



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

ERIVANIA DA SILVA BEZERRA

**POLARIZAÇÃO DA LUZ: VERIFICAÇÃO DA LEI DE MALUS A PARTIR DE
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

ARARUNA-PB

2022

ERIVANIA DA SILVA BEZERA

**POLARIZAÇÃO DA LUZ: VERIFICAÇÃO DA LEI DE MALUS A PARTIR DE
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
(monografia) apresentada á coordenação/
Departamento de Licenciatura em física
da Universidade Estadual da Paraíba,
como requisito parcial à obtenção do
título de licenciada em física.

Área de concentração: Física

Orientador: Prof. Dr. Mario César Soares Xavier

ARARUNA-PB

2022

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B574p Bezerra, Erivania da Silva.

Polarização da luz [manuscrito] : verificação da lei de Malus a partir de procedimentos experimentais / Erivania da Silva Bezerra. - 2022.

30 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Física - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2023.

"Orientação : Prof. Dr. Mário César Soares Xavier, Departamento de Física - CCT."

1. Ondas. 2. Ondas eletromagnética. 3. Luz. 4. Física. I. Título

21. ed. CDD 530.124

ERIVANIA DA SILVA BEZERRA

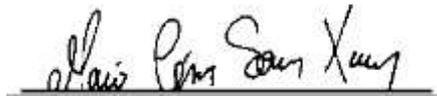
**POLARIZAÇÃO DA LUZ: VERIFICAÇÃO DA LEI DE MALUS A PARTIR DE
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
(monografia) apresentada á coordenação/
Departamento de Licenciatura em física
da Universidade Estadual da Paraíba,
como requisito parcial à obtenção do
título de licenciada em física.

Área de concentração: Física

Aprovada em: 14 /12 / 2022.

BANCA EXAMINADORA



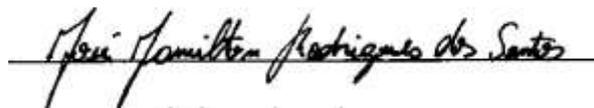
Prof. Dr. Mário César Soares Xavier (Orientador)

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Kelly Christian Tolentino Dominguez

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dr. José Jamilton Rodrigues dos Santos

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

RESUMO

A óptica é a parte da física que estuda a luz, sua propagação seu comportamento e a sua interação com a matéria. Uma das propriedades mais importantes é a polarização da luz, que é bem explicado pela teoria ondulatória da luz, que considera luz não polarizada como uma onda eletromagnética que vibra periodicamente em várias direções. Neste trabalho consideramos fontes de luz não polarizada, que incidem sobre elementos polarizadores (polaroides). Nosso estudo experimental visou mostrar que a intensidade de luz policromática que passa através de um polarizador é polarizada e obedece a lei de Malus. Os polarizadores se comportam como uma fenda, fazendo com que a luz transmitida possua uma única polarização, que pode ser horizontal ou vertical, dependendo da direção de polarização do polarizador utilizado. O estudo foi realizado no laboratório de Óptica- Física da UEPB-campus Araruna. Quando comparados com outros trabalhos experimentais, nossos resultados concordam muito bem com aqueles obtidos em laboratórios bem mais implementados e apoiado inclusive por maquetes experimentais e softwares de automatização para a coleção e tratamento dos dados.

Palavras chaves: Ondas eletromagnéticas. Polarização da luz. Lei de Malus.

ABSTRACT

Optics is the part of physics that studies the generation, propagation, and detection of light. It also considers the interactions with the matter describing the behavior and the properties of visible light, infrared light as well as the ultraviolet region of the electromagnetic spectrum. Polarization is one of the most important properties of light that is well explained by the wave theory of light; this considers unpolarized light as an electromagnetic wave that periodically vibrates in all directions. In this work, we used non-polarized light sources reaching polarizing objects (Polaroids) to show that the intensity of polychromatic light that passes through a polarizer is polarized and obeys the Malus law. A Polaroid works like a slit, such that the transmitted light is polarized horizontally or vertically, depending on the polarization direction of the polarizer. Our results when compared with other experimental works agree very well, inclusive with those obtained in well-established laboratories, supported even by experimental setups with automation software for data collection, and processing.

Key words: Electromagnetic waves. Polarization. Malus' Law.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS	8
2.1	A propagação dos raios luminosos	8
2.2	Espectro eletromagnético.....	9
2.3	Os fenômenos da refração e reflexão da luz.....	10
3	HISTÓRIA DO FENÔMENO POLARIZAÇÃO DA LUZ	12
3.1	Polarização da luz	12
3.2	Polarização linear	13
3.3	Filtros polarizadores (polaroides)	14
3.4	Luz Polarizada e Intensidade Transmitida.....	15
3.5	Lei de Malus	16
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	18
4.1	Observação do experimento do comportamento do laser e da luz policromática com apenas um polarizador	18
4.2	Verificação experimental da Lei de Malus	19
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios o ser humano tem como natureza a essência do ser investigativo, ao que se refere a tudo que está ao seu redor. Durante séculos os filósofos vieram se perguntando o que é a luz? Durante muito tempo a luz teve diferentes formas de compreensão, uma das primeiras teorias para explicar a luz foi a corpuscular de Isaac Newton (1642-1627), que considera a luz formada por um grande número de partículas (AZEVEDO et al., 2010). Porém Christian Huygens (1629-1695), desenvolveu a teoria ondulatória, que explica os fenômenos da refração, polarização e a birrefringência, que não podem ser explicadas pela teoria corpuscular de Newton.

Após a teoria de Huygens onde a luz é considerada como uma onda, surgiram novos contribuidores, como o cientista Thomas Young quem realizou a experiência da dupla fenda para medir o comprimento de onda da luz, que é considerado um dos experimentos, mais importantes na história da ciência. Em 1788 o físico Augustin Jean Fresnel, desenvolveu a teoria ondulatória, explanando os fenômenos de interferência e difração, ele foi capaz de demonstrar que dois raios de luz tendo polarizações perpendiculares não interferiam, esse resultado levou a certeza que a luz era uma onda transversal. Com a continuidade do estudo dos fenômenos ópticos, outro cientista Michael Faraday, realizou estudos acerca do magnetismo, descobrindo o efeito Faraday, onde ele mostrou que um campo magnético externo é capaz de mudar a polarização de um feixe de luz linearmente polarizado.

Partindo dos estudos de Faraday, o físico James Clerk Maxwell(1831-1879), com suas pesquisas consegue unificar as teorias do magnetismo e da eletricidade e com isso conseguiu provar que existe uma relação entre a luz e os fenômenos eletromagnéticos, sendo possível expressar matematicamente a luz como uma onda eletromagnética que sepropaga com uma única velocidade.

