

# **Física Experimental IV - 2008**

## **Polarização - Lei de Malus**

---

***Prof. Alexandre Suaide***  
***Prof. Manfredo Tabacniks***

# Polarização da luz

- Objetivos – Estudar o fenômeno de polarização da luz
  - Aula 1 – Métodos de polarização
    - Lei de Malus
  - Aula 2 – Estudo do fenômeno de birrefringência
    - Lei de Brewster
  - Aula 3 – Atividade óptica de elementos
    - Alteração do estado de polarização da luz
    - Estudo da birrefringência em soluções de açúcares

# A natureza da Luz

---

- O estudo de trajetórias de raios luminosos, em geral, é bem descrita pela óptica geométrica
  - Lentes, espelhos, etc.
- Por conta disto, durante muito tempo, a teoria para a luz de Newton foi bem aceita
- Porém, as experiências de Young e Fresnel no início dos anos de 1800 revelaram os efeitos de interferência e difração da luz

# A natureza da Luz

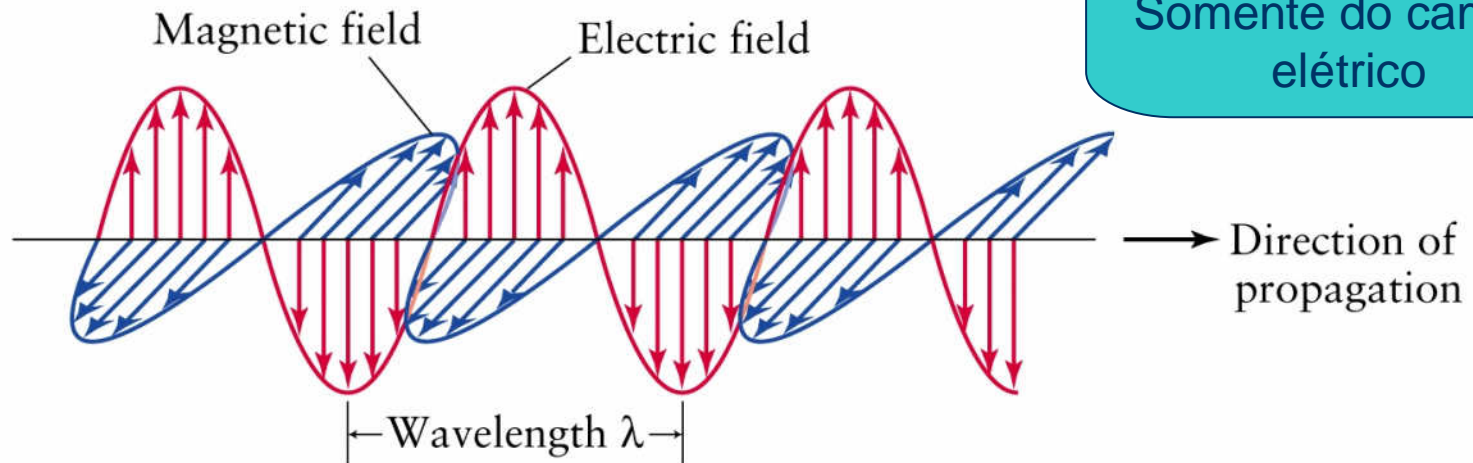
---

- Interferência e difração
  - A luz se comporta como uma onda
- Que tipo de onda?
  - A observação de fenômenos de polarização indicam que a luz é uma onda transversal
  - Os estudos de Maxwell (1864) mostraram que campos eletromagnéticos se propagam com velocidade da luz e que todos os fenômenos luminosos se aplicam
    - A luz é uma onda eletromagnética

# Ondas transversais

- São aquelas nas quais as suas vibrações são perpendiculares à direção de propagação
- A luz é formada por um campo elétrico e magnético transversais e variantes no tempo
  - A variação de E gera B

