



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

JOSENALDO RIBEIRO DOS SANTOS

**O ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO AR EM FUNÇÃO DA PRESSÃO: UMA
APLICAÇÃO DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY**

**ARARUNA/PB
2022**

JOSENALDO RIBEIRO DOS SANTOS

O ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO AR EM FUNÇÃO DA PRESSÃO: UMA APLICAÇÃO DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento do curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Mário César Soares Xavier

**ARARUNA/PB
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S238 Santos, Josevaldo Ribeiro dos.

O índice de refração do ar em função da pressão
(manuscrito) : uma aplicação do interferômetro de Michelson-
Morley / Josevaldo Ribeiro dos Santos. - 2022.

41 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências,
Tecnologia e Saúde, 2023.

"Orientação : Prof. Dr. Mário César Soares Xavier,
Coordenação do Curso de Física - CCTS."

1. Ondas. 2. Luz. 3. Física. I. Título

21. ed. CDD 530.124

JOSENALDO RIBEIRO DOS SANTOS

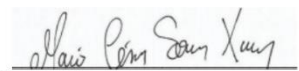
O ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO AR EM FUNÇÃO DA PRESSÃO: UMA APLICAÇÃO
DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento do Curso de Licenciatura em
Física da Universidade Estadual da Paraíba,
como requisito parcial à obtenção do título de
Licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Aprovada em: 14/12/2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Mário César Soares Xavier (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Msc. Robson Vieira Silva
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues dos Santos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A minha sobrinha, Elisa Rodrigues dos Santos, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, e acima de tudo, a DEUS e a Virgem Santíssima, em quem deposito minha fé e atribuo todas as conquistas adquiridas ao longo de minha vida. Muito obrigado por me guiarem a luz em caminhos tenebrosos.

Aos meus pais, Ana Lúcia e José Juarez, por toda assistência, incentivo, carinho, amor e orações. Ensinarão-me a sempre buscar os meus objetivos e trabalhar duro para alcançá-los. Deus abençoe vossas vidas!

Aos meus irmãos Josenildo, Josenilson, Joelson, Jonas e minha cunhada Kaliane Rodrigues. Obrigado pelo incentivo e motivação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mário César Soares, por me proporcionar uma nova visão da vida acadêmica, ao aceitar minha participação no Grupo Fotônica. Muito obrigado pelas oportunidades, orientações e confiança depositada.

Ao Prof. Msc. Robson Vieira pelas orientações e sugestões para a realização desse trabalho. Muito obrigado!

Aos integrantes do Grupo Fotônica, em especial, aos amigos Gabrielly Franklin, Eduarda Feliciano, Natanael Silva, Acson Clementino, Eduarda Freire e Jansen Felix por todas as risadas, ajudas e tardes de conversas e distrações. Deus abençoe a vida de todos!

Aos grandes amigos Joédson Silva, Erivania Silva, Fabíola Gonzaga e Aldaisa Galdino por todo o companheirismo, incentivo, momentos de alegria e ajudas mútuas. Foi uma honra tê-los conhecidos e uma benção estar com vocês todo esse tempo.

Ao ilustre grande amigo, com quem morei durante essa jornada, João Pedro Lira. Muito obrigado pelos momentos de descontração, bebidas, conversas e principalmente pelo companheirismo e confiança. Deus o abençoe!

A todo o Departamento de Física do CCTS, em especial, os professores Jamilton Rodrigues, João Hugo, Thiago Santos, Aline Faustino, Altamir Souto, Ana Paula, Carlos Cirino, Jocsylio Lima e Rafael Brito. Muito obrigado pelos ensinamentos.

Aos amigos e técnicos de laboratório, Fagne Fernandes e Francielho Fernandes, por toda ajuda e empenho para realização desse trabalho, deixo aqui o meu muito obrigado.

Aos amigos que tive o prazer de conhecer enquanto estive no CCTS: Janiele Ferreira, Mileny Silva, Jozemilton Fernandes, José Roberto, Maria Fabiola, Layane Souza, Maria Vitória, Alan Santos, Murilo Soares, Aline Galdino, Davi Texeira e José One. Obrigado pelos bons momentos compartilhados.

“Dê-me, Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter, método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir...”

(Santo Tomás de Aquino)

RESUMO

O interferômetro desenvolvido por Michelson e Morley, em 1887, surgiu em um contexto da Física em que a proposta eletromagnética de James Maxwell (1831-1879), para a luz, estava fortemente consolidada. Maxwell havia unificado conceitos como os de Ampère e de Faraday e conseguiu comprovar que ondas eletromagnéticas são constituídas por campos elétricos e magnéticos, os quais oscilam perpendicularmente um em relação ao outro. No entanto, o objetivo de Michelson e Morley era de investigar o movimento aparente da Terra em relação ao éter. Acreditava-se que esse éter preenchia todo o universo e seria o meio pelo qual a luz se propagava. Mesmo com inúmeras tentativas e de diversas formas, os resultados não comprovaram a existência do éter. Porém, o interferômetro de Michel e Morley não ficou isolado no passado. Ele foi sendo adaptado para outras propostas, por exemplo, a medição do índice de refração do ar. Nossos objetivos consistiram, justamente, em medir o índice de refração do ar utilizando o interferômetro com as adaptações que propusemos, e analisar o seu comportamento em função da variação da pressão. Variamos a pressão utilizando uma bomba de vácuo, para retirar o ar da nossa câmara de vácuo, e uma válvula para controlar o retorno do ar à câmara. Com essas devidas adaptações no equipamento experimental utilizado, chegamos a resultados minuciosamente precisos com taxa de variação em torno de 0,006 %. Consolidando a precisão não apenas do interferômetro, mas também das adaptações sugeridas.

Palavras-chave: Interferômetro de Michelson-Morley; Índice de refração em função da pressão; Interferência; Propagação da luz.

ABSTRACT

The interferometer developed by Michelson and Morley, in 1887, emerged in a context of Physics in which the electromagnetic proposal of James Maxwell (1831-1879), for light, was strongly consolidated. Maxwell had unified concepts such as those of Ampère and Faraday and was able to prove that electromagnetic waves are made up of electric and magnetic fields, which oscillate perpendicularly in relation to each other. However, Michelson and Morley's goal was to investigate the motion Earth's relative to ether. It was believed that this ether filled the entire universe and would be the medium through which light propagated. Even with countless attempts and in different ways, the results did not prove the existence of the ether. However, the Michelson and Morley interferometer has not been isolated in the past. It was adapted for other purposes, for example, measuring the refractive index of air. Our objectives consisted precisely in measuring the refractive index of the air using the interferometer with the adaptations we proposed, and analyzing its behavior as a function of pressure variation. We vary the pressure using a vacuum pump to remove the air from our vacuum chamber and a valve to control the return of air to the chamber. With these necessary adaptations to the experimental equipment used, we reached minutely accurate results with a variation rate of around 0.006%. Consolidating the accuracy of not only the interferometer, but also the suggested adaptations.

Keywords: Michelson-Morley interferometer; Refractive index as a function of pressure; Interference; Light propagation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Múltiplas reflexões em espelhos planos.....	33
Figura 02: Fenômenos da reflexão e refração da luz simultaneamente.....	55
Figura 03: Representação das interferências construtivas e destrutivas em ondas.....	55
Figura 04: Materiais utilizados.....	55
Figura 05: Diagrama esquemático do nosso experimento.....	55
Figura 06: Montagem das ferramentas experimentais.....	55
Figura 07: Imagens de interferência.....	55
Figura 08: Índice de Refração do ar atmosférico em função da pressão.....;	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Índice de refração de diferentes meios materiais.....	55
Tabela 02: Medidas das variações das franjas.....	55
Tabela 03: Índice de refração do ar atmosférico para cada número de franja.....	55
Tabela 04: Variação do número de franjas para a variação da pressão ponto a ponto.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS: LUZ.....	13
3 REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ	16
3.1 Reflexão da luz visível	16
3.3 Índice de refração.....	18
3.4 Índices de refração tabelados	20
4 PROPRIEDADES DE ONDAS LUMINOSAS	21
4.1 Coerência	21
4.2 Interferência.....	22
5 LASERS CONVENCIONAIS.....	23
6 DIFERENÇA DE PRESSÃO	24
7 INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY	27
8 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
9 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
9.1 Determinação do índice de refração.....	32
9.2 Índice de refração do ar em função da pressão	34
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

A interferometria é um ramo da óptica que investiga o fenômeno de interferência para determinar grandezas, tais como comprimentos de onda, frequência, medição de pequenas distâncias ou deslocamentos, vibrações, índice de refração entre outros (FRAGNITO; COSTA, 2010). Historicamente, um dos pioneiros na contribuir com a comprovação do fenômeno de interferência da luz foi o físico britânico Thomas Young, por volta dos anos 1801. Utilizando um experimento, que ficou conhecido como experimento da dupla fenda, Young observou, por meio dos resultados, o comportamento ondulatório da luz. Quando o feixe de luz passava por obstáculos produzia ondas circulares. Ao colocar um anteparo, Young notou a formação de franjas escuras e claras, as quais formavam um padrão, conhecido atualmente como padrão de interferência.

