico. Nesse caso, a equação 1 pode ser reescrita como:

$$\vec{E} = \left(E_{ox}\hat{x} + E_{oy}\hat{y}\right)\cos(kz - \omega t) \tag{2}$$

Na equação 2, o campo elétrico da onda é descrito por um vetor fixo no plano $xy$ multiplicado por um fator oscilatório, que afeta apenas o módulo do vetor (mas não a sua direção).

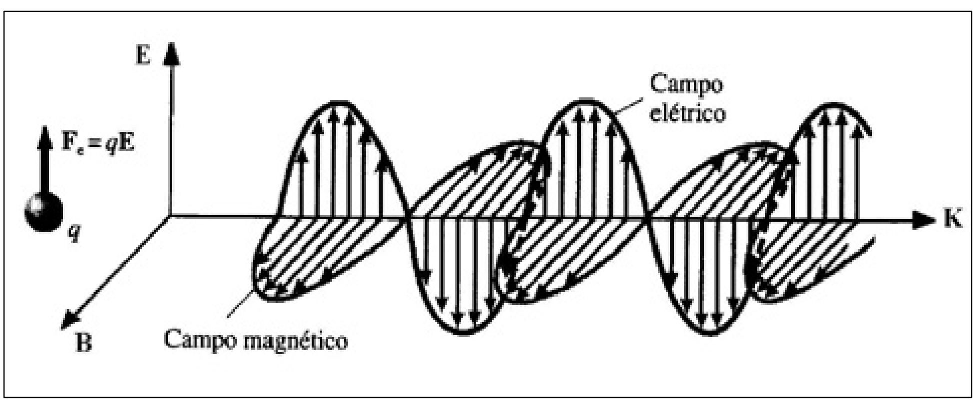



**Figura 1 – (a) Representação esquemática de uma onda eletromagnética.**

Se a diferença de fase entre as componentes for de $\phi = \pm\ \pi / 2$, e além disso as amplitudes forem iguais ( $E_{ox} = E_{oy} = E_o / \sqrt{2}$ ), a equação 1 pode ser reescrita como:

$$\vec{E} = \frac{E_o}{\sqrt{2}}\left(\cos(kz - \omega t)\hat{x} \pm \sin(kz - \omega t)\hat{y}\right) \tag{3}$$

O módulo desse vetor é constante, e o ângulo formado entre a sua direção e um dos eixos de coordenada varia linearmente no tempo. Em outras palavras, o vetor campo elétrico gira no plano xy, sendo que sua extremidade descreve uma trajetória circular à medida que a onda se propaga. Essa onda é denominada de *circularmente polarizada*, sendo que sentido de rotação do campo elétrico pode ser tanto à direita como à esquerda. A polarização à direita corresponde ao sinal positivo na equação 3, e a polarização a esquerda corresponde ao sinal negativo. Na figura 1b, a onda polarizada à esquerda gira no sentido anti-horário, e a onda polarizada à direita no sentido horário. Nesse caso, eixo *z*, que é a direção de propagação da onda, está saindo do papel. Portanto, se o observador olha para a fonte (isto é, como se a onda estivesse vindo de encontro ao observador), o campo elétrico da onda polarizada à esquerda gira no sentido anti-horário, e o da onda polarizada à direita no sentido horário.

A partir desse ponto é útil introduzir a notação complexa, onde o campo elétrico é representado por um número complexo. A notação complexa permite substituir senos e cossenos por exponenciais, que são mais fáceis de serem manipuladas algebricamente. Apenas é preciso lembrar que o valor de fato do campo elétrico é uma grandeza física, sendo portanto igual à parte real do valor complexo. Na notação complexa, a equação 1 é reescrita da seguinte forma (mostre que a parte real desta equação corresponde exatamente a equação 1):

$$\vec{E} = \left(E_{ox}\hat{x} + E_{oy}e^{i\phi}\,\hat{y}\right)e^{i(kz-\omega t)} \tag{4}$$

O termo entre parênteses é um vetor (complexo) que contém as informações sobre a direção do campo elétrico. Se $\phi = 0$ ou $\phi = \pm\ \pi$, teremos:

$$\vec{E} = \left( E_{ox}\hat{x} + E_{oy}\hat{y} \right) e^{i(kz-\omega t)} \tag{5}$$

Cuja parte real equivale à onda linearmente polarizada, com discutido anteriormente.

Se $\phi = \pm \pi / 2$ e $E_{ox} = E_{oy} = E_o / \sqrt{2}$ (onda circularmente polarizada), temos:

$$\vec{E} = E_o \left( \frac{\hat{x} \pm i\hat{y}}{\sqrt{2}} \right) e^{i(kz-\omega t)} \tag{6}$$

O termo entre parênteses é um versor complexo que representa uma onda circularmente polarizada. Esses versores são chamados de $\hat{\varepsilon}_+$ e $\hat{\varepsilon}_-$, podendo ser expressos em termos dos versores $\hat{x}$ e $\hat{y}$:

$$\hat{\varepsilon}_{\pm} = \frac{\hat{x} \pm i\hat{y}}{\sqrt{2}} \tag{7}$$

Da mesma forma que uma onda com polarização arbitrária pode ser descrita como a superposição de duas ondas linearmente polarizadas em direções perpendiculares, tal onda também pode ser descrita como a superposição de duas ondas circularmente polarizadas, uma à esquerda e outra à direita. Uma vez que os versores $\hat{x}$ e $\hat{y}$ podem ser escritos em termos de $\hat{\varepsilon}_+$ e $\hat{\varepsilon}_-$:

$$\hat{x} = \frac{\hat{\varepsilon}_+ + \hat{\varepsilon}_-}{\sqrt{2}} \tag{8}$$

$$\hat{y} = \frac{\hat{\varepsilon}_+ - \hat{\varepsilon}_-}{i\sqrt{2}} \tag{9}$$

