

**Polarização e Lei de Malus**

***Laboratório de Eletromagnetismo***

*Departamento de Física, Escola de Ciências, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga*

*Portugal*

*Docente: Maria Fátima Guimarães Cerqueira*

*Discentes:*

*Luís Miguel Pereira Silva, A96534*

*Mariana Isabel Oliveira Fernandes, A97171*

*Gabriel Domingues Fernandes, A97303*

*Licenciatura em Engenharia Física*

*13 de maio de 2022*

**Sumário**

Este trabalho teve como objetivos principais compreender o conceito de luz polarizada e o fenómeno da polarização da luz com o auxílio de polarizadores dicroicos. Desta forma analisou-se as propriedades dos polarizadores e verificou-se experimentalmente a Lei de Malus para duas fontes de luz diferentes, uma lâmpada de halogéneo e um laser de díodo. Com os resultados obtidos experimentalmente, obteve-se uma percentagem de polarização da radiação eletromagnética emitida de 3,3% e 98,6% respetivamente.

**Introdução**

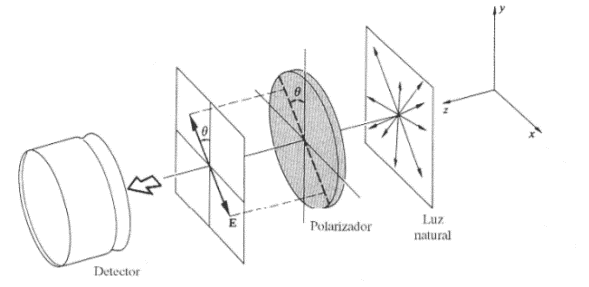
**Polarização**

Classicamente, a luz é descrita matematicamente como a sobreposição de duas ondas ortogonais entre si, das quais descrevem fisicamente a variação do campo elétrico e do campo magnético ao longo do espaço e do tempo, representado na figura 1.

Uma imagem com texto, utensílios de cozinha

Descrição gerada automaticamente

Figura 1 (Representação matemática da luz (radiação eletromagnética))

Quando em determinado feixe de luz, a direção do campo elétrico é a mesma em todos os seus pontos, esse feixe de luz é “linearmente polarizado”.

Além disso, por convenção, defini-mos “direção de polarização” de uma onda eletromagnética como a direção do seu respetivo campo elétrico.

Por exemplo, na Figura 1, a onda eletromagnética representada é “linearmente polarizada segunda a direção do eixo y”.

**Filtros polarizadores**

Um polarizador é um material que, dado uma luz incidente, transmite essa luz polarizada segundo uma direção.

Os feixes polarizados podem ser obtidos com polarizadores baseados em fenómenos físicos como: dicroísmo, reflexão, dispersão e birrefringência.

Nesta experiência foram usados polarizadores dicroicos.

Os polarizadores dicroicos absorvem a componente da luz cujo a direção do campo elétrico seja perpendicular á direção característica do material, transmitindo apenas a componente da luz linearmente polarizada segundo essa direção.

Essa direção característica tem o nome de “eixo de transmissão” do polarizador.

Através destes polarizadores é possível identificar se um feixe de luz é polarizado ou não, por exemplo simulando a montagem representada na Figura 2.

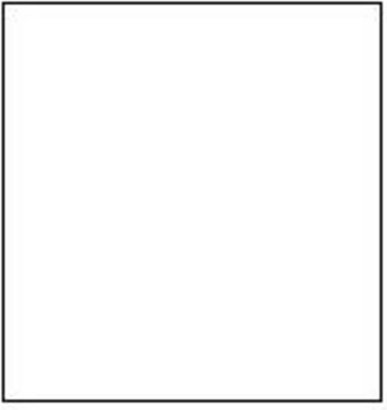
Figura 2 (Montagem para identificar se a luz é polarizada ou não por absorção seletiva)

Se a luz for polarizada, por absorção seletiva (Figura 2), o polarizador apenas transmite a componente da luz cujo a direção do campo elétrico seja paralela ao eixo de transmissão como referido anteriormente, deste modo, se mudarmos o eixo de transmissão rodando o polarizador, verifica-se que a intensidade da luz que chega ao detetor varia.

Analogamente, sabe-se que, se a intensidade da luz não variar, a luz não é polarizada.

Para a radiação monocromática, a percentagem de polarização da radiação é dada por:

1)

 e são os valores, máximo e mínimo respetivamente, das intensidades detetadas.

