

Experimento de baixo custo para o ensino de física óptica: o caso da Lei de Malus

Low cost experiment for optical physics teaching: the case of the Malus Law

Gustavo Henrique de França¹, Johnny Vilcarromero Lopez^{*1}

¹Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Física, Química e Matemática, Sorocaba, SP, Brasil.

Recebido em 03 de dezembro de 2021. Revisado em 07 de abril de 2022. Aceito em 12 de abril de 2022.

Este artigo apresenta a realização de um experimento de baixo custo utilizando apenas objetos do cotidiano para a verificação da propriedade de polarização da luz. O objetivo é facilitar a prática da experimentação no processo de ensino de ciências em um contexto de baixo investimento em infraestrutura escolar pública ou até mesmo de ensino remoto emergencial. Com materiais presentes em dispositivos eletrônicos em desuso e a utilização de aplicativos e softwares gratuitos, o presente artigo mostra que é possível verificar a Lei de Malus – que relaciona o ângulo entre um polarizador e a direção de polarização de uma luz incidente e a intensidade da luz transmitida. Esse experimento permite uma abordagem prática do conteúdo de óptica do ensino básico, além de viabilizar o estudo do funcionamento e utilização de dispositivos e aplicativos digitais.

Palavras-chave: Materiais de baixo custo, Ensino de Física, Experimentação, Óptica, Lei de Malus.

This article presents the realization of a low-cost experiment, using only everyday objects to verify the light polarization property. The objective is to facilitate the practice of experimentation in the science teaching in a context of low investment in public school infrastructure or even emergency remote teaching. With materials present in idle electronic devices and the use of free apps and software, this article shows that it is possible to verify Malus' Law, which relates the angle between a polarizer and the polarization direction of an incident light and the intensity of the transmitted light. This experiment allows a practical approach to basic education optics content, also enables the study of the functioning and use of digital devices and apps.

Keywords: Low cost materials, Physics Teaching, Experimentation, Optics, Malus' Law.

1. Introdução

A experimentação pode ser uma excelente ferramenta pedagógica para o ensino de Física. Além de ser capaz de motivar os alunos devido ao seu caráter lúdico, a utilização de experimentos pode enriquecer a construção do conhecimento científico tanto por atrelar o que é estudado teoricamente com o que é realizado na prática, quanto pela possibilidade de problematizar a obtenção de resultados reais se comparado com o resultado idealizado, possibilitando uma aprendizagem mais consistente e abrangente [1].

Apesar da utilidade da experimentação no ensino, em uma situação de pandemia, como o atual contexto mundial, a dificuldade do ensino de ciências por métodos práticos se intensifica. Em um estudo publicado em 2020 [2], foi constatado que a educação online alcança efetivamente apenas uma parcela restrita da população brasileira, mostrando que existem desafios fundamentais a serem superados na educação por meio de tecnologias digitais.

Por outro lado, é amplamente reconhecido e discutido na literatura que o ensino de ciências na rede pública

possui diversas falhas, em especial na subutilização da infraestrutura escolar no que diz respeito à realização de atividades experimentais, já que atualmente sofre com uma escassez de investimento, que em conjunto com outros fatores problemáticos da educação científica formal, contribui para a precarização da formação dos alunos, dificultando ainda mais a democratização do acesso ao conhecimento [3].

Uma forma de lidar com a ausência de investimento na infraestrutura escolar e o uso da experimentação como método de ensino de ciências de forma remota é a utilização de experimentos de baixo custo, em especial, aqueles que podem ser realizados no espaço domiciliar. Para Ávila e Matos [4], a utilização de materiais de baixo custo no desenvolvimento de atividades de experimentação, além de promover a conscientização do aluno sobre a descartabilidade e reaproveitamento de materiais, contribui com a democratização do conhecimento por possibilitar a ocorrência dessas atividades em instituições de ensino que carecem dos recursos necessários. Essa prática também viabiliza a execução do experimento no contexto da educação à distância, tendo em vista que os materiais são mais acessíveis do que equipamentos laboratoriais, a atividade pode ser realizada em domicílio.

