



**UEPB**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**

**CAMPUS VIII**

**CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE**

**DEPARTAMENTO FÍSICA**

**CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

**MÔNICA PAULINO DE ANDRADE**

**A POLARIZAÇÃO DA LUZ: UM ESTUDO DESTES FENÔMENOS ATRAVÉS DA LEI DE  
MALUS, UTILIZANDO FERRAMENTAS EXPERIMENTAIS DO LABORATÓRIO DE  
ÓTICA FÍSICA.**

**ARARUNA-PB**

**2021**

MÔNICA PAULINO DE ANDRADE

A POLARIZAÇÃO DA LUZ: UM ESTUDO DESTE FENÔMENO ATRAVÉS DA LEI DE MALUS, UTILIZANDO FERRAMENTAS EXPERIMENTAIS DO LABORATÓRIO DE ÓTICA FÍSICA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Departamento do Curso 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 Cesar Soares Xavier.

ARARUNA - PB

2021

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.

A553p Andrade, Monica Paulino de.

A polarização da luz [manuscrito] : um estudo deste fenômeno através da lei de Malus, utilizando ferramentas experimentais do laboratório de ótica física. / Monica Paulino de Andrade. - 2021.

26 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2021.

"Orientação : Prof. Dr. Mário Cesar Soares Xavier ,  
Coordenação do Curso de Licenciatura em Física - CCTS."

1. Luz. 2. Onda eletromagnéticas. 3. Fenômeno físico. I.

Título

21. ed. CDD 535

MÔNICA PAULINO DE ANDRADE

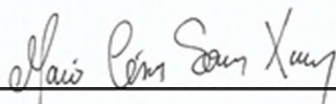
A POLARIZAÇÃO DA LUZ: UM ESTUDO DESTE FENÔMENO ATRAVÉS DA LEI DE MALUS, UTILIZANDO FERRAMENTAS EXPERIMENTAIS DO LABORATÓRIO DE ÓTICA FÍSICA.

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Departamento do Curso Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Graduada em Licenciatura em Física.

Área de concentração: Física.

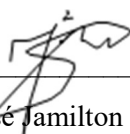
Aprovada em: 20/ 07 / 2021.

**BANCA EXAMINADORA**



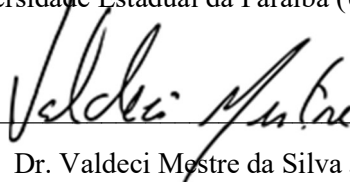
Prof. Dr. Mário Cesar Soares Xavier (Orientador)

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Valdeci Mestre da Silva Júnior

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2. PROPAGAÇÃO DA LUZ.....</b>	<b>8</b>
2.1 Lei da Refração e da Reflexão.....	10
2.2 Transporte de energia e o vetor de Poynting .....	11
<b>3. POLARIZAÇÃO DA LUZ.....</b>	<b>12</b>
3.1 Estudo sobre o Filtro polarizador da luz.....	13
3.2 Polarização da Luz Linear .....	14
3.3 Intensidade da Luz Polarizada Transmitida.....	15
3.4 Polarização por absorção .....	15
3.5 Lei de Malus .....	16
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>17</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>20</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>23</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>24</b>

**A POLARIZAÇÃO DA LUZ: UM ESTUDO DESTE FENÔMENO ATRAVÉS DA LEI DE MALUS, UTILIZANDO FERRAMENTAS EXPERIMENTAIS DO LABORATÓRIO DE ÓTICA FÍSICA.**

**THE POLARIZATION OF LIGHT: A STUDY OF THIS PHENOMENON THROUGH THE MALUS LAW, USING EXPERIMENTAL TOOLS FROM THE PHYSICAL OPTICS LABORATORY.**

Mônica Paulino de Andrade\*

**RESUMO**

Vivemos diariamente conectados através de aparelhos celulares, rádio e televisão, mas não associamos esses aparelhos a fenômenos físicos, tais como as ondas eletromagnéticas. Além das ondas eletromagnéticas, outro fenômeno pode ser encontrado nestes aparelhos, que é justamente os polarizadores, são responsáveis por filtrar partes dessas ondas eletromagnéticas. A polarização é feita através de um filtro polarizador (película com longas moléculas alinhadas em uma determinada direção) podendo também ser encontrada em algumas lentes de óculos escuros, no qual diminuem a intensidade da luz que chega até nossos olhos. A polarização da luz também é um fenômeno natural, que ocorre todos os dias e não percebemos, através da luz emitida pelo sol, que se espalhada pela atmosfera terrestre ou é refletida na superfície de um lago, de uma lâmina de vidro ou em qualquer outra superfície não condutora, por exemplo (CARDOSO,2019). Este trabalho é de caráter experimental, tendo como objetivo demonstrar os fatores que influenciam na polarização da luz, demonstrar que a fonte de luz policromática não é polarizada, além de relacionar a intensidade da luz que atravessa dois polarizadores com o ângulo relativo entre eles, para enunciar a lei de Malus.

**Palavras-chave:** Polarização da Luz. Lei de Malus. Onda eletromagnéticas. Luz Policromática.

**ABSTRACT**

We live daily connected through cell phones, radio and television, but we do not associate these devices with physical phenomena, such as electromagnetic waves. In addition to electromagnetic waves, another phenomenon can be found in these devices, which is precisely the polarizers, which are responsible for filtering parts of these electromagnetic waves. Polarization is done through a polarizing filter (film with long molecules aligned in a certain direction) and can also be found in some sunglasses lenses, which reduce the intensity of light that reaches our eyes. The polarization of light is also a natural phenomenon, which occurs every day and we do not notice, through the light emitted by the sun, that it spreads through the Earth's atmosphere or is reflected on the surface of a lake, a sheet of glass or any other non-conductive surface, for example

---

\* [monicapaulinodeandrade@gmail.com](mailto:monicapaulinodeandrade@gmail.com)

(CARDOSO, 2019). This work is experimental in nature, aiming to demonstrate the factors that influence the polarization of light, demonstrate that the polychromatic light source is not polarized, and relate the intensity of light that passes through two polarizers with the relative angle between them, to enunciate the law of Malus.

**Keywords:** Polarization of Light. Malus' Law. Electromagnetic waves. Polychromatic Light.

## 1. INTRODUÇÃO

A natureza da luz vem sendo estudada desde a Antiguidade, onde alguns filósofos gregos acreditavam que a luz era formada por pequenas partículas. “O filósofo grego Aristóteles (384 – 322 a.C.) foi a primeira pessoa, que se tem notícia, a adotar a natureza ondulatória da luz” (PASSOS, 2013). Essa teoria foi pertinente durante muito tempo, apenas no século XVII surgiu a teoria corpuscular que foi defendida por Newton e o modelo ondulatório da luz por Christian Huygens.

