

# Interferômetro de Michelson construído com material de fácil acesso

Michelson interferometer built with easy access material

L. G. Souza<sup>\*1</sup>, L. R. Santiago<sup>1</sup>, V. L. B. de Jesus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Nilópolis, RJ, Brasil

Recebido em 28 de Março de 2019. Revisado em 25 de Abril de 2019. Aceito em 03 de Maio de 2019

Este trabalho apresenta uma possibilidade de montar um interferômetro similar ao empregado no famoso experimento de Michelson e Morley utilizando materiais de fácil acesso e a um custo muito inferior que os experimentos didáticos disponíveis no mercado. Neste artigo, o principal desafio é o de mover um dos espelhos por poucos milímetros, o que é possível usando um sistema confeccionado para esse fim, similar a uma alavanca. O alinhamento é outro grande desafio da montagem aqui proposta. Aqui se apresenta um dispositivo alternativo que possibilita o alinhamento do feixe com precisão suficiente para medir o comprimento de onda da luz do *laser* com erro relativo de 4%.

**Palavras-chave:** interferômetro de Michelson, ensino de física.

This work presents a possibility to carry out an interferometer, similar to the one used in the famous Michelson and Morley experiment, using easy access materials and at a much lower cost than the didactic experiments available in the market. The main challenge of this article is to move one of the mirrors by a few millimeters, which is possible using a home-made system similar to a lever. Alignment is another major challenge in this article. Here an alternative device is presented which enables the beam alignment with enough precision to measure the laser wavelength within 4% relative error.

**Keywords:** Michelson interferometer, physics teaching.

## 1. Introdução

No final do século XIX acreditava-se na existência de um meio material capaz de mediar fenômenos eletromagnéticos, como a propagação das ondas de luz. Este meio era conhecido como éter luminífero [1]. Embora a existência desse material fosse praticamente indubitável, não era possível sentir, observar ou mensurar o éter.

Em 1887, Albert Michelson e Edward Morley idealizaram e construíram um equipamento conhecido como Interferômetro que, em tese, seria capaz de medir o movimento relativo da Terra em relação ao éter [2].

Além da importância histórica para a física, o experimento de Michelson e Morley sintetiza inúmeros conceitos físicos, como mecânica ondulatória e ótica geométrica, por exemplo. Desta forma, viabilizar a construção de um equipamento similar visando a facilidade de montagem e o baixo custo na aquisição de materiais de fácil acesso se tornou a proposta de autores como Catelli [3] e Silva [4].

O objetivo deste trabalho se alinha com as ideias dos autores citados anteriormente. Entretanto, desejamos dar um passo além e incrementar um novo sistema de alinhamento e adicionar um espelho móvel, possibilitando a realização de medições para determinar o comprimento

de onda da fonte de luz utilizada, que, neste trabalho, consiste de uma caneta *laser* verde.

Como forma de facilitar a visualização e compreensão do produto final deste artigo, realizamos uma filmagem, para apresentar o equipamento, o alinhamento, e o padrão de interferência. Essa filmagem foi editada, dividida em 4 vídeos curtos, e colocados no *YouTube*. Os vídeos podem ser acessados através do *link* <https://www.youtube.com/watch?v=1YFbi8oKIBc&list=PLTf3tvLmqQEFNa1Y0v0as68KfLDpa6kq>

## 2. Montagem experimental

A seguir serão detalhados os componentes do interferômetro. A Tabela 1 apresenta todos os materiais utilizados, assim como suas quantidades, formas de aquisição e valores médios. É importante ressaltar que os locais de aquisição são apenas sugestões e que o valor de cada material pode variar um pouco dependendo da loja.

### 2.1. Base do aparato experimental

Não há uma regra quanto ao tamanho da base do experimento. Entretanto destacamos que, devido à implementação do deslocador de espelho, necessitamos de uma base grande, já que nosso deslocador funciona como uma ala-

\*Endereço de correspondência: [luangomes.souza@gmail.com](mailto:luangomes.souza@gmail.com).

