

T6 – Polarização. Lei de Malus.

Parte 1 - Polarização - introdução¹

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo dos conceitos de polarização e de luz polarizada.

A. Olhe para as lâmpadas do laboratório através do filtro polarizador.

Descreva a forma como o polarizador afeta o que vê. Rodar o polarizador tem algum efeito?

B. Segure um segundo polarizador em frente ao primeiro e olhe novamente para as lâmpadas do laboratório.

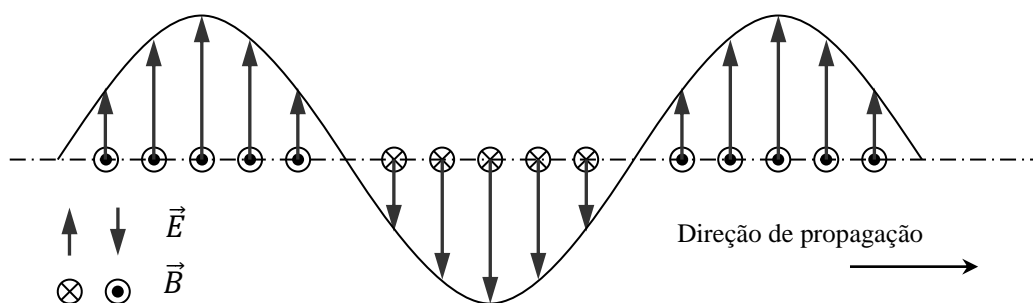
Descreva de que forma os filtros polarizadores afetam o que vê. Rodar um dos filtros em relação ao outro tem algum efeito? Baseando-se nas suas observações, o termo *filtro* é adequado para descrever os polarizadores?

Em que difere o filtro polarizador de um filtro colorido?

Nota:

Como sabe, a luz consiste na propagação de um campo eletromagnético oscilante. A figura seguinte mostra os valores e direções dos campos elétricos e magnéticos ao longo de um raio de luz. O raio de luz está representado a traço-ponto e move-se para a direita. O raio de luz é uma linha (reta, neste caso). Para representar os campos elétricos e magnéticos foi necessário expandir lateralmente o desenho, mas tenha em conta que os vetores apenas representam os campos elétrico e magnético existentes no raio de luz e não ao lado.

¹ Versão adaptada dos protocolos de LIO 2009/10. (Adaptado por Vicente Fonseca de *Tutorials in Introductory Physics*, McDermott, Shaffer & P.E.G., Univ. Washington, Prentice Hall, Inc. 2002).



O raio de luz representado é *linearmente polarizado* porque o campo elétrico tem a mesma direção em todos os pontos. A maior parte dos materiais (vidro, água, etc.) interagem mais com o campo elétrico do que com o campo magnético e por isso convencionou-se chamar *direção de polarização* à *direção do campo elétrico*. Por exemplo, no caso da figura, se o eixo dos x for para a direita, o dos y para cima o dos z perpendicular à folha de papel, então o feixe de luz está polarizado linearmente segundo o eixo dos y .

2. Filtros polarizadores.

A luz transmitida por um filtro polarizador (ou simplesmente *polarizador*) depende da orientação relativa do polarizador em relação ao campo elétrico do feixe luz. Apenas a componente do campo elétrico paralela à direção de polarização do polarizador é transmitida através deste.

C. As lâmpadas do laboratório emitem luz polarizada? Como justifica a sua afirmação baseando-se nas suas observações.

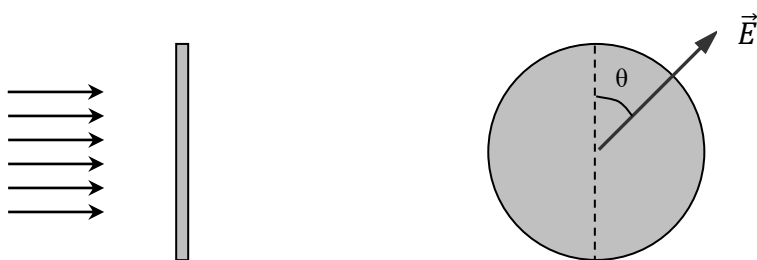
D. Suponha que tem dois polarizadores e que conhece as direções de polarização deles.

Preveja como deve orientar os polarizadores, um em relação ao outro, de forma que a luz que os acesse tenha (i) um *máximo*

de intensidade e (ii) um *mínimo* de intensidade. Verifique experimentalmente as suas previsões.

Nota: quando os dois polarizadores estão alinhados de forma a que a intensidade da luz que os atravessa seja mínima diz-se que os polarizadores estão *cruzados*.

