



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

JONATHAN KEVELLY OLIVEIRA DAS MERCÊS

INVESTIGAÇÃO DA POLARIZAÇÃO DA LUZ  
EM MEIOS BIRREFRINGENTES

CAMPINA GRANDE-PB

2025

JONATHAN KEVELLY OLIVEIRA DAS MERCÊS

INVESTIGAÇÃO DA POLARIZAÇÃO DA LUZ  
EM MEIOS BIRREFRINGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado Plena em Física.

**Orientadora:** Profa. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva

CAMPINA GRANDE-PB

2025

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão 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.

M554i Mercês, Jonathan Kevelly Oliveira das.  
Investigação da polarização da luz em meios birrefringentes  
[manuscrito] / Jonathan Kevelly Oliveira das Mercês. - 2025.  
76 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -  
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e  
Tecnologia, 2025.

"Orientação : Prof. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira  
Lima e Silva, Departamento de Física - CCT".

1. Polarização da luz. 2. Birrefringência. 3. Fotoelasticidade.  
4. Ângulo de Brewster. I. Título

21. ed. CDD 530.7

JONATHAN KEVELLY OLIVEIRA DAS MERCES

## INVESTIGAÇÃO DA POLARIZAÇÃO DA LUZ EM MEIOS BIRREFRINGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física

Aprovada em: 10/06/2025.

### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **José Antônio Ferreira Pinto** (\*\*\*.297.664-\*\*), em **25/06/2025 16:44:19** com chave **c8fa62f851fc11f0b1bf1a7cc27eb1f9**.
- **Alyson José Alves Carvalho** (\*\*\*.764.704-\*\*), em **25/06/2025 17:56:38** com chave **e3170768520611f0b17506adb0a3afce**.
- **Ruth Brito de Figueiredo Melo** (\*\*\*.934.704-\*\*), em **25/06/2025 17:11:55** com chave **a42338de520011f09fa71a1c3150b54b**.
- **Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva** (\*\*\*.421.524-\*\*), em **25/06/2025 16:39:21** com chave **1757d51c51fc11f0bec81a1c3150b54b**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse [https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar\\_documento/](https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/) e informe os dados a seguir.

**Tipo de Documento:** Folha de Aprovação do Projeto Final

**Data da Emissão:** 26/06/2025

**Código de Autenticação:** 2af3a8



Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional; aos professores que contribuíram para minha formação; e, em especial, à professora Tâmara, por sua orientação atenciosa, incentivo e dedicação ao longo desta jornada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, por todo o amor, paciência e incentivo contínuo ao longo da minha trajetória acadêmica. À minha orientadora, professora Tâmara, por sua dedicação, disponibilidade e orientação fundamentais que tornaram este trabalho possível. Aos docentes do curso de Licenciatura em Física, por contribuírem de maneira significativa para minha formação, transmitindo não apenas conhecimento, mas também inspiração. Aos colegas e amigos que compartilharam comigo momentos de estudo, dúvidas e conquistas, meu sincero reconhecimento. Estendo meus agradecimentos ao técnico Thiago pelo suporte para a realização das atividades práticas descritas neste trabalho no laboratório Didático de Física . A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada, meu muito obrigado.

“A ciência da luz é, ao mesmo tempo, uma das mais antigas e uma das mais modernas. Desde os tempos de Euclides até os lasers, a luz tem sido nosso guia na busca por compreender o universo.”

*Victor F. Weisskopf*

## RESUMO

Nesse trabalho é investigado o fenômeno da polarização da luz e aplicações por meio de uma sequência de experimentos voltados para o Ensino de Física. Inicialmente, explorou-se a Lei de Malus através *lasers* emitindo em diferentes comprimentos de onda e polarizadores dispostos em ângulos variados, permitindo verificar a relação entre intensidade transmitida e orientação dos filtros. Em seguida, foram realizados experimentos em meios birrefringentes, que modificam o estado de polarização da luz. Também se investigou o efeito da elipsidade da luz, relacionando-a com tensões internas e a orientação dos eixos ópticos dos materiais utilizados. Por fim, estimou-se o índice de refração de um meio acrílico, integrando conceitos de reflexão, refração e polarização. As atividades desenvolvidas, considerando conceitos fundamentais em Óptica (associados a aplicações que levam em conta propriedades de fotoelasticidade e ângulo de Brewster em meios anisotrópico e isotrópico, respectivamente), promovem uma abordagem experimental conectada à teoria e sugestiva para ser aplicada em sala de aula.

**Palavras-chave:** Polarização da luz; Birrefringência; Fotoelasticidade; Ângulo de Brewster.

## ABSTRACT

This work investigates the phenomenon of light polarization and its applications through a sequence of experiments focused on Physics education. Initially Malus's Law was explored using lasers emitting at different wavelengths and polarizers arranged at varying angles, allowing the relationship between transmitted intensity and polarizer orientation to be verified. Subsequently, experiments were carried out in birefringent media, which change the state of light polarization. The effect of light ellipticity was also investigated, and this was related to internal stresses and the orientation of the optical axes of the materials. Finally the refractive index of an acrylic medium was estimated, integrating concepts of reflection, refraction, and polarization. The activities developed carry fundamentals concepts in Optics (associated with application taking into account the effect of photoelasticity and Brewster's angle in anisotropic and isotropic, respectively) and promotes an experimental approach that connects theory and practice, that can be successfully applied in classroom.

**Keywords:** Light polarization; Birefringence; Photoelasticity; Brewster's angle.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	9
CAPÍTULO 1 : Polarização e Efeito Malus Utilizando <i>Laser</i> .....	11
1.1 Lei de Malus .....	15
1.2 Dispositivo 1 : Polarizador Simples .....	18
1.3 Resultado e Discussões .....	23
CAPÍTULO 2 : Birrefringência em Meios Materiais .....	27
2.1 A Técnica da Fotoelasticidade .....	30
2.2 Dispositivo 2 : Associação de Polarizadores e Meio Birrefringente	32
2.3 Resultados e Discussões.....	35
2.4 Dispositivo 3 : Efeito da Elipsidade em Meio Birrefringente.....	37
2.5 Resultados e Discussões.....	42
CAPÍTULO 3 : O Efeito Brewster com Luz Polarizada.....	45
3.1 Lei de Brewster .....	46
3.2 Dispositivo 4 : Medindo o Índice de Refração em Meio Isotrópico	48
3.3 Resultados e Discussões.....	51
CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS .....	54
APÊNDICES .....	58
Apêndice A - Código Python : Primeiro Dispositivo.....	58
Apêndice B - Dados Experimentais do Primeiro Dispositivo.....	64
Apêndice C - Código Python : Segundo Dispositivo .....	67
Apêndice D - Dados Experimentais do Segundo Dispositivo .....	70
Apêndice E - Código Python : Terceiro Dispositivo .....	71
Apêndice F - Dados Experimentais do Terceiro Dispositivo .....	75

## INTRODUÇÃO

A luz desempenha um papel fundamental em diversos ramos da Física, sendo essencial para o entendimento de fenômenos ópticos e suas aplicações tecnológicas. Entre esses fenômenos, a polarização da luz se destaca como um conceito essencial, com implicações diretas em diversas áreas da ciência e da engenharia (por meio de filtros polarizadores utilizados em câmeras).

O estudo da polarização da luz começou a ganhar destaque no século XVII, impulsionado por cientistas como Christiaan Huygens, que desenvolveu a teoria ondulatória da luz (SILVA, 2011). No entanto, foi no início do século XIX que Étienne-Louis Malus fez uma descoberta fundamental ao observar a polarização da luz por reflexão, um marco significativo para a óptica. Em 1809, ele publicou suas conclusões na obra *Mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique* (MALUS, 1809), e, no ano seguinte, aprofundou seus estudos com a publicação de *Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallines* (MALUS, 1811), onde estabeleceu a relação entre a dupla refração em cristais e o fenômeno da polarização, característica intrínseca de materiais birrefringentes.

Entre os diversos comportamentos (onda ou partícula) que a luz pode apresentar, a polarização se destaca como um fenômeno que restringe as oscilações do campo elétrico da onda luminosa a uma direção específica. Dependendo da maneira como ocorre essa restrição, a luz pode se apresentar em diferentes estados de polarização, sendo os principais: linear, circular e elíptica (YOUNG; FREEDMAN, 2014). A polarização linear ocorre quando o campo elétrico oscila em um único plano ao longo da propagação da onda. Na polarização circular, a extremidade do vetor campo elétrico descreve um movimento circular. Já na polarização elíptica, esse vetor traça uma trajetória elíptica ao longo do tempo. Esse efeito pode ocorrer tanto de forma natural (como na reflexão sobre superfícies não metálicas e na dispersão na atmosfera) quanto de maneira induzida, por meio de polarizadores. Para descrever matematicamente essa variação da intensidade da luz polarizada ao atravessar um polarizador, Étienne-Louis Malus formulou, no início do século XIX, a Lei de Malus, que se tornou fundamental para a compreensão quantitativa da polarização e suas aplicações em óptica.

Diante da importância da polarização da luz e de suas diversas aplicações, este trabalho explora esse fenômeno a partir de uma abordagem experimental qualitativa voltada

para o Ensino de Física. Para isso, serão propostas e analisadas atividades experimentais que envolvem diferentes aspectos da polarização, indo além da Lei de Malus e abrangendo temas como a birrefringência em meios materiais (YOUNG; FREEDMAN, 2014), a fotoelasticidade (COKER; FILON, 1957) e a Lei de Brewster (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). A ideia é proporcionar uma compreensão mais intuitiva e acessível desses conceitos ópticos, reforçando sua relevância prática e contribuindo para uma abordagem mais dinâmica e eficaz do Ensino de Óptica.

Assim, esse estudo se justifica pela necessidade de compreender, de forma qualitativa e experimental, como a luz interage com certos materiais, como os birrefringentes, através da influência de seus padrões de tensão na direção de propagação da luz polarizada. No entanto, a abordagem desta temática no ensino de Física muitas vezes se limita à teoria, sem a exploração experimental necessária para tornar os conceitos mais concretos e acessíveis. Portanto, a utilização de atividades práticas podem contribuir de forma essencial na aprendizagem permitindo que estudantes visualizem e compreendam os efeitos da polarização em diferentes contextos.

O presente trabalho está estruturado em três capítulos. No primeiro Capítulo, é apresentada a fundamentação teórica sobre a polarização da luz, com foco na Lei de Malus e suas implicações, além da realização da primeira atividade experimental, que investiga esse fenômeno na prática. O segundo Capítulo abordará a técnica da fotoelasticidade e sua relação com a polarização, explorando a interação da luz com meios birrefringentes por meio de duas atividades experimentais: a associação de polarizadores a esses materiais e a análise do efeito da elipticidade em um meio birrefringente. Por fim, o terceiro Capítulo será dedicado à Lei de Brewster, incluindo a última atividade experimental, que consiste na medição do índice de refração em meio acrílico. Dessa forma, busca-se reforçar a importância dos conceitos abordados e sua aplicabilidade em contextos ópticos distintos.

## CAPÍTULO 1 : Polarização e Efeito Malus Utilizando *Laser*

O fenômeno da polarização da luz é uma das evidências mais significativas da natureza ondulatória da radiação eletromagnética. Seu entendimento começou a se consolidar a partir do século XVII, impulsionado pelos avanços na investigação e descrição das propriedades ópticas da luz. Um dos primeiros a apresentar uma teoria consistente sobre a natureza da luz foi Christiaan Huygens, responsável pela formulação da teoria ondulatória da propagação luminosa (HUYGENS, 1690). Essa abordagem conceitual representou um marco, abrindo caminhos para a interpretação de diversos fenômenos ópticos, alguns dos quais serão analisados ao longo deste trabalho.

Ao longo do tempo, inúmeros experimentos permitiram explorar com mais profundidade o comportamento da luz polarizada. A criação e o desenvolvimentos de dispositivos, como os polarizadores, foram determinantes nesse processo. O primeiro polarizador funcional, o prisma de Nicol, foi criado por William Nicol em 1828, utilizando cristais de calcita para dividir a luz em feixes com diferentes estados de polarização (CHAPPERT, 1995). Posteriormente, os avanços tecnológicos possibilitaram a criação de filtros polaroides, idealizados por Edwin H. Land na década de 1930, o que favoreceu a sua popularização tanto em contextos científicos quanto em aplicações tecnológicas do cotidiano (HECHT, 2017).

Atualmente, a polarização ocupa um papel de destaque na óptica moderna, com aplicações que abrangem desde instrumentos científicos de alta precisão até tecnologias amplamente difundidas, como telas de LCD. Diante dessa relevância, torna-se pertinente que o tema da polarização seja explorado no âmbito educacional como objeto de investigação acadêmica e análise experimental, visando contribuir com propostas de atividades potencialmente aplicáveis em práticas didáticas futuras e na formação inicial de professores, ainda que não implementadas diretamente neste trabalho.

Nesse contexto, para possibilitar o desenvolvimento de propostas didáticas fundamentadas, faz-se necessário compreender os princípios físicos que regem o fenômeno da polarização. A luz natural, ao ser emitida por fontes comuns, como o Sol ou lâmpadas incandescentes, é composta por ondas eletromagnéticas que vibram em múltiplas direções perpendiculares à sua propagação sendo, por isso, classificada como não polarizada. Quando essas oscilações passam a ocorrer predominantemente em único plano, temos a chamada

luz linearmente polarizada (ZILIO, 2017). Os polarizadores surgem, portanto, como uma parte fundamental deste processo, atuando como estruturas internas (como microrregiões alinhadas ou materiais anisotrópicos<sup>1</sup>) capazes de bloquear todas as componentes da luz que não estejam alinhadas com seu eixo de polarização.

Quando a luz não polarizada incide sobre um polarizador, apenas as componentes do campo elétrico que oscilam paralelamente ao seu eixo de transmissão conseguem atravessá-lo, resultando em luz linearmente polarizada. Nesse processo, a intensidade da luz transmitida é reduzida para aproximadamente a metade da intensidade inicial, fenômeno cuja explicação foi sistematizada posteriormente pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827). Fresnel, uma das figuras centrais no desenvolvimento da teoria ondulatória da luz, detalhou o comportamento da luz polarizada em diversos estudos, entre eles o *Mémoire sur la Diffraction de la Lumière* (FRESNEL, 1818). A relação matemática que descreve a redução da intensidade é dada por:

$$I = \frac{I_0}{2}, \quad (1.1)$$

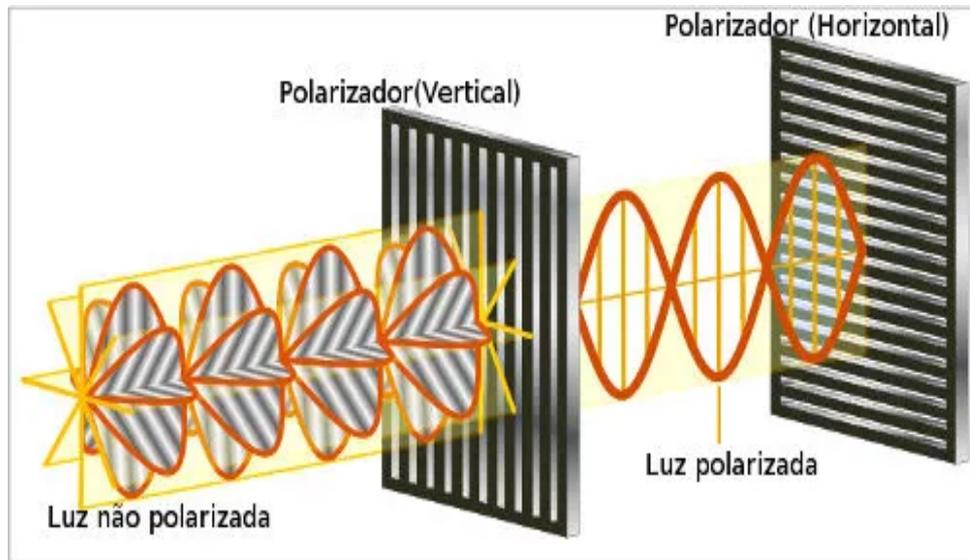
em que  $I_0$  representa a intensidade da luz incidente no polarizador e  $I$  é a intensidade da luz transmitida após o polarizador. O fator  $(1/2)$  decorre do fato de que a luz não polarizada possui oscilações igualmente distribuídas em todos os planos perpendiculares à direção de propagação, sendo que o polarizador permite a passagem apenas das componentes alinhadas ao seu eixo de transmissão.

Se essa luz polarizada atravessar um segundo polarizador (chamado de analisador), a intensidade da luz transmitida dependerá do ângulo  $\theta$  entre os eixos dos dois polarizadores. Caso os eixos sejam perpendiculares entre si ( $\theta = 90^\circ$ ), o analisador bloqueia totalmente a luz, e a intensidade transmitida é nula (MALUS, 1809). Esse princípio é ilustrado na Figura 1, que representa a filtragem da luz em duas etapas sucessivas de polarização.

---

<sup>1</sup>Um material anisotrópico é aquele cujas propriedades físicas variam dependendo da direção em que são medidas. Isso significa que, ao contrário de materiais isotrópicos (que têm propriedades uniformes em todas as direções), os materiais anisotrópicos exibem comportamentos diferentes dependendo do eixo ou plano considerado (JR.; RETHWISCH, 2018). Exemplos: madeira, cristais, grafeno, materiais compostos, fibras de carbono, etc.

Figura 1 – Luz polarizada a partir de uma fonte não polarizada. O feixe polarizador incide no analisador (cujo eixo de polarização é perpendicular ao do primeiro polaróide), não sendo transmitido a partir daí.



Fonte: JÚNIOR (2025).

Compreender esse mecanismo de filtragem direcional da luz é essencial para reconhecer a diversidade de aplicações que a polarização oferece, tanto na ciência quanto no cotidiano. Um exemplo prático e visual do controle da polarização pode ser observado na Figura 2, que ilustra a projeção de luz branca, proveniente de um projetor, atravessando dois polarizadores. À medida que a orientação relativa entre os filtros é modificada, ocorre a seleção das direções de vibração do campo elétrico associadas às diferentes componentes cromáticas (vermelho, verde e azul — sistema RGB) da luz emitida pela fonte luminosa. Embora o comprimento de onda de cada componente permaneça inalterado, as diferentes direções de polarização de seus vetores de campo elétrico permitem que certas componentes sejam mais ou menos transmitidas conforme a posição angular dos polarizadores. Como resultado, surgem colorações distintas, uma vez que a polarização seletiva atua sobre as intensidades relativas das cores transmitidas. Este fenômeno evidencia, de forma didática, a influência direta do ângulo entre os polarizadores na intensidade e na composição aparente da luz transmitida, sem que haja alteração do espectro de frequências.

Figura 2 – A imagem ilustra o efeito da polarização seletiva sobre o feixe branco emitido por um projetor, evidenciando como as intensidades relativas dos componentes cromáticos (RGB) podem ser moduladas pela orientação dos polarizadores. Essa modulação não altera os comprimentos de onda da luz, mas ajusta a intensidade transmitida de cada componente espectral, ressaltando os fundamentos da óptica de polarização aplicados à tecnologia de projeção digital.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 2 ilustra, de forma didática, o efeito da polarização seletiva sobre um feixe de luz branca, emitido por um projetor. Ao atravessar dois polarizadores com eixos de transmissão ajustáveis, a luz sofre um processo de filtragem angular, no qual apenas as componentes do campo elétrico cujas oscilações estejam alinhadas com o eixo de transmissão do polarizador são transmitidas. Essa filtragem não altera os comprimentos de onda envolvidos, mas modifica as intensidades relativas das diferentes componentes espectrais da luz, conferindo variações cromáticas perceptíveis na imagem projetada.

Quando a luz branca, que é uma combinação de várias cores (incluindo os componentes vermelho, verde e azul do sistema RGB), passa através de um polarizador, o que muda é a direção das oscilações e não sua composição espectral. Assim, todas as cores presentes na luz branca permanecem, mas agora com uma polarização uniforme. Em sistemas de projeção RGB, os emissores já trabalham com comprimentos de onda específicos, e o uso de polarizadores pode ajudar a controlar o contraste e reduzir reflexos, sem que se perca ou modifique a essência cromática dos sinais (ZILIO, 2017).

Após a polarização, se essa luz incide em um meio dispersivo (como um prisma ou uma rede de difração), ocorre a separação dos comprimentos de onda. Esse processo de dispersão acontece porque o índice de refração do material varia com o comprimento de onda, fazendo com que cada cor se desvie em ângulos diferentes conforme a Lei de Snell (YOUNG; FREEDMAN, 2014). Assim, mesmo com a ação do polarizador, os comprimentos de onda que correspondem ao vermelho, verde e azul permanecem intactos, mas são espacialmente separados e se tornam visíveis como cores distintas na imagem.