**Lei de Malus**

Etienne Louis Malus foi um oficial do exército, físico e matemático francês.

Participou da expedição de Napoleão no Egito entre 1798 e 1801, em 1810 tornou-se membro da Academia Francesa de Ciências.

Seu trabalho científico foi quase exclusivamente direcionado ao estudo da luz.

A lei do cientista francês pode ser enunciada da seguinte maneira: as intensidades de entrada e de saída da luz durante a sua passagem por um analisador é regida pela fórmula:

Para verificar a Lei de Malus, podemos fazer uso de um aparato análogo ao representado na Figura 3.

Uma imagem com texto

Descrição gerada automaticamente

Figura 3 (Ilustração da montagem para a verificação da Lei de Malus)

Nesta montagem, deu-se o nome de “analisador” ao polarizador mais perto do detetor.

O primeiro polarizador irá polarizar qualquer feixe de luz segundo o seu eixo de transmissão. Desta maneira podemos verificar a Lei de Malus para luzes polarizadas ou não polarizadas.

A intensidade da luz pode ser descrita através da expressão:

2)

Sendo *I* a intensidade da luz, *c* a velocidade da luz, a permitividade elétrica do meio e o campo elétrico associado.

Considerando como o campo elétrico da luz transmitida pelo primeiro polarizador, após a passagem da mesma pelo analisador, o valor do campo elétrico será por absorção seletiva.

Sendo assim a intensidade da luz transmitida pelo analisador pode ser descrita por:

3)

Deste modo, através da expressão 2, podemos reescrever a expressão 3 como:

(Lei de Malus)

Resumidamente, nesta experiência, pela Lei de Malus, a intensidade transmitida pelo analisador varia com o cosseno ao quadrado de θ.

**Procedimento experimental**

**1 ª Parte – Polarização**

Nesta parte do trabalho, com o auxílio dos polarizadores respondemos a um conjunto de questões presentes no protocolo “T6-Polarização. Lei de Malus” em “Parte 1 – Polarização -introdução”, com o intuito de explorar as propriedades de alguns polarizadores. As perguntas e conclusões associadas são as seguintes:

**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?”

Observamos as luzes do laboratório através de um filtro polarizador. Rodamos o polarizador até 360 graus e nenhum efeito foi observado.

**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?”

Se, frente a frende, rodarmos um dos polarizadores em relação ao outro, iremos notar a diminuição da intensidade, até que não observamos a passagem de luz. Isto acontece, porque a luz consiste na propagação de um campo eletromagnético oscilante, e como num filtro polarizador a luz transmitida 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, caso as direções sejam perpendiculares não temos componente paralela e consequentemente não há intensidade luminosa.

Sendo assim o termo filtro é apropriado para o polarizador, tendo em conta que o mesmo filtra a componente paralela do campo elétrico. A diferença entre um polarizador e um filtro colorido, é que um filtra o campo elétrico e o outro filtra o comprimento de onda.

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

Tendo em conta o que foi observado no ponto A, ou seja, a intensidade da luz não diminui á medida que se rodou o polarizador, por isso essa luz não é polarizada.

Se olharmos para a tela do computador ou telemóvel através do filtro polarizador, observa-se a diminuição da intensidade da luz, por isso essa luz é polarizada.

**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 atravesse tenha (i) um máximo de intensidade e (ii) um mínimo de intensidade. Verifique experimentalmente as suas previsões.”

Para **(i)** e **(ii),** segundo as conclusões tiradas anteriormente, é necessário que os eixos de transmissão dos polarizadores estejam em paralelo e perpendicular respetivamente.

**(i)** Colocando os polarizadores com o eixo de polarização paralelo verifica-se intensidade máxima (Como o polarizador têm uma escala em graus, ou seja, e )

**(ii)** Colocando os polarizadores com o eixo de polarização perpendicular verifica-se intensidade nula ( e )

**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 .”



Figura 5 (Representação de um polarizador)

“O vetor E representa o campo elétrico do feixe incidente na superfície do polarizador num determinado instante. Decomponha o vetor 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 de .”

“Escreva a expressão da intensidade da luz transmitida em função da intensidade de luz incidente, , e de .”

As componentes do campo elétrico correspondem,

Absorvida:

Transmitida:

Sendo assim a direção do campo elétrico do feixe transmitido é a direção de polarização, que corresponde á componente paralela do feixe incidente.