* Endereço de correspondência: jvlopez@ufscar.br

Neste artigo, exploramos a Lei de Malus com o objetivo de propor um método para o ensino dos conceitos de óptica através da experimentação. O estudo da física óptica, em especial da polarização da luz, faz parte do currículo do Ensino Médio, sendo um dos temas estudados para a compreensão das propriedades das ondas eletromagnéticas. Porém, possui pouco tempo destinado à sua abordagem prevista na Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Sendo assim, o experimento aqui sugerido visa demonstrar experimentalmente a consequência da polarização das ondas eletromagnéticas, e abrange a compreensão do funcionamento e uso de dispositivos e aplicativos digitais, também previstos no currículo do ensino básico [5].

A Lei de Malus vem sendo trabalhada em laboratório desde Glassen [6], em 1950, que utilizava equipamentos laboratoriais complexos, até propostas mais modernas como as de Vertchenko e Vertchenko [7], Monteiro et al. [8], Rosi e Onorato [9], e Çolak e Erol [10] que combinam sofisticados equipamentos de laboratório com ferramentas tecnológicas contemporâneas, como os smartphones. Este aparelho vem sendo utilizado com maior frequência na realização de diversos experimentos de óptica tais como o estudo da óptica geométrica [11], de lentes focais [12], e da velocidade da luz [13]. Neste sentido, o propósito deste artigo é propor um experimento de óptica para a verificação da Lei de Malus utilizando apenas materiais de baixo custo e smartphones com aplicativos gratuitos.

2. Fundamentação Teórica

A Lei de Malus está relacionada com a transmissão de luz através de um polarizador [14]. A polarização é uma propriedade das ondas eletromagnéticas definida pela orientação de oscilação dos vetores do campo elétrico e magnético. Em geral, a luz natural não é polarizada e não possui direção de oscilação bem definida, no entanto pode se tornar polarizada por reflexão. Uma fração de uma luz que é incidida com um ângulo θ em relação a superfície será refletida e polarizada perpendicularmente em relação ao plano de incidência. O grau de polarização depende de alguns fatores, tais como a qualidade e índice de refração da superfície refletora, e, principalmente, do valor do ângulo de incidência, sendo relativo a $\cos(\theta)$. Esse fenômeno permitiu que Malus identificasse a polarização por reflexão enquanto observava a luz do Sol refletida pelas janelas do palácio de Luxemburgo através de um cristal de calcita, cujas propriedades ópticas já eram discutidas por Huygens desde 1690 em seu trabalho “Tratado sobre a Luz”. Esse cristal, na época conhecido como “espato da Islândia” é um polarizador, um aparato utilizado como filtro óptico que permite a passagem de ondas eletromagnéticas que oscilam apenas em uma direção específica [15].

O que Malus identificou ao analisar a luz polarizada refletida através de um cristal polarizador foi que a

intensidade da luz transmitida varia proporcionalmente ao quadrado do cosseno do ângulo entre a direção de vibração da luz incidente sobre o polarizador e a direção para qual a intensidade da luz analisada é máxima. Essa lei é descrita matematicamente por

$$I = I_{máx} \cos^2\theta. \quad (1)$$

Com o auxílio de tecnologias disponíveis atualmente, podemos atribuir um significado maior ao estudo da óptica e verificar diversos fenômenos físicos na prática. O experimento proposto neste artigo faz uso de LCDs (Liquid Crystal Display), presentes em muitos dispositivos eletrônicos, como TVs, Notebooks e Smartphones, que são compostos por camadas de filmes finos que funcionam exatamente como estes polarizadores, controlando a passagem de luz através de sua rede cristalina.

O cristal líquido é uma substância com uma ordem cristalina relativamente bem definida, e quando um campo elétrico lhe é aplicado, sua direção é orientada por este campo. As telas LCDs contêm 2 polarizadores, sendo o primeiro utilizado para definir a direção de polarização da luz de fundo que em seguida interage com os cristais líquidos, o que pode alterar ou não sua direção de polarização, e em seguida atravessará o segundo polarizador que permitirá a passagem apenas dos campos cuja direção de oscilação não foi alterada, formando assim pontos brilhantes e pontos escuros nos monitores, responsáveis pelo contraste das imagens. Então, quando uma luz polarizada é incidida na tela, apenas as componentes do campo eletromagnético que estão alinhados nesta direção conseguem atravessar o LCD [16].