A teoria corpuscular constitui-se na luz como uma partícula discreta, que descreve uma trajetória em linha reta, com velocidade limitada. Onde, no estudo da polarização da luz, a teoria corpuscular não é conciliável. No entanto a teoria defendida por Christiaan Huygens, conhecida por teoria ondulatória, onde considera a luz como uma onda tem sido apoiada pelo modelo de polarização da luz. (OLIVEIRA, 2020)

Após a formulações destas duas teorias, o físico Thomas Young, que é bastante conhecido pelo seu experimento de fendas duplas, conseguiu medir o comprimento de onda, mostrando a existência de fenômenos óticos que na teoria corpuscular não se aplicava. Posteriormente, o físico francês Augustin Jean Fresnel explicou a propagação retilínea da luz e os efeitos de difração através da luz como uma onda. Outro contribuinte para formulação da natureza da luz foi Michael Faraday um físico realizou estudos sobre o eletromagnetismo, o qual formulou o efeito Faraday, demonstrando a relação de ondas de luz e o eletromagnetismo, ocorrendo o processo de polarização através da relação de eletricidade e o magnetismo, processo este demonstrado a partir de um pedaço de vidro grosso e um eletroímã em formato de ferradura, desta forma a luz que passa pelo vidro tem seu plano de polarização modificada pelo campo magnético.

A partir disto Maxwell contribui para mostrar que os raios luminosos que se propagam no espaço de campos elétricos e magnéticos são uma área do eletromagnetismo. Mostrando que campos elétricos e magnéticos se propagam com a velocidade da luz.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1)$$

Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo e  $\mu_0$  é a permeabilidade no vácuo.

A luz é uma onda eletromagnética, na qual sua frequência se encontra no espectro visível ao olho humano, sendo esta portadora de ondas eletromagnéticas com maiores e menores frequências, as que possuem maiores frequências chamamos de infravermelho e as menores são as ultravioletas.

Neste trabalho iremos abordar fenômenos relacionados a polarização da luz linear, que vem sendo de grande contribuição para a sociedade, presentes em aparelhos que são utilizados diariamente como já foi citado, óculos escuros, aparelhos celulares, televisões

e entre outros. Tendo como objetivo estudar este fenômeno e provar experimentalmente a lei de Malus.

Utilizaremos como referencial o trabalho realizado por Oliveira em 2020, que provou a lei de Malus através da montagem de uma maquete experimental eletrônica com polarizadores.

Para compreendermos o fenômeno da polarização é importante que saibamos que a luz se propaga apenas em uma direção, mas, oscila em infinitas direções perpendiculares ao eixo de propagação. Baseado na lei de Malus demonstraremos experimental a sua teoria.

## 2. PROPAGAÇÃO DA LUZ

A luz, por ser uma onda eletromagnética, se propaga com a maior velocidade possível, não existindo nada, até os dias atuais, que se compare a ela. Se propagando mais rapidamente no vácuo, com uma velocidade de aproximadamente  $3 \cdot 10^8$  m/s. Existem alguns meios nos quais podemos observar a propagação da luz, quando ela muda de meio consequentemente temos uma alteração na sua velocidade, podendo assim, se propagar em meios translúcidos onde a luz consegue atravessar esse meio, mas que, por ser um meio irregular, não podemos observar com nitidez. Outro meio de propagação é o meio transparente, onde a luz se propaga em linha reta e podemos observá-la de forma nítida, o meio transparente pode ser, por exemplo o vácuo e um outro meio de propagação seria um meio opaco, em que a luz não consegue atravessar este meio. Sendo assim, em meios homogêneos e transparentes a luz se propaga em linha reta. No qual, os meios homogêneos são meios em que apresentam as mesmas características em qualquer elemento de volume.

Sabemos que a luz é composta de partículas que se propagam retilineamente. Este princípio pode ser comprovado de maneira sucinta. As ondas eletromagnéticas se propagam com um determinado comprimento e com uma determinada frequência, sendo assim temos:

$$c = \lambda f \quad (2)$$

Os campos elétricos e magnéticos são perpendiculares à direção de propagação. E além das ondas serem perpendiculares a direção de propagação, as ondas magnéticas e elétricas são perpendiculares entre si, como podemos observar na figura 1. No qual, o produto vetorial entre os dois campos aponta no sentido que a onda se propaga, onde estes campos variam de acordo com a frequência. Podemos representar estes campos a partir das funções senoidais.

$$E = E_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad (3)$$

A velocidade de propagação da luz no vácuo é dada por:

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

As ondas eletromagnéticas se propagam no espaço, representada por:



$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_m \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}) \quad (5)$$

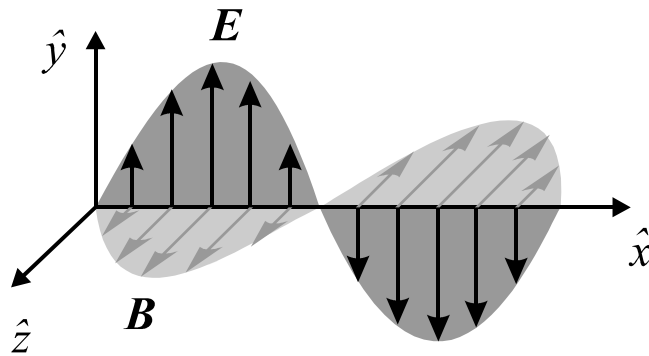
$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_m \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}) \quad (6)$$

As amplitudes dos campos elétricos e magnéticos é dado por  $E_0$  e  $B_0$  respectivamente,  $\omega$  trata-se da frequência de fase e o  $k$  o vetor de onda. Portanto  $(\omega t - \vec{k}\vec{r})$  é a fase da onda. O vetor onda é dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

A figura abaixo mostra uma onda eletromagnética se propagando no eixo  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  e  $\hat{z}$ .

**Figura 1 – Ondas eletromagnéticas**



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

De acordo com a 3ª equação de Maxwell, temos que:

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = \frac{\partial E_y(x, t) \hat{z}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

Escrevendo as Derivada Parciais, temos:

$$\frac{\partial E_y(x, t)}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (9)$$

Tomando a derivada parcial do campo elétrico representado na equação (5) e do campo magnético na equação (6), obtemos:

$$\frac{\partial E_y(x, t)}{\partial x} = k E_m \cos(kx - \omega t) \quad (10)$$

$$\frac{\partial B_z(x, t)}{\partial t} = \omega B_m \cos(kx - \omega t) \quad (11)$$

Igualando as equações (10) e (11), pode-se afirmar que toda onda eletromagnética se propaga no vácuo com a mesma velocidade  $c$ . Logo,