E. Um feixe de luz polarizado linearmente incide num polarizador, como mostra o diagrama abaixo: a parte da esquerda é vista de lado, a parte da direita é vista de frente (olhando para o polarizador, representado por um círculo, na direção em que a luz se propaga). O campo elétrico do feixe de luz faz um ângulo θ com a direção de polarização do polarizador. A amplitude do campo elétrico é E_0 .



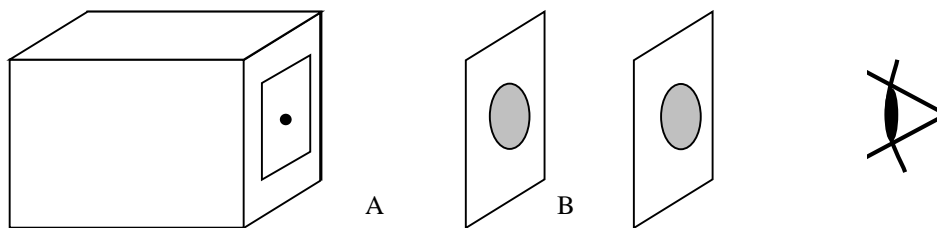
O vetor \vec{E} representa o campo elétrico do feixe incidente na superfície do polarizador num determinado instante. Decomponha o vetor \vec{E} na componente *transmitida* e na componente *absorvida* pelo polarizador.

Qual é a *direção* do campo elétrico do feixe transmitido? Tem alguma relação com a direção do campo elétrico do feixe incidente?

Escreva a expressão para a amplitude do campo elétrico do feixe transmitido em função de E_0 e de θ .

Escreva a expressão da *intensidade* da luz transmitida em função da intensidade de luz incidente, I_0 , e de θ .

F. Um observador olha para uma fonte de luz através de dois polarizadores. Os polarizadores estão cruzados, isto é, a intensidade da luz transmitida é mínima.



1. Suponha que é inserido um terceiro polarizador na posição B da figura.

Preveja se e como isso afeta a intensidade de luz que chega ao observador. A sua resposta depende da orientação do polarizador a inserir em B?

Verifique experimentalmente as suas previsões. Se as previsões estavam incorretas, identifique que aspetos levaram a fazer a previsão errada.

Fundamente o seu raciocínio com as observações que fez no ponto E.

2. Suponha que o terceiro polarizador era inserido em A.

Preveja se e como isso afeta a intensidade da luz que chega ao observador. A sua resposta depende da orientação do terceiro polarizador?

Parte 2 - Lei de Malus

Nesta segunda parte do trabalho vai determinar-se o estado de polarização de uma lâmpada de halogéneo e de um laser de diodo. Proceder-se-á também à verificação experimental da lei de Malus.

1. Introdução

Qualquer interação da radiação eletromagnética com a matéria cujas propriedades óticas sejam assimétricas em relação às direções transversais relativamente ao vetor de propagação é potencialmente um meio de produzir luz polarizada. Um dos possíveis mecanismos físicos que dão origem a luz polarizada, a partir de luz natural, é a absorção seletiva de uma das componentes da radiação, também conhecida por dicroísmo.

1.1. Dicroísmo - polarização por absorção seletiva:

Um polarizador dicroico absorve seletivamente a componente da luz cujo campo elétrico oscile ao longo de uma determinada direção característica do material. A componente do campo elétrico ortogonal em relação a essa direção é facilmente transmitida fazendo com que, para um polarizador ideal, a luz transmitida seja linearmente polarizada ao longo de uma determinada direção conhecida por eixo de transmissão do polarizador.

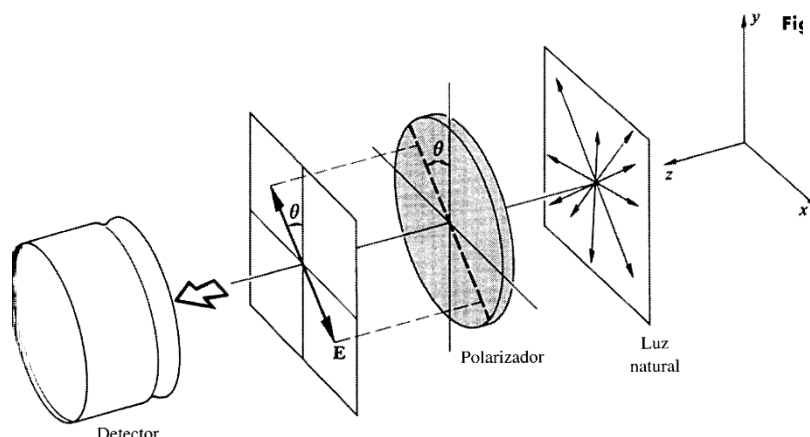


Figura 1: Polarização da luz natural por absorção seletiva.

