

Construção de um interferômetro de Michelson com geração automecânica de padrões de interferência

Construction of a Michelson interferometer with automechanical generation of interference patterns

Samuel L.S. Oliveira¹, Jefferson S. Martins^{*1,2}

¹Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Física, Centro de Educação a Distância, Juiz de Fora, MG, Brasil.

²Força Aérea Brasileira, Escola Preparatória de Cadetes do Ar, Barbacena, MG, Brasil.

Recebido em 09 de agosto de 2025. Revisado em 05 de novembro de 2025. Aceito em 18 de novembro de 2025.

Este trabalho apresenta a montagem experimental de um interferômetro de Michelson utilizando materiais de fácil acesso, com o objetivo de determinar o comprimento de onda da fonte de luz empregada, neste caso, dois lasers, um vermelho e um verde. O destaque deste trabalho é a construção de um dilatômetro automecânico, controlado por um *dimmer*, que permite o deslocamento do espelho móvel de forma controlada e contínua. Com a implementação desse sistema, foi possível mensurar com precisão o comprimento de onda do laser vermelho, com erro relativo de aproximadamente 0,90%, e do laser verde, com erro relativo de aproximadamente 0,75%, demonstrando a eficácia e a confiabilidade do método e do aparato experimental empregados.

Palavras-chave: Interferômetro de Michelson, Ensino de Física, Experimento de baixo custo, Óptica.

This work presents the experimental setup of a Michelson interferometer using easily accessible materials to determine the wavelength of the employed light sources, in this case, two lasers, one red and one green. The highlight of this work is the construction of an automechanical dilatometer controlled by a *dimmer*, which enables the controlled and continuous displacement of the movable mirror. With the implementation of this system, it was possible to accurately measure the wavelength of the red laser with a relative error of approximately 0.90%, and of the green laser with a relative error of approximately 0.75%, demonstrating the effectiveness and reliability of both the method and the experimental apparatus employed.

Keywords: Michelson interferometer, Physics education, Low-cost experiments, Optics.

1. Introdução

Em 1887, Albert A. Michelson e Edward W. Morley [1] desenvolveram um interferômetro com o objetivo de detectar o éter, meio hipotético postulado como suporte para a propagação das ondas eletromagnéticas. Seus resultados experimentais, contudo, não evidenciaram o movimento relativo da Terra em relação ao éter, tornando insustentável a hipótese de sua existência. Esse trabalho foi decisivo para o posterior abandono do conceito do éter e para a consolidação da ideia, hoje estabelecida, de que a luz é uma onda que se propaga no vácuo sem a necessidade de um meio material.

Os interferômetros de Michelson, particularmente em versões de baixo custo, têm sido amplamente empregados em diferentes áreas do conhecimento, incluindo o ensino de metrologia [2], a física moderna [3], a astronomia [4] e a óptica [5]. Além dessas aplicações, destacam-se sua utilização no monitoramento da atividade bacteriana [6–9], no desenvolvimento de circuitos de portas lógicas ultrarrápidas totalmente ópticos [10]

e na medição de amplitudes de deslocamentos nanométricos de atuadores piezoelétricos [11]. Paralelamente às aplicações experimentais, simulações computacionais do interferômetro de Michelson vêm sendo adotadas como recurso didático, uma vez que possibilitam a visualização de padrões de interferência, o ajuste de parâmetros experimentais e a análise de resultados em ambientes virtuais [12–14]. Tais simulações configuram-se como ferramentas relevantes para a democratização do acesso ao experimento, sobretudo em contextos educacionais marcados por restrições de infraestrutura.

Diversos estudos têm explorado o desenvolvimento de interferômetros de Michelson com materiais acessíveis e técnicas de montagem simplificadas, a fim de tornar esses dispositivos mais adequados ao uso educacional e a experimentos de baixo custo. Catelli e Vicenzi, por exemplo, eliminaram a necessidade de lentes expansoras ao utilizar lentes de óculos de sol em seu projeto [15]. Em outro estudo, Silva, Giacomelli, Pérez e Silva propuseram um experimento acessível, com montagem simplificada e rápida execução, projetado para ser reproduzido em ambientes escolares com recursos limitados [16]. Baseando-se nessas propostas pioneiras, Nogueira e Hernandez demonstraram que o interferômetro de Michelson pode ser efetivamente construído com materiais de baixo

*Endereço de correspondência: jmartins@ice.ufjf.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

custo [17]. Em seu trabalho, os autores relataram a reprodução bem-sucedida do experimento por alunos, em suas casas, no contexto do ensino remoto durante a pandemia de COVID-19. Souza, Santiago e Jesus [18] aprimoraram os projetos anteriores [15, 16] ao incorporar um sistema de alinhamento preciso e espelho móvel, viabilizando a medida do comprimento de onda com erro relativo de 4%.

No estudo conduzido por Catelli e Vicenzi, os autores empregaram um ferro de solda para a realização das medições, destacando a instabilidade mecânica do aparato experimental, cuja sensibilidade às vibrações ambientais compromete o alinhamento adequado dos componentes. Por outro lado, na pesquisa desenvolvida por Souza, Santiago e Jesus, foram utilizados materiais como espuma e um parafuso com rosca sem-fim para reduzir os problemas mencionados no estudo anterior por Catelli e Vicenzi. Diante desses desafios, este trabalho propõe um sistema de deslocamento automecânico para o espelho móvel, controlado por um *dimmer*. O objetivo desse sistema é minimizar a interferência humana na obtenção dos padrões de interferência e, com isso, reduzir significativamente os erros nas medições experimentais.

Dessa forma, algumas modificações foram implementadas no projeto originalmente proposto por Catelli e Vicenzi. Enquanto os autores adaptaram integralmente o ferro de solda, neste trabalho optou-se por construir um dilatômetro automecânico com o objetivo de retardar

a velocidade de dilatação térmica em comparação ao projeto original e eliminar a necessidade da ação humana para a visualização dos padrões de interferência. Esse dilatômetro permitiu regular a potência dissipada e, consequentemente, controlar a velocidade de deslocamento do espelho. Essa funcionalidade foi essencial para garantir a velocidade adequada e a reprodutibilidade dos deslocamentos das franjas de interferência, facilitando a contagem precisa das mesmas. Com as modificações implementadas, foi possível determinar o comprimento de onda de um laser vermelho como sendo (644 ± 2) nm, com erro relativo de 0,90%, e o de um laser verde como (536 ± 2) nm, com erro relativo de 0,75%.

2. Montagem Experimental

2.1. Lista de materiais

Diversos componentes utilizados na construção do interferômetro foram reaproveitados a partir de materiais que seriam descartados. Outros elementos, no entanto, precisaram ser adquiridos em locais específicos. A Tabela 1 apresenta a origem dos materiais empregados, bem como seus respectivos preços unitários e totais.

