

Abordagem quantitativa da polarização da luz: Explorando a Lei de Malus com o aplicativo PhyPhox

Quantitative approach to light polarization: Exploring the Law of Malus with the PhyPhox App

Marcelo Franklin da Silva Santos¹, André Scheidegger Laia^{*1,2}

¹Universidade do Estado do Pará, Departamento de Ciências Naturais, 68502-100, Marabá, PA, Brasil.

²Universidade do Estado do Pará, Grupo de Pesquisa em Física e ensino de Física, Departamento de Ciências Naturais, 68502-100, Marabá, PA, Brasil.

Recebido em 30 de novembro de 2022. Revisado em 27 de fevereiro de 2023. Aceito em 30 de março de 2023.

O presente trabalho descreve a confecção de um aparato experimental alternativo para o ensino prático da polarização da luz através da lei de Malus, utilizando materiais de baixo custo e um smartphone com o aplicativo *PhyPhox*, para coletar e analisar os dados quantitativamente em escolas que não dispõem de estruturas laboratoriais formais. Esse recurso tem por finalidade facilitar o processo de comprovação e compreensão da lei de Malus, pois foi possível demonstrar a teoria com dados reais e boa precisão. O material apresentado é de fácil construção e pode ser feito por professores e alunos do ensino médio. Além disto, a ferramenta didática proposta também permite relacionar os conceitos de campos elétricos e o caráter ondulatório da luz ao fenômeno de polarização da luz. Tal proposta permite que os alunos realizem atividades experimentais quantitativas de análises de dados laboratoriais e desenvolvam uma melhor compreensão das tecnologias empregadas em objetos e dispositivos eletrônicos do seu dia a dia, mesmo quando não dispõem de um laboratório de física.

Palavras-chave: Polarização da Luz, Lei de Malus, Experimento Quantitativo alternativo.

The present work describe the construction of an alternative experimental apparatus for the practical teaching of light polarization through the law of Malus, using low-cost materials and the smartphone with the *PhyPhox* application, to collect and analyze quantitative data in schools that do not have formal laboratory structures. This feature is intended to facilitate the process of proving and understanding Malus's law, as it is possible to demonstrate the theory with real data and good accuracy. The material presented is easy to build and can be done by teachers and high school students. In addition, the proposed didactic tool also allows relating the concepts of electric fields and the wave character of light to the phenomenon of polarization of light. This proposal allows students to carry out quantitative experimental activities of analysis of laboratory data and develop a better understanding of the technologies used in objects and every day electronic devices, even when they do not have a physics laboratory.

Keywords: Polarization of Light, Malus's Law, Alternative Quantitative Experiment.

1. Introdução

O processo de ensino-aprendizagem de física se faz mais efetivo com a utilização de ilustrações e aplicações práticas dos conceitos teóricos através de experimentos [1]. Uma das grandes vantagens do ensino de física através de aulas experimentais é a possibilidade de atrair mais facilmente a atenção dos alunos, dando uma motivação extra para a participação ativa nas aulas de física, proporcionando uma melhor construção cognitiva das ideias e conceitos estudados [1-3]. Com isso, o aluno consegue assimilar mais facilmente os conteúdos teóricos, pois além de ser mais visual e interessante, o aluno pode conhecer uma forma de aplicar o que está sendo estudado nas aulas teóricas, gerando uma melhor compreensão da funcionalidade de objetos e equipamentos do dia-a-dia, dando sentido real para a aprendizagem desses novos

conceitos e alcançando uma aprendizagem verdadeiramente significativa [3, 4]. Dessa forma, se faz necessária a utilização de um laboratório de física, ou de ciências em geral, no qual se possa contar com instrumentos que propiciem essas devidas práticas [5].

Considerando que dificilmente os professores e alunos do ensino básico podem contar com um laboratório de física adequadamente equipado, uma opção viável é a elaboração de atividades experimentais alternativas, usando materiais de baixo custo ou de fácil aquisição [6]. Atualmente existe uma forte tendência em introduzir smartphones nestes experimentos devido ao grande número de sensores embutidos nestes dispositivos, o que permite que muitos aplicativos os transformem em verdadeiros “laboratórios de bolso” [7, 8]. Assim, esses experimentos muitas vezes podem ser potencializados através da utilização de smartphones para coleta e análise de dados, permitindo um estudo quantitativo dos fenômenos investigados.

*Endereço de correspondência: andrelaia@uepa.br

Dentre os conteúdos de física presentes no currículo do Ensino Médio, o estudo do fenômeno de polarização da luz é um tema indispensável para o entendimento físico de diversos objetos e equipamentos presentes no dia-a-dia do aluno, sendo um assunto que deve ser visto na disciplina de física de acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) [9, 10]. Acreditando nisto, alguns trabalhos presentes na literatura apresentam formas de estudar quantitativamente a polarização da luz através da lei de Malus, usando experimentos alternativos. Esses trabalhos podem ser classificados em três grupos diferentes, com base no sistema de análise da intensidade da luz transmitida empregado no experimento. O primeiro deles consiste em utilizar um fotodetector ligado a um circuito e a placa de áudio de um computador ou um Arduino. A variação na intensidade da luz captada pelo fotodetector produz uma variação no sinal eletrônico do circuito que é correlacionado a intensidade de luz [11, 12]. No segundo caso, o sistema de análise da intensidade da luz transmitida, baseia-se na imagem capturada pela câmera de um smartphone. Neste caso, a imagem coletada pela câmera é analisada posteriormente por um software de fotometria, que possibilita mensurar a intensidade das componentes RGB (*Red, Green, Blue*) da imagem [7, 13, 14]. E por fim, o terceiro grupo de trabalhos analisa a intensidade de luz através do sensor de luminosidade presente no smartphone usando um aplicativo livre dedicado a essa finalidade [8, 15]. O presente trabalho se enquadra na terceira categoria, utilizando o aplicativo *PhyPhox* para estudar a lei de Malus.