**Tabela 1:** Material utilizado: quantidade, possíveis locais de aquisição e valores médios por unidade.

| Material                                                                                                                     | Quantidade (unidade) | Aquisição                                                                                                         | Valor Médio por unidade (R\$) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Laser de Diodo Verde (532 nm). É possível construir o aparato experimental com <i>laser</i> de qualquer comprimento de onda. | 1                    | Lojas de Eletrônica e papelarias, ou serviços de compras pela internet ( <i>Mercado Livre</i> , <i>OLX</i> , ...) | 22,00                         |
| Placa de vidro utilizada como divisor de feixes e Compensador (10 cm x 5 cm x 0,70 cm).                                      | 2                    | Material descartado em vidraçarias.                                                                               | —                             |
| Chapas de madeira para confeccionar a base e os suportes (60 cm x 60 cm).                                                    | 3                    | Reaproveitamento de peças de um armário inutilizado.                                                              | —                             |
| Disco Metálico de <i>HD</i> (9,5 cm de diâmetro).                                                                            | 1                    | <i>HD</i> 's antigos ou descartados.                                                                              | —                             |
| Lente de lupa com distância focal de 5 cm.                                                                                   | 1                    | Papelarias.                                                                                                       | 3,00                          |
| Molas de compressão para suporte dos espelhos. (4,2 cm de comprimento e constante elástica de 3200 N/m)                      | 4                    | Casas de parafusos ou de materiais de construção.                                                                 | 2,00                          |
| Parafusos para suporte dos espelhos.                                                                                         | 12                   | Casas de parafusos ou de materiais de construção.                                                                 | 0,20                          |
| Parafuso sem fim.                                                                                                            | 1                    | Casas de parafusos ou de materiais de construção.                                                                 | 5,00                          |
| Parafuso de rosca fina (5 cm).                                                                                               | 1                    | Casas de parafusos ou de materiais de construção.                                                                 | 1,50                          |
| Mola rígida de compressão para deslocador de espelho. (6,974 cm de comprimento e const. Elástica de 495 N/m)                 | 1                    | Casas de parafusos ou de materiais de construção.                                                                 | 5,00                          |
| Espuma D28 (metro).                                                                                                          | 1                    | Lojas de tecido.                                                                                                  | 10,00                         |
| <b>Valor de compra médio de todos os materiais (R\$)</b>                                                                     |                      |                                                                                                                   | <b>54,00</b>                  |

vanca, e para se obter o mínimo deslocamento necessário dependemos das distâncias entre as suas extremidades e seu ponto de apoio.

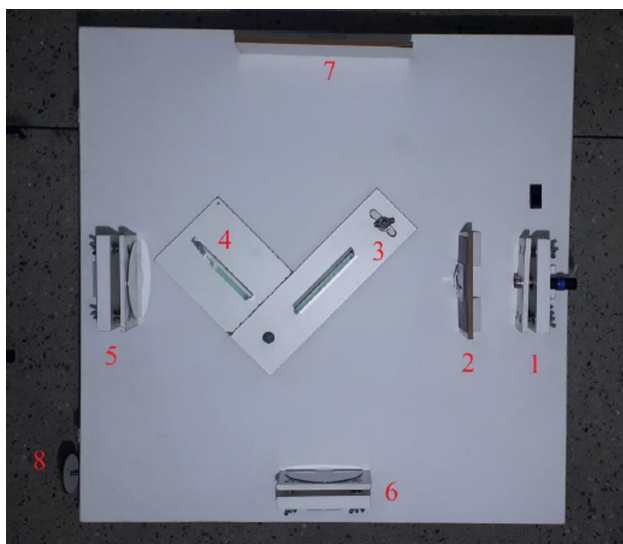
Dessa forma, foi construída uma caixa de madeira com dimensões de 60 cm x 60 cm x 12 cm, onde os espelhos e *laser*, foram colocados no ponto médio de cada lateral (Fig. 1).

Catelli [3] enfatiza a questão da instabilidade mecânica que o seu experimento possui por ser sensível a vibrações

provenientes do ambiente que dificultam um bom alinhamento. A medida de prevenção adotada foi revestir o interior da caixa com espuma D28 de 5 cm de espessura (Fig. 2).