Um campo elétrico qualquer no plano *xy* é escrito como:

$$\vec{E} = \left( E_+\hat{\varepsilon}_+ + E_- e^{i\varphi}\hat{\varepsilon}_- \right) e^{i(kz-\omega t)} \tag{10}$$

Em particular, para uma onda linearmente polarizada tem-se $E_+ = E_-$. A diferença de fase $\phi$ contém a informação sobre a direção de polarização.

A convenção utilizada até agora considerou que a onda se propaga da fonte para o observador, definindo então a polarização circular à esquerda ou à direita. No entanto, usa-se também uma convenção onde se especifica a direção do momentum angular da onda. Assim, se o momentum angular é positivo diz-se que a onda tem helicidade positiva e se o momentum angular é negativo a onda tem helicidade negativa. Note que a polarização à esquerda corresponde a helicidade positiva, sendo descrita pelo versor $\hat{\varepsilon}_+$. Já a polarização à direita corresponde a helicidade negativa, sendo descrita pelo versor $\hat{\varepsilon}_-$. Por exemplo, uma onda do tipo $\vec{E} = E_0 \hat{\varepsilon}_+ e^{i(kz-\omega t)}$ tem helicidade positiva e é circularmente polarizada à esquerda. Mostre que a parte real dessa exp´ressão corresponde a equação 3 com sinal negativo.

## II. Polarização por absorção e Lei de Malus

A polarização por absorção ocorre em meios dicróicos, ou seja, meios nos quais o coeficiente de absorção depende da direção de vibração do campo elétrico. A direção em que a absorção é mínima é conhecida como eixo de transmissão, enquanto na direção perpendicular a absorção é máxima. Qualquer raio incidente pode ser expresso como a combinação de dois raios linearmente polarizados nas direções de máxima e mínima absorção. Se a luz percorrer uma distância suficiente, a componente na direção de máxima absorção pode se tornar desprezível frente à outra componente e a direção do campo elétrico passa a ser a mesma do eixo de transmissão do material. Esse tipo de sistema pode ser então utilizado para obter luz linearmente polarizada à partir de luz não polarizada e por isso são denominados polarizadores por absorção.

Para entender como isso ocorre microscopicamente, vamos considerar um material formado por moléculas longas, alinhadas, condutoras e separadas por uma distância da ordem do comprimento da luz incidente. Um exemplo prático desse tipo polarizador são polímeros dopados com átomos de iodo (que tornam as cadeias condutoras nas freqüências ópticas e estirados em uma certa direção). Quando a luz incide com o seu vetor campo elétrico paralelo às cadeias, correntes elétricas se estabelecem e a energia luminosa é absorvida. Se o campo elétrico for perpendicular às cadeias, a corrente não é estabelecida e a luz não é absorvida. Assim, devido à absorção de uma dos componentes do campo, a luz transmitida será linearmente polarizada. Este é o principio de funcionamento do polarizador denominado Polaroid, que foi inventado por E. H. Land em 1938. Atualmente, os polarizadores Polaroid comumente utilizados são formados por filmes de acetato de celulose contendo cristais microscópicos de sulfeto de iodo.

O funcionamento do polarizador por absorção só é satisfatório se a distância entre as cadeias for muito menor do que o comprimento de onda da radiação eletromagnética, de modo que o valor do campo elétrico é praticamente o mesmo para duas cadeias vizinhas (ou seja, não há diferença de potencial entre cadeias próximas, mas existe uma ddp ao longo da cadeia). Por exemplo, a radiação de microondas (comprimento de onda da ordem de 10 cm) pode ser bloqueada por duas grades perpendiculares entre si e com separação de alguns milímetros. Este é o motivo da existência de um reticulado condutor com alguns milímetros de distância na porta dos fornos de microonda, que impede a saída da radiação de microondas sem bloquear a luz visível, permitindo acompanhar o processo de cozimento.

Em um filme Polaroid, a direção perpendicular à do alinhamento das moléculas é o eixo de transmissão. Se uma onda linearmente polarizada incidir nessa direção, ela atravessa o Polaroid. No entanto, se a onda for linearmente polarizada na direção perpendicular, ela será quase que totalmente absorvida. Se a onda for linearmente polarizada em outra direção, a intensidade transmitida é dada pela equação conhecida como lei de Malus.

Para descrever a lei de Malus, vamos considerar uma onda eletromagnética com direção de polarização fazendo um ângulo $\theta$ com relação ao eixo *x*. Essa onda pode ser decomposta em duas componentes ao longo dos eixos *x* e *y*, com amplitudes $E_{ox} = E_o \cos\theta$ e $E_{oy} = E_o \sin\theta$, respectivamente. Se a onda incidir em um polarizador cujo o eixo de transmissão está ao longo do eixo *x, a* componente em *x* não sofre perdas, enquanto a componente em *y* é totalmente absorvida. Como, a intensidade da onda é proporcional ao quadrado do campo elétrico, a intensidade transmitida é:

$$I(\theta) = E_{ox}^2(\theta) = E_o^2 \cos^2\theta = I_o \cos^2\theta \qquad (11)$$

Esta é a expressão conhecida como Lei de Malus, em homenagem ao seu observador E. L. Malus que viveu entre 1775 e 1812.

