15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DA LUZ PELO MÉTODO DE FOUCAULT

JOSÉ ROBERTO DE LIMA[1], VÁGNER RICARDO DE ARAÚJO PEREIRA[2], ALISON JOSÉ PEREIRA NERI[3]

[1] Graduando em Eng. de Controle e Automação, Bolsista PIBIFISP, IFSP, *Campus Catanduva*, lima.jose@aluno.ifsp.edu.br
[2] Professor de Física, IFSP, *Campus Matão*, vagner.pereira@ifsp.edu.br
[3] Graduando em Eng. de Controle e Automação, Bolsista PIBIFISP, IFSP, *Campus Catanduva*, alison.n@aluno.ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.05.01.05-3 Metrologia, Técnicas Gerais de Laboratório, Sistema de Instrumentação.

RESUMO: A experimentação é essencial no ensino de física, unindo teoria e prática para reforçar conceitos e desenvolver habilidades críticas. A medição da velocidade da luz é um exemplo de avanço científico obtido por experimentos, desde as tentativas de Galileu até a precisão alcançada por Foucault, sendo um dos marcos históricos da física experimental. Propõe-se medir a velocidade da luz no ar usando o método de Foucault com o equipamento sofisticado PASCO OS-926. Este método envolve a deflexão de um feixe de laser por um espelho rotatório. Os dados coletados foram analisados utilizando o método de regressão linear para obter um resultado com erro inferior a 5% da velocidade da luz. A experimentação mostrou uma concordância significativa com os valores teóricos da velocidade da luz, destacando a eficácia do método utilizado. O experimento contribui para melhoria da formação acadêmica dos estudantes e proporciona uma compreensão prática e aprofundada dos conceitos teóricos da física.

PALAVRAS-CHAVE: experimentação; ensino de física; velocidade da luz; método de Foucault; regressão linear.

DETERMINATION OF THE SPEED OF LIGHT USING THE FOUCAULT METHOD

ABSTRACT: Experimentation is essential in physics education, combining theory and practice to reinforce concepts and develop critical skills. Measuring the speed of light is an example of scientific advancement achieved through experiments, from Galileo's attempts to the precision achieved by Foucault, marking a historical milestone in experimental physics. The proposed study measures the speed of light in air using Foucault's method with the sophisticated PASCO OS-926 equipment, donated to the institution. This method involves the deflection of a laser beam by a rotating mirror. The data were analyzed using the linear regression method to obtain a result with an error of less than 5% of the speed of light. The experimentation showed significant agreement with the theoretical values of the speed of light, highlighting the effectiveness of the method used. Thus, contributing to the improvement of students' academic training, providing a practical and in-depth understanding of the theoretical concepts of physics.

KEYWORDS: experimentation; physics education; speed of light; Foucault method; linear regression.

INTRODUÇÃO

A experimentação desempenha um papel crucial na formação de estudantes e profissionais. No contexto educacional, o aprendizado da física não se limita à compreensão teórica dos fenômenos naturais, mas também à prática por meio de experimentos laboratoriais, que permitem um melhor entendimento de conceitos teóricos (Almeida *et al*., 2019).

A medição da velocidade da luz é um exemplo de como a experimentação pode levar a avanços significativos na ciência, sendo um dos marcos da física experimental desde os primórdios da ciência moderna. A história da medição da velocidade da luz é repleta de tentativas e descobertas. Galileu foi um dos primeiros a tentar medir essa velocidade. Ole Rømer, em 1675, fez a primeira estimativa

quantitativa. Em 1849, Hippolyte Fizeau desenvolveu o primeiro método bem-sucedido usando uma roda dentada, e Léon Foucault aprimorou essa técnica em 1862 com um espelho rotatório, chegando próximo ao valor aceito atual de 299.792.458 m/s (Serway; Jewett, 2019; Silva, 2002).

Nesse contexto, é proposto a determinação da velocidade da luz no ar com a utilização do equipamento sofisticado PASCO OS-926. Este equipamento permite determinar a velocidade da luz (c) através do método de Foucault, a partir da deflexão angular medida de um feixe, da velocidade de rotação do espelho e das distâncias fixas entre os espelhos. Utilizando o *software Excel* (2024) para realizar a medição da velocidade da luz com um erro inferior a 5%, espera-se alcançar uma precisão significativa do equipamento. A ideia é proporcionar uma experiência prática e educativa, demonstrando a aplicação de conceitos teóricos e métodos experimentais históricos em um contexto moderno.

MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos de montagem e calibração foram essenciais em todo o processo de medição. A coleta de dados foi realizada utilizando os componentes disponíveis no equipamento PASCO OS-926, que desempenharam um papel fundamental na execução do experimento feito no laboratório de física. Esses componentes estão ilustrados na Figura 1 a seguir.

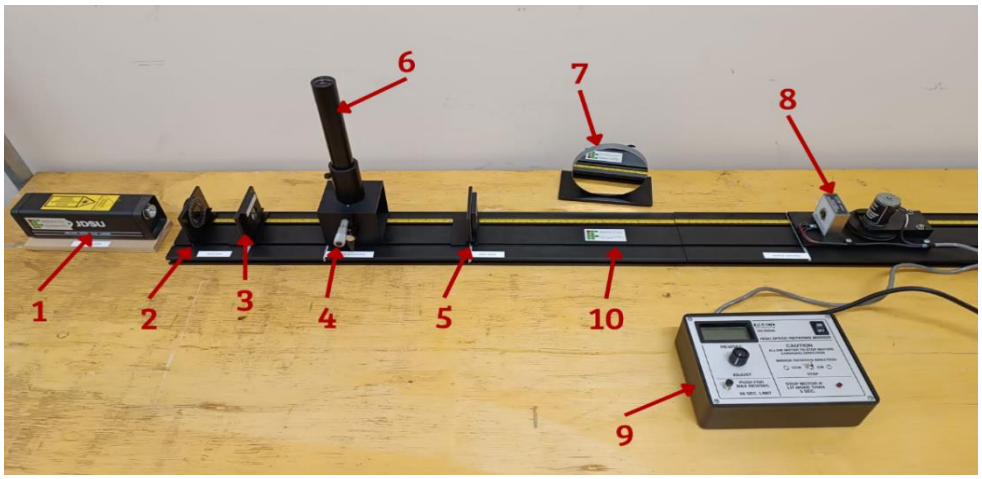


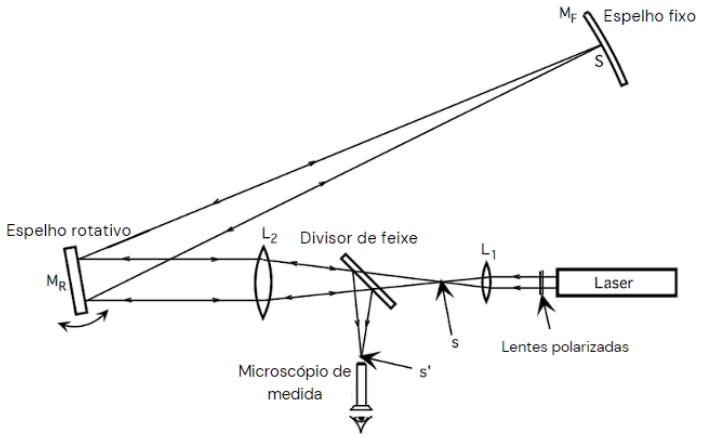
FIGURA 1. Componentes do equipamento PASCO OS-926.

Os seguintes componentes e suas numerações foram utilizados para a realização do experimento:

1. Fonte laser He-Ne 0,5 mw;
2. Lentes polarizadas para segurança na calibração e medição do feixe;
3. Lente de distância focal de 48 mm com suporte (L1);
4. Divisor de feixe e micrometro para medição do deslocamento;
5. Lente de distância focal de 252 mm com suporte (L2);
6. Microscópio de medição para medir o deslocamento do ponto de imagem do feixe refletido;
7. Espelho fixo (MF) com superfície côncava para reflexão do feixe de laser;
8. Espelho rotatório (MR) de alta velocidade;
9. Controlador do espelho rotatório (MR) e medidor de revoluções por segundo;
10. Bancada para montagem de todos os componentes.