Portanto, a razão pela qual observamos essas cores é que o polarizador não “corta” ou elimina as frequências responsáveis por cada cor; ele apenas alinha as ondas de luz. A decomposição espectral observada resulta da combinação do efeito da polarização com o fenômeno da dispersão, onde cada cor segue seu próprio caminho conforme sua frequência. Essa interação revela as verdadeiras cores do feixe RGB sem comprometer sua identidade espectral.

Ao considerar os conceitos fundamentais da polarização e das propriedades espectrais da luz no contexto do Ensino de Física, surge uma oportunidade relevante de integrar teoria e fundamentos experimentais em propostas de investigação didática. O estudo da polarização, neste caso, oferece um contexto enriquecedor para compreender aspectos da radiação eletromagnética e os fenômenos associados ao comportamento da luz. Neste capítulo, apresenta-se uma proposta de experimento qualitativo centrado na Lei de Malus, com foco na análise da polarização da luz. Utilizando *lasers* de diferentes comprimentos de onda, a atividade permite observar os efeitos ópticos envolvidos e explorar, de forma visual e conceitualmente estruturada, o fenômeno da polarização em um contexto didático investigativo.

## 1.1 Lei de Malus

Ao estudar o fenômeno da polarização da luz, é inevitável deparar-se com uma figura central na história da óptica: Étienne-Louis Malus. Seu nome está diretamente associado a uma das relações matemáticas mais relevantes para a compreensão da luz polarizada. No entanto, sua contribuição vai muito além da lei que leva seu nome. Entender quem foi Malus, o contexto histórico em que viveu e o que motivou suas pesquisas é essencial para compreender o desenvolvimento do conhecimento sobre a polarização e, por consequência, a construção dos conceitos que hoje ensinamos e aplicamos na Física Moderna.

Étienne-Louis Malus foi um físico e engenheiro francês nascido em 1775, em meio a um período marcado por intensas transformações políticas, científicas e tecnológicas. Vivendo durante a Revolução Francesa e os conflitos napoleônicos, Malus foi oficial do exército francês, tendo participado das campanhas militares no Egito lideradas por Napoleão Bonaparte. Mas mesmo em meio a esse cenário conturbado, sua curiosidade científica o levou a se dedicar ao estudo da luz, tema que começava a ser cada vez mais debatido no meio acadêmico europeu da época (CHAPPERT, 1995).

Na virada do século XVIII para o XIX, a teoria dominante sobre a natureza da luz era a teoria corpuscular, proposta por Isaac Newton, segundo a qual a luz seria composta por partículas que se propagavam em linha reta (CHAPPERT, 1995). Essa teoria conseguia explicar razoavelmente bem fenômenos como a reflexão e a refração, mais enfrentava dificuldades diante de efeitos mais complexos como a difração, interferência e, especialmente, a polarização. Foi nesse cenário teórico em transição que Malus começou a desenvolver suas investigações.

O ponto de partida de seus estudos foi um experimento aparentemente simples, mas que revelaria algo profundamente novo: ao observar a luz do sol refletida em uma janela através de um cristal de calcita, Malus notou que a intensidade da luz variava conforme girava o cristal. Essa observação, realizada por volta de 1808, foi o estopim para suas pesquisas sobre o comportamento direcional da luz (CHAPPERT, 1995). No ano seguinte, em 1809, Malus publicou os resultados de seus estudos no trabalho intitulado *Mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique* (MALUS, 1809), no qual descreve detalhadamente a descoberta da polarização da luz por reflexão. Em 1811, publicou uma segunda obra essencial: *Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallines* (MALUS, 1811), onde apresentou sua teoria sobre a dupla refração em cristais, ampliando de forma significativa sua contribuição para a óptica.

É importante destacar que a breve, porém impactante, carreira científica de Malus, se desenvolveu num período de transição crucial para a óptica, ainda fortemente influenciado pela tradição Newtoniana e por uma teoria corpuscular da luz que, embora amplamente aceita, já apresentava sinais de esgotamento. A teoria de Newton, apesar de dominante, era marcada por contradições internas - como a necessidade de apelar a forças de atração e à hipótese de “acessos” para explicar a interferência - e foi recebida por muitos de seus sucessores como Euler, Young e Boskovich, com reservas ou críticas fundamentadas (CHAPPERT, 1995). O século XVIII, apesar de rico em avanços técnicos e experimentais, foi relativamente tímido nas formulações teóricas, o que só varia a mudar com os trabalhos de Fresnel e o avanço da teoria ondulatória no século XIX. Assim o trabalho de Malus, situado nesse momento de inflexão entre modelos concorrentes, contribuiu de forma decisiva ao fornecer uma base experimental sólida que impulsionaria a superação da teoria da emissão e abriria caminho para a compreensão mais profunda da luz como onda.

Retomando os seus trabalhos, oriundos de sua primeira publicação (no ano 1809), Malus apresentou aquilo que seria uma das belas formulações matemáticas de seu trabalho: a Lei de Malus. Essa lei descreve matematicamente como a intensidade da luz polarizada varia ao atravessar dois polarizadores dispostos com diferentes orientações. Quando um feixe de luz previamente polarizado incide sobre um segundo polarizador (denominado analisador), a intensidade  $I$  da luz transmitida é determinada pelo ângulo  $\theta$  entre os eixos de polarização dos dois dispositivos, sendo expressa pela equação (DUREE, 2011):

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\theta), \quad (1.2)$$

em que  $I$  representa a intensidade da luz transmitida pelo analisador,  $I_0$  é a intensidade da luz incidente sobre o polarizador e  $\theta$  corresponde ao ângulo entre os eixos de transmissão do polarizador e do analisador.

Essa relação indica que a luz polarizada transmitida pelo analisador atinge seu valor máximo quando os eixos de polarização do polarizador e do analisador estão perfeitamente alinhados ( $\theta = 0^\circ$ ), resultando em  $I = I_0$ . À medida que o ângulo  $\theta$  aumenta, a intensidade transmitida diminui proporcionalmente ao quadrado do cosseno do ângulo ( $\cos^2(\theta)$ ), evidenciando uma redução contínua e suave da intensidade da luz. Quando os eixos tornam-se perpendiculares ( $\theta = 90^\circ$ ), o cosseno é nulo e, conseqüentemente, a intensidade transmitida também se anula ( $I = 0$ ), indicando que a luz é completamente bloqueada. Assim, a variação do ângulo entre os polarizadores regula de forma precisa a quantidade de luz transmitida, permitindo o controle gradual da intensidade luminosa.

Mas por que isso é importante? A Lei de Malus não apenas confirma a existência da polarização como propriedade intrínseca da luz, como também fornece uma ferramenta quantitativa para medi-la e explorá-la em experimentos e aplicações. A partir dessa relação, tornou-se possível aprofundar a investigação sobre a natureza ondulatória da luz, promovendo um avanço significativo na compreensão dos fenômenos ópticos e complementando as concepções corpusculares vigentes até então, contribuindo para o desenvolvimento da teoria ondulatória que se consolidaria nas décadas seguintes.

No contexto educacional, a Lei de Malus se destaca por apresentar grande potencial didático devido à sua clareza conceitual e a possibilidade de experimentação acessível. Por meio de atividades simples, utilizando fontes de luz coerente (como *lasers*), polarizadores e um fotodetector, é possível reproduzir com clareza o comportamento previsto pela equação

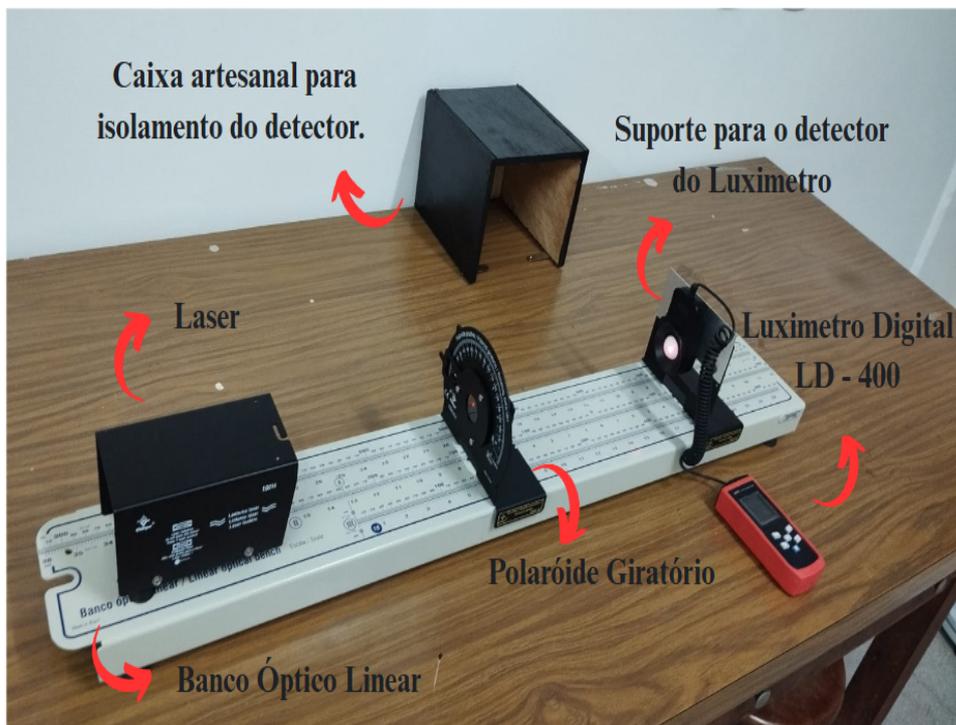
de Malus com alto grau de fidelidade. Além disso, ela estabelece uma ponte entre a Física e Matemática, especialmente no uso de funções trigonométricas, contribuindo para uma abordagem interdisciplinar do conhecimento.

## 1.2 Dispositivo 1 : Polarizador Simples

A primeira montagem experimental desenvolvida neste trabalho tem como finalidade a verificação quantitativa da Lei de Malus, por meio da utilização de *lasers* com diferentes comprimentos de onda e a medição da intensidade luminosa transmitida pela associação de polarizadores.

Os recursos utilizados para a montagem do primeiro experimento estão ilustrados na Figura 3, onde é possível visualizar os componentes principais utilizados: uma ponteira *laser*, um polaroide giratório, um luxímetro digital LD-400 com suporte para o detector e uma caixa artesanal para isolamento da luz ambiente. O experimento foi montado sobre um banco óptico linear, o que possibilitou o alinhamento preciso dos elementos.

Figura 3 – Montagem experimental utilizada para a verificação da Lei de Malus, composta por um *laser*, banco óptico linear, polaroide giratório, luxímetro digital LD - 400 com suporte e caixa artesanal para isolamento do detector.



Fonte: O autor (2025).

Foram utilizados três *lasers* emitindo em comprimentos de onda distintos - vermelho ( $\lambda = 665 \text{ nm}$ ), verde ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) e violeta ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ) - testados individualmente com o mesmo conjunto de equipamentos. O polarizador foi ajustado entre  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , em intervalos de  $10^\circ$ . Para a análise teórica, considerou-se a intensidade máxima  $I_0$ , registrada pelo luxímetro na ausência do polarizador, com o feixe incidindo diretamente sobre o detector.

A Figura 4 mostra a montagem final do experimento, já devidamente alinhado para a coleta de dados. O detector do luxímetro encontra-se posicionado dentro da caixa artesanal, que tem como função minimizar a interferência da luz ambiente sobre as medições. Essa preocupação é fundamental, visto que o local de realização do experimento deve ser o mais escuro possível a fim de se evitar ruídos indesejados nas medições. Caso o local seja suficientemente escuro, a caixa pode ser dispensada. Além disso, a escala do luxímetro foi ajustada inicialmente para  $2000 \text{ lux}$ , podendo ser modificada conforme o modelo do sensor ou comprimento de onda de emissão ( $\lambda$ ) do *laser* empregado, visto que a resposta espectral do sensor pode variar com  $\lambda$ . A distância entre o *laser* e o polarizador pode ser desprezada devido a natureza colimada do feixe, enquanto a distância entre o polarizador e o detector foi minimizada com o objetivo de reduzir possíveis efeitos de interferência óptica indesejada, tais como múltiplas reflexões internas ou difusão residual dentro do trajeto óptico, assegurando assim maior precisão nas leituras de intensidade.

Figura 4 – Montagem final do experimento de verificação da Lei de Malus, com todos os elementos ópticos devidamente alinhados: o *laser* (esquerda), o polaróide giratório (centro) e o detector do luxímetro posicionado dentro da caixa artesanal (direita).



Embora a montagem utilize apenas um polarizador explícito, é importante salientar que a Lei de Malus continua válida neste contexto. Isto ocorre por que o feixe luminoso do *laser*, de uma forma geral, já emite luz linearmente polarizada. Esse fato se deve à maneira como a luz é gerada dentro do dispositivo: no interior da cavidade do *laser*, o processo de emissão estimulada e as condições de oscilação impõem restrições específicas à orientação do campo elétrico da luz emitida. Como resultado, o *laser* produz um feixe de luz cuja polarização é predominantemente linear, com o vetor do campo elétrico oscilando em uma direção preferencial. Essa característica é especialmente marcante em *lasers* de diodo, como os utilizados neste experimento (CONTRIBUTORS, 2025).

Dessa forma, o feixe de luz, quando substituído por um *laser*, já pode ser considerado como tendo passado por um primeiro polarizador. Ao adicionar um polaróide giratório ao caminho óptico, temos, na prática, um sistema composto por **dois polarizadores**: o primeiro sendo o próprio *laser* (cujo eixo de polarização é fixo ao dispositivo) e o segundo sendo o polarizador rotativo. Assim, ao variar o ângulo de inclinação do eixo no polaróide, a intensidade da luz transmitida varia conforme previsto pela Equação (1.2).

Outro aspecto importante está relacionado à natureza da grandeza física medida. O luxímetro fornece a iluminância do feixe transmitido em *lux*, uma unidade fotométrica, que leva em conta a sensibilidade do olho humano ao comprimento de onda da luz (PALMER; GRANT, 2010). No entanto, a Lei de Malus se refere à irradiância (ou intensidade luminosa em termos físicos), expressa em  $W/m^2$  (*watts* por metro quadrado). Assim, para possibilitar uma comparação válida entre teoria e experimento, é necessário converter os valores de *lux* para irradiância. Para fontes monocromáticas como os *lasers*, essa conversão pode ser feita utilizando-se de um fator médio baseado na eficiência luminosa do olho humano.

Além disso, o instrumento utilizado para as medições, o luxímetro digital modelo LD-400, é desenvolvido para aplicações gerais em ambientes controlados. Este aparelho é projetado para operar de forma ideal na faixa de frequência de 50 a 60 *Hz* (Hertz), o que o torna adequado para medições de iluminância em condições típicas de iluminação artificial ou natural. Sua sensibilidade e resposta espectral são calibradas de acordo com a curva de eficiência luminosa do olho humano (luz verde, mais especificamente em torno de 555 nm), o que torna uma ferramenta apropriada para a quantificação da iluminância dos feixes de *laser* utilizados (INSTRUTHERM, 2025).

Neste experimento, baseado na sensibilidade ideal do luxímetro, adotamos a taxa de conversão padrão aproximada para luz visível monocromática em condições fotométricas convencionais:

$$1 \text{ lux} \cong 0,0079 \text{ W/m}^2 \quad (1.3)$$

Esse valor considera a resposta espectral média do olho humano e é amplamente utilizado em aplicações técnicas que envolvem a equivalência entre iluminância e irradiância em feixes de luz visível (PALMER; GRANT, 2010). A conversão foi aplicada em todos os dados obtidos experimentalmente.

Entretanto, mesmo após a conversão das unidades de medida, observa-se que a simples resposta espectral do luxímetro não é suficiente para a comparação sistemática entre os valores experimentais e os previstos teoricamente. Essa discrepância, geralmente é associada a um deslocamento vertical dos dados no gráfico de intensidade versus ângulo, tornando necessária a aplicação de uma translação nos resultados experimentais. Essa calibração inicial é essencial para que o valor máximo experimental - correspondente ao ângulo  $\theta = 0^\circ$ , onde se espera  $I = I_0$  - coincida com o máximo teórico previsto pela Lei de Malus. Dessa forma, garante-se que a comparação entre teoria e experimento seja fiel, permitindo avaliar corretamente a conformidade dos dados com o comportamento ideal esperado. A translação, portanto, não altera a forma funcional da curva experimental, apenas reposiciona os dados para respeitar o ponto de referência teórico adequado, permitindo a comparação de resultados.

Para guiar a realização do experimento, seguiu-se o seguinte roteiro:

1. **Calibração do luxímetro:** ajustar o luxímetro para a escala de 2000 *lux* (ou outra apropriada, dependendo do modelo do equipamento e da melhor intensidade que se adeque aos *lasers* utilizados). Registrar a intensidade  $I_0$ , com o feixe do *laser* atingindo diretamente o sensor do luxímetro, sem a presença do polarizador no trajeto do feixe.
2. **Medições com o polarizador:** inserir o polaróide no trajeto do feixe e ajustar seu ângulo de rotação de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , em incrementos de  $10^\circ$ . Para cada posição, aguardar entre 30 segundos a 1 minuto para estabilização da leitura e registrar a intensidade luminosa indicada no luxímetro. Após o término da série completa, realizar uma

segunda medição, recomeçando a partir do item anterior.

3. **Repetição com diferentes *lasers*:** repetir todos os passos anteriores para os outros *lasers* disponíveis, respeitando os mesmos critérios experimentais.
4. **Processamento dos dados:** utilizar um programa computacional desenvolvido especificamente para esta atividade (disponível no Apêndice A), com as seguintes funcionalidades:
  - **Média Aritmética:** calcular a média aritmética entre os valores obtidos no primeiro e segundo passo.
  - **Conversão das unidades:** converter a média de todas leituras de iluminância (em *lux*) realizadas no item anterior para irradiância (em,  $W/m^2$ ), utilizando-se da Equação (1.3) apresentada.
  - **Cálculo teórico:** com base no valor médio de  $I_0$  obtido e convertido para  $W/m^2$ , calcular os valores teóricos da intensidade transmitida utilizando a equação da Lei de Malus (1.2) para os ângulo de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , variando em intervalos de  $10^\circ$
  - **Geração de gráficos comparativos:** construção do gráfico contendo os dados experimentais (convertidos) e os valores teóricos, com ajuste linear.
  - **Geração de tabela:** geração de tabela com todos dados obtidos, contendo: Medida I (*lux*), Medida II (*lux*), Valores experimentais - Média (*lux*), Valores experimentais - Média ( $W/m^2$ ), Valores teóricos ( $W/m^2$ ), Erro percentual.
5. **Comparação dos resultados:** analisar os dados obtidos experimentalmente e compará-los com os valores teóricos, avaliando a coerência e discordância entre eles, verificando se estão de acordo com a teoria.

A metodologia experimental proposta neste estudo foi concebida com foco em sua potencial aplicabilidade didática, ao possibilitar a observação direta da polarização da luz em condições controladas de laboratório. A variação da intensidade luminosa em função do ângulo entre os eixos de polarização permite ilustrar, de forma visual e acessível, os conceitos físicos envolvidos no fenômeno, oferecendo uma ferramenta que pode contribuir futuramente para o ensino de tópicos relacionados à polarização da luz.

### 1.3 Resultado e Discussões

Os dados obtidos no primeiro aparato experimental, com *lasers* de diferentes comprimentos de onda (vermelho ( $\lambda = 665$  nm), verde ( $\lambda = 532$  nm) e violeta ( $\lambda = 405$  nm)) foram analisados à luz da Lei de Malus, com o intuito de investigar a variação da intensidade luminosa em função do ângulo entre os eixos de polarização. A discussão que segue aborda a comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos esperados e as limitações inerentes ao sistema experimental utilizado.

A Tabela 1.1 apresenta os valores máximos de intensidade luminosa  $I_0$  registrados para cada *laser* utilizado, obtidos a partir das média entre duas medições consecutivas. Também são indicadas as respectivas conversões para irradiância (em  $W/m^2$ ) (utilizados para obter os valores teóricos, através da Equação (1.2), de cada *laser*, e a variação de  $\theta$  de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , em intervalos de  $10^\circ$ ) e os ângulos de translação aplicados. Esta medida foi adotada afim de garantir o alinhamento de picos experimentais com valores teóricos correspondentes a  $\theta = 0^\circ$ . Verifica-se que o *laser* vermelho exigiu uma translação de  $70^\circ$ , revelando um desalinhamento significativo entre os eixos de polarização. Já o experimento com o *laser* verde apresentou um desvio significativamente menor, de apenas  $-20^\circ$ . E, por último, o *laser* violeta apresentou uma translação angular de  $90^\circ$ , sendo esta a maior verificada no experimento.