Se a luz incidente for não polarizada, as componentes em cada eixo têm na média a mesma amplitude e a intensidade transmitida é metade da intensidade original. Esse resultado também pode ser obtido pela equação 11, lembrando que o valor médio do co-seno quadrado é ½ (na luz não polarizada, a direção do campo elétrico varia aleatoriamente, portanto $\theta$ é uma variável aleatória e podemos fazer a média sobre todos os valores possíveis).

As fontes de luz mais comuns emitem luz não polarizada, e um polarizador pode ser usado para obter luz linearmente polarizada. Assim, para verificar a lei de Malus deveremos ter dois polarizadores com eixos de transmissão rodados de um ângulo $\theta$ um em relação ao outro. Nesse caso, o ângulo $\theta$ da equação 11 é o ângulo entre os eixos de transmissão dos polarizadores, como mostrado na figura 2. Quando os eixos de transmissão dos dois polarizadores forem perpendiculares, nenhuma luz é transmitida, porque a direção de transmissão para um é a direção de absorção para o outro; é dito que nessa situação temos "polarizadores cruzados".

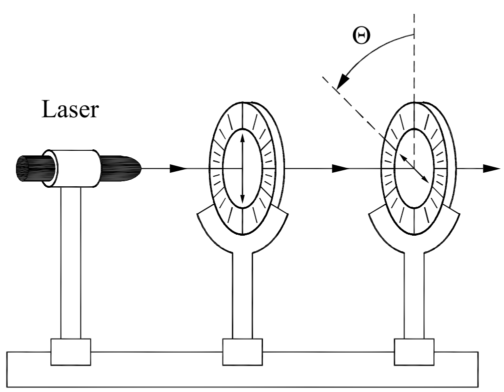



**Figura 2 – Representação esquemática de dois polarizadores com eixos de transmissão deslocados de um ângulo Θ.**

Um fato interessante ocorre quando um terceiro polarizador é colocado entre dois polarizadores cruzados. Suponha que o eixo de transmissão desse polarizador faça um ângulo $\theta$ com o eixo do primeiro, e um ângulo de $\pi/2 - \theta$ com o segundo. Para obter a intensidade total, basta aplicar duas vezes a lei de Malus:

$$I(\theta) = I_o \cos^2\theta \cos^2(\pi/2 - \theta) = I_o \sin^2\theta \cos^2\theta \qquad (12)$$

Ou seja, agora há luz transmitida, mesmo estando os dois polarizadores externos cruzados. Isso ocorre porque a polarização da luz após atravessar o segundo polarizador não é mais perpendicular ao eixo de transmissão do terceiro polarizador, sendo que a intensidade da luz que emerge do conjunto depende da orientação do eixo de transmissão do segundo polarizador em relação aos demais. Então, é como se o segundo polarizador alterasse a direção da polarização da luz, ou seja, o mesmo se comporta como um meio capaz de alterar a direção de polarização da luz. De fato, existem materiais que possuem essa propriedade, isto é, de alterar o estado de polarização da luz, sendo usualmente denominados de materiais que apresentam atividade ótica. Um exemplo desses materiais são os cristais líquidos presentes, por exemplo, nos *displays* de relógios digitais. Neste caso particular, o ângulo de rotação da polarização induzido pelo material depende do campo elétrico, logo pode ser alterado aplicando-se uma tensão elétrica. Assim, colocando-se esse material entre dois polarizadores cruzados é possível controlar a intensidade da luz que atravessa o conjunto.

## III. Atividade Óptica natural

Como mencionado anteriormente, algumas substâncias possuem a propriedade de girar a direção de polarização da luz que as atravessa, o que é conhecido como *atividade óptica*. O ângulo de rotação por unidade de comprimento é conhecido como poder de rotação específica. Para determinar o sentido da rotação, a convenção é olhar no sentido contrário ao da propagação da onda (como se a onda estivesse vindo de encontro ao observador): se o plano de polarização é girado no sentido horário, a substância é destro-rotatória (ou destrógira). Caso contrário é levo-rotatória (ou levógira). A figura 3 mostra um exemplo de uma substância destrógira e seu efeito na polarização.

