

# Física Experimental IV

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=90535>

2º Semestre 2021

Exp. 3 – Polarização

Atividade 1 – Lei de Malus

Semana 9 - 11/Novembro

Prof. Henrique Barbosa

[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)

<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>

# Exp. 3 – Polarização

- Objetivos
  - Estudar a polarização linear, circular, e elíptica
  - A reflexão e a polarização: reflexão na interface com dielétricos e com superfícies metálicas
  - Dielétricos que mudam o estado de polarização: as placas  $\frac{1}{2}$  onda e  $\frac{1}{4}$  de onda

# Cronograma

- 4 atividades:

- **Atividade 1:** Fenômenos de polarização da luz - Lei de Malus

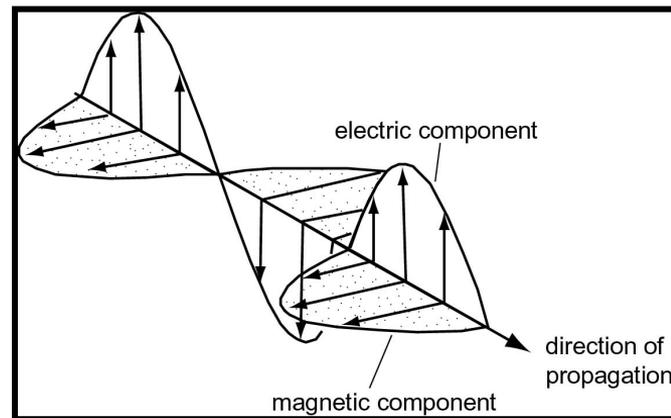
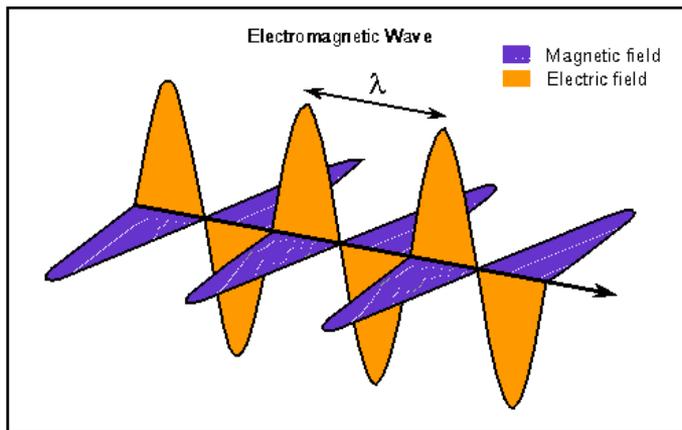
- **Atividade 2:** Polarização após reflexão em dielétrico

- **Atividade 3:** Polarização após reflexão em espelho

- **Atividade 4:** Alteração da polarização por placa de onda

# Radiação eletromagnética

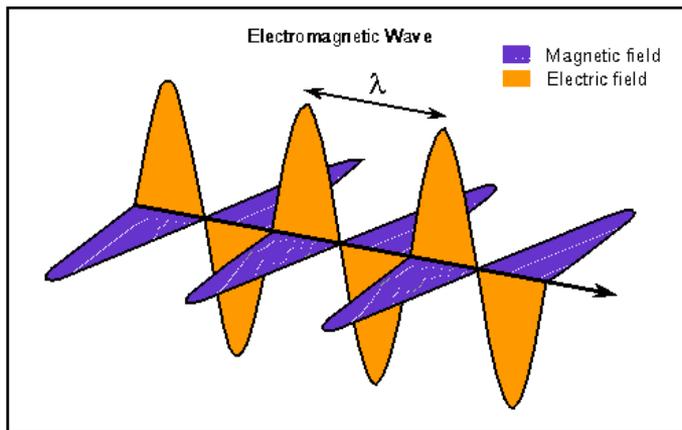
A radiação eletromagnética é uma onda transversal composta de um **campo elétrico** e um **campo magnético**, oscilantes no tempo, perpendiculares entre si e à direção de propagação.



Podemos, por simplicidade, nos referir somente ao campo elétrico.

# Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética é uma onda transversal composta de um **campo elétrico** e um **campo magnético**, oscilantes no tempo, perpendiculares entre si e à direção de propagação.



Toda onda EM (de fato qualquer onda transversal) tem uma propriedade chamada de polarização, que descreve como o campo elétrico se propaga.

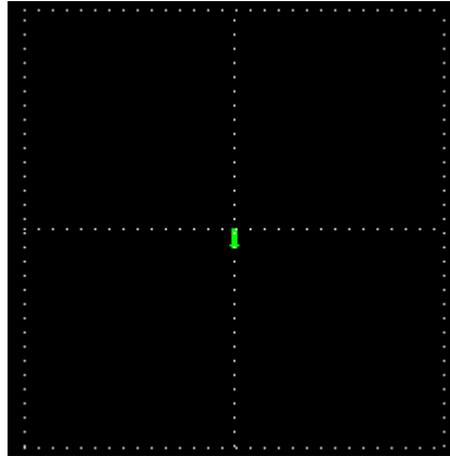
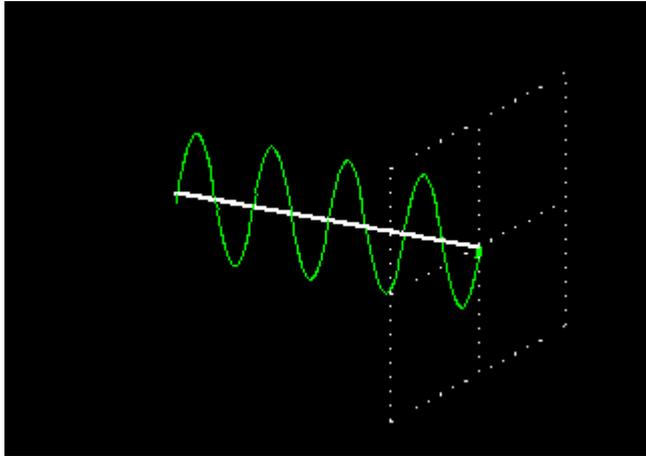
# Estados possíveis de polarização