Verifica-se, ainda, que o *laser* verde apresentou a maior intensidade luminosa média, compatível com a maior sensibilidade do luxímetro na faixa próxima a 555 nm. O *laser* vermelho, embora menos intenso, ainda gerou valores consideráveis. Já o *laser* violeta exibiu a menor intensidade registrada, o que reforça as limitações do sensor e as propriedades das ondas eletromagnéticas.

Tabela 1.1 – Valores máximos de intensidade luminosa  $I_0$  e translações angulares realizadas nos experimentos com *lasers* de diferentes comprimentos de onda.

$\lambda$ (nm) emitido pelo <i>laser</i> no experimento	Medida I $I_0$ máximo ( <i>lux</i> )	Medida II $I_0$ máximo ( <i>lux</i> )	Média ( <i>lux</i> )	Média ( $W/m^2$ )	Translação realizada ( $\theta$ )
665 (vermelho)	1267	1215	1241	9,8039	$70^\circ$
532 (verde)	5950	5910	5930	46,847	$-20^\circ$
405 (violeta)	233	235	234	1,8486	$90^\circ$

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

O Apêndice B reúne todos os dados experimentais obtidos com cada fonte de luz *laser* utilizada. Neste apêndice estão as medições em *lux*, os valores médios, as conversões para irradiância (em  $W/m^2$ ), os dados corrigidos via translação angular e os valores teóricos previstos pela Lei de Malus, além dos erros percentuais associados. A partir dessas informações, é possível avaliar, ponto a ponto, o grau de concordância entre os resultados empíricos e a função teórica descrita pela Equação (1.2), considerando os efeitos experimentais discutidos anteriormente.

Ao analisar os dados, observa-se que os valores máximos de irradiância medidos foram, em todos os casos, inferiores ao valor teórico de  $I_0$ . Tal comportamento é esperado, tendo em vista as perdas por reflexão e absorção que ocorrem nos polarizadores, nas superfícies ópticas e no próprio ambiente. A Lei de Malus pressupõe condições ideais, raramente alcançadas em experimentações reais. Além disso, nota-se que, embora teoricamente a irradiância deva ser nula quando o ângulo entre os polarizadores é de  $90^\circ$ , experimentalmente sempre se obtém valores residuais diferentes de zero. Esse desvio se deve à transmissão imperfeita dos polarizadores cruzados, à presença de luz difusa ou refletida no ambiente e o possível espalhamento da luz através das bordas do sistema óptico.

Em relação aos erros percentuais, o laser verde apresentou os menores desvios, resultado compatível com a alta sensibilidade do luxímetro na região próxima de 555 nm. No entanto, ao observar os dados com maior detalhe, verifica-se que, embora o perfil geral de variação siga o comportamento esperado, a dispersão dos erros no laser verde é ligeiramente superior à do laser vermelho em alguns ângulos intermediários. Esse comportamento pode estar associado à maior potência absoluta da irradiância registrada para esse comprimento de onda, que potencialmente contribui para a influência de efeitos sistemáticos, como saturação parcial do sensor, reflexões residuais ou pequenas instabilidades do feixe durante as medições.

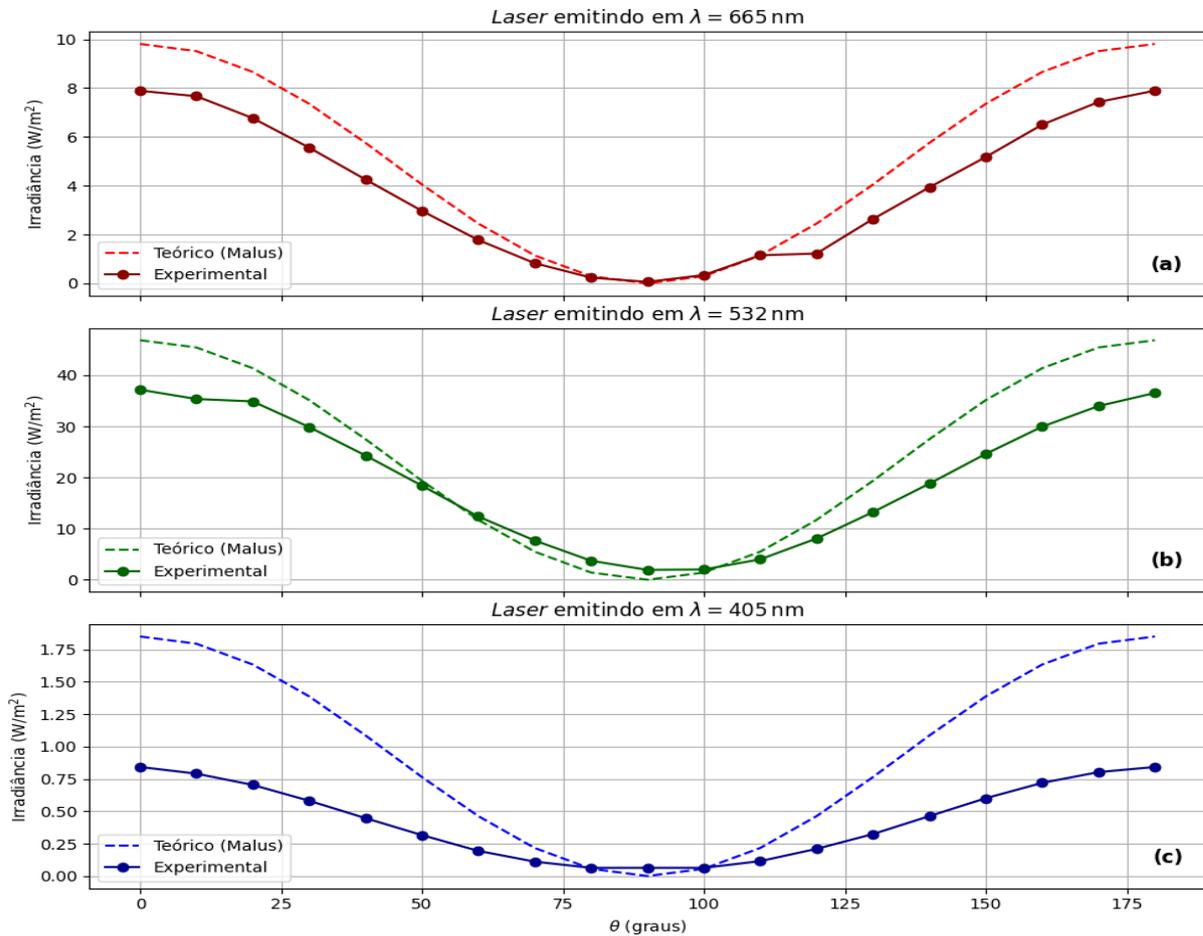
O laser vermelho, por sua vez, apresentou um comportamento global bastante consistente com a curva teórica prevista pela Lei de Malus, com erros percentuais em grande parte inferiores a 30 % ao longo dos ângulos avaliados. Destaca-se, contudo, um aumento local do erro percentual nas proximidades de  $\theta = 60^\circ$  a  $70^\circ$ , sugerindo possível sensibilidade a ruídos instrumentais nas baixas intensidades detectadas ou pequenos desalinhamentos ópticos no aparato experimental.

Já no caso do laser violeta, observa-se a maior dispersão nos dados, com erros percentuais frequentemente superiores a 100 % em regiões de baixa irradiância. Esse comportamento é coerente com a menor sensibilidade espectral do luxímetro na faixa dos 405 nm, bem como com a menor potência absoluta do feixe violeta, tornando-o particularmente suscetível a ruídos de fundo, instabilidades no detector e acúmulo de perdas ópticas ao longo do percurso. Adicionalmente, pequenas imperfeições no alinhamento dos polarizadores e na colimação do feixe contribuem para a maior variabilidade observada neste caso.

A Figura 5 ilustra graficamente os resultados obtidos com os três *lasers*, permitindo uma comparação visual entre os valores experimentais e a curva teórica prevista pela Lei de Malus. De modo geral, observa-se que a variação da irradiância em função do ângulo segue a tendência esperada, descrita pela Equação (1.3), cuja forma matemática é regida pela função trigonométrica  $\cos^2(\theta)$ . Essa função apresenta um comportamento suave e simétrico em torno de  $\theta = 0^\circ$ , com o valor máximo de  $I_0$  nesse ponto, decaindo progressivamente até atingir o valor mínimo nulo em  $\theta = 90^\circ$ , onde teoricamente a luz polarizada é completamente bloqueada. A partir daí, a função volta a crescer em módulo, refletindo a natureza periódica da componente trigonométrica. Esse perfil caracteriza uma típica curva de intensidade modulada angularmente, como previsto para sistemas ópticos com polarizadores ideais.

Além das perdas ópticas e da sensibilidade espectral do sensor, variações na colimação dos feixes *lasers* e, conseqüentemente, pequenas instabilidades na intensidade luminosa emitida por essas fontes, podem ter influenciado os resultados. Adicionalmente, imperfeições nos filtros polarizadores - como arranhões, impurezas ou falta de homogeneidade - podem alterar o padrão de transmissão da luz, mas não comprometeram a análise dos resultados observados. Também é relevante considerar que a presença de luz ambiente e reflexões indesejadas pode interferir nas medições, sobretudo nos menores níveis de intensidade. Para evitar tal efeito, foi utilizada a caixa artesanal para isolar o detector.

Figura 5 – Comparação entre os valores teóricos e experimentais de irradiância para o laser emitindo em  $\lambda = 665$  nm (vermelho) (a),  $\lambda = 532$  nm (verde) (b) e  $\lambda = 405$  nm (violeta) (c), em função do ângulo  $\theta$  entre os polarizadores.



Fonte: O autor (2025).

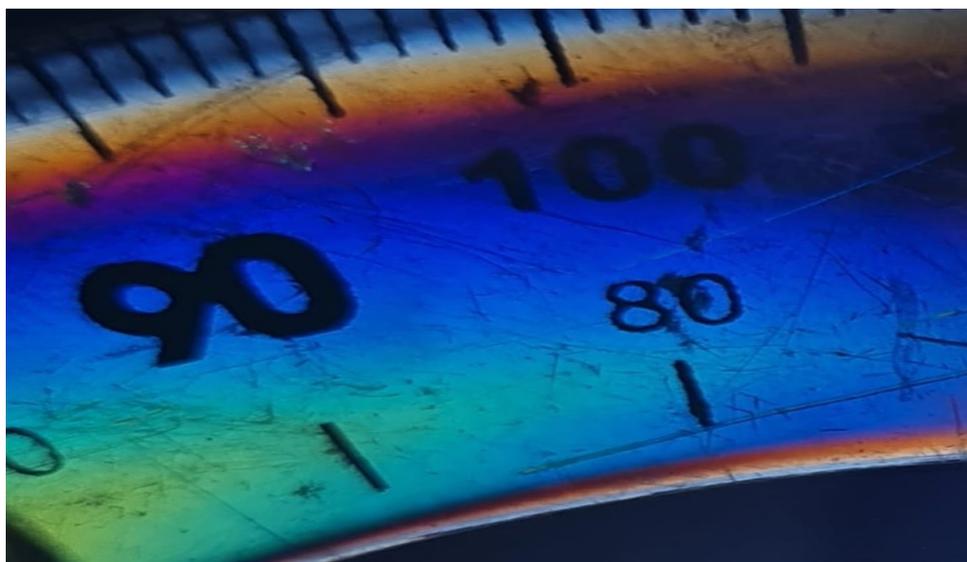
A realização desse experimento não apenas permite a verificação empírica da Lei de Malus, como também proporciona uma ótima oportunidade didática para a compreensão de conceitos fundamentais da óptica ondulatória. A análise comparativa entre dados experimentais e modelos teóricos desenvolve habilidades importantes no processo de formação científica, como o tratamento de incertezas, o pensamento crítico e a interpretação de fenômenos físicos à luz de modelos matemáticos. Assim, o experimento contribui significativamente para consolidar o entendimento dos processos de polarização da luz e das limitações inerentes às medições físicas em ambientes não ideais.

## CAPÍTULO 2 : Birrefringência em Meios Materiais

Ao abordar o tema da polarização da luz no Ensino de Física, é natural que surjam fenômenos ópticos que, além de conceitualmente ricos, se revelam também visualmente impressionantes. Entre esses fenômenos, destaca-se a birrefringência, caracterizada pela capacidade de certos materiais em decompor a luz polarizada em dois feixes distintos, formando padrões coloridos que impressionam tanto pelo aspecto estético quanto pelas implicações físicas envolvidas (ZILIO, 2017).

Um exemplo marcante dessa manifestação ocorre quando objetos plásticos, como régua ou transferidores são posicionados entre polarizadores cruzados, revelando padrões coloridos distintos que surpreendem pela beleza e pela informação física contida nesses padrões, conforme a Figura 6. A observação desse efeito em sala de aula contribui para ampliar a compreensão dos estudantes sobre o comportamento da luz e suas interações com a matéria, permitindo discussões mais profundas, como a anisotropia óptica<sup>2</sup>, interferência e propriedades dos materiais.

Figura 6 – Birrefringência observada em um transferidor plástico submetido à luz polarizada cruzada, evidenciando tensões internas no material.



Fonte: O autor (2025).

Historicamente, o interesse por esse fenômeno remonta ao século XVII, quando

---

<sup>2</sup>Anisotropia é um termo utilizado para designar materiais ou sistema que podem possuir diferentes características físicas ou mecânicas em diferentes direções (JR.; RETHWISCH, 2018).

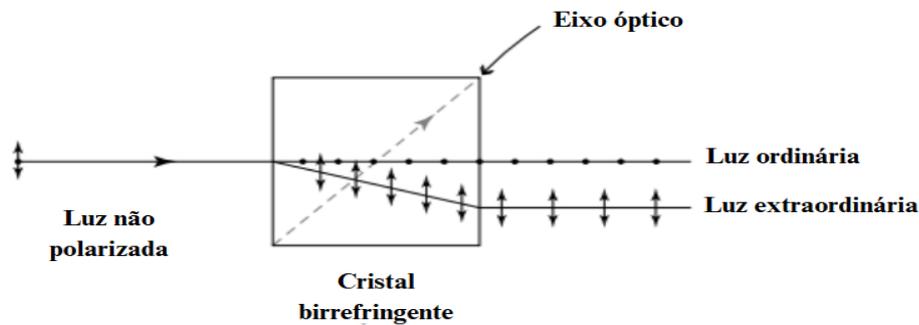
o físico dinamarquês Rasmus Bartholin observou, em 1669, que um cristal de calcita (também conhecido como espató da Islândia) fazia com que uma imagem vista através dele aparecesse duplicada - o primeiro registro da chamada dupla refração. Bartholin publicou suas descobertas na obra *Experimenta Crystalli Islandici Disdiacastici* (BARTHOLIN, 1669), estabelecendo as bases iniciais para o estudo da birrefringência. No século XVIII, Christiaan Huygens, defensor da teoria ondulatória da luz, aprofundou a explicação do fenômeno ao propor que a duplicação da imagem era resultado da propagação da luz em velocidades distintas dentro do cristal, conforme exposto em sua obra *Traité de la lumière* (HUYGENS, 1690). Posteriormente, no século XIX, Augustin-Jean Fresnel ampliou essa compreensão ao formular uma teoria matemática da propagação da luz em meios anisotrópicos, integrando a birrefringência aos fundamentos da óptica clássica com base nas equações de onda.

Fisicamente, a birrefringência é uma manifestação da anisotropia óptica de determinados materiais, ou seja, da propriedade que esses corpos apresentam ao responder de maneira distinta conforme a direção de propagação ou a orientação da polarização da luz incidente (JR.; RETHWISCH, 2018). Em meios birrefringentes, a luz incidente (especialmente quando polarizada) é separada em dois feixes distintos, denominados raio ordinário e raio extraordinário, que percorrem trajetórias ligeiramente diferentes e apresentam distintos índices de refração. Esses dois componentes são ortogonais entre si e seguem caminhos divergentes dentro do material, acumulando uma defasagem de fase à medida que se propagam (FREJLICH, 2013).

Um exemplo clássico desse fenômeno pode ser observado na Figura 7, que ilustra o comportamento da luz não polarizada ao incidir em um cristal birrefringente com o eixo óptico inclinado. Nesse caso, o raio ordinário segue uma trajetória retilínea, enquanto o extraordinário sofre desvio em relação à direção original, resultando na separação espacial de dois feixes ortogonalmente polarizados (esse tipo de fenômeno, conhecido como dupla refração, é frequentemente observado em cristais como a calcita ou a turmalina, sendo também uma demonstração recorrente em contextos educacionais para evidenciar a birrefringência). Quando esses feixes emergem do meio birrefringente e atravessam um analisador (um segundo polarizador), a diferença de fase acumulada pode gerar padrões de interferência visíveis como franjas coloridas ou variações de intensidade, dependendo do comprimento de onda da luz utilizada. Esse comportamento não se limita apenas a cris-

tais naturais: materiais inicialmente isotrópicos, como plásticos transparentes, também podem exibir birrefringência quando submetidos a tensões mecânicas internas, sendo esse o princípio explorado pela técnica da fotoelasticidade (JR.; RETHWISCH, 2018). A birrefringência, portanto, insere-se em um amplo espectro de aplicações tecnológicas e científicas - da microscopia de polarização utilizada em biologia à operação de telas de cristal líquido (LCD) e à detecção de tensões residuais em materiais poliméricos.

Figura 7 – Ilustração do fenômeno de dupla refração em cristal birrefringente, mostrando a separação da luz não polarizada em dois feixes ortogonalmente polarizados: o raio ordinário e o extraordinário. O desvio do raio extraordinário resulta da anisotropia óptica do material, evidenciando a birrefringência.



Fonte: O autor (2025).

Sob a perspectiva educacional, a introdução da birrefringência no contexto escolar configura-se como uma possibilidade valiosa para enriquecer o ensino de Óptica. A visualização direta dos efeitos da polarização em materiais anisotrópicos favorece a compreensão de conceitos abstratos de forma concreta e acessível, sendo apontada por autores como um recurso eficaz na mediação do ensino de fenômenos ópticos complexos (HECHT, 2017). Ademais, os experimentos que exploram esse fenômeno podem ser executados com recursos relativamente simples, como o uso de polarizadores e fontes de luz — coerente ou branca — tornando-se viáveis mesmo em ambientes com infraestrutura laboratorial limitada.

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica da birrefringência, bem como experimentos propostos para investigação qualitativa do fenômeno no contexto da polarização da luz, com potencial aplicação didática, ainda que não tenham sido efetivamente aplicados em situações de ensino.

## 2.1 A Técnica da Fotoelasticidade

A técnica da fotoelasticidade representa uma aplicação notável da birrefringência induzida, sendo amplamente empregada na análise de tensões internas em materiais anisotrópicos. Seu princípio baseia-se na observação de padrões de interferência gerados pela luz polarizada ao atravessar um corpo anisotrópico. Esses padrões, frequentemente coloridos e visualmente complexos, como ilustrado a Figura 6, permitem inferências qualitativa sobre a distribuição de esforços internos em estruturas submetidas a cargas (COKER; FILON, 1957).

Historicamente, os primeiros estudos sistemáticos sobre a relação entre tensões mecânicas e efeitos ópticos remontam ao século XIX. Um dos precursores dessa abordagem foi o físico escocês David Brewster, que observou, em 1816, a birrefringência em materiais vítreos sob tensão e publicou seus achados na obra *A Treatise on Optics* (BREWSTER, 1831). No entanto, foi apenas no século XX que a técnica da fotoelasticidade se consolidou como ferramenta científica e de engenharia, com os trabalhos de E. G. Coker e L. N. Filon, autores do clássico *A Treatise on Photo-Elasticity* (COKER; FILON, 1957), em que sistematizaram métodos experimentais e fundamentos teóricos para análise de tensões com base em padrões fotoelásticos.