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad (12)$$

## 2.1 Lei da Refração e da Reflexão

Quando uma luz incide em um meio qualquer e o raio muda sua direção de propagação e ocorre a velocidade da luz de acordo com o meio de propagação chamamos este processo de refração. No entanto, se a luz for incidida perpendicular à superfície a luz não sofrerá desvio (PAIVA,2014). A lei da refração é dividida em duas: A primeira lei diz que o raio de incidência, o refratado e a normal pertencem ao mesmo plano, já a segunda lei é conhecida como Lei de Snell, esta lei diz que temos dois ângulos, o ângulo  $\theta_2$  e  $\theta_1$  que estão em relação a reta normal, desta maneira o ângulo de incidência e de refração satisfazem a seguinte equação. (PAIVA, 2014)

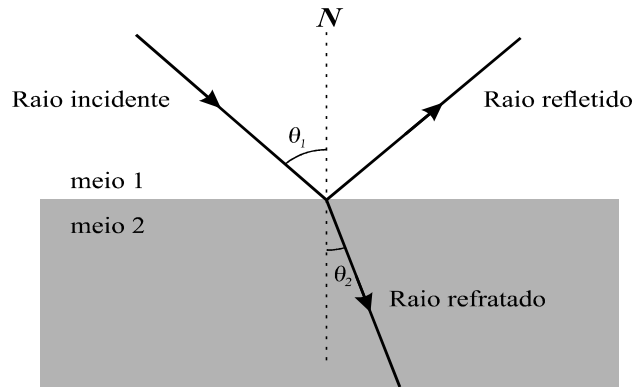
$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (13)$$

Na equação (14) nos referimos a índice de refração, que é a velocidade da luz pela velocidade do meio de propagação das ondas, onde o menor índice de refração do ar corresponde a aproximadamente 1. Desta forma, pode-se dizer que o índice de refração do meio é proporcional a velocidade com que a luz consegue atravessar o meio.

$$n = \frac{c}{v} \quad (14)$$

Na maioria das vezes quando ocorre o processo de refração temos a reflexão, parte da luz incidida refrata e parte é refletida, com o mesmo ângulo de incidência da luz em relação a reta normal. Em suma, o processo de reflexão ocorre quando uma luz está no meio  $n_1$  e incide sobre um determinado meio  $n_2$ , no qual ao incidir no  $n_1$  ela volta para o meio de origem, ocorrendo assim, a mudança de direção da luz, refletindo apenas em uma direção. Outra forma possível de reflexão da luz é a incidência em uma superfície irregular, onde a luz é refletida em várias direções. É importante que saibamos que o ângulo de incidência  $\theta$  é igual ao de reflexão  $\theta'$ , ambos em relação a reta normal. Sendo assim,  $\theta = \theta'$

**Figura 2** – Processo de reflexão e refração



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

## 2.2 Transporte de energia e o vetor de Poynting

**John Henry Poynting** (1852-1914) foi o físico inglês, ele publicou o seu trabalho sobre transporte de energia eletromagnética, conhecida como vetor de Poynting, que é definida pelo fluxo de energia, este fluxo a quantidade de energia transferida por unidade de área. Sendo definido por:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (15)$$

Como o vetor do campo elétrico e do campo magnético são perpendiculares em uma onda eletromagnética, o módulo da equação de Poynting resultará no produto vetorial desses dois campos.

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB \quad (16)$$

Portanto, a quantidade de energia transporta por uma onda através de uma área é dado pela quantidade de energia que flui durante um intervalo de tempo em uma determinada área  $s = \frac{E}{\nabla t \cdot A}$ , sendo que a energia sobre o tempo é justamente a potência, resultando em:

$$S = \frac{\text{potência}}{\text{área}} \quad (17)$$

Visto que a razão do campo elétrico pelo campo magnético nos dar a velocidade de propagação da luz. Logo o fluxo instantâneo de energia será:

$$S = \frac{1}{\mu_0} \frac{E^2}{c} \quad (18)$$

Diante disto, podemos determinar o fluxo médio, levando em consideração  $\text{sen}^2\theta$  é para qualquer variável angular  $\frac{1}{2}$ , teremos que a intensidade corresponde a equação abaixo:

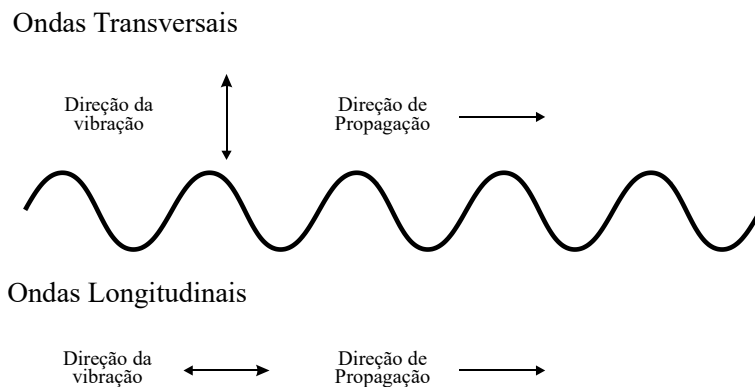
$$I = \frac{1}{\mu_0 c} E_{rms}^2 \quad (19)$$

### 3. POLARIZAÇÃO DA LUZ

A polarização da luz é uma das propriedades das ondas eletromagnéticas, a partir dela podemos encontrar diversas aplicações no nosso cotidiano, como as televisões que possuem tela 3D, celulares, lentes de câmeras fotográficas e até mesmo os óculos escuros com lentes polaroides. Podemos assim, encontrar diversos equipamentos que possuem eixos de polarização, sendo que se variarmos o estado de polarização é possível maximizar ou minimizar a potência entregue a determinados equipamentos. (CALLIARI, 2014).

As únicas ondas eletromagnéticas que podem ser polarizadas são as transversais, as quais vibram em uma direção perpendicular à direção de propagação. A figura 3 mostra esses dois tipos de ondas: as ondas longitudinais e transversais.

**Figura 3** – Ondas transversais e ondas longitudinais



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021

É importante salientar que não são todas as luzes que podem ser polarizadas, as ondas longitudinais são ondas que oscilam no mesmo sentido que se propagam, não importando o sentido do filtro polarizador, pois a luz sempre consegue ultrapassá-lo, posto isto, as ondas longitudinais não podem ser polarizadas.

Os óculos de sol que possuem lentes polarizadoras, nos quais, diminuem a intensidade da luz que chega até nossos olhos. É importante enfatizar que não são todas as lentes de óculos escuros que são polarizadas, existe outro tipo de matéria que funciona através de absorção de algumas cores, ou seja, absorve determinadas frequências de cores permitindo que apenas uma parcela destas chegue até seus olhos.

Mediante disto, a polarização da Luz pode ser obtida através de quatro fenômenos de ondas não polarizadas: absorção, espalhamento, reflexão e birrefringência (conhecida como dupla refração) (JUNIOR, 2015).