O primeiro interferômetro foi desenvolvido por Thomas Young, com esse interferômetro foi obtido as franjas de interferência através do experimento de dupla fenda (LEÃO, 2004). Logo depois, veio o interferômetro de Mach-Zehnder, o qual consiste em um arranjo de espelhos e semi-espelhos que demonstram o fenômeno por meio da divisão do feixe luminoso, exibindo uma interferência construtiva com grande eficiência, que possibilita medidas precisas para a refração (EISBERG; RESNICK, 1994). Outro importante interferômetro é o LIGO, que possui funcionamento similar aos anteriores. Esse modelo se diferencia em termos de dimensão, isto é, a distância dos espelhos ao centro é muito maior do que os interferômetros convencionais. Essa distância projetada, no interferômetro de LIGO, foi pensada de modo a reduzir os ruídos sísmicos e, conseqüentemente, a interferências externas (SZPUNAR, 2016). Sua proposta está direcionada para a detecção de ondas gravitacionais, divergindo, assim, da proposta dos demais interferômetros. Diante disso, podemos notar a importância dos interferômetros para os avanços da ciência, principalmente no campo da física óptica. Através deles é possível investigar muitos fenômenos, sendo o de maior destaque a refração da luz em meios materiais, tais como sólidos, líquidos e gases, assim como podem analisar a interação entre ondas eletromagnéticas.

Um interferômetro de grande importância para a óptica do século XX, foi desenvolvido por A. A. Michelson e E. Morley, em 1887, (MICHELSON; MORLEY, 1887). Escolhemos esse modelo para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, o interferômetro de Michelson foi designado à comprovação da existência do éter. O interferômetro de Michelson consiste, basicamente, em dividir um feixe de luz em dois caminhos, os quais são refletidos de volta e

recombinados em um anteparo. Nesse anteparo pode ser observado a formação do padrão de interferência (MICHELSON; MORLEY, 1887).

A abordagem metodológica utilizada, neste trabalho, consiste nas concepções experimentais. O objetivo é determinar o índice de refração do ar atmosférico a partir do uso do Interferômetro de Michelson-Morley (IMM), desenvolvido pelo Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa (CIDEPE). Também pretendemos analisar o comportamento do índice de refração em função da pressão, propondo uma pequena adaptação para o IMM utilizado com o intuito de aprimorar a aquisição de medidas.

Este trabalho é estruturado a partir de discussões que englobam, brevemente, a luz como uma onda eletromagnética, seu comportamento em meios refringentes, tais como seus índices de refração; seu comportamento ondulatório, a coerência de suas fontes e as interferências causadas. Adiante, ocorre uma análise da diferença de pressão em ambientes quaisquer, buscando aprofundar o estudo, analisa-se sua influência sobre o índice de refração. Por fim, uma breve linha temporal a cerca do surgimento do interferômetro de Michelson-Morley será estabelecida. Tais abordagens ocorrem com o objetivo de fundamentar essa pesquisa, de mesma forma, enfatizar sua relevância.

2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS: LUZ

A luz é o principal fenômeno da natureza para os estudos utilizando interferômetros. Neste capítulo, vamos discutir, de forma sucinta, a respeito da definição da luz.

Muitas são as formas de ondas eletromagnéticas existentes na natureza, por exemplo, raio-x, raios gama, ondas de rádios entre outros. No entanto, este trabalho se limita ao estudo da teoria eletromagnética proposta, inicialmente, por James Maxwell em 1873. Na concepção de Maxwell, as ondas citadas anteriormente, assim como a luz, teriam a mesma velocidade no vácuo (MAXWELL, 1954). A partir dessas conclusões, décadas mais tarde, surgiu uma nova óptica física. As perspectivas aqui abordadas referem-se as teorias eletromagnéticas abordadas nas obras de *A Treatise on Electricity & Magnetism* (MAXWELL, 1954) e *Electromagnetic Fields and Waves* (CORSON; LORRAIN, 1970).

As conhecidas equações de Maxwell relacionam perpendicularmente os campos elétrico e magnético. No entanto, para que essa relação fosse analisada, algumas adequações foram necessárias nas leis já constituídas na época, as quais foram propostas pelo próprio Maxwell em suas obras (LIMA, 2019). Algumas dessas adequações estão presentes no trabalho de Lima (2019). As equações de Maxwell são dadas pelo seguinte conjunto de equações:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}, \quad (4)$$

onde \mathbf{E} e \mathbf{B} são os campos elétrico e magnético, respectivamente, \mathbf{J} é a densidade de corrente, ρ a densidade de carga, μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo e ϵ_0 a permissividade do vácuo. As Eqs. (3,4) descrevem o caráter eletromagnético das ondas, note que se ocorre uma variação em um dos campos, também ocorrerá uma variação no outro, ou seja, se o campo elétrico variar, o magnético também irá. O inverso também é verdadeiro (CORSON;

LORRAIN, 1970). Considerando, assim como Maxwell, ondas no vácuo podemos obter a constante da velocidade da luz (c). No vácuo as equações assumem a forma

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (8)$$

onde as Eqs. (5,6) correspondem a Lei Diferencial de Gauss para a eletricidade e o magnetismo, respectivamente, enquanto que a Eq. (7) refere-se à Lei de Faraday e Eq. (8) a Lei de Ampère. Se aplicarmos o rotacional (identidade de operadores) na Eq. (7), teremos que

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right). \quad (9)$$

Usando a identidade de operadores $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$, considerando $\mathbf{A} = \mathbf{E}$ e a Eq. (5), temos que

$$\nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = \nabla^2 \mathbf{E}. \quad (10)$$

Tomando a propriedade do rotacional no lado esquerdo da Eq. (10), teremos

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla^2 \mathbf{E}. \quad (11)$$

Substituindo a Eq. (8) na Eq.(11), obtemos

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}. \quad (12)$$

De maneira análoga, a partir da Eq. (8) é possível encontrar o seguinte resultado para o campo magnético,

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}. \quad (13)$$

Esses resultados, tanto para o campo elétrico quanto magnético, referem-se à ligação direta entre a carga e o potencial. Para finalmente chegar na relação da velocidade da luz no vácuo, devemos fazer uma analogia entre a equação da onda e o que foi encontrado anteriormente. A equação da onda é dada por,

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2}. \quad (14)$$

Com essa equação, podemos notar a relação $1/c^2 = \mu_0 \varepsilon_0$. A partir dessa relação, obtemos a velocidade da luz, dada por

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}. \quad (15)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do meio, a qual vale $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, e ε_0 é a permissividade elétrica do meio, cujo valor é dado por $8,8541878176 \cdot 10^{-7} \text{ F/m}$ (o meio em questão é o vácuo). Ao substituir esses valores encontraremos o atual valor da velocidade da luz, sendo este, aproximadamente, de $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Esse valor não é o mesmo encontrado por Maxwell em seus cálculos, assim como as equações utilizadas diferenciam em alguns aspectos das que foram apresentadas anteriormente (LIMA, 2019). O valor encontrado por ele seria próximo ao que Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) encontrou em 1849, para a luz no ar, de $3,15 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (MORIZOT et al, 2010).

Os resultados obtidos contribuíram para o entendimento inicial da propagação da luz e como esta se relaciona com outras ondas eletromagnéticas pela velocidade de propagação. Generalizou-se, portanto, quw estas, para um referencial inercial, teriam mesmo módulo de velocidade. Inicialmente, se entendeu que tal referencial seria o Éter, porém, este não seria limitado apenas a isto, uma vez que seria o elemento que preenche todo o espaço, segundo sua teoria.

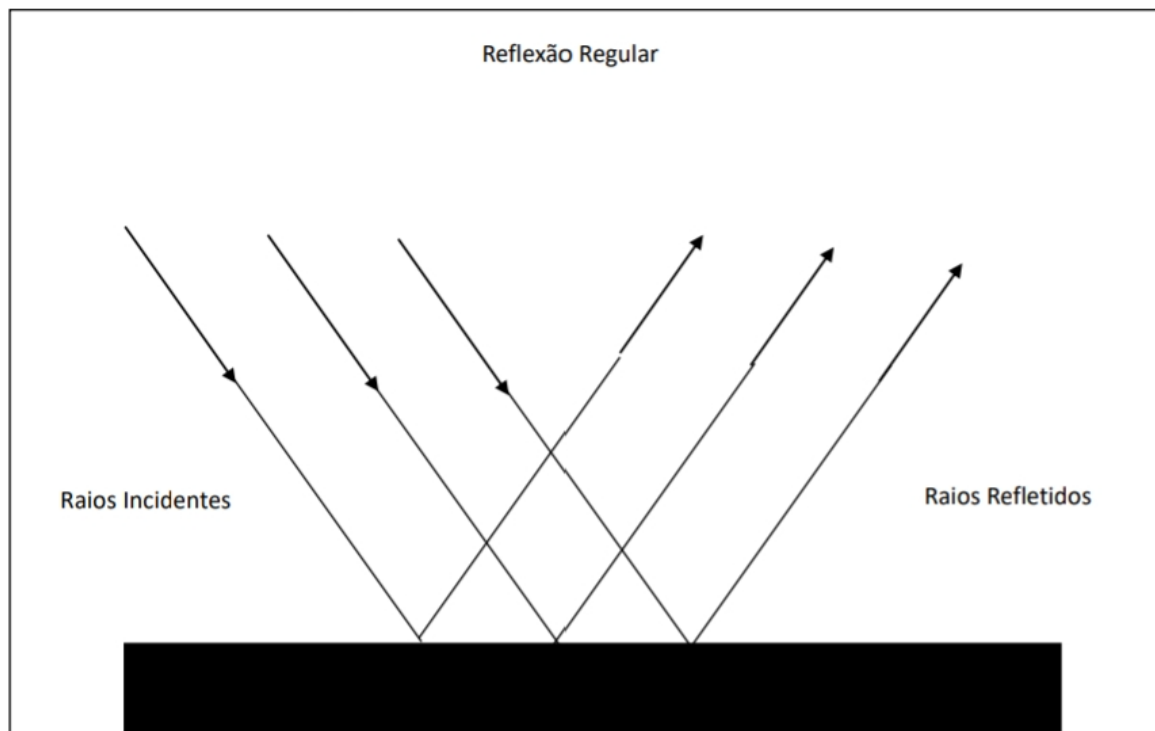
3 REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Alguns conceitos da óptica geométrica são fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Por esta razão, vamos discutir, neste capítulo, alguns fenômenos relacionados a luz interagindo com meios. Neste caso, estamos nos referindo aos fenômenos de reflexão e refração da luz.