Do ponto de vista físico, a fotoelasticidade se apoia na premissa de que certos materiais inicialmente isotrópicos (como plásticos transparentes) passam a apresentar comportamento anisotrópico quando submetidos a tensões internas. Essas tensões alteram localmente o índice de refração do material de forma desigual, de modo que a luz polarizada que o atravessa se divide em dois raios com velocidades distintas, produzindo interferências visíveis sob a ação de um analisador (segundo polarizador). O resultado são figuras chamadas isocromáticas, que indicam regiões de igual diferença de fase, e isóclinas<sup>3</sup>, que revelam as direções principais de tensão.

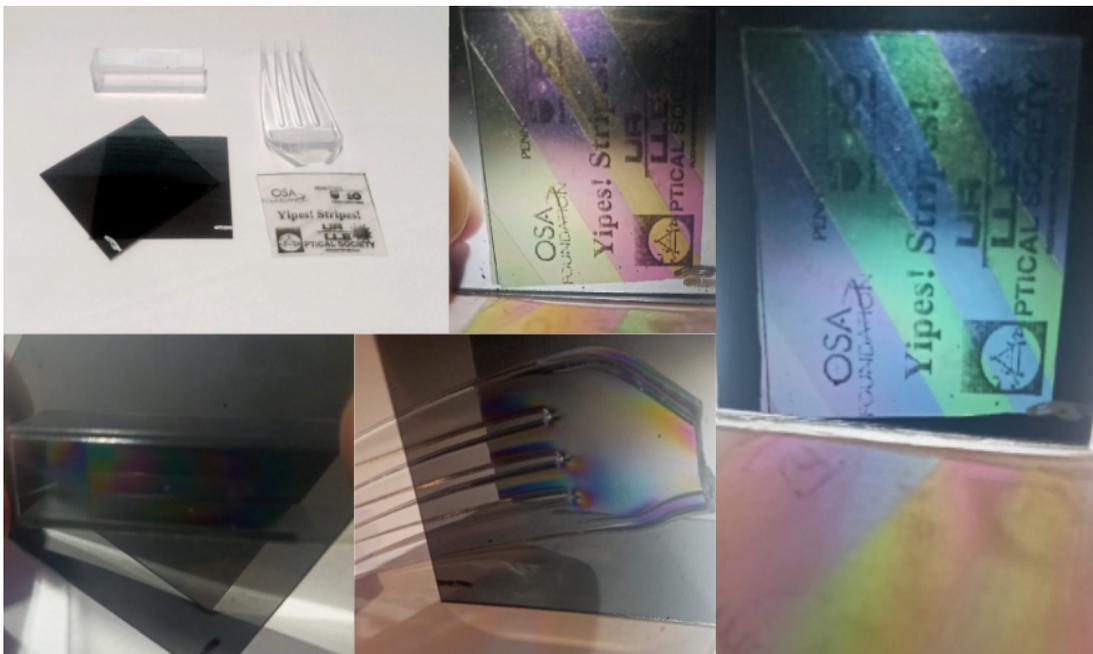
Além de seu valor técnico e científico, a fotoelasticidade destaca-se também como uma ferramenta pedagógica de grande potencial no Ensino de Física. Por permitir a visualização direta e intuitiva de conceitos abstratos da óptica, favorece o aprendizado significativo por meio da experimentação. Utilizando-se de kits didáticos simples, como o apresentado na Figura 8, é possível demonstrar os padrões de interferência gerados pela

---

<sup>3</sup>Isóclinas são curvas que indicam as direções principais de tensão em um determinado material ou estrutura. Essas direções correspondem aos eixos nos quais as tensões normais atingem seus valores máximos e mínimos, sem a presença de tensões de cisalhamento (JR.; RETHWISCH, 2018).

birrefringência induzida em objetos sob diferentes configurações de polarização. Com materiais de fácil obtenção, como polarizadores lineares, fontes de luz branca, utensílios plásticos, plaquetas transparentes e cubos de acrílico, os estudantes podem observar, de forma intuitiva, como os padrões ópticos variam conforme o ângulo entre os filtros, evidenciando a interação entre luz polarizada e meios anisotrópicos.

Figura 8 – Kit didático de fotoelasticidade (fornecido pelo grupo OPTICA CHAPTER UEPB, do Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba) composto por polarizadores, cubo de acrílico e elementos plásticos, submetidos a tensões internas. A incidência de luz polarizada revela padrões de interferência (franjas isocromáticas), permitindo a visualização qualitativa das distribuições de tensões nos materiais, conforme os princípios da técnica da fotoelasticidade.



Fonte: O autor (2025).

A utilização de kits experimentais, como os mencionados anteriormente, permite a criação de atividades práticas que articulam teoria e experimentação de modo integrado. A manipulação direta dos experimentos e a observação dos fenômenos ópticos proporcionam oportunidades para consolidar conceitos relacionados à polarização e à birrefringência, além de favorecer o desenvolvimento de competências investigativas mesmo sem a necessidade de análises quantitativas complexas (FREJLICH, 2013). Nesse contexto, a inserção de meios birrefringentes em sistemas ópticos com polarizadores amplia as possibilidades didáticas, possibilitando que diferentes alterações no estado de polarização

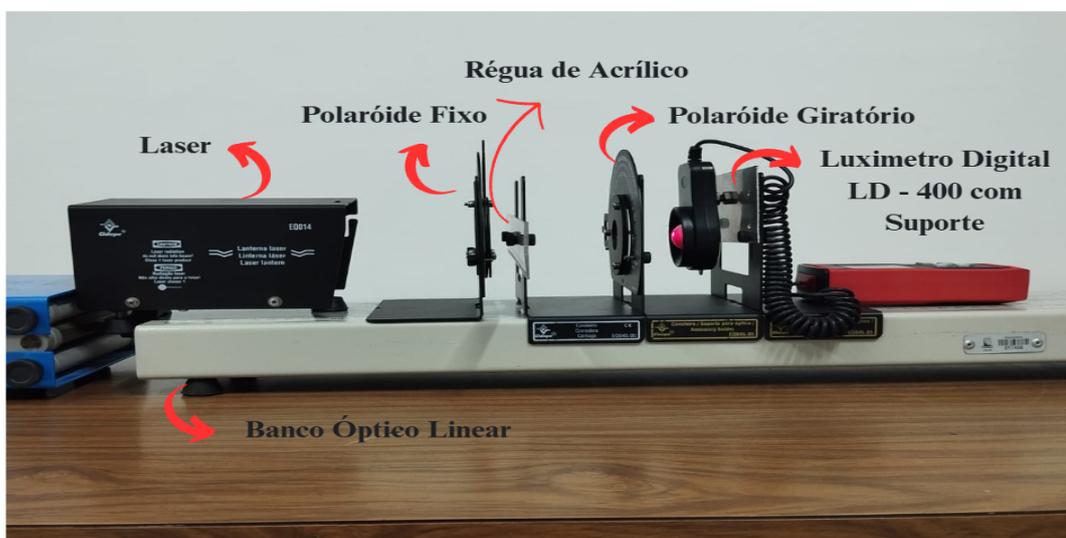
da luz sejam observadas de forma qualitativa. A seguir, apresenta-se o segundo dispositivo experimental elaborado neste trabalho, destinado à investigação qualitativa do fenômeno através da associação entre polarizadores e um meio birrefringente.

## 2.2 Dispositivo 2 : Associação de Polarizadores e Meio Birrefringente

Dando continuidade às atividades experimentais propostas neste trabalho, o segundo dispositivo didático tem como finalidade realizar uma análise qualitativa da birrefringência em materiais anisotrópicos quando expostos à luz polarizada. Essa configuração experimental permite observar, de maneira acessível, como a inserção de um meio birrefringente altera o estado de polarização da luz e, conseqüentemente, modifica a intensidade da luz transmitida por um sistema óptico composto por múltiplos polarizadores.

A Figura 9 ilustra a montagem empregada, evidenciando os principais componentes empregados: *lasers* (com emissão linearmente polarizada, conforme discutido no Capítulo 1), dois polarizadores (sendo um fixo e outro giratório), uma régua de acrílico transparente atuando como meio birrefringente passivo, um luxímetro digital LD-400 com foto detector acoplado a um suporte fixo, além de um banco óptico linear, responsável por garantir o alinhamento dos elementos ópticos.

Figura 9 – Montagem experimental do Dispositivo 2, composto por *laser*, polaróide fixo, régua de acrílico (meio birrefringente), polaróide giratório e luxímetro digital LD-400 com suporte. O experimento foi realizado sobre um banco óptico linear, permitindo o alinhamento dos elementos. A variação angular do polaróide giratório possibilitou a análise qualitativa da birrefringência induzida no material.



O experimento consistiu em analisar da luz transmitida ao longo do sistema quando a régua de acrílico, atuando como meio birrefringente, é posicionada entre dois polarizadores cruzados. O primeiro polaróide foi fixado a  $90^\circ$ , enquanto o segundo polaróide foi manualmente rotacionado de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , em intervalos de  $10^\circ$ . Foram utilizados dois *lasers* monocromáticos: um emitindo em  $\lambda = 532$  nm (verde) e outro emitindo em  $\lambda = 665$  nm (vermelho), testados individualmente sob as mesmas condições experimentais.

A fim de reduzir perdas ópticas, o espaçamento entre os componentes ópticos foi minimizado, buscando de mitigar efeitos indesejados de dispersão, reflexão ou difração. As intensidades da luz transmitidas foram registradas pelo luxímetro digital, ajustado para a escala de 2000 *lux*. Para garantir maior confiabilidade nas medições, o fotodetector foi posicionado dentro de uma caixa artesanal opaca, com o intuito de mitigar interferências provenientes da luz ambiente. Ressalta-se que o ambiente ideal para execução do experimento deve ser o mais escuro possível, embora a utilização da caixa permita certa flexibilidade quanto às condições de iluminação externa.

A fundamentação teórica da atividade baseia-se no comportamento da luz polarizada ao atravessar meios birrefringentes, que apresentam índices de refração distintos conforme a direção de vibração da onda luminosa. Ao incidir sobre o material anisotrópico, a luz se decompõe em dois feixes com polarizações ortogonais, chamados raios ordinário e extrassensório, gerando uma defasagem relativa entre eles. Ao emergirem do meio birrefringente e incidirem no segundo polarizador (o analisador), essas componentes interferem entre si, modificando a intensidade transmitida em função do ângulo de análise.

Cabe destacar, adicionalmente, as perdas de intensidade decorrentes da reflexão parcial nas interfaces ópticas e da absorção dos polaróides. De acordo com a Lei de Fresnel (ver Capítulo 1), parte da luz incidente em cada elemento é refletida, especialmente nas transições entre meios com diferentes índices de refração. Tais perdas tornam-se ainda mais relevantes quando há múltiplos elementos no trajeto óptico, como o presente. Por essa razão, não foi possível utilizar o *laser* emitindo em  $\lambda = 405$  nm (violeta): devido à sensibilidade limitada do luxímetro nessa faixa espectral, a intensidade restante da luz - após múltiplas interações com os polarizadores e o meio birrefringente - foi insuficiente para gerar medições confiáveis na escala adotada.

O procedimento experimental foi estruturado da seguinte forma:

1. **Configuração dos polarizadores:** posicionar o primeiro polaróide a  $90^\circ$  e o se-

gundo a  $0^\circ$ , com o meio birrefringente inserido entre eles.

2. **Aquisição de dados:** girar o segundo polaróide de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  graus, em incrementos de  $10^\circ$ . Para cada ângulo, aguardar de 30 segundos a 1 minuto para estabilização da leitura e registrar a intensidade luminosa no luxímetro. Repetir o procedimento completo três vezes.
3. **Repetição para outros comprimentos de onda:** repetir todo o procedimentos anteriores utilizando o segundo *laser* (verde ou vermelho, a depender da escolha inicial), mantendo as mesmas condições experimentais.
4. **Análise computacional:** processar os dados obtidos por meio de um programa desenvolvido especificamente para esta atividade, com as seguintes funcionalidades:
  - Cálculo da média aritmética entre as três medições;
  - Geração automática de tabelas com os valores obtidos (Medida I, II, III e Média).

O código completo utilizado para o processamento dos dados e plotagem gráfica encontra-se disponível no Apêndice C deste trabalho.

5. **Discussão dos resultados:** comparar os dados com os do primeiro experimento (Lei de Malus sem meio birrefringente), avaliando as diferenças observadas e a influência da birrefringência na modulação da intensidade transmitida.

A montagem experimental permite observar de forma clara os efeitos da birrefringência em materiais de baixo custo, como o acrílico, a partir da variação angular entre os polarizadores que sucedem a passagem do feixe laser pelo meio birrefringente. As variações na intensidade transmitida, resultantes da diferença de fase induzida, evidenciam a natureza vetorial da luz e sua dependência angular. Embora a atividade não tenha sido aplicada em contexto escolar, o experimento possibilita analisar os fenômenos envolvidos e destacar a influência do alinhamento dos componentes ópticos, bem como a necessidade de controle das condições experimentais para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade das medições.

### 2.3 Resultados e Discussões

Os dados experimentais apresentados no Apêndice D evidenciam padrões distintos de variação da intensidade luminosa em função do ângulo entre dois polarizadores, com a presença de um meio birrefringente interposto. Os experimentos foram realizados utilizando dois *lasers* monocromáticos (conforme já mencionado na metodologia), e os valores registrados correspondem às médias de três medições independentes para cada ângulo, variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  com incrementos regulares de  $10^\circ$ .

Em relação ao experimento anterior (ver Seção 1.2), no qual apenas um polarizador foi utilizado, observa-se que os comportamentos medidos apresentam similaridade qualitativa. No dispositivo 1, a variação da intensidade luminosa observada obedecia à Equação (1.2), com máxima transmissão quando os polarizadores estavam alinhados ( $\theta = 0^\circ$ ) e mínima quando dispostos ortogonalmente ( $\theta = 90^\circ$ ). Essa simetria em torno dos  $90^\circ$ , embora de difícil percepção visual (uma vez que o primeiro polarizador era o próprio feixe *laser*), foi constatada tanto nos dados experimentais quanto nos valores teóricos calculados para os três comprimentos de onda analisados.

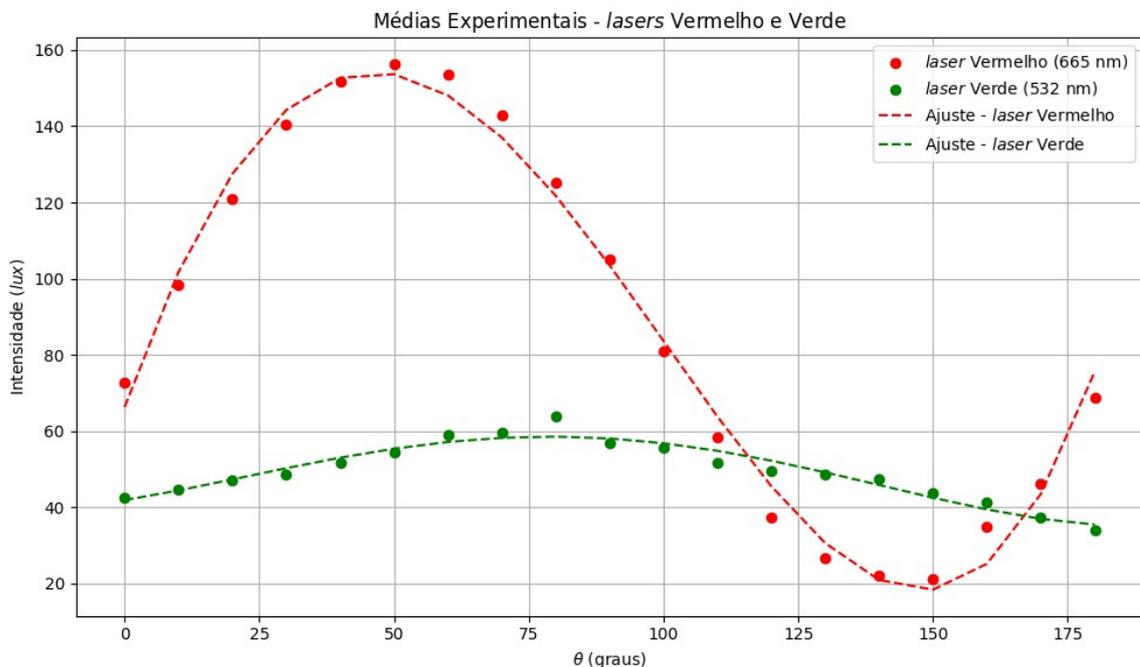
No presente experimento, o sistema óptico pode ser conceitualmente dividido em três partes: o conjunto emissor (*laser* + polarizador fixo), o meio birrefringente (régua de acrílico transparente) e o analisador rotativo (segundo polarizador). Como o *laser* e o primeiro polarizador mantiveram sua orientação constante ao longo da coleta de dados, considerou-se ambos como um único sistema emissor de luz linearmente polarizada.

A introdução do meio birrefringente altera substancialmente o comportamento da luz transmitida, como visto na Figura 10. Isso ocorre porque a birrefringência do acrílico induz uma defasagem relativa entre as componentes ortogonais do campo elétrico da luz polarizada, modificando seu estado de polarização original. Como resultado, mesmo quando os polarizadores estão dispostos em ângulo reto ( $\theta = 90^\circ$ ) entre eles, o feixe de luz não é completamente bloqueado, uma vez que a componente resultante da luz emergente do acrílico já não se encontra perfeitamente perpendicular à orientação do analisador.

Essa alteração do estado de polarização pode ser claramente observada nos resultados obtidos com o *laser* vermelho. A curva de intensidade apresenta um padrão oscilatório qualitativamente semelhante ao do experimento anterior, mas com uma defasagem angular de aproximadamente  $10^\circ$  e amplitude reduzida (se comparadas aos dados do Apêndice B - Média (*lux*)). Tais alterações podem ser atribuídas a perdas por reflexão, absorção

e espalhamento ao longo do trajeto óptico, especialmente ao atravessar o meio acrílico. Destaca-se que, em nenhum ângulo, a intensidade luminosa caiu a zero, o que reforça a ideia de que a régua de acrílico atuou como um elemento perturbador da polarização - modificando sua orientação e impedindo o cancelamento total da luz no analisador.

Figura 10 – Médias experimentais da intensidade luminosa transmitida em função do ângulo  $\theta$  entre polarizadores cruzados, com a presença de um meio birrefringente (régua de acrílico transparente). Observa-se que a intensidade não se anula em  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 180^\circ$ , devido à alteração do estado de polarização imposta pelo meio birrefringente. Além disso, nota-se que em  $\theta = 90^\circ$  a intensidade não atinge seu valor máximo teórico, evidenciando a defasagem introduzida pela birrefringência.



Fonte: O autor (2025).

Com o *laser* verde, observou-se um comportamento análogo, porém com defasagem angular mais acentuada e intensidade média menor. Essa discrepância pode ser explicada por uma combinação de fatores ópticos e experimentais que influenciaram o desempenho deste feixe durante o experimento. Entre os principais aspectos observados, destacam-se:

1. Desalinhamento do feixe de *laser* no trajeto óptico, o que pode ter diminuído a intensidade efetivamente medida.
2. Espalhamento ou imperfeições na superfície do acrílico, que poderiam afetar de modo desigual as diferentes frequências de luz, principalmente se houver microfissuras

internas ou tensões ópticas residuais.

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram qualitativamente como a introdução de um meio birrefringente afeta a propagação da luz polarizada, modificando seu estado de polarização e influenciando diretamente a intensidade detectada. Esse comportamento é fundamental para a compreensão de fenômenos ópticos em materiais anisotrópicos e constitui base conceitual para diversas aplicações, como a fotoelasticidade. No presente trabalho, essa atividade foi proposta como um modelo experimental de investigação qualitativa dos efeitos da birrefringência, com a finalidade de ilustrar os fenômenos físicos envolvidos e subsidiar futuras discussões no âmbito do ensino de óptica.

#### 2.4 Dispositivo 3 : Efeito da Elipsidade em Meio Birrefringente

Dando continuidade à análise experimental da polarização da luz, outra aplicação didaticamente rica e cientificamente relevante que envolve a investigação do comportamento da luz em meios birrefringentes é quando o estado de polarização da luz deixa de ser linear para se tornar *elipticamente polarizado*.

Na prática da fotoelasticidade, a luz que emerge de um sistema óptico composto por uma lâmina birrefringente sob tensão entre dois polarizadores pode apresentar um comportamento singular, a polarização elíptica. Tal condição resulta da diferença de fase acumulada entre os componentes ortogonais do campo elétrico, que se propagam com velocidades distintas ao longo dos eixos principais do material birrefringente (DUREE, 2011), conforme a Figura 7. Quando essa diferença de fase não corresponde a um múltiplo inteiro de  $\pi$ , a superposição das ondas com amplitudes e fases distintas produz uma oscilação elíptica do vetor campo elétrico.