Nesse trabalho realizamos um estudo sobre a propriedade de polarização das ondas eletromagnéticas, que é de grande interesse devido a sua aplicação na ciência e na engenharia, impactando diretamente á sociedade humana. Temos como exemplos, o rádio, televisão, celulares entre outros. Nosso principal objetivo é verificar experimentalmente a lei de Malus, tendo, como motivação o trabalho realizado por Oliveira et.al (2020), quem desenvolveu uma maquete experimental eletrônica com polarizadores para verificar a lei de Malus

A maquete foi automatizada com a ajuda de uma plataforma computacional construída em Arduino, está modificava o ângulo rotação do polarizador e permitia a obtenção automática da intensidade de luz transmitida como função da direção do ângulo de polarização do polarizador. Nosso trabalho desenvolvido no laboratório de Óptica Física da UEPB, campus Araruna, nosso arranjo experimental foi construído a partir do Kit experimental desenvolvido pelo Centro industrial de equipamentos de ensino e pesquisa (CIDEPE). Nossos resultados concordam muito bem com os resultados apresentados por o de Oliveira.

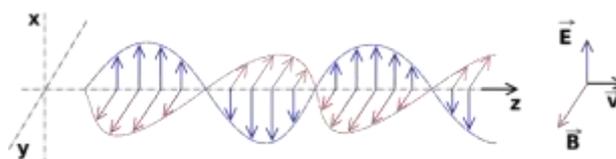
2 FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

2.1 A propagação dos raios luminosos

As ondas eletromagnéticas foram descobertas por James Clerk Maxwell, a partir de seus estudos foi possível visualizar as ondas eletromagnéticas como uma composição dos campos, elétrico (\vec{E}) e campo magnético (\vec{B}), que oscilam perpendicularmente, (HALLIDAY,2012). como mostrado na figura 1.

Figura 1- Mostra uma onda eletromagnética, sendo o campo elétrico (\vec{E}), o campo magnético

(\vec{B}) e a velocidade (v) perpendiculares entre si.



Fonte: Halliday, 2009.

Os vetores (\vec{E}) e (\vec{B}) são representados nas equações 1 e 2, respectivamente como duas ondas que se propagam no espaço.

$$E(r, t) = E_0 \cos(\omega t - kr) \quad (1)$$

$$B(r, t) = B_0 \cos(\omega t - kr) \quad (2)$$

$(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$ é a fase da onda, e o vetor $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{e}$ são o número de onda, λ é o comprimento de onda, \vec{r} é o vetor posição, \vec{e} é o vetor unitário na direção de propagação da onda ω é a frequência cíclica ou angular, e t é o tempo.

Devido a perpendicularidade entre os campos \vec{E} e \vec{B} , as ondas eletromagnéticas são ondas transversais que satisfazem todos os fenômenos da teoria ondulatória, (Refração, reflexão, difração, polarização, etc). No vácuo, os Campos magnéticos (\vec{B}) e os campos elétricos (\vec{E}) que compõem as ondas eletromagnéticas, propagam-se com a mesma velocidade da luz no vácuo aproximadamente $c=3 \times 10^8$ m/s. onde o valor de c pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (3)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade no vácuo e o ε_0 é a permissividade no vácuo.

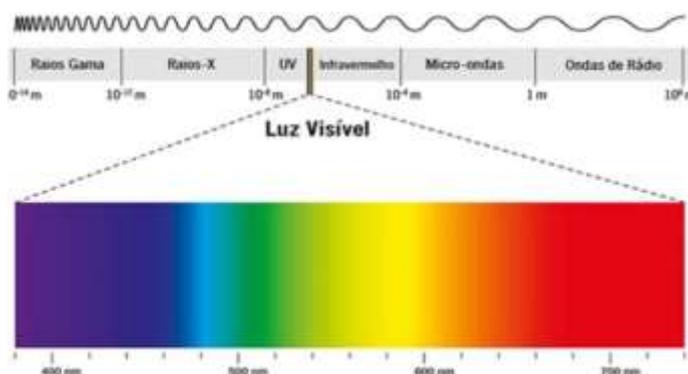
$$\varepsilon_0 = 8,85418 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}/\text{A}$$

2.2 Espectro eletromagnético

Certamente, a luz não é a única onda eletromagnética que existe, é só uma parte de um grande conjunto de ondas eletromagnéticas, que formam o chamado espectro eletromagnético, (figura 2). A luz visível é uma pequena parte do espectro que é visível para os olhos humanos, ou seja, as ondas que nossos olhos podem detectar. Na figura (2) vemos que existem diferentes regiões dentro do espectro eletromagnético, como, ondas de rádio, micro-ondas, infra-vermelho, luz visível, ultravioleta, raio x e raios gama. (LACZKOWSK, 2010)

Figura 2: Representação do espectro eletromagnético



Fonte: Guimarães, 2005.

O espectro eletromagnético está organizado conforme os comprimentos de onda (λ) e com as suas respectivas frequências (f), como mostra a figura 2 acima.

Na ausência de campos gravitacionais intensos, a luz propaga-se de maneira retilínea. Sendo a onda eletromagnética, dita como luz, a mesma quando se propaga em diferentes meios, como, porexemplo, vidro, ar, tijolo, água. Os meios de propagação podem ser transparentes, translúcidos ou opacos. Como a luz trata-se de uma onda, então

pode-se usar a equação que relaciona a frequência e o comprimento de onda para calcular a velocidade de uma onda no vácuo, que é:

$$c = \lambda f \quad (4)$$

Onde,

c = velocidade da luz no vácuo

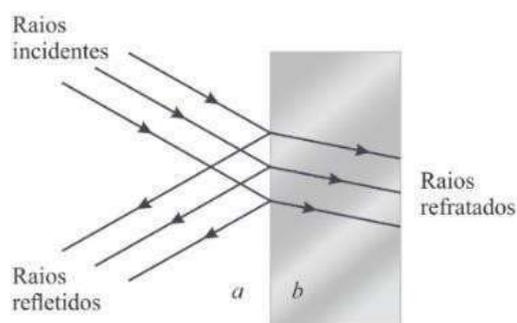
λ = comprimento de onda

f = frequência

2.3 Os fenômenos da refração e reflexão da luz

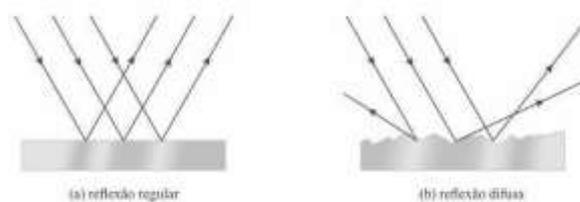
A refração e a reflexão da luz são fenômenos que podem ser estudados usando-se a teoria ondulatória da luz. A refração e reflexão da luz acontece quando um raio incide em uma superfície podendo refratar ou refletir. Na figura mostrada a seguir observamos os dois fenômenos, na parte da figura descrita por (a) é mostrado o fenômeno da reflexão e na parte da figura (b) está mostrando o fenômeno da refração.

Figura (3): Fenômeno da reflexão e da refração da luz



Fonte: Autora própria, 2022.

Para Paiva (2014,p.1) a refração da luz acontece quando o raio passa de um meio para o outro, mudando sua velocidade de propagação. A reflexão da luz pode ser dividida em 2 aspectos, (i) reflexão regular (figura 4a) quando os raios incidem numa superfície plana e refletem de uma forma paralela e organizada, e (b) reflexão difusa (figura 3b), quando o raio incide sobre uma superfície rugosa, os raios são refletidos em forma desorganizada.