Por conta disto, vamos Falar, daqui por diante, Somente do campo elétrico



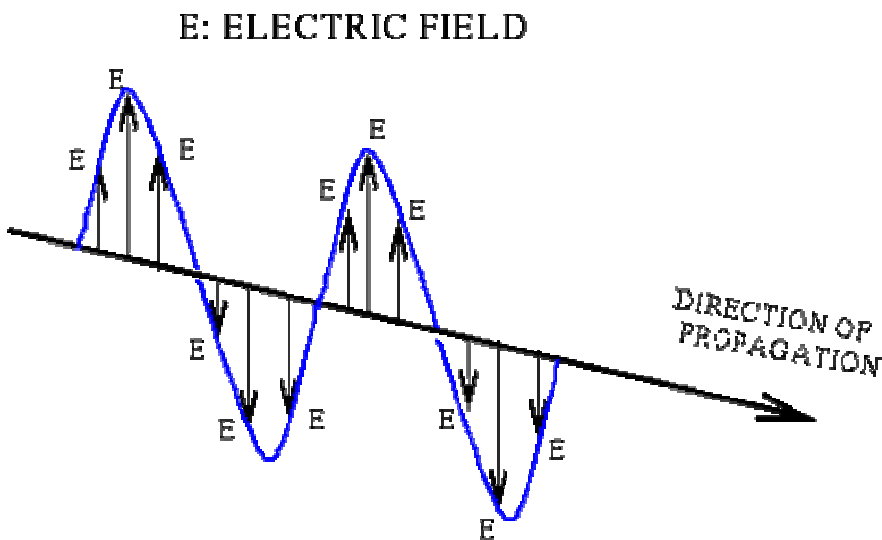
# Polarização da luz

---

- Efeito característico de ondas transversais
- No caso da luz, a direção de polarização é aquela do campo elétrico
- Tipos de polarização:
  - Linear
  - Circular ou elíptica
  - Não polarizada

# Polarização linear

- É aquela na qual a direção do campo elétrico não se altera com o tempo, somente a sua intensidade



- No caso de uma onda de frequência bem definida, podemos escrever o campo elétrico como:

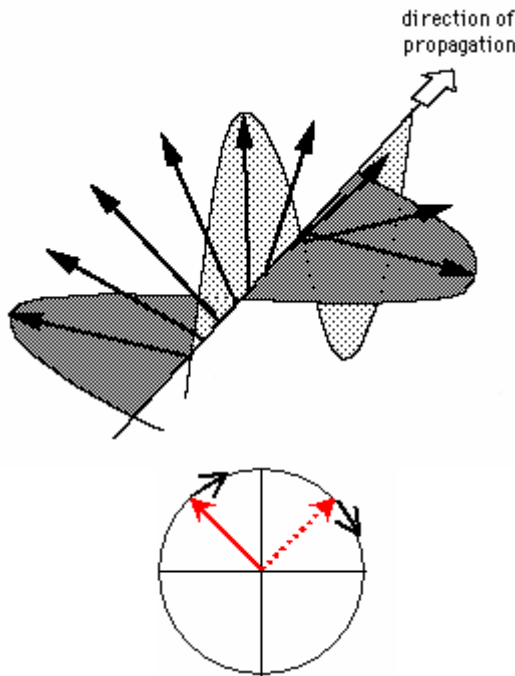
$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t) \hat{j}$$

$$k = 2\pi / \lambda$$

$$\omega = 2\pi f$$

# Polarização circular

- É aquela na qual a direção do campo elétrico depende do tempo mas a intensidade é constante



- No caso da polarização circular, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de  $90^\circ$ , ou seja:

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \left[ \begin{array}{l} \cos(kx - \omega t) \hat{j} + \\ \text{sen}(kx - \omega t) \hat{i} \end{array} \right]$$

$$\vec{E}(x, t) = E_0 e^{j(kx - \omega t)}$$

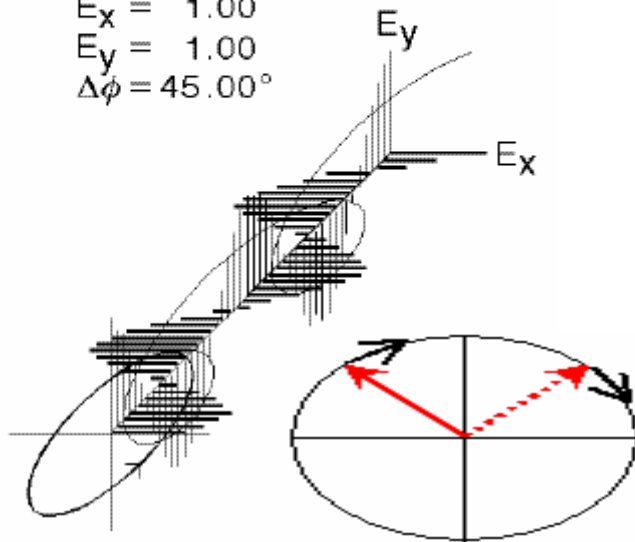


# Polarização elíptica

- É aquela na qual a direção do campo elétrico depende do tempo, bem como a sua intensidade