Há vários estados possíveis de polarização:

1. **Plano polarizada** ou **linearmente polarizada** quando o campo elétrico é sempre paralelo a um plano definido, chamado plano de polarização da onda
2. **Circularmente polarizada** quando o campo elétrico da onda gira em torno da direção de propagação, tendo módulo constante. Nesse caso, pode-se dizer que, numa dada posição o vetor campo elétrico realiza um movimento circular uniforme.
3. **Elípticamente polarizada** quando o vetor campo elétrico descreve uma elipse

# Polarização linear

- A direção do campo elétrico não se altera com o tempo, somente a sua intensidade. O campo vibra em um **plano de polarização da onda**



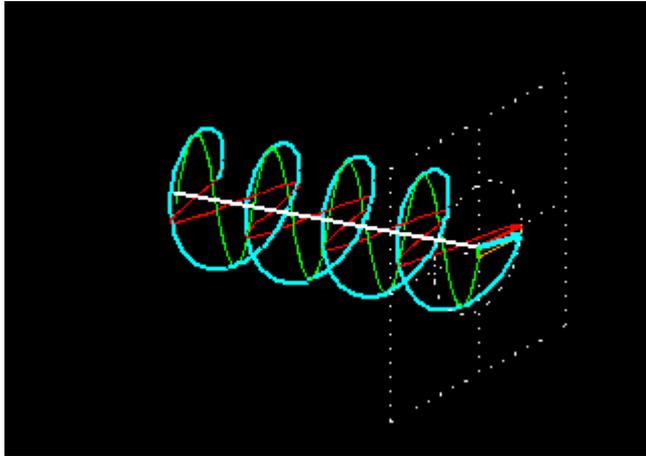
No caso de uma onda de frequência bem definida, podemos escrever o campo elétrico como:

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

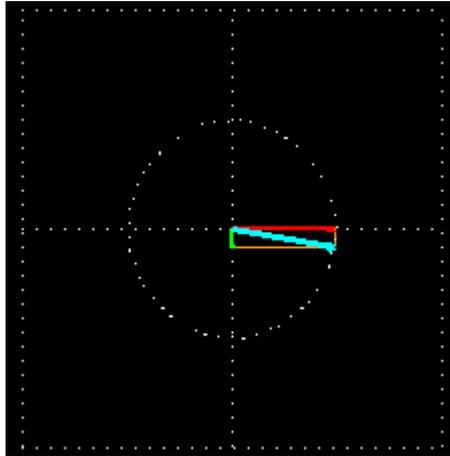
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \omega = 2\pi f$$

# Polarização Circular

- Quando o campo elétrico da onda gira em torno da direção de propagação, tendo módulo constante.
  - Numa dada posição, o vetor  $\mathbf{E}$  realiza movimento circular uniforme.



Circularmente polarizada no sentido horário

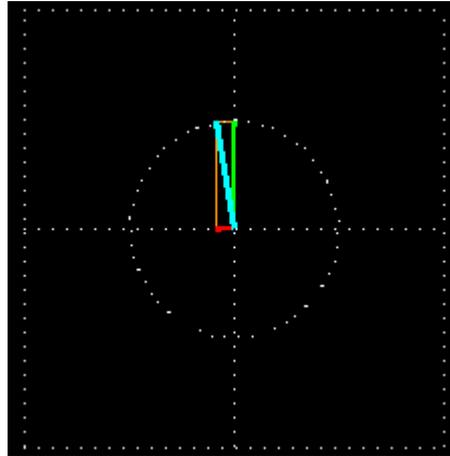
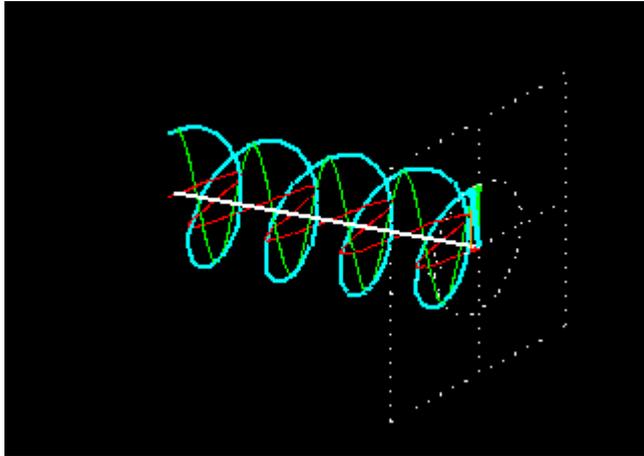


Podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de  $90^\circ$ :

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{j} + E_0 \sin(kz - \omega t) \hat{i}$$

# Polarização Circular

- Quando o campo elétrico da onda gira em torno da direção de propagação, tendo módulo constante.
  - Numa dada posição, o vetor  $\mathbf{E}$  realiza movimento circular uniforme.



