

# Exp. 13

## Luz polarizada

FSC5144 - Laboratório de Física IV  
FSC5123 - Física experimental II

lemo.ufsc.br  
Versão de 12 de agosto de 2019

### 1 Objetivos

Nesta experiência, examina-se alguns aspectos dos fenômenos de polarização da luz. A luz polarizada tem aplicações na Física Aplicada, na Engenharia e na Indústria. Nos cristais líquidos, a luz polarizada é uma importante ferramenta de investigação prática e teórica. As distribuições de tensões em peças mecânicas, podem ser analisadas por meio de modelos transparentes colocados entre polarizadores cruzados. Quando se aplica um campo elétrico em certos líquidos, eles se tornam birrefringentes, o que permite utilizá-los como “válvulas de luz”, controlando, eletricamente, informações que podem ser conduzidas por fibras óticas.

Os objetivos desta experiência incluem:

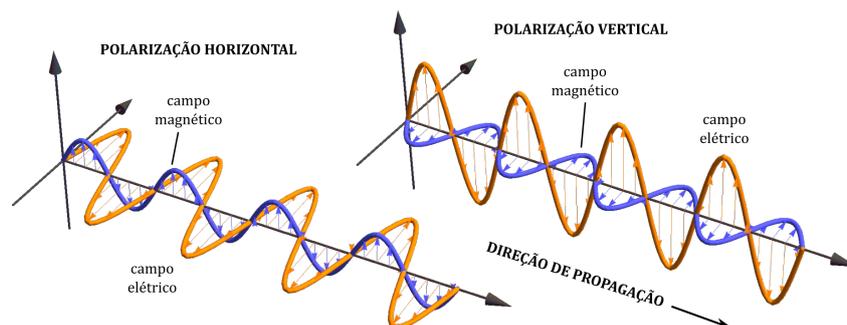
- Verificar a Lei de Malus, que prevê a intensidade luminosa transmitida através de um polarizador quando nele se incide luz linearmente polarizada.
- Estudar a polarização da luz obtida via reflexão num dióptro plano (plano que separa dois meios homogêneos e transparentes);
- Medir o índice de refração de um meio refringente a partir do ângulo de Brewster e do ângulo limite.

### 2 Teoria Básica

#### 2.1 Ondas eletromagnéticas e polarização

As ondas eletromagnéticas são formadas por campos elétricos e magnéticos que se propagam através do espaço. Estes campos mantêm-se perpendiculares entre si e oscilam juntos à medida que se propagam (ver Figura 1). O *período* dessas oscilações no espaço é o que chamamos de *comprimento de onda* ( $\lambda$ ). As ondas eletromagnéticas presentes na natureza têm comprimentos de onda variados, que abrangem desde ondas de rádio, com comprimento de onda da ordem de  $10^6$  m, até raios gama, com  $10^{-14}$  m. Apenas uma pequena fração deste largo espectro é capaz de sensibilizar o olho humano ( $4 - 7 \times 10^{-7}$  m) e a esta estreita faixa do espectro eletromagnético chamamos *luz*.

Ondas eletromagnéticas são ondas transversais, pois tanto o campo elétrico quanto o campo magnético oscilam em direções perpendiculares à direção de propagação, como ilustra a Figura 1.



**Figura 1 Ondas eletromagnéticas linearmente polarizadas.** A onda da esquerda está polarizada horizontalmente, pois o campo elétrico está apontando sempre na direção horizontal; a onda da direita está polarizada verticalmente, pois o campo elétrico está apontando sempre na direção vertical.

A *polarização* é uma propriedade que se aplica às ondas transversais e que especifica a orientação de suas oscilações. Ondas transversais podem apresentar polarização linear (como na Figura 1), circular, elíptica, etc. **Por convenção, dizemos que a direção de polarização de uma onda eletromagnética é a direção em que oscila o seu campo elétrico.**

A produção de ondas eletromagnéticas se faz por vibração de cargas elétricas. Sob condições especiais pode-se fazer com que os elétrons de uma porção de matéria vibrem paralelamente entre si, produzindo uma onda de campo elétrico com polarização numa dada direção preferencial. A luz natural e a luz de lâmpadas convencionais, não seguem esse padrão. Estes são exemplos de luz não polarizada, em que o campo elétrico vibra aleatoriamente em diversas direções, portanto sem direção preferencial.