## Right-hand Elliptical Polarization

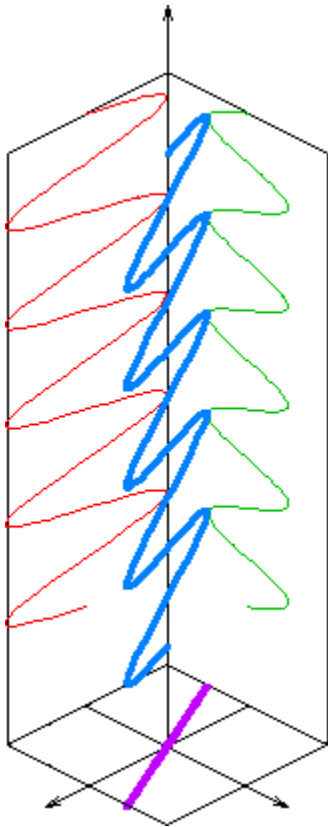
$$\begin{aligned}E_x &= 1.00 \\E_y &= 1.00 \\ \Delta\phi &= 45.00^\circ\end{aligned}$$



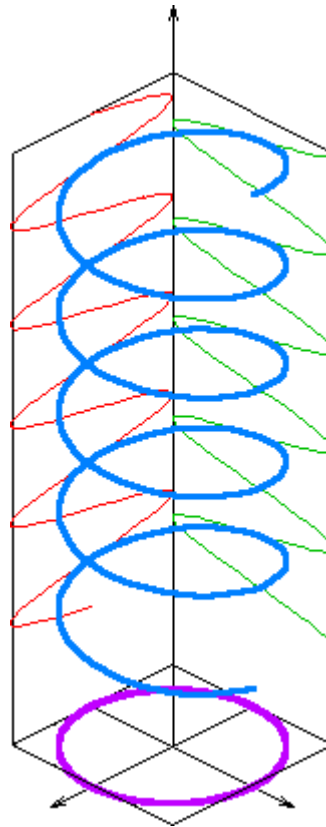
- No caso da polarização circular, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de  $90^\circ$ , ou seja:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, t) &= E_0^j \cos(kx - \omega t) \hat{j} \\ &+ E_0^i \sin(kx - \omega t) \hat{i}\end{aligned}$$