No método utilizado para medir a velocidade da luz no ar, o princípio central é a observação do desvio angular causado por um espelho giratório que reflete um feixe de laser. O feixe de laser é inicialmente focado em um ponto através de uma série de lentes. A Figura 2 ilustra o funcionamento do equipamento utilizado no método de Foucault. O feixe de luz emitido pelo laser passa pela lente L1 e é focado em s. A lente L2 é posicionada de tal maneira que o feixe focado em s incide no espelho rotatório (MR) e é refletido para o espelho fixo (MF). O espelho MF reflete o feixe de modo que este retorne ao ponto s pela mesma trajetória, passando novamente pela L2 onde é focado. Um espelho semitransparente colocado na trajetória dos feixes permite observar o ponto refletido por MF através de um microscópio posicionado em s'. Quando o espelho giratório (MR) está em movimento, o feixe de luz que retorna

percorre uma trajetória ligeiramente diferente devido à mudança na posição angular do espelho durante o tempo em que a luz viaja para o espelho fixo e retorna. Essa variação no caminho percorrido causa um deslocamento da imagem da luz refletida. Aplicando-se uma rotação com velocidade angular ω no espelho MR, o feixe refletido pelo espelho MF atingirá o espelho rotatório com um ângulo de incidência ligeiramente diferente, resultando em um deslocamento observável no microscópio (Pasco, 2012).



Fonte: Adaptada de Pasco, 2012.
FIGURA 2. Esquema do método de Foucault.

A partir desse deslocamento perceptível no microscópio de medida, é possível calcular a velocidade da luz no ar. A fórmula que relaciona o deslocamento do feixe (Δs'), a variação da velocidade angular do espelho é representada pela equação 1.

$$c = \frac{\left(4\pi AD^2\right)}{(B+D)} \cdot \frac{\omega}{\Delta s'} \tag{1}$$

em que,

c - Velocidade da luz, m/s;
ω - Velocidade angular do espelho rotatório (MR), rad/s;
A - Distância entre a lente L2 entre L1, subtraia a distância focal de L1 (48mm), m;
B - Distância entre o espelho rotatório (MR) e o espelho fixo (MF), m;
D - Distância entre a lente L2 e o espelho giratório (MR), m;
Δs'- O deslocamento do feixe visualizado pelo microscópio, m.

O deslocamento da imagem é diretamente proporcional à velocidade angular (ω). Assim, como as constantes A, B, e D são mantidas controladas durante o experimento, é possível determinar a velocidade da luz variando a velocidade angular (ω) e medindo a correspondente mudança aparente no deslocamento do feixe (Δs') reescrita na equação 2, ao considerar que uma volta completa em uma circunferência é correspondente a 2π.

$$c = \frac{(8\pi AD^2)}{(B+D)} \cdot \frac{\left(Rot(h) - Rot(ah)\right)}{(s'h - s'ah)} \tag{2}$$

em que,

Rot(h) - Rotações no sentido horário, rev/s;
Rot(ah) - Rotações no sentido anti-horário, rev/s;
s'h - Posição do feixe medido no sentido horário, m;
s'ah - Posição do feixe medido no sentido anti-horário, m.

A equação que relaciona o deslocamento e as rotações pode ser resolvida utilizando um gráfico de regressão linear. As medidas coletadas do equipamento são plotadas, com o deslocamento do feixe (Δs′) no eixo x e a frequência do espelho rotatório (MR) em revoluções por segundo (rev/s) no eixo y.

Ao utilizar um gráfico no *Excel* (2024), é possível gerar uma linha de tendência linear a partir dos dados experimentais, o que nos leva à equação da reta.

$$y = ax + b \tag{3}$$

em que,

y - Frequência do espelho rotatório (MR), rev/s;
a - Coeficiente angular, que representa a inclinação da reta, sendo a taxa de variação da frequência do espelho (MR) entre o deslocamento (Δs′), rev/s.m;
x - Deslocamento do feixe (Δs′), m;
b - Coeficiente linear da reta, que representa o ponto onde a reta intercepta o eixo y, rev/s.