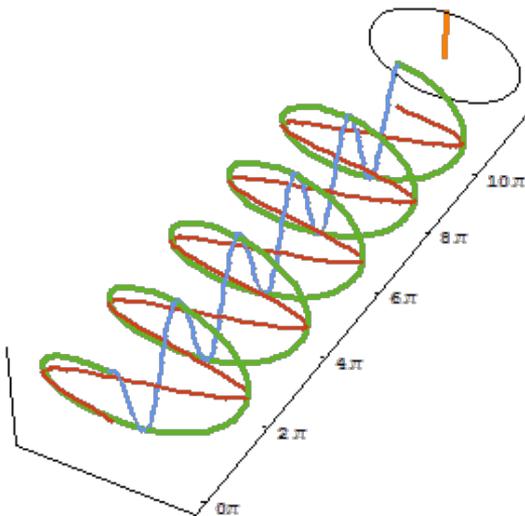
Mudando o sinal da fase, muda a direção de rotação.

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{j} - E_0 \sin(kz - \omega t) \hat{i}$$

Circularmente polarizada no sentido anti-horário

# Polarização Elíptica

- Elipticamente polarizada quando o vetor campo elétrico descreve uma elipse, nesse caso o módulo do vetor campo elétrico não é constante.

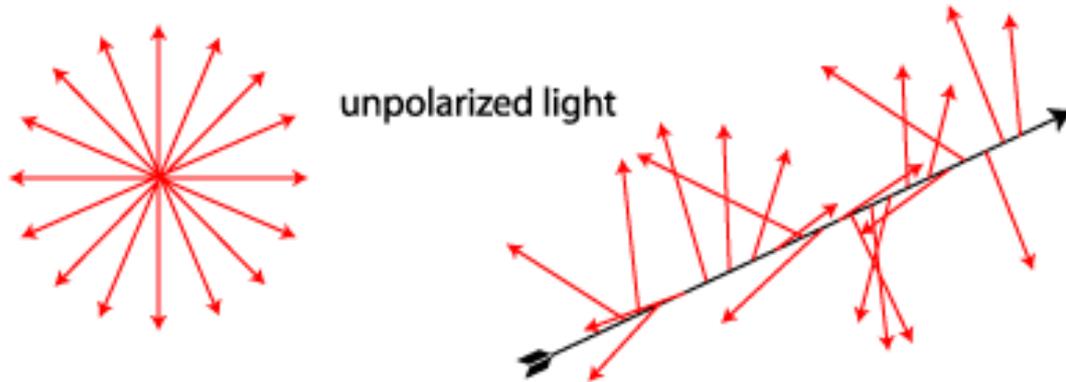


Pode ser descrita como a superposição de duas ondas, de amplitudes diferentes, linearmente polarizadas em direções perpendiculares e defasadas de  $90^\circ$

$$\vec{E}(z,t) = E_1 \cos(kz - \omega t) \hat{j} + E_2 \sin(kz - \omega t) \hat{i}$$

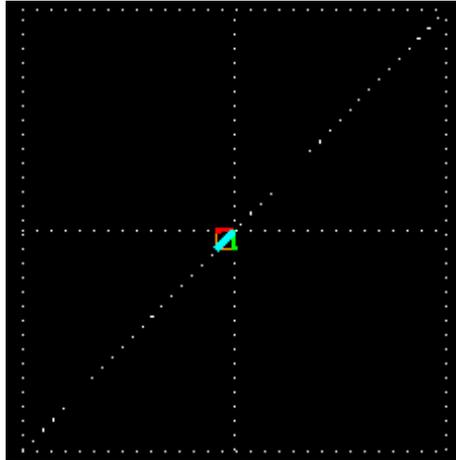
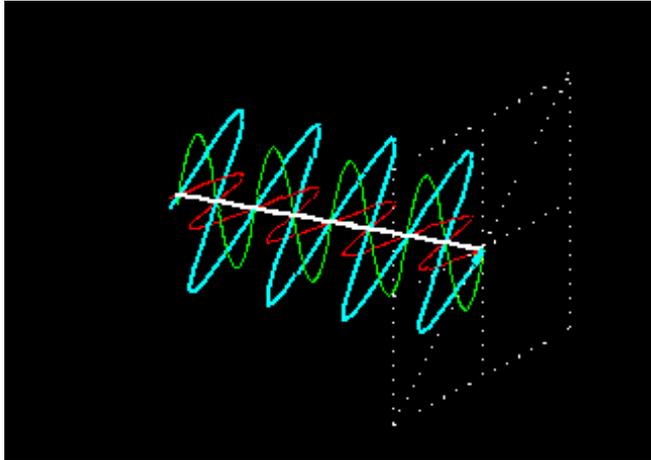
# Luz não polarizada

- A luz é dita não polarizada quando a direção do campo elétrico varia aleatoriamente no tempo.
- A maioria das fontes de luz comuns, como Sol, LED, e incandescente produzem luz não polarizada.