Observa-se que o componente de maior valor é o relógio comparador digital. Esse custo elevado justifica-se pela alta precisão do equipamento, essencial para a obtenção de medições confiáveis no experimento.

Tabela 1: Aquisição e valores dos materiais.

Material	Quantidade	Sugestão de Aquisição	Valor unitário (R\$)
Caneta laser de diodo vermelho (650 nm)	1	Shopee	6,00
Caneta laser de diodo verde (532 nm)	1	Shopee	6,00
<i>Dimmer</i>	1	Reaproveitado de ventilador de teto	–
Placa de vidro para o divisor de feixe (100 × 1000 × 19) mm	1	Vidraçaria	15,00
Peca de madeira (1000 × 100 × 100) mm	1	Reaproveitado em restos de materiais de construção	–
Lente convergente	1	Reaproveitado de lanterna de Led estragada	–
Parafusos	20	Casas de Parafusos	0,30
Porcas	20	Casas de Parafusos	0,15
Abraçadeira de rosca sem fim (19 × 25) mm	1	Casas de Parafusos	1,00
Cola de Cianoacrilato	1	Casas de Parafusos	5,00
Tubo de Cobre 1/2 polegada de diâmetro e 150 mm de comprimento	1	Lojas de refrigeração ou manutenção de ar-condicionado	10,00
Espelho 100 × 200 mm	1	Supermercado ou lojas de utensílio de salão	4,00
Resistência de ferro de solda	1	Mercado Livre	15,00
Abraçadeira tipo U para eletroduto de 1/2 polegada	3	Casas elétricas ou lojas de materiais de construção	1,20
Relógio comparador digital 0 – 12,7 mm 0,001 mm	1	Mercado Livre	170,00
Total			233,65

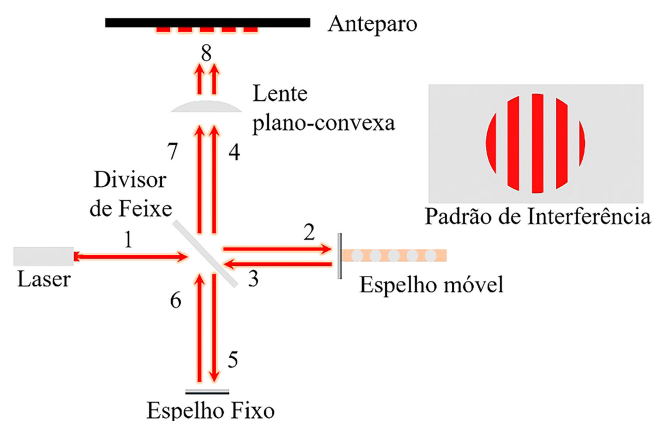


Figura 1: Representação esquemática do interferômetro de Michelson.

2.2. Funcionamento do interferômetro de Michelson

A Figura 1 representa o funcionamento do interferômetro de Michelson empregado neste estudo. O feixe de luz (1), emitido pelo laser, incide sobre o divisor de feixe, onde é parcialmente refletido (5) e parcialmente transmitido (2), resultando na divisão do feixe incidente. O feixe transmitido (2) é direcionado ao espelho móvel, sendo refletido de volta (3) ao divisor de feixe, onde sofre nova reflexão e origina o feixe (4), propagando-se em direção à lente plano-convexa. O feixe refletido inicialmente (5) incide sobre o espelho fixo, retorna ao divisor de feixe (6) e, ao atravessá-lo, origina o feixe (7). Sob condições de alinhamento adequado do sistema, os feixes (4) e (7) recombinam-se e atravessam a lente plano-convexa, formando no anteparo um padrão de interferência ampliado.

2.3. Construção do interferômetro de Michelson

Na Figura 2 apresenta-se o interferômetro de Michelson utilizado nesse experimento, composto pelos seguintes elementos: laser (L), divisor de feixe (D), espelho fixo M1 (E1), espelho móvel M2 (E2), lente convergente (LC) e o anteparo (A).

Para dar início à construção do interferômetro, é necessário confeccionar os suportes apresentados na Figura 3. Esses suportes funcionam como base estrutural e têm a função de alinhar os feixes de luz tanto na vertical quanto na horizontal. Com exceção do anteparo, todos os elementos do sistema são montados sobre suportes desse tipo, variando apenas em suas dimensões.

A Figura 3(a) ilustra o suporte utilizado para o alinhamento do laser. Os materiais utilizados para a construção do suporte foram: porcas sextavadas, com diâmetro externo de 8 mm para parafusos de 4 mm (A); parafusos (B), com 4 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento, compatíveis com as porcas; suporte de madeira (C); e cola adesiva instantânea. Foram realizados furos com

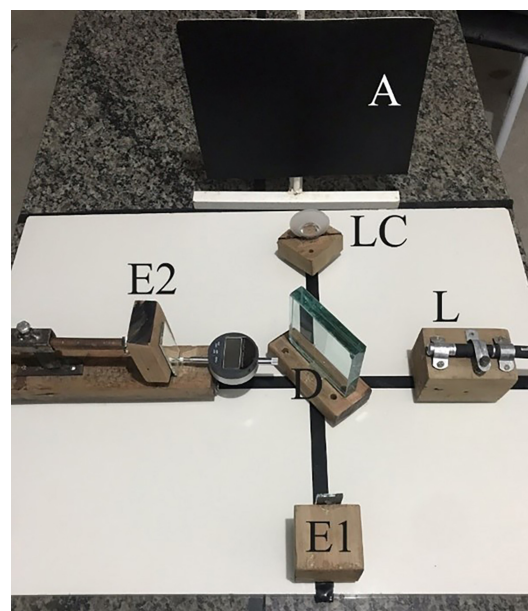


Figura 2: Montagem experimental do Interferômetro.