Figura (4)- Representação da reflexão difusa e regular

Fonte: Autora própria, 2022.

O índice de refração absoluto é representado pela letra (**n**) definida como a razão entre, a velocidade da luz no vácuo (**c**) e a velocidade da luz no meio (**v**). Portanto, quanto maior for o índice de refração de um meio, menor será a velocidade da luz de propagação desse meio. Na equação, é necessário denotar que a velocidade da luz no ar é muito próxima a velocidade da luz no vácuo, ou seja $n \approx 1$.

O índice de refração absoluto pode ser calculado pela equação a seguir:

$$n = \frac{c}{v} \quad (5)$$

n=Índice de refração (adimensional, não há unidade de medida)

c=Velocidade da luz no vácuo ($c=3 \times 10^8$ m/s)

v= Velocidade da luz no meio (m/s)

Segundo Halliday (1995,p,18), Quando um raio se refrata, o seu plano de raio refratado tem um ângulo de refração θ_2 que se relaciona com o ângulo do raio incidente θ_1 , através da equação (6).

$$n_2 \text{sen} \theta_2 = n_1 \text{sen} \theta_1 \quad (6)$$

Sendo assim, se $n_2 > n_1$, então $\text{sen}(\theta_1) < \text{sen}(\theta_2)$, resultando $\theta_1 < \theta_2$. Portanto, para incidência oblíqua da luz, quando passa de um meio com menor índice de refração para outro com maior índice, o raio luminoso aproxima-se da normal.

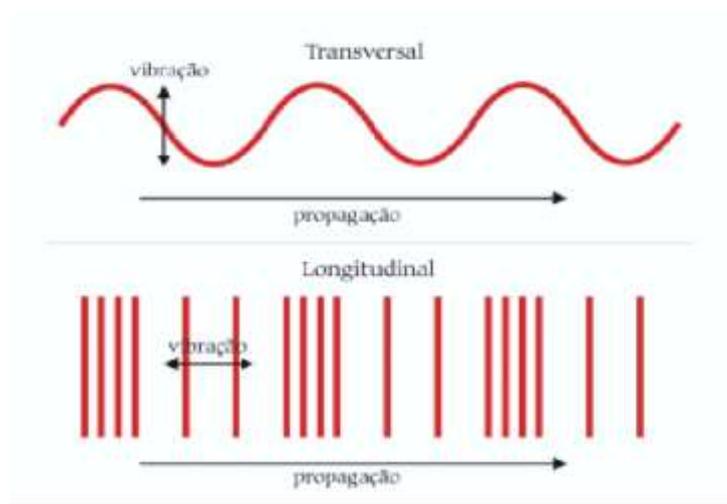
3 HISTÓRIA DO FENÔMENO POLARIZAÇÃO DA LUZ

3.1 Polarização da luz

Ondas eletromagnéticas- são aquelas que não necessitam de um meio para se propagar, pois elas se propagam inclusive no vácuo. Como por exemplo, as ondas de rádio, micro-ondas, luz visível e raio x, etc. (HALLIDAY, RESNICK; WALLKER, 2009b).

Segundo Ribeiro e Verdeaux (2012), as únicas ondas que podem ser polarizadas são as ondas transversais, diferentes das ondas longitudinais, pois a característica que torna impossível a polarização das ondas longitudinais é que elas têm a mesma direção de oscilação e de propagação. Como representado na figura 5.

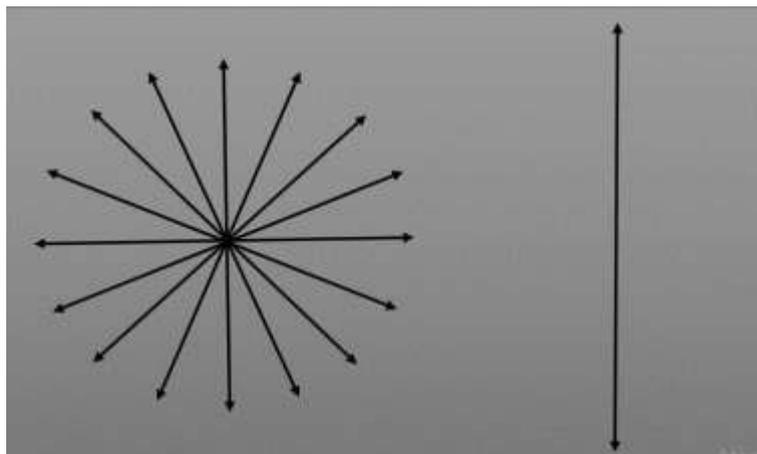
Figura (5): Ondas longitudinais e transversais



Fonte: Ribeiro e Verdeaux, 2012

Segundo Halliday (2009,p,13), a polarização da luz é um fenômeno específico da teoria ondulatória, que filtra as direções de vibração das ondas eletromagnéticas, que em um início se propagavam em infinitas direções, e após a polarização passam a se propagarem apenas uma direção, como mostra na figura (6). Esse efeito acontece quando a luz não polarizada, passa por um filtro polarizador que pode ser vertical ou horizontal, fazendo com que o feixe transmitido fique com a direção da polarização do filtro e perca intensidade luminosa.

Figura (6): Representação da luz não polarizada com setas que indicam o campo elétrico em várias direções e polarizada a luz polarizada representada por uma seta em uma só direção.



Fonte: Autora própria, 2022.

A polarização pode ser classificada em Polarização linear, polarização elíptica e polarização circular. Nesse trabalho vamos tratar apenas da polarização linear.

3.2 Polarização linear

Na polarização linear da luz, considerando o plano xy , a direção de propagação da onda eletromagnética se mantém fixa em x , e a onda oscila em y . Segundo Laczkowski (2010), a polarização linear acontece quando as vibrações do vetor campo elétrico (\vec{E}) são mutuamente paralelos em todos os pontos da onda.

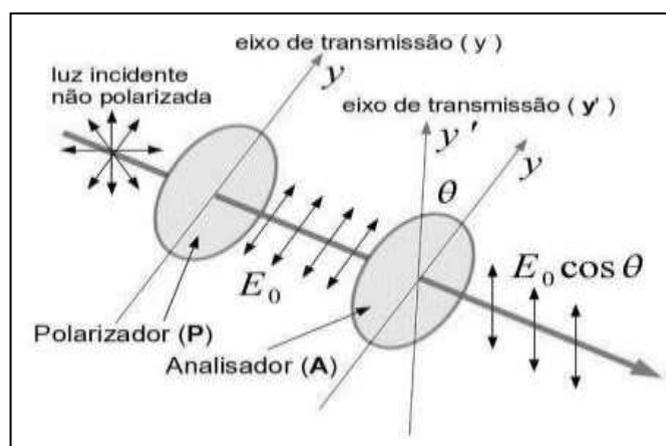
Para uma onda linearmente polarizada na direção y , o campo elétrico pode ser escrito da seguinte maneira:

$$E_z, t = E_0 \cos [kz - \omega t] \hat{j} \quad (7)$$

Onde temos o versor (\hat{j}) na direção y , (ω) é a frequência angular e (k) é o número de onda, uma constante dada em função do comprimento de onda (λ).