Esse fenômeno é de especial interesse na técnica da fotoelasticidade, uma vez que a análise dos padrões de interferência gerados depende do conhecimento da diferença de fase  $\phi$  entre os dois componentes ortogonais da luz. Essa diferença está diretamente associada à distribuição de tensões internas no meio material. A elipsidade pode ser analisada a partir da variação da intensidade da luz transmitida, observada por meio de um analisador rotativo, permitindo a determinação de  $\phi$  e, conseqüentemente, do índice de birrefringência  $\Delta n$  com base nas expressões (FREJLICH, 2013):

$$\cos \phi = \frac{I_M/I_m - 1}{I_M/I_m + 1} \quad \text{e} \quad (2.1)$$

$$d \Delta n = \pm \frac{\phi \lambda}{2\pi}, \quad (2.2)$$

onde  $I_M$  representa a intensidade luminosa máxima transmitida (quando os eixos de polarização estão alinhados com a direção da luz emergente),  $I_m$  corresponde à intensidade mínima (quando estão ortogonais),  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz incidente,  $d$  é a espessura da lâmina birrefringente e  $\Delta n = n_e - n_o$  representa a diferença entre os índices de refração extraordinário e ordinário do material.

Essa característica, conforme demonstrado em experimentos como os de Benedek e Villars, permite inferir quantitativamente o comportamento óptico de materiais birrefringentes com alta sensibilidade, utilizando fontes monocromáticas (como *lasers* ou LEDs de comprimento de onda fixo) e dispositivos de análise como fotodetectores e osciloscópios (BENEDEK; VILLARS, 1971).

A luz elipticamente polarizada constitui, assim, uma consequência natural da interação entre luz polarizada linearmente e meios anisotrópicos. Sua análise permite não apenas a compreensão qualitativa do fenômeno da birrefringência, mas também a extração de dados quantitativos. Elementos como a orientação dos polarizadores, o ângulo de incidência da lâmina birrefringente e o comprimento de onda da luz incidente influenciam diretamente o grau de elipsidade e a forma dos padrões observados no analisador, que variam desde regiões de escurecimento até estruturas mais complexas.

Essa perspectiva também é abordada em materiais voltados à educação em Óptica, como na obra *Óptica: Fundamentos e Aplicações* (GROSS, 2013), que apresenta modelos conceituais simplificados para a interpretação dos estados de polarização emergentes, além de propor experimentos acessíveis utilizando polarizadores cruzados e lâminas retardadoras, visando à identificação de estados de polarização linear, circular e elíptica.

Com o intuito de explorar essas particularidades, foi desenvolvido o Dispositivo 3, projetado para investigar como a diferença de fase  $\phi$ , resultante da birrefringência, afeta o estado de polarização da luz transmitida e como, a partir dessa informação, é possível determinar com precisão o índice de refração  $\Delta n$ . Essa análise é central no contexto da fotoelasticidade, onde a polarização elíptica decorre diretamente da interação entre luz polarizada e materiais anisotrópicos submetidos a tensões.

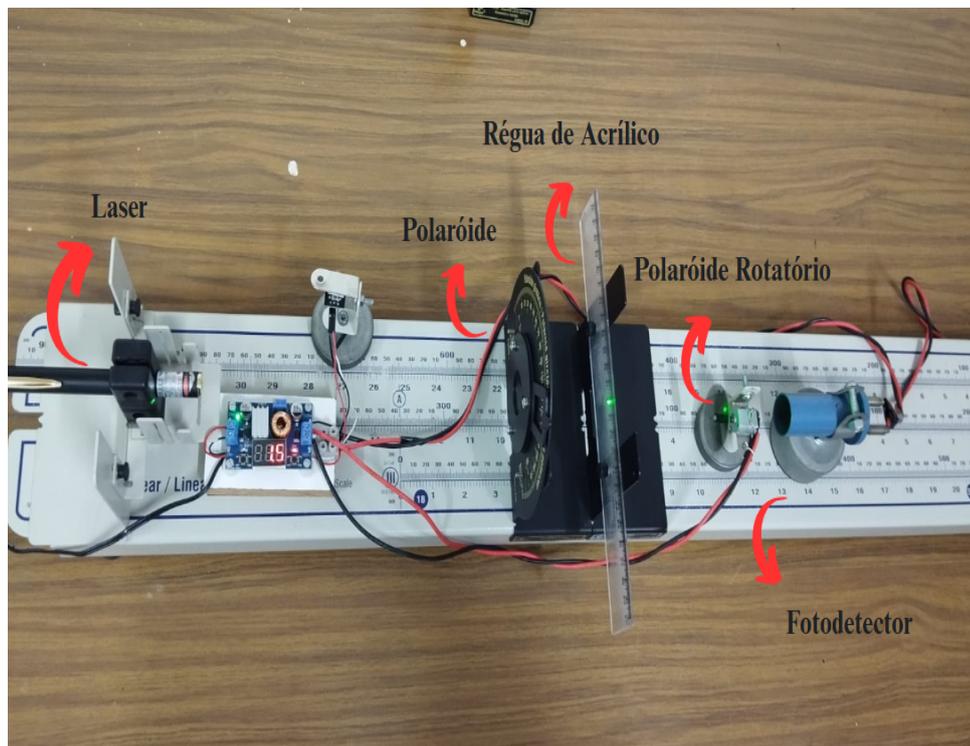
A diferença de fase  $\phi$  entre os raios ordinário e extraordinário pode ser encontrada através da Equação (2.2). Tal equação estabelece uma relação direta entre as propriedades

ópticas e estruturais do meio e os efeitos observáveis no estado de polarização da luz emergente.

Determinando-se experimentalmente o valor de  $\phi$ , por meio da análise da elipsidade da luz (via variação de intensidade observada com um polarizador rotativo), torna-se possível calcular  $\Delta n$ , estabelecendo uma relação entre as propriedades ópticas do material e as modificações induzidas no campo elétrico da luz. Essa abordagem experimental, aqui proposta, permite explorar de forma qualitativa o fenômeno da birrefringência e sua aplicação em contextos de investigação em óptica.

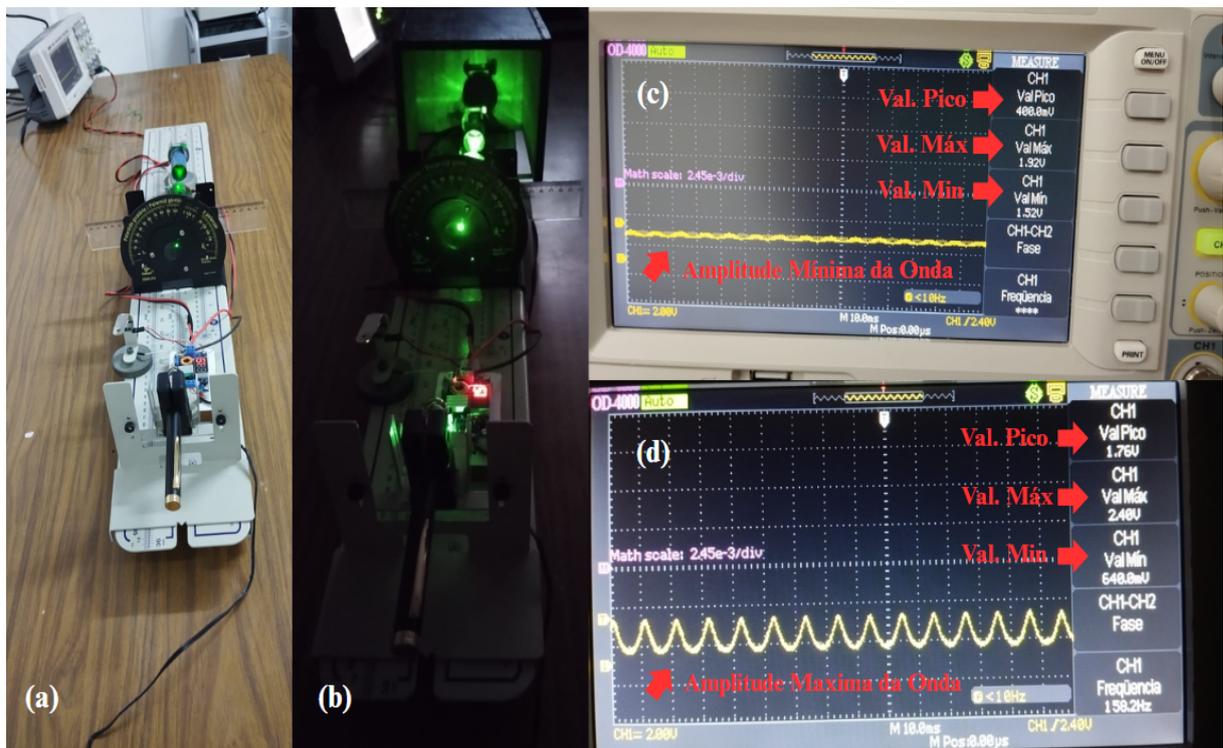
A montagem experimental utilizada baseia-se na proposta descrita na referência (FREJLICH, 2013) e foi dividida em duas etapas para facilitar o acompanhamento. A primeira etapa, ilustrada na Figura 11, envolve uma fonte de *laser* monocromática, um polaróide linear fixo e um analisador rotativo acoplado a um motor com velocidade angular constante. O conjunto é disposto sobre um banco óptico linear, de forma a garantir o alinhamento de todos os componentes.

Figura 11 – Montagem experimental do Dispositivo 3. O feixe *laser* atravessa um polaróide fixo, incide sobre o meio birrefringente posicionado entre os polarizadores e é analisado por um polaróide rotatório. A intensidade da luz transmitida é registrada por um fotodetector ao final do percurso óptico.



A segunda etapa, apresentada na Figura 12, consiste na integração do sistema de aquisição de dados. Após atravessar o sistema óptico, a luz incide sobre um fotodetector, posicionado dentro de uma caixa opaca com o objetivo de reduzir interferências externas. O sinal elétrico gerado pelo detector é então monitorado por um osciloscópio digital.

Figura 12 – Montagem experimental do Dispositivo 3; registro dos sinais no osciloscópio antes da medida (a) e durante a medida (b), realizada no escuro; registro dos sinais no osciloscópio, onde foram verificados os sinais de mínima transmissão (c) e máxima transmissão (d).



Fonte: O autor (2025).

O osciloscópio desempenha papel central na análise, pois possibilita a visualização da variação temporal da intensidade luminosa convertida em sinal elétrico. A tensão gerada, proporcional à intensidade da luz incidente, é representada no eixo vertical, enquanto o tempo é exibido no eixo horizontal.

Quando o analisador está em rotação contínua, a intensidade da luz transmitida varia periodicamente em função do ângulo, resultando em um sinal senoidal (característica típica da luz elipticamente polarizada). Em contrapartida, com o analisador fixo, o sinal tende a permanecer constante, refletindo uma intensidade estacionária.

A forma de onda exibida no osciloscópio permite extrair informações fundamen-

tais para a análise da birrefringência. Em especial, são observados os valores de tensão máxima ( $V_{\text{máx}}$ ) e mínima ( $V_{\text{mín}}$ ) correspondentes, respectivamente, à máxima e mínima intensidade de luz transmitida. A diferença entre esses dois valores define a amplitude do sinal ( $V_{\text{pico}} = V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}$ ), a qual será utilizada nos cálculos da diferença de fase  $\phi$  entre os dois componentes ortogonais da onda luminosa. Essa diferença de fase é diretamente relacionada à variação  $\Delta n$ , de acordo com a Equação (2.2).

Adicionalmente, o osciloscópio fornece medições automáticas da tensão de pico, frequência e fase, facilitando a análise quantitativa. A frequência, por exemplo, permite verificar a constância da velocidade de rotação do analisador, enquanto a forma senoidal e a estabilidade das medições indicam a confiabilidade do aparato experimental.

O procedimento experimental foi estruturado da seguinte forma:

1. **Configuração do experimento:** posicionar o primeiro polaróide em um ângulo inicial arbitrário e inserir a lâmina birrefringente (régua de acrílico) entre os dois polaróides; conectar o segundo polaróide (analisador) ao motor rotativo e alinhar o sistema óptico com o feixe *laser*.
2. **Medição da espessura:** medir a espessura da régua de acrílico com paquímetro ou régua milimetrada, obtendo o valor de  $d$  necessário para o cálculo de  $\Delta n$ .
3. **Ajuste e observação:** girar lentamente o primeiro polaróide até observar no osciloscópio uma curva senoidal estável, associada à modulação da intensidade causada pela elipsidade da luz.
4. **Determinação de picos:** identificar os valores máximos ( $I_M$ ) e mínimos ( $I_m$ ) da curva no osciloscópio. Como a diferença entre esses pontos é de  $45^\circ$ , a localização de um permite determinar o outro.
5. **Coleta de dados:** realizar o procedimento completo para cada posição e registrar no osciloscópio o conjuntos de  $I_M$  e  $I_m$ , referentes aos valores de Val. Pico, Val. Máx e Val. Mín (com o aguardo de 1 minuto e 30 segundos para cada medição). Repetindo este procedimento quatro vezes para cada *laser*: vermelho ( $\lambda = 665$  nm) e verde ( $\lambda = 532$  nm), obtendo quatro conjuntos de  $I_M$  e  $I_m$  para posterior cálculo da média.

6. **Processamento computacional:** todos os dados experimentais são processados por um programa em Python desenvolvido especificamente para este experimento (vide Apêndice E). O programa recebe como entrada os pares  $I_M$  e  $I_m$  referentes aos valores de Val. Pico, Val. Máx e Val. Mín, conforme ilustrado na Figura 12. A partir desses dados, o código calcula automaticamente a diferença de fase  $\phi$  e determina o índice de birrefringência  $\Delta n$  com base nas equações (2.1) e (2.2). O programa também gera planilhas contendo os valores médios e individuais, além de apresentar os dados em gráficos para facilitar a visualização e interpretação.
7. **Comparação e análise dos dados:** com os resultados obtidos para os dois comprimentos de onda utilizados (vermelho e verde), o programa permite comparar a birrefringência  $\Delta n$  em função da frequência da luz incidente. Essa comparação é útil para investigar eventuais dependências espectrais da birrefringência no material utilizado. Além disso, as variações entre os conjuntos de medições são analisadas estatisticamente para avaliar a confiabilidade dos dados. O comportamento das curvas também pode ser contrastado com os modelos teóricos esperados, permitindo a discussão de possíveis fontes de erro, como imperfeições na colimação do feixe, variações na espessura do material ou desalinhamentos no sistema óptico.

Esse experimento configura uma abordagem viável para o estudo da birrefringência, permitindo uma análise qualitativa das interações entre luz polarizada e materiais anisotrópicos. A investigação da elipsidade, associada a técnicas de detecção óptica e processamento de sinais, possibilita examinar os efeitos da diferença de fase e da interferência resultantes da propagação da luz em meios anisotrópicos.

## 2.5 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta a análise dos dados obtidos com o Dispositivo 3, com o objetivo de estimar o índice de birrefringência  $\Delta n$  do acrílico (PMMA)<sup>4</sup> submetido a tensões internas residuais. As medições foram realizadas por meio de um arranjo óptico com polarizadores cruzados e *lasers* monocromáticos emitindo em dois comprimentos de onda distintos: vermelho (665 nm) e verde (532 nm). Os sinais resultantes, capturados por um

---

<sup>4</sup>PMMA é a sigla para *Polimetilmetacrilato*, um polímero termoplástico transparente amplamente utilizado em aplicações ópticas e estruturais. Devido à sua alta transmitância óptica e resposta mecânica previsível, é frequentemente empregado em experimentos de birrefringência e fotoelasticidade como um material birrefringente acessível e de fácil usinagem (KOJO; TAGAYA; KOIKE, 2012).

fotodetector e exibidos em um osciloscópio, permitiram a determinação das intensidades luminosa máximas e mínimas para diferentes ângulos de polarização. O processamento dos dados foi conduzido com o auxílio de um *script* desenvolvido em linguagem Python (vide Apêndice E), e os conjuntos completos de medições encontram-se organizados no Apêndice F.

Os valores médios obtidos para o índice de birrefringência  $\Delta n$  foram os seguintes:

- *Laser* vermelho (665 nm):  $\Delta n_{\text{vermelho}} = 2,3537 \times 10^{-3}$
- *Laser* verde (532 nm):  $\Delta n_{\text{verde}} = 1,6193 \times 10^{-3}$

Os valores típicos da birrefringência para o PMMA sob tensão mecânica são da ordem de  $\Delta n \approx 3,87 \times 10^{-3}$ , conforme reportado em (TAGAYA; KOIKE, 2012). No experimento, a amostra (régua de acrílico) não foi submetida a cargas externas (a birrefringência observada resulta predominantemente de tensões internas residuais oriundas do processo de fabricação ou corte do material), o que condiz com um  $\Delta n \approx 1,98 \times 10^{-3}$  (média entre  $\Delta n_{\text{vermelho}}$  e  $\Delta n_{\text{verde}}$ ).

Outro aspecto relevante observado foi a variação sistemática dos valores de  $\Delta n$  em função do comprimento de onda. Tal diferença está associada à dispersão cromática do PMMA, um fenômeno no qual o índice de refração do material depende da frequência da luz incidente. Conforme dados compilados em (SZCZUROWSKI, 2013), o índice de refração do acrílico varia com o aumento do comprimento de onda da luz incidente. Essa relação impacta diretamente a elipticidade da luz emergente e, portanto, a intensidade da birrefringência detectada. Estudos adicionais, como os realizados pela fabricante Shimadzu, utilizando o refratômetro KPR-300, também confirmam essa dependência espectral para o PMMA (CORPORATION, 2020), reforçando a influência da dispersão óptica nos resultados experimentais.

A diferença entre os valores médios de  $\Delta n$  obtidos com os dois *lasers* pode ser compreendida à luz de fatores experimentais e instrumentais, dentre os quais se destacam:

1. Incerteza na leitura dos picos no osciloscópio: a identificação precisa dos valores máximos e mínimos de intensidade luminosa nem sempre foi possível, devido à presença de ruído eletrônico, instabilidades no sinal ou baixa modulação da forma de onda. Tais flutuações podem gerar incertezas na determinação da diferença de fase  $\phi$  e, conseqüentemente, no cálculo de  $\Delta n$ .

2. Dispersão cromática e efeitos térmicos: além da dependência espectral do índice de refração, a temperatura do ambiente e do material pode ter influenciado os resultados. Durante o experimento, foi observado que o *laser* verde apresentava maior intensidade luminosa e aquecimento aparente em comparação ao vermelho. Esse efeito térmico, aliado ao tempo de estabilização necessário (cerca de 1 minuto e 30 segundos), pode ter afetado a resposta óptica do sistema.
3. Baixo contraste interferométrico: em algumas séries, observou-se que a razão entre os valores de tensão máxima e mínima não era suficientemente acentuada, indicando modulação fraca na elipticidade da luz. Essa condição limita a precisão na determinação da diferença de fase e, por conseguinte, da birrefringência.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos demonstraram de forma clara a alteração no estado de polarização da luz ao atravessar um meio birrefringente. A visualização das formas de onda no osciloscópio, em função da variação angular entre os polarizadores, mostrou-se eficaz para ilustrar os diferentes estados de polarização (linear, elíptica e circular) de maneira acessível e didaticamente relevante.

A consistência entre as repetições experimentais para cada comprimento de onda, associada à diferença sistemática observada entre as fontes de luz *lasers* verde e vermelha, evidencia a confiabilidade do método. Em síntese, a atividade proposta proporciona aos estudantes uma abordagem concreta, acessível e significativa do fenômeno da birrefringência em materiais anisotrópicos.

### CAPÍTULO 3 : O Efeito Brewster com Luz Polarizada

Após explorarmos fenômenos fundamentais da polarização da luz - como a Lei de Malus, a birrefringência em meios anisotrópicos e o efeito da fotoelasticidade -, é oportuno introduzir outro marco conceitual relevante no estudo da polarização: o Efeito Brewster. Tal fenômeno está diretamente associado às investigações do físico escocês David Brewster (1781–1868), cuja trajetória científica foi essencial para a consolidação do entendimento moderno sobre polarização. Profundamente envolvido com estudos de óptica física, Brewster tornou-se uma figura central na análise da luz refletida em superfícies dielétricas, contribuindo de maneira decisiva para o avanço da física no século XIX (SMITH, 1997).