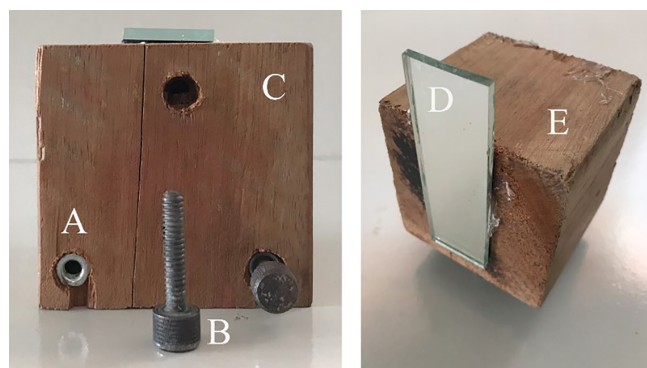


Figura 3: (a) Construção do suporte. (b) Construção do suporte para o espelho M1.

uma broca de 7 mm de diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro externo das porcas com o objetivo de forçar o encaixe das porcas na madeira. Essas porcas devem ser fixadas apenas na parte externa do suporte, utilizando cola, tomando-se o cuidado de não deixar o adesivo atingir a rosca interna, o que comprometeria o ajuste fino. Os parafusos foram empregados para ajustar a inclinação dos feixes de luz provenientes do laser. Uma variação de aproximadamente 0,5 mm na altura do suporte pode ser obtida com apenas 1/4 de volta no parafuso. Assim, ao apertar o parafuso, a altura do suporte é reduzida; ao afrouxá-lo, ocorre sua elevação. O espelho M1 (Figura 3(b)) é composto por um espelho retangular (D) de dimensões 25 × 70 mm, fixado em um suporte de madeira (E) em forma de cubo, com arestas de 60 mm.

Para que o espelho M2, apresentado na Figura 2, possa se mover linearmente com uma taxa de variação de aproximadamente 500 nm/s, Catelli e Vicenzi [15]

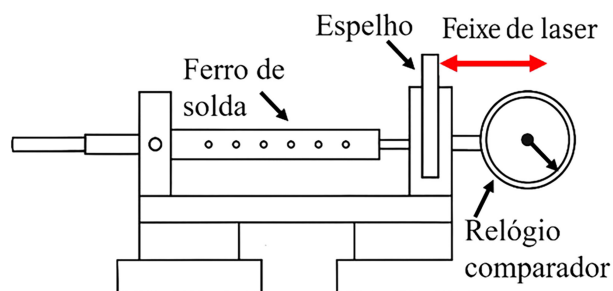


Figura 4: Deslocador de espelho sugerido por Catelli e Vicenzi. Figura adaptada de Catelli e Vicenzi [15].

propõem um projeto de deslocamento baseado na dilatação térmica, utilizando um ferro de solda como elemento de aquecimento. Esse fenômeno ocorre a partir da alteração de temperatura de um corpo, provocando variações em suas dimensões devido ao aumento na agitação molecular. À medida que as partículas do material vibram mais intensamente com o aumento da temperatura, a distância média entre elas se expande, resultando em um aumento nas dimensões do corpo [19]. A Figura 4 ilustra a concepção geral do dispositivo proposto pelos autores.

Algumas modificações foram realizadas em relação ao projeto disponibilizado por Catelli e Vicenzi (Figura 4), conforme descrito a seguir. No projeto original, Catelli e Vicenzi adaptaram todo o ferro de solda. Neste trabalho, conforme ilustrado na Figura 5, apenas a resistência de um ferro de solda (A) foi reaproveitada, sendo inserida em um tubo de cobre (B) com diâmetro de 1/2 polegada. Essa adaptação tem como objetivo retardar a velocidade de dilatação térmica em comparação ao projeto original, proporcionando maior controle sobre o deslocamento do espelho. Para a construção do suporte (C), foi necessário soldar uma porca metálica de 12 mm de diâmetro em um tubo quadrado com dimensões de $50 \times 15 \times 15$ mm e espessura de parede de 2 mm. Ao inserir um parafuso na porca, é possível fixar e pressionar a resistência do ferro de solda dentro do tubo de cobre, melhorando o contato térmico entre as duas partes. Esse parafuso também exerce a função de direcionar a dilatação na direção do espelho móvel (E), que foi fixado na extremidade oposta do tubo por meio de uma abraçadeira (D). Esses procedimentos podem ser visualizados na Figura 5.

Para obter um controle ainda mais preciso e lento da dilatação do tubo de cobre, foi utilizado um *dimmer* (F) (Figura 5), conectado em série com a resistência do ferro de solda. Esse dispositivo atua como um controlador de potência, permitindo ao operador ajustar a quantidade de energia elétrica fornecida à carga, neste caso, a resistência do ferro de solda. Ao regular a energia fornecida, o *dimmer* controla diretamente a taxa de aquecimento do sistema, o que influencia a velocidade de dilatação térmica do tubo. Catelli e Vicenzi sugeriram operar um ferro de solda com tensão nominal de 220 V e potência de 25 W sob uma tensão reduzida de 127 V, o que resulta

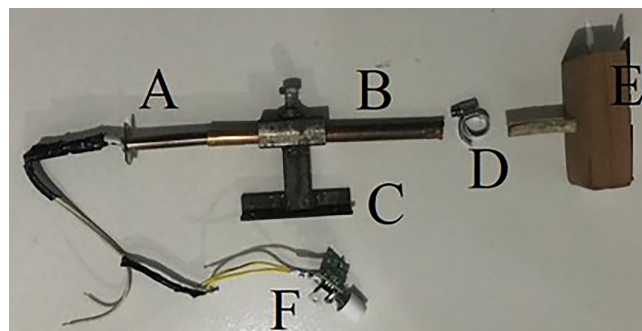


Figura 5: Construção do dilatômetro automecânico.

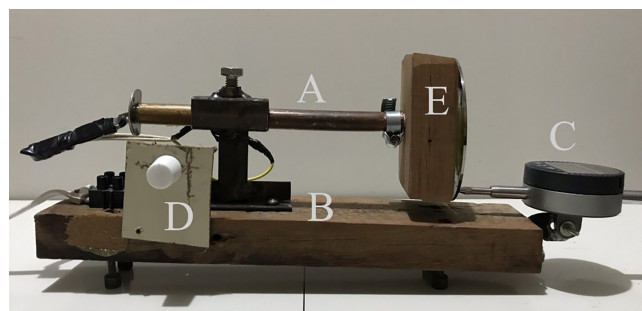


Figura 6: Dilatômetro automecânico.

em uma potência aproximada de 12,5 W, diminuindo a velocidade de deslocamento do espelho. No entanto, com o uso do *dimmer*, o operador do dispositivo passa a ter maior liberdade para controlar a potência entre aproximadamente 0 W e 25 W, permitindo um controle mais refinado do movimento do espelho e não apenas para um valor fixo como no projeto de Catelli e Vicenzi.

Na Figura 6 apresenta-se o dilatômetro automecânico e as modificações implementadas em relação ao projeto original. O dilatômetro foi fixado em um suporte de madeira (B), com dimensões de $300 \times 50 \times 25$ mm, juntamente com um relógio comparador digital (C), o *dimmer* (D) e o espelho móvel M2 (E).

