

# Polarização da Luz por Absorção e Reflexão

Rodrigo Hjort <sup>a)</sup>

Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná  
Curitiba, PR, Brasil

Neste experimento analisamos o princípio da polarização da luz pelos fenômenos de absorção e reflexão. Utilizando um conjunto de polarizadores e fotômetro verificamos a validade da Lei de Malus. Com uma lente cilíndrica e polarizador medimos o Ângulo de Brewster e então fizemos comparações entre teoria e experimento. Ao final expandimos a propriedade de polarização à qualquer onda eletromagnética e transversal.

## I. INTRODUÇÃO

Etienne Louis Malus descobriu em 1809, por acaso, que a luz pode ser polarizada se refletida sob certo ângulo crítico numa placa de vidro ou outro material dielétrico<sup>2</sup>. Sir David Brewster também efetuou estudos sobre este fenômeno e, em 1812, deduziu empiricamente as equações que levam seu nome. Em 1938, E. H. Land inventou uma película polarizadora que recebeu o nome comercial de Polaroid, tendo esta a capacidade de absorver certas componentes da onda eletromagnética incidente<sup>1</sup>.

Óculos de sol, visores de cristal líquido (LCD) presentes em aparelhos eletrônicos e películas polarizadoras (Polaroid) são exemplos de instrumentos que utilizam-se do princípio da polarização da luz para controlar a intensidade luminosa de uma dada fonte. A polarização é uma característica inerente às ondas transversais e é produzida, em ondas eletromagnéticas, pelos seguintes fenômenos: absorção, espalhamento, reflexão e birrefringência.

Na primeira parte deste experimento analisamos os fenômenos de absorção e a Lei de Malus utilizando polarizadores e fotômetro. Em seguida utilizamos uma lente cilíndrica e polarizador para evidenciar a polarização por reflexão e o ângulo de Brewster. Com estas informações são feitas comparações entre as previsões teóricas e os resultados experimentais.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. LUZ POLARIZADA

Em fontes de rádio e microondas os emissores fundamentais, elétrons movendo-se para frente e para trás na antena transmissora, atuam em harmonia, isto é, formam uma fonte *coerente*. Em fontes luminosas comuns, entretanto, assim como o sol ou uma lâmpada fluorescente, os emissores elementares, os quais são átomos que compõem a fonte, agem independentemente. Devido a esse fato, a luz propagada de tais fontes numa dada direção consiste de muitas ondas independentes cujos planos

de vibração estão aleatoriamente orientados sobre a direção de propagação, como na Fig. 1. Tal luz é dita *não-polarizada*.

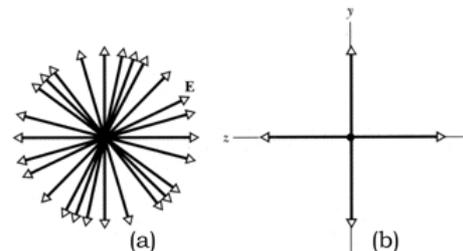


Fig. 1. (a) Onda não-polarizada, produzida com campos elétricos aleatoriamente direcionados. (b) Representação alternativa para onda não-polarizada em suas componentes vertical e horizontal.

Em princípio, pode-se considerar cada campo elétrico da Fig. 1a em termos de suas componentes  $y$  e  $z$ , e então representá-lo como na Fig. 1b. Fazendo isso, a luz não-polarizada é matematicamente transformada na superposição de duas ondas polarizadas cujos planos de vibração são perpendiculares entre si.

Pode-se transformar luz originalmente não-polarizada em luz polarizada fazendo-a atravessar uma película polarizadora como na Fig. 2.

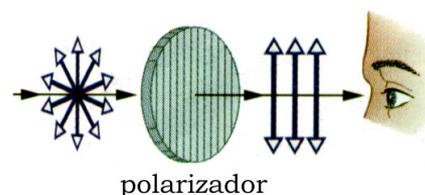


Fig. 2. Luz não-polarizada torna-se polarizada ao atravessar uma película polarizadora. A direção de polarização é alinhada paralelamente ao eixo de transmissão do polarizador.