A polarização por absorção é feita através de matérias que permitem a passagem de luz em uma única direção de propagação, a polarização por espalhamento é demonstrada através do azul do céu, de forma que a luz do sol, ao incidir na atmosfera terrestre, irá interagir com as moléculas de N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, produzindo luz espalhada que se propagam na direção do solo, só que com um ângulo bem maior que o de incidência. Por isso, quando olhamos para o céu, a luz que atinge nossos olhos é a luz espalhada pela atmosfera, com

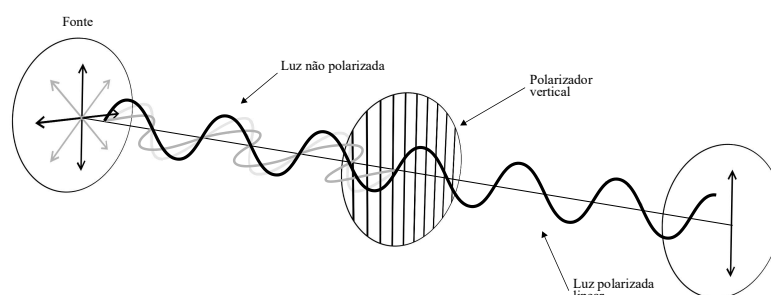
exceção daquela que vem diretamente do Sol, significando que sem a atmosfera o céu seria escuro durante o dia. (CARNEIRO, 2019)

Já a polarização por reflexão é defendida por Brewster, sua teoria diz que um raio que incide numa superfície plana formando um ângulo de  $90^\circ$  a soma do ângulo raio o refratado, ocorrerá o processo de polarização total, onde a luz refratada será parcialmente polarizada e a refletida totalmente polarizada. Outro meio possível de polarização da luz por birrefringência, este material possui diferentes índices de refração, ocasionando dupla refração, um material que possui índices de refração diferente é o cristal de calcita, que é a base cálcio.

### 3.1 Estudo sobre o Filtro polarizador da luz

O filtro polarizador foi desenvolvido pelo físico Edwin Land ainda quando era universitário. O filtro polarizador trata-se de uma folha plástica que contém longas moléculas em seu processo de fabricação e são esticadas para que as moléculas se alinhem, sendo assim, quando a luz passa pela folha com ondas que oscilam paralelas às moléculas, a luz atravessa o filtro sem alteração, contudo as que oscila perpendicularmente são absorvidas.

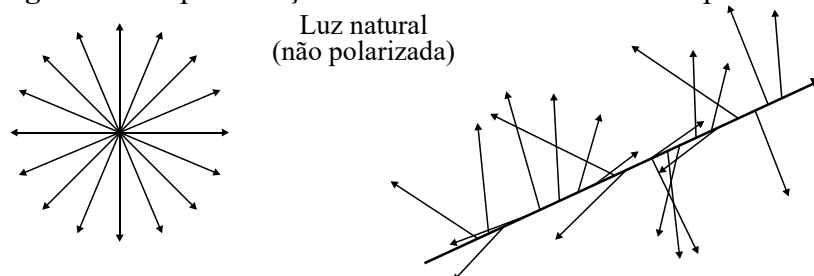
**Figura 4** – Fonte de luz não polarizada passando pelo filtro polarizador



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

É importante reafirmar que uma luz polarizada oscila apenas em uma direção, a polarização de uma luz não polarizada, ou seja, uma luz que oscila em várias direções, ocorre através de um filtro polarizador, no qual, a luz que oscilava em várias direções ao passar pelo filtro polarizador, irá oscilar apenas na direção de alinhamento das moléculas do filtro de polarização.

**Figura 5** – Representações de uma onda luminosa não polarizada



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Além disso, existem alguns materiais presentes na natureza e no nosso cotidiano que podem fazer o papel de um filtro polarizador, por exemplo, a água, nela a luz atinge sua superfície e reflete com o mesmo ângulo de incidência em relação a normal, só que ao atingir a superfície da água a sua intensidade diminui, passando a se propagar apenas em um sentido.

### 3.2 Polarização da Luz Linear

No processo de luz linearmente polarizada a luz oscila em uma única direção, oscilando apenas na direção de um eixo, ou seja, se ela oscila no eixo z ela estará polarizada neste eixo e assim sucessivamente. Dessa forma, sua direção do campo elétrico não varia, apenas a sua intensidade pode variar. De acordo com a equação (3) podemos representar as ondas polarizadas linearmente da seguinte forma:

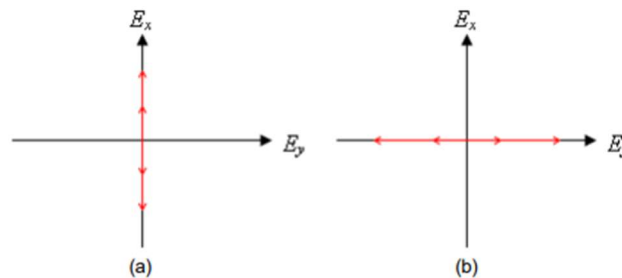
$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \cos(kx - \omega t) \hat{x} \quad (20)$$

$$\vec{E}(z, t) = E_{0y} \cos(kx - \omega t + \phi) \hat{y} \quad (21)$$

A cada instante de tempo, o módulo do vetor campo Elétrico (E) varia harmonicamente sempre na direção do eixo x. A polarização é dita linear na direção x. Um outro caso muito semelhante é obtido se a componente  $E_{0x} = 0$ , sendo chamada de polarização linear na direção y. (SILVA, 2016, p.8)

Como podemos observar nas figuras abaixo:

**Figura 6** – Polarização linear na direção (a) x e (b) y



Fonte: Silva, 2016.

Onde,

$$\phi = n2\pi \quad (22)$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Sendo que,  $\theta = kz - \omega t$ . Portanto  $\cos(\theta + n2\pi) = \cos\theta$ . Com isso, teremos que:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \cos(kz - \omega t) \quad (23)$$

Existe diversas forma de polarização da luz, aqui neste trabalho iremos trabalhar com polarização linear. Para isto, vamos compreender a intensidade da luz polarizada.

### 3.3 Intensidade da Luz Polarizada Transmitida

A intensidade luminosa é a quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa podendo ser medida em laboratórios através de um medidor de intensidade da luz (multímetro). No qual, a luz possui uma determinada intensidade e se propaga numa determinada frequência, no qual, se propaga em determinadas direções ou apenas em uma única direção, sendo assim, entende-se que a luz que se propaga em várias direções, é uma luz não polarizada e a que se propaga apenas em uma é luz polarizada.