O relógio comparador foi instalado de forma que sua haste de medição permanecesse em contato direto com o espelho M2, posicionada paralelamente à base e transversal ao plano do espelho. Essa configuração permite registrar com precisão o deslocamento linear do espelho em resposta à dilatação térmica do tubo de cobre, garantindo maior fidelidade na detecção dos movimentos. O dilatômetro automecânico foi conectado a uma extensão elétrica com interruptor liga/desliga, permitindo interromper o aquecimento sempre que necessário. Isso contribui para um controle mais eficiente do experimento, evitando o contato direto com o equipamento durante o processo.

Na Figura 7 apresenta-se a construção e fixação dos componentes do experimento: o laser, o divisor de feixe, a lente convergente e o anteparo utilizado. Na Figura 7(a), observa-se o laser (A), fixado em um suporte de madeira

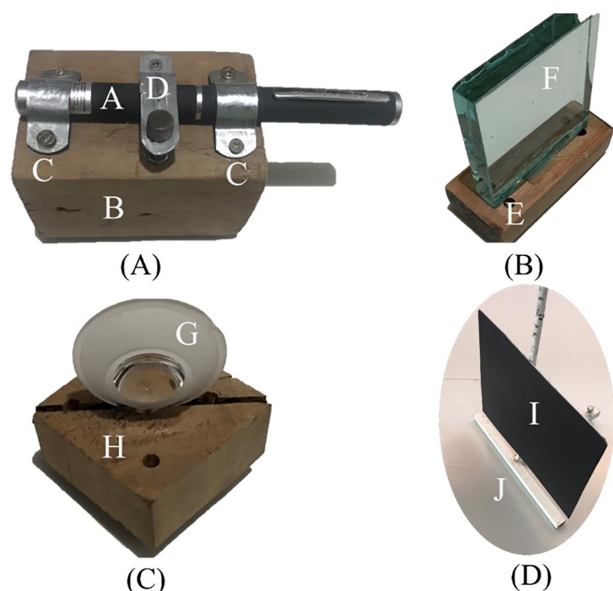


Figura 7: (a) Fixação do laser no suporte; (b) Divisor de feixe; (c) Fixação da lente convergente no suporte; (d) Anteparo.

(B) por meio de duas abraçadeiras tipo “U” de 1/2 polegada (C). Adicionalmente, uma terceira abraçadeira (D) foi adaptada sobre o botão de acionamento do laser, juntamente com um parafuso, com o objetivo de manter o dispositivo ligado continuamente, eliminando a necessidade de pressionamento manual do botão liga/desliga. Essas adaptações podem ser visualizadas na Figura 7(a).

A Figura 7(b) mostra o divisor de feixe, composto por um suporte de madeira (E) e um espelho espesso (F), fixado com cola de silicone. A maior espessura disponível em vidraçarias foi de 19 mm, e o menor tamanho que as máquinas conseguiram cortar foi de $100 \times 100 \times 19$ mm. Embora o vidro não precise ter exatamente essas dimensões, é fundamental que seja espesso, pois espessuras maiores ajudam separar espacialmente os reflexos indesejáveis das superfícies internas, facilitando o controle da interferência e contribuindo para a qualidade e precisão do experimento.

A lente convergente, apresentada na Figura 7(c), é composta por uma lente plano-convexa (G), fixada em um suporte de madeira (H). Sua principal função é ampliar, no anteparo, o padrão de interferência gerado pelos feixes de luz.

Por fim, a Figura 7(d) apresenta a construção do anteparo, composto por uma chapa de ferro (I) pintada com tinta preta fosca, fixada em um suporte (J). A pintura fosca tem como objetivo minimizar reflexos indesejáveis, contribuindo para uma melhor visualização do padrão de interferência.

2.4. Alinhamento dos equipamentos

Para realizar o ajuste do interferômetro, recomenda-se traçar duas linhas perpendiculares, representadas

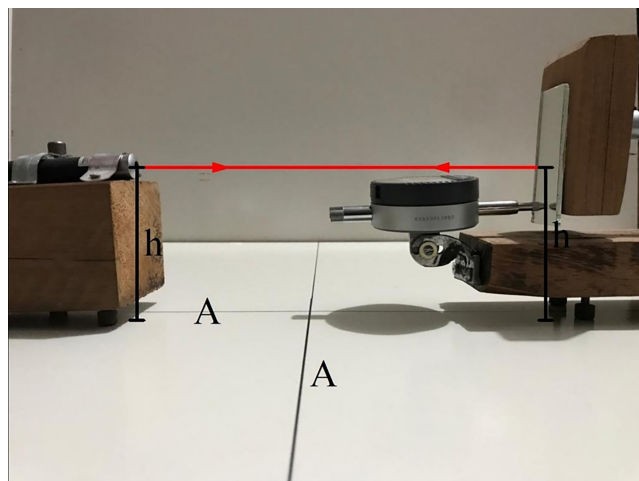


Figura 8: Alinhamento vertical entre o laser e o espelho M2.

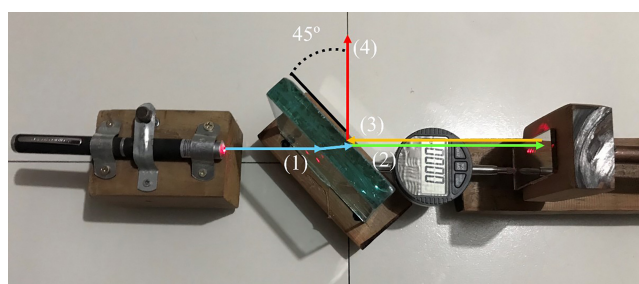


Figura 9: Alinhamento horizontal entre o laser, o divisor de feixe e o espelho M2.

pela letra “A” na Figura 8, no local de montagem, que servirão como referência para o alinhamento dos componentes. O processo de alinhamento inicia-se com o feixe do laser, representado pela linha vermelha na Figura 8, e com o espelho móvel M2 (E2). O feixe de luz deve estar alinhado com uma das linhas traçadas na superfície de montagem, e a altura (h) da saída do feixe deve coincidir com a altura do espelho M2. Esse ajuste é realizado por meio dos parafusos presentes nos suportes do laser e do espelho M2. Para confirmar o alinhamento vertical, o feixe de luz deve ser refletido exatamente para o ponto de origem, conforme ilustrado na Figura 8 pelas setas vermelhas.

A Figura 9 ilustra a inserção do divisor de feixe, que deve ser realizada somente após o alinhamento vertical entre o laser e o espelho M2. O divisor deve ser posicionado a 45° em relação às linhas perpendiculares traçadas na superfície de montagem. Para verificar o alinhamento, utiliza-se o anteparo (Figura 7(d)), no qual é possível observar a projeção dos feixes de luz. O feixe inicial do laser (1), em azul; o feixe refratado pelo divisor (2), em verde; e o feixe refletido pelo espelho M2 (3) devem ser paralelos entre si e perpendiculares ao feixe refletido (4), em vermelho.