Como a luz natural pode ser descrita matematicamente como a sobreposição de duas ondas ortogonais linearmente polarizadas de igual amplitude, incoerentes entre si, se se rodar o polarizador da Figura 1 em redor do eixo z e não se detetar qualquer variação na intensidade podemos dizer que a luz incidente no polarizador é não polarizada. Se, pelo contrário, a rotação do polarizador provocar uma variação da intensidade detetada estamos então em presença de radiação com uma direção de polarização preferencial. Para radiação monocromática pode definir-se a percentagem de polarização da radiação por:

$$\% \text{ Polarização} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

onde I_{\max} e I_{\min} são os valores máximo e mínimo das intensidades detetadas com um arranjo geométrico semelhante ao da Figura 1.

1.2. Lei de Malus

Admitamos que se introduz um segundo polarizador linear (por vezes chamado analisador) antes do detetor de modo que o ângulo formado entre os eixos de transmissão dos dois polarizadores seja θ - Figura 2.

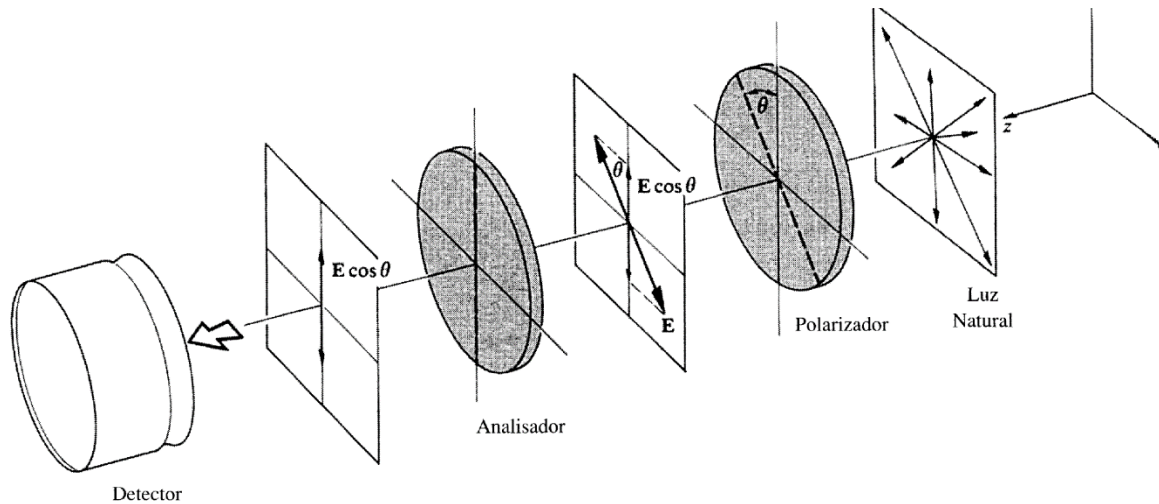


Figura 2: Ilustração do método de verificação da lei de Malus.

Se a amplitude do campo elétrico transmitido pelo primeiro polarizador for E_0 , apenas a sua componente paralela ao eixo de transmissão do segundo polarizador $E_0 \cos \theta$ alcançará o detetor (admitindo um polarizador ideal sem absorção). A irradiância no detetor será então:

$$I(\theta) = \frac{c \epsilon_0}{2} E_0^2 \cos^2 \theta \quad (2)$$

Da equação (2) decorre que a irradiância máxima ocorre quando os dois polarizadores têm os eixos de transmissão alinhados ($\theta = 0$).

A equação anterior pode ainda ser reescrita como:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta \quad (3)$$

que é conhecida como a Lei de Malus pois foi publicada pela primeira vez por Etienne Malus, engenheiro militar e capitão do exército de Napoleão, em 1809.

2. Procedimento experimental

2.1. Material

- Laser de diodo
- Lâmpada de halogéneo
- 2 polarizadores lineares
- Calha ótica e respetivos suportes
- Fotodíodos
- Microamperímetro

2.2. Descrição do procedimento experimental

Assegure-se que o material se encontra disposto na bancada ótica de acordo com o seguinte esquema.