No plano da película há uma direção característica chamada de *direção de polarização* ou *eixo de transmissão*, indicada pelas linhas paralelas na Fig. 2.

Somente as componentes vetoriais de campo elétrico que são paralelas à direção de polarização são transmitidas por um filme polarizador. Componentes que são perpendiculares à direção de polarização são absorvidas pelo filme.

Quando luz originalmente não-polarizada é enviada através de um filme polarizador, a intensidade transmitida equivale à metade da intensidade original.

<sup>a)</sup> Endereço eletrônico do autor para contato:  
rodrigo\_hjort@yahoo.com

Na Fig. 3 o filme de polarização ou *polarizador* está desenhado no plano da página e a direção de propagação entrando nela. O vetor  $E$  exibe o plano de vibração de uma onda aleatoriamente selecionada movendo-se para cima na lâmina. Este vetor pode ser fragmentado em duas componentes,  $E_z = E \sin \theta$  e  $E_y = E \cos \theta$ . Apenas  $E_y$  será transmitida;  $E_z$  será absorvida no filme.

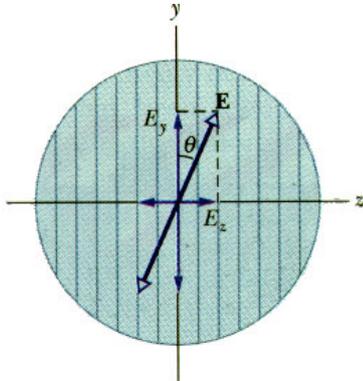


Fig. 3. Direção de vibração de uma onda antes de atravessar o polarizador. O campo elétrico é dividido em duas componentes:  $E_y$  será transmitida e  $E_z$  será absorvida.

Coloca-se um segundo filme polarizador  $P_2$  (dito *analisador*) após  $P_1$ , como na Fig. 4. Se  $P_2$  for rotacionado sobre a direção de propagação, haverá duas posições, separadas em  $180^\circ$ , cuja intensidade da luz transmitida é próxima de zero; estas são as posições nas quais as direções de polarização de  $P_1$  e  $P_2$  são perpendiculares entre si.

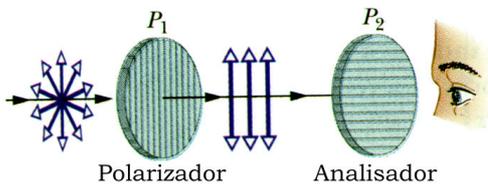


Fig. 4. Luz não polarizada não é transmitida se atravessa polarizadores cruzados (perpendiculares).

Se a amplitude de  $P_2$  é  $E_m$ , a amplitude da luz que emerge é  $E_m \cos \theta$ , onde  $\theta$  é o ângulo entre as direções de polarização de  $P_1$  e  $P_2$ . (Vide Fig. 5).

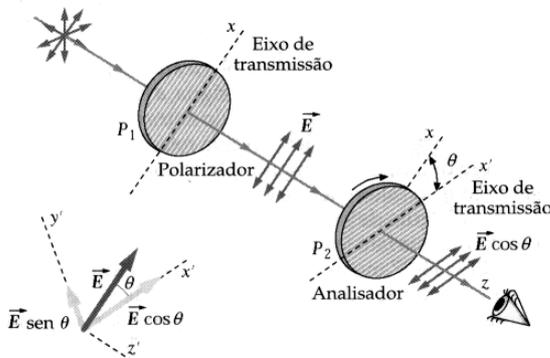


Fig. 5. Placas polarizadoras com os eixos de transmissão fazendo um ângulo  $\theta$ . Apenas a componente  $E \cos \theta$  é transmitida na segunda placa.

Sendo a intensidade de uma onda eletromagnética (neste caso um raio de luz) proporcional ao quadrado da amplitude<sup>1,3</sup>, a

intensidade transmitida  $I$  varia com  $\theta$  de acordo com a *Lei de Malus*<sup>1,3</sup>:

$$I = I_m \cos^2 \theta \tag{2.1}$$

onde  $I_m$  é o valor máximo da intensidade transmitida. Este máximo ocorre quando as direções de polarização de  $P_1$  e  $P_2$  são paralelas, isto é, quando  $\theta=0^\circ$  ou  $\theta=180^\circ$ . Analogamente, quando  $\theta=90^\circ$  ou  $\theta=270^\circ$  a luz transmitida através da região é mínima (nula).