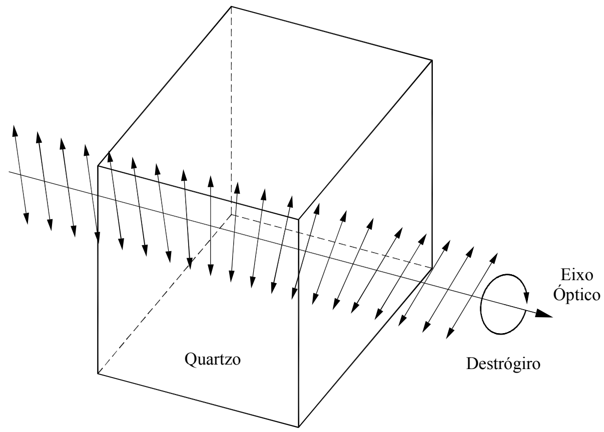



**Figura 3 – Mudança na direção de polarização da luz provocada por um cristal destrógiro**

A atividade óptica ocorre para aqueles materiais cujas moléculas interagem com radiação circularmente polarizada à esquerda e a direita de forma diferente. Sendo assim, radiação linearmente polarizada ao atravessar um material com essas características pode ter sua direção de polarização alterada. Aqui é bom lembrar que uma onda linearmente polarizada pode ser escrita como uma combinação de duas ondas circularmente polarizadas à direita e à esquerda. Portanto, essas duas componentes interagirão de forma distinta gerando o efeito de rotação da polarização.

Para compreender melhor o mecanismo da atividade óptica, admitamos que luz linearmente polarizada incida em um material que possua diferentes índices de refração para luz circularmente polarizada à direita e à esquerda. Vamos decompor a onda incidente em uma superposição de duas componentes circularmente polarizadas (versores de polarização $\hat{\varepsilon}_+$ e $\hat{\varepsilon}_-$, respectivamente) e de mesma amplitude. Deste modo, o campo elétrico da onda linearmente polarizada que incide no material pode ser escrita como:

$$\vec{E} = \left(E_+\hat{\varepsilon}_+ + E_-\hat{\varepsilon}_-\right)e^{i(kz-\omega t)} \tag{13}$$

Como para esse material, o índice de refração $n_+$ para a componente em $\hat{\varepsilon}_+$ é diferente do índice $n_-$ para a componente em $\hat{\varepsilon}_-$, o vetor de propagação para cada um dos componentes, $k_+ = n_+\dfrac{2\pi}{\lambda}$ e $k_- = n_-\dfrac{2\pi}{\lambda}$, são diferentes. Logo após atravessar o material o campo elétrico pode ser escrito como:

$$\vec{E} = \left(E_+\hat{\varepsilon}_+ e^{i(k_+L)} + E_-\hat{\varepsilon}_- e^{i(k_-L)}\right)e^{i(kz-\omega t)} \tag{14}$$

A diferença de fase $\Delta\varphi$ entre as componentes do campo elétrico em $\hat{\varepsilon}_+$ e $\hat{\varepsilon}_-$ ao percorrer uma distância $L$ dentro do material é:

$$\Delta\varphi = \left(k_+ - k_-\right)L = (n_+ - n_-)\frac{2\pi}{\lambda}L \tag{15}$$

Portanto, se considerarmos que a onda incidente no material tinha direção de polarização no eixo $x$:

$$\vec{E}_o = E_o\hat{x} = E_o\frac{\hat{\varepsilon}_+ + \hat{\varepsilon}_-}{\sqrt{2}} \tag{16}$$

Após a propagação no material, a componente em $\hat{\varepsilon}_+$ adquire uma fase $\Delta\varphi$ em relação à componente em $\hat{\varepsilon}_-$, como mostrado na figura 4. A onda que emerge pode ser escrita (a menos de um fator de fase) como:

$$\vec{E} = E_o\frac{e^{i\Delta\varphi}\hat{\varepsilon}_+ + \hat{\varepsilon}_-}{\sqrt{2}} \tag{17}$$

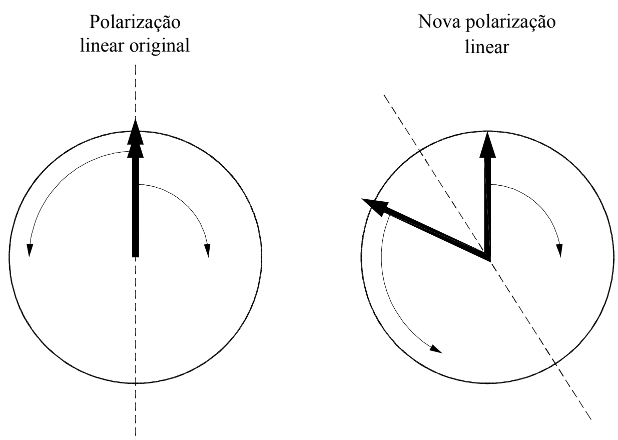



**Figura 4 – Efeito de uma diferença de fase entre as componentes circulares da onda.**

O passo seguinte é reescrever a equação 17 em termos de $\hat{x}$ e $\hat{y}$:

$$\vec{E} = \frac{E_o}{\sqrt{2}} e^{i\Delta\varphi/2} \left( \hat{x} \frac{e^{i\Delta\varphi/2} + e^{-i\Delta\varphi/2}}{\sqrt{2}} + i\hat{y} \frac{e^{i\Delta\varphi/2} - e^{-i\Delta\varphi/2}}{\sqrt{2}} \right) \tag{18}$$

A equação acima pode ser reescrita de uma forma mais simples lembrando as fórmulas para co-seno e seno usando exponenciais imaginárias:

$$\cos\alpha = \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2} \tag{19a}$$

$$\sin\alpha = \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i} \tag{19b}$$

O resultado é:

$$\vec{E} = E_o e^{i\Delta\varphi/2} \left( \hat{x}\cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) - \hat{y}\sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right) \tag{20}$$