Analisando o conjunto de polarizadores utilizados nos experimentos mencionados acima, percebe-se que existem duas abordagens comuns. A primeira envolve o uso de equipamentos de laboratório convencionais que possuem ajuste do ângulo de rotação entre os filtros polarizadores. No entanto, essa abordagem requer a aquisição desses equipamentos no mercado para reproduzir a prática experimental [13]. Já a segunda abordagem propõe o uso de filtros polarizadores retirados de telas LCD, mas sem um aparato que permita o controle preciso do ângulo entre as direções de polarização dos filtros [7]. Neste trabalho, foi desenvolvido um suporte para os filtros polarizadores extraídos de telas LCD que permitiu controlar o ângulo entre as direções de polarização de uma forma precisa, assim esta prática experimental pode ser reproduzida em escolas que não dispõem de laboratórios de física.

Dessa forma, tivemos como objetivo central deste trabalho a construção de um aparato experimental alternativo, totalmente desenvolvido a partir de materiais de baixo custo ou de fácil aquisição e um smartphone, que possibilitou o estudo experimental quantitativo da lei de Malus [16] através de uma prática experimental simples, rápida e precisa, facilitando os procedimentos de coleta e análise de dados. Acreditamos que este trabalho pode ser de grande relevância para o ensino de física, visto que a

prática experimental proposta aqui pode ser reproduzida em qualquer escola de ensino médio que disponha de um smartphone.

2. O Estudo da Polarização da Luz

2.1. Polarização da luz

A partir do conhecimento da dualidade onda-partícula da luz, sabemos que ela pode ser tratada tanto como partícula quanto como uma onda eletromagnética. Neste último caso, definimos luz como uma estreita faixa do espectro eletromagnético, visível para o ser humano, compreendida entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nm [17].

Analisando a luz como uma onda eletromagnética, temos que as oscilações dos campos elétricos (\vec{E}) e magnéticos (\vec{B}) ocorrem em planos perpendiculares entre si e também perpendiculares em relação ao seu sentido de propagação. Na Figura 1(a), é apresentada uma representação esquemática de uma radiação eletromagnética (luz) que se propaga no sentido positivo do eixo “z” e tem o campo elétrico (\vec{E}) oscilando no plano “yz” e o campo magnético (\vec{B}) oscilando no plano “xz”. Como a direção do plano de oscilação do campo elétrico não muda com o tempo, essa luz é classificada como uma luz polarizada (Figura 1(b)) [18]. No entanto, em fontes de luz como o Sol ou uma lâmpada elétrica, a direção do plano de oscilação do campo elétrico não possui uma direção preferencial devido à natureza de sua produção, já que cada elétron, responsável por tais emissões, oscila em uma direção aleatória [17]. Neste caso, essa luz é classificada como luz não polarizada (Figura 1(c)). Na prática, podemos considerar que esses diferentes vetores de campos elétricos presentes em uma luz não polarizada possuem componentes vetoriais sobre o eixo “x” e sobre o eixo “y”, levando a termos 50% do campo elétrico oscilando na horizontal (eixo “x”) e 50% oscilando na direção vertical (eixo “y”) [18].

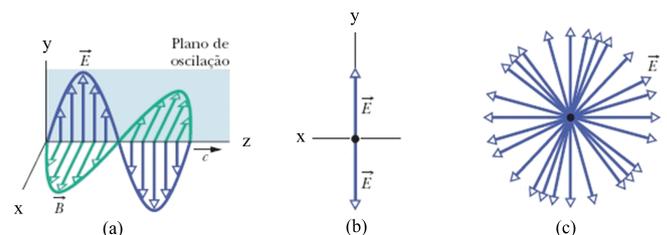


Figura 1: (a) Esquema representativo de uma onda eletromagnética com os campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{B}) oscilando nos planos “yz” e “xz”, respectivamente. (b) representação frontal de uma onda polarizada indicando a direção preferencial de oscilação do campo elétrico (\vec{E}). (c) representação frontal de uma luz não polarizada, onde o campo elétrico oscila em diferentes direções. Imagens adaptadas de [18].

Uma luz não polarizada pode ser transformada em uma luz polarizada por diferentes processos [19, 20]:

- Por reflexão – quando a luz não polarizada incide em uma interface que separa dois meios com índices de refração diferentes, a luz refletida pela interface pode ser parcial ou completamente polarizada, dependendo do ângulo de incidência e da relação entre os índices de refração dos meios;
- Por espalhamento – quando parte do campo elétrico \vec{E}_0 da luz não polarizada interage com um meio material, tendo ambos diferentes valores de frequência angular de oscilação. Parte da energia da luz incidente é totalmente absorvida e em seguida reemitida na forma de uma onda ($\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t$) conforme o padrão de radiação de um dipolo elétrico oscilante, tendo esta luz uma orientação de vibração do campo elétrico bem definida, ou seja, a luz espalhada é polarizada;
- Por absorção – consideremos agora que o meio material seja composto por uma fina rede de fios condutores dispostos verticalmente (y) no plano “xy”. Quando a luz não polarizada incide perpendicularmente a essa rede, as componentes “y” do campo elétrico desta luz forçarão os elétrons livres a oscilarem ao longo de “y”, e estes por sua vez acabarão por se colidirem com os átomos presentes na estrutura, transferindo a sua energia aos fios na forma de calor. Por outro lado, as componentes “x” atravessarão a rede livremente.