Para que aconteça o fenômeno de polarização linear, é necessário que uma luz não polarizada passe por um filtro polarizador, onde esse filtro vai determinar a direção de vibração dessa onda.

Figura (7):Mostra um Exemplo de polarização das ondas de luz.



Fonte: Lackowski, 2010.

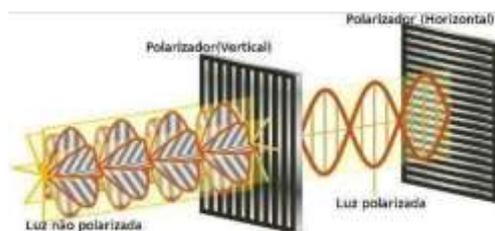
Quando a direção de polarização de um feixe incidente linearmente polarizado coincide com a direção do eixo de um polarizador (p), o módulo do campo elétrico transmitido terá a amplitude E_0 . Quando o feixe de luz linearmente polarizado incide formando um ângulo (θ) com o eixo do polarizador acontece uma mudança de plano de polarização e o módulo do campo elétrico transmitido é $E_0 \cos \theta$.

3.3 Filtros polarizadores (polaroides)

É possível transformar uma luz não polarizada em polarizada, para tal se faz necessário a utilização de um filtro polarizador. Os filtros polarizadores, também conhecidos como filtros polaroides, foram inventados em 1932 por Edwin Land quando ainda era um universitário, esses filtros são lâminas de plástico que contém moléculas longa de um certo hidrocarboneto. Durante o processo de fabricação, a folha é esticada, fazendo com que as moléculas se alinhem e em seguida é mergulhada em uma solução de iodo, sendo assim os átomos de iodo se une as moléculas que já estão alinhada, fazendo com que fiquem eletricamente condutoras. (PEREIRA,2021).

A polarização por absorção tem um funcionamento a partir dos filtros polarizadores que quando a onda eletromagnética passa pela folha apenas as componentesdo campo que são paralelas as moléculas conseguem atravessá-la, as componentes perpendiculares são absorvidas, como isso dizemos que a luz transmitida está polarizada(figura 8).

Figura (8): Luz natural incidindo sobre o polarizador, sendo observado seu eixo de rotação pelo detector.



Fonte: Tripler. Mosca, 2006.

3.4 Luz Polarizada e Intensidade Transmitida

Existe uma regra que só é válida para luz não-polarizada que incide em um filtro polarizador, esta é chamada de regra da metade. Imaginando um campo eletromagnético que oscila nas direções de y e z , como na Figura 8, passando por um polarizador paralelo ao eixo y , apenas componentes do eixo y passam pelo filtro polarizador e as componentes em z são absorvidas, com isso metade da intensidade I_0 da onda original é perdida. Logo a expressão matemática a intensidade transmitida é:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \quad (8)$$

Onde I_0 é a intensidade da luz incidente.

Esta regra só é válida se a luz que incide no filtro polarizador é não-polarizada, como dito anteriormente, caso contrário teremos um outro comportamento que deve ser analisado a partir das suas peculiaridades.

Figura 9: luz não polarizada atravessando um polarizador

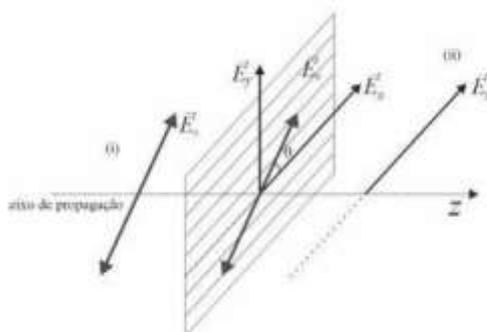


Fonte: D.Halliday, 1995.

3.5 Lei de Malus

Etienne Louis Malus, foi um grande cientista, que viveu entre 1775 e 1812, o mesmo foi engenheiro militar e capitão do exército de Napoleão em 1809. Para descrever a lei de Malus, vamos ter um polarizador, cujo eixo de transmissão, representado pela linha tracejada x, faz um ângulo (θ) com o vetor campo elétrico \vec{E} . Este polarizador transmite apenas a onda linearmente polarizada, para a qual o vetor \vec{E}_x é paralelo ao seu eixo de transmissão.

Figura 10: Luz polarizada preste a atravessar um filtro polarizador



Fonte: Autora própria, 2022.

A amplitude do campo elétrico da luz transmitida terá dada por:

$$E_x = E_0 \cdot \cos\theta \quad (9)$$

O vetor \vec{E}_0 da onda transmitida, pelo primeiro polarizador, pode ser representado em termos das componentes E_y e E_x ,

$$E_y = E_0 \sin\theta \quad (10)$$

$$E_x = E_0 \cos \theta \quad (11)$$

Inserindo, agora, um segundo polarizador (analisador), com seu eixo de transmissão formando um ângulo θ com o primeiro, ou seja, na direção x , apenas a componente E_x é componente de transmissão e E_y totalmente bloqueada.

A intensidade I da luz que atravessa o analisador é captada no detector (foto resistor). Lembrando que a intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado da amplitude, devemos ter:

$$I = K E_x^2 \quad (12)$$

obtem-se, então:

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{E_x}{E} \right)^2 \quad (13)$$

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{E \cos \theta}{E} \right)^2 \quad (14)$$

Assim, de acordo com a equação:

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 \theta \quad (15)$$

Encontraremos, a seguinte equação é conhecida como lei de Malus, de onde podemos deduzir, que a intensidade da luz transmitida, e que chega ao detector, é máxima para $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$ (neste caso, os dois polarizadores têm seus eixos de polarização paralelos) e é nula para $\theta = 90^\circ$ ou $\theta = 270^\circ$, onde os polarizadores estão perpendiculares (HALLIDAY, 2009).

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (16)$$

Onde, I_0 é a intensidade de luz incidente no polarizador, θ é o ângulo entre os eixos de transmissão dos polarizadores e I é a intensidade da luz transmitida.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Observação do experimento do comportamento do laser e da luz policromática com apenas um polarizador

Para verificar a lei de Malus, foram realizados experimentos para estudar a propriedade de polarização da luz, usando um laser e uma lanterna policromática. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Física experimental IV, no Campus VIII da Universidade Estadual da Paraíba, utilizando-se os kits experimentais da CIDEPE.

O arranjo experimental foi montado em ambiente apropriado de mínima incidência de luz, a coleta de dados, foi feita em horário noturno e com as luzes do laboratório desligadas. Tais cuidados foram tomados em conta com o intuito de minimizar que luz externa se filtrasse até o detector e influenciasse nos valores dos dados coletados, pois nosso medidor de intensidade luminosa (luxímetro) é muito sensível.