Perceba que não há diferença de fase entre a componente $x$ e a componente $y$ da onda. Isso significa que a polarização é linear, mas agora há uma componente em $y$ que não havia anteriormente. Ou seja, o plano de polarização foi girado de um ângulo $\theta$ com relação ao eixo $x$ (a direção inicial de polarização). Da equação 20 é possível concluir o valor de $\theta$:

$$\theta = -\frac{\Delta\varphi}{2} = -(n_+ - n_-)\frac{\pi}{\lambda}L \tag{21}$$

O poder de rotação específico da substância é definido como a rotação provocada no plano de polarização por unidade de comprimento:

$$\frac{\theta}{L} = -(n_+ - n_-)\frac{\pi}{\lambda} \tag{22}$$

Se $n_+ > n_-$, a substância é destro-rotatória, ou destrógira ($\theta$ nesse caso é negativo) e se $n_+ < n_-$ a substância é levo-rotatória, ou levógira ($\theta$ positivo).

Como visto, a atividade óptica ocorre quando os índices de refração são diferentes para a luz circularmente polarizada à esquerda ou à direita. Isso está relacionado com uma propriedade de simetria das moléculas que compõem o material, que é a quiralidade. Uma molécula quiral é diferente de sua imagem especular (da mesma forma que uma mão direita é diferente da sua imagem especular, que é uma mão esquerda). Quando a simetria por reflexão especular existe, a polarização circular à esquerda e à direita provoca o mesmo tipo de resposta nas moléculas, e não há atividade óptica; se a molécula é quiral, a resposta é diferente, e a molécula é opticamente ativa. Boa parte das moléculas orgânicas, como aminoácidos e alguns açúcares, são quirais.

No caso em que a substância opticamente ativa está dissolvida, a atividade óptica também depende da concentração da substância na solução. Neste caso, a equação acima deve ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\theta}{L} = \alpha(\lambda, T).\frac{m}{V} \tag{23}$$

Onde $m$ é a massa do soluto, $V$ é o volume da solução e $\alpha$ é uma constante característica do soluto que depende do comprimento de onda $\lambda$ da luz incidente e da temperatura.

Um exemplo típico de substância que apresenta atividade óptica é a sacarose. Em uma solução de sacarose em água a rotação do plano de polarização ocorre de acordo com a equação 23, e, portanto, é proporcional ao comprimento da amostra e a sua concentração. Para a sacarose, a temperatura de 20°C e no comprimento de onda de 589 nm (linha amarela do sódio), o valor tabelado de $\alpha$ é de 66,4 (°.ml)/(dm.g). Assim, conhecendo-se o ângulo de rotação específico de uma solução de sacarose e a constante $\alpha$, podemos determinar a concentração da solução. De fato, este e um dos métodos padrões para avaliar a concentração de sacarose em cana de açúcar, sendo utilizado para avaliar a qualidade produtiva da cana de açúcar. O instrumento comercial usado para fazer essa avaliação é denominado sacarímetro.

## Experimentos

### 1. Determinação do eixo óptico dos polarizadores

Para realizar os experimentos a seguir, é necessário conhecer a orientação dos eixos de transmissão dos polarizadores a serem utilizados. Isso pode ser facilmente realizado, observando a reflexão da luz em uma superfície dielétrica (piso do laboratório, por exemplo) através do polarizador.

a) Mantendo o suporte do polarizador na vertical, observe (à grande distância) a reflexão de uma das lâmpadas no piso do laboratório.

b) Gire lentamente o polarizador (através do goniômetro do suporte) de modo a minimizar a reflexão observada. Como a luz refletida possui preferencialmente direção de polarização paralela ao piso (isso será mostrado na prática sobre Ângulo de Brewster), quando for observada extinção dessa luz o eixo de transmissão do polarizador será perpendicular ao plano do piso.

c) Veja qual é a indicação angular na escala do goniômetro do suporte do polarizador, e anote esse valor. Repita esse procedimento para os demais polarizadores que se encontram sobre sua bancada.

**Determinação dos eixos de transmissão de polarizadores**

| Polarizador | Identificação do Polarizador | Leitura angular (eixo de transmissão) |
|---|---|---|
| 1 | | |
| 2 | | |
| **3** | | |

**Figura 5 – Polarizador, com suporte e escala angular.**

## 2. Determinação da porcentagem de polarização de um feixe de luz

Um parâmetro importante para se especificar um feixe de luz quanto a sua polarização é a porcentagem de polarização. Para medir essa grandeza, faz-se o feixe atravessar um polarizador, e mede-se a intensidade da luz na condição de mínima e máxima transmissão, $I_{mín}$ e $I_{máx}$. Qual a relação entre a intensidade luminosa e a tensão medida? A partir dessa medida a porcentagem de polarização pode ser calculada por:

$$\%P = \left( \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \right) .100\% \tag{24}$$

a) Alinhe o feixe de laser horizontalmente e verticalmente com relação ao trilho óptico. Assegure-se que o feixe esteja numa direção horizontal e paralela ao trilho.

b) Monte o aparato descrito na figura 6, com a direção de transmissão do polarizador ao longo da vertical. Gire o laser até obter máxima intensidade de luz na entrada do detector. Inicialmente faça esse ajuste observando visualmente.