As componentes da intensidade da luz correspondem,

Absorvida:

Transmitida:

Onde , conhecida como Lei de Malus!

**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.”

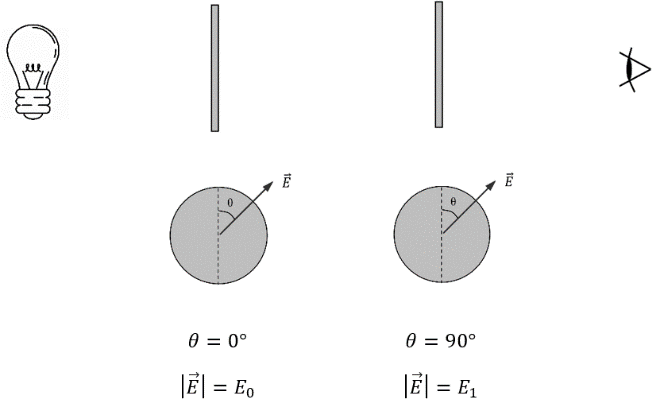


Figura 6 (Esquema F)

**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.”

Se não tiver nenhum polarizador entre os outros dois:

Inserindo um terceiro polarizador entre os outros dois, intuitivamente pensamos que o resultado não dependerá do mesmo, mas isso não é verificado experimentalmente. Com:

Uma imagem com texto, relógio

Descrição gerada automaticamente

Figura 7 (Esquema F.1)

De seguida:

Onde e são complementares, ou seja:

Assim:

Quando :

Quando ou :

**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?”

Neste caso como temos dois polarizadores consecutivos com direções de polarização perpendiculares para qualquer orientação do polarizador entre a fonte e o primeiro polarizador temos,

Que foi verificado experimentalmente!

**2 ª Parte – Lei de Malus**

**Material utilizado**

* Laser de díodo;
* Lâmpada de halogéneo;
* 2 polarizadores lineares;
* Calha ótica e respetivos suportes;
* Foto díodos;
* Multímetro.

**Montagem experimental**

Para a realização deste trabalho utilizou-se o seguinte esquema ótico:

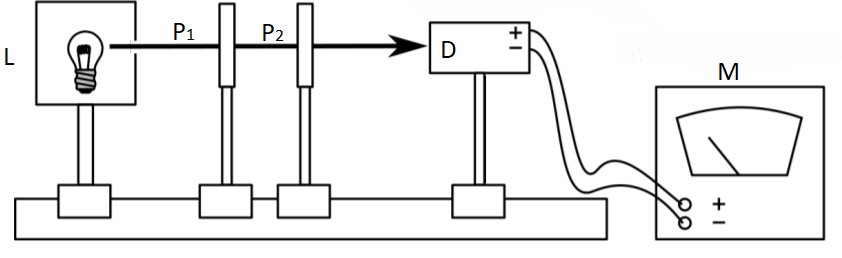


Figura 8 (Montagem experimental, 2ª Parte)

**Legenda**

**L** - Fonte de radiação

**P1, P2** - Polarizadores

**D** - Detetor

**M** – Multímetro

**Descrição do procedimento experimental**

Em primeiro lugar, utilizando como fonte o laser díodo e apenas um polarizador, roda-se o mesmo de -90 a 90 graus (de 10 em 10 graus) e regista-se os valores de intensidade da luz que chega ao detetor de modo a calcular a % de polarização.

Adiciona-se agora outro polarizador, estando P1 e P2 inicialmente orientados com e e, posteriormente roda-se o P2 de -90 a 90 graus e regista-se, novamente, os valores de intensidade.

Em segundo lugar, repete-se o procedimento utilizado para a lâmpada de halogéneo.

Durante a realização desta experiência tivemos em consideração alguns aspetos como:

1. O zero do ângulo considerado em todas as experiências corresponde à intensidade máxima;
2. Quando temos dois polarizadores apenas podemos rodar P2, porque para verificar a Lei de Malus o polarizador que é rodado precisa de receber um feixe já polarizado de modo a ter resultados mais fidedignos;
3. A sala do laboratório terá de estar escura durante a realização das experiências;
4. Não alterar a posição das fontes durante a realização das experiências.