## 2.2. Conjunto de espelhos

Os espelhos utilizados devem ser de primeira superfície, evitando assim distorções e interferências indesejadas, devido à refração do vidro em espelhos de segunda superfície, mais comuns de serem encontrados. Aqui optamos pelo disco metálico encontrado no interior de *HD*'s. Seu manuseio deve ser cuidadoso a fim de evitar arranhões, o que pode prejudicar a formação do padrão de interferência. São necessários dois espelhos para este experimento,



**Figura 1:** Disposição de cada componente na superfície da caixa (aparato experimental). (1) Fonte de luz, (2) suporte para lente expansora, (3) divisor de feixes, (4) compensador, (5) espelho móvel, (6) espelho fixo, (7) anteparo, (8) parafuso do deslocador do espelho móvel.



**Figura 2:** Parte interior da caixa revestida com espuma, cujo objetivo é evitar vibrações mecânicas.

logo, usando o disco de *HD*, pode-se cortá-lo ao meio e utilizar as duas metades.

Foram montados dois suportes para as duas metades do *HD*. Ambos feitos com a mesma madeira utilizada na confecção da caixa, com dimensões de 11 cm x 3 cm, e têm a função de apoiar os espelhos e permitir o ajuste do feixe (ver Fig. 3).

A necessidade de um ajuste para o feixe é justificada pelo tamanho da caixa. Por ser muito grande, é difícil manter o feixe de luz paralelo à superfície sem algum tipo de ajuste. A confecção dos suportes não é complicada, sendo necessário apenas quatro conjuntos de parafusos com molas (Fig. 3b).

O ajuste é feito apertando-se ou afrouxando-se esses parafusos. Uma vez que o espelho é colocado na vertical, é interessante manter um dos parafusos fixo. Assim, o movimento do espelho é dado com três graus de liberdade, que define um plano, ajudando na precisão do alinhamento.

Um comentário acerca da fixação do espelho no suporte. A princípio foi utilizado uma Super Cola. Entretanto era

notável um formato estranho nas franjas de interferência (Fig. 4). A justificativa para essa anomalia era que a cola utilizada causava uma tensão excessiva no espelho ao secar, gerando curvatura em sua superfície. A solução, foi a substituição da cola por uma fita dupla face para reduzir a tensão.

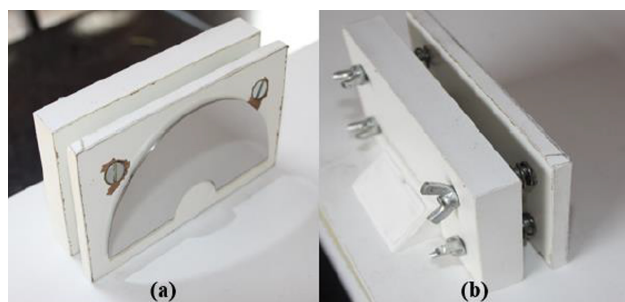
O último detalhe é o deslocador de espelho. Catelli [5] apresenta um projeto de deslocador de espelho cujo funcionamento é baseado na dilatação térmica de um ferro de solda. Embora os materiais utilizados por ele sejam simples de adquirir, a necessidade de deixar o ferro de solda ligado pode aumentar o risco de queimaduras de professores ou alunos desatentos. Aqui apresentamos uma outra solução para o deslocador, usando um *parafuso de rosca fina*, dois *parafusos sem fim* com roscas, e uma mola rígida (Fig. 5).

Para observarmos os deslocamentos de franja, o espelho deve se mover a pequenas distâncias. Resolvemos esta situação utilizando uma relação simples envolvendo as distâncias dos extremos do braço de madeira e o parafuso fixo à base, o ponto de apoio (Fig. 6).