3.1 Reflexão da luz visível

O fenômeno da reflexão da luz que estamos interessados é aquele que ocorre em superfícies espelhadas, a qual não é muito difícil de ser compreendida. Esse fenômeno acontece quando um raio de luz, proveniente de uma fonte luminosa, é incidido, com um determinado ângulo, em uma superfície plana e espelhada, e refletido no mesmo plano e com o mesmo ângulo. Ou seja, raio incidente e refletido estão no mesmo plano e possuem o mesmo ângulo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). A Fig. (1) exemplifica esse fenômeno.

Figura 01 - Múltiplas reflexões em espelhos planos.



Fonte: autor (2022)

Observe, na Fig. (1), que os ângulos de incidência e reflexão possuem a mesma magnitude, onde a relação de igualdade $\theta_1 = \theta_2$ é verdadeira. Esse princípio não é aplicado apenas a

espelhos e superfícies planas, mas a qualquer superfície que possua reflexão independente de sua geometria, podendo então ser generalizada como a primeira lei da óptica geométrica.

3.2 Refração da luz visível

Enunciado a reflexão da luz se torna possível falar a respeito da refração da luz visível em meios materiais de diferentes composições, separados por uma interface. É importante deixar claro que há outras maneiras de abordar a refração da luz e Lei de Snell como, por exemplo, através da abordagem ondulatória, Fassarella (2007), onde é possível propor uma generalização da Lei de Snell a partir de uma análise da luz propagando-se como uma onda. No entanto, este não é de interesse no momento.

Vamos considerar dois meios pelos quais a luz possa se propagar. Por exemplo, ar e água. Se um raio luminoso é incidido com certo ângulo, por exemplo, do ar para a água, os quais possuem índices de refração diferentes, notaremos que o raio sofre um pequeno deslocamento na sua propagação, logo, o ângulo do raio incidente é diferente do ângulo do raio refratado. Além disso, a velocidade de propagação do raio é alterada, essa alteração ocorre para mais ou para menos dependendo do índice de refração do meio (OLIVEIRA, 2020). De acordo com Lei da Refração de Snell, os índices de refração e os ângulos dos raios incidente e refratado se relacionam, considerando a normal, da seguinte forma

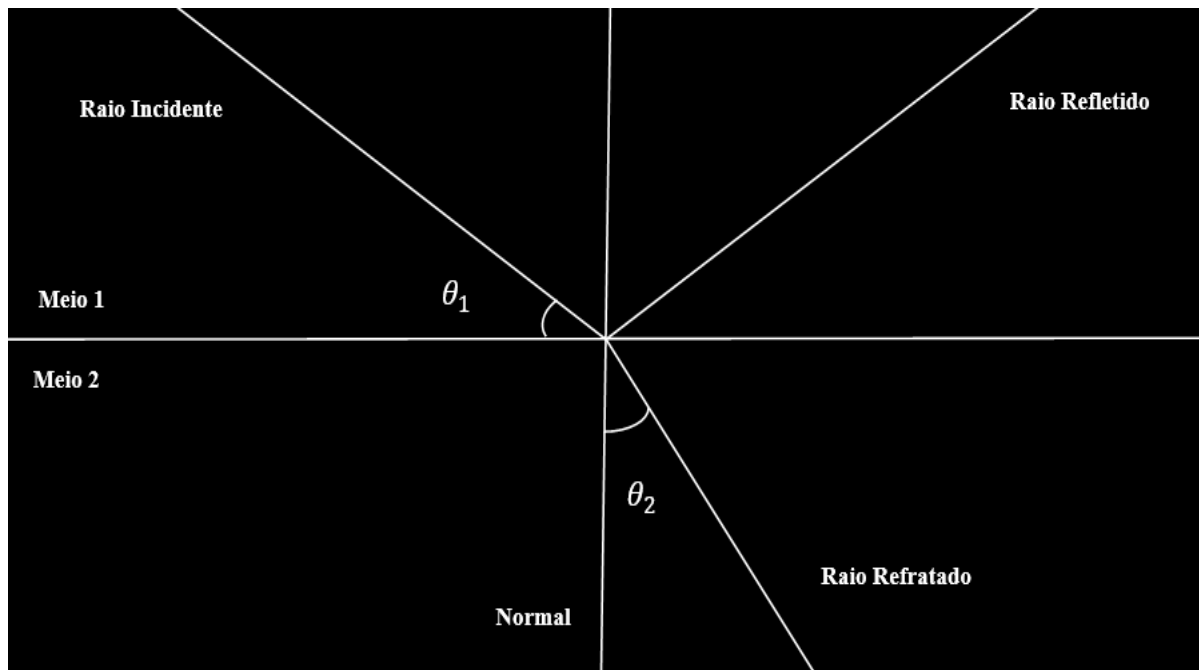
$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2). \quad (16)$$

A Figura 2 ilustra o fenômeno da refração da luz. Um raio de luz incide sobre uma interface surgindo uma reflexão, seguida de um raio refratado, em que os ângulos de incidência e reflexão são iguais, e o de refração possui magnitude distinta. Com essa mudança de meios há uma alteração na velocidade em que a luz se propaga e por consequência no comprimento de onda. Isto ocorre devido o comprimento de onda ser

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (17)$$

onde v é a velocidade de propagação e f a frequência. Esta última não varia, logo quanto menor for a velocidade de propagação, menor será comprimento de onda. Então, o princípio básico da refração da luz seria: a alteração da velocidade da luz no meio material pelo qual se propaga.

Figura 2 - Fenômenos da reflexão e refração da luz simultaneamente.



Fonte: autor (2022)

Para exemplificar, considere que o meio 1 da Figura 2 tenha um índice de refração menor do que o meio 2, ou seja, $n_1 < n_2$. Neste caso, o ângulo do raio de incidência será maior do que o raio refratado. Caso contrário, ou seja, $n_1 > n_2$, o ângulo refratado será maior que o incidente. Por fim, se os índices forem iguais, $n_1 = n_2$, não ocorrerá alterações na trajetória da luz (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

A partir do domínio dos fenômenos de reflexão e refração, foi possível compreender outros fenômenos da natureza, por exemplo, o arco-íris ou a refração dos raios solares na atmosfera, e o desenvolvimento de equipamentos tecnológicos, como é o caso da fibra óptica (MARTINHO; SOARES, 2017). Esses fenômenos também contribuíram significativamente para o estudo e aprimorando de lentes. Uma curiosidade interessante, a respeito da refração, é que pode chegar, com a dedução das equações da teoria eletromagnética, a uma generalização da Lei de Snell, onde os raios de luz seriam representados por vetores com relações de maior complexidade entre ângulos e meios de propagações (PAULLIQUECIS, 2020)

3.3 Índice de refração

O índice de refração, por exemplo, de um meio homogêneo altera a velocidade e a direção de propagação da luz. Ao contrário do que muitas vezes é disseminado, o índice de refração não é apenas uma unidade adimensional. Suas propriedades interagem com a onda luminosa

causando perturbações em sua trajetória, devido a interação entre as partículas de luz e as substâncias que compõem o próprio meio material.

Para uma fonte de luz monocromática (apenas um comprimento de onda), o índice de refração absoluto n pode ser obtido a partir da relação que considera a razão entre a velocidade da luz no vácuo, c , e a velocidade da luz no meio, v , ou seja,

$$n = \frac{c}{v}. \quad (19)$$

O tipo de material que compõem o meio pelo qual a luz se propaga são responsáveis por definir o índice de refração e, conseqüentemente, o comportamento da luz ao passar por ele (FASSARELLA, 2007). Embora a frequência não varie no meio, há uma alteração no comprimento de onda, isso pode significar um aumento ou diminuição. Cada fonte luminosa monocromática possui uma frequência específica que se mantém ao interagir com as substâncias do meio, sendo oriunda das propriedades da fonte luminosa.

Também podemos encontrar índice de refração em meios gasosos, como, por exemplo, gás hidrogênio, gás oxigênio, ar atmosférico entre outros. No entanto, suas medições não são obtidas facilmente, muitas vezes requer equipamentos experimentais avançados, como um interferômetro ou refratômetro. Para o ar atmosférico, podemos obter o índice de refração a partir de uma equação que relaciona comprimento de onda, deslocamento de franjas da figura de interferência e do caminho óptico percorrido. Essa equação está presente no Livro de Atividades Experimentais do Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa (CIDEPE).