Por outro lado, através de softwares de astrofotometria é possível quantificar a intensidade de uma onda eletromagnética transmitida como tem sido explorado por Vertchenko [7]. Para este fim é necessário somente registrar a luz observada através de uma fotografia. Um registro básico pode ser realizado através de um smartphone. Estes aparelhos geralmente possuem algumas configurações básicas, tais como o controle da sensibilidade do sensor à luz (ISO), do foco e também do valor de exposição da fotografia, relacionado diretamente com o tempo de exposição à luz [17]. Tais configurações são suficientes para a obtenção da fotografia utilizadas no experimento.

3. Metodologia

3.1. Materiais

Para a realização do experimento foram utilizados:

- Um notebook, que é aproveitado como fonte de luz polarizada. Pode ser substituído por uma TV LED, um aparelho de celular, videogames portáteis, um visor automotivo ou qualquer emissor de luz polarizada ou que possua uma película polarizadora.

- Uma tela LCD removida de um celular danificado. Essa tela também é encontrada nos aparelhos eletrônicos listados no item anterior.
- Um goniômetro ou um transferidor, para verificação do ângulo do polarizador.
- Um smartphone com câmera para registrar a transmissão da luz, com sistema Android 5.0 (lançado em 2014), iOS 9.3 (2015), ou versões mais recentes, com os aplicativos gratuitos ProCam X Lite¹ ou ProCam,² respectivamente.
- O software IRIS, também gratuito, disponível no site da desenvolvedora *Astrosurf* [18].

Com a disponibilidade de todo o material listado, foi possível realizar o experimento de baixo custo.

3.2. Procedimento

A execução do experimento consiste em realizar uma medição indireta da intensidade da luz polarizada que é emitida pelo monitor de um notebook e atravessa um polarizador posicionado em diferentes ângulos. Como o monitor também possui uma tela LCD, a luz que emite já está polarizada, e então utilizamos a tela LCD removida do celular para realizar a verificação.

No monitor do notebook foi exibida a imagem de um círculo verde em um fundo preto, construída no programa *Microsoft Paint*, com intuito de exibir uma figura qualquer em contraste com um fundo escuro. Para poder realizar a comparação da luz absorvida através da fotografia. O smartphone foi posicionado de maneira que pudesse fotografar este círculo. A tela LCD e o goniômetro (transferidor) foram posicionados entre o notebook e o smartphone, de forma que estivessem alinhados, isto é, que a câmera registrasse a figura no monitor através do LCD, como no esquema da Figura 1.

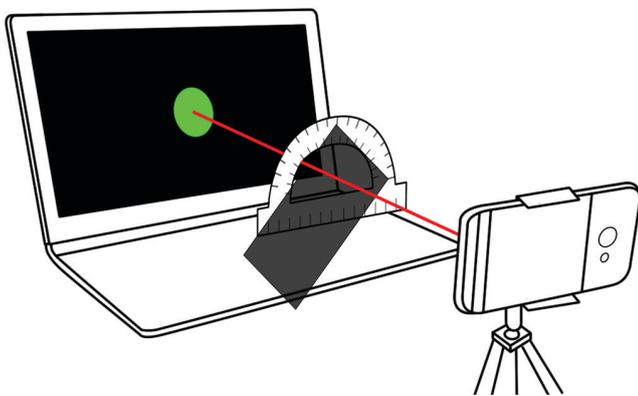


Figura 1: Esquema do experimento para verificar a Lei de Malus. Fonte: Elaborado pelo autor.

¹ play.google.com/store/apps/details?id=com.intermedia.hd.camera.professional&hl

² apps.apple.com/br/app/procam/id1148468916

Para a realização do experimento é necessário que a câmera capte a intensidade da luz com a mesma sensibilidade em todas as fotos, portanto, é necessário fixar o valor do ISO e do foco nas opções da câmera do celular. Porém, isso nem sempre é possível utilizando apenas as configurações padrões dos smartphones. Uma vez que algumas versões recentes possuem um ajuste automático da sensibilidade do sensor da câmera, e a cada fotografia modifica a quantidade de luz captada. A escolha do aplicativo ProCam para o registro das fotos deve-se ao fato de que, independentemente do smartphone utilizado, ele permite a realização de fotografias com a configuração de ISO fixa e foco travado. Desde que a versão do sistema seja compatível com o aplicativo, é possível fixar a sensibilidade à luz, e, dessa forma, também padronizar a reprodutibilidade do experimento.