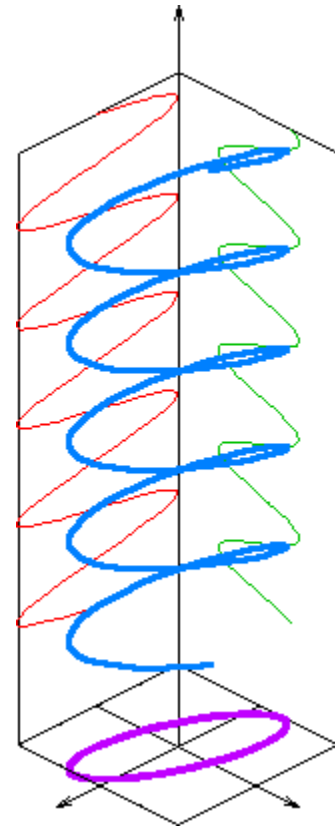
Polarização  
linear



Polarização  
circular



Polarização  
elíptica

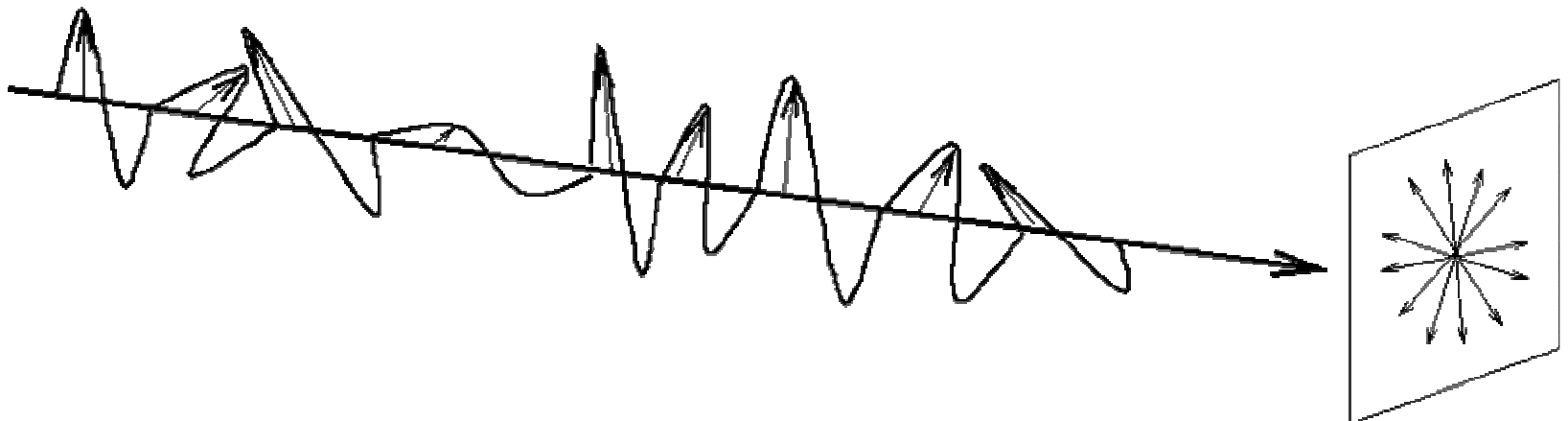


$$\vec{E}(x, t) = E_0^j \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \vec{j} + E_0^k \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \vec{k}$$

# Luz não polarizada

- Tanto a intensidade como a direção do campo elétrico variam de forma incoerente no tempo
- Contudo, podemos sempre escrever que o campo elétrico possui uma componente  $j$  e  $i$

$$\vec{E}(x, t) = E^j(x, t)\hat{j} + E^i(x, t)\hat{i}$$



# O Polarizador



- Instrumento óptico capaz de polarizar a luz em uma dada direção pré-definida.
- Todo polarizador é caracterizado por um eixo de polarização
  - Este eixo representa a direção da componente do campo elétrico que será transmitida
- Vários tipos de polarizador
  - Absorção
    - Absorve a componente dos campos EM em uma dada direção
  - Birrefringentes
    - O índice de refração pode depender da polarização da luz
  - Reflexão
    - A luz refletida, dependente do ângulo, favorece a polarização em uma direção

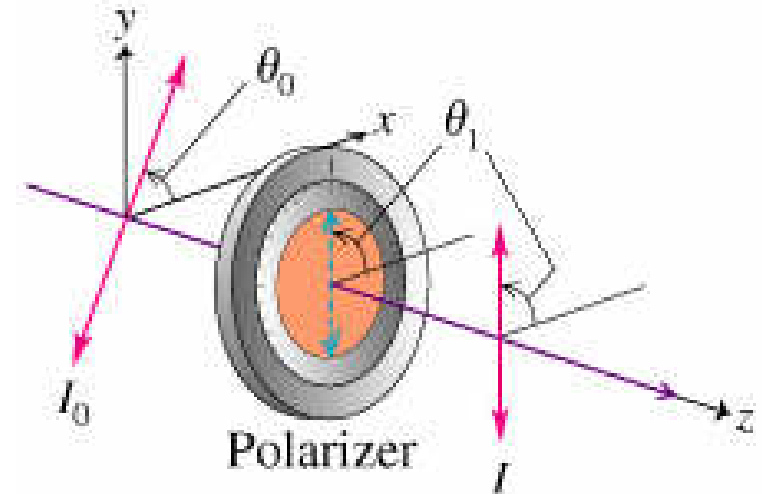
# Lei de Malus

- Lei de Malus
  - Polarizador colocado na frente de uma luz polarizada, com seu eixo em um ângulo  $\theta$  em relação ao campo elétrico

$$E = E_0 \cos \theta$$

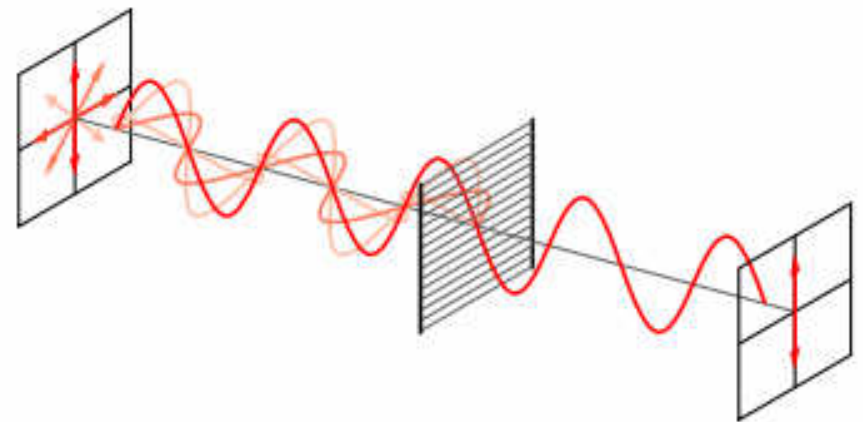
- A intensidade da onda transmitida vale:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$