# Superposição

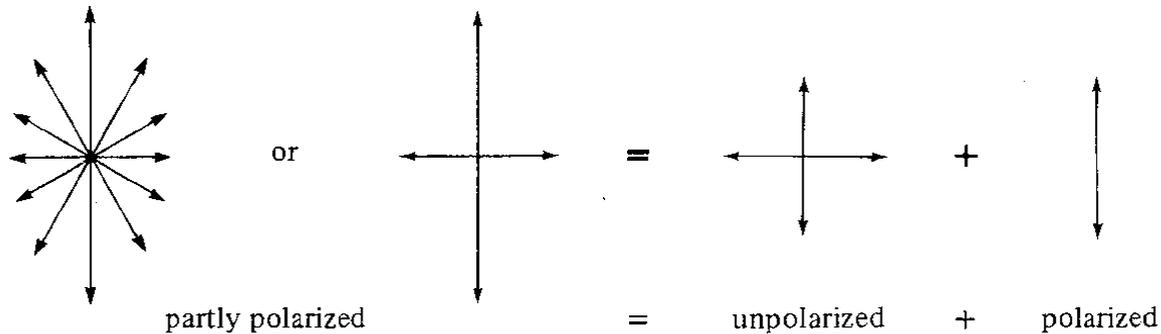
- As propriedades da onda resultante vai depender das intensidades e da diferença de fase das componentes.
  - Exemplo: onda linearmente polarizada com  $45^\circ$



$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{j} + E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{i}$$

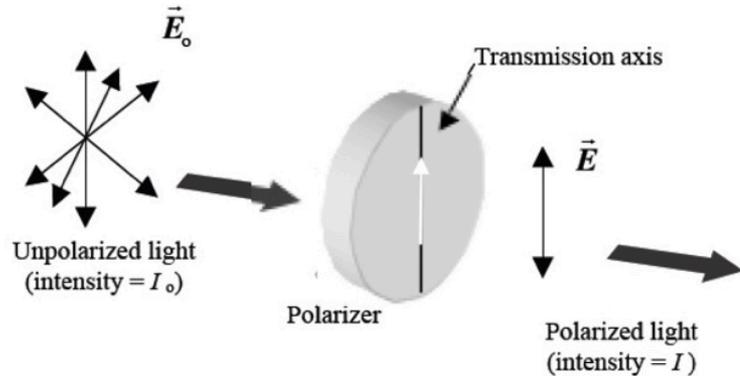
# Superposição

- Em geral, a luz de origem artificial ou natural, não é nem completamente não polarizada, nem completamente polarizada. **Normalmente toda luz é parcialmente polarizada**



# Polarizador

- Instrumento óptico capaz de polarizar a luz em uma dada direção pré-definida.
- Tem um eixo de polarização, que representa a direção da componente de  $\vec{E}$  que será transmitida

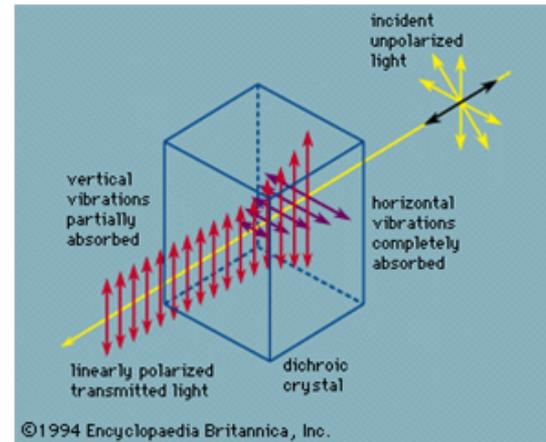
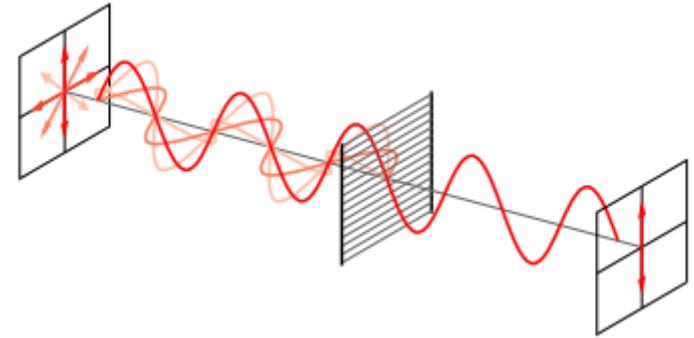


# Tipos de polarizador

- **Absorção:** absorvem 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.

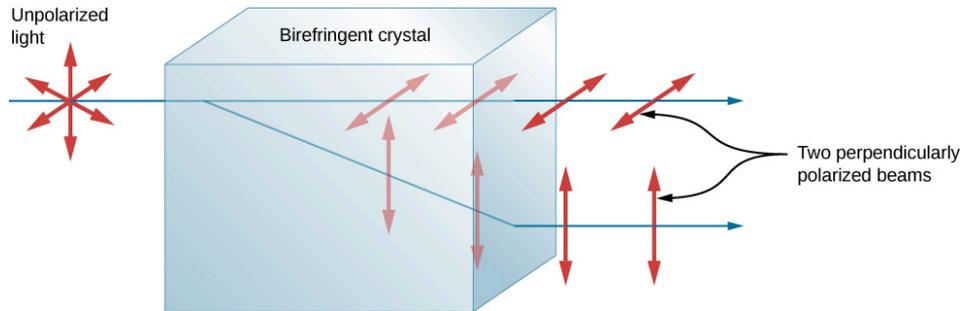
# Polarizador por absorção

- **Grade de fios:** o campo elétrico na direção dos fios pode ser absorvido pelos elétrons livres que podem se mover nesta direção
- **Dicroísmo:** certos cristais e materiais sintéticos possuem absorção diferente conforme a polarização da radiação.