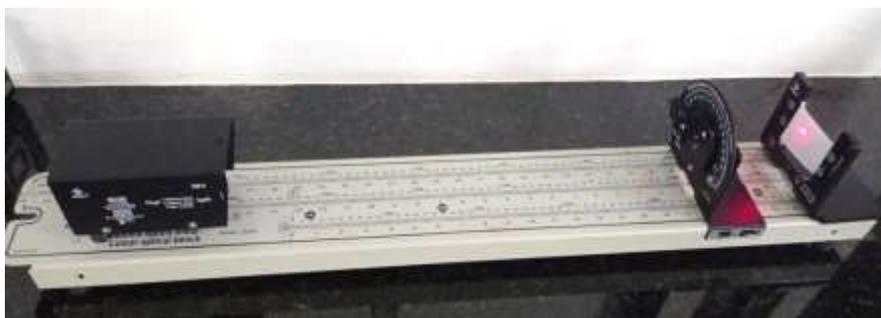
O arranjo experimental, consistiu dos seguintes componentes:

- 1 lanterna de luz policromática;
- 1 lanterna laser;
- 1 medidor de intensidade luminosa em Lux;
- 1 barramento para banco óptico;
- 1 lente convergente plano convexa de 04 dioptrias;
- 1 lente convergente plano convexa de 08 dioptrias;
- 2 filtros polaroides girante;
- 1 íris 1,5 a 30 mm;
- 1 painel branco com escalas.

Iniciamos nosso estudo experimental analisando os efeitos de polarização na intensidade da luz transmitido de um polarizador, comparamos duas fontes luminosas, uma fonte de luz policromática e fonte laser. Uma fotografia de nosso arranjo experimental é mostrada na figura (10).

Primeiro, usamos a fonte laser que foi posicionada no ponto zero da escala do banco óptico e a cartolina branca no outro extremo a um comprimento de x cm após o ponto zero. Antes da cartolina, foi colocado o polaroide na posição y cm após o ponto zero.

Figura 11: Montagem do aparato experimental.



Fonte: Autora própria, 2022.

Quando o polaroide é girado para valores entre 0° e 180° se percebe que a intensidade do laser que incide sobre a cartolina branca fixada sobre o anteparo variações de intensidade, observando-se no luxímetro, valores de intensidade máximos, médios e mínimos, dependendo do valor do ângulo girado. O ponto de máxima intensidade ocorre quando o plano de vibração da fonte laser fica alinhado com os cristais do polarizador. Já o ponto de mínima intensidade ocorre quando o plano de vibração da luz laser é perpendicular (forma um ângulo de 90°) a direção dos cristais do polarizador.

Segundo, substituímos a fonte laser por uma lanterna de luz policromática, acrescentando-se as 5 lentes convergentes plano convexas de 4 e 8 dioptrias, para focalizar o feixe através do polarizador, tal que o feixe transmitido seja observado na cartolina. Seguidamente, foi realizado o mesmo procedimento com apenas um polarizador, e percebemos que a fonte de luz policromática não é polarizada com apenas um polarizador, diferente da fonte de laser, pois observamos na cartolina que não há mudança na sua intensidade sobre a cartolina.

4.2 Verificação experimental da Lei de Malus

Como descrito anteriormente, foi realizado um estudo preliminar para a lei de Malus, onde usamos um arranjo experimental com um único polarizador. No entanto para verificar a lei de Malus foi necessário fazer algumas modificações importantes no nosso arranjo. A nova montagem é mostrada na figura (11), onde utilizamos um banco óptico

que possuía uma escala milimetrada para posicionar os componentes. A lanterna ficou na posição 640 mm, o cavaleiro com íris em 590 mm, o polarizador em 520 mm, a lente convergente plano convexa de 8 dioptrias em 420 mm e a de 4 dioptrias em 200 mm, o filtro polarizador analisador em 130 mm e o medidor em Lux na posição em 60 mm.

Figura 12: Montagem do aparato experimental.

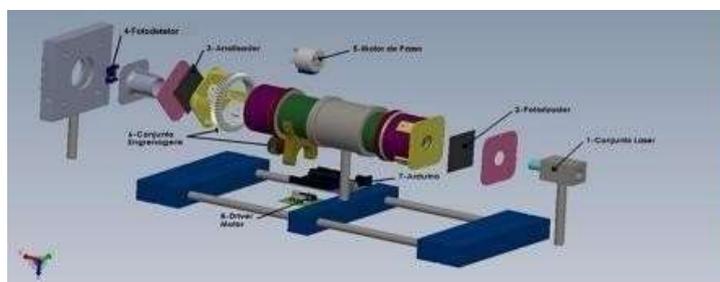


Fonte: autora própria, 2022.

Na montagem, abertura da íris foi de 15 mm, o eixo do primeiro polarizador foi fixado na posição 0° e o segundo polarizador móvel foi sendo girado em 10 e 10 graus, entre 0° a 180° . Para monitorar a intensidade da luz transmitida pelo segundo polarizador usamos um luxímetro. Antes de iniciar a coleta de dados, foram desligadas todas as luzes do laboratório. Em seguida ligamos a lanterna de luz policromática e iniciou-se o experimento e a coleta dos dados (intensidade lida pelo luxímetro vs ângulo de giro do polarizador).

A modo de comparação e para melhor entendermos a metodologia utilizada por Oliveira 2020, a seguir é mostrado o esquema experimental da maquete experimental automatizada para a verificação da lei de Malus. Na Figura (13), é mostrado todos os componentes da maquete experimental automatizada separadamente, e como todos funcionam, primeiramente temos tubo com um polarizador em cada extremidade. O primeiro polarizador (2) é fixo, o segundo polarizador (analisador 3), pode girar com o auxílio de um sistema que contém um motor de passo (5).

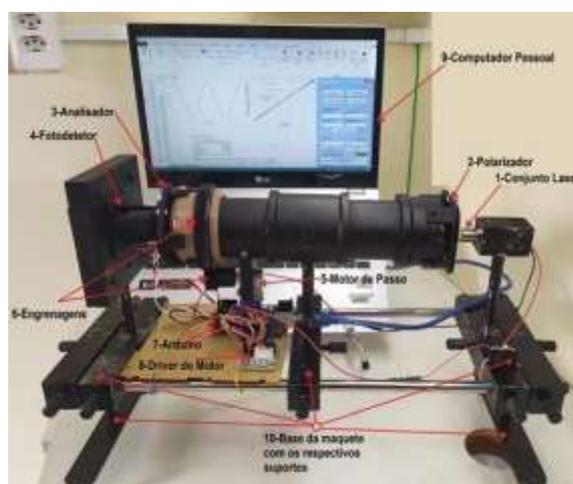
Figura 13: Elementos utilizados na composição da maquete experimental.



Fonte: Oliveira, 2020

Elementos básicos da maquete são: 1–Laser vermelho; 2- Polarizador; 3- Analisador; 4– Fotodetector; 5–Motor de passo; 6–Engrenagens; 7–Arduino Uno; 8–Driver do Motor.

Figura 14: Foto da maquete experimental utilizada para a demonstração da lei de Malusdo trabalho de Oliveira 2020.



Fonte: Oliveira, 2020.