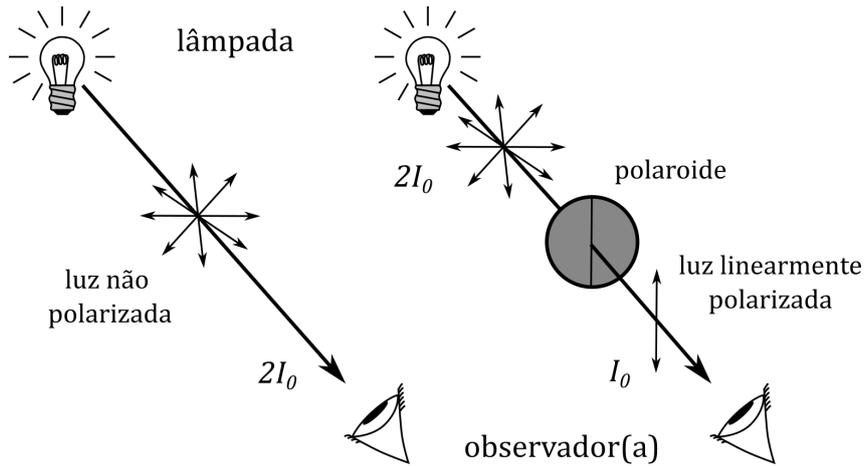
## 2.2 Polaroides e Lei de Malus

Na Figura 2, tem-se uma fonte de luz não polarizada representada pelas direções aleatórias de vibração do campo elétrico. Se esta luz atravessar um dispositivo especial, denominado *polaroide*, a vibração do campo elétrico terá uma direção característica determinada pelo polaroide, resultando em luz linearmente polarizada.

Um polaroide é constituído de uma lâmina plástica flexível, embebida em certos compostos poliméricos. A lâmina plástica é estirada de modo que as moléculas se alinhem paralelamente entre si. Nesta condição, as ondas cujos campos elétricos vibrarem na direção perpendicular ao alinhamento das moléculas serão **transmitidas**, enquanto aquelas que vibrarem paralelamente à direção de alinhamento serão **absorvidas** pelo polaroide.

### Dois polaroides em sequência

Se for colocado um segundo polaroide no trajeto luminoso de uma luz linearmente polarizada, este deixará passar apenas a componente do campo elétrico que vibra em

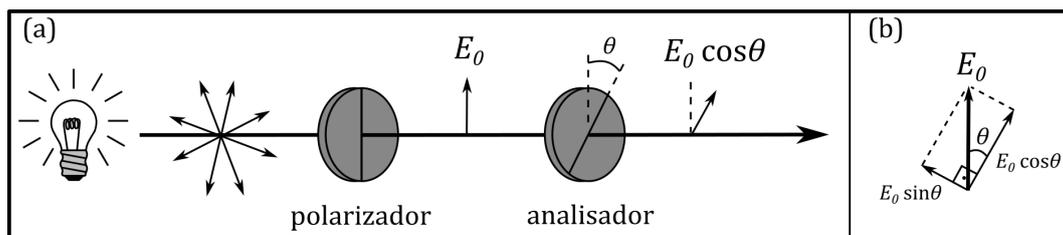


**Figura 2** Luz não polarizada incidindo num polaróide (esquerda). Após atravessar o polaróide, a luz torna-se polarizada na direção do eixo do polaróide. Microscopicamente, este eixo é perpendicular à direção de alinhamento das moléculas do polaróide. Se a luz incidente é perfeitamente não polarizada, metade de sua intensidade é transmitida pelo polaróide, como indica a figura à direita.

sua direção característica de polarização. Se  $E_0$  representa a amplitude da luz linearmente polarizada, determinada pelo primeiro polaróide, denominado polarizador, a amplitude da luz transmitida pelo segundo polaróide, agora denominado analisador, será a componente de  $E_0$  na direção de transmissão do analisador (Figura 3). Portanto, a luz transmitida pelo analisador terá amplitude dada por:

$$E = E_0 \cos \theta , \tag{1}$$

onde  $\theta$  é o ângulo formado entre as direções dos eixos do polarizador e do analisador.