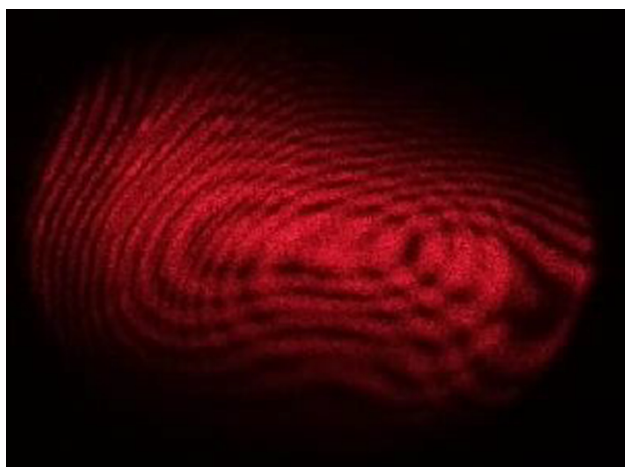
Utilizando semelhança de triângulos, obtemos a seguinte relação:

$$d_m = L \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \quad (1)$$

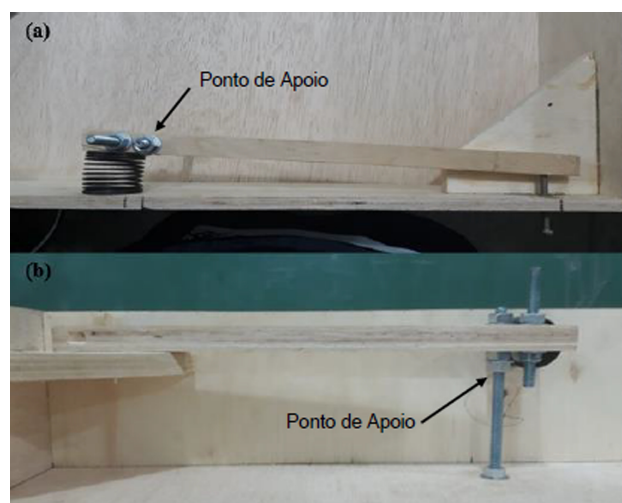
A Eq. (1) nos informa qual será o deslocamento ( $d_m$ ) máximo que o espelho terá, em função dos parâmetros do nosso deslocador. Levando-se em conta que em nosso interferômetro as distâncias  $D_1$  e  $D_2$  valem, respectivamente, 225 mm e 20 mm, e o parafuso possui comprimento  $L$  de 46,6 mm, e utilizando a Eq. (1), temos que, ao rosquear todo o parafuso, o espelho terá percorrido a distância  $d_m$  de 4,14 mm.



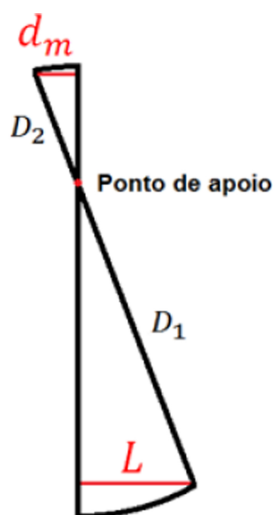
**Figura 3:** Suporte confeccionado para os espelhos. (a) vista frontal. Uma dica é fixar os discos o mais próximo do centro do suporte possível. (b) Os quatro conjuntos de parafusos e molas utilizados no alinhamento. Ressaltando que foram compradas quatro molas com características descritas na Tabela 1, onde cada uma foi dividida em três obtendo-se assim doze molas menores.



**Figura 4:** Deformação no padrão de interferência ocasionada pela tensão da cola ao secar.



**Figura 5:** O deslocador de espelho. Nesta imagem, observamos de dois pontos diferentes, sendo (a) visão superior e (b) visão frontal. As distâncias entre o parafuso de rosca fina e o parafuso sem fim até o ponto fixo são, respectivamente 2 cm e 22,5 cm.



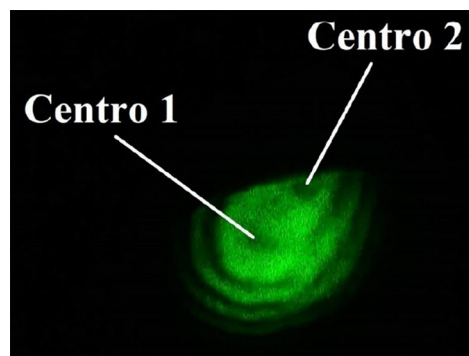
**Figura 6:** Diagrama utilizado no deslocamento de um dos espelhos. Os seguimentos de reta  $d_m$  e  $L$  representam as distâncias percorridas pelo espelho e pelo parafuso de rosca fina, respectivamente. Os seguimentos de reta  $D_1$  e  $D_2$  correspondem, respectivamente, às distâncias entre o parafuso e o ponto de apoio, e a distância do espelho ao mesmo ponto.

