



## Experimento 4: Irradiância Luminosa e Polarização da Luz

### 2.4.1 Objetivos

- ✓ Compreender o conceito de irradiância Luminosa.
- ✓ Medir a irradiância luminosa em função da distância à fonte.
- ✓ Estudar a polarização da luz.
- ✓ Verificar a lei de Malus.

### 2.4.2 Materiais Necessários

- ✓ Lâmpada incandescente
- ✓ Um detector de luz
- ✓ Medidor de irradiância luminosa (luxímetro)
- ✓ 1 trilho com graduação milimetrada
- ✓ 2 polarizadores de luz com analisador

### 2.4.3 Fundamentação Teórica

#### *Irradiância de uma fonte luminosa*

A irradiância luminosa emitida por uma fonte de luz isotrópica (que emite igualmente em todas as direções) varia com a distância à fonte. Neste momento investiga - se a lei do inverso do quadrado da distância para a irradiância luminosa de uma fonte, localizada a uma distância  $r$ . Para uma melhor compreensão da irradiância, define - se algumas grandezas como potência, intensidade radiante e irradiância de uma fonte luminosa.

A potência ou **fluxo de energia radiante** ( $\Phi$ ) de uma fonte luminosa é definido como a quantidade de energia emitida por unidade de tempo  $e$ , expressa como:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

No sistema internacional de unidades (SI) esta é medida como Joule por segundo (J/s). Onde 1J/s é igual a 1 Watt (W).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Define-se a **intensidade radiante** ( $I$ ), como o fluxo de energia radiante emitida por unidade de ângulo sólido  $\Omega$ . Para esta grandeza, todas as direções dos raios luminosos emitidos devem estar compreendidas dentro de um determinado ângulo sólido  $\Omega$ . Esta quantidade é expressa como

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2)$$

Um elemento de ângulo sólido é expresso como  $d\Omega = dA/R^2$ , onde  $dA$  é um elemento de área de uma esfera de raio  $R$  centrada na fonte luminosa  $S$ . A Figura 1 é uma ilustração de raios luminosos (representados por setas) compreendidos em um ângulo sólido  $\Omega$  emitidos de uma fonte  $S$ . O efeito dos raios em um anteparo localizado em  $A$ , é o de produzir um clarão circular, delimitado pelos raios luminosos.

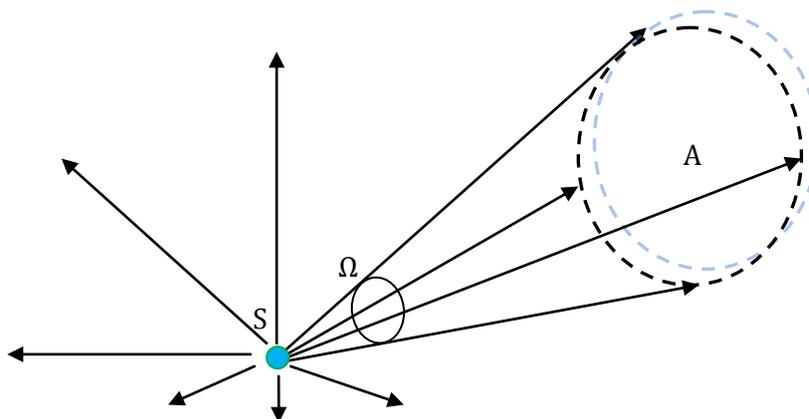


Figura 1. Raios luminosos que partem de uma fonte  $S$  e atravessam um ângulo sólido  $\Omega$ .

No SI a intensidade radiante é medida como watts (W) por esferoradiano (sr). Um esferoradiano é a medida de ângulo sólido que subtende na superfície da esfera uma área de  $R^2$ . Sendo assim, uma esfera completa possui ângulo sólido de  $4\pi$  esferoradianos. Outra unidade de medida, para a intensidade luminosa, é o candela (cd). Um candela no SI é definida como a intensidade luminosa emitida por uma fonte, em uma dada direção, de luz monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade de radiação em tal direção é de  $1/683$  watts por esferoradiano. Desta forma,  $1 \text{ cd} = 1/683 \text{ W/Sr}$ .