**Figura 3** (a) Luz linearmente polarizada incidindo num polaróide analisador. (b) Decomposição do vetor campo elétrico no sistema de eixos do polaróide girado de um ângulo  $\theta$ .

A *intensidade* de uma onda, qualquer que seja sua natureza (acústica, mecânica, elétrica, luminosa, etc.), é proporcional ao quadrado da sua *amplitude*. Assim, **a intensidade  $I$  da luz transmitida pelo analisador está relacionada com a intensidade  $I_0$  da luz transmitida pelo polarizador** através da expressão conhecida por **Lei de Malus**:

$$I = I_0 \cos^2 \theta . \tag{2}$$

A lei de Malus nos diz que, se polarizador e analisador estiverem com os eixos alinhados entre si ( $\theta = 0^\circ$ ), toda a intensidade será transmitida. Por outro lado, se

os eixos estiverem perpendiculares entre si ( $\theta = 90^\circ$ ), temos transmissão nula, ou seja, toda a luz é bloqueada

### Três polaroides em sequência

Se for colocado um terceiro polaroide cujo eixo forma um ângulo de  $90^\circ$  com o eixo do primeiro polaroide (polarizador), a intensidade  $I$  da luz emergente pode ser obtida aplicando-se duas vezes a Lei de Malus: uma para o segundo polaroide e outra para o terceiro. Assim,

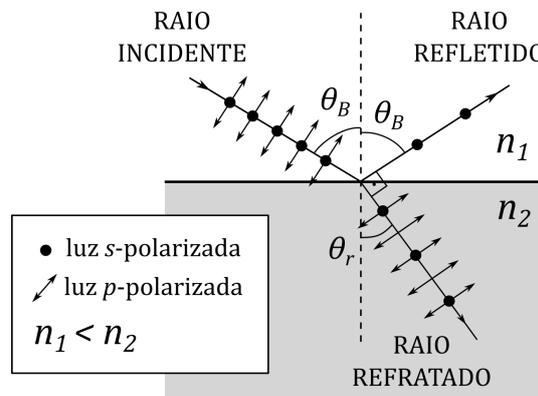
$$I = I_0(\cos \theta \cos(90^\circ - \theta))^2 = I_0(\cos \theta \sin \theta)^2 . \quad (3)$$

Utilizando a identidade trigonométrica  $\sin(2\theta) = 2 \sin \theta \cos \theta$ , a equação acima se escreve

$$I = \frac{I_0}{4} \sin^2(2\theta) . \quad (4)$$

### 2.3 Polarização por reflexão: ângulo de Brewster

Além do uso de polaroides, um dos possíveis métodos para se obter luz polarizada utiliza o fenômeno da reflexão num *dióptro plano*, que nada mais é que um sistema formado por dois meios homogêneos e transparentes separados por uma superfície plana. Uma lagoa de águas calmas e cristalinas é um bom exemplo de dióptro plano, pois sua superfície é aproximadamente plana e separa a água do ar, dois meios transparentes. A superfície de uma janela de vidro é um outro exemplo pertinente.



**Figura 4** Polarização por reflexão com ângulo de incidência igual ao ângulo de Brewster ( $\theta_i = \theta_B$ ). Polarização *s*: perpendicular ao plano de incidência (plano da figura). Polarização *p*: paralela ao plano de incidência.

O ângulo de Brewster é o *ângulo de incidência* no qual um raio de luz com uma certa polarização é perfeitamente transmitido através da superfície plana de um dióptro. Quando luz não polarizada incide no ângulo de Brewster, a luz refletida é portanto perfeitamente polarizada (ver Figura 4), motivo pelo qual o ângulo de Brewster também é conhecido como ângulo de polarização. Este ângulo de incidência com propriedades tão particulares recebe seu nome numa homenagem ao físico

escocês Sir David Brewster (1781–1868). Aqui denotaremos o ângulo de Brewster por  $\theta_B$ .