Observação: durante todas as medidas correlacionadas utilizando-se o fotodetector, não altere a intensidade de luz da lâmpada acima de sua bancada. Além disso, posicione o polarizador de modo que possa visualizar a marcação angular do polarizador sem olhar diretamente para o laser.

c) Conecte a saída do fotodiodo a um voltímetro ajustado para a escala de Volts. Ligue o fotodiodo. Provavelmente você irá observar uma tensão de cerca de 12 V, que é a tensão de saturação do fotodiodo. Para evitar a saturação, adicione camadas de fita adesiva à entrada do fotodiodo até observar uma tensão de aproximadamente 7 V. Gire lentamente o laser e verifique se a tensão registrada no voltímetro não excede 8 V. Caso exceda, adicione mais camadas de fita adesiva até que a tensão máxima observada seja ~ 8 V. Utilizando a leitura do voltímetro, faça o ajuste fino da orientação angular do laser de modo a obter a maior intensidade de luz no fotodetector. Dica: feito esse ajuste, mantenha-o até o fim da prática.

d) Gire o goniômetro do suporte do polarizador até obter o mínimo de tensão no voltímetro. Anote a leitura do voltímetro e da escala angular nessa condição.

e) Gire o goniômetro do suporte do polarizador de 90°. Nesta condição você deverá obter novamente um máximo de tensão. Anote a leitura do voltímetro.

f) Sabendo que a tensão mostrada pelo voltímetro é proporcional a intensidade da luz incidente no fotodiodo, determine a percentagem de polarização do feixe de laser.

g) Repita o procedimento anterior colocando uma folha de papel fosco na frente do laser. Meça a percentagem de polarização da luz após passar pelo papel e discuta o resultado obtido. Provavelmente nesta etapa você pode retirar algumas fitas adesivas para aumentar a intensidade de luz que chega ao detector.

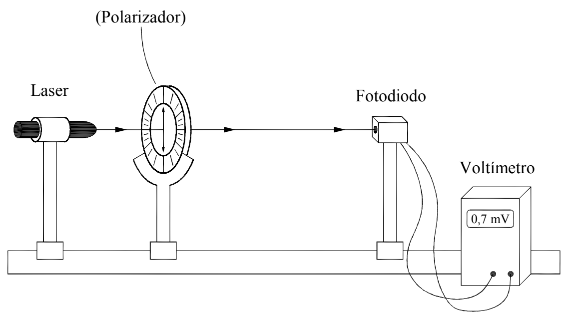



**Figura 6 – Esquema utilizado para determinar a percentagem de polarização de um laser.**

**Determinação da percentagem de polarização da luz**

| **Laser** | | | **Laser com Difusor** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $V_{max}$ | $V_{min}$ | %P | $V_{max}$ | $V_{min}$ | **%P** |
| | | | | | |

### 3. Verificação da Lei de Malus

a) Monte o aparato descrito na figura 7, inicialmente utilizando um único polarizador. Lembre-se sempre de verificar o alinhamento do feixe laser (horizontal e paralelo ao trilho óptico) e a retro-reflexão dos polarizadores.

b) Ajuste o primeiro polarizador na condição de maior transmissão na vertical. Gire o laser até obter o máximo de intensidade no detector (caso seja necessário, utilize camadas de fita adesiva para evitar a saturação do detector).

c) Acrescente o segundo polarizador à montagem cruzado com o primeiro (direção de transmissão horizontal). Faça o ajuste fino desta situação observando a mínima intensidade de luz no sinal do fotodetector. Gire o goniômetro do segundo polarizador de 90°. Nesta condição os dois polarizadores devem estar com eixos de transmissão alinhados.

d) Verifique se o fotodetector não está saturado (procure trabalhar com a máxima medida do voltímetro sempre em ~ 8 V).

e) Meça a intensidade de luz em função do ângulo entre os eixos dos dois polarizadores. Faça medidas girando o segundo polarizador em passos de 15º até atingir 360º. Qual é o período da curva obtida? Interprete o resultado com base na lei de Malus.

(a) (b)

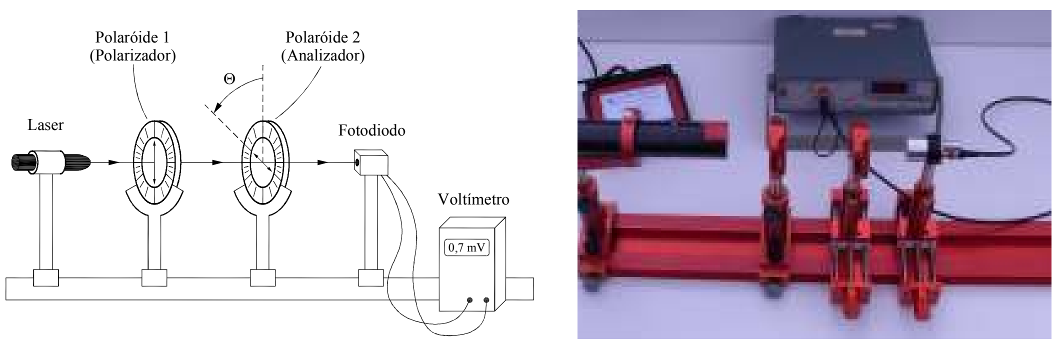



**Figura 7 – Esquema (a) e Fotografia (b) do aparato utilizado na verificação da Lei de Malus com dois polarizadores.**

**Verificação da lei de Malus com dois polarizadores**

| θ (º) | V (V) | θ (º) | V (V) | Θ (º) | V (V) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