A partir do candela (unidade fundamental do SI), define-se outra unidade para o fluxo de energia radiante ( $\Phi$ ), o lúmen (lm). Um lúmen é o fluxo de energia radiante dentro



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

de um ângulo sólido de 1 esferorradiano, emitido por um ponto luminoso com intensidade de 1 candela (em todas as direções).

Na Figura 1, o fluxo de energia radiante que atravessa qualquer área localizada a uma distância  $r$  da fonte, correspondida pelo ângulo sólido  $\Omega$ , é o mesmo. O mesmo raciocínio vale para a intensidade radiante, visto que  $\Omega$  é o mesmo para qualquer uma dessas superfícies.

Finalmente, se um elemento de área  $dA$ , a uma distância  $r$  da fonte, é iluminado por um fluxo luminoso  $d\Phi$ , a **irradiância** ( $E$ ) fica definida como:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (3)$$

Mas como  $dA$  se relaciona com um ângulo sólido, por meio da equação  $d\Omega = dA/R^2$ , a equação acima fica:

$$E = \frac{1}{r^2} \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Logo

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (4)$$

A unidade SI da irradiância luminosa é lux. 1 lux é definido como a razão de 1 lumen por metro quadrado ( $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$ ). A equação acima descreve a lei do inverso do quadrado da distância (também conhecida como lei fotométrica da distância). Espera-se então que a irradiância da fonte luminosa sobre uma superfície decresça com o quadrado da distância à fonte. A Figura 2 é uma ilustração da geometria da lei do inverso do quadrado para a intensidade luminosa de uma fonte  $S$ .

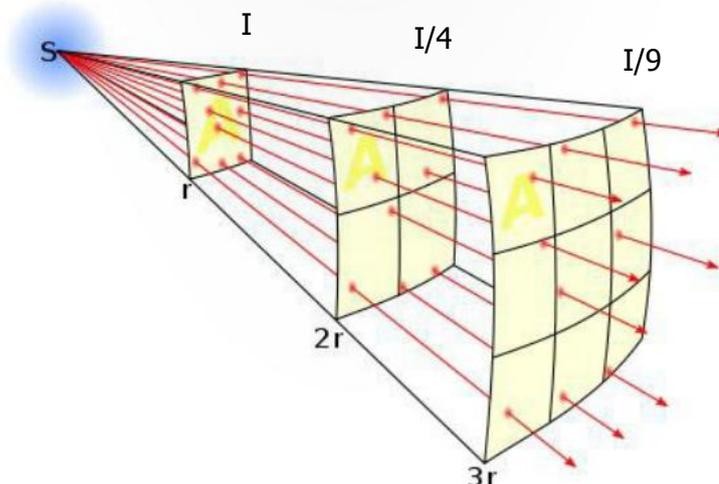


Figura 2- Raios luminosos partindo da fonte S atravessam uma área A, delimitada por um ângulo sólido  $\Omega$ . A uma distancia  $r$ , a intensidade luminosa é I e decresce com o inverso do quadrado de da distância.

### ***Polarização da Luz***

Em fontes ordinárias de luz, como uma lâmpada incandescente ou o Sol, os átomos agem independentemente e emitem ondas cujos campos eletromagnéticos são orientados aleatoriamente em torno da direção de propagação. Nestas fontes de luz, os campos eletromagnéticos são ondas transversais e, a direção de propagação da luz é dada pelo produto vetorial do campo elétrico (**E**) e magnético (**B**) [**E** X **B**]. Pelo fato de os campos eletromagnéticos não oscilarem em um plano preferencial, diz-se que estas fontes de luz são *não polarizadas*. A direção de polarização é definida, por convenção, como sendo a do campo elétrico da onda. A Figura 3 (a) é uma ilustração de uma onda eletromagnética não polarizada, que se propaga perpendicularmente ao plano da página, cuja direção do vetor **E** muda de direção aleatoriamente.