Nesse trabalho foi realizado as duas formas de provar a lei de Malus, e nessa parteserá feito a comparação dos gráficos da independência de intensidade luminosa do ângulo θ , com os dados desse trabalho e do de Oliveira, 2020. Para que esse gráfico da independência de intensidade luminosa do ângulo θ , seja de acordo com a Lei de Malus, é necessário que ocorra uma linearização, ou seja uma reta e com as medidas de I

$I_0 = \cos^2\theta$, que foi formado o gráfico (2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

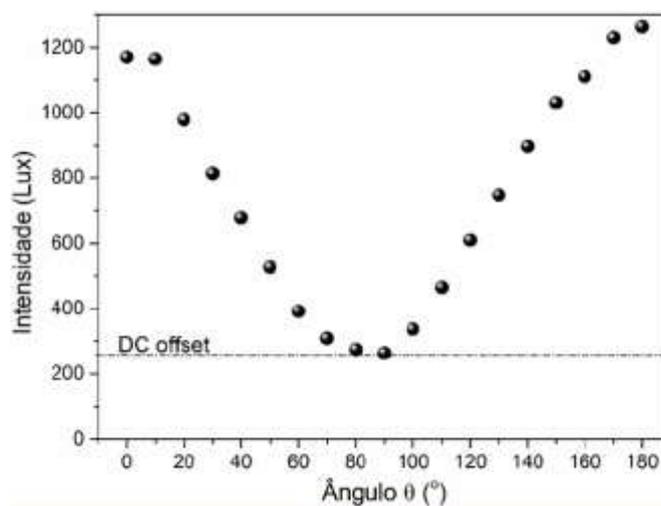
Na tabela 1, apresentamos os valores da intensidade lida no luxímetro versus o ângulo de rotação do segundo polarizador para uma fonte policromática.

Tabela 1: Dados coletados no experimento com ires com abertura de 15 mm.

$\theta(^{\circ})$	$\cos\theta$	$I(\text{lux})$	$\cos^2\theta$	$\frac{I}{I_0}$
0	1	1170	1	1
10	0,98481	1164	0,96985	0,99485
20	0,93969	978	0,88302	0,83586
30	0,86603	813	0,75	0,69485
40	0,76604	677	0,58682	0,57869
50	0,64279	526	0,41318	0,44955
60	0,5	392	0,25	0,33505
70	0,34202	309	0,11698	0,26414
80	0,17365	275	0,03015	0,22566
90	0	264	3,8E-33	0,23505
100	-0,17365	337	0,03015	0,28808
110	-0,34202	465	0,11698	0,39747
120	-0,5	610	0,25	0,52131
130	-0,64279	748	0,41318	0,63939
140	-0,76604	898	0,58682	0,76758
150	-0,86603	1031	0,75	0,88111
160	-0,93969	1110	0,88302	0,94879
170	-0,98481	1230	0,96985	1,05125
180	-1	1263	1	1,07948

Fonte: Autora própria, 2022.

No gráfico 1. Apresentamos um gráfico na intensidade lida no luxímetro versus o ângulo de rotação do segundo polarizador.

Gráfico (1): Intensidade da luz policromática versus ângulo θ do polarizador

Fonte: Autora própria, 2022.

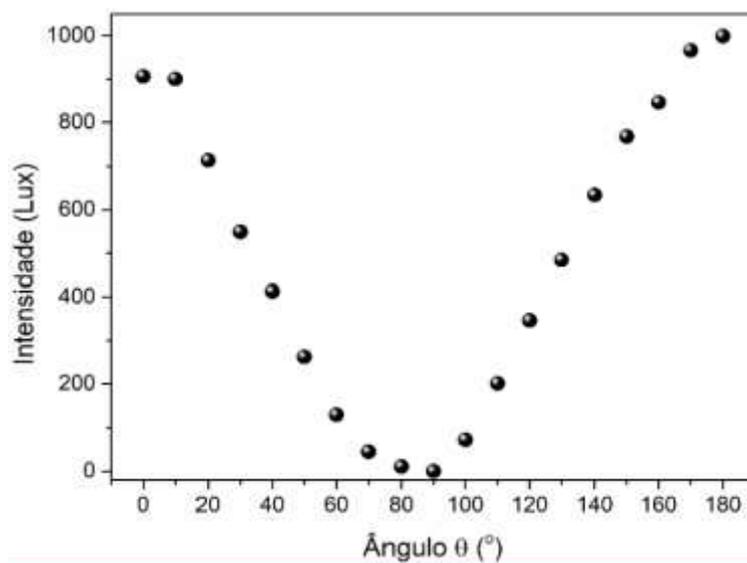
Note que segundo a lei de Malus, eq. (16), a intensidade transmitida quando $\theta = 90^\circ$ deveria ser nula. Nos nossos resultados, observamos que para $\theta = 90^\circ$ a intensidade no luxímetro é 264 lux, associamos esse valor a um sinal de corrente contínua ou *DC Offset* que se soma ao valor real da intensidade transmitida pelo segundo polarizador. O sinal de offset é produzido por luz não polarizada passando através dos filtros polarizadores, indicando que nossos polarizadores estão longe de ser ideais. Na realidade, nenhum filtro polarizador é capaz de filtrar 100% da luz não- polarizada ou 100% da luz polarizada. Por tanto sempre teremos luz indesejada passando a traves dos polarizadores que contribuirá ao aumento do sinal de offset. Considerando que nossos polarizadores não são novos, provavelmente possuem defeitos causados pela manipulação que contribuem à transmissão de luz parasita através deles.

É possível de se perceber que quando o eixo do polarizador está a 0° e 180° temos pontos de intensidade máxima de luz e quando se encontram em 90° não temos a passagem de luz completa, ou seja, o ponto de mais baixa intensidade. Temos os pontos de maior intensidade devido os raios que passam no primeiro polaroide também passam pelo segundo, o que não ocorre para 90° já que os raios incidentes não passaram do primeiro para o segundo em intensidade suficiente.

Para verificar a lei de Malus, foi necessário considerar um offset de 264 lux, ou seja, fizemos a subtração desse valor no eixo vertical da intensidade.

Fazendo isso, observamos que os dados, tanto do gráfico como da tabela, estão de acordo com a lei de Malus, como mostrado no, veja no gráfico 2.

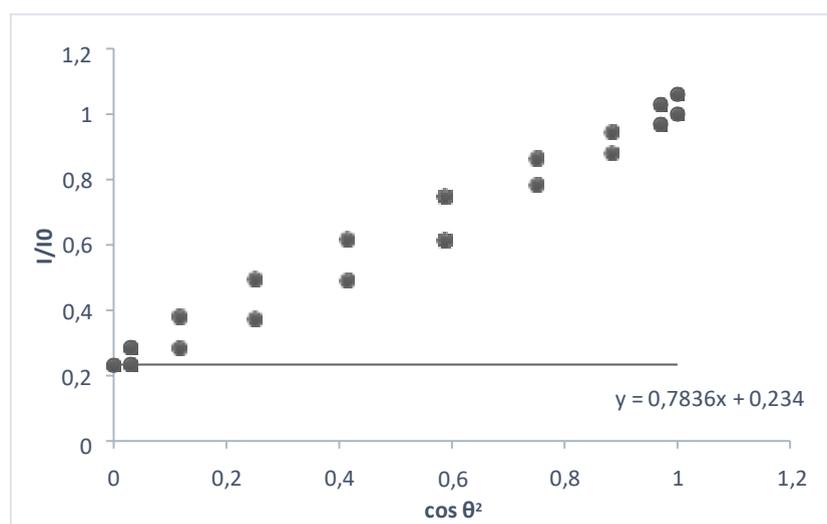
Gráfico (2). Intensidade da luz policromática *versus* ângulo θ do polarizador sem ooffset



Fonte: Autora própria, 2022.