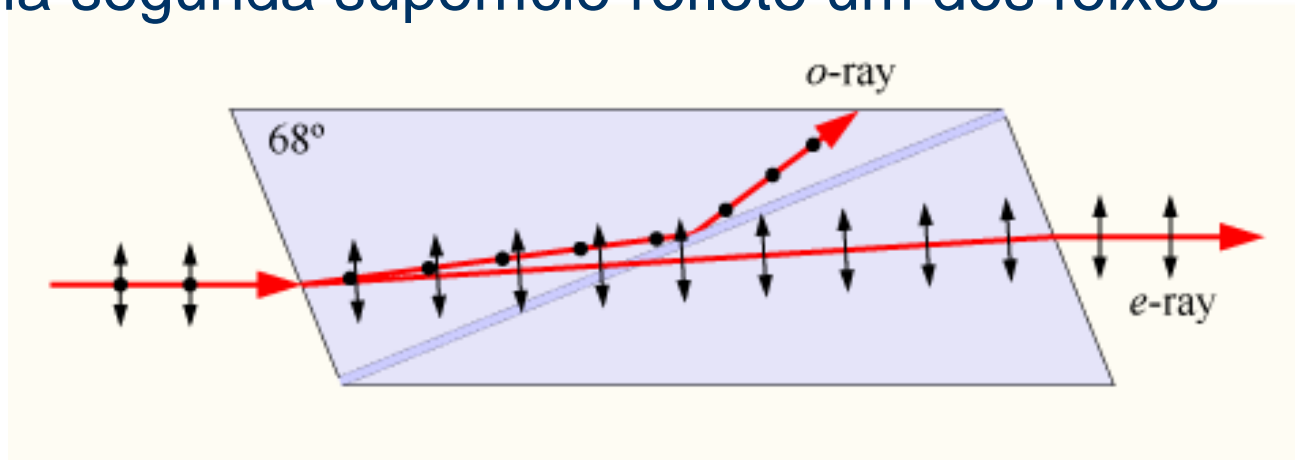
# Polarizador por absorção

- O mais simples é o de grade de fios
  - O campo elétrico na direção dos fios faz com que os elétrons livres se movam. O movimento desses elétrons faz com que essa componente seja absorvida
- Dicroísmo
  - Alguns cristais possuem absorção diferente para cada componente da luz incidente, dependendo da estrutura da rede cristalina



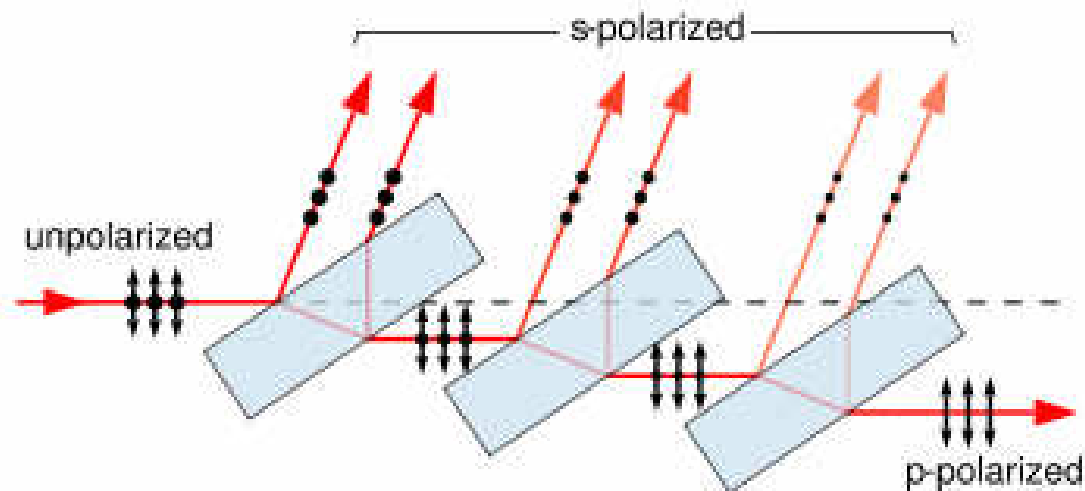
# Polarizador birrefringente

- Alguns materiais, principalmente cristais, possuem índices de refração que dependem da polarização da luz.
- Assim, uma luz não-polarizada tem o seu feixe dividido em dois, um para cada componente de polarização
- Uma segunda superfície reflete um dos feixes