O feixe de luz resultante projetado no anteparo (A) deve estar na mesma altura que o feixe emitido

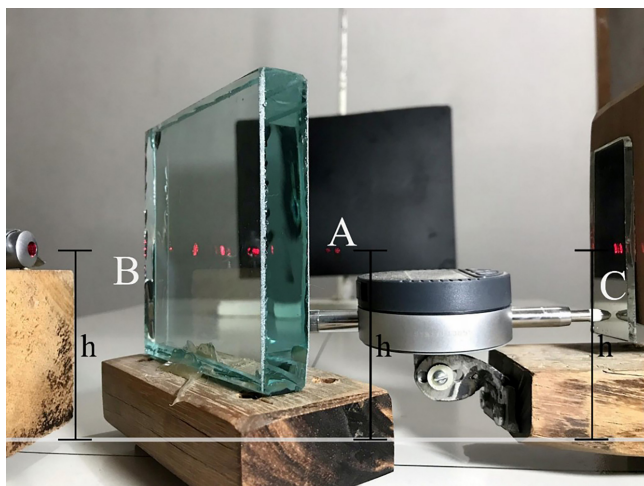


Figura 10: Alinhamento vertical entre o laser, o divisor de feixe e o espelho M2.

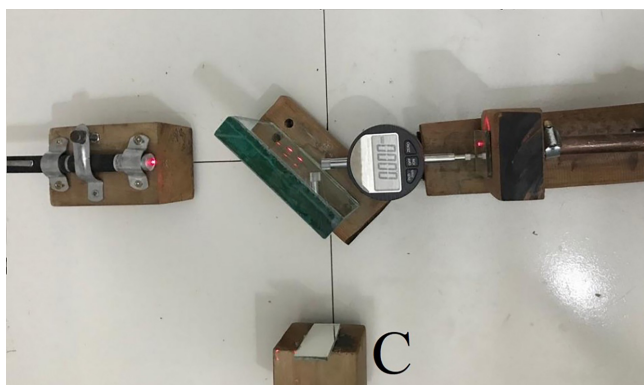


Figura 11: Inserção espelho M1.

originalmente pelo laser (B) e o feixe refletido pelo espelho M2 (C), conforme pode ser observado na Figura 10.

Dependendo da forma como o divisor de feixe é posicionado, o feixe projetado no anteparo pode não ser proveniente do espelho M2. Para verificar essa condição, basta obstruir temporariamente o espelho M2 e observar se o feixe projetado no anteparo desaparece. Na Figura 10, é possível observar dois feixes de luz projetados no anteparo (A). Esse fenômeno ocorre devido às múltiplas reflexões geradas pelas superfícies interna e externa do divisor de feixe, bem como pelas superfícies dos espelhos M1 e M2. Após essa verificação, o espelho M1 foi inserido, conforme indicado pela letra “C” na Figura 11.

Na Figura 12, é possível observar uma série de ajustes realizados para o alinhamento do espelho M1 com o espelho M2. Na Figura 12(a), observa-se o feixe proveniente do espelho M1 na parte superior e à direita. Os dois feixes projetados abaixo são provenientes do espelho M2, que não sofrerá nenhum ajuste. A Figura 12(b) mostra os feixes alinhados horizontalmente, porém com inclinação vertical incorreta. Já na Figura 12(c), verifica-se que

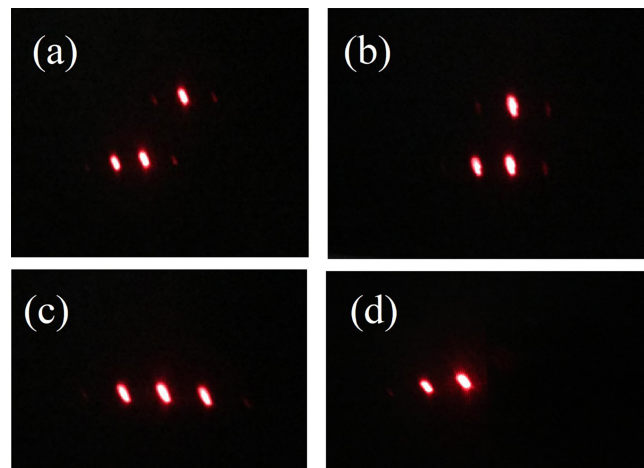


Figura 12: Alinhamento do espelho M1 com o espelho M2.

o alinhamento vertical está correto, mas há desalinhamento horizontal. Para corrigir esse desalinhamento, são feitos ajustes na inclinação horizontal, variando o ângulo entre o espelho M1 e o divisor de feixe. Os ajustes verticais são realizados por meio de parafusos que permitem variar a altura do feixe de luz. Com esses ajustes, obtém-se o resultado mostrado na Figura 12(d), onde o feixe de luz proveniente do espelho M1 está sobreposto ao feixe de luz do espelho M2, indicando o alinhamento ideal.

3. Resultados e Discussão

3.1. Alinhamento do laser

Ao alinhar os feixes, observa-se, ainda que de forma tênue, a formação de um padrão de interferência, conforme ilustrado na Figura 13(a). No entanto, devido à baixa visibilidade e à pequena dimensão do padrão, mesmo com o afastamento do anteparo, torna-se inviável realizar a contagem precisa das franjas de interferência em movimento. Para superar a limitação observada na Figura 13(a), após o alinhamento dos feixes, foi inserida uma lente convergente no sistema, conforme

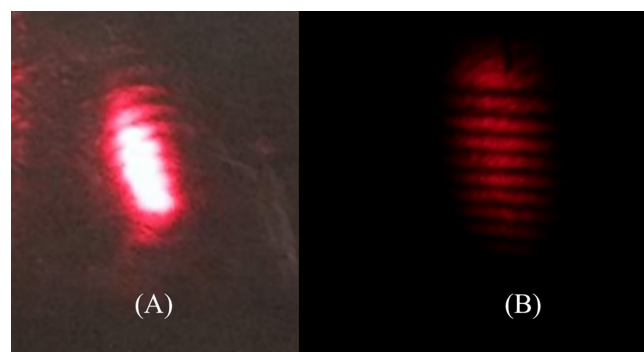


Figura 13: (a) Padrão de Interferência. (b) Padrão de interferência após a inserção da lente convergente.