Para obter o valor teórico do sinal de offset realizamos o processo de linearização do gráfico 1, para isso usamos a eq. (15) e os dados das 3ª e 4ª colunas da Tabela 1, resultando no gráfico 3.

Gráfico (3): $\frac{I}{I_0}$ versus $\cos^2\theta$



Fonte: Autora própria, 2022.

A equação resultante da linearização é:

$$y = 0,7836x + 0,234 \quad (17)$$

comparando o ultimo resultado com a eq. (15) obtemos a seguinte equação:

$$\frac{I}{I_0} = 0,7836 \cos^2 \theta + 0,234 \quad (18)$$

Observamos que a razão I/I_0 é proporcional ao quadrado do ângulo θ mais constante. Essa constante está relacionada com o nosso sinal de offset que estamos procurando, sendo assim, temos:

Para $\theta = 90^\circ$, vamos ter que,

$$\frac{I}{I_0} = 0,78 \cos^2 90^\circ + 0,234$$

então,

$$\frac{I}{I_{0 \text{ OFFSET}}} = 0,234.$$

Vamos calcular o valor do offset teórico, onde vamos utilizar o dado experimental de $I_0 = 1170$, então vamos ter que,

$$I_{0 \text{ OFFSET TEÓRICO}} = 1170 \cdot 0,234 = 274 \text{ lux.}$$

Obtemos então um offset teórico igual a 274 lux que é muito próximo do valor obtido em nossa primeira aproximação visual, que foi de 264 lux.

Vamos calcular o erro percentual, entre o valor teórico e nossa aproximação.

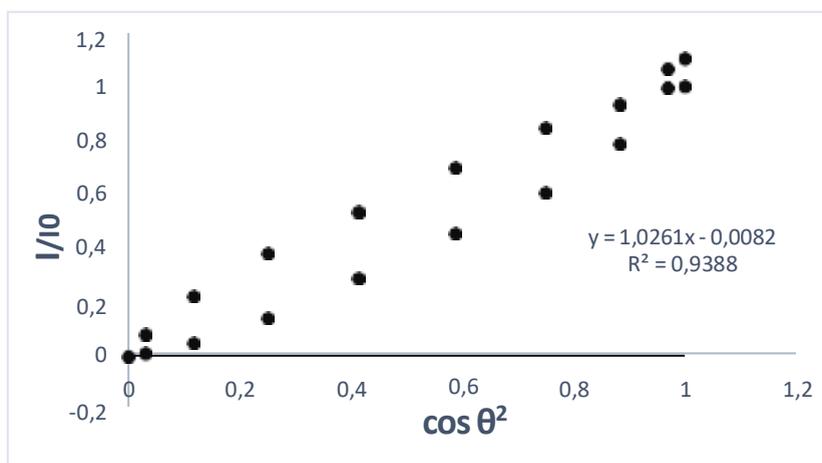
$$e \% = \frac{274 - 264}{274} = 0,4\%$$

O valor obtido é um erro aceitável e podemos considerar o valor de 264 lux como o valor do offset.

O gráfico (3), representa a linearização do gráfico (1). Para a linearização, foi utilizada uma equação para reta do tipo $y = ax+b$, onde o coeficiente $a = 0,7836x$ e o coeficiente $b = 0,234$. A partir do comportamento linear mostrado no gráfico (3) e descrito

matematicamente pela equação (17) conseguimos verificar a lei de Malus. Observamos que o coeficiente $a \neq 1$ e também o coeficiente $b \neq 0$, como esperado teoricamente. A divergência entre os valores esperados pela teoria e os nossos resultados, podem ser explicados pelo sinal de offset e pela influência de outros erros experimentais representados pelas incertezas na determinação do ângulo de rotação do polarizador, pois a mudança de ângulo foi feita manualmente. Também podem ter ocorrido oscilações na escala do luxímetro, defeitos nos polarizadores e outros componentes ópticos. O gráfico (4), representa a linearização com a ausência do offset teórico de 274 lux.

Gráfico (4): $\frac{I}{I_0}$ versus $\cos^2\theta$



Fonte: Autora própria, 2022.

Para obter esse gráfico foi feita uma nova linearização, subtraindo o offset teórico de 274 lux.

O coeficiente de correlação corresponde a 93,88% dos valores calculados na medição, levando de modo direto ao método para verificação da lei de Malus, com os resultados obtidos fica clara a verificação de Malus. equação 15.

Encontrando o erro percentual, vamos ter:

$$e \% = \frac{1 - 1,02261}{1} = 2,6\%$$

Onde esse resultado é tolerável para resultados experimentais.

Nós inferimos que grande parte da luz emitida da fonte laser é polarizada, provavelmente existe um polarizador interno que faz que a luz de nosso laser seja polarizada. Um ponto crucial para que o laser seja polarizado com apenas um polarizador

é que uma fonte monocromática (apenas um tipo de luz em sua composição) e o laser possui essa característica, além de ser uma luz totalmente coerente e de alta intensidade. Não seria possível obter esses resultados caso a luz não fosse monocromática.

Quando o polaroide foi rotacionado entre as angulações de 0 e 180 graus, não foram observadas mudanças na intensidade transmitida da luz policromática, que incidia sobre a cartolina branca. Não importava qual fosse o ângulo girado, o comportamento da luz policromática, ao passar pelo polarizador não mudava visualmente a sua intensidade sobre a cartolina. Variamos, também a separação entre as lentes, ainda sim, não houve mudanças de intensidade. Esse fenômeno ocorre devido a luz policromática não ser uma luz polarizada, então para que haja a polarização é necessário que tenha dois polarizadores com diferentes ângulos.

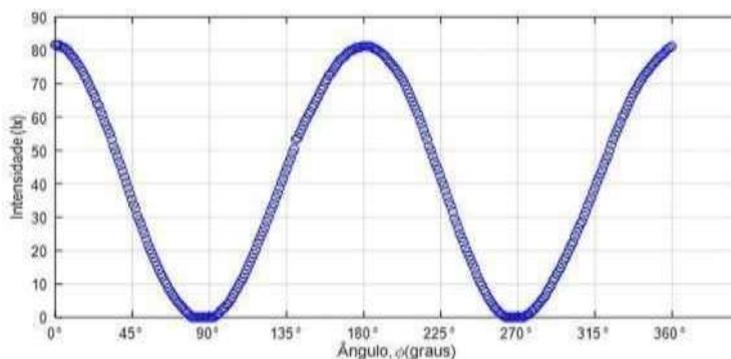
Devido as suas características a fonte luz policromática não pode ser polarizada como a lanterna de laser, com apenas um polarizador. É fundamental que, para ocorrer a polarização a fonte de luminosa obedeça a composição de um laser que é de apenas um comprimento de onda, ou seja com apenas uma cor. Uma vez que luzes que podem conter mais de uma cor em sua composição não possuem coerência e intensidade suficientes para que os cristais do polarizador se alinhem com o raio emissor, dadas as condições em que os feixes de luzes se encontram.