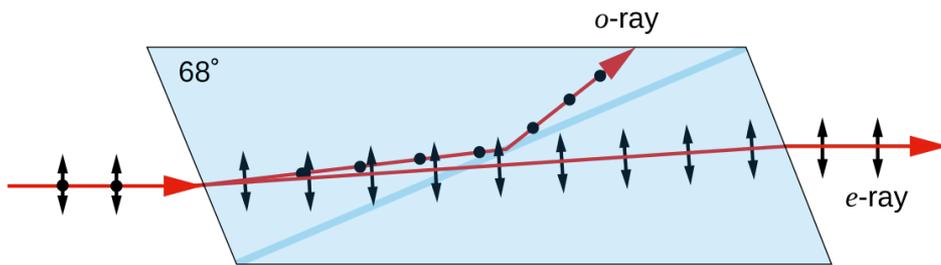
# Polarizador birrefringente

- 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



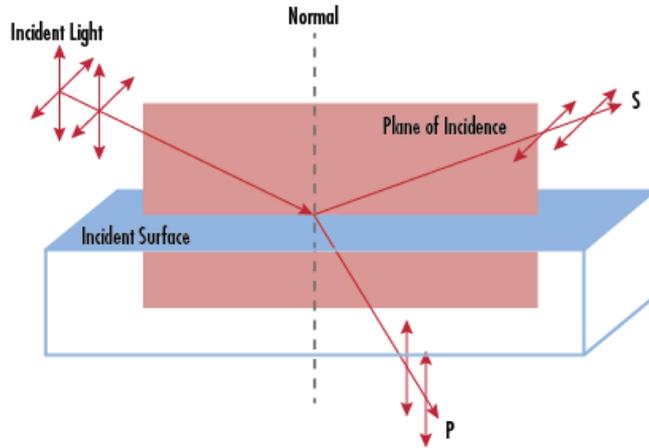
# Polarizador birrefringente

- Com uma segunda superfície (ângulo de Brewster) pode-se refletir uma das componentes (polarizações).



# Polarizador por reflexão

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



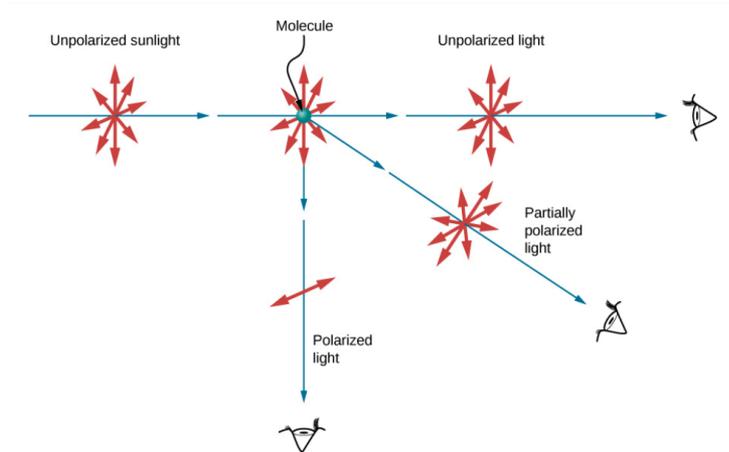
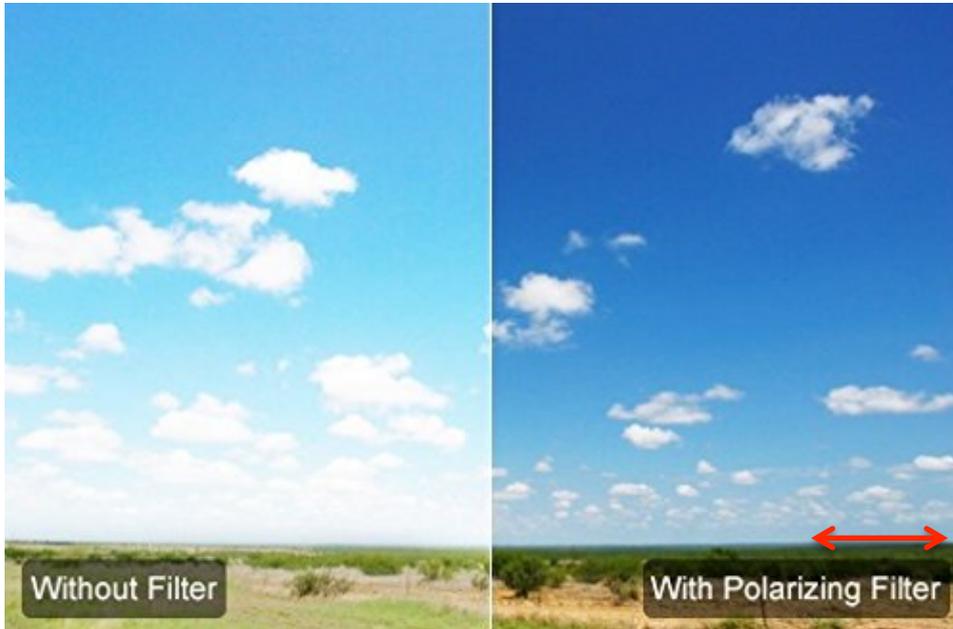
# Exemplos

- Polarizador na frente da máquina fotográfica usado para “cortar” a luz refletida na água.