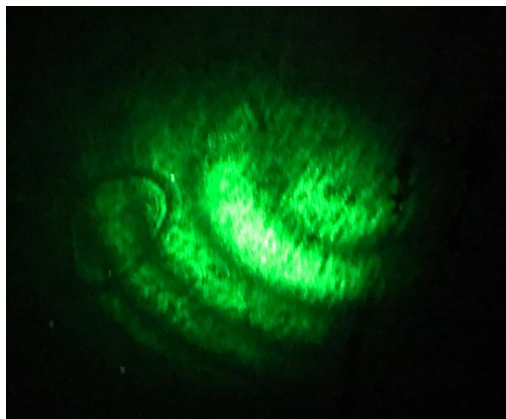


Figura 14: Padrão de interferência com a lente convergente obtido para o laser verde.

indicado na Figura 7(c). A função dessa lente é ampliar o padrão de interferência, aumentando a separação entre as franjas e tornando-as visualmente mais nítidas. Com essa ampliação, o padrão torna-se claramente perceptível, permitindo a contagem precisa do deslocamento das franjas, como ilustrado na Figura 13(b).

Os mesmos procedimentos utilizados para o alinhamento do laser vermelho foram aplicados ao laser verde. A Figura 14 apresenta o padrão de interferência obtido com o feixe de luz verde, evidenciando que o alinhamento foi bem-sucedido também para esse comprimento de onda. Destaca-se que as franjas claras correspondem às regiões de interferência construtiva, enquanto as franjas escuras indicam interferência destrutiva.

3.2. Procedimento de coleta de dados

Antes do início da coleta de dados, recomenda-se a realização de um ensaio preliminar com o objetivo de ajustar a velocidade de deslocamento das franjas de interferência a um ritmo visualmente confortável para o observador. Tal procedimento é essencial, uma vez que os deslocamentos dos padrões ocorrerão de forma automecânica, em decorrência da dilatação térmica. Nessa etapa, a função do operador limita-se à aferição dos valores indicados pelo relógio comparador, os quais correspondem à quantidade de franjas deslocadas observadas no padrão de interferência. Ressalta-se que essa etapa não pode ser realizada individualmente ou sem o auxílio de uma câmera, pois envolve a coleta simultânea de dois dados distintos.

Esse ajuste é feito por meio do *dimmer*, girando-se o potenciômetro até que a velocidade de movimento das franjas seja adequada. Para o laser vermelho, o *dimmer* foi regulado de modo que a resistência do ferro de solda dissipasse aproximadamente 65% de sua potência nominal, reduzindo a potência de 25 W para cerca de 16,25 W. Nessa condição, a corrente elétrica no circuito foi de aproximadamente 0,13 A. No caso do laser verde, foi necessário reduzir ainda mais a potência dissipada,

uma vez que o comprimento de onda da luz verde é menor. Isso faz com que, sob a mesma potência, as franjas verdes se desloquem mais rapidamente do que as vermelhas. Assim, para o laser verde, a potência foi ajustada para cerca de 50% da capacidade do ferro de solda, resultando em uma dissipação de 12,5 W e uma corrente de aproximadamente 0,10 A. Esse controle preciso da potência é fundamental para assegurar que o deslocamento das franjas de interferência ocorra em uma velocidade adequada, permitindo medições confiáveis e precisas por parte do observador durante o experimento.

Após o ajuste da velocidade de dilatação térmica, correspondente ao comprimento de onda que se deseja determinar, o sistema experimental encontra-se pronto para operação. A ativação do experimento é realizada por meio do acionamento do botão de alimentação da extensão de tomada, o que inicia o aquecimento da resistência elétrica. Esse aquecimento induz a dilatação térmica do tubo de cobre, provocando o deslocamento do espelho M2 na direção do feixe de luz incidente. Como consequência, ocorre uma alteração no caminho óptico percorrido pelos feixes, resultando no deslocamento das franjas de interferência projetadas sobre o anteparo.

A contagem dos deslocamentos no padrão de interferência é feita observando a passagem alternada das franjas claras e escuras (formadas pela interferência da luz) por um ponto fixo no anteparo. Para facilitar essa observação, foi aplicada uma faixa de fita crepe sobre o anteparo, como mostrado na Figura 15, o que aumentou o contraste e melhorou a visualização do movimento das franjas. É importante destacar que o movimento de deslocamento das franjas observado no anteparo acontece na direção perpendicular às franjas, e neste experimento, esse deslocamento foi percebido na direção vertical.

A distância de deslocamento do espelho M2 foi determinada por meio de um relógio comparador, o



Figura 15: Deslocamento das Franjas.

que permitiu quantificar a variação no caminho óptico e, conseqüentemente, realizar cálculos relacionados ao comprimento de onda da luz utilizada. Como a coleta de dados exige a obtenção simultânea de duas informações, que são o deslocamento do espelho e a contagem das franjas de interferência, foi utilizado um dispositivo móvel posicionado de forma que sua câmera registrasse diretamente o mostrador do relógio comparador. A gravação foi iniciada antes do início da contagem das franjas, que foi realizada em voz alta. Dessa maneira, o vídeo obtido permitiu associar com precisão cada valor de deslocamento visualmente registrado no relógio à respectiva quantidade de franjas deslocadas, identificadas por meio do áudio.

Após o acionamento do dilatômetro automecânico, iniciou-se a contagem dos deslocamentos das franjas de interferência por meio da leitura do relógio comparador, em função do deslocamento do espelho M2. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 2. Para cada intervalo de deslocamento listado na primeira coluna da Tabela 2, foi realizada a contagem das franjas de interferência que se moveram sobre o anteparo, sendo os valores registrados na coluna M-1 (Medida 1). Após a contagem completa das franjas para todos os intervalos, foi necessário aguardar o resfriamento do tubo de

cobre para repetir o procedimento e coletar os dados da coluna M-2 (Medida 2). Esse processo foi repetido sucessivamente até a obtenção dos valores das demais colunas, garantindo a repetibilidade e a confiabilidade dos dados experimentais. Assim, as colunas M-1 até M-10 nas Tabelas 2 e 3 correspondem às contagens de franjas deslocadas para cada intervalo de deslocamento do espelho M2, referentes aos experimentos realizados com os lasers vermelho e verde, respectivamente.

Para minimizar os erros associados à imprecisão do relógio comparador, recomenda-se iniciar a contagem apenas quando o deslocamento atinge $2\text{ }\mu\text{m}$. Esse valor é adotado como deslocamento inicial $D_0 = 2\text{ }\mu\text{m}$.

A distância efetiva de deslocamento D é então calculada por:

$$D = D_F - D_0 \quad (1)$$

em que D_F é o deslocamento final.

3.3. Cálculo do comprimento de onda

Por meio dos dados apresentados nas Tabelas 2 e 3 foi possível calcular as médias aritméticas da quantidades de franjas deslocadas $\bar{m}(t)$ para cada intervalo do deslocamento do espelho M2, e o desvio padrão $\sigma(t)$ conforme

Tabela 2: Registro de dados coletados referentes o laser vermelho.