### B. POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO

A Fig. 6 mostra um raio de luz não-polarizado incidindo numa superfície de vidro. Os vetores do campo elétrico na luz podem ser separados em *componentes perpendiculares* (perpendiculares ao plano de incidência), representadas pelos pontos na Fig. 6, e *componentes paralelas* (deitadas no plano de incidência), representadas pelas setas. Para a luz não-polarizada incidente, estas duas componentes são de mesma magnitude.

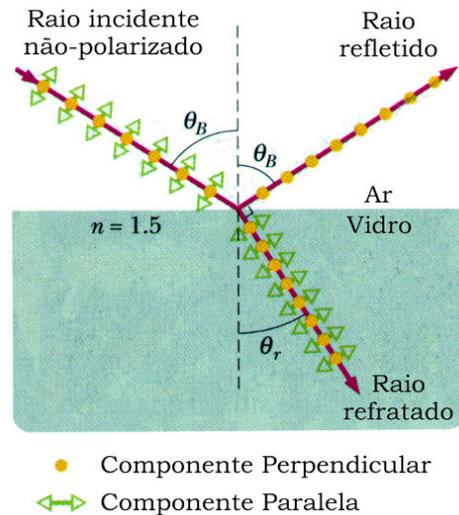


Fig. 6. Para um ângulo de incidência particular, o ângulo de Brewster, a componente paralela é refratada sem perdas. Consequentemente, o raio refletido não contém componente paralela e a luz torna-se plano-polarizada.

Para o vidro ou outros materiais dielétricos, há um ângulo de incidência peculiar, chamado de *ângulo de Brewster*  $\theta_B$ , no qual acontece reflexão nula das componentes paralelas. Isso significa que a luz refletida do vidro para este ângulo de incidência é completamente polarizada, com seu plano de vibração perpendicular ao plano de incidência (o plano da Fig. 6). Uma vez que as componentes paralelas de um raio incidente no ângulo de Brewster não são refletidas, elas devem ser completamente refratadas. Para outros ângulos de incidência, a luz refletida é parcialmente polarizada pois há ainda uma fraca reflexão das componentes paralelas<sup>2</sup>.

Para luz incidente no ângulo de Brewster  $\theta_B$ , os raios refletidos e refratados são perpendiculares entre si. Assim:

$$\theta_B + \theta_r = 90^\circ \quad (2.2)$$

Estes dois ângulos também podem ser relacionados com a equação da refração:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$

Assim, combinando-se (2.2) e (2.3), temos o ângulo de Brewster<sup>2</sup>:

$$\theta_B = \arctg\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.4)$$

Se o meio em que os raios incidente e refletido percorrem for o ar, pode-se considerar  $n_1=1,0$  e representar  $n_2$  por  $n$ . Assim a equação (2.4) simplifica-se em:

$$\theta_B = \arctg(n) \quad (2.5)$$

### III. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### A. POLARIZAÇÃO POR ABSORÇÃO E LEI DE MALUS

O experimento foi montado conforme o diagrama abaixo (Fig. 7), inicialmente sem a presença dos polarizadores  $P_1$  e  $P_2$ .

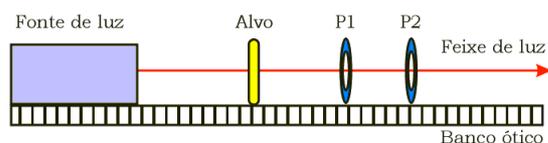


Fig. 7. Arranjo experimental para estudo da polarização por absorção e *Lei de Malus*.

Um dos polarizadores é inserido no banco óptico e em seguida rotacionado para a intensidade luminosa ser observada em cada uma das inclinações.