O mecanismo físico por trás da polarização por reflexão pode ser compreendido em termos da interação da luz com os dipolos elétricos do próprio meio transparente. Podemos imaginar que a luz incidente na superfície é absorvida, fazendo os dipolos vibrarem na direção de vibração do campo elétrico. Estes dipolos vibrantes, por sua vez, reemitem ondas a partir da interface entre os dois meios, sendo uma onda refletida e outra onda refratada. A polarização da luz se propagando livremente é sempre perpendicular à direção de propagação. Os dipolos que produzem a onda refratada (transmitida) oscilam na direção de polarização da luz incidente. Estes mesmos dipolos também geram a onda luminosa refletida. Entretanto, dipolos não emitem nenhuma energia na direção de vibração dos dipolos. Logo, se a luz refratada é  $p$ -polarizada (ver Figura 4) e se propaga exatamente na direção perpendicular àquela prevista para a luz refletida de maneira especular, os dipolos não emitem nenhuma radiação na direção da reflexão especular e, portanto, nenhuma luz é refletida.

A condição a ser satisfeita para que ocorra polarização por reflexão é, portanto, que as direções de propagação da luz refratada e da luz refletida sejam perpendiculares, ou seja,

$$\theta_i + \theta_r = 90^\circ . \quad (5)$$

Por aplicação da lei de Snell<sup>1</sup> aos meios de índices de refração  $n_1$  e  $n_2$ , vem

$$n_1 \sen \theta_i = n_2 \sen \theta_r . \quad (6)$$

Combinando as duas equações anteriores resulta a **lei de Brewster**

$$\boxed{\text{tg } \theta_B = \frac{n_2}{n_1}} , \quad (7)$$

onde  $\theta_i$  foi identificado como o ângulo de Brewster,  $\theta_B$ . A lei de Brewster explicita o fato de que o valor do ângulo de Brewster depende apenas da razão entre os índices dos meios. Se o primeiro meio é o ar ( $n_1 \simeq 1$ ), então a equação (7) pode ser simplesmente escrita como  $\text{tg } \theta_B = n$ , onde  $n$  é o índice de refração do segundo meio.

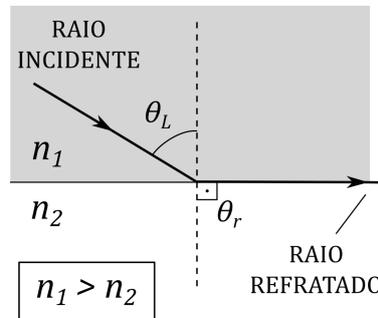
## 2.4 Reflexão total: ângulo limite

Se, agora, o raio luminoso for proveniente de um meio mais refringente para um meio menos refringente ( $n_1 > n_2$ ), em um ângulo de incidência  $\theta_i$ , tal que o ângulo de refração seja  $\theta_r = 90^\circ$  (rasante à superfície, como na Figura 5) a aplicação da Lei de Snell resulta em:

$$n_1 \sen \theta_i = n_2 \sen 90^\circ = n_2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\sen \theta_L = \frac{n_2}{n_1}} , \quad (8)$$

<sup>1</sup> Para mais detalhes, ver Experiência 11, Medidas de índice de refração

onde  $\theta_i$  é agora chamado de **ângulo limite**,  $\theta_L$ . Se o segundo meio é o ar ( $n_2 \simeq 1$ ), então a equação (8) assume a forma mais simples  $\sin \theta_L = 1/n$ , onde  $n$  é o índice de refração do meio mais refringente. Para ângulos de incidência superiores ao ângulo limite, observa-se que não há luz refratada, fenômeno a que chamamos de *reflexão total*.



**Figura 5** Ângulo limite  $\theta_L$ : ângulo de incidência para o qual a luz refratada sai rasante à superfície. Se  $\theta_i > \theta_L$ , ocorre reflexão total.