Partindo da ideia de calcular a diferença do número de ondas completas N dentro da câmara de atividades óptica, seja na presença ou na ausência (vácuo) do ar atmosférico, o número de ondas dentro da cédula é dado pela divisão entre o comprimento da câmara e o comprimento de onda λ_a da fonte luminosa no ar, ou seja,

$$N_a = \frac{2L}{\lambda_a}. \quad (20)$$

Analogamente, para o vácuo, λ_v , será

$$N_v = \frac{2L}{\lambda_v}. \quad (21)$$

Pelas relações de igualdades das equações (19), (20) e (21),

$$N_a - N_v = \frac{2L}{\lambda_a} - \frac{2L}{\lambda_v} = 2L \left(\frac{1}{\lambda_a} - \frac{1}{\lambda_v} \right). \quad (22)$$

$$\Delta N = \frac{2L}{\lambda_v} \left(\frac{\lambda_v}{\lambda_a} - 1 \right) = \frac{2L}{\lambda_v} (n - 1). \quad (23)$$

$$n = \frac{\Delta N \lambda_v}{2L} + 1. \quad (24)$$

Logo, obtemos a expressão para o índice de refração de um gás. O fator 2 corresponde ao caminho que a luz percorre na ida e na volta dentro da câmara de atividades ópticas.

3.4 Índices de refração tabelados

Cada meio que permite a propagação da luz possui o seu índice de refração específico, que depende do tipo de material que ele é composto. Atualmente, encontraremos na literatura varias tabelas com os índices de refração de diversos materiais. A Tabela 1 abaixo nos mostra alguns exemplos, em especial, de materiais presentes em nosso cotidiano.

Tabela 01 - Índice de refração de diferentes meios materiais.

Meio	Índice	Meio	Índice
Vácuo	1	Cloreto de sódio	1,54
Ar (CNTP)	1,00029	Poliestireno	1,55
Água	1,33	Dissulfeto de carbono	1,63
Acetona	1,36	Vidro de alta dispersão	1,65
Álcool Etilico	1,36	Safira	1,77
Sol. de Açúcar (30%)	1,38	Vidro de baixa disper.	1,52
Quartzo Fundido	1,46	Diamante	2,42

Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2009, p. 18, com adaptações).

4 PROPRIEDADES DE ONDAS LUMINOSAS

O comportamento ondulatório da luz possui inúmeras vertentes e estudos afins, no entanto, alguns possuem maior destaque por firmarem as bases dos fundamentos teóricos acerca das ondas luminosas. Aqui, o intuito é apresentar as principais teorias e teoremas que fomentam a composição de uma fonte luminosa, assim como seu comportamento quando interagem entre si e o próprio meio em que se inserem.

4.1 Coerência

O fenômeno da coerência contribui para compreensão da interferência de ondas eletromagnéticas. Neste caso, trata-se de uma luz coerente. Para que haja interferência em dois feixes luminosos sobrepostos é necessário que a diferença de fase entre eles permaneça constante no tempo, acoplando-se sobre um anteparo em que será formada a imagem, (FREITAS, 2011; HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009). Nesse sentido, cada onda percorre o mesmo caminho sobrepondo-se uma a outra, mantendo a diferença de fase constante ao longo do tempo ou da angulação entre as ondas.

Satisfeitas as condições, pode-se afirmar que a fonte de luz é coerente, no entanto, as fontes luminosas podem ser parcialmente coerentes ou incoerentes, (FACÃO, 1999; FREITAS, 2011). As fontes incoerentes possuem variação na diferença de fase com o decorrer do tempo. Em contrapartida, essas fontes serão parcialmente coerentes no momento em que se observa as diferenças de fase, possuindo pontos incoerentes noutros momentos observados.

Muitas das fontes de luz como lâmpadas de filamento incandescente e estrelas, não possuem características totalmente coerentes, já que são luzes de composição policromáticas, ou seja, a fonte emite raios luminosos com mais de um comprimento de onda. Um exemplo de uma luz totalmente coerente são as fontes pontuais como os Lasers, os quais emitem um feixe de luz com um único comprimento de onda, as chamadas luzes monocromáticas.

O comportamento da luz estreitamente monocromática de uma fonte pontual é dado pela expressão de uma senoide infinita no espaço e tempo, ou seja, $A \sin(\omega t - kx)$ (FACÃO, 1999). As luzes de fontes reais não são pontuais, logo não possuem características suficientes que as definam estreitamente coerente (FACÃO, 1999).

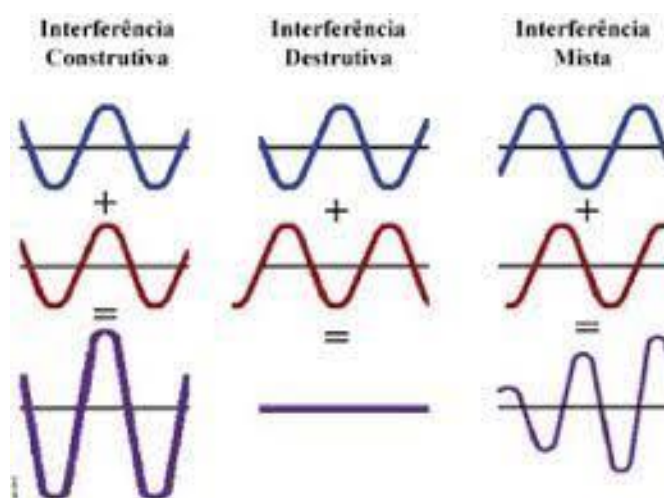
4.2 Interferência

Um dos fenômenos ondulatórios de importância para o estudo da interferometria é a interferência em ondas luminosas. Ela está presente em várias ramificações da óptica física, assim como em fenômenos naturais. Por exemplo, a interferência causada na superfície de bolhas de sabão, o bater das asas de uma borboleta ou ainda a tinta usada em algumas cédulas de dinheiro (HALLIDAY; RESNICK e WALKER, 2009).

Os fenômenos da interferência encontrados na natureza possuem uma certa complexidade no tocante as análises de comportamento, o que implica na impossibilidade de estudar o fenômeno a partir de uma única onda progressiva, sendo necessário uma junção de ondas progressivas (SERWAY; JEWTT, 2014). A interferência em ondas, sejam elas mecânicas ou eletromagnéticas, parte do princípio da superposição. Isso quer dizer que a função de onda resultante em qualquer ponto é a soma algébrica dos valores de cada função de onda para duas ou mais ondas progressivas que se propagam num meio qualquer (SERWAY; JEWTT, 2014).

Ondas em propagação podem resultar em dois tipos de interferência: construtivas e destrutivas. Nas construtivas, o deslocamento dos elementos do meio ocorre para ambas as ondas na mesma direção, fazendo com que a amplitude da onda resultante seja maior que as originais separadamente. Para a interferência destrutiva, as ondas se propagam pelo mesmo caminho, no entanto, são opostas e quando se sobrepõem são anuladas, (SERWAY e JEWTT, 2014). Esses dois tipos de interferência podem ser combinados em uma única propagação, resultando em uma onda com características construtivas e destrutivas, a chamada interferência mista.

Figura 03 - Representação das interferências construtivas e destrutivas em ondas.



Fonte: Couto (2021, p. 11)

5 LASERS CONVENCIONAIS

Por séculos a óptica trabalhou com fontes luminosas policromáticas, as quais necessitavam de muitas adaptações para chegar em alguns fenômenos, principalmente aos da luz como uma onda. Nos anos de 1960, essa perspectiva foi revolucionada com o desenvolvimento do LASER, o qual foi criado por Theodore Maiman (MAIMAN, 1960).

A sigla LASER, usualmente atribuído a um substantivo, é a abreviatura de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que em Português significa “Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação”. Os LASERS convencionais são dispositivos responsáveis por gerarem radiação eletromagnética, no entanto, para que seja possível o seu comprimento de onda deve ser definido, coerente, monocromático, os fótons da radiação em fase e colimado. Além dessas características, o espalhamento do feixe de um LASER é mínimo, mesmo que a longas distâncias, mantendo uma propagação linear (SERWAY e JEWTT, 2012).

Para entender melhor os LASERS é importante saber como que ocorre o seu funcionamento. Ele é constituído por três componentes, sendo eles: o meio ativo, um sistema de alimentação e o ressonador (SIEGMAN, 1986). O primeiro é o responsável por gerar a matéria de uso de um LASER, podendo ser composto por um sólido, líquido ou gás. Os átomos que constituem o meio ativo serão os responsáveis por emitirem a luz a partir de uma certa concentração de energia nos fótons. O responsável por determinar o comprimento de onda será os átomos com elétrons em níveis que o espaçamento tenha a energia do feixe de luz buscado. O segundo é responsável por fazer com que os elétrons tenham sua energia alterada a partir de estados excitados e com o decaimento é produzido luz. Esse elemento atua no meio ativo emitindo fótons e fazendo com que os átomos fiquem no estado excitado. Por fim, o terceiro faz com que os fótons que escapam do meio voltam a ele e continuem a produzir emissão estimulada. Os responsáveis por fazerem com que esses fótons retornem ao meio ativo são os espelhos semi-refletores que são colocados nas extremidades do laser (SILVA, 2020).

Um dos LASERS que segue este princípio é o de gás hélio-neônio (HeNe), criado em 1961 por Javan, Herriott e Bennett, cujo o meio ativo é constituído de gás, com uma fonte de alimentação externa e espelhos nas extremidades (JAVAN; BENNETT JR; HERRIOTT, 1961).

6 DIFERENÇA DE PRESSÃO

A atmosfera que envolve a Terra é composta basicamente por fluidos gasosos, os quais formam as camadas de defesa do planeta. Cerca de onze elementos compõe a atmosfera, onde apenas três compõe quase todo o volume atmosférico. O Nitrogênio ocupa 78,09%, o Oxigênio 20,95% e o Argônio 0,03% (DIAS; ANDEADW-NETO; MILTÃO, 2007). Os demais gases estão em uma proporção muito pequena, no entanto possuem grande importância para o equilíbrio dos gases e a manutenção da estabilidade do planeta.