Formado inicialmente em teologia pela Universidade de Edimburgo, Brewster enveredou cedo pelo caminho da ciência natural, tendo publicado, já em sua juventude, importantes trabalhos no campo da óptica física (CANTOR, 1984). Foi eleito membro da Royal Society em 1815 e posteriormente recebeu a Medalha Copley, uma das mais altas honrarias científicas britânicas. Sua carreira foi marcada por um equilíbrio entre pesquisa teórica, experimentação e aplicação prática, sempre com ênfase na difusão do conhecimento científico.

Entre suas principais contribuições está o aperfeiçoamento do caleidoscópio, instrumento que lhe trouxe reconhecimento público, bem como diversos estudos sobre birrefringência, propriedades ópticas de cristais, e a polarização da luz. Brewster também colaborou com figuras como William Whewell e Charles Babbage e manteve correspondência com Michael Faraday, com quem compartilhava o entusiasmo pela experimentação (WADE; TATLER, 1998).

Em seus estudos, Brewster demonstrou a sensibilidade da luz polarizada ao interagir com superfícies transparentes, o que abriu caminho para novas interpretações sobre a estrutura da matéria e contribuiu significativamente para a formulação de conceitos fundamentais da óptica moderna. Além disso, seu trabalho foi decisivo para a compreensão do comportamento da luz em situações de reflexão e refração, especialmente no contexto de meios dielétricos. Sua dedicação à pesquisa, aliada ao entusiasmo pela experimentação, reflete-se não apenas nos avanços científicos que promoveu, mas também em sua atuação como editor de enciclopédias científicas e defensor da popularização do conhecimento.

A importância de David Brewster transcende o campo da física pura, projetando-se também nas bases experimentais da óptica aplicada. Seu legado inspira ainda hoje abordagens pedagógicas voltadas à visualização dos fenômenos ópticos, como aquelas propostas neste trabalho. Nesse sentido, o Dispositivo 4, apresentado a seguir, foi concebido para investigar a reflexão da luz em superfícies dielétricas, com o objetivo de determinar o índice de refração do vidro a partir da observação do *ângulo de Brewster*. Essa abordagem permite explorar experimentalmente a relação entre teoria e prática na análise do comportamento da luz em meios isotrópicos.

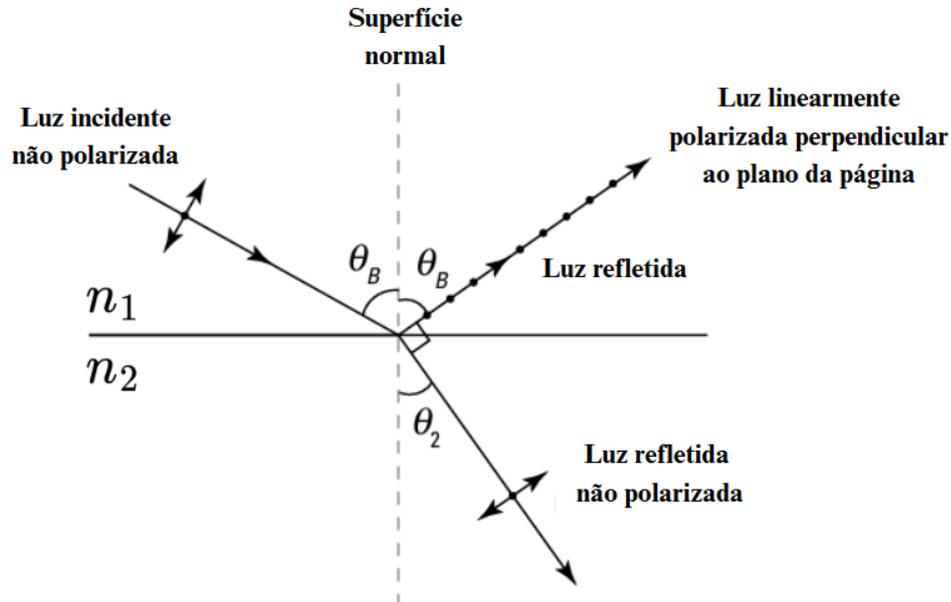
### 3.1 Lei de Brewster

Dando continuidade à discussão sobre as contribuições de Brewster, abordamos agora um de seus resultados mais emblemáticos: o efeito de polarização por reflexão, formalizado naquilo que se convencionou chamar de Lei de Brewster. Este fenômeno descreve uma condição específica na qual a luz refletida em uma interface entre dois meios dielétricos se torna completamente polarizada linearmente - avanço conceitual que consolidou a compreensão da natureza vetorial da luz (BREWSTER, 1815).

Quando um feixe de luz não polarizado incide sobre a superfície de separação entre dois meios transparentes com diferentes índices de refração, ocorre a divisão do feixe em duas componentes: uma refletida e outra refratada. Para um determinado ângulo de incidência (denominado ângulo de Brewster), a componente refletida torna-se totalmente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência. Nessa situação, os vetores dos feixes refletido e refratado tornam-se ortogonais entre si, revelando uma propriedade geométrica singular da propagação luminosa.

A Figura 13 ilustra o fenômeno, apresentando um feixe de luz incidindo sobre uma superfície dielétrica com o ângulo  $\theta_B$ , a separação das componentes refletida e refratada e a orientação dos vetores de campo elétrico.

Figura 13 – Representação do fenômeno de reflexão polarizada no ângulo de Brewster. Quando a luz incide sobre uma superfície com o ângulo  $\theta_B$ , o feixe refletido torna-se totalmente polarizado linearmente perpendicular ao plano de incidência.



Fonte: O autor (2025).

O ângulo de Brewster  $\theta_B$  pode ser determinado analiticamente por (DUREE, 2011, pag. 110):

$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3.1)$$

onde  $n_1$  é o índice de refração do meio de onde a luz parte (ex.: ar) e  $n_2$  é o índice de refração do meio em que a luz penetra (ex.: vidro).

Esta relação é particularmente útil do ponto de vista experimental, pois permite a determinação do índice de refração de um material a partir da medição do ângulo em que ocorre a polarização total do feixe refletido. As implicações dessa descoberta são vastas: desde o desenvolvimento de filtros polarizadores e dispositivos a *laser*, até aplicações em comunicações ópticas e caracterização de superfícies dielétricas (HECHT, 2017).

A propriedade de total polarização da luz refletida é explorada no experimento descrito na seção seguinte, o qual visa determinar o índice de refração do acrílico por meio da identificação experimental do ângulo de Brewster. Tal abordagem reafirma o caráter pedagógico e investigativo da óptica, aproximando os conceitos desenvolvidos por

Brewster da realidade do laboratório didático contemporâneo.

### 3.2 Dispositivo 4 : Medindo o Índice de Refração em Meio Isotrópico

Com base nos fundamentos teóricos discutidos na seção anterior, o experimento descrito nesta etapa tem como objetivo investigar o fenômeno da polarização por reflexão, por meio da observação direta do *ângulo de Brewster* em uma superfície de vidro transparente (meio isotrópico). A partir da análise do comportamento do feixe refletido em diferentes ângulos de incidência, torna-se possível determinar experimentalmente o índice de refração do material, por meio da Equação (3.1).

Essa abordagem experimental destaca não apenas a aplicabilidade da teoria óptica, mas também a relevância da observação qualitativa no ensino de Física. A identificação visual do ângulo de mínima intensidade luminosa — diretamente relacionado à máxima polarização da luz refletida — constitui um procedimento acessível, que pode ser realizado com instrumentos simples, como um transferidor, uma placa de vidro e um polaróide. Tais recursos tornam o experimento viável mesmo em contextos escolares com infraestrutura limitada, sem comprometer a qualidade na visualização do efeito observado.

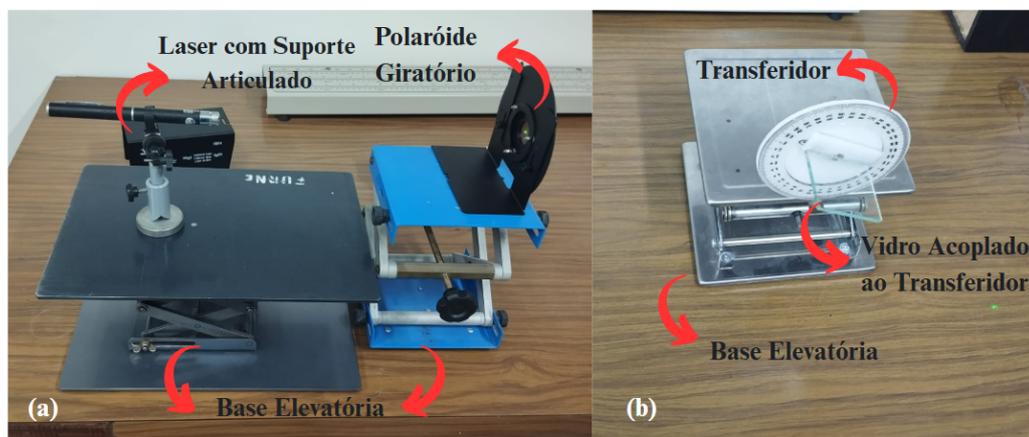
O Dispositivo 4 foi concebido com base na proposta apresentada pelo Laboratório de Física Experimental da Universidade Federal de Minas Gerais (LABORATÓRIO DE FÍSICA EXPERIMENTAL BÁSICA – UFMG, 2020), permitindo a visualização do fenômeno de polarização por reflexão por meio da variação controlada do ângulo de incidência de um feixe de luz sobre uma superfície plana de vidro. A montagem experimental compreende os seguintes elementos principais:

- Fonte de *laser* com suporte articulado, operando nos comprimentos de onda do vermelho ( $\lambda = 665 \text{ nm}$ ) e verde ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ), montada sobre uma **base elevatória regulável**, garantindo o ajuste preciso da altura;
- Polaróide linear giratório, fixado em estrutura metálica, responsável pela polarização linear do feixe incidente;
- Transferidor de acrílico com escala angular de  $360^\circ$ , acoplado a uma segunda base elevatória e fixado rigidamente a uma placa de vidro transparente.

A montagem inicial deve ser realizada com o transferidor ajustado a  $0^\circ$ , assegurando que a placa de vidro esteja alinhada ao transferidor e paralela à superfície da mesa. A partir

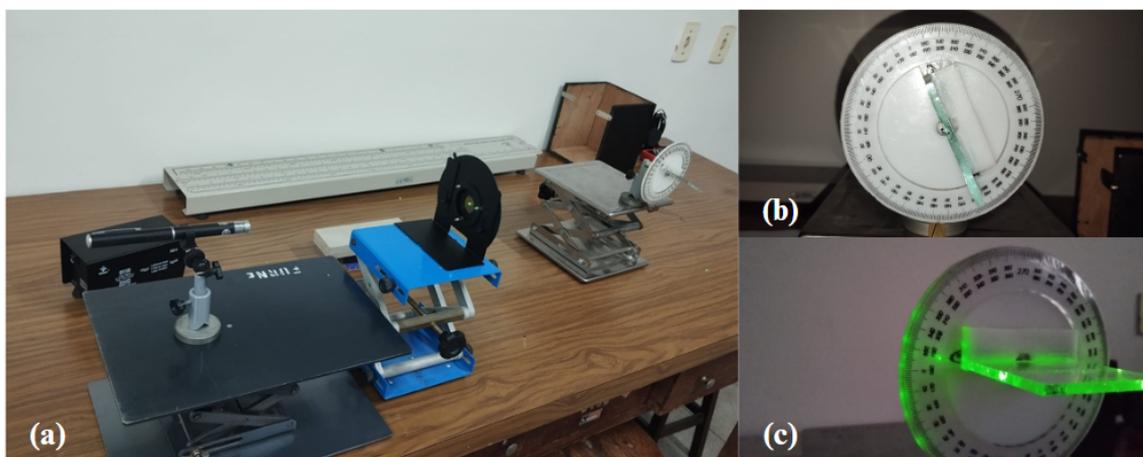
dessa configuração, é possível girar o transferidor para variar com precisão o ângulo de incidência do feixe sobre a superfície. A observação do feixe refletido é feita sobre a mesa, possibilitando a identificação do ângulo de mínima intensidade, característico da polarização total. A Figura 14 e a Figura 15 apresentam, respectivamente, os componentes principais e a montagem final do dispositivo.

Figura 14 – Componentes principais do Dispositivo 4: *laser* com suporte articulado, polaróide giratório e base elevatória (a); transferidor com acrílico fixado e sistema de ajuste angular (b).



Fonte: O autor (2025).

Figura 15 – Montagem final do Dispositivo 4: (a) vista geral do aparato óptico; (b) alinhamento da placa de vidro e do transferidor; (c) visualização do feixe alinhado com a placa de vidro. O experimento permite a identificação do ângulo de Brewster com base na observação da mínima intensidade luminosa refletida..



Fonte: O autor (2025).

O procedimento experimental foi realizado conforme os seguintes passos:

1. **Ajuste do polarizador:** o polaróide foi girado até atingir a orientação que maximize a intensidade do feixe incidente. Esse alinhamento facilita a detecção da diminuição da luz refletida.
2. **Observação do feixe refletido:** o transferidor foi girado lentamente, variando o ângulo de incidência. À medida que o ângulo de incidência se aproxima do ângulo de Brewster, a intensidade do feixe refletido decresce visivelmente, chegando a um mínimo. Isso ocorre porque, no ângulo de Brewster, a componente do feixe refletido cuja vibração é paralela ao plano de incidência é completamente cancelada devido à condição de polarização total. Como o feixe laser utilizado já possui elevado grau de polarização linear, a variação da intensidade refletida fica diretamente relacionada à redução progressiva dessa componente paralela. Conseqüentemente, observa-se um mínimo de intensidade refletida quando os eixos do campo elétrico do feixe refletido e do refratado tornam-se ortogonais, caracterizando o fenômeno.
3. **Identificação do ângulo de Brewster:** o ângulo em que a intensidade refletida é mínima foi localizado visualmente. Para maior precisão:
  - Foi utilizado uma folha branca como superfície de projeção do feixe;
  - Foi utilizado variações angulares em incrementos pequenos ( $1^\circ$ );
  - Foi utilizado um luxímetro digital para registrar a intensidade refletida;
  - Foi utilizado a média dos ângulos de mínima intensidade observada em ambas as bordas da faixa de atenuação como estimativa do ângulo de Brewster.
4. **Cálculo do índice de refração:** a Equação (3.1) foi aplicada utilizando o ângulo estimado, assumindo  $n_1 \approx 1,0003$  para o ar (YOUNG; FREEDMAN, 2014), a fim de se determinar o índice de refração  $n_2$  do vidro.
5. **Repetição com diferentes fontes:** todo o procedimento foi repetido utilizando os dois *lasers* emitindo no (vermelho e verde), comparando os valores obtidos para  $n_2$  em função do comprimento de onda da luz.

Este experimento ilustra com clareza os princípios físicos associados à polarização por reflexão, integrando teoria e prática em uma experiência de alto valor formativo. Ao

permitir a determinação experimental de uma grandeza óptica fundamental - o índice de refração - por meio da observação direta da polarização da luz refletida, o dispositivo evidencia como fenômenos clássicos da Física podem ser explorados didaticamente com recursos acessíveis.

### 3.3 Resultados e Discussões

A análise dos dados obtidos com o Dispositivo 4 possibilitou a determinação experimental do índice de refração do vidro por meio da identificação do *ângulo de Brewster*. Nos ensaios realizados com *lasers* emitindo no verde ( $\lambda = 532$  nm) e no vermelho ( $\lambda = 665$  nm), observou-se que a intensidade luminosa refletida atingia seu valor mínimo para um ângulo de incidência próximo de  $55^\circ$ . Essa observação foi feita visualmente, a partir da projeção do feixe refletido sobre uma superfície plana, conforme descrito anteriormente.

Com base na Equação (3.1), que estabelece a relação entre o ângulo de Brewster  $\theta_B$  e o índice de refração  $n_2$  do material, é possível calcular esse índice assumindo o valor padrão para o ar,  $n_1 \approx 1,0003$ :

$$n_2 = \tan(\theta_B) = \tan(55^\circ) \approx 1,428 \quad (3.2)$$

Esse valor experimental aproxima-se de forma satisfatória do índice de refração típico do vidro do tipo *crown* (vidro não temperado ou vidro comum), cuja média para o espectro visível é aproximadamente  $n = 1,52$  (HECHT, 2017). A diferença percentual entre o valor experimental (3.2) e o valor de referência corresponde a um erro relativo de cerca de 6,05%, o que se mostra aceitável em experimentos de cunho didático, principalmente considerando as limitações inerentes à metodologia empregada.

Algumas possíveis fontes que podem ter contribuído para o erro incluem:

- Imprecisão na leitura do ângulo de incidência: mesmo com incrementos angulares controlados, a determinação visual do ponto de mínima intensidade luminosa envolve subjetividade e pode ser afetada por fatores como reflexos residuais ou iluminação ambiente;
- Desalinhamentos na montagem experimental: desvios no posicionamento do feixe *laser*, inclinações na base do transferidor ou imperfeições na fixação da placa de vidro podem comprometer a exatidão do ângulo medido;

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos para os dois comprimentos de onda apresentaram boa consistência, evidenciando a confiabilidade do procedimento. A proximidade entre os valores obtidos e os dados de referência valida o uso da Lei de Brewster como ferramenta eficaz de investigação óptica em ambientes didáticos.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou, sob uma perspectiva experimental e qualitativa, diferentes fenômenos ópticos associados à polarização da luz, com foco em seu potencial de aplicação didática no Ensino Médio e na formação inicial de professores de Física. Para tal, foram desenvolvidos e analisados quatro dispositivos experimentais de baixo custo, abordando conceitos fundamentais da óptica física: a Lei de Malus, a birrefringência em meios anisotrópicos, a polarização elíptica e o Efeito Brewster em meios isotrópicos.

No Capítulo 1, foram discutidos os fundamentos da polarização linear, com destaque para a verificação experimental da Lei de Malus, por meio da utilização de *lasers* emitindo diferentes comprimentos de onda e filtros polarizadores. Os dados obtidos foram analisados graficamente e comparados com os resultados teóricos, demonstrando a validade da expressão  $I = I_0 \cos^2 \theta$  e evidenciando a influência da sensibilidade dos detectores utilizados.

O Capítulo 2 abordou o fenômeno da birrefringência, com foco na técnica da *fotoelasticidade*, aplicando-a à análise de tensões internas em materiais poliméricos, como o PMMA (acrílico). A introdução da luz elipticamente polarizada como consequência da propagação em meios anisotrópicos permitiu explorar a diferença de fase  $\phi$  e sua relação com a birrefringência  $\Delta n$ . A utilização do osciloscópio e a automação dos cálculos via linguagem Python (vide Apêndice D) agregaram precisão e confiabilidade à análise, ao mesmo tempo em que estimularam o uso de ferramentas computacionais no ensino de Física.

No Capítulo 3, foi investigado o Efeito Brewster, com a determinação experimental do índice de refração de uma amostra de vidro (meio isotrópico) a partir da observação do ângulo de mínima intensidade luminosa refletida. A aplicação da equação da Lei de Brewster mostrou-se eficaz e coerente com os valores teóricos esperados, validando o uso da polarização por reflexão como recurso pedagógico e experimental.

Em todas as etapas do trabalho, buscou-se aliar os conceitos físicos à simplicidade instrumental, de forma a tornar viável a implementação das atividades em ambientes escolares com infraestrutura limitada ou não. Os dispositivos desenvolvidos se mostraram eficientes não apenas para a obtenção de dados confiáveis, mas também como instrumentos de visualização didática, favorecendo o aprendizado por meio da observação e

experimentação.

Como perspectivas futuras, recomenda-se o aprimoramento das medições quantitativas com o uso de sensores ópticos de maior precisão, além da integração de sistemas digitais para aquisição e processamento automático de dados. A adaptação das atividades propostas para diferentes níveis de ensino, incluindo a Educação Básica e a formação continuada de professores, pode ampliar significativamente o impacto pedagógico do material desenvolvido.

Conclui-se, portanto, que o estudo da polarização da luz constitui um campo de vasta exploração em ensino experimental de Física, permitindo articular teoria e prática, estimular a investigação científica no contexto escolar e aprofundar a compreensão de princípios fundamentais da óptica moderna.