Para a análise das fotos, o software utilizado foi o IRIS, mais comumente utilizado na astrofotometria, que permite a medição da intensidade de luz por meio da análise de imagens [18].

Para a verificação da lei de Malus, o goniômetro foi utilizado para medir a variação do ângulo do polarizador. É possível observar diretamente na tela do celular que com a variação do ângulo da tela LCD no esquema da Figura 1, também é modificada a intensidade da luz transmitida e capturada pela câmera, sendo que em determinada posição essa intensidade é máxima, e, com uma diferença de 90° desta, a intensidade é mínima. Essa observação a olho nu foi utilizada para posicionar a tela de forma que nenhuma luz atravessasse o polarizador, ou seja, que a câmera não conseguisse detectar o círculo no monitor estabelecido como o ângulo inicial (ângulo zero). A partir dessa posição, o ângulo foi aumentado em intervalos de 10° até o valor de 90° . No *ProCam*, o ISO foi fixado em 400 e em cada ângulo foram tiradas 3 fotos, para uma análise estatística posterior.

Para medir a intensidade da luz registrada através do IRIS, basta importar a foto, clicar na guia *Analysis*, selecionar *Aperture photometry*, e escolher a opção 2 círculos. É importante que o círculo interno contenha toda a região verde e o círculo externo apenas uma região escura, para que haja uma comparação das intensidades da luz (Figura 2). A medição é dada em ADUs (Analog Digital Units), uma medida linearmente proporcional ao sinal eletrônico gerado pelos sensores ao detectar luz, e, portanto, não é necessário realizar nenhuma conversão.

4. Resultados

A Tabela 1 apresenta os valores medidos de intensidade conforme a variação do ângulo, para fotografias com o valor do ISO de 400.

A intensidade média medida através das fotografias (ADU) foi dividida pela intensidade média máxima. A divisão da intensidade pela intensidade máxima nos fornece os resultados normalizados pelos próprios valores

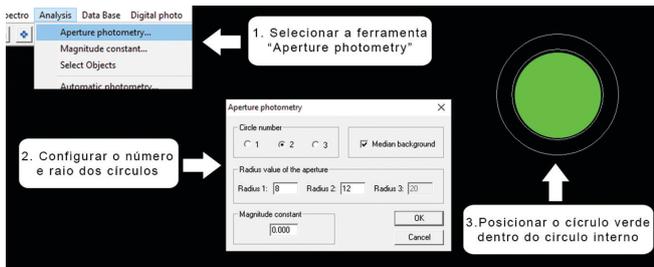


Figura 2: Procedimento para realizar a medida de intensidade de luz fotografada. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1: Valores de intensidade média e cosseno do ângulo do polarizador.

Ângulo (°)	Cosseno	Cosseno ²	Intensidade Média (ADU)
0	0	0	626
10	0,1736	0,0301	23277
20	0,3420	0,1170	170197
30	0,5000	0,2500	351846
40	0,6428	0,4132	577971
50	0,7660	0,5868	807979
60	0,8660	0,7500	963548
70	0,9397	0,8830	1110403
80	0,9848	0,9698	1180789
90	1	1	1244594

medidos na execução do experimento, que irá variar entre 0 e 1. Estes dados foram relacionados e apresentados na Figura 3, com o quadrado do cosseno do ângulo da tela LCD. Tudo isso para facilitar a análise dos dados obtidos e mostrar uma relação linear entre os dados. Ao observar a equação (1) a intensidade I é uma função quadrática em relação à variável θ . Porém, se considerarmos em função de $\cos^2(\theta)$ a relação é linear. De forma que podemos considerá-la como uma função do tipo $y = ax + b$ em que $b = 0$ e $a = I_{máx}$. Por este motivo, é de se esperar que o valor obtido para o coeficiente linear seja próximo de 0 e o valor para o coeficiente angular seja próximo de 1.