A polarização por absorção é o processo mais frequentemente utilizado para polarizar a luz em algumas telas e lentes. Esse processo é realizado por uma película que funciona como um filtro polarizador. Inventado em 1932 por Edwird Land, este filtro consiste em uma fina folha de polímeros constituído de macromoléculas orgânicas muito compridas. Esquentado e depois resfriado sobre forte tensão, essas macromoléculas acabam por se alinhar na direção da tensão. Posteriormente são presos quimicamente átomos eletronegativos as estruturas das macromoléculas, as tornando condutoras elétricas, semelhantes aos fios descritos no processo de absorção. Assim, as componentes paralelas a essas macromoléculas são absorvidas e as componentes perpendiculares conseguem atravessá-la livremente, e portanto, a luz polarizada que emerge do polarizador tem orientação de polarização sempre perpendicular a orientação das macromoléculas [18]. Isso é representado na Figura 2.

2.2. Lei de Malus

Como já mencionado anteriormente, podemos decompor o vetor campo elétrico de uma luz não polarizada que se propaga ao longo do eixo “z” nas componentes “x” e “y”, e teremos 50% do campo elétrico oscilando na horizontal e 50% oscilando na direção vertical. Assim, a intensidade da luz não polarizada é reduzida pela metade ao atravessar um filtro polarizador ($I = I_0/2$) [20].

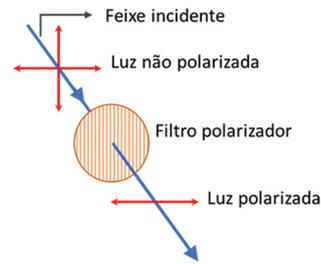


Figura 2: Um feixe de luz inicialmente não polarizado ao atravessar um filtro polarizador com as macromoléculas alinhadas verticalmente polariza a luz horizontalmente. As linhas desenhadas no representam a orientação das macromoléculas.

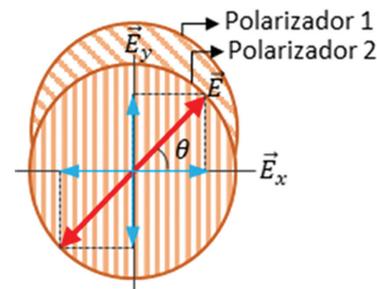


Figura 3: Luz polarizada emergente do polarizador 1 atravessando o polarizador 2 disposto com um ângulo θ em relação a orientação de polarização do primeiro.

Introduzindo um segundo polarizador ao esquema da Figura 2, de forma que este faça um ângulo θ com a orientação de polarização do primeiro polarizador (seta em vermelho), o campo elétrico que atravessa o polarizador 2 será dado por $\vec{E}_x = \vec{E} \cos \theta$ (Figura 3). Embora tenhamos representado o campo \vec{E}_y , ele será absorvido pelas moléculas dispostas no polarizador 2 e não o atravessarão.

Como a intensidade luminosa é proporcional ao quadrado do campo elétrico, temos que a intensidade da luz que atravessa o segundo polarizador (I) será dada por:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

onde I_0 é a intensidade de luz que atravessa o primeiro polarizador. Essa equação é comumente conhecida como Lei de Malus [7].

2.3. Proposta de implementação didática

A polarização da luz é um fenômeno fundamental que ocorre em muitos aspectos da nossa vida diária. Por exemplo, a polarização da luz é responsável pela forma como enxergamos imagens em telas de LCD, como em smartphones e televisores. Além disso, a polarização da luz tem aplicações importantes em ciência e tecnologia, como na detecção de tensões em materiais e na identificação de substâncias em química. Além disto, a polarização é um fenômeno puramente ondulatório capaz

de comprovar o caráter ondulatório da luz. Devido a esta relevância, a BNCC estabelece que tal assunto deve ser introduzido nas aulas de física [9, 10].

Uma das formas mais apropriadas para fazer a implementação deste assunto em sala de aula é através da experimentação, pois a mesma permite aos alunos visualizarem e compreenderem conceitos abstratos e complexos de forma concreta e prática [7]. Por meio de atividades experimentais, os alunos podem explorar o comportamento da luz polarizada em diferentes situações, manipular variáveis e analisar os resultados. Além disso, a experimentação permite que os alunos desenvolvam habilidades importantes, como a observação, análise, interpretação de dados e solução de problemas. A experimentação também pode estimular a curiosidade, a criatividade e a colaboração entre os alunos [1].

Sugerimos que este assunto seja introduzido no terceiro ano do Ensino Médio, como um subtópico de ondas eletromagnéticas. É importante que ele seja introduzido após o estudo dos fenômenos de óptica, mais especificamente conceitos de reflexão, refração e absorção, já que a polarização da luz pode ser realizada por meio destes processos. A forma como o professor irá desenvolver o assunto em sala depende muito do perfil da turma e dos recursos disponíveis. De forma genérica, sugerimos nos próximos parágrafos uma sequência didática básica de como esse assunto pode ser abordado em sala de aula, levando em consideração o desenvolvimento de uma aprendizagem significativa [3, 4].