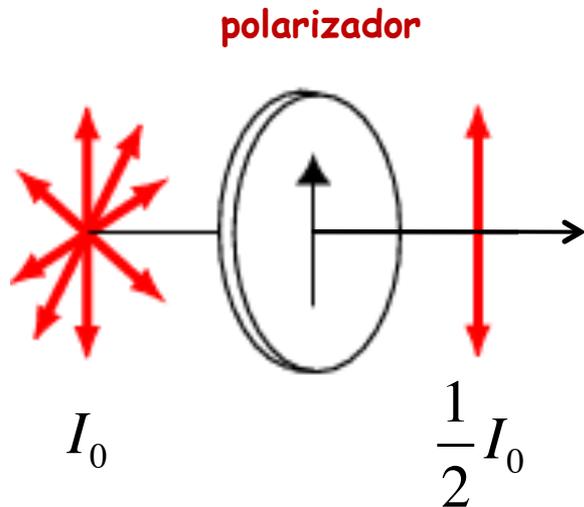
# Exemplos

- Enfatizar o azul do céu, mais polarizado pelo espalhamento pelas moléculas, realçando o contraste com as nuvens.



# Efeito de um polarizador na luz

- Polarizadores selecionam um único estado de polarização entre todos os estados que neles incidem.

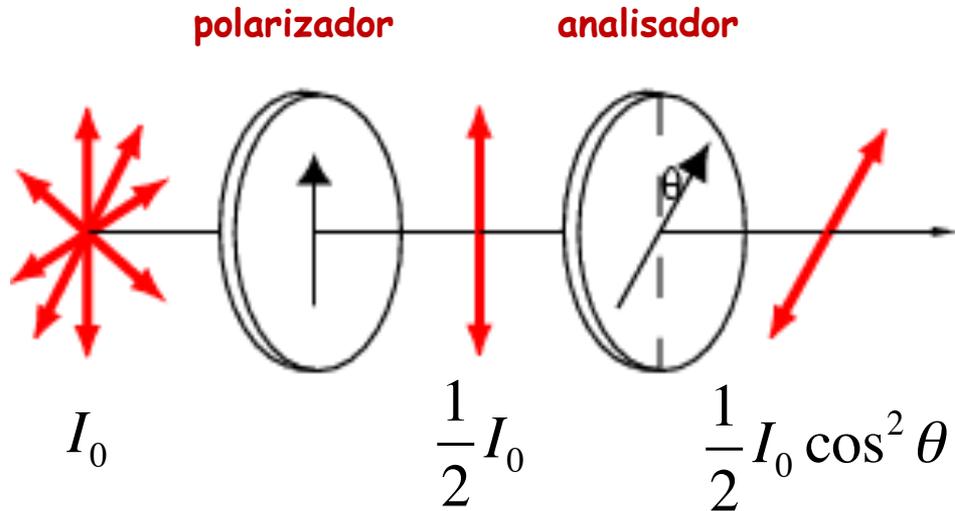


P: Qual a intensidade da luz transmitida?

R: A luz não-polarizada pode ser decomposta em 2 estados de polarização perpendiculares e o polarizador seleciona um deles: cai à metade

# Lei de Malus

- Agora colocamos um segundo polarizador (analisador) logo depois do primeiro.

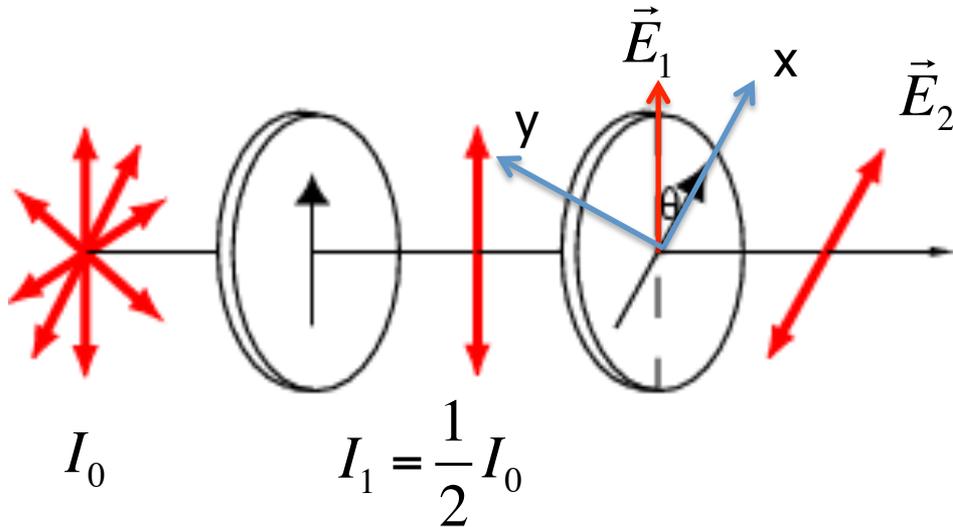


P: Qual a intensidade da luz transmitida?

R:  $E$  pode ser decomposta em 2 estados de polarização perpendiculares (relativo ao eixo do polarizador). Passa a componente alinhada com o 2º polarizador.