Por outro lado, o valor do coeficiente linear nos fornece, ainda, outra informação sobre a validade do experimento. Como o ângulo inicial do polarizador é determinado a olho nu, a intensidade de luz que pode ultrapassar o polarizador caso este não esteja bem posicionado vai produzir um deslocamento da reta, já que fornecerá um valor inicial de intensidade, e, portanto, uma variação do coeficiente linear. Ou seja, ao plotar o gráfico, consideramos também a presença de um coeficiente linear para que possamos observar através dos resultados se o ângulo inicial do polarizador era próximo de ortogonal em relação a polarização da luz, e, caso não seja, não será possível verificar a Lei de Malus e será necessário repetir o experimento.

A Figura 3 apresenta um gráfico, onde estão plotados os valores da Tabela 1 juntamente com uma regressão

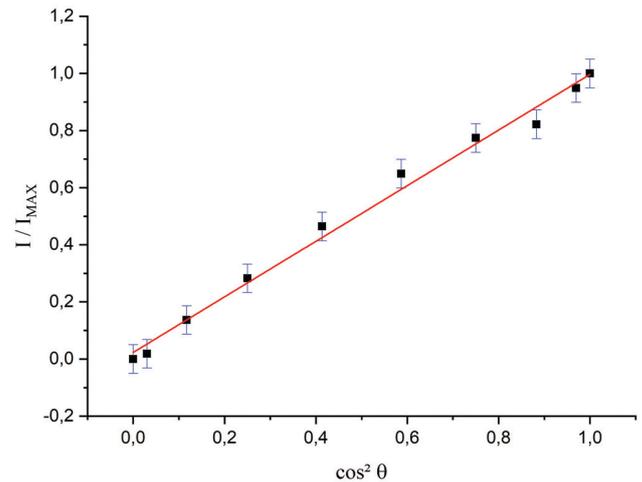


Figura 3: Gráfico da intensidade medida dividida pela intensidade máxima em função de $\cos^2 \theta$.

linear, em que o valor obtido para o coeficiente linear foi de $0,023 \pm 0,019$ e o coeficiente angular $0,973 \pm 0,031$, valores próximos do esperado.

No experimento realizado por Vertchenko [7] também foi utilizada uma tela LCD removida de um aparelho celular, e sugere que o desvio observado nos resultados pode ser explicado pelo fato de que o display é conectado a um vidro que reflete parcialmente a luz incidida, e, portanto, diminui a intensidade da luz transmitida. E não apenas a tela utilizada como polarizador como também o monitor do notebook é composto por camadas de filtros que interferem na transmissão da luz.

Podem-se acrescentar outras fontes de erro experimentais existentes no aparato, tais como a definição do ângulo inicial do polarizador, que é realizada a olho nu, e ruídos estatísticos na medição de intensidade provocados pela reflexão de luz no ambiente. Executar o experimento em ambientes escuros e realizar previamente medições de intensidade para se definir com maior precisão o ângulo inicial podem diminuir a influência dessas fontes de erros nos resultados. Outra fonte de erros é a utilização de um smartphone para registrar as fotos ao invés de uma câmera digital. Um desses erros está relacionado ao foco e à sensibilidade do sensor à luz, que se não estiverem fixados no mesmo valor para todas as fotografias, pode resultar em uma relação não linear entre a intensidade e o quadrado do cosseno do ângulo do polarizador como observado na Figura 4.

A Figura 4 compara os dados do experimento realizado com ISO fixado em 400 e foco travado, ISO 400 e ajuste automático de foco, e ISO e foco ajustados automaticamente (configuração padrão em versões mais recentes dos sistemas Android e iOS).

Uma câmera digital semiprofissional possui todas estas configurações disponíveis, porém, não é tão acessível quanto um celular, e, portanto, esses resultados evidenciam as precauções para a realização desse experimento

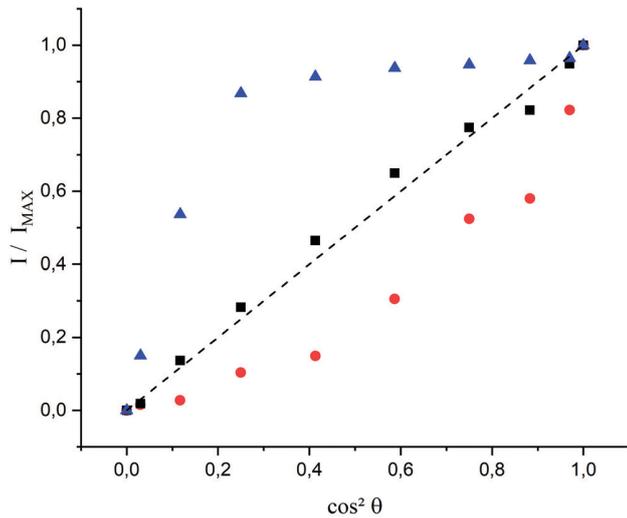


Figura 4: Gráfico da intensidade medida para fotografias com ISO 400 e foco travado (quadrado preto), ISO 400 e foco automático (círculo vermelho) e ISO e foco ambos ajustados automaticamente (triângulo azul). A linha tracejada representa a Lei de Malus.