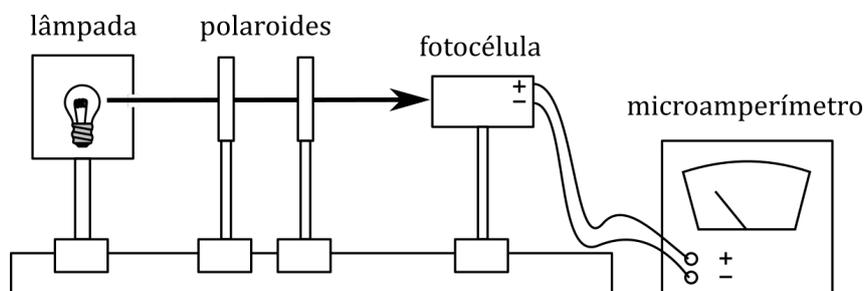
### 3 Referências Bibliográficas

- Halliday, Resnick & Walker, *Fundamentos de Física*, Vol. 4, Ed. LTC
- Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, Vol. 4, Ed. Blucher
- Piacentini, Grandi, Hofmann, de Lima & Zimmerman, *Introdução ao Laboratório de Física*, Ed. da UFSC.
- Helene & Vanin, *Tratamento estatístico de dados em física experimental*, Ed. Blucher

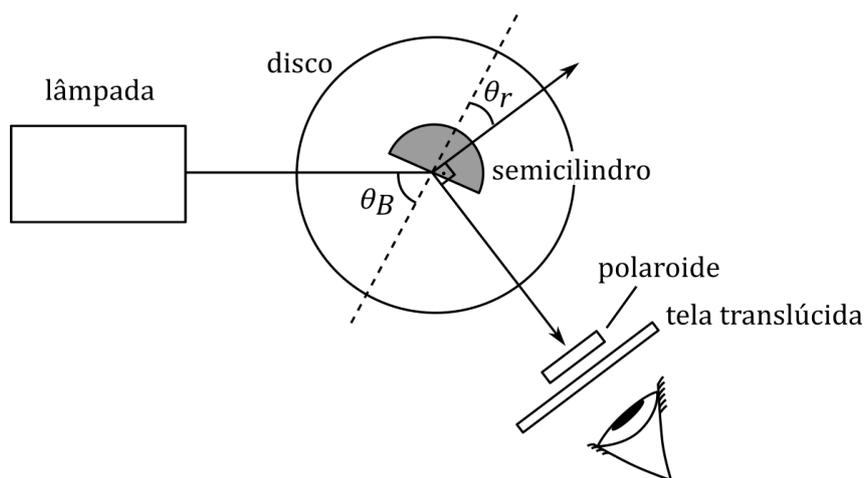
## 4 Relação do material

- 01 fonte luminosa (lâmpada incandescente);
- 01 trilho de ferro fundido com escala milimetrada ( $L = 150$  cm);
- 01 fotocélula de selênio com proteção metálica;
- 01 microamperímetro (até  $100 \mu A$ );
- 03 polaroides com escala em graus;
- 03 suportes metálicos para trilho tipo “V”;
- 01 anteparo translúcido;
- 01 disco branco graduado de diâmetro 30 cm em suporte de latão;
- 01 semicilindro de acrílico.

## 5 Esquemas Experimentais



**Figura 6** Montagem experimental para verificação da lei de Malus.



**Figura 7** Montagem experimental para verificação da lei de Brewster.

## 6 Procedimento Experimental

### PRIMEIRA PARTE - Lei de Malus

1. Coloque sobre o banco ótico, alinhados, a lâmpada, dois polaroides e a fotocélula de selênio, conforme o esquema da figura 6. Ligue a lâmpada (110 V) ao transformador (220 V  $\rightarrow$  110 V) e acenda a lâmpada.
2. Coloque os dois polaroides a  $0^\circ$ .
3. Ajuste a posição da fotocélula de maneira que o microamperímetro acuse  $100 \mu\text{A}$ .
4. Mantenha o polaroide próximo à lâmpada (polarizador) com uma orientação fixa. Gire o outro polaroide (analisador), anotando na Tabela I do relatório as medidas de corrente em função do ângulo entre os polaroides. *Nota: A corrente elétrica acusada pelo microamperímetro é proporcional à intensidade luminosa recebida pela fotocélula.*
5. Para verificar a função dos polaroides quanto à transmissão da intensidade luminosa, coloque agora mais um polaroide na bancada, de modo a ter três consecutivos.
6. Coloque os três polaroides a  $0^\circ$  e aproxime a fotocélula até que o microamperímetro acuse aproximadamente  $100 \mu\text{A}$ . Mantenha o primeiro e o segundo polaroides a  $0^\circ$  e ajuste o terceiro a  $90^\circ$ . Anote na Tabela II do relatório a corrente em função do ângulo indicado pelo **segundo polaroide**.