Ressaltamos duas observações, a primeira é que, com a finalidade de evitar o desgaste da madeira ao rosquear o parafuso por muito tempo, fixamos uma pequena dobradiça na parte onde há o contato da madeira com o parafuso. A segunda observação é a função da mola de restaurar a posição do braço. A precisão do sistema é satisfatória, ou seja, conseguimos ver e contar as franjas à medida que avançamos e recuamos o parafuso. Recomendamos a lubrificação do parafuso, utilizando sabonete ou uma vela.

### 2.3. Divisor de feixes

Uma placa de vidro com 0,6 cm de espessura foi utilizada como divisor de feixe. Esse objeto serve como semi-espelho, que transmite uma parte da luz da fonte e reflete outra. É interessante notar que em kits para laboratórios de física, esse espelho recebe um tratamento antirreflexivo, com o intuito de reduzir o que chamamos de interferências parasitas [3]. Essas interferências indesejadas aparecem, não por falha de alinhamento, mas porque ambas as superfícies do vidro fazem com que a luz interfira, formando dois padrões superpostos no anteparo, como visto na Figura 7.

Há métodos de reduzir, esse efeito indesejado. Um deles é aumentar a espessura do vidro, fazendo isso as interferências se distanciam, assim é possível trabalhar com uma delas separadamente. Entretanto, é mais difícil encontrar um pedaço de vidro com dimensões para tal, além de ser mais pesado, dificultando seu manuseio. Outro método é utilizar um meio opaco no divisor de feixes, como um pedaço de cartolina. Esse método consiste em buscar cuidadosamente uma posição no divisor de feixes



**Figura 7:** Superposição das franjas de interferência geradas por ambas as superfícies do vidro. Na imagem podemos ver dois centros distintos.

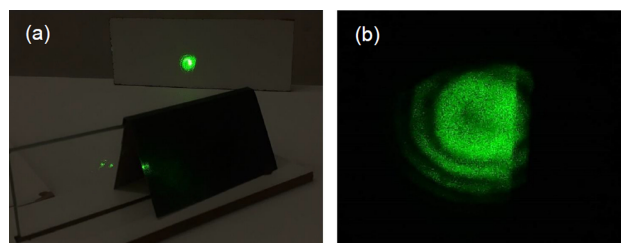
que bloqueie a passagem da interferência de uma das superfícies para o anteparo, como mostra a Figura 8.

Catelli [3] faz uma observação quanto à polarização do *laser*. Por conta da lei de Brewster, ao girarmos o plano de polarização do nosso laser, percebemos que as interferências parasitas diminuem de intensidade, deixando a franja de interferência principal com mais contraste. Utilizando um luxímetro, percebemos que a melhor franja de interferência é aquela obtida quando os feixes de luz que atingem tanto o espelho móvel quanto o espelho fixo, possuem a mesma intensidade luminosa. Nos testes feitos, as melhores franjas são aquelas cujo eixo principal de polarização do *laser* está próximo a  $45^\circ$  com a vertical.

Outro detalhe importante é a necessidade de um compensador. Ele tem a função de corrigir a refração da luz que passa pelo divisor de feixes, consistindo em um pedaço do mesmo vidro do separador. Vemos seu funcionamento na Figura 9. Como ele não participa diretamente da formação da interferência o compensador não necessita de um tratamento antirreflexo, e deve ser colocado entre o divisor de feixes e o espelho móvel.