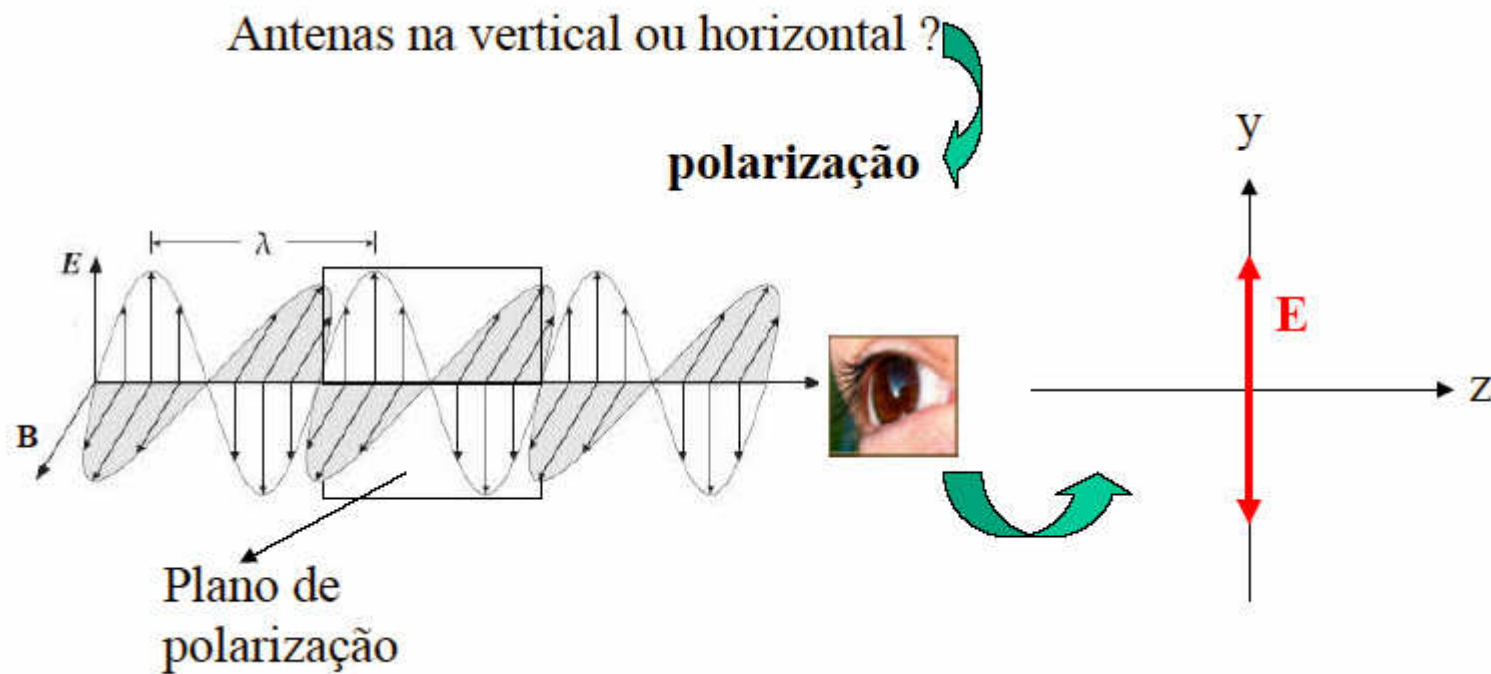
# Polarizador por reflexão

- Ao incidir sobre uma superfície refratora/refletora, dependendo do ângulo de incidência, a luz refletida e refratada são polarizadas



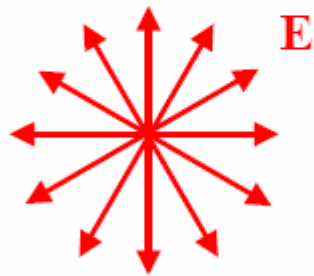


# Polarização

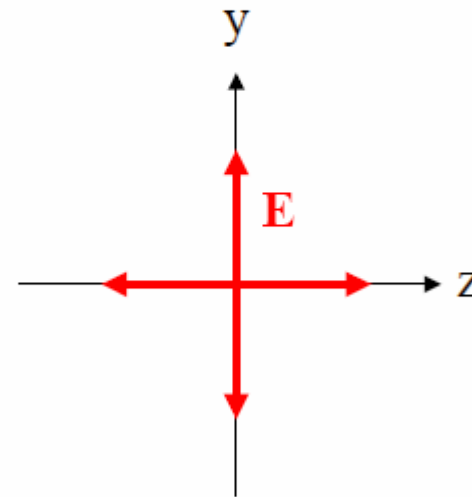


# Luz polarizada

Fonte de luz comum  $\rightarrow$  polarizadas aleatoriamente  
ou não-polarizadas