O coeficiente angular é essencial, pois ele revela a relação linear entre as variáveis, indicando como o deslocamento varia em função da mudança de frequência no espelho. A partir dessa relação linear, é possível inserir o valor de "a" na equação da velocidade da luz (Equação 4) para determinar seu valor experimental. Estabelecendo uma constante que vincula diretamente o deslocamento aparente ao movimento de MR.

$$c = \frac{\left(8\pi AD^2\right)}{(B+D)} \cdot a \tag{4}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores das constantes A, B e D utilizadas no experimento medidos com uma trena, juntamente com suas respectivas incertezas de ± 0,0005 m, estão apresentados na tabela 1. Essas constantes foram mantidas inalteradas ao longo de todos os testes para garantir a precisão dos resultados. Na tabela 2, estão as medições de posição feitas com o micrômetro analógico, frequência coletada pelo gerador digital, e o deslocamento (Δs') em relação à posição inicial, com incertezas de ± 0,000005 m para a posição e ± 1 rev/s para a frequência. Alguns valores de frequência são negativos devido à rotação anti-horária do espelho rotatório (MR) durante a coleta de dados.

TABELA 1. Valores fixos das constantes na experimentação.

Constantes	Valores ± 0,0005 (m)
A	0,2600
B	0,4550
D	7,2000

TABELA 2. Conjunto de dados coletas do equipamento variando a frequência de MR.

Frequência Rot ± 1 (rev/s)	Posição s' ± 0,000005 (m)	Deslocamento Δs' (m)
1500	0,012150	0,00021
1250	0,012120	0,00018
1000	0,012090	0,00015
750	0,012040	0,00010
500	0,012020	0,00008
0	0,011940	0
-500	0,011870	0,00007
-750	0,011840	0,00010
-1000	0,011790	0,00015
-1250	0,011740	0,00020
-1500	0,011690	0,00025

A partir das medidas das constantes (A, B e D), deslocamento do feixe (Δs') em função da variação da frequência de MR (rev/s) do espelho rotatório, foi possível ajustar uma linha de tendência linear utilizando um gráfico no *Excel* (2024). Essa reta forneceu a relação entre as variáveis de interesse,

com o coeficiente angular da reta (a) representando uma constante diretamente relacionada à velocidade da luz. Representado no gráfico da figura 3.

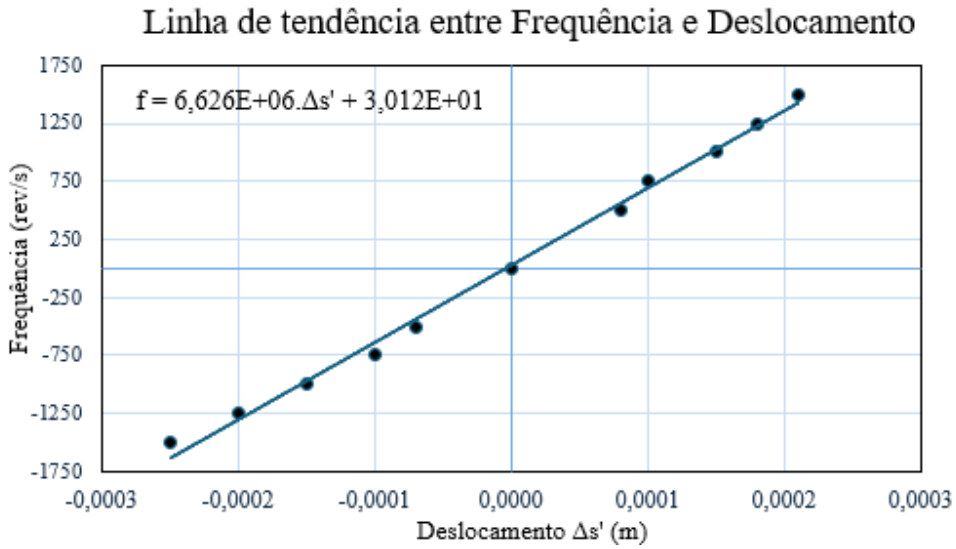


FIGURA 3. Gráfico de regressão linear gerado pelo *Excel* (2024).