Foi incluído o outro polarizador no aparato de modo que  $P_1$  e  $P_2$  formassem um ângulo nulo.  $P_1$  é fixado e o alvo é visto através de  $P_2$ , sendo este rotacionado completamente observando-se a intensidade da luz.

O alvo é retirado e um fotômetro devidamente calibrado é instalado na extremidade do banco óptico oposta à fonte de luz. Para cada combinação de ângulos entre  $P_1$  e  $P_2$  é feita a medida da intensidade da luz com o fotômetro.

#### B. POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO E ÂNGULO DE BREWSTER

A montagem experimental para a polarização por reflexão é feita de acordo com o diagrama da Fig. 8. As componentes são ajustadas de forma que somente um feixe de luz passe através do disco, alinhando-o à sua reta normal. A lente cilíndrica é posicionada sobre o centro do disco graduado, com sua face plana voltada para o feixe de luz. (Vide Fig. 9).

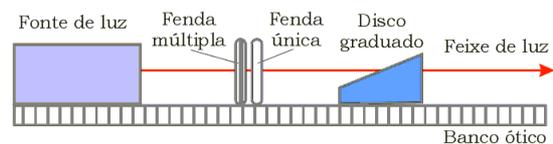


Fig. 8. Arranjo experimental para estudo da polarização por reflexão e *Ângulo de Brewster*.

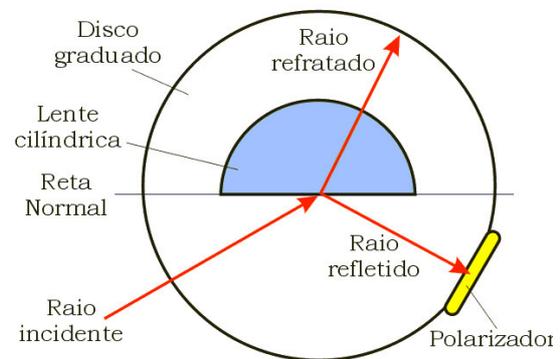


Fig. 9. Detalhe do disco graduado no experimento para obtenção do ângulo de Brewster.

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Se somente um polarizador for inserido, a intensidade é a mesma para qualquer ângulo do eixo de transmissão deste.

Com os valores medidos na seção III.A, foi gerado o gráfico da intensidade contra o ângulo entre os polarizadores (Fig. 10). A linha contínua representa a curva prevista teoricamente pela *Lei de Malus*.

No arranjo experimental da seção III.B, quanto mais próximo do ângulo  $\theta=56^\circ$  medido, menor era a intensidade observada, até o valor nulo.

### V. SUMÁRIO

A intensidade proveniente de uma fonte luminosa quando o feixe atravessa um polarizador é a metade daquela que haveria se não houvesse obstrução. Isso acontece pois a película polarizadora absorve as componentes da onda eletromagnética que são paralelas ao eixo de transmissão do polarizador.

Notamos que a luz da lâmpada utilizada não é plano-polarizada, pois quando utilizamos somente um polarizador, em todos os ângulos medidos em relação ao seu eixo de transmissão o raio que emerge deste tem

a mesma intensidade: a metade da intensidade da fonte original.

Observando o gráfico da Fig. 10, concluímos que a *Lei de Malus* (2.1) está de acordo com a análise da intensidade no conjunto de polarizadores. Desta forma, o máximo de intensidade ocorre quando os polarizadores têm um ângulo  $\theta=0^\circ$  ou  $\theta=180^\circ$  entre seus eixos de transmissão. Em contrapartida, o mínimo de luz ocorre quando  $\theta=90^\circ$ , e este valor é zero.

O fenômeno independe da disposição dos polarizadores: quando fixamos  $P_1$  e giramos  $P_2$  e depois o inverso, os resultados obtidos foram os mesmos.

Se uma lâmina de vidro ou plástico for posicionada entre os dois polarizadores, mesmo estando estes com seus eixos de transmissão perpendiculares, haverá reposição de certas componentes da onda e luz plano-polarizada voltará a ser observada na outra extremidade, como se houvesse um único polarizador.