Figura 5: Delimitações usadas para se medir a intensidade da luz no IRIS. O desfoque diminui a resolução da borda do círculo, afetando a precisão com que a intensidade é medida pelo software. Fonte: Elaborado pelo autor.

utilizando o smartphone. A ausência de foco diminui o valor da intensidade medida, pois o IRIS realiza uma comparação entre o círculo verde e o fundo escuro. O desfoque provoca uma claridade na região ao redor que diminui a diferença da luz detectada (Figura 5). O valor automático do ISO faz com que a sensibilidade do sensor seja ajustada de acordo com a luminosidade, tendendo a um valor constante, como pode ser visualizado nos triângulos azuis da Figura 4. Sendo assim, a maneira mais apropriada de se realizar o experimento é com o ISO e o foco ambos fixados, configurações disponíveis no aplicativo sugerido.

5. Conclusão

O experimento proposto neste artigo pôde ser realizado com poucas despesas, utilizando apenas materiais de baixo custo e de relativo fácil acesso. Pode ser executado

em escolas do ensino básico que carecem de investimento em infraestrutura de laboratório de ciências ou mesmo em domicílio, em vista da presente modalidade de ensino remoto aplicadas em diversas escolas do ensino público do país.

O resultado permitiu identificar as propriedades das ondas eletromagnéticas e de polarizadores através da verificação da Lei de Malus. Estes conceitos estão presentes nos conteúdos apresentados na disciplina de Física do ensino básico. Além disso, também pode ser utilizado para o ensino de conceitos relacionados ao funcionamento de dispositivos eletrônicos.

Referências

- [1] M.S. Taha, C.S.C. Lopes, E.L. Soares e V. Folmer, *EENCI* **11**, 138 (2016).
- [2] E.S. Couto, E.S. Couto e I.M.P. Cruz, *Interfaces Científicas – Educação* **8**, 200 (2020).
- [3] E.I. Santos, L.P.C. Piassi e N.C. Ferreira, em: *IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física* (Jaboticatubas, 2004).
- [4] S.G. Ávila e J.R. Matos, *Educ. Química* **28**, 254 (2017).
- [5] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, *Base Nacional Comum Curricular* (Ministério da Educação, Brasília, 2018).
- [6] S.C. Gladden, *Am. J. Phys.* **18**, 395 (1950).
- [7] L. Vertchenko e L. Vertchenko, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **38**, e3311 (2016).
- [8] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza e A.C. Marti, *Phys. Teach.* **55**, 264 (2017).
- [9] T. Rosi e P. Onorato, *Phys. Educ.* **55**, 045011 (2020)
- [10] I.Ö. Çolak e M. Erol, *JPEFI* **16**, 9–13 (2020).
- [11] A. Giroto, N.A. Goy, A. Vilquin e U. Delabre, *Phys. Teach.* **58**, 133 (2020).
- [12] J. Freeland, V. R. Krishnamurthi e Y. Wang, *Phys. Teach.* **58**, 360 (2020).
- [13] S. Kapucu, *Phys. Educ.* **52**, 045001 (2017).
- [14] E.L. Malus, *Bull. Sci. Soc. Philom. Paris* **7**, 77 (1807).
- [15] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica 4: Ótica, Relatividade e Física Quântica* (Blücher, São Paulo, 2014), v. 5, p. 138.
- [16] G. Planinsic e M. Gojkosek, *Eur. J. Phys.* **32**, 601 (2011).
- [17] P.A. Ourique, O. Giovannini e F. Catelli, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **32**, 1302 (2010).
- [18] IRIS – An astronomical images processing software, <http://www.astrosurf.com/buil/iris-software.html>, acessado em: 20/09/2021.