### SEGUNDA PARTE - Ângulo de Brewster e ângulo limite

1. Retire os polaroides e a fotocélula do banco ótico. Coloque o disco graduado na posição horizontal sobre o banco ótico, com o suporte adequado, na mesma altura da lâmpada.
2. Coloque a máscara de fenda vertical na frente da lâmpada e produza um raio luminoso visível sobre o disco e que passe exatamente por seu centro.
3. Sobre o disco coloque o semicilindro transparente de acrílico, com o centro de sua face plana coincidindo com o centro do disco, conforme o esquema da Figura 7. Girando o disco, tente identificar os raios incidente, refletido e refratado.
4. Como no esquema da Figura 7, observe o feixe **refletido** pelo semicilindro, posicionando, entre o observador e o feixe, um polaroide e uma tela translúcida. Observe o que acontece com a intensidade do feixe variando o ângulo de incidência de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , nas seguintes situações: (a) polaroide a  $0^\circ$ ; (b) polaroide a  $90^\circ$ .
5. Baseando-se nas observações do item anterior, determine o ângulo de Brewster (ver Seção 2.3) e a direção da polarização do feixe refletido (vertical ou horizontal). Anote os resultados na Tabela III.
6. Meça o ângulo limite (ver Seção 2.4) para o semicilindro e anote na Tabela III.

## 7 Questionário

1. (a) Trace o gráfico de  $I$  em função de  $\cos^2 \theta$  com os dados da Tabela I e faça uma regressão linear, obtendo os coeficientes linear e angular da reta.  
(b) Compare o resultado com a equação de Malus (2): quais os significados físicos dos coeficientes obtidos e quais eram seus valores esperados?
2. Através do gráfico precedente determine o ângulo entre os polaroides afim de que a intensidade da luz transmitida pelo segundo polaroide seja 75 % da luz transmitida pelo primeiro.
3. (a) Trace o gráfico de  $I$  em função de  $\sin^2(2\theta)$  com os dados da Tabela II e faça uma regressão linear, obtendo os coeficientes linear e angular da reta.  
(b) Compare o resultado com a equação (4): quais os significados físicos dos coeficientes obtidos e quais eram seus valores esperados?
4. (a) Faça um esquema contendo o disco graduado e o semicilindro e indique a direção da polarização do feixe refletido para um ângulo de incidência igual ao ângulo de Brewster.  
(b) Explique quais as funções do polaroide e da tela translúcida na determinação do ângulo de Brewster e da polarização da luz refletida.
5. (a) A partir do valor medido do ângulo de Brewster e sua incerteza experimental, calcule o índice de refração do semicilindro e sua incerteza.  
(b) Faça o mesmo a partir do valor medido do ângulo limite.  
(c) Compare os resultados. Eles são compatíveis?

## Exp. 13 - Luz polarizada

GRUPO: \_\_\_\_\_

ALUNOS: \_\_\_\_\_

TURMA: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

DATA: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### ➤ Primeira Parte - Lei de Malus

TABELA I

$\theta$ (graus)	$\cos^2\theta$	$I$ ( $\mu\text{A}$ )
0,0		
15,0		
30,0		
45,0		
60,0		
75,0		
90,0		

TABELA II

$\theta$ (graus)	$\sin^2 2\theta$	$I$ ( $\mu\text{A}$ )
0,0		
7,5		
15,0		
22,5		
30,0		
37,5		
45,0		

### ➤ Segunda Parte - Ângulo de Brewster e ângulo limite

TABELA III

$\theta_B$ (graus)	Incerteza $\theta_B$ (graus)	$\theta_L$ (graus)	Incerteza $\theta_L$ (graus)

Polarização da luz refletida: ( ) horizontal  
( ) vertical