Em geral os alunos se mostram apáticos em relação as aulas de física. Para quebrar essa barreira e despertar o interesse para o novo assunto o professor pode inicialmente propor algumas experiências introdutórias dispondo de um par de óculos de Sol. O professor pode disponibilizá-lo para que os alunos coloquem os óculos enquanto rotacionam seus celulares com a tela desbloqueada. Eles notaram que a intensidade da luz emitida pelo celular que chega aos seus olhos dependerá do ângulo de rotação entre o celular e os óculos. Neste momento o professor pode sugerir que os alunos proponham hipóteses para explicar o que está ocorrendo. Em seguida, o professor pode apresentar um vídeo mostrando a reflexão da luz do Sol na superfície de um lago sem e depois com o uso de um filtro polarizador, inicialmente sem mencionar que se trata de um filtro polarizador [21]. Em seguida o professor pode novamente pedir que os alunos tentem explicar o que está acontecendo.

Este momento servirá para aguçar a curiosidade dos alunos e também para que o professor sonde os conhecimentos prévios dos alunos. A partir das teorias levantadas pelos alunos o professor pode então desenvolver uma explicação mais apropriada para os fenômenos apresentados e mencionar que os conceitos teóricos que serão estudados em seguida abordarão este assunto. Após esta etapa, o professor pode introduzir os conceitos teóricos, apresentando a teoria da polarização da luz e da lei de Malus, evidenciando a característica ondulatória

da luz, discutindo o que é a polarização da luz, por que ela ocorre e como podemos detectá-la. Em seguida ele pode desenvolver os conceitos teóricos da lei de Malus e sua relação com a intensidade da luz polarizada.

Na etapa seguinte, o professor pode então propor a execução da prática experimental quantitativa proposta neste artigo, onde o aluno pode analisar a variação gradual da intensidade da luz de uma lanterna ao atravessar dois filtros polarizadores a medida em que varia o ângulo de rotação entre esses filtros. Para fazer essa análise, inicialmente o aluno pode observar a projeção da luz transmitida em uma parede, em seguida o professor pode orientar ao aluno que utilize o aplicativo *PhyPhox*, onde a intensidade da luz é coletada pelo sensor de luminosidade do celular.

Já com os dados coletados, o professor pode solicitar que o aluno construa um gráfico da intensidade da luz em função do ângulo de rotação entre os polarizadores. Após analisar o gráfico montado, o professor pode sugerir que o aluno normalize a intensidade de luz com relação a intensidade máxima transmitida e reconstrua o gráfico para que os alunos tentem correlacionar a forma ondulatória presente no gráfico com uma função matemática que já conheçam. Neste momento é esperado que os alunos já possam visualizar que quando o ângulo de rotação entre os polarizadores é de 0° a intensidade é igual a 1 e que quando o ângulo é de 90° a intensidade é aproximadamente zero. Assim é possível correlacionar o comportamento da intensidade da luz em função da variação do ângulo de rotação entre os polarizadores com uma função cosseno ($(\cos \theta)^2$). Por fim, o professor pode sugerir que os alunos montem um novo gráfico com a intensidade normalizada em função do cosseno do ângulo ao quadrado, isso deve levar a um comportamento aproximadamente linear, que pode facilmente ser correlacionado com a equação 1, comprovando a validade da lei de Malus. Uma forma de avaliar a compreensão dos alunos e sua aprendizagem sobre o assunto pode ser através da confecção de um relatório detalhado da prática experimental.

Esta é uma forma alternativa de abordar a polarização da luz e a lei de Malus em sala de aula com uma prática experimental quantitativa visto que, em geral, quando este assunto é trabalhado em escolas de nível médio, a inexistência de um laboratório de física leva o professor a negligenciar a sua abordagem prática, ou então apresentar apenas experimentos demonstrativos, sem uma análise cuidadosa de como os parâmetros envolvidos influenciam na intensidade da luz. No próximo tópico é apresentado detalhes da montagem e execução do experimento quantitativo proposto.

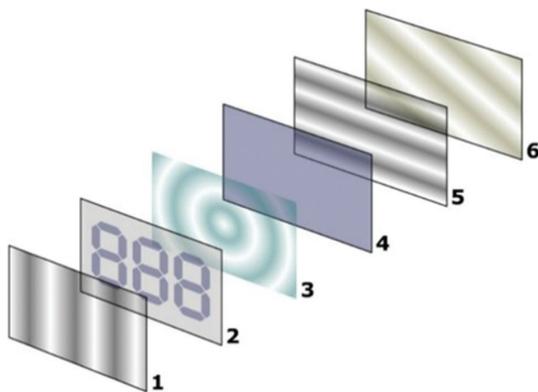
3. Materiais e Métodos

Os materiais utilizados na montagem deste experimento são apresentados no Quadro 1:

Os polarizadores foram extraídos de telas LCD (Liquid Crystal Displays) de materiais de descarte

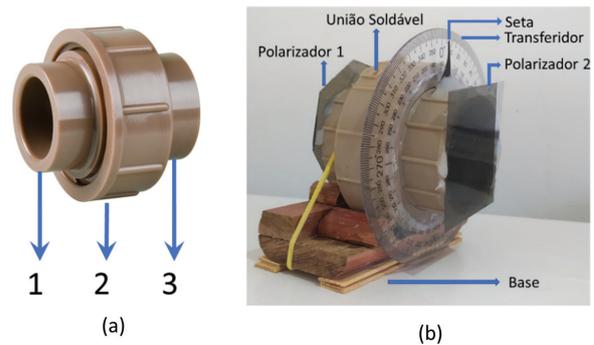
Quadro 1: Materiais que foram utilizados na construção e realização do experimento.