**Nota:**

Caso se rode apenas o P1:

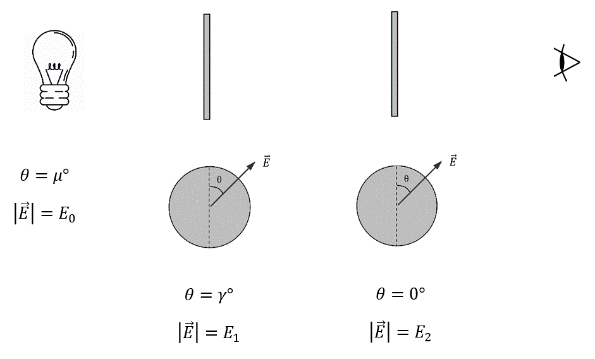


Figura 9 (Representação da rotação do P1)

Considerando que temos uma fonte polarizada,

por isso, variando temos:

e,

Então:

Caso rodássemos apenas P1, para verificar a Lei de Malus teríamos de ajustar uma função quadrática aos pontos de em função do para obter o no ajuste.

Considerando uma fonte sem polarização, já é possível a realização de tal forma (rodando apenas P1) porque o valor de e será sempre o mesmo.

Já para uma percentagem de polarização intermédia, tem-se que:

E, e não são contantes, afetando assim os resultados.

Rodando apenas o P2 nenhum destes problemas ocorre por isso fizemos isso durante toda a experiência.

**Análise de dados e discussão de resultados**

**Laser de díodo**

**Um Polarizador**

Apenas com um polarizador, registaram-se os seguintes valores:

|  |  |
| --- | --- |
| Ângulo () | Intensidade (V) |
| -90 | 0,0852 |
| -80 | 0,2848 |
| -70 | 1,100 |
| -60 | 2,849 |
| -50 | 4,381 |
| -40 | 6,60 |
| -30 | 8,41 |
| -20 | 10,55 |
| -10 | 11,79 |
| 0 | 12,16 |
| 10 | 11,80 |
| 20 | 11,05 |
| 30 | 9,10 |
| 40 | 7,50 |
| 50 | 5,407 |
| 60 | 3,350 |
| 70 | 1,750 |
| 80 | 0,6100 |
| 90 | 0,1034 |

Tabela 1 (Laser com um polarizador, ângulo e intensidade)

Quando o ângulo é 0 graus foi registada a intensidade máxima, quando o ângulo corresponde a 90 graus a intensidade é mínima. Podendo assim calcular a % de polarização do laser, como:

e

Temos então que o laser de díodo é polarizado. Podemos também representar os pontos da tabela 1 num gráfico (Gráfico 1) e traçar um ajuste aos pontos experimentais (com o solver), onde a intensidade ajustada corresponde (é verificada Lei de Malus por a luz ser polarizada):

Gráfico 1 (Intensidade em função do ângulo, um polarizador, laser)

e são parâmetros do ajuste e correspondem neste caso a 12,07 V e , respetivamente. ( com um desvio percentual de de 0,7%).

**Dois Polarizadores**

Com dois polarizadores, registaram-se os seguintes valores:

|  |  |
| --- | --- |
| Ângulo () | Intensidade (V) |
| -90 | 0,0000 |
| -80 | 0,2430 |
| -70 | 0,974 |
| -60 | 2,039 |
| -50 | 3,595 |
| -40 | 5,053 |
| -30 | 6,30 |
| -20 | 7,51 |
| -10 | 8,18 |
| 0 | 8,47 |
| 10 | 8,21 |
| 20 | 7,52 |
| 30 | 6,27 |
| 40 | 5,065 |
| 50 | 3,500 |
| 60 | 2,133 |
| 70 | 1,047 |
| 80 | 0,2806 |
| 90 | 0,0010 |

Tabela 2 (Laser com dois polarizadores, ângulo e intensidade)

No qual o gráfico e o ajuste aos pontos da tabela 2 corresponde:

Gráfico 2 (Intensidade em função do ângulo, laser com dois polarizadores)

Com, e .