Compreender o comportamento da atmosfera é algo complexo e que não corresponde aos interesses desse trabalho. Porém, para entender algumas variações no índice de refração do ar, entender algumas variantes que estão imersas no estudo da atmosfera, mais especificamente a variação da pressão nas diferentes localidades do planeta, faz-se necessário.

Fluidos que interagem com uma superfície perpendicularmente, seja ela qual for, exercem uma força de impulsionamento sobre esta. Essa força é originada das inúmeras colisões que ocorrem entre as partículas que compõem o ar e aquelas da superfície, após cada colisão o sentido da velocidade é invertido (SERWAY, 2014). As colisões respeitam o teorema do impulso-momento e a terceira lei de Newton, onde as partículas, em altíssimas velocidades, encontram-se em um ponto do espaço e a diferença entre o movimento final e o inicial faz com que haja uma compressão na superfície. Esta grandeza recebe o nome de Pressão.

A pressão em uma determinada superfície, generalizada, é analisada a partir da relação entre o módulo da força constante aplicada e a área de contato:

$$P = \frac{|F|}{A}. \quad (25)$$

A pressão possui uma variação de comportamento peculiar. Quanto maior for a altitude, menor será a pressão, sendo correto afirmar o oposto para altas profundidades (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Partindo da ideia de uma força resultante atuando sobre um fluido, é possível determinar cada força em função da área e pressão a partir da equação (25). Ao igualar a massa desse fluido ao produto da massa específica pelo volume resulta:

$$P_2 A = AP_1 + pA\Delta y. \quad (26)$$

Tomando $P_2 = P, P_1 = P_0, y_1 = 0, y_2 = -d$, tem-se a expressão da pressão a uma dada profundidade:

$$P = P_0 + pd. \quad (27)$$

A pressão de um gás pode efetuar possíveis variações no índice de refração de um meio, ao ser estabelecida uma análise da interação do comportamento eletromagnético da luz em contato com esse meio gasoso (RODRIGUES; DEGASPERI; BARBOSA, 2022). Com a variação da pressão de um gás, ocorre uma mudança de comportamento nas moléculas que compõem o gás, causando uma modificação no comportamento e caminho de propagação da luz. Este, então, causa uma ligeira ou brusca variância no índice de refração.

Quando se trata da refração da luz em um meio gasoso algumas interações, como as partículas na interação de radiação eletromagnética com nuvens eletrônicas de átomos de um meio, devem ser desconsideradas, (RODRIGUES; DEGASPERE; BARBOSA, 2022). Tal desconsideração é feita devido a busca por uma simplificação na análise interativa assim como esquivar de algumas problemáticas variantes da propagação da luz interagindo com um meio material.

A pressão de um gás e seu índice de refração possuem relações de variação de comportamento em determinadas condições. Considerando uma câmara fechada com ar em seu interior, de espessura L , onde a onda luminosa percorre dois caminhos, a ida e a volta, os comprimentos de onda em seu interior são obtidos como $N' = (2L/\lambda')$. Com uma alteração na pressão, N' se torna $N'' = (2L/\lambda'')$. A alteração da pressão significa dizer que o gás estava em uma pressão inicial e variou para uma final.

Tomando o índice de refração para uma dada pressão como a relação dos comprimentos de onda em um meio λ' e no vácuo λ_0 , obtém-se, para uma pressão P' inicial e P'' final, respectivamente,

$$\lambda' = \frac{n'}{\lambda_0} \quad e \quad \lambda'' = \frac{n''}{\lambda_0}.$$

A partir dessas relações, substituindo em N' e N'' , chega-se na equação (28), onde $N'' - N' = \Delta N$. Logo,

$$n' - n'' = \frac{\Delta N \lambda_0}{2L}. \quad (28)$$

Como o índice de refração para o vácuo é 1, ou seja, uma pressão nula é correto afirmar que para baixas pressões o índice de refração possui uma variação de comportamento linear. Assim,

$$n(P) = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta P} P. \quad (29)$$

Logo o gráfico do índice de refração em função da pressão é dado como:

$$\frac{\Delta n}{\Delta P} = \frac{\Delta n \lambda_0}{2L \Delta P}. \quad (30)$$

A partir das relações supracitadas será feita, posteriormente, uma análise das relações entre índice de refração e variação da pressão, estabelecendo as propriedades de propagação da luz em meios gasosos, assim como sua velocidade.

7 INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY

A transição do século XIX para o século XX foi marcada de reviravoltas no campo da física, surgindo muitas teorias, como os avanços da física óptica, a teoria eletromagnética de Maxwell, a teoria ondulatória da luz, o surgimento da física quântica, a relatividade de Einstein e outras que se perpetuam até os dias atuais, trazendo contribuições científicas e tecnológicas.

Uma discussão muito forte na época, logo após o entendimento das ondas eletromagnéticas, era a existência de um meio necessário para que a luz se propagasse, o qual recebeu o nome de Éter Luminífero (OLIVEIRA, 1993). Com a chegada das conhecidas equações de Maxwell, Lima (2019), constatou-se que a luz possuía um comportamento ondulatório, devido a isso deveria possuir um meio de propagação, uma vez que todas as ondas conhecidas necessitariam desse meio.

Caso esse meio de fato existisse ele causaria um movimento aparente em relação ao movimento da Terra (SHANKLAND, 1974). Caso houvesse esse movimento aparente a velocidade da luz deveria ter um retardo quando se propagasse contrariamente ao “vento de éter”. Para entender melhor foi realizado uma análise a partir do caminho da luz (MORLEY; MILLER, 1905).

Com o intuito de analisar essa interação foi criado o interferômetro que hoje é conhecido como Interferômetro de Michelson-Morley (IMM) (MICHELSON; MORLEY, 1887). O experimento consistia em uma fonte de luz que incide sobre um espelho difusor de feixes que reflete parte da luz permitindo a passagem da outra parte. Os feixes secundários refletiam sobre dois espelhos refletores, fazendo com que retornem pelo mesmo caminho e se concentrem em um anteparo, onde são formadas as franjas de interferência.

A luz emitida incide no espelho divisor em $T = 0$, o primeiro espelho está a uma distância L , movendo-se com velocidade v , ao chegar ao espelho temos T_1 e uma distância $T_1 c$ (c é a velocidade da luz no éter). Já o espelho variou a distância em $T_1 v$, logo $T_1 = L + T_1 v$, assim o tempo de viagem é dado como $T_1 = L/(c - v)$, de forma análoga para o segundo espelho se tem $T_2 = L - T_2 v$ e $T_2 = L/(c + v)$. O tempo total será, então,

$$T' = \frac{L}{c - v} + \frac{L}{c + v} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (31)$$

Na direção transversal, Michelson encontrou

$$T' = \frac{2L}{c}. \quad (32)$$

Michelson desconsiderou o aumento do comprimento no quadro de repouso do éter, assim, considerando esse efeito a partir da dilatação do tempo e usando a relação do triângulo de Pitágoras é obtido a correção

$$T'' = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right). \quad (33)$$

Tomando a variação de $T' - T''$, tem-se

$$T' - T'' = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{2c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{2c^2}}} \right). \quad (34)$$

A diferença de caminho será

$$\Delta\lambda' = 2L \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{2c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{2c^2}}} \right). \quad (35)$$

Considerando o termo $v^2/c^2 \ll 1$ vamos ter uma expressão binomial de primeiro grau, dado que nessas condições a velocidade do éter em relação a da luz é muito pequena, logo

$$(1 - x)^n \approx 1 - nx \quad (36)$$

Reescrevendo a equação (35),

$$\Delta\lambda' = 2L \left[\left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (37)$$

Pela simplificação usando a equação (36),

$$\Delta\lambda' = 2L \left[\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) - \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \right] = \frac{Lv^2}{c^2}. \quad (38)$$

Para detectar o éter Michelson e Morley posicionaram o experimento para obtenção da imagem de interferência. Em seguida, variaram o caminho de um dos braços para que a velocidade da luz fosse alterada e observaram o comportamento das interferências de máximos e mínimos. Ao girar o interferômetro em 90° e repetindo o procedimento esperava-se que houvesse uma variação no comportamento da imagem de interferência, no entanto isso não ocorreu, as mudanças foram mínimas, ocasionando no “fracasso” do experimento.

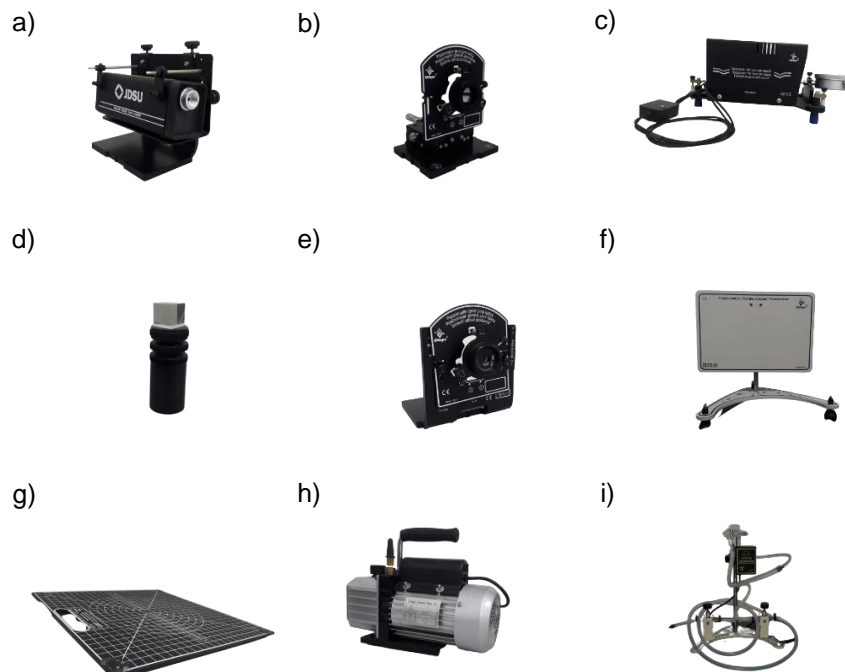
Esperava-se que a variação entre a velocidade da luz, em cada braço do interferômetro, fosse de $0,44c$ e o encontrado foi aproximadamente $0,02c$, constatando a não detecção do vento de éter (MICHELSON; MORLEY, 1887).