Item	Quantidade
Polarizadores	2
União soldável de PVC (policloreto de vinila) de 50 mm ou similar	1
Base de madeira	1
Conjunto de Elásticos	1
Transferidor	1
Cola quente	1
Lanterna	1
Suporte para o smartphone (tripé)	1
Smartphone com o aplicativo <i>PhyPhox</i> devidamente instalado	1
Computador para controlar remotamente o smartphone e analisar os dados	1

**Figura 4:** Filmes que compõem a tela de LCD [23].

(smartphones, TVs, Monitores, notebooks e etc). Na Figura 4 são apresentados os componentes geralmente presentes em uma tela de LCD: (1) Filme polarizador na vertical; (2) Substrato de vidro com eletrodo ITO (óxido de estanho e índio); (3) Cristal líquido; (4) Substrato de vidro de eletrodo ITO com traçados horizontais para se alinhar com polarizador horizontal; (5) Filme polarizador na horizontal; (6) Espelho para tornar-se um painel refletivo [7, 22, 23]. Assim, de cada tela de LCD é possível extrair dois polarizadores.

Inicialmente, foi construído o suporte para os dois filtros polarizadores, que permitiu um maior controle do ângulo entre as direções de polarização. Para isso, a união soldável de PVC foi montada enroscando a parte 1 na parte 2, deixando a parte 3 presa entre as duas (1 e 2), mas com uma folga para que a mesma pudesse girar livremente (Figura 5(a)). Em seguida, o transferidor foi colado na parte 2 (do lado da parte 3) e os filtros polarizadores 1 e 2 foram colados nas partes 1 e 3, respectivamente. Posteriormente, a parte 3 foi girada até encontrar a posição onde os sentidos de polarização dos filtros se coincidissem (maior intensidade de luz transmitida). Esta posição foi marcada colando uma seta alinhada com o ângulo zero do transferidor. Por fim, esse conjunto foi colocado sobre uma base de

**Figura 5:** (a) União soldável de PVC de 50 mm, (b) suporte para os filtros polarizadores.

madeira e preso por um elástico, mantendo as partes 1 e 2 fixas e a parte 3 livre para girar 360° (Figura 5(b)).

3.1. Realização do Experimento

Este experimento foi realizado para fazer medições diretas e quantitativas da intensidade de uma fonte de luz não polarizada ao passar por dois polarizadores. Dessa forma, podemos simplificar o trabalho de França e Lopes (2022) [7], pois não será necessário utilizar um computador para fazer análise fotométrica, poupando mais tempo em sala de aula para fazermos outras representações e análises gráficas que tal experimento requer.

Inicialmente foi executado o aplicativo *PhyPhox* no smartphone e selecionamos o sensor “Luz – obtenha o dado puro do sensor de luz” (Figura 6(a)). Clicamos nos três pontos na parte superior a direita e selecionamos “permitir acesso remoto” (Figura 6(b) e (c)). O aplicativo forneceu uma URL, que ao acessarmos, possibilitou controlar o aplicativo por outro smartphone ou computador. Ao fazer isso, a tela do aplicativo foi duplicada e foi possível controlar tudo a partir deste segundo dispositivo. Esse processo facilita o manuseio, mas pode ser pulado caso não se tenha um segundo dispositivo (smartphone ou computador).

Após a conclusão dos procedimentos anteriores, partimos para montagem do aparato experimental com o smartphone preso ao suporte (tripé) na posição horizontal, o suporte para os filtros polarizadores e a lanterna, devidamente alinhados como apresentado na Figura 7(a). Foi necessário que a luz da lanterna transmitida através dos polarizadores estivesse incidindo sobre o sensor de luminosidade do smartphone, que geralmente encontra-se próximo a câmera frontal. Na Figura 6(d), a posição da câmera frontal e do sensor de luminosidade foram indicados pelas setas 1 e 2, respectivamente. Para garantir o alinhamento, foi pressionado o botão “play” do aplicativo e o celular foi movimentado em relação ao feixe de luz até que se encontrasse um ponto no qual o gráfico produzido pelo aplicativo indicasse a máxima intensidade de luz coletada pelo sensor (Figura 6(d)).

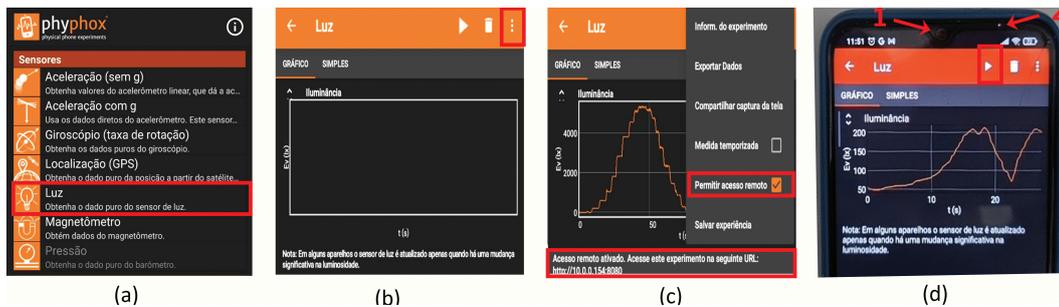


Figura 6: (a) Interface do aplicativo, (b) experimento Luz, (c) configurar acesso remoto, (d) posição da câmera frontal (1), do sensor de luminosidade (2) e do botão *play* do aplicativo.