Na segunda parte do experimento, concluímos que a luz refletida pela lente cilíndrica é

plano-polarizada numa direção paralela ao eixo vertical. De acordo com a equação (2.5), considerando  $n_{\text{lente}}=1,50$ , o ângulo de *Brewster* seria  $\theta_B=\arctg(1,50)=56,3^\circ$ . O ângulo medido experimentalmente foi  $\theta=56,0^\circ$ , condizendo com a teoria a menos de erros experimentais.

O princípio da polarização, apesar de observada exclusivamente a luz neste experimento, é válido para qualquer onda eletromagnética. Isso pode também ser estendido para qualquer onda transversal. Já ondas longitudinais, como as sonoras, não sofrem polarização.

## VI. REFERÊNCIAS

<sup>1</sup>P. Tipler, *Física 2* (LTC, 4ª edição).

<sup>2</sup>D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentals of physics* (John Wiley, 1993, 4<sup>th</sup> edition).

<sup>3</sup>F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young, *Física* (Vol. 4, 2ª edição, 1985).

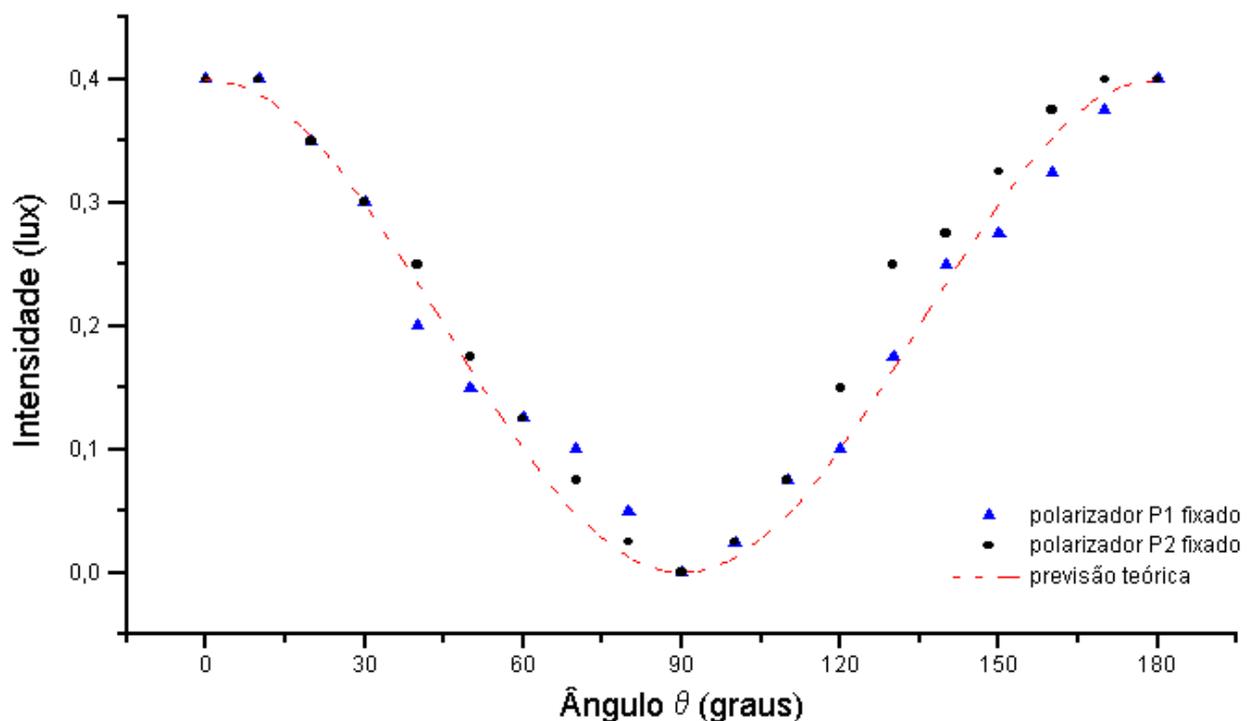


Fig. 10. Gráfico da intensidade em função do ângulo de inclinação dos polarizadores. A linha contínua representa a simulação de acordo com a Lei de Malus, equação (2.1).