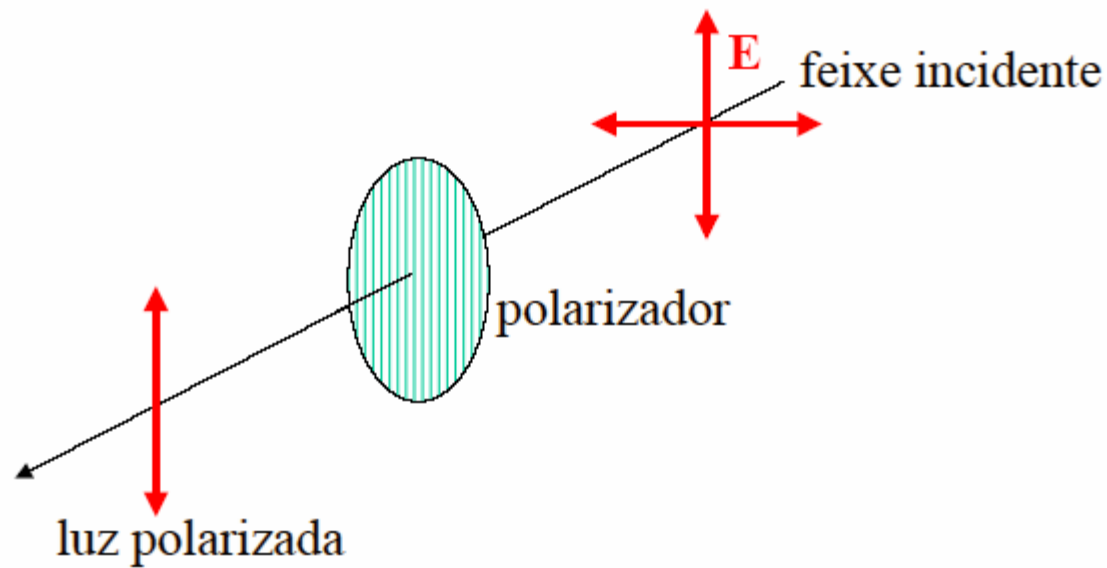
ou



Parcialmente polarizadas  $\rightarrow$  setas comp. diferentes

# Filtro polarizador

Não-polarizada em polarizada

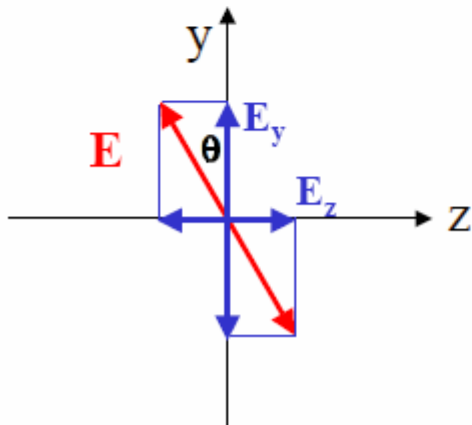


# Intensidade da luz polarizada transmitida

Luz não-polarizada:

polariz.  $I = \frac{1}{2} I_0$  não-polariz.

Luz polarizada: projeção o vetor  $\mathbf{E}$



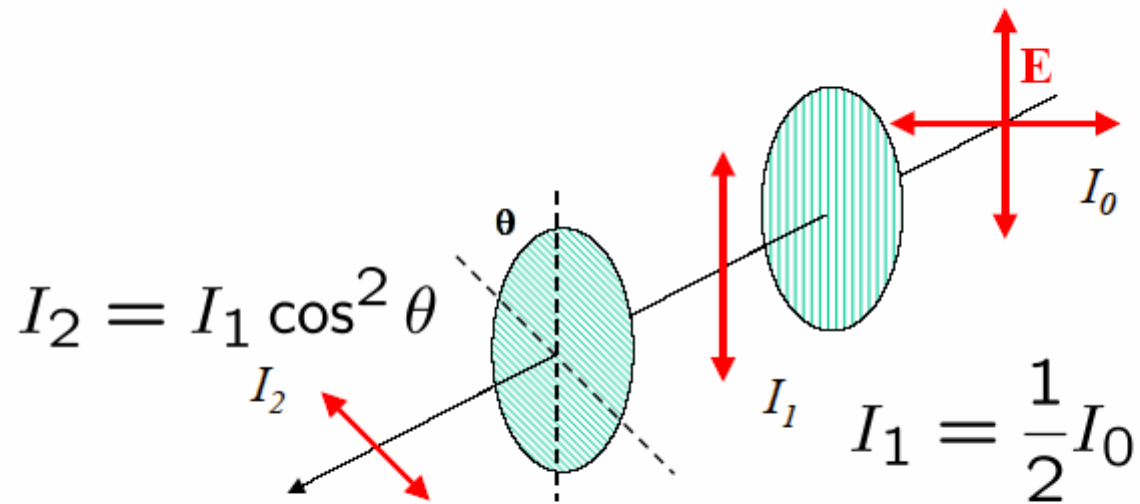
$$E_y = E \cos \theta$$

Como:  $I \propto E^2$

$$\Rightarrow I = I_0 \cos^2 \theta$$

(só para luz já polarizada)