**4. Determinação do ângulo de transmissão de um polarizador utilizando polarizadores cruzados.**

a) Monte o aparato mostrado na figura 8.

b) Coloque os três polarizadores com direções de transmissão na vertical. Certifique-se que essa situação produz a máxima leitura no voltímetro e que não excede a tensão de saturação do detector. Faça um ajuste fino nas direções de transmissão dos três polarizadores para garantir que eles realmente possuam as mesmas direções de transmissão. Para isso, primeiramente coloque o primeiro polarizador e ajuste seu eixo de transmissão até obter máxima intensidade no fotodetector. Em seguida inclua o segundo polarizador na montagem e ajuste seu eixo para maximizar o valor medido no voltímetro. Em seguida, inclua o terceiro fotodetector e faça o mesmo procedimento. Anote as posições angulares dos três polarizadores ($\alpha_0$,$\theta_0$,$\varphi_0$), respectivamente.

c) Gire o polarizador 2 de um ângulo $\theta$ qualquer. Anote a indicação angular.

d) Meça a intensidade da luz em função do ângulo entre os eixos dos polarizadores 1 e 3, ângulo $\varphi$. Faça medidas girando o polarizador 3 em passos de 15º até atingir 360º. Analise o gráfico da intensidade da luz transmitida como função do ângulo $\varphi$ e determine qual o ângulo $\theta$ pelo qual o eixo de transmissão do segundo polarizador foi rodado. Dica para análise dos dados: caso os ângulos ($\theta_0$,$\varphi_0$) sejam não nulos, faça o gráfico da intensidade como função de: ($\varphi - \varphi_0$) e determine $\Delta\theta$. Compare os valores obtidos por essa análise com os obtidos quando se considera apenas $\varphi$ e $\theta$, caso exista alguma discrepância, explique-a.

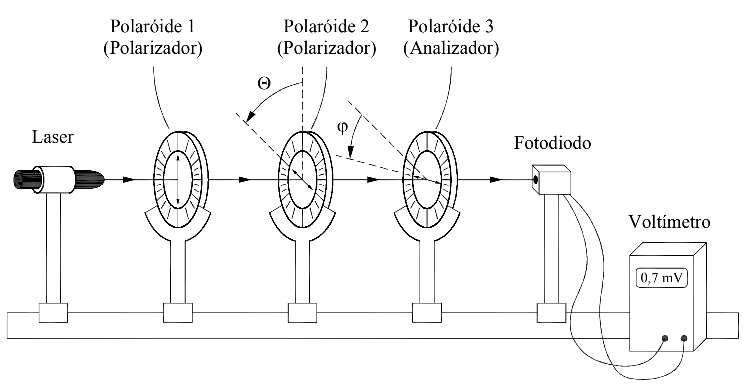



**Figura 8 – Esquema do aparato utilizado na determinação do ângulo de transmissão de um polarizador utilizando polarizadores cruzados.**

**Determinação do ângulo de transmissão de um polarizador utilizando polarizadores cruzados**

| φ (º) | V (V) | φ (º) | V (V) | φ (º) | V (V) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

## 5. Verificação da Lei de Malus com polarizador rotativo

a) Utilizando um laser de HeNe e um polarizador, produza um feixe de luz linearmente polarizado na direção vertical.

b) Faça como que esse feixe atravesse um polarizador rotativo (figura 9), que consiste de polarizador acoplado ao eixo de um motor elétrico (utilize uma tensão de cerca de 5 V). Utilizando um fotodetector com a saída conectada a um osciloscópio, analise a intensidade da radiação (Cuidado para o detector não saturar). Neste caso o osciloscópio irá amostrar um gráfico da tensão de saída do detector como função do tempo.

c) Explique como esse gráfico mostrado na tela do osciloscópio se relaciona com a lei de Malus.

d) Utilizando a lei de Malus encontre uma relação entre o ângulo formado entre os eixos de transmissão dos dois polarizadores (fixo e rotativo) e a escala de tempo lida no osciloscópio. Para realizar uma medida mais precisa, ajuste a base de tempo do osciloscópio e a velocidade do motor (cuidado para não aplicar mais que 8 V de tensão ao motor) de modo a observar apenas um período de revolução do polarizador na tela do osciloscópio.