## REFERÊNCIAS

- BARTHOLIN, E. *Experimenta crystalli Islandici disdiacastici: quibus mira et insolita refractio detegitur*. Hafniae: Danielis Paulli, 1669. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=F7RAAAAACAAJ&dq=Experimenta+Crystalli+Islandici+Disdiacastici>).
- BENEDEK, G. B.; VILLARS, F. M. H. Optical methods and birefringence in biological materials. In: BENEDEK, G. B.; VILLARS, F. M. H. (Ed.). *Physics with Illustrative Examples from Medicine and Biology: Volume 1*. New York: Springer, 1971. p. 150–172.
- BREWSTER, D. On the laws which regulate the polarisation of light by reflection from transparent bodies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 105, p. 125–159, 1815. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/448/david-with-babbage-brewster-charles-with-davy-humphrey/on-the-laws-which-regulate-the-polarisation-of-light-by-reflection>).
- BREWSTER, D. *A Treatise on Optics*. Philadelphia: Carey, Lea, & Blanchard, 1831. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=QUMIAAAAIAAJ>).
- CANTOR, G. David brewster and the progress of science. *Annals of Science*, Taylor & Francis, v. 41, n. 1, p. 1–30, 1984.
- CHAPPERT, A. *Étienne Louis Malus (1775–1812) et la théorie corpusculaire de la lumière*. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin, 1995. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=m3cN7LcZIZUC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbv\\\_-ge\\\_summary\\\_r&cad=0\#v=onepage&q=Nicol&f=false](https://books.google.com.br/books?id=m3cN7LcZIZUC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbv\_-ge\_summary\_r&cad=0\#v=onepage&q=Nicol&f=false)).
- COKER, E. G.; FILON, L. N. G. *A Treatise on Photo-Elasticity*. Cambridge: Cambridge University Press, 1957. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://archive.org/details/treatiseonphotoe0000coke>).
- CONTRIBUTORS, W. Laser diode. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2025. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\_diode)).
- CORPORATION, S. *Refractive index and dispersion of acrylic resin (PMMA)*. 2020. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://www.shimadzu.com/opt/products/ref/ref-app03.html>).
- DUREE, J. G. C. *Optics for Dummies*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 97–129 p. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: [https://issuu.com/brisahuckeb/docs/ebook\\\_optics\\\_for\\\_dummies](https://issuu.com/brisahuckeb/docs/ebook\_optics\_for\_dummies)).
- FREJLICH, J. *Óptica*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 56 p.
- FRESNEL, A. J. Mémoire sur la diffraction de la lumière. *Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France*, v. 5, p. 339–475, 1818. Acesso em: 17 jun. 2025.

Disponível em: [https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fresnel/Fresnel\\\_pdf/Mem1818\\\_p339.pdf](https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fresnel/Fresnel\_pdf/Mem1818\_p339.pdf).

GROSS, D. *Óptica: Fundamentos e Aplicações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2013.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física – Vol. 4: Óptica e Física Moderna*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 4. 1–36 p. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://estudandoengenharias.blogspot.com/2016/12/livro-halliday-volume-1-edicao-9-pdf.html>.

HECHT, E. *Optics*. 5th. ed. Pearson, 2017. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://eminetner.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/04/hecht-optics-5ed.pdf>.

HUYGENS, C. *Traité de la lumière. Où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la réflexion, et dans la réfraction. Et particulièrement dans l'étrange réfraction du cristal d'Islande. Avec un discours de la cause de la pesanteur*. Leide: Pierre van der Aa, 1690. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b86069987/f9.item.texteImage>.

INSTRUTHERM. *Catálogo técnico: Luxímetro Digital LD-400*. Instrutherm Instrumentos de Medição, 2025. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <https://www.instrutherm.com.br>.

JR., W. D. C.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8800475/mod\\\_resource/content/1/473965973-Ciencia-e-Engenharia-de-Materiais-CALLISTER-9-Edicao-pdf.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8800475/mod\_resource/content/1/473965973-Ciencia-e-Engenharia-de-Materiais-CALLISTER-9-Edicao-pdf.pdf).

KOJO, T.; TAGAYA, A.; KOIKE, Y. Mechanism of generation of birefringence in poly(methyl methacrylate/styrene). *Polymer Journal*, v. 44, p. 167–173, 2012. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/pj2011101>.

LABORATÓRIO DE FÍSICA EXPERIMENTAL BÁSICA – UFMG. *Polarização da Luz*. 2020. Acesso em: 1 jun. 2025. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=4KSrb6xvo\\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=4KSrb6xvo\_0).

MALUS Étienne L. *Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallisées: mémoire couronné par l'institut dans la séance publique du 2 janvier 1810*. Paris: Garnery, libraire, rue de Seine, Hôtel Mirabeau, 1811. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: [https://books.google.com.br/books/about/Theorie\\\_de\\\_la\\\_double\\\_refraction\\\_de\\\_la\\\_lu.html?id=Wb3EHev07w0C](https://books.google.com.br/books/about/Theorie\_de\_la\_double\_refraction\_de\_la\_lu.html?id=Wb3EHev07w0C).

MALUS Étienne-Louis. Mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique. *Nouveau bulletin des sciences de la Société philomathique de Paris*, v. 2, p. 291–295, 1809. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: [https://patrimoine.sorbonne-universite.fr/medias/91/ee/01/d3/91ee01d3-d6bc-4c51-8a4d-fc63fa120ce0/files/PC\\\_000303\\\_002\\\_pdf.pdf](https://patrimoine.sorbonne-universite.fr/medias/91/ee/01/d3/91ee01d3-d6bc-4c51-8a4d-fc63fa120ce0/files/PC\_000303\_002\_pdf.pdf).

PALMER, J. M.; GRANT, B. G. *The Art of Radiometry*. Bellingham: SPIE Press, 2010. 1–22 p. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/21445223/The-Art-of-Radiometry-J-M-Palmer-B-G-Grant>.

SILVA, F. W. O. O tratado sobre a luz de Huygens: comentários. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 28, n. 1, p. 123–140, jan./abr. 2011. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2011v28n1p123>).

SMITH, M. P. *David Brewster and the Science of Light*. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1997. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=F7RAAAAACAAJ>).

SZCZUROWSKI, K. *Optical properties of PMMA*. 2013. Acesso em: 25 maio 2025. Disponível em: <https://refractiveindex.info>).

TAGAYA, A.; KOIKE, Y. Compensation and control of the birefringence of polymers for photonics. *Polymer Journal*, v. 44, p. 306–314, 2012. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/pj2011141>).

WADE, N. J.; TATLER, D. J. *The Moving Tablet of the Eye: The Origins of Modern Eye Movement Research*. Oxford: Oxford University Press, 1998.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Sears e Zemansky: Física – vol. 4: Óptica e física moderna. In: \_\_\_\_\_. 14. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2014. cap. 33, p. 1–37. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://zonadaeletrica.com.br/colecao-fisica-sears-zemansky-young-freedman-vol-1-2-3-e-4-12a-e-14a-edicao/>).

ZILIO, S. C. *Óptica moderna: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Portal de Livros Abertos da USP, 2017. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/96>).

## APÊNDICES

Os apêndices apresentados a seguir reúnem o material complementar ao trabalho experimental desenvolvido neste estudo. Eles contêm tanto os códigos computacionais quanto as tabelas de dados obtidos nos experimentos descritos nos capítulos anteriores. O objetivo é proporcionar ao leitor uma visão detalhada dos procedimentos de análise de dados, bem como oferecer recursos que possam auxiliar na reprodutibilidade das atividades propostas.

Os programas foram elaborados em linguagem *Python*, empregando bibliotecas amplamente utilizadas em processamento de dados científicos, como *pandas*, *numpy* e *matplotlib*. Dessa forma, para a execução dos códigos, faz-se necessário que o usuário possua ambiente *Python* devidamente configurado, com as bibliotecas instaladas. Destaca-se que os códigos foram desenvolvidos especificamente para os experimentos conduzidos neste trabalho, ajustados às características e parâmetros adotados nos dispositivos experimentais aqui descritos. Assim, qualquer modificação nos procedimentos experimentais poderá exigir adaptações nos programas.

Considerando as possibilidades atuais, sugere-se que, para eventuais adaptações e ajustes, ferramentas de inteligência artificial possam ser utilizadas como auxílio para usuários que tenham menor familiaridade com programação, tornando o processo de personalização mais acessível mesmo para aqueles com pouca experiência prévia em *Python*.

### Apêndice A - Código Python : Primeiro Dispositivo

O código Python apresentado neste apêndice foi desenvolvido para o processamento dos dados experimentais obtidos no Primeiro Dispositivo. Esse dispositivo investiga a variação da intensidade luminosa transmitida por luz polarizada linearmente, com base na Lei de Malus. O programa realiza o cálculo dos valores teóricos de irradiância, a geração de gráficos comparativos entre os dados teóricos e experimentais e a exportação das planilhas com os resultados obtidos. Os dados analisados neste apêndice estão discutidos na Seção 1.2 deste trabalho.

```

1 # =====
2 # Apêndice A - Código Python : Primeiro Dispositivo
3 # Descrição: Cálculo, Análise e Geração de Dados Teóricos e

```

```

    Experimentais
4 # =====
5
6 import math
7 import os
8 import pandas as pd
9 import matplotlib.pyplot as plt
10 import winreg
11
12 # =====
13 # Função auxiliar: Cosseno diretamente em graus
14 # =====
15 def cos_graus(theta_graus):
16     return math.cos(theta_graus * math.pi / 180)
17
18 # =====
19 # Função para obter o caminho da Área de Trabalho (Windows)
20 # =====
21 def get_desktop_path():
22     try:
23         key = winreg.OpenKey(winreg.HKEY_CURRENT_USER,
24                             r"Software\Microsoft\Windows\CurrentVersion
25                             \Explorer\Shell_Folders")
26         desktop, _ = winreg.QueryValueEx(key, "Desktop")
27         return desktop
28     except Exception as e:
29         print("Erro ao localizar a Área de Trabalho:", e)
30         return os.path.join(os.path.expanduser("~"), "Desktop")
31
32 # =====
33 # Função de translado circular (ajuste de fase angular)
34 # =====
35 def translado(vals, n):
36     return vals[n:] + vals[:n]
37
38 # =====
39 # Conversão de iluminância (lux) para irradiância (W/m2)
40 # =====
41 def converter_para_irradiancia(lista_lux):

```

```

41     return [round(valor * 0.0079, 4) for valor in lista_lux]
42
43 def converter_valor_lux_para_wm2(valor_lux):
44     return round(valor_lux * 0.0079, 4)
45
46 # =====
47 # Cálculo da média ponto a ponto
48 # =====
49 def media_experimento(medidas1, medidas2):
50     return [(v1 + v2) / 2 for v1, v2 in zip(medidas1, medidas2)]
51
52 # =====
53 # Cálculo Teórico pela Lei de Malus ( $\cos^2$  em graus)
54 # =====
55 def calcular_malus(I0, angulos_graus):
56     return [round(I0 * cos_graus(theta)**2, 4) for theta in
57             angulos_graus]
58
59 # =====
60 # Geração de planilhas de resultados
61 # =====
62 def gerar_planilha(nome, angulos, medida_1, medida_2, media,
63                  irradiancia_trans, teorico):
64     erro_percentual = [round(abs((t - e) / e) * 100, 2) if e != 0 else 0
65                       for t, e in zip(teorico, irradiancia_trans)]
66     df = pd.DataFrame({
67         "Theta (graus)": angulos,
68         "Medição 1 (lux)": medida_1,
69         "Medição 2 (lux)": medida_2,
70         "Média (lux)": media,
71         "Média ( $W/m^2$ )": converter_para_irradiancia(media),
72         "Transladado ( $W/m^2$ )": irradiancia_trans,
73         "Teórico ( $W/m^2$ )": teorico,
74         "Erro Percentual (%)": erro_percentual
75     })
76     caminho = os.path.join(get_desktop_path(), f"{nome}.xlsx")
77     df.to_excel(caminho, index=False)
78     print(f"Planilha salva em: {caminho}")

```

```

77 # =====
78 # Planilha resumo de todos os experimentos
79 # =====
80 def gerar_planilha_resumo():
81     caminho = os.path.join(get_desktop_path(), "Resumo_Experimentos.xlsx
82         ")
83     dados = {
84         "Experimento": ["Laser_Vermelho", "Laser_Verde", "Laser_Violeta"
85             ],
86         "IO_Medida_1_lux": [1267, 5950, 233],
87         "IO_Medida_2_lux": [1215, 5910, 235],
88         "Média_lux": [(1267+1215)/2, (5950+5910)/2, (233+235)/2],
89         "Média(W/m²)": [
90             converter_valor_lux_para_wm2((1267+1215)/2),
91             converter_valor_lux_para_wm2((5950+5910)/2),
92             converter_valor_lux_para_wm2((233+235)/2)
93         ],
94         "Translação_passos": [7, -2, 9]
95     }
96     pd.DataFrame(dados).to_excel(caminho, index=False)
97     print(f"Planilha_resumo_salva_em:{caminho}")
98
99 # =====
100 # === Dados Experimentais ===
101 # =====
102 # Laser Vermelho
103 medida_1 = [157, 331, 519, 661, 817, 942, 1013, 1008, 991, 865, 719,
104     550, 377, 231, 106, 31, 8, 42, 147]
105 medida_2 = [153, 337, 477, 649, 829, 938, 985, 988, 949, 848, 688, 527,
106     375, 219, 104, 29, 8, 45, 145]
107
108 # Laser Verde
109 medida_3 = [4310, 3620, 2830, 2130, 1390, 870, 430, 240, 290, 570, 1080,
110     1740, 2440, 3180, 3830, 4290, 4610, 4680, 4450]
111 medida_4 = [4520, 3940, 3320, 2530, 1740, 1070, 510, 250, 220, 440, 960,
112     1610, 2320, 3050, 3750, 4310, 4640, 4730, 4500]
113
114 # Laser Violeta

```

```

110 medida_5 = [8, 15, 26, 40, 59, 76, 90, 101, 106, 106, 100, 89, 73, 58,
111           40, 24, 14, 8, 8]
112
113 medida_6 = [8, 14, 27, 42, 58, 76, 92, 102, 107, 107, 100, 89, 74, 55,
114           40, 25, 14, 8, 8]
115
116 # Cálculo das médias experimentais
117
118 media_vermelho = media_experimento(medida_1, medida_2)
119 media_verde = media_experimento(medida_3, medida_4)
120 media_violeta = media_experimento(medida_5, medida_6)
121
122 # Conversão para irradiância (W/m2)
123 irradiancia_vermelho = converter_para_irradiancia(media_vermelho)
124 irradiancia_verde = converter_para_irradiancia(media_verde)
125 irradiancia_violeta = converter_para_irradiancia(media_violeta)
126
127 # =====
128 # Definição dos ângulos experimentais (em graus)
129 # =====
130 angulos = list(range(0, 181, 10))
131
132 # =====
133 # Cálculo teórico com Lei de Malus
134 # =====
135
136 # Intensidade máxima de referência (convertida para W/m2)
137 I0_vermelho_lux = (1267 + 1215) / 2
138 I0_verde_lux = (5950 + 5910) / 2
139 I0_violeta_lux = (233 + 235) / 2
140
141 I0_vermelho = converter_valor_lux_para_wm2(I0_vermelho_lux)
142 I0_verde = converter_valor_lux_para_wm2(I0_verde_lux)
143 I0_violeta = converter_valor_lux_para_wm2(I0_violeta_lux)
144
145 # Aplicação da Lei de Malus
146 teorico_vermelho = calcular_malus(I0_vermelho, angulos)
147 teorico_verde = calcular_malus(I0_verde, angulos)
148 teorico_violeta = calcular_malus(I0_violeta, angulos)
149
150 # =====

```

```

147 # Ajuste de fase experimental (translado angular)
148 # =====
149 t_vermelho, t_verde, t_violeta = 7, -2, 9
150
151 irradiancia_vermelho_trans = translado(irradiancia_vermelho, t_vermelho)
152 irradiancia_verde_trans = translado(irradiancia_verde, t_verde)
153 irradiancia_violeta_trans = translado(irradiancia_violeta, t_violeta)
154
155 # =====
156 # Geração dos gráficos comparativos
157 # =====
158 fig, axs = plt.subplots(3, 1, figsize=(10, 12), sharex=True)
159
160 axs[0].plot(angulos, teorico_vermelho, '--', color='red', label='Teórico
161             □(Malus)')
162 axs[0].plot(angulos, irradiancia_vermelho_trans, 'o-', color='darkred',
163             label='Experimental')
164 axs[0].set_title(r'$Laser□em□$\lambda□=□665\,nm$')
165 axs[0].set_ylabel(r'Irradiância□($W/m^2$)')
166 axs[0].legend(); axs[0].grid(True)
167 axs[0].text(0.98, 0.08, '(a)', transform=axs[0].transAxes, fontsize=12,
168             ha='right')
169
170 axs[1].plot(angulos, teorico_verde, '--', color='green', label='Teórico□
171             (Malus)')
172 axs[1].plot(angulos, irradiancia_verde_trans, 'o-', color='darkgreen',
173             label='Experimental')
174 axs[1].set_title(r'$Laser□em□$\lambda□=□532\,nm$')
175 axs[1].set_ylabel(r'Irradiância□($W/m^2$)')
176 axs[1].legend(); axs[1].grid(True)
177 axs[1].text(0.98, 0.08, '(b)', transform=axs[1].transAxes, fontsize=12,
178             ha='right')
179
180 axs[2].plot(angulos, teorico_violeta, '--', color='blue', label='Teórico
181             □(Malus)')
182 axs[2].plot(angulos, irradiancia_violeta_trans, 'o-', color='darkblue',
183             label='Experimental')
184 axs[2].set_title(r'$Laser□em□$\lambda□=□405\,nm$')
185 axs[2].set_xlabel(r'$\theta□(graus)$')

```

```

178  axs[2].set_ylabel(r'Irradiância⊥($W/m^2$)')
179  axs[2].legend(); axs[2].grid(True)
180  axs[2].text(0.98, 0.08, '(c)', transform=axs[2].transAxes, fontsize=12,
181         ha='right')
182
183  plt.tight_layout()
184  plt.show()
185
186  # =====
187  # Geração das planilhas de resultados
188  # =====
189  gerar_planilha("Laser_Vermelho", angulos, medida_1, medida_2,
190               media_vermelho, irradiancia_vermelho_trans, teorico_vermelho)
191  gerar_planilha("Laser_Verde", angulos, medida_3, medida_4, media_verde,
192               irradiancia_verde_trans, teorico_verde)
193  gerar_planilha("Laser_Violeta", angulos, medida_5, medida_6,
194               media_violeta, irradiancia_violeta_trans, teorico_violeta)
195  gerar_planilha_resumo()

```

Listing A.1 – Código Python - Processamento dos dados experimentais do Primeiro Dispositivo

## Apêndice B - Dados Experimentais do Primeiro Dispositivo

O apêndice reúne os dados experimentais coletados no Primeiro Dispositivo, correspondentes à variação angular da intensidade luminosa transmitida por luz polarizada linear. Os experimentos foram realizados com três fontes de luz monocromáticas (*laser* vermelho, verde e violeta), cujos comprimentos de onda são, respectivamente,  $\lambda = 665$  nm,  $\lambda = 532$  nm e  $\lambda = 405$  nm.

As tabelas a seguir apresentam:

- As duas medições da intensidade luminosa em *lux*;
- O valor médio de iluminância;
- A conversão para irradiância ( $W/m^2$ );
- A irradiância transladada (ajuste para comparação com os dados teóricos);
- Os valores teóricos obtidos via Lei de Malus;

- O erro percentual relativo entre os valores teóricos e experimentais.

Os resultados apresentados aqui servem de base para as análises discutidas na Seção 1.3.

Tabela A.1 – Valores experimentais obtidos para a intensidade luminosa do *laser* vermelho ( $\lambda = 665$  nm) em função do ângulo  $\theta$ , com suas respectivas conversões, translações, valores teóricos e erros percentuais.