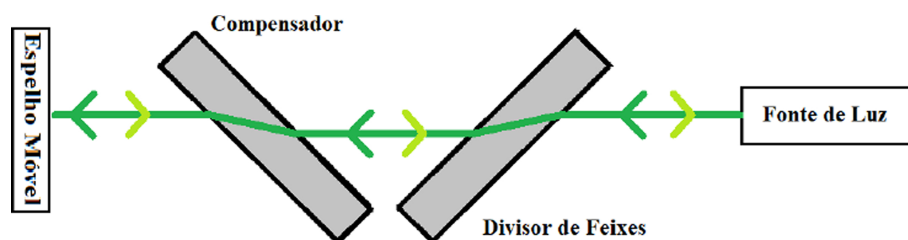
### 2.4. Fonte de luz

Como fonte de luz, optamos por um *laser* de diodo, da cor verde cujo comprimento de onda é 532 nm, segundo

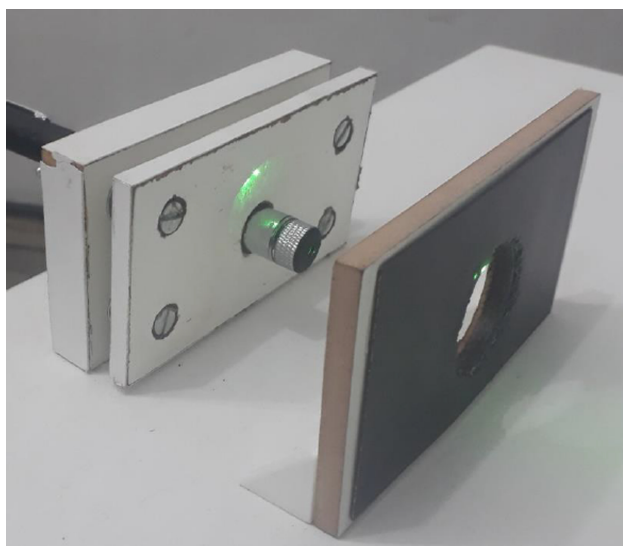


**Figura 8:** (a) Um pedaço de cartolina foi utilizado para bloquear uma das interferências parasitas. (b) Franjas de interferência utilizando o bloqueio no divisor de feixes, percebe-se que há uma sombra em uma das extremidades devido ao pedaço de cartolina utilizado.





**Figura 9:** O Compensador deve ser colocado a 90° em relação ao divisor de feixes para que a refração seja corrigida. As setas representam os caminhos de ida e volta da luz.



**Figura 10:** Suporte confeccionado para o laser. Vale lembrar que sua manipulação é idêntica ao suporte dos espelhos. A frente temos o apoio para a lente expansora usada para visualizar o padrão de interferência.

informações do fabricante. O tamanho da caixa dificulta o alinhamento paralelo do *laser* com a superfície do experimento. Como saída para esse problema, foi implementado um sistema de ajuste similar aos dos espelhos, como pode ser visto na Figura 10.

O aparato colocado em frente ao *laser* é um apoio para a lente expansora [3]. Esta lente tem seu objetivo descrito na Fig. 11, ao colocá-la entre o *laser* e o divisor de feixes o raio de luz é espalhado, e um padrão de interferência é visto no anteparo. A lente foi colada em uma folha de ímã para geladeiras e no apoio foi colocado uma chapa de metal, mantendo-a fixa e simplificando seu posicionamento para encontrarmos o padrão de interferência no anteparo.

### 3. Alinhamento

Com o aparato experimental devidamente montado, o primeiro passo é ajustar a altura do laser, até que ele fique paralelo à superfície da tampa do experimento, para isso é necessário retirar o divisor de feixes e o compensador do caminho que o *laser* percorre. A dica para este

procedimento é ter algum objeto que possa ser usado como referência, por exemplo, uma régua, marcando a altura do feixe na saída do laser até atingir o espelho móvel, não esquecendo de utilizar os parafusos do suporte sempre que necessário. Já com o feixe paralelo à superfície, utilize o suporte do espelho móvel para que a reflexão do laser retorne perfeitamente para a sua origem.

Após realizar esse alinhamento, será possível observar duas “linhas pontilhadas” no anteparo (Fig. 12a). Com o espelho fixo, alinhe esses pontos de maneira que fiquem sobrepostos, como mostra a Figura 12b. Perceba que, se alinhado corretamente, é possível observar algumas franjas de interferência, ainda que bem fracas.