Segundo Oliveira (2020, p.3) a intensidade é proporcional ao quadrado do módulo da intensidade do campo elétrico, então, medindo-se a intensidade da luz polarizada linearmente, que passa através de um polarizador, pode-se comprovar a lei de Malus:

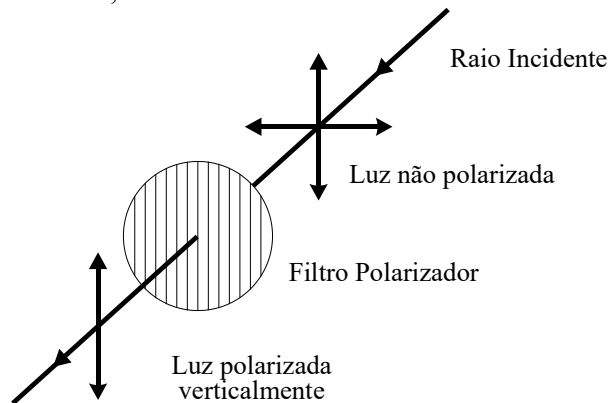
$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (24)$$

Onde  $I$  é a intensidade final e  $I_0$  inicial do feixe de luz.. Existe uma regra que só é válida para luz não-polarizada que incide em um filtro polarizador, esta é chamada de regra da metade. Considerando um campo magnético que oscila em todas as direções, como mostra a figura 7, passando por um filtro polarizador alinhado na direção vertical, apenas as ondas que oscilam na vertical irá passar, as outras ondas serão absorvidas, com isso metade da intensidade  $I_0$  da onda original é perdida. Portanto, temos que a regra da metade é regida pela equação (25):

$$I = \frac{1}{2} I_0 \quad (25)$$

Esta regra só é válida se a luz que incide no filtro polarizador é não-polarizada, como dito anteriormente.

**Figura 7** – Luz não-polarizada atravessando um polarizador. As componentes do eixo z foram absorvidas, com isso metade de sua intensidade foi perdida



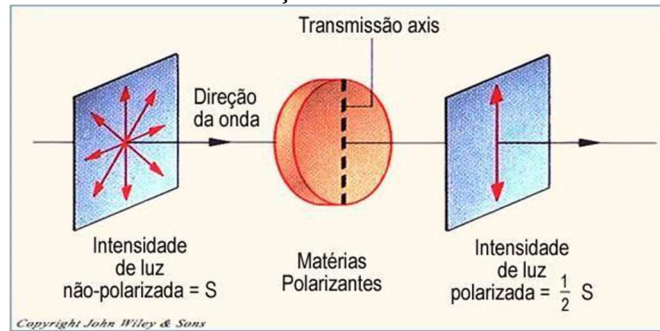
Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

### 3.4 Polarização por absorção

A polarização por absorção funciona através de um filtro inventado em 1938 por E. H. Land, já citado anteriormente, é utilizado para sua criação dos filtros possui moléculas de hidrocarboneto que são alinhados quando esticados em uma determinada direção, absorvendo a luz que oscila em direção perpendicular à de seus filamentos. Estas longas cadeias de moléculas de hidrocarboneto tornam-se condutoras em frequências ópticas quando a lâmina é mergulhada em uma solução contendo iodo. Quando a luz incide com

seu vetor campo elétrico paralelo às cadeias, correntes elétricas são geradas ao longo das cadeias e a energia da luz é absorvida como podemos observar na figura abaixo. (JUNIOR, 2015)

**Figura 8**– Luz não polarizada incidindo sobre um material polarizante e posteriormente observamos a redução da intensidade luminosa



Fonte:Junior,2015.

Na figura 8 temos um feixe de luz não polarizada que incide sobre uma placa polarizadora que possui filamentos alinhados na direção vertical, após essa luz não polarizada passar por essa placa polarizadora que também a conhecemos ela como polaroide, a luz passa a ser polarizada linearmente na direção do alinhamento das moléculas do filtro polarizador, ou seja, polarizada na direção vertical.

### 3.5 Lei de Malus

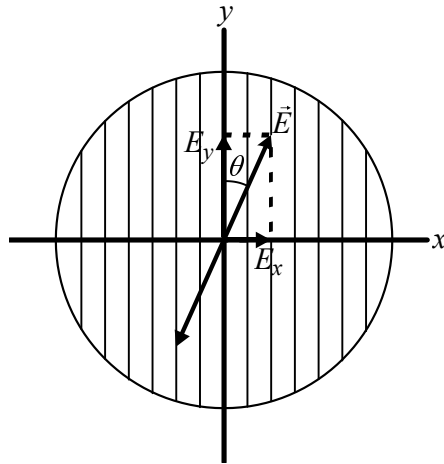
O observador Etienne Louis Malus viveu entre 1775 e 1812, foi oficial do exército, físico e matemático francês. Em 1810 ele tornou-se membro da Academia Francesa de Estudo de Ciências. No qual, o seu trabalho de pesquisa tinha como ênfase o estudo da luz, teve seu trabalho sobre polarização da Luz por reflexão, publicado em 1809, logo após, em 1810 publicou a teoria da dupla reflexão em cristais.

Vamos supor agora que a luz que incide em um filtro polarizador seja polarizada (nesta situação o filtro polarizador funciona como analisador), como, por exemplo um laser. A Figura 9 mostra um filtro polarizador no plano do papel e o campo elétrico  $\mathbf{E}$  (aqui estou utilizando o termo em negrito para representar notação vetorial) de uma onda polarizada antes de passar pelo filtro polarizador, podemos separar o campo  $\mathbf{E}$  em componentes em relação à direção do filtro de polarização do filtro: a componente  $\mathbf{E}_y$ , que é transmitida pelo filtro, e a componente perpendicular  $\mathbf{E}_z$ , que é absorvida. Como  $\mathbf{E}_y$  é a componente perpendicular ao campo  $\mathbf{E}$ , então podemos concluir a seguinte relação:

$$E_y = E \cos\theta \quad (26)$$

**Figura 9** – Luz polarizada prestes a atravessar um filtro polarizador





Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Estamos examinando a intensidade  $I$  da onda emergente que é proporcional a  $E_y^2$  e a intensidade  $I_0$  da onda original é proporcional a  $E_2$ , Assim de acordo com equação intensidade,  $\frac{I}{I_0} = \cos^2 \alpha$ , portanto:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (27)$$

Em outras palavras podemos dizer que a intensidade da onda eletromagnética é proporcional à intensidade inicial e ao cosseno ao quadrado do ângulo formado entre as componentes do campo elétrico de a direção do analisador, se o ângulo entre eles forem  $0^\circ$  a intensidade é máxima, se o ângulo for  $90^\circ$  a intensidade é nula.

Se diferente do caso anterior, a luz for não polarizada, basta adicionar outro filtro polarizador, um terá a função de polarizar a luz não polarizada e o outro a função de analisador.