Existem certos materiais comerciais polarizadores chamados de polaróide que ao serem atravessados por uma onda de luz não polarizada, permitem somente a transmissão de luz, cuja direção de oscilação do campo **E** é fixa no espaço. Esta direção é determinada pelas propriedades da lâmina e a luz desta forma fica *polarizada*. A direção de polarização da lâmina é estabelecida durante o processo de produção, inserindo-se certas moléculas de cadeia longas em uma lâmina de plástico flexível, de modo que estas se alinhem paralelamente. A radiação com a componente do vetor **E** paralelo às moléculas é fortemente absorvida, enquanto que a componente perpendicular passa através da lâmina.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

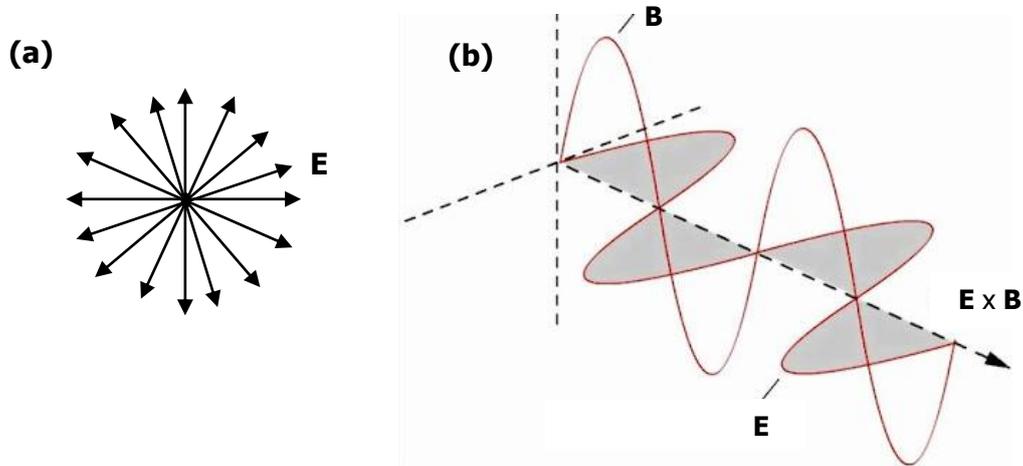


Figura 3 – (a) Ilustração de uma vista de frente de um campo elétrico oscilante de uma luz não polarizada. (b) Ao atravessar um polarizador, os campos E e B oscilam em um direção fixa, determinada pelas propriedades do polarizador

A Figura 3(b) é uma ilustração de uma onda de luz que ao atravessar um polarizador fica com as direções dos campos eletromagnéticos fixas no espaço. A luz também pode ser total ou parcialmente polarizada, por reflexão ao incidir em um meio, ou por um processo chamado espalhamento. Assim a luz solar é parcialmente polarizada pelo processo de espalhamento na atmosfera.

A Figura 4 é a ilustração de uma forma de analisar a intensidade do campo **E** da onda de luz transmitida por um polarizador, com relação a um segundo polarizador, onde suas direções de polarização são determinadas por um ângulo  $\Theta$ .

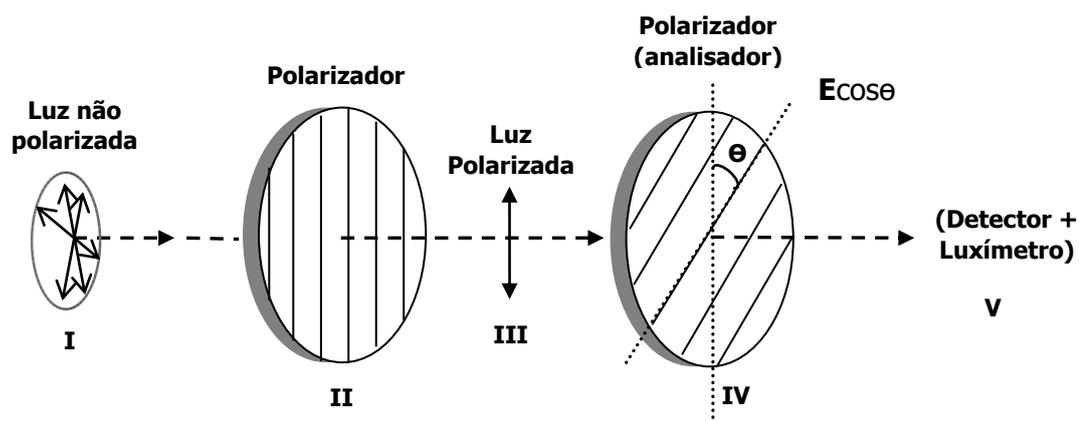


Figura 4 – A Luz não polarizada (I) ao emergir do polarizador (II) fica polarizada na direção vertical (III). Um segundo polarizador funciona como analisador (IV). A intensidade luminosa é medida, como função do ângulo  $\Theta$ , com o auxílio de um detector acoplado ao luxímetro (V).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