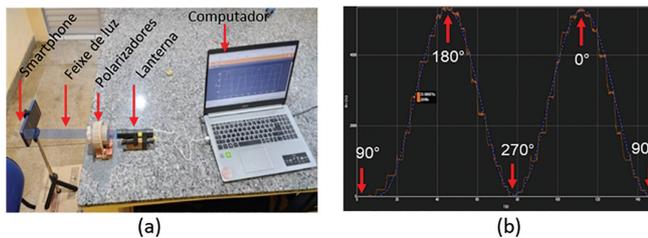


Figura 7: (a) Aparato experimental devidamente montado (b) gráfico da intensidade da luz em função do tempo, plotado pelo aplicativo *PhyPhox* em tempo real, iniciando com um ângulo de 90° entre os sentidos de polarização dos filtros. A linha pontilhada em azul corresponde a uma função cosseno ao quadrado.

Após a montagem do aparato, giramos a parte 3 da união, variando assim o ângulo entre as direções de polarização dos dois filtros e com isso variamos também a intensidade da luz que atravessava os polarizadores (dada em lux). As variações no ângulo foram de 10° e 10° graus, com pausa de 3 ou 4 segundos a cada variação. Como o aplicativo registrava um novo valor de intensidade luminosa a cada $0,1s$, em cada ângulo foram registrados cerca de 30 valores de intensidade luminosa. Isso possibilitou obter um gráfico da intensidade da luz em função do tempo ($I(t)$) plotado pelo aplicativo em tempo real, tendo um formato aproximado de uma função cosseno ao quadrado, onde seus máximos foram correlacionados aos ângulos de 0° e 180° e seus mínimos aos ângulos de 90° e 270° entre as direções de polarização dos polarizadores 1 e 2 (Figura 7(b)), assim como ocorre em uma função cosseno ao quadrado. Cada degrau visto no gráfico corresponde a uma rotação de 10° do segundo polarizador. Esses degraus ocorrem nas pausas de 3 à 4 segundos mencionados, onde a intensidade luminosa é constante em relação tempo. Assim, a Figura 7(b) corresponde a uma rotação de 360° do segundo polarizador 2.

4. Resultados e Discussões

Para que seja viável a execução desta prática em um maior número de escolas, considerando as diferentes

realidades possíveis, a realização de uma atividade experimental alternativa deve utilizar materiais de baixo custo e/ou de fácil acesso, deve ter uma montagem simples e além disto, deve possibilitar uma realização rápida e reprodutível. Por isso, ao tomar o cuidado de manter uma velocidade de rotação do segundo polarizador, já garantimos a constatação visual da lei de Malus por meio do gráfico da intensidade de luz em função do tempo, visto tanto na tela do smartphone quanto do computador (Figura 7(b)). Tal execução levou menos de 3 minutos para ser concluída.

Para obtenção dos dados do experimento e realizarmos a análise quantitativa, clicamos novamente nos três pontos e selecionamos a opção “exportar dados (Excel)” (Figura 6(c)), o que se obteve foi uma tabela com duas colunas (tempo e intensidade luminosa). Num programa de análise de planilhas, foi possível plotar novamente o gráfico e tirar as médias dos valores de intensidade de cada degrau e correlaciona-los com os ângulos correspondentes, ângulos esses conhecidos graças ao suporte construído (Figura 5(b)). Com isso foi construída uma nova tabela com a intensidade em função do ângulo θ entre as direções de polarização dos polarizadores (Tabela 1). Além disto, os valores de intensidade luminosa foram normalizados em relação a intensidade máxima de 5297 lux (I/I_{max}). Em seguida plotamos um gráfico da intensidade luminosa normalizada em função do ângulo θ a partir dos dados apresentados na Tabela 1 (Figura 8). A função cosseno de θ ao quadrado também foi plotada no gráfico da Figura 8 para podemos confirmar mais uma vez a constatação visual feita na Figura 7(b) de que a intensidade luminosa varia periodicamente com o valor de θ , se ajustando bem ao comportamento da função $[\cos(\theta)]^2$.

Admitindo que $I_0 = I_{max}$, podemos reescrever a equação (1) como:

$$\cos^2 \theta = \frac{I}{I_{max}} \quad (2)$$

Assim, normalizando as intensidades (I/I_{max}) e as correlacionando com o $\cos^2 \theta$ podemos comprovar ou não a validade da lei de Malus.

Tabela 1: Resultados da variação de iluminância em função do ângulo.

Ângulo (°)	Intensidade (lx)	Desvio Padrão	I/I_{max}	Desvio Padrão	Ângulo (°)	Intensidade (lx)	Desvio Padrão	I/I_{max}	Desvio Padrão
0	5297	33	1,000	0,006	90	0,52	0,51	0,000	0,001
10	5156	41	0,973	0,008	100	122	2	0,023	0,001
20	4734	27	0,893	0,005	110	537	2	0,101	0,001
30	4043	39	0,763	0,007	120	1002	1	0,189	0,001
40	3252	32	0,614	0,006	130	1801	22	0,340	0,004
50	2326	29	0,439	0,006	140	2799	43	0,528	0,008
60	1449	14	0,274	0,003	150	3798	20	0,717	0,004
70	862	6	0,163	0,001	160	4626	17	0,873	0,003
80	280	4	0,053	0,001	170	5073	31	0,958	0,006
90	0,52	0,51	0,000	0,001	180	5264	32	0,994	0,006