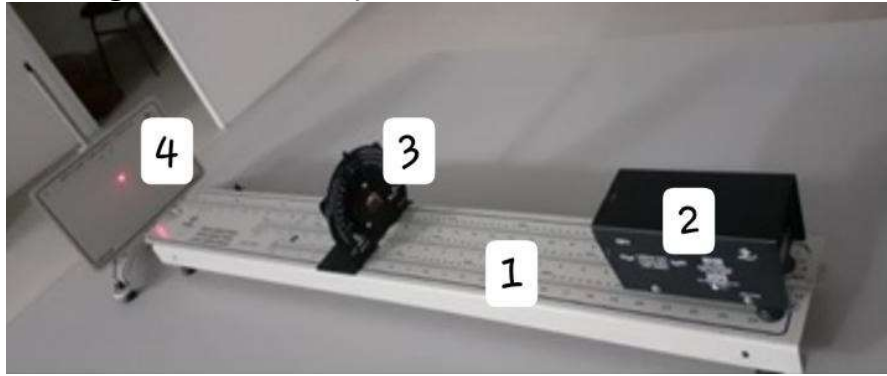
#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento de polarização da luz a seguir foi realizado no laboratório de física experimental IV, da Universidade Estadual da Paraíba, Campus VIII de Araruna, sendo disponibilizados os seguintes materiais:

- 1 Banco Óptico Linear
- 2 Lanterna Laser
- 3 Polaróide giratório
- 4 Aparato

Posicionamos a lanterna laser de diodo e o polaróide no banco óptico linear que é utilizamos para posicionarmos os equipamentos, foi possível observar que ao girar o eixo do polaróide quão mais próximo se aproxima de  $90^\circ$  graus a intensidade da luminosa vai diminuindo, ao ultrapassar os  $90^\circ$  graus ela vai aumentando novamente.

**Figura 10** – Observação da intensidade luminosa do laser



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

Como já vimos, o Polaroid ou filtro polarizador tem a função de polarizar o feixe de luz que passa por ele, o seu eixo de polarização é móvel sendo possível a alteração do ângulo de polarização. O quarto equipamento que é o aparato foi utilizado para analisar o feixe de luz ao passar no Polaroid e o primeiro foi o banco óptico utilizado para apoiar os instrumentos.

Na segunda etapa do experimento substituí a lanterna de laser pela lanterna policromática, acrescentamos também um medidor de intensidade luminosa. Quando a luz da lanterna policromática ao incidir no polaroide e chegou ao anteparo observou-se que não ocorreu variação na intensidade da luz, ou seja, não ocorreu polarização.

Na terceira etapa do experimento utilizamos os seguintes materiais:

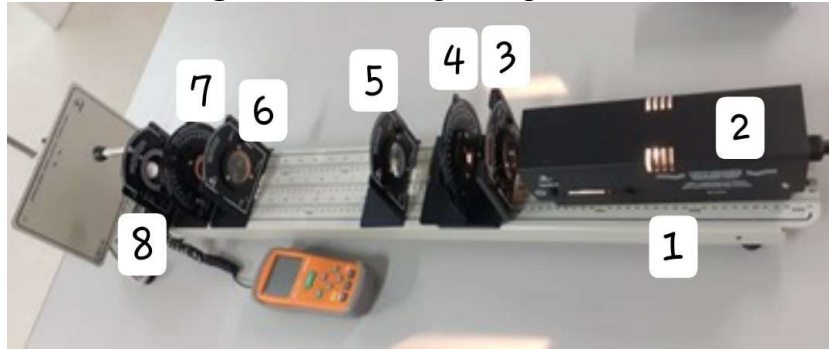
- 1 Banco óptico
- 2 Lanterna policromática
- 3 Íris
- 4 e 7 2 Polarizadores
- 5 Lente plano convexa 8di
- 6 Lente plano convexa 4di
- 8 Medidor de intensidade luminosa (lux)

O objetivo foi identificar os fatores que influenciam a polarização da luz, reconhecer que grande parte da luz emitida por um laser é polarizada, o laser de diodo emite um feixe de luz possui um comprimento de onda de 810nm, já a luz policromática é uma fonte luz que se propaga em várias direções sendo esta não é polarizada, além de observar a variação da intensidade da luz com a angulação dos polaroides girantes.

É importante enfatizar que a íris concentra o feixe da luz policromática, a lanterna policromática é uma luz eletromagnética não polarizada que se propaga em várias direções. Os dois polarizadores utilizados, um tem o papel de analisar a polarização e o outro de polarizar.

Para dar início ao experimento realizamos o processo de montagem com uma fonte de luz policromática na posição de 640 mm do barramento para banco óptico; um cavaleiro com íris na posição de 590 mm; o filtro polaroide girante com a função de polarizador na posição de 520 mm; uma lente convergente de plano convexa de 8 dioptrias em 450 mm; uma lente convergente de plano convexa de 4 dioptrias em 200 mm; um polaroide girante com a função de analisador na posição 130 mm; e um medidor de intensidade luminosa (Lux) na posição de 60 mm. Toda a estrutura pode ser observada na imagem abaixo:

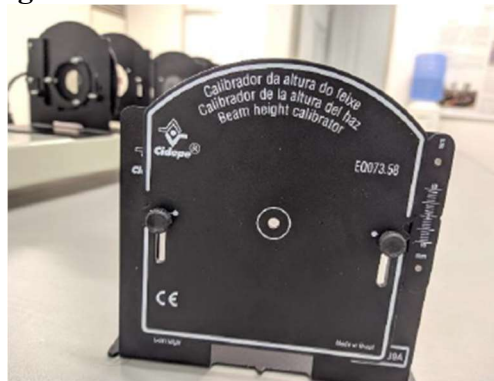
**Figura 11** – Montagem experimental



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

O procedimento inicial foi ligar a fonte de luz policromática e posicionar os dois polaroides (o polaroide e o analisador) na posição marcada em  $0^\circ$ , a íris foi ajustada para uma abertura de 30mm e em seguida foi ajustado o analisador em  $10^\circ$  e marcando em uma tabela, e o procedimento foi se repetindo de  $10^\circ$  em  $10^\circ$  até  $180^\circ$ . Ao pôr os dados na tabela foi percebido erros em relação aos dados, o mesmo aconteceu ao traçar os gráficos, então, depois de apurar a causa do erro foi adicionado mais um elemento no barramento óptico, a frente do medidor de intensidade.