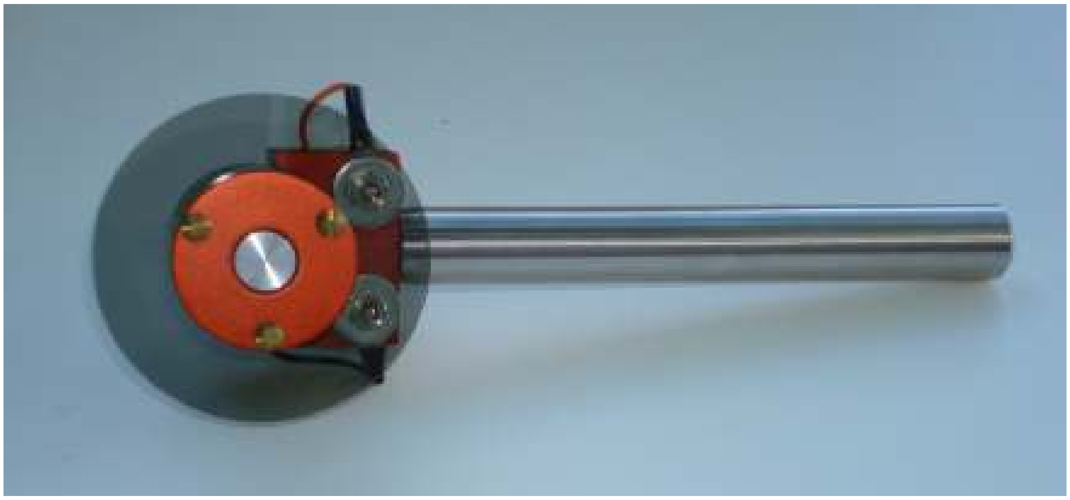


**Figura 9 – Polarizador rotativo**

**Verificação da lei de Malus com polarizador rotativo**

| Tempo (s) | Ângulo (º) | Tensão (V) | Tempo (s) | Ângulo (º) | Tensão (V) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

## 6. Atividade óptica

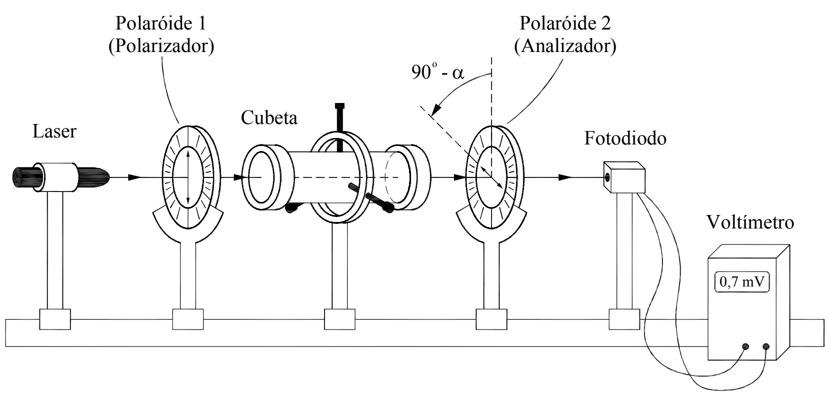
Nesta parte do experimento verificaremos a propriedade de rotação da polarização por moléculas em uma solução aquosa de sacarose.

a) Alinhe o feixe de laser verticalmente e horizontalmente com relação ao trilho óptico.

b) Coloque dois polarizadores cruzados na frente do laser. Gire um dos polarizadores de modo a minimizar a intensidade sob o detector para garantir que os polarizadores estejam cruzados.

c) Em seguida, coloque uma cubeta de 5 cm com solução de sacarose de concentração de 2 kg/l (massa do soluto pelo volume total da solução) entre os polarizadores, como mostrado na figura 10a. Verifique se a tensão registrada pelo voltímetro ligado ao detector é maior que 8 V. Caso isso aconteça, adicione camadas de fita adesiva na entrada do detector até obter uma leitura menor que 8 V.

(a)




(b)

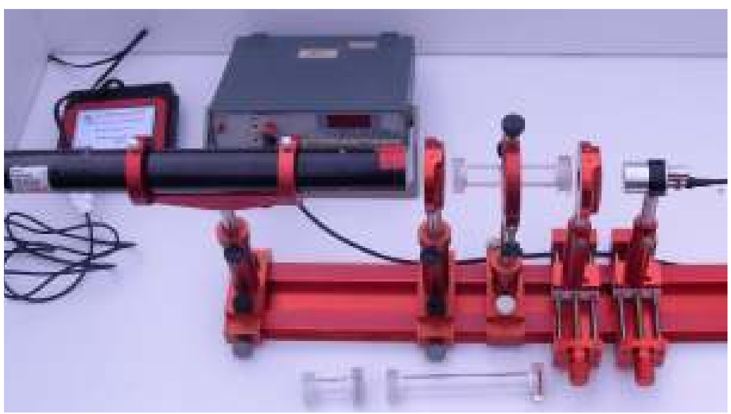


**Figura 10 – Montagem experimental, com a cubeta entre os polarizadores.**

d) Anote a indicação angular do segundo polarizador e então gire-o de tal forma que se obtenha novamente um mínimo de intensidade. Anote essa nova indicação angular e subtraia daquela anterior. Assim você estará determinando o ângulo de rotação da polarização da luz introduzido pela cubeta de sacarose. Indique também a direção de rotação da polarização (direita ou esquerda) com relação ao vetor de propagação.

e) Repita o procedimento para diferentes comprimentos de cubetas 5, 10 e 15 cm (mantendo a concentração da solução em 2 kg/L), e para diferentes concentrações (mantendo o comprimento da cubeta).

f) Suponha que a lei fenomenológica para o ângulo rodado seja $\theta = \alpha CL$. Encontre o parâmetro $\alpha$ e compare o seu valor com o valor tabelado.

**Atividade óptica de uma solução de sacarose**

| Concentração em volume da solução (g / ml) | Comprimento da cubeta (cm) | Ângulo de rotação da polarização |
|---|---|---|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

g) Repita o procedimento e) para uma solução de frutose de concentração 2 kg/L.

h) Após desmontar todo o sistema e retirar o cabo detrás do fotodiodo, certifique-se que esse está desligado, assim como o multímetro.