A incerteza associada à intensidade é dada por:

Que pode ser encontrada no manual do usuário do voltímetro (que também se encontra no apêndice).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Intensidade (V) | Escala (V) | Incerteza da intensidade (V) |
| 0,0000 | 0,0001 | 0,0002 |
| 0,2430 | 0,0001 | 0,001 |
| 0,974 | 0,001 | 0,003 |
| 2,039 | 0,001 | 0,005 |
| 3,595 | 0,001 | 0,007 |
| 5,053 | 0,001 | 0,010 |
| 6,30 | 0,01 | 0,029 |
| 7,51 | 0,01 | 0,031 |
| 8,18 | 0,01 | 0,032 |
| 8,47 | 0,01 | 0,033 |
| 8,21 | 0,01 | 0,032 |
| 7,52 | 0,01 | 0,031 |
| 6,27 | 0,01 | 0,029 |
| 5,065 | 0,001 | 0,010 |
| 3,500 | 0,001 | 0,007 |
| 2,133 | 0,001 | 0,005 |
| 1,047 | 0,001 | 0,004 |
| 0,2806 | 0,0001 | 0,001 |
| 0,0010 | 0,0001 | 0,0002 |

Assim temos as seguintes incertezas associada a cada valor individualmente:

Tabela 3 (Laser, intensidade, escala e incerteza da intensidade)

Como visto anteriormente, a Lei de Malus é dada por:

Onde , ou seja,

A partir dos valores da tabela 2 podemos traçar um gráfico da intensidade em função do cosseno ao quadrado do ângulo:

Gráfico 3 (Intensidade em função do com as barras de erro)

Fazendo uma regressão linear (fixando a ordenada na origem) dos pontos do Gráfico 2, obtém se as seguintes estatísticas:

(O desvio a (8,47 V) corresponde a 0,5σ)

Também, como

temos que:

Assim, temos os seguintes pontos experimentais:

|  |  |
| --- | --- |
| Ângulo () |  |
| -90 | 0,00000 |
| -80 | 0,0287 |
| -70 | 0,1150 |
| -60 | 0,241 |
| -50 | 0,424 |
| -40 | 0,597 |
| -30 | 0,744 |
| -20 | 0,887 |
| -10 | 0,966 |
| 0 | 1,000 |
| 10 | 0,969 |
| 20 | 0,888 |
| 30 | 0,740 |
| 40 | 0,598 |
| 50 | 0,413 |
| 60 | 0,252 |
| 70 | 0,1236 |
| 80 | 0,0331 |
| 90 | 0,00012 |

Tabela 4 (Laser, ângulo e intensidade sobre a intensidade máxima)

Podendo obter a respetiva incerteza associada a cada valor individualmente, obtidas a partir da seguinte expressão:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 0,00000 | 0,00002 |
| 0,0287 | 0,0001 |
| 0,1150 | 0,0006 |
| 0,241 | 0,001 |
| 0,424 | 0,002 |
| 0,597 | 0,003 |
| 0,744 | 0,005 |
| 0,887 | 0,005 |
| 0,966 | 0,005 |
| 1,000 | 0,005 |
| 0,969 | 0,005 |
| 0,888 | 0,005 |
| 0,740 | 0,004 |
| 0,598 | 0,003 |
| 0,413 | 0,002 |
| 0,252 | 0,001 |
| 0,1236 | 0,0006 |
| 0,0331 | 0,0001 |
| 0,00012 | 0,00002 |

Por isso temos:

Tabela 5 (Laser, e )

A partir dos valores da tabela 4, podemos traçar o seguinte gráfico:

Gráfico 4 (Intensidade sobre Intensidade máxima em função do com as barras de erro)

Novamente, fazendo uma regressão linear dos pontos do Gráfico 3, obtém se as seguintes estatísticas:

(O desvio ao valor 1 corresponde a 0,5σ)

Para analisar os valores individualmente:

Considerando o valor da intensidade registada em 0 graus (durante a experiência o máximo de intensidade foi a nossa referência para 0 graus) e multiplicando pelo quadrado do cosseno do ângulo, podemos obter a intensidade teórica.

Sendo o número de desvios:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Intensidade (V) | Incerteza da intensidade (V) | Intensidade teórica (V) | Número de desvios, n |
| 0,0000 | 0,0002 | 0,00 | 0,0 |
| 0,2430 | 0,001 | 0,26 | 22,0 |
| 0,974 | 0,003 | 0,99 | 4,9 |
| 2,039 | 0,005 | 2,12 | 15,5 |
| 3,595 | 0,007 | 3,50 | 12,9 |
| 5,053 | 0,010 | 4,97 | 8,6 |
| 6,30 | 0,029 | 6,35 | 1,8 |
| 7,51 | 0,031 | 7,48 | 1,0 |
| 8,18 | 0,032 | 8,21 | 1,1 |
| 8,47 | 0,033 | 8,47 | 0,0 |
| 8,21 | 0,032 | 8,21 | 0,1 |
| 7,52 | 0,031 | 7,48 | 1,3 |
| 6,27 | 0,029 | 6,35 | 2,8 |
| 5,065 | 0,010 | 4,97 | 9,9 |
| 3,500 | 0,007 | 3,50 | 0,1 |
| 2,133 | 0,005 | 2,12 | 3,0 |
| 1,047 | 0,004 | 0,99 | 15,7 |
| 0,2806 | 0,001 | 0,26 | 40,6 |
| 0,0010 | 0,0002 | 0,00 | 5,0 |