A partir do gráfico de regressão linear gerado no *Excel* (2024), que forneceu o coeficiente angular da reta ($a = 6{,}626\,.\,10^6$), substitui-se as variáveis pelo coeficiente angular da reta na equação 3, a velocidade da luz foi calculada como:

$$c = \frac{(8\pi 0{,}260 \cdot 7{,}200^2)}{(0{,}455 + 7{,}200)} \cdot 6{,}626 \cdot 10^6$$

$$c \cong 293.213.280{,}71\, m/s$$

Comparando com o valor teórico da velocidade da luz no vácuo $c = 299.792.458\, m/s$, o erro percentual foi calculado como:

$$Erro\ percentual = \left| \frac{valor\ medido - valor\ teórico}{valor\ teórico} \right| \cdot 100 \quad (5)$$

$$Erro\ percentual = \left| \frac{293.213.280{,}71 - 299.792.458}{299.792.458} \right| \cdot 100$$

$$Erro\ percentual \cong 2{,}19\%$$

Os resultados obtidos indicam que o valor calculado da velocidade da luz está muito próximo do valor teórico, com um erro percentual de aproximadamente 2,19%. Este erro é significativamente inferior ao limite de 5% estabelecido como meta, o que demonstra a eficácia do método de Foucault e a precisão do equipamento PASCO OS-926.

Vale ressaltar que o coeficiente linear (b) da equação da reta gerada é de aproximadamente 3,012, um valor consideravelmente menor em comparação ao coeficiente angular ($a = 6{,}626\,.\,10^6$). Isso sugere que o coeficiente linear é tão pequeno que pode ser considerado desprezível dentro do contexto do experimento. Sua influência sobre o cálculo final da velocidade da luz é mínima, não afetando significativamente a análise dos dados.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na experimentação confirmam a precisão da metodologia de Foucault. A concordância dos resultados experimentais com os valores teóricos, obtendo um erro percentual de 2,19%, inferior ao definido de 5%. Demonstra não apenas a precisão do método, mas também a sua

adequação como ferramenta educacional no ensino da física na instituição. Além disso, o uso do método de Foucault, aliado ao equipamento PASCO OS-926, proporciona aos estudantes uma oportunidade valiosa de aplicar conceitos teóricos em experimentos práticos, consolidando o aprendizado de forma interdisciplinar.

Trabalhos futuros podem incluir a coleta de dados com a variação da distância do espelho fixo (D), para analisar sua influência no erro da determinação da velocidade da luz com esse equipamento. Esse procedimento permitirá refinar os resultados e melhorar ainda mais a precisão das medições. Assim, espera-se obter uma confirmação ainda mais robusta dos valores medidos, consolidando a metodologia como uma ferramenta eficaz para a educação e a prática científica.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

José Roberto de Lima: Coleta, análise de dados, apresentação de dados e redação do manuscrito. Vágner Ricardo de Araújo Pereira: Iniciativa do projeto, orientação, obtenção de financiamento, disponibilização da estrutura de laboratório e revisão do manuscrito. Alison José Pereira Neri: Auxílio na coleta de dados, análise e manuscrito.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PIBIFSP pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. P. S.; ARAUJO, L. C.; ROCHA, A. S.; GOMES, E. C.; LOBO, M. P. Experimentação como processo de ensino e aprendizagem de física óptica. **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, Araguaína, v. 6, n. 3, p. 37-42, 2019. Disponível em: https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/6240. Acesso em agosto 2024.

MICROSOFT CORPORATION. *Microsoft Excel [Software]*. Versão 16.0. Redmond, WA: Microsoft, 2024.

PASCO scientific. **OS-9261A Speed of Light Apparatus,** 2021. Disponível em: https://www.pasco.com/prodCatalog/OS/OS-9261_speed-of-light-apparatus/index.cfm. Acesso em agosto 2024.

SÉRÉ, M. G.; COELHO, S. M.; NUNES, A. D. **O papel da experimentação no ensino da Física. Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 20, n. 1, p. 30-42, 2003. Disponível em: https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6560. Acesso em agosto 2024.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR, J. W. The nature of light and the principles of ray optics. **Physics for scientists and engineers with modern physics**. Boston, 10ª ed, cap. 35, 2019. Disponível em: https://salmanisaleh.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/02/physics-for-scientists-7th-ed.pdf. Acesso em agosto 2024.

SILVA, R. M. M. **Experiências históricas para a determinação da velocidade da luz.** Tese (Mestrado em Física para o Ensino) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. p. 17-66, 2002. Disponível em: https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:WQxnF9uylsJ:scholar.google.com/+medindo+a+velocidade+da+luz&hl=pt-BR&as_sdt=0,5. Acesso em agosto 2024.