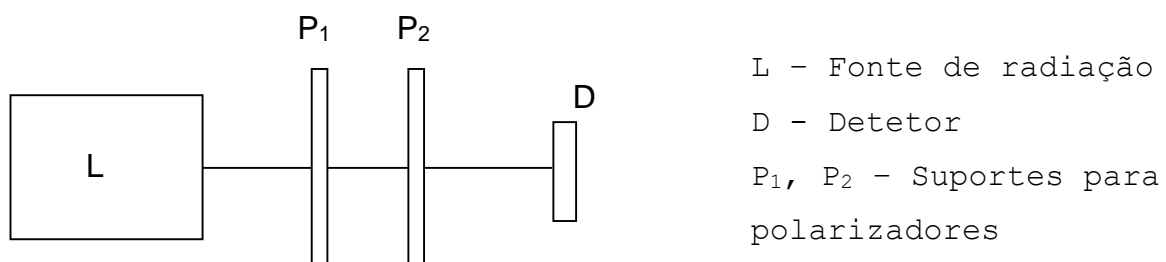


Figura 3: Esquema da montagem experimental

Durante a realização do trabalho experimental deve ter em conta as seguintes observações gerais:

- Deverá utilizar as escalas do multímetro de 15 μA e de 150 μA . Sempre que haja dúvidas quanto à intensidade que espera medir deverá regular o multímetro para a escala menos sensível para evitar danificar inadvertidamente o aparelho.
- Deverá utilizar em cada medição a escala com a maior sensibilidade que for possível e, sempre que houver mudança de escala de medida, dever-se-á reacertar o zero

do multímetro. Para acertar o zero de escala deve-se cortar a luz a medir mas procurar manter a iluminação ambiente com que vai efectuar todas as medidas.

- Sempre que alterar a fonte de radiação, deverá fazer um alinhamento do fotodíodo de maneira a obter um máximo de intensidade. Durante a realização das medidas deverá ter cuidado em não tocar no fotodíodo pois isso iria alterar a intensidade medida.
- Se suspeitar que pode ocorrer saturação do fotodetector deverá utilizar um filtro de densidade neutra para diminuir a irradiância no detector.

2.2.1. Estado de polarização das fontes de radiação

Deverá começar por verificar o estado de polarização da lâmpada de halogéneo e só depois iniciar as medições a realizar com o laser. Para testar o estado de polarização das fontes de radiação deverá, tal como foi descrito no ponto 1.1., colocar no caminho da radiação apenas um dos polarizadores. Faça uma medição da intensidade da radiação em função do ângulo medido no suporte giratório do polarizador, abarcando uma variação no ângulo de cerca de 180° .

2.2.2. Lei de Malus

Depois de testar o estado de polarização do laser deverá iniciar a série de medidas destinadas a testar a lei de Malus. Para isso insira o primeiro polarizador no suporte respectivo com o eixo de transmissão vertical e rode o segundo polarizador como fez no ponto 2.2.1.

O eixo de transmissão do segundo polarizador encontra-se praticamente alinhado com o zero na escala do suporte rotativo.

Como o alinhamento não é no entanto perfeito deverá começar por determinar a situação em que os polarizadores se encontram cruzados determinando a situação de transmissão mínima próximo de 90° na escala do suporte. A partir desse conhecimento deverá efectuar as medidas que entender e que lhe permitam medir a intensidade em função do ângulo real entre os polarizadores desde $+100^\circ$ até -100° , em intervalos de 10° .

Não esquecer de tomar nota da escala no multímetro em que foi feita cada medida pois os erros de leitura da escala são diferentes.

3. Resultados e cálculos

Deverá começar por determinar a percentagem de polarização da radiação emitida pela lâmpada de halogéneo e pelo laser.

Para o teste da lei de Malus, deve representar graficamente a lei de Malus e os valores experimentais da razão I/I_0 sobre a mesma escala. Nesta representação deve ainda incluir barras de erro para representar os erros prováveis (para isso note que quer I quer I_0 são afectados de erros experimentais). Como estimativa razoável dos erros dos resultados directos deve usar o erro de leitura.

A partir da comparação entre a razão I/I_0 e a função $\cos^2 \theta$ conclua se os seus resultados estão concordantes com o que seria esperado.

Averigue da validade da lei de Malus tanto para a lâmpada de halogéneo como para o laser de diodo.

Ficha de registos experimentais -Parte 2

Dados relativos ao multímetro utilizado:

Escala (μA)	Menor divisão da escala (μA)	Erro de leitura (μA)
15		
150		

Estado de polarização das fontes:

[illegible]

Cálculo da percentagem de polarização:

Lâmpada

[illegible]

Cálculo de $\delta(I/I_0)$:

Lei de Malus:

Laser de diodo

Equações: Cálculo de I/I_0 :

Ângulo (°)	$I (\mu A)$	δI	I/I_0	$\delta(I/I_0)$
0				

Cálculo de $\delta(I/I_0)$:

Resultados

Inclua os gráficos necessários a uma boa compreensão dos resultados obtidos, nomeadamente os pedidos no ponto 3 não se esquecendo de incluir barras de erro.

Analise criticamente todos os resultados obtidos e conclua sobre a validade da Lei de Malus para as duas situações estudadas.