Tendo em conta o que foi dito acima podemos fazer a seguinte tabela:

Tabela 6 (Incerteza teórica e número de desvios, laser)

Observando o número de desvios de alguns pontos podem nos induzir que os valores são disparatados, mas temos de ter em conta que a incerteza no ângulo é muito mais significativa que a incerteza do voltímetro. Como a escala de menor divisão do ângulo é 10 , a incerteza associada ao ângulo é 5. Por isso, os desvios dos valores registados em relação aos valores teóricos, devem-se principalmente á incerteza no ângulo.

**Discussão dos resultados obtidos, laser de díodo**

Como esperado, o feixe do laser de díodo é polarizado.

Observando os valores obtidos nas regressões e considerando a incerteza associada à mesma, em ambas se encontram dentro do valor esperado. Tendo em conta este resultado podemos afirmar que a Lei de Malus foi verificada para o laser de díodo.

Em relação á análise dos valores individualmente, conseguimos observar que a incerteza na medição do ângulo é muito mais significativa que a incerteza da intensidade da radiação.

**Lâmpada de halogéneo**

**Um Polarizador**

Apenas com um polarizador, registaram-se os seguintes valores:

|  |  |
| --- | --- |
| Ângulo () | Intensidade (V) |
| -90 | 0,703 |
| -80 | 0,702 |
| -70 | 0,703 |
| -60 | 0,707 |
| -50 | 0,719 |
| -40 | 0,726 |
| -30 | 0,734 |
| -20 | 0,742 |
| -10 | 0,748 |
| 0 | 0,751 |
| 10 | 0,75 |
| 20 | 0,748 |
| 30 | 0,744 |
| 40 | 0,731 |
| 50 | 0,719 |
| 60 | 0,708 |
| 70 | 0,703 |
| 80 | 0,697 |
| 90 | 0,698 |

Tabela 7 (Lâmpada com um polarizador, ângulo e intensidade)

Por isso:

e

Ou seja, podemos considerar que a lâmpada não é polarizada.

Neste caso, como a luz é não polarizada não é possível traçar um ajuste do solver para se verificar a Lei de Malus.

**Dois Polarizadores**

Com dois polarizadores, registaram-se os seguintes valores:

|  |  |
| --- | --- |
| Ângulo () | Intensidade (V) |
| -90 | 0,0683 |
| -80 | 0,0749 |
| -70 | 0,0877 |
| -60 | 0,1061 |
| -50 | 0,130 |
| -40 | 0,149 |
| -30 | 0,177 |
| -20 | 0,197 |
| -10 | 0,209 |
| 0 | 0,211 |
| 10 | 0,206 |
| 20 | 0,194 |
| 30 | 0,172 |
| 40 | 0,145 |
| 50 | 0,125 |
| 60 | 0,0981 |
| 70 | 0,0810 |
| 80 | 0,0700 |
| 90 | 0,0684 |

Tabela 8 (Lâmpada com dois polarizadores, ângulo e intensidade)

Observando os valores da tabela 8, os pontos deveriam ser aproximadamente 0 V, mas como a luz da lâmpada de halogénio é mais dispersa (O laser de díodo era apenas um feixe, muito preciso). Provavelmente a intensidade em corresponde a uma intensidade que não atravessa através dos polarizadores, mas sim pelas laterais dos polarizadores, e vai ser constante durante toda a experiência. Por esse motivo, podemos remover essa constante a todos os valores da tabela 8, obtendo assim a intensidade corrigida.