**Figura 12** – Calibrador de altura do feixe



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

O calibrador de altura do feixe teve como objetivo evitar o espalhamento do feixe de luz no medidor de intensidade, pois esse espalhamento estava causando divergência nos dados e como utilizamos esse calibrador, a íris foi aberta totalmente, com isso, a nova configuração do experimento ficou da seguinte forma:

**Figura 13** – Barramento Óptico com os 7 elementos descritos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização do experimento demonstrado na figura 13 obtivemos os dados representados na tabela e no gráfico abaixo:

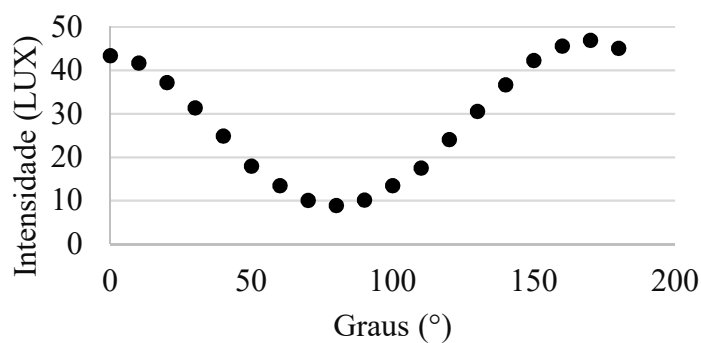
**Tabela 1** – Dados obtidos no procedimento experimental

$\theta$ (°)	$\text{Cos } \theta$	I(lux)	$\text{cos}^2 \theta$	$\frac{I}{I_0}$
0	1	43,4	0,96984631	1
10	0,98481	41,7	0,883022222	0,96083
20	0,93969	37,2	0,75	0,85714
30	0,86603	31,4	0,586824089	0,7235
40	0,76604	24,9	0,413175911	0,57373
50	0,64279	18	0,25	0,41475
60	0,5	13,5	0,116977778	0,31106
70	0,34202	10,1	0,03015369	0,23272
80	0,17365	8,9	3,75247E-33	0,20507
90	0	10,2	0,03015369	0,23502
100	-0,1736	13,5	0,116977778	0,31106
110	-0,342	17,5	0,25	0,40323
120	-0,5	24,1	0,413175911	0,5553
130	-0,6428	30,6	0,586824089	0,70507
140	-0,766	36,7	0,75	0,84562
150	-0,866	42,3	0,883022222	0,97465
160	-0,9397	45,6	0,96984631	1,05069
170	-0,9848	46,9	1	1,08065
180	-1	45,1	1	1,03917

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

A partir dos dados da tabela 1 foi feito um gráfico que relaciona a intensidade com o ângulo entre filtro polarizador e o analisador.

**Gráfico 1** – Intensidade X no ângulo



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Como podemos observar claramente através do gráfico, a intensidade da luz se comporta como dito anteriormente, para ângulos próximo e 0° e 180° (ou de múltiplos

inteiros de  $\pi$ ) temos uma intensidade máxima da luz, respeitando a Lei de Malus, e para ângulos de  $90^\circ$  (e múltiplos inteiros de  $\frac{\pi}{2}$ ) temos um mínimo na intensidade. Vale ressaltar que, como dito anteriormente, quando o ângulo entre o polarizador e o analisador for de  $90^\circ$  não haverá passagem de luz, porém como não existem polarizadores perfeitos houve uma pequena passagem de luz, como o próprio gráfico acusa, porém, com intensidade mínima.

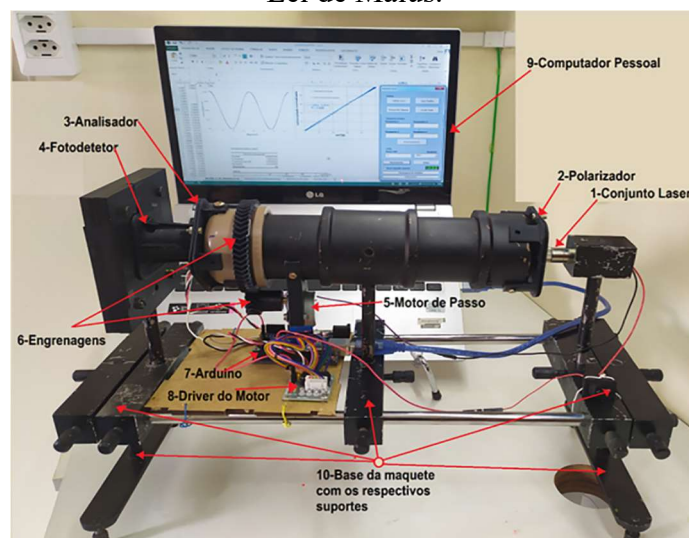
Oliveira (2020, p.7) realizou o procedimento experimental com base na lei de Malus, no qual, a variação do filtro polarizador no seu experimento foi  $360^\circ$ , resultando no gráfico abaixo:



Fonte: Oliveira, 2020.

Oliveira realizou o experimento com outra metodologia, utilizando uma maquete experimental automática, para isso ele desenvolveu software que era necessário para o controle da placa Arduino, responsável por acionamento do laser, que ao ser acionado passava pelos filtros polarizadores que foi controlado pelo motor de passo, e por fim enviava os valores da medição para um microcomputador. A figura abaixo mostra os equipamentos e a montagem experimental utilizada por ele.

**Figura 14** – Foto da maquete experimental utilizada por Oliveira para comprovação da Lei de Malus.

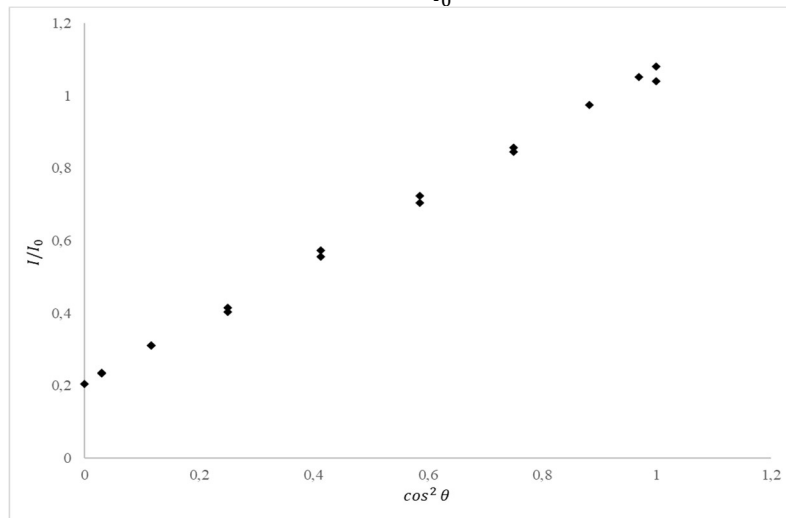


Fonte: Oliveira, 2020

Comparando o gráfico da independência de intensidade luminosa do ângulo  $\theta$  plotado a partir dos dados obtidos no nosso experimento e os dados de Oliveira, percebe-se que obtemos resultados semelhantes, sendo que variamos apenas até  $180^\circ$ . Comprovando assim a teoria de Malus, quando os filtros estiverem ortogonais a intensidade da luz será mínima.