Por fim, basta colocar a lente expansora na frente do percurso do *laser*, assim será possível observar o padrão das franjas de interferência (Fig. 13). Conseguimos variar o padrão das franjas de interferência utilizando o sistema adaptado para deslocar o espelho.

### 4. Determinando o comprimento de onda da fonte de luz

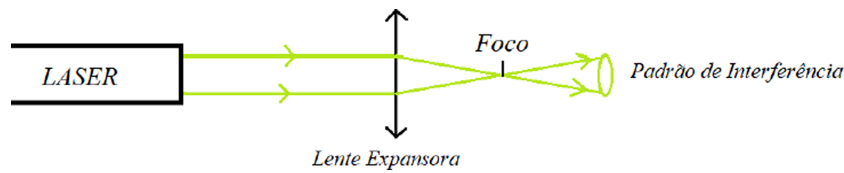
O fenômeno de interferência entre os dois feixes luminosos pode ser modelado como a soma vetorial de duas ondas eletromagnéticas, considerando que a intensidade luminosa é proporcional ao quadrado do módulo de seu campo elétrico. Assim, para um interferômetro na configuração de Michelson e Morley, o valor do comprimento de onda ( $\lambda$ ) é dado pela expressão

$$\lambda = \frac{2 d_m}{M} \quad (2)$$

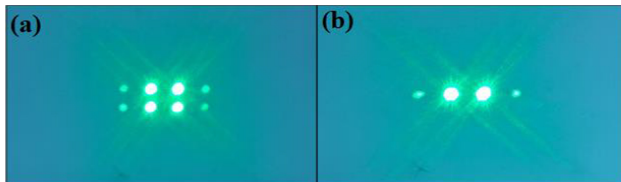
Onde  $d_m$  é o deslocamento que o espelho sofreu, e  $M$  a quantidade de franjas contadas. Assim, para determinar o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da fonte de luz, neste caso do *laser*, basta contar o número de franjas que se repetem no anteparo, e saber o quanto o espelho se moveu.

Entretanto, no interferômetro construído, não conseguimos aferir com precisão pequenos deslocamentos para  $d_m$  sem o auxílio de um instrumento metrológico, como o micrômetro. Assim seria necessário avançar todo o parafuso para tomarmos uma medida de  $\lambda$ , o que tornaria o experimento demorado e cansativo.

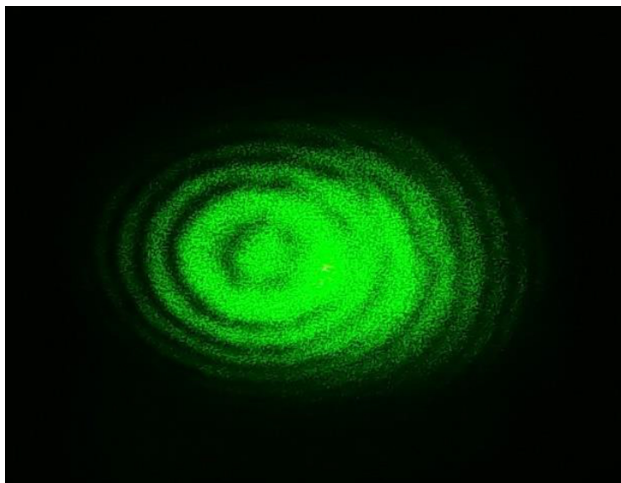
Desta forma propomos uma solução na qual a Eq. (2) dependa da quantidade de franjas contadas e do número



**Figura 11:** Esquema de funcionamento da lente expansora. A lente utilizada possui uma distância focal de 5 cm, uma observação interessante é que quanto menor for essa distância, maior será o padrão visto no anteparo.



**Figura 12:** (a) Cada conjunto de quatro linhas na horizontal representa uma das partições do laser que passa pelo divisor de feixes. (b) Ajustando o espelho fixo conseguimos sobrepor-las, ocasionando a interferência.



**Figura 13:** Franjas de Interferência. Perceba que é possível observar dois padrões superpostos de interferência, como previsto devido ao divisor de feixes. Para esta imagem, optamos por colocar o eixo de polarização a 45° com a vertical, e não utilizar um meio opaco, como na Fig. 8.

de voltas que o parafuso executa, variáveis estas que conseguimos obter facilmente.