8 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, iremos discutir o procedimento experimental adotado para o desenvolvimento deste trabalho. A base para a prática experimental consiste no Interferômetro de Michelson-Morley (IMM), desenvolvido pelo Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa (CIDEPE). Além disso, realizamos pequenas adaptações para alcançar os objetivos traçados.

O aparato experimental utilizado é composto por: uma fonte laser de Hélio-Neônio (HeNe) alimentada por eletricidade; um espelho plano fixo preso a um cavalete; um deslocador térmico elétrico com escala nanométrica e um espelho plano; um cubo divisor de feixes 50 por 50 e uma mesa cilíndrica regulável; uma lente divergente de ampliação 20x; um Anteparo; uma base ótica com escalas; uma bomba de vácuo; e, o Tubo de Geissler com sensor de pressão. Cada item desses está apresentado na Fig. (4).

Figura 4 - a) uma fonte laser de Hélio-Neônio (HeNe) alimentada por eletricidade; b) um espelho plano fixo preso ao cavalete; c) um deslocador térmico elétrico de escala nanométrica e um espelho plano; d) um cubo divisor de feixes 50 por 50 e uma mesa cilíndrica regulável; e) uma lente divergente de ampliação 20x f) um Anteparo; g) uma base ótica com escalas; h) bomba de vácuo 2 Stages Vacuum Pump; i) Tubo de Geissler com sensor de pressão acoplado.



Fonte: autor (2022)

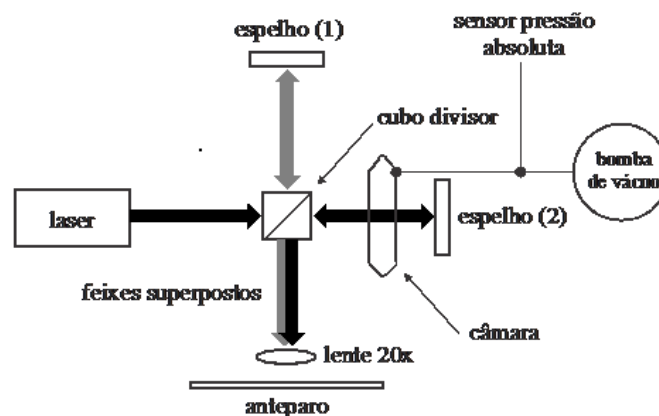
Como nossos objetivos são determinar o índice de refração do ar atmosférico e analisar a relação existente entre a variação do índice de refração pela variação da pressão local, o IMM

da Cidepe, por si só, não pode atender a esses objetivos. Pois, com ele só podemos obter o comprimento de onda do HeNe e a velocidade da luz no meio. Devido a isso, fizemos uma pequena adaptação no experimento utilizando outros materiais, os quais não fazem parte do interferômetro. Os materiais são: uma bomba de vácuo, Fig. (4h), e um Tubo de Geissler (TG) com sensor de pressão, Fig. (4i).

O TG foi utilizado para se comportasse como uma câmara de atividades óticas, que simule vácuo em seu interior. Para retirar o ar do TG, usamos a bomba de vácuo, que permite a retirada de 87% do ar presente. Este pode ser devolvido ao tubo com o auxílio de uma válvula, a qual é regulável. Quanto à variação da pressão interna do TG, medimos por meio de um sensor de pressão e com o auxílio de um software, responsável pela aquisição dos dados. Ainda sobre a bomba de vácuo, o modelo que utilizamos foi o 2 Stages Vacuum Pump, VE215, Fig. (4h).

Montamos o nosso experimento como mostra a Fig. (5). Note que o laser está alinhado com o espelho 2 e o anteparo com o espelho 1, mas ambos os espelhos estão a mesma distância do cubo, que está centralizado. Quando o laser é ligado, o feixe passa pelo cubo divisor, e é dividido em dois. Cada um dos feixes percorre um caminho diferente. Um feixe será refletido para o espelho 1 e ao chegar lá será refletido de volta em direção ao cubo. O outro feixe passará direto em direção ao espelho 2. Porém, antes do espelho 2 colocamos o TG (câmara de vácuo), pelo qual o feixe passa primeiro, bate no espelho e volta a passar por ele novamente em direção ao cubo. Quando os dois feixes chegam ao cubo, o feixe que veio do espelho 1 passa direto em direção ao anteparo e o feixe que veio do espelho 2 é refletido em direção, também, ao anteparo. No anteparo, visualizaremos a formação das franjas de interferência, que, a priori, são diferentes do caso em que a câmara de vácuo não esteja presente no aparato.

Figura 5 – Diagrama esquemático do nosso experimento.



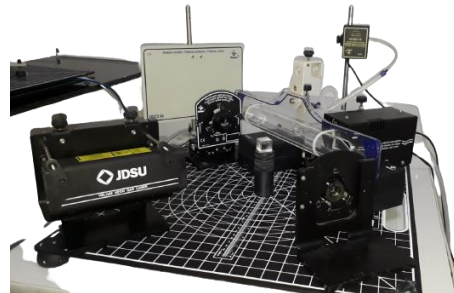
Fonte: Autor (2022)

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

9.1 Determinação do índice de refração

Para coletar os dados, os equipamentos foram posicionados e alinhados o feixe para obter a superposição das ondas divididas pela semi-reflexão, como descrito no capítulo anterior. A Fig. (6) ilustra o posicionamento dos equipamentos como descrito.

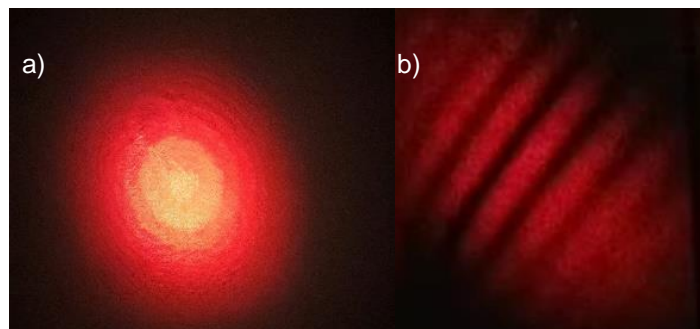
Figura 06 - Montagem das ferramentas experimentais.



Fonte: autor (2022)

Quando alinharmos os feixes, notamos múltiplas reflexões. Essas múltiplas reflexões são resultantes da distribuição do conjunto de espelhos com o cubo divisor. Logo, o ajuste fino do IMM acontece quando todos os feixes refletidos são alinhados em um ponto, tanto sobre os espelhos quanto o anteparo. Pelo princípio da superposição, dois feixes superpostos são suficientes para a inerência de um padrão de interferência, no entanto, para o IMM esse resultado não é o bastante. O alinhamento deve configurar a superposição de todos os feixes luminosos, onde formará, no anteparo, a figura de interferência circular. A Fig. (7) ilustra o alinhamento obtido.

Figura 07 - a) Imagem de interferência do interferômetro; b) Padrão de interferência ajustado.



Fonte: autor (2022)

Após o IMM alinhado, iniciou-se a coleta de dados. Porém, a variação das franjas em um padrão circular não é algo fácil de ser percebido, tão pouco em nosso caso, cuja figura de

interferência obtida possui baixa visibilidade devido a variantes externas que trataremos a frente. Causamos um pequeno desalinhamento no IMM, causando um padrão de franjas perceptível para contagem da variação de máximos e mínimos. O padrão é representado na Fig. (7b).

A contagem da variação de máximos e mínimos da figura de interferência iniciou-se com a vazão do ar para o interior do TG. Apenas 87% do ar presente no interior da câmara é sugado para fora. A impossibilidade de se obter vácuo absoluto faz com isso ocorra. Sua definição pode ser dada a partir do entendimento que o vácuo é um volume de gás cujas as partículas, moléculas ou átomos são inferiores em densidade ou pressão comparado a atmosfera externa em que o recipiente estar envolvido (MARQUADIT, 1999).

O laboratório está localizado na cidade de Araruna, interior da Paraíba, cuja pressão atmosférica é de aproximadamente $96KPa$, ou seja, abaixo de 1 Atm ($101KPa$). O vácuo alcançado no TG foi de $12,5KPa$. As medidas de pressão foram obtidas a partir do sensor de pressão absoluta. A temperatura ambiente durante o experimento, medida pelo sensor de temperatura termopar flexível, possuía variação entre $25^{\circ}C$ e $26^{\circ}C$.

Com a câmara “vazia“, a válvula de vazão do ar foi liberada, permitindo que o gás adentrasse lentamente o seu interior. A vazão para o interior da câmara faz com que as moléculas, partículas e átomos interajam com a onda eletromagnética, alterando o caminho óptico, que causa mudanças na intensidade da franja, fazendo com que se movam.