Assim temos os seguintes valores:

Tabela 9 (Lâmpada com dois polarizadores, ângulo e intensidade corrigida)

No qual o gráfico e o ajuste aos pontos da tabela 9 corresponde:

|  |  |
| --- | --- |
| Ângulo () | Intensidade corrigida (V) |
| -90 | 0,0000 |
| -80 | 0,0066 |
| -70 | 0,0194 |
| -60 | 0,0378 |
| -50 | 0,062 |
| -40 | 0,081 |
| -30 | 0,109 |
| -20 | 0,129 |
| -10 | 0,141 |
| 0 | 0,143 |
| 10 | 0,138 |
| 20 | 0,126 |
| 30 | 0,104 |
| 40 | 0,077 |
| 50 | 0,057 |
| 60 | 0,0298 |
| 70 | 0,0127 |
| 80 | 0,0017 |
| 90 | 0,0001 |

Gráfico 5 (Intensidade corrigida em função do ângulo, laser com dois polarizadores)

Com os seguintes parâmetros de ajuste, e .

Como visto anteriormente, a incerteza associada à intensidade é dada por:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Intensidade corrigida (V) | Escala (V) | Incerteza da intensidade (V) |
| 0,0000 | 0,0001 | 0,0002 |
| 0,0066 | 0,0001 | 0,0002 |
| 0,0194 | 0,0001 | 0,0002 |
| 0,0378 | 0,0001 | 0,0003 |
| 0,062 | 0,001 | 0,002 |
| 0,081 | 0,001 | 0,002 |
| 0,109 | 0,001 | 0,002 |
| 0,129 | 0,001 | 0,002 |
| 0,141 | 0,001 | 0,002 |
| 0,143 | 0,001 | 0,002 |
| 0,138 | 0,001 | 0,002 |
| 0,126 | 0,001 | 0,002 |
| 0,104 | 0,001 | 0,002 |
| 0,077 | 0,001 | 0,002 |
| 0,057 | 0,001 | 0,002 |
| 0,0298 | 0,0001 | 0,0002 |
| 0,0127 | 0,0001 | 0,0002 |
| 0,0017 | 0,0001 | 0,0002 |
| 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 |

Assim a incerteza associada a cada valor individualmente é:

Tabela 10 (Lâmpada, intensidade corrigida, escala e incerteza da intensidade)

Pode se agora traçar o ajuste dos pontos da tabela 9, da intensidade em função do quadrado do cosseno do ângulo (para se verificar a Lei de Malus):

Gráfico 6 (Intensidade corrigida em função do )

Fazendo uma regressão linear (fixando a ordenada na origem) dos pontos do Gráfico 6, obtém-se as seguintes estatísticas:

(O desvio a (0,143 V) corresponde a 1σ)

Também, temos os seguintes pontos experimentais:

|  |  |
| --- | --- |
| Ângulo () |  |
| -90 | 0,000 |
| -80 | 0,046 |
| -70 | 0,136 |
| -60 | 0,265 |
| -50 | 0,43 |
| -40 | 0,57 |
| -30 | 0,76 |
| -20 | 0,90 |
| -10 | 0,99 |
| 0 | 1,00 |
| 10 | 0,96 |
| 20 | 0,88 |
| 30 | 0,73 |
| 40 | 0,54 |
| 50 | 0,40 |
| 60 | 0,209 |
| 70 | 0,089 |
| 80 | 0,012 |
| 90 | 0,001 |

Tabela 11 (Lâmpada, ângulo e intensidade corrigida sobre a intensidade máxima)

Como vimos anteriormente,

Assim temos que a incerteza correspondente a cada valor é:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 0,000 | 0,001 |
| 0,046 | 0,002 |
| 0,136 | 0,003 |
| 0,265 | 0,004 |
| 0,43 | 0,02 |
| 0,57 | 0,02 |
| 0,76 | 0,02 |
| 0,90 | 0,02 |
| 0,99 | 0,02 |
| 1,00 | 0,02 |
| 0,96 | 0,02 |
| 0,88 | 0,02 |
| 0,73 | 0,02 |
| 0,54 | 0,02 |
| 0,40 | 0,02 |
| 0,209 | 0,004 |
| 0,089 | 0,002 |
| 0,012 | 0,001 |
| 0,001 | 0,001 |

Tabela 12 (Laser. e )

A partir dos valores da tabela 11, podemos traçar o seguinte gráfico:

Gráfico 7 (Intensidade sobre Intensidade máxima em função do )

Novamente, fazendo uma regressão linear dos pontos do Gráfico 7, obtém se as seguintes estatísticas:

(O desvio ao valor 1 corresponde a 0,55σ)