+ de 1 polarizador



$$\Rightarrow I_2 = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

# Objetivos

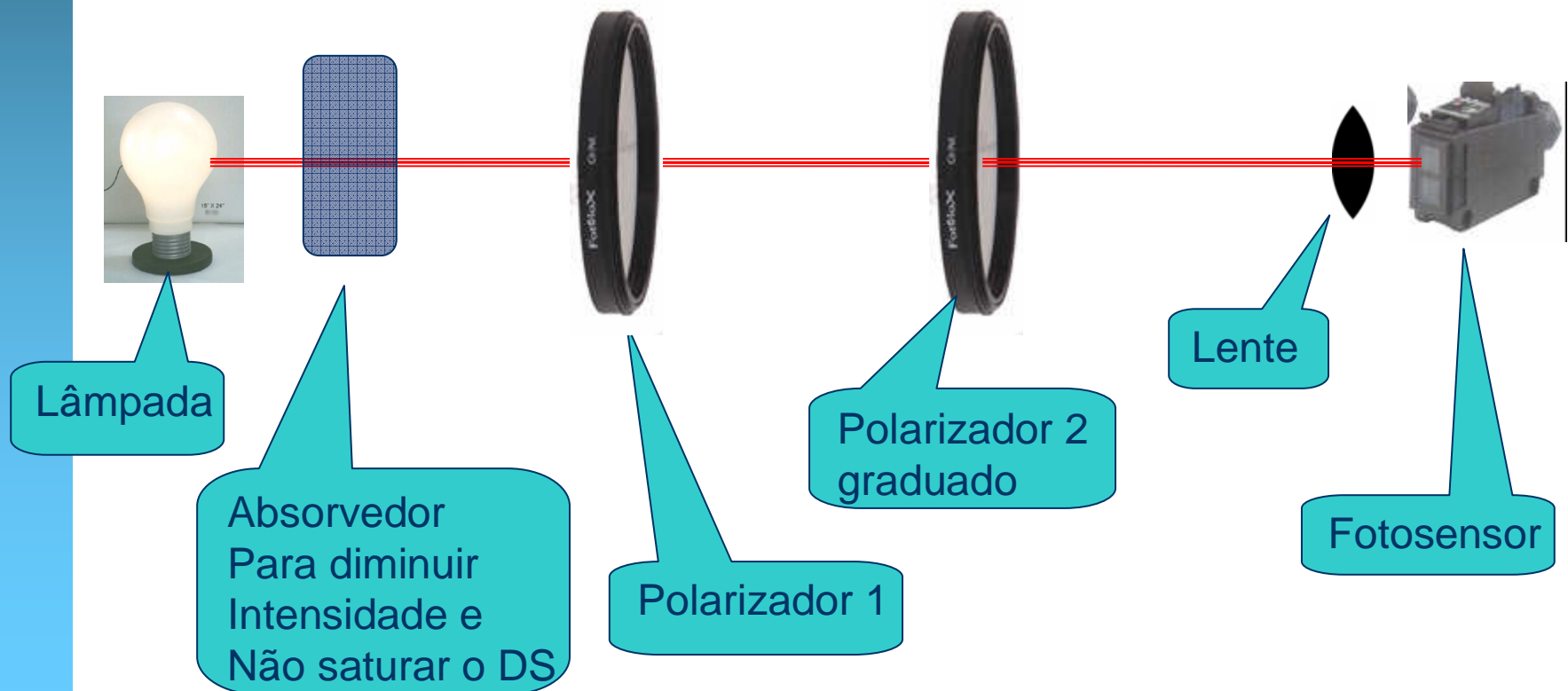
---

- Verificar experimentalmente a lei de Malus

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

# Lei de Malus

- Montar o seguinte arranjo



# Lei de Malus

- Montar o seguinte arranjo



- Alinhar os dois polaróides (Intensidade máxima no data studio)
- Medir a intensidade no data studio variando o ângulo do segundo polaróide de 10 em 10 graus em relação ao primeiro
- Medir a intensidade máxima entre cada medida para monitorar
- Fazer gráfico de  $I/I_0$  vs  $\cos^2 \theta$
- Discutir e simular se pode ter havido um erro em  $\theta$