A direção de polarização está representada por linhas paralelas em cada polarizador. A luz não polarizada (I) ao atravessar o polarizador (II) fica polarizada na direção vertical (III). Um segundo polarizador (IV), que funciona como um analisador da intensidade da luz polarizada, tem sua direção de polarização variada de  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ . Desta forma, se amplitude da luz polarizada (III) é  $E_m$ , a amplitude da luz emergente do analisador é dada por  $E_m \cos \theta$ . Lembrando que a "intensidade" (irradiância) de um feixe luminoso é proporcional ao quadrado da amplitude, a intensidade transmitida varia com  $\theta$  de acordo com a equação

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

Esta equação, chamada de lei de Malus, foi descoberta em 1809 por Etienne Louis Malus, usando técnicas de polarização diferentes das descritas neste roteiro.

## 2.4.4 Procedimentos experimentais

### Parte 1 - Irradiância de uma fonte luminosa

1 – Posicione detector de irradiância luminosa, com o cabo do luxímetro conectado, conforme a Figura 5 abaixo:

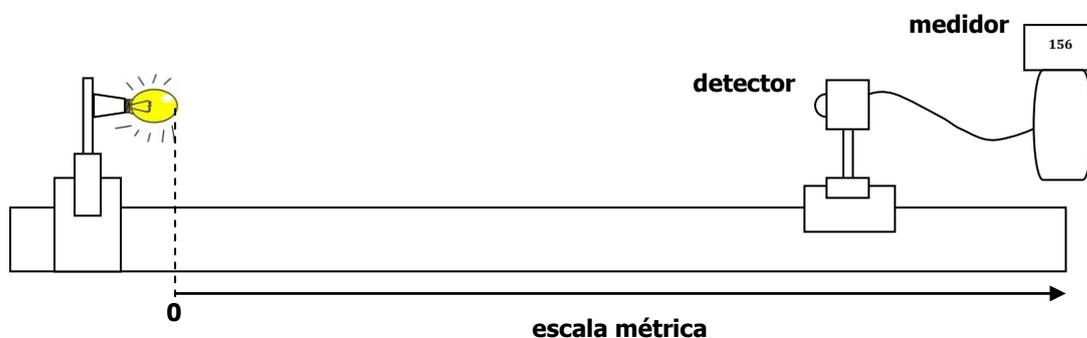


Figura 5 – ilustração do aparato experimental para medição da intensidade luminosa em função da distância à fonte luminosa.

2 – Ligue a lâmpada de 127 V/ AC e o luxímetro.

3 – Posicione o detector a uma distância de 10 cm da lâmpada. Afastando a lâmpada de 5 em 5 cm, meça a irradiância até uma distância de 70 cm. Realize mais três medições, calcule a média e adote o desvio padrão como incerteza. Complete a Tabela 1.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Tabela 1- Valores de irradiância luminosa em função da distância à fonte

Distância (cm)	$I_1$ (lux)	$I_2$ (lux)	$I_3$ (lux)	$I_{\text{médio}} \pm \Delta I$
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				

4 – Avalie o erro na distância e faça um gráfico de intensidade em função do inverso do quadrado da distância. O gráfico traçado corresponde ao esperado ? Justifique sua resposta e avalie as possíveis causas de erro.

### Parte 2 - Polarização da luz

1 – Observe o que acontece quando você gira uma placa polarizadora sobre um relógio digital ou um mostrador de cristal líquido.

2 – Olhando para uma lâmpada da sala através de uma placa polarizadora, gire a placa e veja o que acontece. Faça o mesmo com o reflexo da lâmpada na mesa de granito polido da bancada. O fenômeno que você deve observar é chamado de polarização por reflexão. O ângulo de incidência para o qual a luz refletida é totalmente polarizada é chamado de **ângulo de Brewster**.

3 – Observe a Figura 6 posicione o primeiro polarizador entre uma distância de 5 a 10 cm da lanterna. Não coloque mais próximo para não danificá-lo. Gire o eixo deste polarizador de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  e observe se há variação da intensidade luminosa e discuta esta observação. Após isto, posicione-o na posição angular  $\Theta = 0^\circ$ .