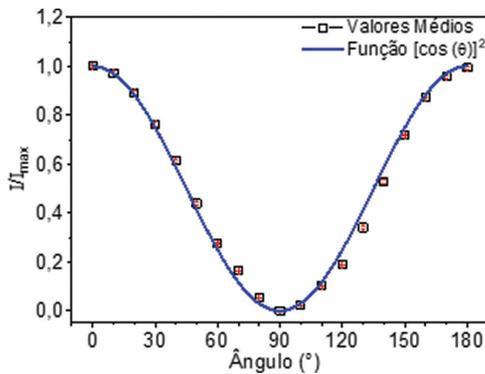


Figura 8: Gráfico gerado com os dados da Tabela 1. A linha em azul corresponde a função que melhor se ajusta ao comportamento dos dados coletados $[\cos(\theta)]^2$.

Os dados coletados no procedimento representado na Figura 7(b) foram fracionados em quatro etapas ($M_1 = 90^\circ$ a 180° , $M_2 = 180^\circ$ a 270° , $M_3 = 270^\circ$ a 360° ou 0° e $M_4 = 0^\circ$ a 90° , já que a princípio basta variarmos 90° entre os polarizadores para comprovarmos a lei de Malus, cada uma dessas etapas corresponde a uma medida. Novamente, as intensidades luminosas foram normalizadas em relação a intensidade máxima (I/I_{max}) e os resultados foram apresentados na Tabela 2, já correlacionados aos respectivos valores de $\cos^2 \theta$. E com os dados da Tabela 2 plotamos o gráfico da Figura 9, com as intensidades normalizadas em função do $\cos^2 \theta$,

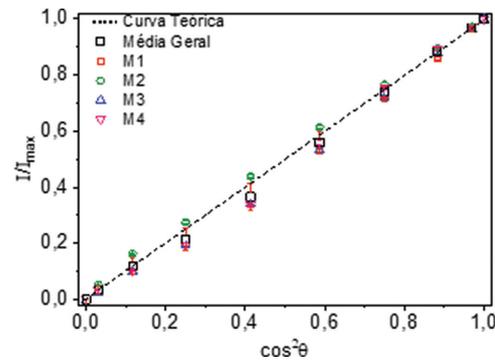


Figura 9: Gráfico gerado com os dados da Tabela 2.

para uma melhor visualização das medidas (M_1 , M_2 , M_3 e M_4), colhidas em nossa prática experimental. O comportamento teórico previsto (linha preta pontilhada) é o de uma função linear crescente que se estende de 0 a 1.

Comparando a média geral das medidas (pontos em preto) com a curva teórica (linha pontilhada), foi possível perceber que existe uma boa concordância entre a teoria e a prática experimental realizada, mesmo utilizando materiais alternativos para a sua execução. Comparando estes resultados com os reportados em trabalhos similares na literatura [7, 12, 15], foi permitido inferir que os resultados obtidos são igualmente válidos, porém a execução da estratégia apresentada neste trabalho pode ser realizada em um menor intervalo de tempo.

Tabela 2: Resultados da intensidade relativa em função do $\cos^2 \theta$.

$\cos^2 \theta$	$M_1 = \frac{I}{I_{max}}$	Desvio Padrão	$M_2 = \frac{I}{I_{max}}$	Desvio Padrão	$M_3 = \frac{I}{I_{max}}$	Desvio Padrão	$M_4 = \frac{I}{I_{max}}$	Desvio Padrão
0	$9,8 \times 10^{-5}$	$9,5 \times 10^{-5}$	$9,8 \times 10^{-5}$	$9,6 \times 10^{-5}$	$9,9 \times 10^{-5}$	$9,8 \times 10^{-5}$	$9,7 \times 10^{-5}$	$9,6 \times 10^{-5}$
0,0302	0,037	0,001	0,053	0,001	0,0232	$4,4 \times 10^{-4}$	0,034	0,001
0,117	0,112	0,002	0,163	0,002	0,101	0,002	0,103	0,002
0,25	0,198	0,006	0,275	0,004	0,193	0,008	0,197	0,008
0,4132	0,341	0,003	0,439	0,006	0,342	0,004	0,339	0,006
0,5868	0,531	0,007	0,614	0,006	0,533	0,007	0,559	0,007
0,75	0,718	0,004	0,765	0,008	0,721	0,005	0,753	0,007
0,8830	0,859	0,004	0,895	0,005	0,879	0,004	0,893	0,007
0,9698	0,962	0,008	0,972	0,010	0,965	0,006	0,970	0,006
1	1	0,006	1	0,006	1	0,006	1	0,006

Mesmo se tratando de um experimento que envolve luminosidade, ele não requer um ambiente totalmente escuro, nem tão pouco equipamentos laboratoriais ou uma confecção rebuscada.

A concordância entre os valores teórico e experimental registrados no presente artigo foram semelhantes aos obtidos em outros trabalhos [7, 12, 15]. No entanto, a montagem e execução do experimento proposto aqui é consideravelmente simples quando comparado a proposta de Oliveira et al 2020 [12], não requer nenhum equipamento laboratorial convencional como os usados por Çolak e Erol 2020 [15], mas ainda assim permite a coleta de dados em tempo real, o que é uma clara vantagem a respeito do trabalho de França e Lopes (2022) [7], já que na proposta realizada por eles, são necessários pelo menos 3 processos demorados para chegar a um resultado semelhante ao resultado alcançado no nosso experimento.