Analisando individualmente os valores:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Intensidade (V) | Incerteza da intensidade (V) | Intensidade teórica (V) | Número de desvios, n |
| 0,0000 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0 |
| 0,0066 | 0,0002 | 0,0043 | 10,9 |
| 0,0194 | 0,0002 | 0,0167 | 11,8 |
| 0,0378 | 0,0003 | 0,0357 | 8,3 |
| 0,062 | 0,002 | 0,059 | 1,3 |
| 0,081 | 0,002 | 0,084 | 1,4 |
| 0,109 | 0,002 | 0,107 | 0,8 |
| 0,129 | 0,002 | 0,126 | 1,2 |
| 0,141 | 0,002 | 0,138 | 1,0 |
| 0,143 | 0,002 | 0,143 | 0,0 |
| 0,138 | 0,002 | 0,138 | 0,3 |
| 0,126 | 0,002 | 0,126 | 0,1 |
| 0,104 | 0,002 | 0,107 | 1,5 |
| 0,077 | 0,002 | 0,084 | 3,3 |
| 0,057 | 0,002 | 0,059 | 1,1 |
| 0,0298 | 0,0002 | 0,0357 | 24,0 |
| 0,0127 | 0,0002 | 0,0167 | 18,2 |
| 0,0017 | 0,0002 | 0,0043 | 12,9 |
| 0,0001 | 0,0002 | 0,0000 | 0,5 |

Tabela 13 (Incerteza teórica e número de desvios, lâmpada)

Novamente, observando o número de desvios de alguns pontos podem nos induzir que os valores são disparatados, mas como vimos anteriormente, temos de ter em conta que a incerteza no ângulo é muito mais significativa que a incerteza do voltímetro.

**Discussão dos resultados obtidos, lâmpada de halogénio**

Como esperado, vimos que a lâmpada de halogénio não é polarizada.

Novamente, também foi verificada a Lei de Malus, agora para a lâmpada de halogénio (embora se tenha feito uma correção pela luz ser mais dispersa).

**Conclusão**

Esta experiência foi muito interessante porque permitiu-nos também conhecer e compreender melhor as propriedades dos polarizadores, como por exemplo o ponto F e F.1 do procedimento experimental, 1ª parte polarização.

Tendo em conta todos os resultados obtidos, esta experiência foi um sucesso, conseguindo concluir que a laser de díodo é polarizado e a lâmpada de halogénio não polarizada, também verificamos a Lei de Malus tanto para a lâmpada de halogénio, como para o laser de díodo.

**Apêndice**

No manual do voltímetro tínhamos os seguintes dados:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Função | Resolução | Precisão\* |
| Milivolts CC | 0,1 mV | 0,15%+2 |
| Volts CC | 0,001 V |
| 0,01 V |
| 0,1 V |
| 1 V |

Tabela 14 (Precisão no multímetro)

\* (

**Bibliografia**

1. *Hecht, E.* (tradução portuguesa da 3º edição); 2º ed, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, (2002).
2. “T6 – Polarização. Lei de Malus.” Laboratório de Eletromagnetismo (e Ótica) 2021/22 Universidade do Minho.
3. Polarização da luz. Obtido a 20 de abril de 2022 [Link](https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/1215/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf)
4. Figura 8. Obtido a 20 de abril de 2022 em [Link](http://lab4.fisica.ufsc.br/files/2018/03/roteiro-exp-13.pdf)
5. Ilustração Lâmpada. Obtido a 6 de maio de 2022 em [Link](https://bigpic.net.ua/rozmalovka-z-lampochkoyu-32-foto/)
6. [Figura 1. Obtido a 20 de abril de 2022 em](file:///C:\\Users\\maria\\OneDrive\\Ambiente%20de%20Trabalho\\Polarização%20da%20luz%20%20.Obtido%20a%2020%20de%20abril%20de%202022%20em%20https:\\www.fisica.ufmg.br\\ciclo-basico\\wp-content\\uploads\\sites\\4\\2020\\05\\Polarizacao_da_luz.pdf) [[Link](file:///C:\\Users\\maria\\OneDrive\\Ambiente%20de%20Trabalho\\Polarização%20da%20luz%20%20.Obtido%20a%2020%20de%20abril%20de%202022%20em%20https:\\www.fisica.ufmg.br\\ciclo-basico\\wp-content\\uploads\\sites\\4\\2020\\05\\Polarizacao_da_luz.pdf)](https://www.fisica.ufmg.br/ciclo-basico/wp-content/uploads/sites/4/2020/05/Polarizacao_da_luz.pdf)