A metodologia usada por Oliveira, 2020 é diferente pois o procedimento experimental é totalmente automatizado, tendo um funcionamento por um sistema computadorizado. Foi usado a plataforma Arduino por ser de baixo custo e de fácil acesso. De acordo com Oliveira 2020, para a realização do funcionamento dessa maquete experimental, foi necessário criar um software que comande a placa Arduino, que tem função de acionar o laser, e ao acionar, essa luminosidade percorra passando pelos dois filtros polarizadores, sendo controlados pelo motor de passo, e assim enviando os valores de intensidade luminosa para o micro-computador. A figura (13) a seguir mostra todo esse procedimento

Quando observamos o gráfico de Oliveira, 2020, pode-se perceber que sua variação do filtro polarizador foi de 360° e quando temos o plano de polarização do polarizador e do analisador paralelos, percebemos uma intensidade maior nos ângulos $\phi = 0^\circ$, 360° ou $\phi = 180^\circ$, e quando esses planos de polarização estão ortogonais, percebe-se

uma intensidade mínima nos ângulos $\phi = 90^\circ$ ou $\phi = 270^\circ$, e tendo uma curva mais satisfatória para lei de Malus.

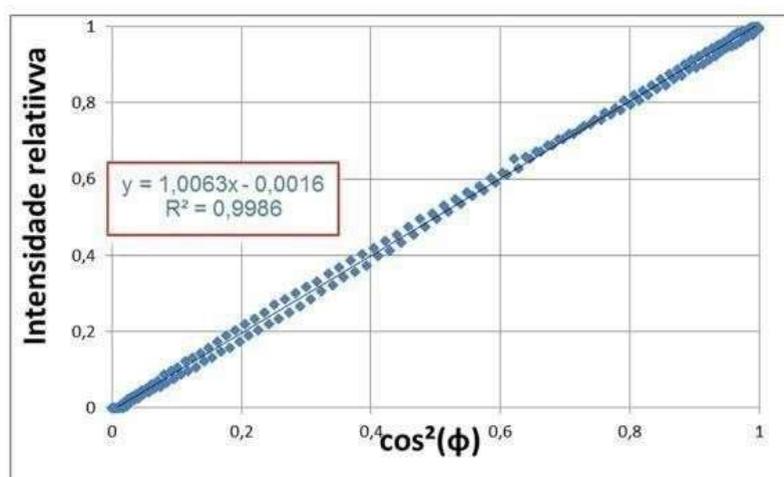
Figura 13: Gráfico da intensidade de luz em função do ângulo.



Fonte: Oliveira, 2020.

No gráfico de Oliveira, 2020 observamos que a sua linearização foi mais precisa, pelo fato de ser um experimento automatizado. A partir do coeficiente de correlação podemos observar um resultado mais próximo da teoria.

Figura 15: Gráfico da dependência $I_{rel} \times \cos^2\phi$.



Fonte: Oliveira, 2020

Ao analisar e comparar os dados podemos concluir que a lei de Malus é válida tanto para uma fonte policromática como para monocromática.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Lei de Malus foi verificada experimentalmente dentro do erro experimental. Desconsiderando o offset ou ruído de fundo, nós observamos uma boa convergência entre teoria e prática. As divergências foram identificadas e associadas a fatores externos se filtrando indesejavelmente na montagem experimental (refiro-me aqui a própria montagem da CIDEPE). Ficou claro que houve uma passagem de luz indesejada quando os polarizadores ficaram ortogonais, pois na teoria a intensidade transmitida quando os polarizadores estão ortogonais deveria ser 0, porém houve uma intensidade mínima ou offset, que foi determinada a partir da linearização do gráfico $I/I_0 = \cos^2\theta$ como sendo de 264 lux. Pôde ser visualizada com bons resultados na experimentação realizada.

Mesmo com esses fatores é possível afirmar que os resultados obtidos são de grande significância e coerência. Ao fazer a comparação dos dados com Oliveira, 2020, percebemos que mesmo tendo um aparato muito inferior, conseguimos valores e comportamento muito similares. No caso da observação do fenômeno da polarização da luz, das fontes policromática e monocromática, podemos identificar que a fonte policromática é diferente da fonte monocromática, onde quando ocorre o fenômeno da polarização da luz, só é possível polarizar a fonte policromática com dois polarizadores com ângulos diferentes.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, Eduardo Ribeiro de *et al.* **Utilização de um espectrógrafo de projeção como uma ferramenta para contagem sobre polarização da luz.** 2010. 1 v. Tese (Doutorado) -Curso de Física, Instituto de Física de São Carlos, São Carlos, 2010.
- GUIMARÃES, Osvaldo. **Física 3.** 1ª ed. São Paulo: Ática, 2013. PENTEADO, Paulo Cersar M. **Física – ciência e tecnologia.** 1ª ed. São Paulo: Moderna, 2005.
- HALLIDAY, David. **Fundamentos de física: ondas eletromagnéticas e óptica física.** 2. ed. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 1995. 304 p. 4 v. Ronaldo Sergio. 1995.
- HALLIDAY, DAVID, 1916-2010 **Fundamentos de física**, volume 2 : **gravitação, ondas e termodinâmica** / David Halliday , Robert Resnick , Jearl Walker ; tradução Ronaldo Sérgio de Biasi – 10. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016. il. ; 28 cm.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALLKER, J. **Física**, Vol. 2v - **Gravitação, Ondas e Termodinâmica.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. b.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física.** 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v.1.
- LACZKOWSKI, I. M. - **Efeito magneto-óptico em mistura binária dopada com ferrofluido** – UEM. Maringá, 2010.
- OLIVEIRA. IVANOR NUNES DE. **Construção de uma maquete experimental automatizada para o estudo da polarização da luz e comprovação experimental da Lei de Malus com o auxílio da plataforma Arduino.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 42, e20200247, 2020.
- PAIVA, Rodrigo de. **Refração da Luz.** In: Revista de Ciência Elementar, v. 2, n.1, p. 1-3, 2014.
- PEREIRA NETO, João Alfredo. **Proposta de ensino de polarização da luz com utilização de TDIC.** 2021. 35 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo de Mourão, 2021. Cap. 1.
- RIBEIRO, Jair Lucio Prados da Silva, e VERDEAUX, Maria de Fátima da Silva. **Atividades experimentais no ensino de óptica:** uma revisão. DF, 2012.
- TIPLER, P. MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros: LTO, Ótica e Física Moderna.** 3ª ed. Rio de Janeiro. LTC, p. 128-146, 2006.