A variação de $12,5KPa$ a $96KPa$ proporcionou a contagem das franjas em movimento durante o percurso. Foram realizadas 10 medidas para verificar o número de franjas. Para diminuir o erro da contagem, as medidas foram filmadas. Posteriormente, utilizou-se um software de edição para contagem das franjas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 02 - Medidas das variações das franjas.

Medida	Número de Franjas	Medida	Número de Franjas
1	28	6	29
2	29	7	30
3	29	8	28
4	30	9	29
5	29	10	29

Fonte: autor (2022)

Substituindo o número de franjas na equação (24), onde $\lambda_p = 632,8 * 10^{-9}m$ (comprimento de onda no HeNe) e $L = 0,0387m$ (diâmetro interno da câmara de vácuo). Os resultados para n estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 03 - Índice de refração do ar atmosférico para cada número de franja.

Número de Franjas	Índice de Refração	Número de Franjas	Índice de Refração
28	1,00022	29	1,00023
29	1,00023	30	1,00024
29	1,00023	28	1,00022
30	1,00024	29	1,00023
29	1,00023	29	1,00023

Fonte: autor (2022)

A média do índice de refração n do ar atmosférico corresponde a 1,00023 e a variação do número de franjas é de 29. O valor adotado na literatura para o índice de refração do ar considerando condições normais de temperatura e pressão é de 1,00029, Halliday; Resnick; Walker (2009). Os resultados obtidos pelo IMM estão coerentes com o esperado, mostrando uma boa precisão do aparato.

Nota-se que há uma leve discrepância entre os números de franjas deslocadas, os quais não deveriam variar. Porém, havia variação na temperatura enquanto as medidas eram realizadas, afetando a pressão. As vibrações do próprio edifício em que o laboratório está localizado interferem no alinhamento dos feixes causando variações no padrão de interferência. Por fim, o próprio observador, ainda que com o auxílio de software de edição, pode realizar contagem do deslocamentos das franjas de maneira equivocada.

9.2 Índice de refração do ar em função da pressão

Para entender a relação do índice de refração do ar atmosférico em função da sua pressão é necessário apresentar algumas variantes que influenciam em seu comportamento. A pressão do ar muda de acordo com a variação de temperatura e condições geológicas, logo variações no índice de refração são perceptíveis. As variações podem ser analisadas a partir das medidas interferométricas do IMM em conjunto com o sensor de pressão absoluta, conectado ao software que analisa e armazena os dados a cada 0,1s.

O sensor utilizado, embora registre uma pressão mínima de 12,5KPa no interior do TG, sua análise a cada 0,1s é captada a partir do intervalo entre 20KPa e 250KPa, o que implica na não consideração da pressão que varia entre 12,5KPa e 19,9KPa, uma vez que está dentro do intervalo de limitação do equipamento. A captação do número de franjas com a variação da pressão foi realizada a cada 10KPa. Para uma medida precisa da quantidade de máximos e

mínimos deslocados, usou-se um programa de edição de vídeo para recortar a gravação no ponto exato da variação. Adotou-se esse devido a impossibilidade de observar variações de pressão e deslocamento de franjas simultaneamente.

A cada ponto de pressão variado, devido a entrada de ar para o interior da câmara de vácuo, as franjas de interferência movimentam-se respeitando um padrão. As medidas adquiridas durante a realização do experimento são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 04 - Medidas da variação do número de franjas para a variação da pressão ponto a ponto.

Pressão (KPa)	Medidas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
30	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
40	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
50	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
60	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
70	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
80	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
90	27	27	27	28	27	27	28	27	27	27
96	28	29	29	30	29	29	30	28	28	29

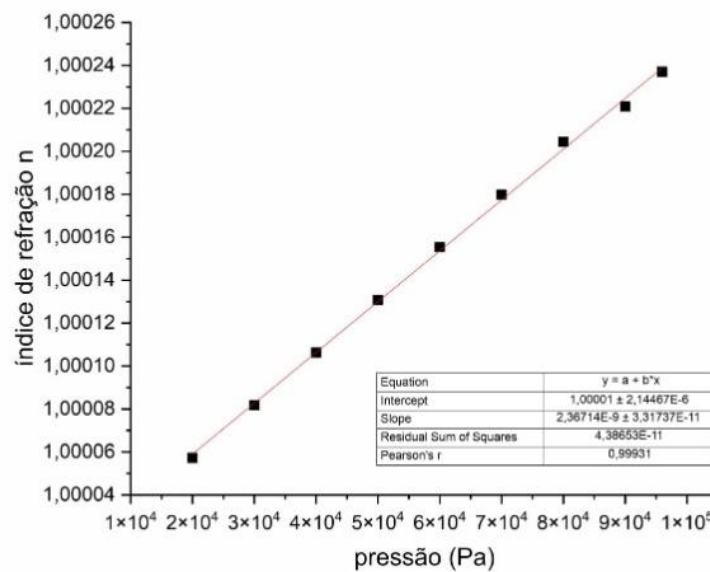
Fonte: autor (2022)

Ao observar as medidas é perceptível que quanto maior for a pressão menor é a variação do número de franjas a cada ponto. No entanto, o comportamento da pressão em relação as franjas variadas é diretamente proporcional, isto é, para altas pressões o deslocamento de máximos e mínimos da figura de interferência aumenta gradativamente.

Com a média do número de franjas deslocadas para cada pressão é possível obter o índice de refração do ar ponto a ponto através da equação (24). Traçando-se um gráfico do índice de refração em função da pressão, com a equação (30), é perceptível a interação da refração do meio e a pressão ocorrendo linearmente.

Ressaltamos, novamente, que o sensor de pressão utilizado nas medições não faz uma varredura precisa abaixo de 20KPa. A Fig. (8) ilustra o comportamento da interação do índice de refração do ar em função da pressão.

Figura 08 - Índice de Refração do ar atmosférico em função da pressão.



Fonte: autor (2022)

Na Fig. (8), $n \times P$ possui um crescimento linear, comprovando que são diretamente proporcional. O índice de refração de um meio é adimensional, portanto não possui um fundamento físico direto. Por outro lado, a justificativa que define a linearidade do gráfico ocorre a partir do comportamento da propagação da luz em meios diferentes.

Vimos que o índice de refração proporciona uma variação na velocidade de propagação da luz ao passar de um meio para outro, fenômeno que explica os resultados obtidos. Antes de retirar o ar do interior da câmara, a composição do meio dentro do TG é igual ao exterior, logo não há uma alteração na velocidade de propagação da luz.

Quando a câmara é esvaziada ocorre uma alteração no meio, por consequência, a velocidade da luz é alterada. A onda luminosa que percorre no espaço fora da câmara de atividades ópticas não sofre alterações na velocidade devido a composição do meio não variar. Ao abrir a válvula o ar começa a preencher o espaço alterando o meio, causando, portanto, um retarde na velocidade de propagação da luz.

A variação do meio dentro da câmara ocorre pois as moléculas de ar que preenchem, lentamente, o volume interno interagem de forma direta com a onda de luz, assim, sua velocidade é retardada, uma vez que há alternância de um meio pouco refringente para um mais refringente. Em um primeiro momento o número de moléculas de ar dentro do TG seria mínimo, logo depois ocorre um aumento gradativo dessas moléculas alterando o comportamento da imagem de interferência.

Dito isto, chegamos a relação estabelecida no gráfico da Fig. (8). Com a alteração da velocidade de propagação da luz, temos um certo número de franjas se deslocando e sabemos que quanto maior for a densidade molecular de um gás, maior será seu índice de refração e, também quanto maior for esse índice o número de franjas deslocadas aumentam. É correto afirmar que ao serem analisadas em pares esses fenômenos são diretamente proporcionais, justificando, assim, a presença de uma linearidade do índice de refração em função da pressão variada.

Com o aumento da quantidade de moléculas, partículas e átomos do ar atmosférico no interior da câmara, o índice de refração intensifica, implicando dizer que com o aumento da pressão o meio em que a luz se propaga se torna mais refringente, diminuindo a velocidade que a onda se propaga.

A partir dos resultados, a eficiência do IMM para a obtenção da medida da refração em gases é assegurada, mostrando-se com uma alta precisão, uma vez que o resultado do índice de refração do ar atmosférico divergiu apenas 0,006% do valor considerado na literatura (Tab. 1). No entanto, o valor, geralmente, apresentado na literatura corresponde a condições normais de temperatura e pressão, ou seja, o ar seco com uma temperatura de 15°C e pressão a 1Atm, o que nitidamente não corresponde as condições climáticas de nossos laboratórios.

Trabalhar com o IMM não é uma tarefa fácil, dado que as vibrações externas interferem constantemente na mesa óptica causando irregularidades no padrão das franjas e nas medidas, toda vibração próxima do laboratório é perceptível para o IMM. Para amenizar o problema, as medidas foram realizadas a noite (poucas pessoas no prédio), o que resultou em um número menor de interferências externas e uma boa visualização dos máximos e mínimos da imagem de interferência.

Um último problema analisado, assim como no trabalho de Leão (2004), diz respeito ao cubo divisor. O IMM utilizado possui um cubo divisor de feixes que permite o retorno de alguns feixes indesejados a fonte de emissão, causando uma realimentação. Esse problema não foi investigado, a priori, devido não estar firmado em nossos objetivos, no entanto, é algo que pode trazer algumas vertentes positivas ou negativas, que venham a influenciar diretamente nas medidas ou alinhamento dos equipamentos.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os avanços tecnológicos proporcionaram a evolução do IMM, antes e após sua época, principalmente depois da chegada dos Lasers, que proporcionaram aparelhos mais precisos e compactos. Com os avanços dos interferômetros a área da interferometria ampliou seus horizontes, tornando-se indispensável em áreas como a medicina, odontologia geologia, comunicações, etc., atuando como auxiliadora em procedimentos e equipamentos, firmando, assim, sua importância.