Quantidade de franjas deslocadas para o laser vermelho										
D (μm)	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10
10	31	31	32	30	31	30	31	31	33	32
11	35	34	34	33	35	33	34	33	35	36
12	38	37	37	37	37	35	38	36	37	39
13	41	40	39	41	40	39	41	40	41	41
14	43	42	42	45	43	43	44	45	45	45
15	48	45	44	49	47	46	45	48	48	46
16	52	48	48	53	51	50	48	50	50	51
17	54	53	51	55	53	53	51	54	53	55
18	56	56	55	58	57	53	56	57	56	58
19	58	59	59	60	61	59	59	60	58	60

D é a distância efetiva de deslocamento do espelho; M é a medida.

Tabela 3: Registro de dados coletados referentes ao laser verde.

Quantidade de franjas deslocadas para o laser verde										
D (μm)	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10
10	37	39	39	38	37	38	37	36	34	39
11	41	42	44	43	39	42	41	41	39	40
12	45	46	48	46	48	46	45	45	42	45
13	49	49	52	49	47	50	48	48	48	47
14	52	51	55	52	52	54	52	51	53	51
15	56	56	58	57	55	57	55	56	55	54
16	60	59	61	61	59	61	60	58	58	60
17	64	65	66	66	62	64	62	62	63	62
18	67	68	69	72	66	68	67	65	65	66
19	70	72	74	74	70	73	70	69	70	69

D é a distância efetiva de deslocamento do espelho; M é a medida.

Tabela 4: Média dos dados coletados para os lasers vermelho e verde.

D (μm)	Laser Vermelho		Laser Verde	
	$\bar{m}(t)$	$\sigma(t)$	$\bar{m}(t)$	$\sigma(t)$
10	31	± 1	38	± 2
11	34	± 1	41	± 2
12	37	± 1	46	± 2
13	40	± 1	49	± 1
14	43	± 2	52	± 1
15	46	± 2	56	± 1
16	50	± 1	60	± 1
17	53	± 1	64	± 2
18	56	± 1	67	± 2
19	59	± 1	70	± 2

D é o deslocamento do espelho; $\bar{m}(t)$ é a média aritmética da quantidade de franjas deslocadas; $\sigma(t)$ desvio padrão.

as equações equação 2 e equação 3, respectivamente [20]. Os valores obtidos estão disponíveis na Tabela 4.

$$\bar{m}(t) = \sum_{i=1}^{10} \frac{m_i}{10} \quad (2)$$

e

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^{10} (t_i - \bar{m}(t))\right)^2}{10}} \quad (3)$$

Ao deslocar o espelho móvel no sentido do divisor de feixe com uma distância de aproximadamente $D = \frac{\lambda}{2}$, ao caminho óptico será acrescentado um valor no percurso de $2D = \lambda$ no feixe de luz, pelo fato do feixe atravessar o vidro duas vezes. Essa diferença no percurso ocasionará o deslocamento completo de uma franja clara no padrão de interferência projetado no anteparo. Dessa forma, para uma quantidade qualquer de franjas claras deslocadas m no anteparo, o deslocamento D correspondente do espelho móvel será dado por:

$$2D = m\lambda \quad (4)$$

O deslocamento D do espelho móvel pode ser compreendido como a diferença entre o valor inicial e final apurado pelo relógio comparador, a quantidade de franjas deslocadas m correspondente a diferença do deslocamento, isolando λ na equação 4 e substituindo o valor de D dado equação (1) pode se chegar a equação 5 para encontrar o comprimento de onda do laser utilizado no experimento.

$$\lambda = \frac{2(D_f - D_0)}{m} \quad (5)$$

A partir da equação 5, e utilizando a média aritmética do número de franjas deslocadas no anteparo, representada por $\bar{m}(t)$, chega-se à equação 6, que permite o cálculo do comprimento de onda λ da luz utilizada no experimento:

$$\lambda = \frac{2(D_f - D_0)}{\bar{m}(t)} = \frac{2 * D}{\bar{m}(t)} \quad (6)$$

Tabela 5: Média do comprimento de onda e a propagação da incerteza.

D (μm)	$\lambda_{\text{vermelho}}$	$\sigma(\lambda_{\text{vermelho}})$	λ_{verde}	$\sigma(\lambda_{\text{verde}})$
	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
10	645	± 2	533	± 2
11	647	± 2	537	± 2
12	649	± 2	527	± 2
13	642	± 2	536	± 2
14	644	± 2	538	± 2
15	645	± 2	536	± 2
16	640	± 2	533	± 2
17	642	± 2	535	± 2
18	643	± 2	537	± 2
19	644	± 2	543	± 2

D é o deslocamento do espelho; $\lambda_{\text{vermelho}}$ é o comprimento de onda para o laser vermelho; $\sigma(\lambda_{\text{vermelho}})$ é a propagação do erro para o laser vermelho; λ_{verde} é o comprimento de onda para o laser verde; $\sigma(\lambda_{\text{verde}})$ é a propagação do erro para o laser verde.

Seja λ o comprimento de onda da luz a ser determinado. As distâncias D_0 e D_f representam, respectivamente, os deslocamentos inicial e final do espelho M2, conforme apresentados na primeira coluna das Tabelas 2 e 3. A média aritmética do número de franjas deslocadas em cada intervalo, representada por $\bar{m}(t)$, foi calculada a partir das dez medições realizadas para cada valor de deslocamento e seus resultados estão organizados na Tabela 4. Com base nesses dados, o valor do comprimento de onda λ pode ser determinado utilizando a relação entre o deslocamento do espelho e o número médio de franjas observadas. Os resultados obtidos para λ em cada intervalo estão apresentados na Tabela 5, permitindo uma análise quantitativa da interferência luminosa para os lasers vermelho e verde.

A imprecisão do instrumento de medida pode ocasionar valores discrepantes, dessa forma é interessante calcular a propagação da incerteza $\sigma(\lambda)$ que é dada pela equação 7 [20]. Os valores determinados estão disponibilizados na Tabela 5, juntamente aos respectivos comprimentos de onda.

$$\sigma(\lambda) = \frac{2}{\bar{m}(t)^2} * \sqrt{(\bar{m}(t)^2 * \sigma(\Delta D)^2 + \Delta D^2 * \sigma(t)^2)} \quad (7)$$

A partir dos valores apresentados na Tabela 5, determinou-se o comprimento de onda médio de cada laser, obtendo-se $\lambda = (644 \pm 2)$ nm para o vermelho, com erro relativo de 0,90% em relação ao valor esperado de 650 nm, e $\lambda = (536 \pm 2)$ nm para o verde, com erro relativo de 0,75% em relação ao valor esperado de 532 nm. A baixa margem de erro evidência não apenas a precisão da técnica de contagem de franjas, mas também a eficiência do dilatômetro automecânico desenvolvido, que possibilitou medições estáveis e reprodutíveis. Tais resultados reforçam a viabilidade do aparato tanto como recurso de investigação científica

quanto como ferramenta didática para o ensino de conceitos fundamentais de interferometria e metrologia óptica.