A segunda forma de provar a lei de Malus foi a construção do gráfico 3, que relaciona a intensidade sobre a intensidade inicial versus o cosseno ao quadrado do ângulo, ou seja,  $\frac{I}{I_0} \times \cos^2 \theta$ , assim temos:

**Gráfico 3** –  $\frac{I}{I_0} \times \cos^2 \theta$



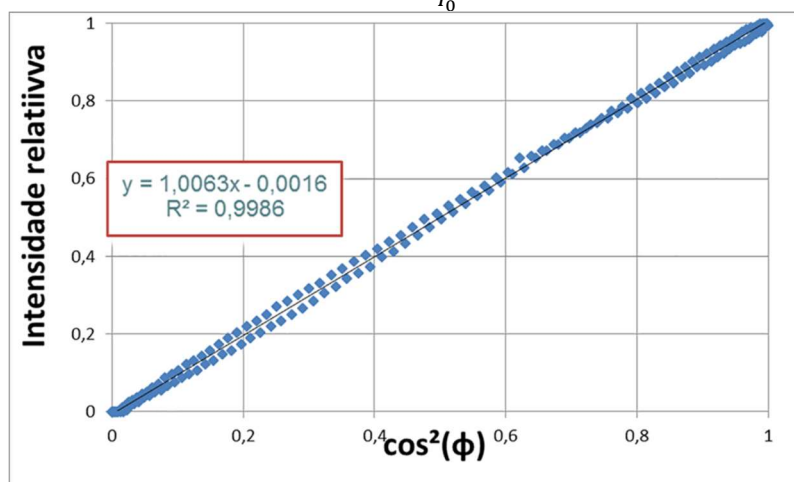
Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Como visto, temos que a intensidade da luz é proporcional a intensidade inicial e ao cosseno ao quadrado do ângulo alpha, então:

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

O gráfico 3 mostra a comprovação da linearidade, no qual, foi coletado uma reta dada por  $y=0,207498006 + 0,853680055x$ . Em que o coeficiente angular é 0,853680055 e o termo independente é 0,207498006 que chamamos de coeficiente linear, nos valores teóricos esses números são 1 e 0 respectivamente. Para encontrarmos estes valores utilizamos a equação  $y = b + ax$ . Desta forma, como o valor obtido está entre 1 e 0 está dentro da margem de erros.

**Gráfico 4** –  $\frac{I}{I_0} \times \text{Cos}^2\phi$



Fonte: Oliveira, 2020.

O coeficiente de correlação calculado indica que 99,86% dos valores obtidos na medição correspondem diretamente à metodologia adotada para verificação da lei de Malus, ou seja  $\frac{I}{I_0} = \text{cos}^2\phi$ . (OLIVEIRA, 2020)

O comportamento do gráfico 3 e o gráfico 4 são semelhantes mudando apenas o valor dos coeficientes, já que a variação dos ângulos do experimento de Oliveira foi maior. Desta forma os resultados comprovam a teoria de Malus de acordo com a equação 24. Apesar dos experimentos terem sido realizados de maneiras distintas, e equipamentos distintos, os resultados se assemelham de forma satisfatória.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos dados experimentais obtidos sobre polarização da luz, associada a lei de Malus, obtendo assim resultados similares com a teoria, ao compararmos os dados com o artigo de oliveira, comprovamos a contundência destes. É importante salientar que não conseguimos eliminar a luz por completo durante o experimento devido à baixa qualidade dos filtros polarizadores. Os resultados que foram tabelados e apresentados graficamente, mostram que quando os filtros estão ortogonais temos a menor intensidade possível, teoricamente essa intensidade seria 0, pois, teoricamente, não teria passagem de luz por esses filtros, ainda há passagem de luz através do filtro, por não se tratar de um equipamento perfeito, onde há uma polarização de 100%.

Ao compararmos os dados obtidos no nosso experimento com os de oliveira que utilizou um equipamento mais sofisticado, podemos perceber que os resultados se assemelham.

Ainda podemos destacar que é possível demonstrar experimentalmente que a fonte de luz policromática não é polarizada. Para essa comprovação foi ajustado um filtro polarizador, com a função de polarizar inicialmente a luz policromática, logo após, foi posto um segundo polarizador, que tem o papel de analisador, para fazer um estudo de como a luz polarizada, que atravessa o analisador muda sua intensidade de acordo com o ângulo entre o polarizador e o analisador.

## 7. REFERÊNCIAS

CALLIARI, FELIPE. **Desenvolvimento de interface gráfica para análise do estado de polarização da luz através de plataforma FPGA.** Rio de Janeiro: Projeto Graduação-Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-RIO, 2014.

CARDOSO, CARLOS ADRIANO DA CONCEIÇÃO. **Construindo um estereoscópio: Ensinando a polarização da luz a partir de imagens 3D.** São Luís – MA, p. 7, 2019.

CARNEIRO. BRENDA PINHEIRO. **Espalhando e simulando o azul do Céu.** A Física na Escola, v. 17, n. 2, p.26, 2019.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física, vol. 4: óptica e física moderna.** Livros Técnicos e Científicos Editora, p. 25, 2009.

JUNIOR, MARCOS GARCIA DE OLIVEIRA. **Proposta para o estudo da polarização da luz no ensino médio através da medida de sua rotação em soluções opticamente ativas.** Uberlândia-MG, 2015.

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. **Leis da refração da luz.** Revista de Ciência Elementar, Casa das Ciências, v. 2, n. 3, 2014.

PAIVA, RODRIGO DE. **Refração da luz.** Revista de Ciência Elementar, Casa das Ciências, v. 2, n. 1, 2014.

PASSOS. CARLOS AUGUSTO CARDOSO. **Natureza e Propagação da Onda Eletromagnética.** Universidade Federal do Espírito Santo. 2013

SILVA. FELIPE MARTINS. **Caracterização experimental dos Estados de Polarização da luz via análise de imagens.** Niterói, 2016.

SANTOS. MARIA APARECIDA DA CONCEIÇÃO DOS. **Ferramentas Didáticas e a Aprendizagem sobre Ondas Eletromagnéticas e a Polarização da Luz.** Dissertação



do mestrado Nacional Profissional em ensino de Física (MPEF). Universidade Estadual de Maringá. Sociedade Brasileira de Física. 2016.

SUAIDE. PROF. ALEXANDRE. **Física Experimental IV-Polarização Lei de Malus.** 2008.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter permitido que tivesse saúde e perseverança para dá continuidade aos meus estudos.

Ao professor Mario Cesar, por ter sido meu orientador e pela oportunidade de participar do grupo Fotônica.

Aos professores, que contribuíram para o meu aprendizado e desempenho no meu processo de formação.

Ao meu esposo Edjanilson pela compreensão e apoio.

A minha colega e amiga Geisse Kelly, que esteve comigo durante este percurso.

Aos meus colegas do grupo Fotônica, em especial: Acson Clementino.

Ao técnico de laboratório Fagner Fernandes.

Aos meus pais, meus familiares e amigos por acreditar em mim.

A minhas irmãs Maria Paulino e Ana Cristina, e a minha prima Dora, por terem me apoiado e me ajudado.

A professora Alessandra Brandão, pela oportunidade de participar do projeto meninas na física.

De forma geral, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.