Neste trabalho buscou-se analisar a eficiência do IMM para obtenção de uma medida precisa do índice de refração do ar atmosférico, bem como entender o seu comportamento em função da variação de sua pressão, constatando-se a precisão do IMM para detecção de mínimas variação da velocidade da luz em um meio de baixa refringência possuindo forte relação com a pressão.

A análise dessa interação é fundamental para superar a ideia disseminada de que o índice de refração, como discutido, não possui um caráter físico. A composição do meio define a sua densidade, a qual possui uma certa refringência, que determina a velocidade de propagação da luz. Assim fica entendido que o índice de refração não é apenas uma componente adimensional, sendo importante para entender a propagação da luz.

Através da prática experimental, aliada ao estudo teórico, foi possível constatar que a pressão, assim como a temperatura, influencia diretamente na refração dos raios luminoso ao se propagarem em um meio gasoso. Sua visualização não é muito perceptível, sendo necessário as técnicas interferométricas para sua detecção. Nosso intuito não se firmou em abordar novas técnicas para obtenção do índice de refração, e sim reproduzir métodos já desenvolvidas, e então verificar sua validade e aprimorando alguns dos procedimento para alcançar nossos objetivos.

Adaptar uma câmara de vácuo para o IMM foi a maior problemática encontrada durante a pesquisa, assim como contornar as vibrações indesejadas, sendo superada a partir do uso do TG suspenso em uma estrutura de madeira. Em relação as vibrações, nos perseguiram até o término da pesquisa, porém após inúmeras medidas em horários estratégicos as interferências foram reduzidas, proporcionando os bons resultados apresentados, permitindo uma ampliação da temática abordando, pela equação dos gass ideias, uma análise detalhada do número de partículas no interior da câmara de vácuo.

REFERÊNCIAS

- COUTO, O. D. D. J. **Aula 03 – Interferência**. Campinas/SP, 2021. 48 slides, color, 25 cm x 20 cm. Disponível em: https://portal.ifi.unicamp.br/images/files/graduacao/aulas-on-line/fisica-geral-iv/Aula_3_Interferencia_disponibilizada.pdf. Acesso em: 04 dez. 2022.
- CORSON, D.; LOEEAIN, P. **Eletromagnetic Filds and Waves**. 2. ed. San Francisco (USA): W. H. Freeman And Company, 1970. Disponível em: <https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1387952>. Acessado em: 10 ago. 2022.
- DIAS, A. A. C.; ANDRADE NETO, A. V.; MILTÃO, M. S. R. A Atmosfera Terrestre: Composição e Estrutura. **Caderno de Física da UEFS**, Feira de Santana/BA, v. 1 e 2, n. 5, p. 20-41, 2007. Disponível em: <http://dfisweb.uefs.br/caderno/vol5n12/Atmosfera.pdf>. Acessado em: 02 dez. 2022.
- FASSARELLA, L. Lei de Snell Generalizada. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo/SP, v. 29, n. 2, p. 215-224, jan. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/wzCcCbdmhJxQfpWzp7SSt4h/?format=pdf>. Acessado em: 01 nov. 2022.
- FACÃO, M. **Interferômetro de Michelson: Princípios e Aplicações**. 1999. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Física, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro/PT, 1999.
- FRAGNITO, H.; COSTA, A. Interferômetro de Michelson-Morley. Instituto de Física. **Gleb Wataghin/Unicamp**, Campinas/SP. mar. 2010. Disponível em: <https://sites.ifi.unicamp.br/laboptica/files/2013/01/michelson1.pdf>. Acessado em: 20 nov. 2022.
- FREITAS, F. C. **Interferometria**. 2011. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/32121/1/2011_tcc_fcfreitas.pdf. Acessado em: 15 nov. 2022.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física: Óptica e Física Moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- JAVAN, A.; BENNETT JR, W. R.; HERRIOTT, D. R. Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture. **Physical Review Letters**, APS, v. 6, n. 3, p. 106, 1961. Disponível em: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.6.106>. Acessado em: 05 dez. 2022.
- JEWETT, J. W. J.; SERWAY, R. A. **Física Para Cientistas e Engenheiros: Luz, Óptica e Física Moderna**. 8. ed. São Paulo/SP: Cengage Learning, 2012.
- LEÃO, J. V. F. **Interferometria Óptica Aplicada à Medição de Amplitudes de Vibração Nanométricas em Piezoatuadores Flexionais**. 2004. 179 f. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha dos Solteiros/SP, 2004. Disponível em:

https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87267/leao_jvf_me_ilha.pdf;jsessionid=78A7D2E3B6AE9B12595E5DA4BCB60C3A?sequence=1. Acessado em: 10 dez. 2022.

LIMA, M. C. Sobre o Surgimento das Equações de Maxwell. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo/SP, v. 41, n. 4, p. 1-18, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/mvghwLG3ZgQchrJxLvCLMhr/?format=pdf>. Acessado em: 07 ago. 2022.

MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. **Nature**, Springer, v. 187, n. 4736, p. 493-494, 1960. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1960Natur.187..493M/abstract>. Acessado em: 01 dez. 2022.

MARTINHO, M. P.; SOARES, V. Determinação do Índice de Refração dos Materiais Pelo Método de Ptolomeu. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo/SP, v. 39, n. 3, p. 1-9, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/WFjYtWgnqDmpp8K7ntt7dGs/> Acessado em: 10 set. 2022.

MARQUADIT, N. Introduction to the Principles of Vacuum Physics. **Institute for Accelerator Physics and Synchrotron Radiation**, University of Dortmund, Dortmund (DE), p. 1-24. 1999.

MAXWELL, J. C. **A Treatise on Electricity & Magnetism**. 3ª ed. Alterada da 3ª edição de 1891. New Yourk (USA): Dove Publications, v. 1 e 2, 1954.

MICHELSON, A. A.; MORLEY, E. W. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. **The American Journal of Science**. 3th series, v. XXXIV, n. 203, p. 333-345, November, 1887. Disponível em: <https://history.aip.org/exhibits/gap/PDF/michelson.pdf>. Acessado em: 01 jun. 2022.

MORIZOT, O. et al. A Modern Fizeau Experiment for Education and Outreach Purposes. **European Journal of Physics**, European Physical Society, v. 1, p. 1-10, nov. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230975904_A_modern_Fizeau_experiment_for_education_and_outreach_purposes. Acessado em: 15 ago. 2022.

MORLEY, E. W.; MILLER, D. C. Relatório de um Experimento para Determinar o Efeito Fitzgerald-Lorentz. **Anais da Academia Americana de Arte e Ciências**, v. XLI (12), n. 321-8. 1905.

OLIVEIRA, L. S. **Refração e Reflexão Interna Total da Luz: Um Experimento Engajador Para o Ensino Médio**. 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Física – MNPEF, Departamento de Física, Universidade Federal do ABC, Santo André/SP, fev. 2020. Disponível em: https://propg.ufabc.edu.br/mnpef/Dissert_Defendidas/2020/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20MNPEF%20-%20Leandro%20Silva%20de%20Oliveira%20-%20Vers%C3%A3o%20Final%201.pdf. Acessado em: 15 out. 2022.

OLIVEIRA, M. P. O éter luminoso como espaço absoluto. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas/SP, v. 3, n. ½, p. 163-182, 1993. Disponível em: https://sites.usp.br/nupic/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/Pietrocola_O_ETER_LUMINOSO_COMO_ESPACO_ABSOLUTO.pdf. Acessado em: 12 jul 2022.

RODRIGUES, T. G.; DEGASPERE, F. G.; BARBOSA, E. A. Medição Interferométrica do Índice de Refração de Gases. **Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI**, 12. São Bernardo dos Campos/SP: Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2022.

SANTOS, P. J. S. J. **Triângulos Órticos e Interferômetros**: Uma Abordagem Interdisciplinar. 2013. 43 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Matemática – PROFMAT, Departamento de Matemática, Universidade Federal do Pernambuco, Recife/PE, 2013.

SERWAY, A. R.; JEWETT, J. W. J. **Princípios de Física**: Oscilações, Ondas e Termodinâmica. 5. ed. São Paulo/SP: Cengage Learning, 2014.

SIEGMAN, A. E. Lasers. **University Science Books**, Mill Valley (USA), v. 37, n. 208, p. 169, 1986. Disponível em: [https://www.scirp.org/\(S\(vtj3fa45qm1ean45%20vvffcz55\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2183197](https://www.scirp.org/(S(vtj3fa45qm1ean45%20vvffcz55))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2183197) Acessado em: 30 nov. 2022.

SHANKLAND, R. S. Michelson and his Interferometer. **Physics Today**, v. 27, n. 4, p. 37-43, April, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.3128534> Acessado em: 28 ago. 2022.

_____. SILVA, A. C. **Início de uma Nova Ótica**: Localização da Luz com Desenvolvimento de Simulações Numéricas. 2020. 32 f. TCC (Graduação) – Curso de Física, Departamento de Física, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna/PB, 2020. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/22771/1/PDF%20-%20Acon%20Clementino%20da%20Silva.pdf>. Acessado em: 09 nov. 2022.

_____. SZPUNAR, M.; LIGO. Caltech. 2016. Disponível em: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-detectors>. Acessado em: 10 dez. 2022.