$\theta$ (graus)	Medida 1 ( <i>lux</i> )	Medida 2 ( <i>lux</i> )	Média ( <i>lux</i> )	Média (W/m <sup>2</sup> )	Transladado (W/m <sup>2</sup> )	Teórico (W/m <sup>2</sup> )	Erro (%)
0	157	153	155	1.2245	7.8842	9.8039	24.35
10	331	337	334	2.6386	7.6630	9.5083	24.08
20	519	477	498	3.9342	6.7664	8.6571	27.94
30	661	649	655	5.1745	5.5577	7.3529	32.43
40	817	829	823	6.5017	4.2542	5.7532	35.24
50	942	938	940	7.4260	2.9704	4.0507	36.37
60	1013	985	999	7.8921	1.7775	2.4511	37.89
70	1008	988	998	7.8842	0.8295	1.1468	38.25
80	991	949	970	7.6630	0.2370	0.2956	24.73
90	865	848	856.5	6.7664	0.0632	0.0000	–
100	719	688	703.5	5.5577	0.3437	0.2956	13.99
110	550	527	538.5	4.2542	1.1534	1.1468	0.57
120	377	375	376	2.9704	1.2245	2.4510	100.16
130	231	219	225	1.7775	2.6386	4.0507	53.52
140	106	104	105	0.8295	3.9342	5.7532	46.24
150	31	29	30	0.2370	5.1745	7.3529	42.10
160	8	8	8	0.0632	6.5017	8.6571	33.15
170	42	45	43.5	0.3437	7.4260	9.5083	28.04
180	147	145	146	1.1534	7.8921	9.8039	24.22

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

Tabela A.2 – Valores experimentais obtidos para a intensidade luminosa do *laser* verde ( $\lambda = 532$  nm) em função do ângulo  $\theta$ , com suas respectivas conversões, translações, valores teóricos e erros percentuais.

graus ( $\theta$ )	Medida 1 ( <i>lux</i> )	Medida 2 ( <i>lux</i> )	Média ( <i>lux</i> )	Média (W/m <sup>2</sup> )	Transladado (W/m <sup>2</sup> )	Teórico (W/m <sup>2</sup> )	Erro (%)
0	4310	4520	4415	34.8785	37.1695	46.8470	26.04
10	3620	3940	3780	29.8620	35.3525	45.4344	28.52
20	2830	3320	3075	24.2925	34.8785	41.3669	18.60
30	2130	2530	2330	18.4070	29.8620	35.1353	17.66
40	1390	1740	1565	12.3635	24.2925	27.4909	13.17
50	870	1070	970	7.6630	18.4070	19.3561	5.16
60	430	510	470	3.7130	12.3635	11.7118	5.27
70	250	240	245	1.9355	7.6630	5.4801	28.49
80	290	220	255	2.0145	3.7130	1.4126	61.96
90	570	440	505	3.9855	1.9355	0.0000	–
100	1080	960	1020	8.0580	2.0145	1.4126	29.88
110	1740	1610	1675	13.2325	3.9855	5.4801	37.36
120	2440	2320	2380	18.8020	8.0580	11.7117	45.34
130	3180	3050	3115	24.6085	13.2325	19.3561	46.28
140	3830	3750	3790	29.9410	18.8020	27.4909	46.21
150	4290	4310	4300	33.9700	24.6085	35.1353	42.78
160	4610	4640	4625	36.5375	29.9410	41.3669	38.16
170	4680	4730	4705	37.1695	33.9700	45.4344	33.75
180	4450	4500	4475	35.3525	36.5375	46.8470	28.22

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

Tabela A.3 – Valores experimentais obtidos para a intensidade luminosa do *laser* violeta ( $\lambda = 405$  nm) em função do ângulo  $\theta$ , com suas respectivas conversões, translações, valores teóricos e erros percentuais.

$\theta$ (graus)	Medida 1 ( <i>lux</i> )	Medida 2 ( <i>lux</i> )	Média ( <i>lux</i> )	Média (W/m <sup>2</sup> )	Transladado (W/m <sup>2</sup> )	Teórico (W/m <sup>2</sup> )	Erro (%)
0	8	8	8	0.0632	0.8414	1.8486	119.71
10	15	14	14.5	0.1146	0.7900	1.7929	126.95
20	26	27	26.5	0.2094	0.7031	1.6324	132.17
30	40	42	41	0.3239	0.5807	1.3865	138.76
40	59	58	58.5	0.4622	0.4464	1.0848	143.01
50	76	76	76	0.6004	0.3160	0.7638	141.71
60	90	92	91	0.7189	0.1936	0.4622	138.74
70	101	102	101.5	0.8019	0.1106	0.2162	95.48
80	106	107	106.5	0.8414	0.0632	0.0557	11.87
90	106	107	106.5	0.8414	0.0632	0.0000	–
100	100	100	100	0.7900	0.0632	0.0557	11.87
110	89	89	89	0.7031	0.1146	0.2162	88.66
120	73	74	73.5	0.5807	0.2094	0.4621	120.68
130	58	55	56.5	0.4464	0.3239	0.7638	135.81
140	40	40	40	0.3160	0.4622	1.0848	134.70
150	24	25	24.5	0.1936	0.6004	1.3865	130.93
160	14	14	14	0.1106	0.7189	1.6324	127.07
170	8	8	8	0.0632	0.8019	1.7929	123.58
180	8	8	8	0.0632	0.8414	1.8486	119.71

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

## Apêndice C - Código Python : Segundo Dispositivo

O código *Python* descrito neste apêndice foi desenvolvido para processar os dados experimentais obtidos no Segundo Dispositivo, destinado à investigação qualitativa da birrefringência em um meio plástico submetido à luz polarizada linear cruzada. Foram utilizados lasers vermelho e verde, com controle angular sobre o sistema óptico. O programa executa:

- o processamento das três séries de medições experimentais para cada *laser*;
- o cálculo das médias ponto a ponto das intensidades obtidas;
- o ajuste polinomial de grau 4 para suavização das curvas experimentais;
- a plotagem gráfica comparativa entre os dados experimentais médios e seus ajustes teóricos;
- a exportação automatizada dos dados para a área de trabalho.

```

1 # =====
2 # Apêndice C - Código Python : Segundo Dispositivo
3 # Autor: [Seu Nome]
4 # Descrição: Processamento dos dados experimentais de intensidade
5 # luminosa
6 # para lasers vermelho e verde com ajuste polinomial.
7 # =====
8 import os
9 import pandas as pd
10 import matplotlib.pyplot as plt
11 import numpy as np
12
13 # =====
14 # Caminho para a Área de Trabalho (ajustado para Windows com OneDrive)
15 # =====
16 desktop = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "OneDrive", "Desktop")
17
18 if not os.path.exists(desktop):
19     raise FileNotFoundError(f"Diretório não encontrado: {desktop}")

```

```

20
21 # =====
22 # Dados Experimentais - Laser Vermelho ( $\lambda = 665$  nm)
23 # =====
24 angulos_vermelho = list(range(0, 181, 10))
25
26 medida1_vermelho = [73, 97, 121, 142, 152, 157, 155, 145,
27                     127, 106, 83, 60, 41, 28, 29, 23, 31, 49, 72]
28
29 medida2_vermelho = [74, 101, 124, 142, 155, 157, 153, 143,
30                     126, 106, 82, 59, 33, 26, 18, 20, 44, 44, 66]
31
32 medida3_vermelho = [71, 97, 118, 137, 148, 155, 153, 141,
33                     123, 103, 78, 56, 38, 26, 19, 21, 30, 46, 68]
34
35 # Média ponto a ponto
36 media_vermelho = [(m1 + m2 + m3) / 3 for m1, m2, m3 in zip(
37     medida1_vermelho, medida2_vermelho, medida3_vermelho)]
38
39 # =====
40 # Dados Experimentais - Laser Verde ( $\lambda = 532$  nm)
41 # =====
42 angulos_verde = list(range(0, 181, 10))
43
44 medida1_verde = [54, 56, 59, 61, 68, 77, 85, 89,
45                 94, 74, 74, 73, 65, 64, 63, 57, 53, 49, 44]
46
47 medida2_verde = [41, 44, 45, 45, 46, 48, 52, 47,
48                 53, 53, 50, 47, 45, 44, 42, 39, 40, 31, 32]
49
50 medida3_verde = [33, 34, 37, 40, 41, 38, 40, 43,
51                 45, 44, 43, 35, 39, 38, 37, 35, 31, 32, 26]
52
53 # Média ponto a ponto
54 media_verde = [(m1 + m2 + m3) / 3 for m1, m2, m3 in zip(
55     medida1_verde, medida2_verde, medida3_verde)]
56
57 # =====
58 # Ajuste Polinomial de Grau 4 (Suavização)

```

```

59 # =====
60 # Laser Vermelho
61 coef_poli_vermelho = np.polyfit(angulos_vermelho, media_vermelho, deg=4)
62 ajuste_vermelho = np.polyval(coef_poli_vermelho, angulos_vermelho)
63
64 # Laser Verde
65 coef_poli_verde = np.polyfit(angulos_verde, media_verde, deg=4)
66 ajuste_verde = np.polyval(coef_poli_verde, angulos_verde)
67
68 # =====
69 # Plotagem das Médias e Ajustes Polinomiais
70 # =====
71 plt.figure(figsize=(10, 6))
72
73 plt.scatter(angulos_vermelho, media_vermelho, color='red',
74             label=r'$Laser$ Vermelho ($\lambda=665$, nm)', zorder=3)
75
76 plt.scatter(angulos_verde, media_verde, color='green',
77             label=r'$Laser$ Verde ($\lambda=532$, nm)', zorder=3)
78
79 plt.plot(angulos_vermelho, ajuste_vermelho, color='red', linestyle='--',
80          label='Ajuste Polinomial Laser Vermelho')
81
82 plt.plot(angulos_verde, ajuste_verde, color='green', linestyle='--',
83          label='Ajuste Polinomial Laser Verde')
84
85 plt.title('Variação da Intensidade Luminosa - Dispositivo 2')
86 plt.xlabel(r'$\theta$ (graus)')
87 plt.ylabel('Intensidade (lux)')
88 plt.grid(True)
89 plt.legend()
90 plt.tight_layout()
91 plt.show()

```

Listing A.2 – Código Python: Processamento dos dados experimentais do Segundo Dispositivo

## Apêndice D - Dados Experimentais do Segundo Dispositivo

Este apêndice apresenta os dados experimentais obtidos no Segundo Dispositivo, destinados ao estudo da birrefringência induzida pela passagem da luz polarizada linear por um meio birrefringente (placa de acrílico). Foram realizadas três medições independentes para cada ângulo  $\theta$ , variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  em passos de  $10^\circ$ . A média aritmética dessas medições permitiu atenuar variações experimentais, fornecendo uma representação mais precisa da intensidade transmitida. As tabelas seguintes apresentam os dados obtidos para os *lasers* vermelho ( $\lambda = 665$  nm) e verde ( $\lambda = 532$  nm).

Tabela A.4 – Valores de intensidade luminosa (lux) do *laser* vermelho em função do ângulo  $\theta$ .

$\theta$ (graus)	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média (lux)
0	73	74	71	72,67
10	97	101	97	98,34
20	121	124	118	121,00
30	142	142	137	140,34
40	152	155	148	151,67
50	157	157	155	156,34
60	155	153	153	153,67
70	145	143	141	143,00
80	127	126	123	125,34
90	106	103	123	105,00
100	83	82	78	81,00
110	60	59	56	58,34
120	41	33	38	37,34
130	28	26	26	26,67
140	29	18	29	25,34
150	23	20	21	21,34
160	31	29	30	30,00
170	49	44	46	46,34
180	72	66	68	68,67

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

Tabela A.5 – Valores de intensidade luminosa (lux) do *laser* verde em função do ângulo  $\theta$ .

$\theta$ (graus)	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média (lux)
0	54	41	33	42,67
10	56	41	34	43,67
20	59	45	37	47,00
30	61	46	40	48,67
40	68	46	41	51,67
50	77	48	38	54,34
60	85	52	40	59,00
70	89	57	43	59,67
80	94	53	45	64,00
90	74	53	44	57,00
100	74	50	43	55,67
110	73	47	35	51,67
120	65	49	39	49,67
130	64	41	38	48,67
140	63	42	37	47,34
150	57	39	35	43,67
160	53	40	31	41,34
170	49	31	32	37,34
180	41	32	26	34,00

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

A partir desses dados, foram gerados os gráficos comparativos apresentados na Seção (2.3), cujas curvas ajustadas por polinômios de grau 4 permitiram visualizar o comportamento qualitativo da birrefringência nos diferentes comprimentos de onda. A Figura 10 sintetiza os resultados obtidos.

### Apêndice E - Código Python : Terceiro Dispositivo

O código *Python* deste apêndice foi desenvolvido para o pós-processamento dos dados experimentais do Terceiro Dispositivo, responsável pela análise quantitativa da birrefringência óptica, descrita na Seção (2.4). O programa calcula a diferença de fase  $\varphi$  e a birrefringência  $\Delta n$  a partir dos valores de pico obtidos experimentalmente, verificando

a consistência dos dados medidos e automatizando o processamento computacional.

```

1 # =====
2 # Apêndice E - Código Python : Terceiro Dispositivo
3 # Autor: [Seu Nome]
4 # Descrição: Processamento dos dados experimentais de birrefringência  $\Delta n$ 
5 # obtidos com lasers vermelho e verde a partir dos valores de pico de
6 # tensão.
7 # =====
8 import pandas as pd
9 import numpy as np
10 import os
11
12 # =====
13 # Caminho para a Área de Trabalho (OneDrive Windows)
14 # =====
15 desktop = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "OneDrive", "Desktop")
16
17 if not os.path.exists(desktop):
18     raise FileNotFoundError(f"Diretório não encontrado: {desktop}")
19
20 # =====
21 # Função principal de cálculo de  $\Delta n$ 
22 # =====
23 def calcular_dados(dados, lambda_nm, espessura, nome_laser="Laser"):
24     n = len(dados["Medição"])
25     delta_n_list = [" " for _ in range(n)]
26     razao_check = []
27     valores_dn = []
28
29     print(f"\n===== {nome_laser.upper()} =====")
30     par = 1
31     for i in range(0, n, 2):
32         vpico_1 = dados["Val. Pico (mV)"][i] / 1000
33         vpico_2 = dados["Val. Pico (mV)"][i + 1] / 1000
34
35         if vpico_1 == 0:
36             r = float('inf')

```

```

37     else:
38         r = vpico_2 / vpico_1
39
40         cos_phi = (r - 1) / (r + 1)
41         phi_rad = np.arccos(np.clip(cos_phi, -1, 1))
42         phi_deg = np.degrees(phi_rad)
43
44         dn = (phi_deg * lambda_nm * 1e-9) / (2 * np.pi * espessura)
45         valores_dn.append(dn)
46         delta_n_list[i + 1] = dn
47
48         print(f"\nPar_Medições_{par}:")
49         print(f"    Val. Pico_ímpar:_{vpico_1:.4f}V")
50         print(f"    Val. Pico_par:_{vpico_2:.4f}V")
51         print(f"    Razão_R={v_par}/v_ímpar={r:.4f}")
52         print(f"    cos(φ)={cos_phi:.4f}")
53         print(f"    φ(rad)={phi_rad:.6f}")
54         print(f"    φ(graus)={phi_deg:.6f}")
55         print(f"    Δn={dn:.6e}")
56         par += 1
57
58     for j in (i, i + 1):
59         diff = round(dados["Val. Max(V)"][j] - dados["Val. Min(V)"]
60                     ][j], 3)
61         vpico_v = dados["Val. Pico(mV)"][j] / 1000
62         if abs(diff - vpico_v) < 0.01:
63             razao_check.append("de acordo")
64         else:
65             razao_check.append(f"{diff:.2f}V")
66
67     media_dn = sum(valores_dn) / len(valores_dn)
68     print(f"\n>>> MÉDIA Δn({nome_laser}):_{media_dn:.6e}<<<")
69
70     for key in dados:
71         dados[key].append("")
72     dados["Medição"][-1] = "Média"
73     delta_n_list.append(media_dn)
74     razao_check.append("")

```

```

75     return pd.DataFrame(dados).assign( $\Delta n$ =delta_n_list, Razão=razao_check
76     )
77     # =====
78     # Dados experimentais: Laser Vermelho ( $\lambda = 665$  nm)
79     # =====
80     dados_vermelho = {
81         "Medição": [f"Medida_{i}" for i in range(1, 5) for _ in (0, 1)],
82         "Ângulo(°)": [75, 120] * 4,
83         "Val._Pico(mV)": [320, 800, 320, 960, 240, 880, 320, 880],
84         "Val._Max(V)": [4.08, 3.36, 4.80, 3.44, 4.24, 3.44, 4.40, 3.68],
85         "Val._Min(V)": [3.76, 2.56, 4.48, 2.48, 4.08, 2.56, 4.08, 2.64],
86     }
87
88     # =====
89     # Dados experimentais: Laser Verde ( $\lambda = 532$  nm)
90     # =====
91     dados_verde = {
92         "Medição": [f"Medida_{i}" for i in range(1, 5) for _ in (0, 1)],
93         "Ângulo(°)": [120, 165] * 4,
94         "Val._Pico(mV)": [400, 1760, 400, 1760, 480, 1760, 400, 1760],
95         "Val._Max(V)": [1.82, 2.40, 1.92, 2.40, 2.08, 2.40, 2.08, 2.40],
96         "Val._Min(V)": [1.52, 0.64, 1.60, 0.64, 1.60, 0.64, 1.60, 0.64],
97     }
98
99     # =====
100    # Processamento e geração dos resultados
101    # =====
102    df_vermelho = calcular_dados(dados_vermelho, lambda_nm=665, espessura
103        =2.72e-3, nome_laser="Laser_Vermelho")
104
105    df_verde = calcular_dados(dados_verde, lambda_nm=532, espessura=2.72e-3,
106        nome_laser="Laser_Verde")
107
108    # =====
109    # Exportação para planilhas Excel
110    # =====
111    arquivo_vermelho = os.path.join(desktop, "laser_vermelho.xlsx")
112    arquivo_verde = os.path.join(desktop, "laser_verde.xlsx")

```

```

111 df_vermelho.to_excel(arquivo_vermelho, index=False)
112 df_verde.to_excel(arquivo_verde, index=False)
113
114 print(f"\nPlanilhas salvas na Área de Trabalho:\n- {arquivo_vermelho}\n-
      {arquivo_verde}")

```

Listing A.3 – Código Python: Cálculo da birrefringência no Terceiro Dispositivo

## Apêndice F - Dados Experimentais do Terceiro Dispositivo

Este apêndice reúne os dados experimentais obtidos nas medições realizadas com os lasers monocromáticos (vermelho e verde), referentes ao Dispositivo 3 descrito na Seção (2.5). As tabelas a seguir apresentam os registros das grandezas físicas coletadas durante o experimento, organizadas de modo a possibilitar a análise detalhada do comportamento da luz ao atravessar o meio birrefringente.

Cada conjunto de medições abrange dois ângulos distintos entre os polarizadores, de forma a maximizar a sensibilidade à diferença de fase  $\phi$  gerada pela birrefringência do material. As variáveis reportadas incluem: o valor de pico de tensão obtido no osciloscópio (em milivolts), as tensões máxima e mínima (em volts), a diferença de fase convertida em termos de birrefringência  $\Delta n$ , bem como uma razão comparativa entre os valores observados e o valor esperado para a modulação (considerando  $V_{\text{pico}} = V_{\text{max}} - V_{\text{min}}$ ). Essa razão auxilia na identificação de possíveis inconsistências de leitura ou flutuações na qualidade do sinal capturado.

Tabela A.6 – Dados experimentais para o *laser* vermelho (665 nm).

Medição	Ângulo ( $\theta$ )	Val. Pico (mV)	Val. Max (V)	Val. Min (V)	$\Delta n$	Razão
Medida 1	75	320	4.08	3.76	$2,5145 \times 10^{-3}$	de acordo
	120	800	3.36	2.56		de acordo
Medida 2	75	320	4.80	4.48	$2,3347 \times 10^{-3}$	de acordo
	120	960	3.44	2.48		de acordo
Medida 3	75	240	4.24	4.08	$2,1459 \times 10^{-3}$	0,16 V
	120	880	3.44	2.56		de acordo
Medida 4	75	320	4.40	4.08	$2,4196 \times 10^{-3}$	de acordo
	120	880	3.68	2.64		1,04 V
Média					$2,3537 \times 10^{-3}$	

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

Tabela A.7 – Dados experimentais para o *laser* verde (532 nm).

Medição	Ângulo ( $\theta$ )	Val. Pico (mV)	Val. Max (V)	Val. Min (V)	$\Delta n$	Razão
Medida 1	120	400	1.82	1.52	$1,5869 \times 10^{-3}$	0,30 V de acordo
	165	1760	2.40	0.64		
Medida 2	120	400	1.92	1.60	$1,5869 \times 10^{-3}$	0,32 V de acordo
	165	1760	2.40	0.64		
Medida 3	120	480	2.08	1.60	$1,7168 \times 10^{-3}$	de acordo de acordo
	165	1760	2.40	0.64		
Medida 4	120	400	2.08	1.60	$1,5869 \times 10^{-3}$	0,48 V de acordo
	165	1760	2.40	0.64		
Média					$1,6193 \times 10^{-3}$	

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).