De acordo com a Eq. (1), o comprimento do parafuso que utilizamos está relacionado diretamente com o deslocamento do espelho. Sendo assim substituindo (1) em (2) obtemos:

$$\lambda = \frac{2L}{M} \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \quad (3)$$

Analizando agora o parafuso, seu comprimento  $L$  pode ser escrito como o produto de seu passo ( $\alpha$ ) pelo número de voltas que ele possui ( $N$ ), de modo que

$$L = \alpha N \quad (4)$$

Utilizando valores máximos para o comprimento e para o número de voltas, sendo ambos 46,6 mm e 56 voltas, respectivamente, o valor de seu passo ( $\alpha$ ) é de aproximadamente 0,8321 mm/volta. Substituindo (4) em (3) temos a expressão que precisamos para obter  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{2\alpha N}{M} \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \quad (5)$$

Com a Eq. (5) em mãos podemos fazer uma pequena estimativa da quantidade de franjas que devemos contar se dermos uma volta completa no parafuso. Adotando o valor de  $\lambda$  fornecido pelo fabricante como 532 nm e o número de volta  $N$  como 1 volta, estimamos que o número de franjas a serem contadas deveria ser de aproximadamente 277 franjas. Este número ainda é um pouco alto. Então propomos que sejam contadas as franjas correspondentes a 1/4 de volta do parafuso. Baseados nisso foram realizadas 5 medições e os dados coletados foram organizados na Tabela 2.

Tomando os valores experimentais encontrados, temos um valor médio para  $\lambda$  de  $(553 \pm 43)$  nm. De acordo com as informações do fabricante, o comprimento de onda do laser empregado na montagem aqui proposta é de  $(532 \pm 10)$  nm, ou seja, a diferença percentual entre a média das medidas realizadas  $(553 \pm 43)$  nm e o valor fornecido pelo fabricante é de aproximadamente 4%.

## 5. Conclusão

Este trabalho permite a construção de um interferômetro com material de fácil acesso, de custo modesto, possibilitando a visualização de franjas de interferência com nitidez, e ainda movimentar um dos espelhos do interferômetro permitindo a mensuração do comprimento de onda

**Tabela 2:** Dados coletados

| Medições | $d_m$ (voltas) | Franjas contadas | Comprimento de onda (nm) |
|----------|----------------|------------------|--------------------------|
| 1        | 1/4            | 68               | $544 \pm 23$             |
| 2        |                | 74               | $500 \pm 21$             |
| 3        |                | 69               | $536 \pm 22$             |
| 4        |                | 65               | $569 \pm 24$             |
| 5        |                | 60               | $616 \pm 26$             |

do *laser* (*laser pointer*) com erro relativo aproximado de 4%.

Os mecanismos construídos nesse aparato experimental, para auxiliar o alinhamento, mostraram-se bastante eficientes, uma vez que se permite a realização de seu alinhamento em poucos minutos.

Este interferômetro pode ser utilizado em aulas de cursos de licenciatura e bacharelado em física, e em cursos de engenharia. A abordagem pode ser feita de maneira qualitativa ou quantitativa, dependendo do enfoque pretendido pelo professor.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao professor Carlos André de Castro Pérez por suas valiosas sugestões no sistema de ajuste e alinhamento do aparato experimental e a Edmilson Esteves de Oliveira por colaborar com a escolha de materiais e nas formas de montagem.

Agradecemos também aos professores Alexandre Lopes de Oliveira e Daniel Guilherme Gomes Sasaki pela minuciosa leitura e revisão do manuscrito.

## Referências

- [1] A. Einstein, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 77 (2005).
- [2] A.A. Michelson e E.W. Morley, *American Journal of Science* **34**, 35 (1887).
- [3] F. Catelli e S. Vicenzi, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **18**, 108 (2001).
- [4] C.C. Silva, A.C. Giacomelli, C.A.S. Pérez e B.L. Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia* **10**, 175 (2017).
- [5] F. Catelli e R. Bernardi, em *Atas do XIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Brasília, 1999, organizado por M. F. R. Makiuchi (SBF, São Paulo, 1999), p. 270.