# Lei de Malus

- Sem perda de generalidade, podemos escrever  $\vec{E}_1$  no sistema de coordenadas do analisador:



$$\vec{E}_1 = |\vec{E}_1| (\cos\theta \hat{i} + \sin\theta \hat{j})$$

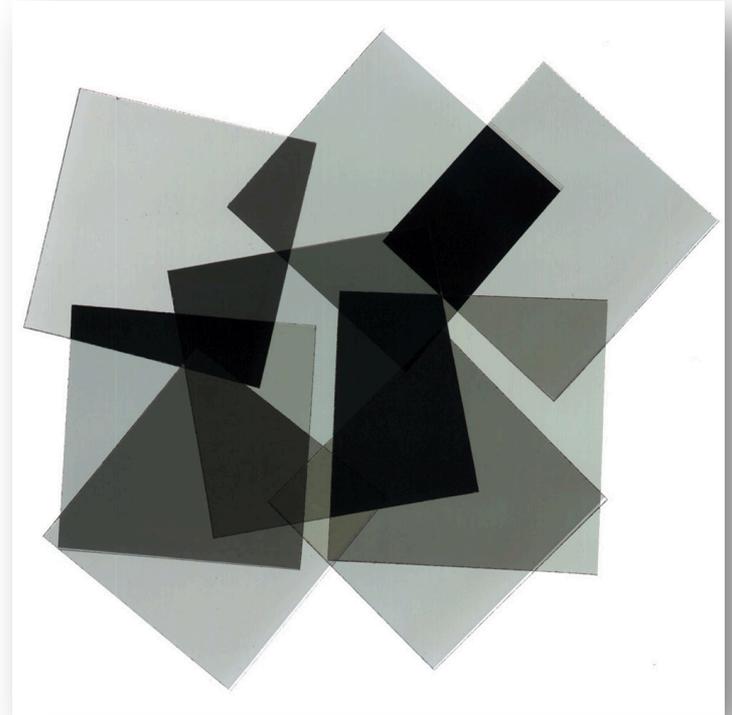
E o polarizador analisador só deixa passar o campo alinhado com seu eixo, portanto  $E_2$  vale:

$$\vec{E}_2 = |\vec{E}_1| \cos\theta \hat{i}$$

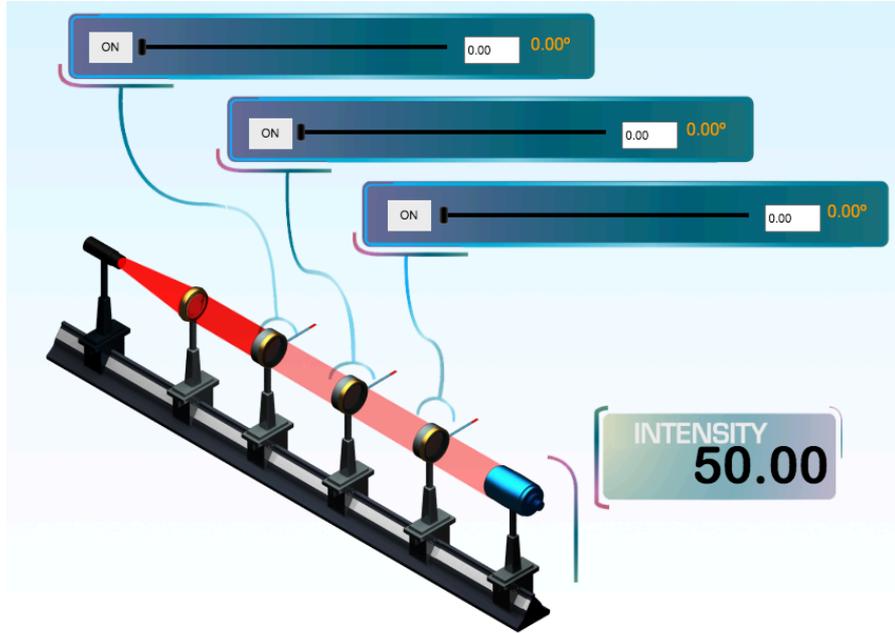
$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

# Resumindo

- **Luz não polarizada:** o polarizador deixa passar  $I_0/2$
- **Luz polarizada:** o polarizador deixa passar  $I_0 \cos^2(\theta)$ , onde  $\theta$  é o ângulo entre o campo elétrico incidente e o eixo do polarizador.



# Simulando a lei de Malus



O que acontece nos seguintes casos?

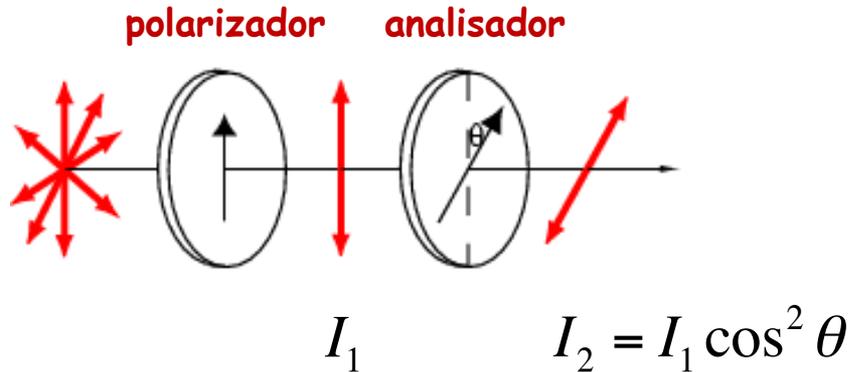
- 1 polarizador: variar ângulo
- 2 polarizadores: fixar um, girar o outro.
- 3 polarizadores: 1 e 2 perpendiculares, girar o 3
- 3 polarizadores: 1 e 3 perpendiculares, girar o 2.