Assim, o diferencial deste trabalho com relação aos trabalhos presentes na literatura foi a construção de um suporte para os polarizadores extraídos de telas LCD de descarte, que permitiu o controle do ângulo entre as direções de polarização, sua rápida execução e fácil reprodutibilidade, culminando em uma prática experimental com coleta de dados através de uma tecnologia muito presente na sociedade atual, principalmente entre os jovens, que são os smartphones, tornando o experimento mais atrativo para o aluno.

Como ressalva aos desvios dos resultados em relação a curva teórica podemos destacar a: reflexão da luz ocasionalmente captada pelo sensor de luminosidade do smartphone; instabilidade da intensidade da fonte luminosa, que normalmente diminui com o passar do tempo devido descarga da bateria (conseguimos melhorar esse fator mantendo a lanterna carregando no momento da coleta dos dados); o ângulo selecionado contém um erro de $\pm 1^\circ$ devido a precisão do equipamento usado. Para reduzir tais erros é conveniente realizar o experimento em um espaço com baixa luminosidade e também manter o sensor próximo ao segundo polarizador.

5. Considerações Finais

Este trabalho trouxe uma opção alternativa para a prática experimental em sala de aula em turmas do ensino básico, pois os materiais utilizados são de baixo custo e/ou de fácil aquisição além de possuir uma montagem simples. O uso do aplicativo *PhyPhox* permite a rápida obtenção dos resultados e facilita a visualização dos dados durante e depois do experimento. O computador utilizado para controle remoto e análise dos dados foi introduzido apenas para facilitar e ter uma melhor estabilidade do procedimento experimental, mas seu uso é opcional, já que a obtenção e leitura dos dados pode ser feita no próprio smartphone. Além disto, este aparato experimental pode ser construído juntamente com os alunos em sala, ou até mesmo como proposta para o

ensino remoto, para que os próprios alunos montem em sua residência, com o auxílio de um adulto responsável, seguindo as instruções do professor.

Nesta prática foi possível construir com poucos recursos uma opção experimental para se ensinar e verificar de forma prática e detalhada a lei de Malus (polarização da luz), compreendendo com mais profundidade o comportamento ondulatório da luz e sua natureza eletromagnética, bem como as tecnologias empregadas em alguns dispositivos eletrônicos. Desta forma, concluímos que a proposta experimental apresentada neste trabalho pode contribuir significativamente para o ensino de física em escolas de ensino médio desprovidas de laboratórios de ensino devidamente equipados.

Referências

- [1] M.V. Pereira e M.C.A. Moreira, *Caderno Brasileiro de Ensino Física* **34**, 265 (2017).
- [2] A. Gaspar e I. Monteiro, *Investigações em Ensino Ciências* **10**, 227 (2005).
- [3] J.L.P. Ribeiro e M.F.S. Verdeaux, *Rev. Bras. Ensino Fis.* **34**, 4403 (2012).
- [4] D. Ausubel, J. Novak e H. Hanesian, *Psicologia Educacional* (Interamericana, Rio de Janeiro, 1980).
- [5] L.C.G. Filho, A.S. Fontes, O.R. dos Santos, M.C. Batista e D.R. Coneglian, *Cad. Física da UEFS* **18**, 2503.1 (2020).
- [6] E.G. Alves e A.L.M. Santos, *Rev. Bras. Ensino Física* **43**, 20210146–1 (2021).
- [7] G.H. de França e J.V. Lopez, *Rev. Bras. Ensino Física* **44**, e20210423 (2022).
- [8] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza e A.C. Martí, *Phys. Teach.* **55**, 264 (2017).
- [9] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, *Base Nacional Comum Curricular*, 21 de dezembro de 2017. Brasília, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf
- [10] L.A. Oliveira, E.F. Sá e E.F. Mortimer, *Rev. Bras. Pesqui. em Educ. em Ciências* **19**, 251 (2019).
- [11] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro e D. Guimarães, *Física na Escola* **7**, 73 (2006).
- [12] I. N. Oliveira, W.L. Silva, J.A.P. Ramos, C.A.O. Melo, C. Takiya e V.D. Chaves, *Rev. Bras. Ensino Fis.* **42**, e20190105 (2020).
- [13] J.L. Fabris, M. Muller e L.V.M. Fabris, *Cad. Bras. Ensino Física* **34**, 636 (2017).
- [14] T. Rosi e P. Onorato, *Physics Education* **55**, 045011 (2020).
- [15] Í.Ö. Çolak e M. Erol, *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia* **16**, 9 (2020).
- [16] E.L. Malus, *Bull. Sci. Soc. Philom. Paris* **7**, 77 (1807).
- [17] P.G. Hewitt e M.H. Gravina, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2015).
- [18] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de física: óptica e física moderna* (LTC, Rio de Janeiro, 2016), v. 4.
- [19] S.C. Zilio, *Óptica Moderna: Fundamentos e Aplicações* (IFSC-USP, São Paulo, 2009).

- [20] P.A. Tipler e G. Mosca, *Física para Cientistas e Engenheiros* (LTC, Rio de Janeiro, 2014), v. 3.
- [21] <https://www.youtube.com/watch?v=KinAp8G5xPA>, acessado em 22/09/2023.
- [22] L. Vertchenko e L. Vertchenko, *Rev. Bras. Ensino Fis.* **38**, e3311 (2016).
- [23] D. Ciriaco, *Como funcionam as telas de LCD?*, disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/televisao/2058-como-funcionam-as-telas-deled-htm>, acessado em: 16/09/2022.