4 – Monte o segundo polarizador (analisador) a uns 10 cm do primeiro polarizador. Gire o eixo deste analisador de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Discuta sua observação.

5 – Posicione o detector de irradiância à aproximadamente 2 cm do analisador. Com o luxímetro ligado, certifique-se de que a leitura é máxima quando  $\Theta = 0^\circ$  no analisador.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO**  
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

6 – O segundo polarizador (analisador) é rotacionado com intervalos de 10° entre as posições -90° e 90° e as correspondentes intensidades luminosas determinadas no luxímetro. Complete a Tabela 2 e calcule a média e adote o desvio padrão como incerteza.

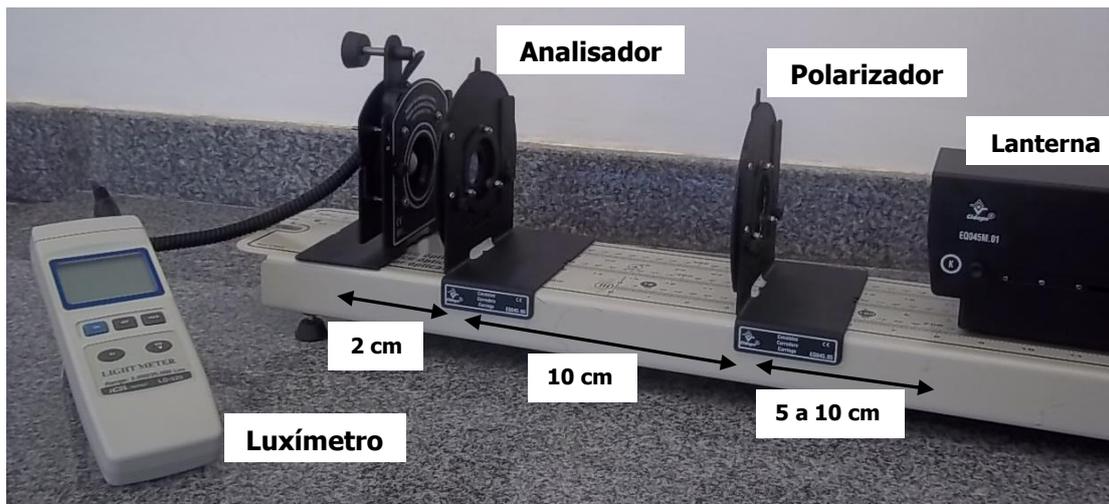


Figura 6 – Ilustração do aparato experimental para medição da intensidade luminosa em função do ângulo entre as direções do polarizador e analisador.

7 – Com os dados obtidos construa uma tabela contendo as intensidades normalizadas  $N(\theta) = I(\theta)/I_0$  em função dos ângulos  $\theta$ .

Tabela 2 – Valores de intensidade luminosa em função do ângulo ( $\theta$ ) entre as direções de polarização do polarizador.

$\theta$ (o)	$I_1$ (lux)	$I_2$ (lux)	$I_3$ (lux)	$I_{\text{médio}} \pm \Delta I$
-90				
-80				
-70				
-60				
-50				
-40				
-30				
-20				
-10				
0				
10				
20				



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				

### 2.4.5. O que Incluir no Relatório do Experimento

- Dedução da lei de Malus.
- Em um mesmo gráfico trace as curvas de  $I(\theta)/I_0$  em função de  $\theta$  e  $\cos^2 \theta$  em função de  $\theta$  e, verifique se a lei de Malus é obedecida. Não se esqueça de mostrar as incertezas.
- Responda às questões:
  - (a) De que forma a luz ambiente pode afetar os resultados da experiência ?
  - (b) O que é polarização por reflexão ? Discuta sobre a lei de Brewster.
  - (c) Uma onda sonora pode ser polarizada ? Explique.
  - (d) Por que os óculos de sol feitos de materiais polarizados têm uma vantagem marcante sobre aqueles que contam simplesmente com efeito de absorção ? Que desvantagem eles podem ter ?

### 2.4.6. Bibliografia

Lei de Malus e Lei Fotométrica da distância. Física experimental IV. Centro de Ciências da Natureza, Departamento de Física (Prof. Angel Alberto Hidalgo).

Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de Janeiro RJ (1996).