4. Conclusão

A construção do dilatômetro automecânico possibilitou o controle da velocidade de deslocamento do espelho móvel, evitando o movimento acelerado das franjas de interferência e, conseqüentemente, facilitando sua contagem. Esse recurso permitiu a observação estável e nítida dos padrões de interferência construtiva e destrutiva de forma automecânica e controlada. A partir da contagem das franjas deslocadas, obteve-se a determinação precisa do comprimento de onda do laser vermelho, com erro relativo de aproximadamente 0,90%, e do laser verde, com erro relativo de cerca de 0,75%, resultados que evidenciam a eficácia e a confiabilidade do método empregado.

Além de comprovar a viabilidade técnica do dispositivo, este estudo destaca seu potencial pedagógico, uma vez que o experimento pode ser incorporado como ferramenta de apoio ao ensino de óptica e metrologia em diferentes níveis educacionais.

Como perspectiva de continuidade, propõe-se a integração do aparato experimental a dispositivos digitais, associados a técnicas de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, com o objetivo de viabilizar a automatização da contagem de franjas e a análise dos padrões de interferência. A aplicação dessas técnicas, já consolidada em diferentes áreas da óptica [21–23] e empregada no aprimoramento da detecção de ondas gravitacionais [24], revela-se promissora para a elevação do nível de sofisticação e para a ampliação do alcance de experimentos em ambientes acadêmicos e de pesquisa científica.

Conclui-se, portanto, que a proposta apresentada não apenas valida a construção de um dispositivo de baixo custo com precisão metrológica, mas também abre novas perspectivas para o desenvolvimento de abordagens experimentais e didáticas no estudo da interferometria óptica, incorporando recursos digitais e inteligentes ao processo de ensino-aprendizagem.

Agradecimentos

Agradecemos aos revisores anônimos pelas valiosas sugestões e contribuições, que aprimoraram significativamente a qualidade deste trabalho.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

Referências

- [1] A.A. Michelson e E.W. Morley, *American Journal of Science* **34**, 333 (1887).
- [2] C.P. Santos, A.J.J. Santos, A.A. Rabelo, S.L. Valença e A.J. Santos, *O interferômetro de Michelson aplicado ao ensino de metrologia* (Editora Científica Digital, São Paulo, 2023), v. 1.
- [3] G.A. Caritá, M.N.S. Silva e J.T.C. Neto, em: *Anais do XVIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física* (Florianópolis, 2020).
- [4] J.T.C. Neto, J.L. Stefani, F.R. Apolinário, A.A. Soares e L. Mendes, em: *Anais do XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física* (São Carlos, 2017).
- [5] H.P. Cordova, *Construção de um interferômetro de Michelson e aplicações no ensino de óptica*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2016).
- [6] D.F. Jardim, R.B.S. Neto, R.R.P. Machado, F.M. Aarestrup, J.P.R.F. Mendonça e B. Lesche, *Eur. Biophys J.* **32**, 159 (2003).
- [7] R.R.P. Machado, E.S.L. Filho, D.F. Jardim, M.A.A. Ferreira, C.G. Faria, R.S. Duarte e B. Lesche, *Eur. Biophys J.* **38**, 111 (2008).
- [8] R.R.P. Machado, R.C. Dutra, F. Pittella, N.R.B. Raposo, B. Lesche, R.S. Duarte, G.L.G. Soares e M.A.C. Kaplan, *Rev. Bras. Plantas Med.* **17**, 881 (2012).
- [9] R.R.P. Machado, R.C. Dutra, N.R.B. Raposo, B. Lesche, M.S. Gomes, R.S. Duarte, G.L.G. Soares e M.A.C. Kaplan, *Tuberculosis* **95**, 829 (2015).
- [10] J.R.R. Sousa, A.F.G.F. Filho, A.C. Ferreira, E.R.B. Figueiredo, J.C. Sales, M.B.C. Costa, G.F. Guimarães e A.S.B. Sombra, *Opt. Eng.* **58**, 56101 (2019).
- [11] L.A.P. Marçal, J.H. Galeti, R.T. Higuti, C. Kitano e E.C.N. Silva, em: *Anais do 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications* (Fortaleza, 2012).
- [12] N.L. Dias, G.D.S. Castro e A.D.A. Coelho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210205 (2021).
- [13] H. Sun, X. Wei e Y. Liu, em: *Anais do International Conference on Image and Graphics* (Tianjin, 2015).
- [14] M.T. Restivo, J. Villate, F. Almeida, F. Chouzal, R. Magalhães e I. Menezes, em: *Anais do The International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation* (Porto, 2007).
- [15] F. Catelli e S. Vicenzi, *Caderno Catarinense Ensino Física* **18**, 108 (2001).
- [16] C.C. Silva, A.C. Giacomelli, C.A.S. Pérez e B.L. Silva, *Revista Brasileira de Ensino Ciência e Tecnologia* **10**, 1 (2017).
- [17] G.T. Nogueira e J.A. Hernandez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210242 (2021).
- [18] L.G. Souza, L.R. Santiago e V.L.B. Jesus, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20190070 (2019).
- [19] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física* (LTC, Rio de Janeiro, 2009), v. 2.
- [20] A. Santoro, J.R. Mahon, J.U.C.L. Oliveira, L.M.M. Filho, V. Oguri e W.L.P. Silva, *Estimativas e erros em experimentos de física* (EdUERJ, Rio de Janeiro, 2008), v. 3.

- [21] F.R.P. Santos, *Identificação de aberrações ópticas em imagens no espaço de Fourier assistida por aprendizagem de máquina*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife (2020).
- [22] G. Genty, L. Salmela, J.M. Dudley, D. Brunner, A. Kokhanovskiy, S. Kobtsev e S.K. Turitsyn, *Nat. Photonics* **15**, 91 (2021).
- [23] T. Sutili, E.S. Rosa, Y.R.R. Bustamante e R.C. Figueiredo, *Revista da SBFoton* **1**, 25 (2022).
- [24] M. Zevin, S. Coughlin, S. Bahaadini, E. Besler, N. Rohani, S. Allen, M. Cabero, K. Crowston, A.K. Katsaggelos, S.L. Larson et al., *Classical and Quantum Gravity* **34**, 064003 (2017).