# Vida real

- O polarizador, por não ser bem transparente, absorve também parte da luz polarizada paralelamente ao eixo do polarizador
- O polaróide não funciona igualmente bem para todos os comprimentos de onda
- Há luz residual na sala que pode entrar no detector e que não passou pelos polarizadores

# Atividade 1

- Verificar experimentalmente a lei de Malus para uma luz previamente polarizada.

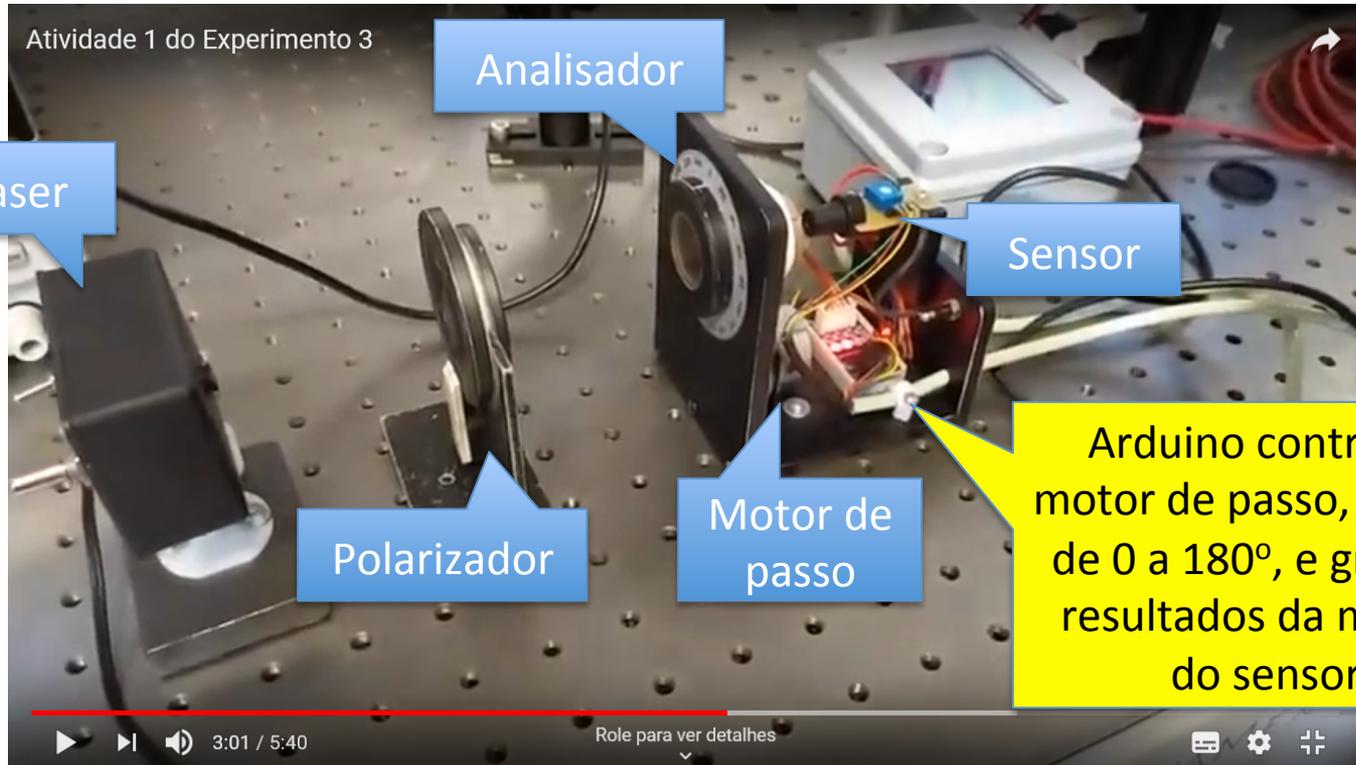


Malus - engenheiro, soldado e aluno de Fourier



1775-1812

# Montagem



[https://youtu.be/bV\\_fWmjmlJo](https://youtu.be/bV_fWmjmlJo)

# Cuidados

- É importante obter um bom alinhamento de todos os elementos na figura anterior
- Verifique se o foto-sensor não está saturando (picos de intensidade máxima cortados)
- Mantenha a intensidade máxima  $\sim 90\%$
- Cuidado ao medir os ângulos entre os polarizadores
  - Qual a incerteza dessa medida? Justifique.
- Qual a incerteza na medida da intensidade luminosa?

# Medidas

- Medir a intensidade luminosa em função de  $\theta$  para 3 orientações diferentes do polarizador inicial ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $50^\circ$ )
- Fazer o gráfico de intensidade vs.  $\theta$  para os 3 casos
- Ajustar os dados experimentais com a previsão teórica da Lei de Malus
- Comparar os valores obtidos para o ângulo do polarizador com os valores nominais.

# Discussão

- Discutir os resultados
  - Os dados se comportam como esperado pela teoria?
  - Caso não, podemos modificar a Lei de Malus para levar em conta outros efeitos? Quais são estes efeitos?
  - Se necessário, refaça o ajuste levando em conta as modificações efetuadas na Lei de Malus (justifique!).