



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ  
CAMPUS SÃO RAIMUNDO NONATO  
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA**

**ADRIANO DIAS FERREIRA DE CASTRO**

**INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY COM ARDUINO: UMA  
PROPOSTA PARA O ENSINO DE ÓTICA**

**SÃO RAIMUNDO NONATO**

**2025**

ADRIANO DIAS FERREIRA DE CASTRO

INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY COM ARDUINO: UMA PROPOSTA  
PARA O ENSINO DE ÓTICA

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)  
apresentado como exigência parcial para obtenção do  
diploma do Curso de Licenciatura em Física do Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí,  
Campus São Raimundo Nonato.

Orientador (a): Prof. Dr. Rafael de Alencar Rocha.

SÃO RAIMUNDO NONATO

2025

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**

---

Castro, Adriano Dias Ferreira de  
C355i Interferômetro de Michelson-Morley com arduino : uma proposta para o ensino de ótica / Adriano Dias Ferreira de Castro. - 2025.  
114 p.: il. color.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus São Raimundo Nonato, 2025.  
Orientador : Prof Dr. Rafael de Alencar Rocha.  
1. experimentação. 2. interferômetro de Michelson-Morley. 3. arduino. 4. sequência didática. I. Título.

CDD - 530

---

**Elaborado por Uliscley Silva Gomes CRB 15/938**

ADRIANO DIAS FERREIRA DE CASTRO

INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY COM ARDUINO: UMA PROPOSTA  
PARA O ENSINO ÓTICA

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)  
apresentado como exigência parcial para obtenção do  
diploma do Curso de Licenciatura em Física do Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí,  
Campus São Raimundo Nonato.

Aprovado em: 10/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Rafael de Alencar Rocha. (Orientador)  
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

---

Prof. Esp. Aline Simões dos Santos  
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

---

Prof. Esp. Ricardo Valério de Oliveira  
Instituição Instituto Federal do Piauí (IFPI)

À minha mãe, Andrea, minha heroína —  
inspiração em todo seu e meu caminho.

À minha avó, Maria, sumo que nutre meu peito e  
alma.

À Brulina Ventura, luz véspera — que, mesmo  
distante, reavive o calor de dias melhores me  
mim.

Às mulheres que permeiam os meus passos e a  
minha pessoa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, Andrea, que não apenas pavimentou o caminho em minha trajetória de vida com seu suor e lágrimas, mas me concedeu a certeza de um amor incondicional em qualquer destino.

Agradeço a minha avó, Maria das Graças, por todo o aconchego e o cafuné tímido, pelo ensinamento através de suas ações e a oportunidade da descoberta do valor do carinho em tudo que tocamos.

Agradeço ao meu irmão, Alexandre, parceiro de procrastinação, por ser o amigo que não se contenta com uma única gargalhada ou partida, não importando hora ou dia.

Agradeço a Braulina Ventura, por toda ânsia de ser que trouxe a mim, almejo não só tua força, mas a coragem que reside em cada palavra sua, meu orgulho de carregar uma parte sua comigo.

Agradeço aos meus companheiros noturnos e de escrita, meus gatos, que sufocaram não apenas toda a paz presente na madrugada, como também, a ansiedade presente nela.

Agradeço ao IFPI do Campus São Raimundo Nonato, por quase 9 anos de acolhimento, pela segunda morada e a todos os servidores e funcionários, que o mantiveram de pé sob sol ou chuva.

Agradeço a todo o quadro de professores, pelos aprendizados acadêmicos e para vida. Cito aqui em especial a professora Mauryleia Marques, por perceber em mim potencial que eu desconhecia e todo o incentivo. A professora Aline Simões, por todo o apoio inquestionado, direcionamentos e exemplo profissional e pessoal. O professor Antonius Ribeirus, por toda sua disposição e suporte, mesmo que nos horários de maior inconveniência. O professor Ronan Viana, pela oportunidade e a paciência em meu primeiro contato com a pesquisa em física. E o Professor Rafael de Alencar, meu orientador e também colega de projetos.

Por fim, agradeço a cada um de meus colegas, que seguiram junto a mim e afloraram em mim um profissional e uma pessoa melhor. Deixo meu obrigado a Panelinha, ao tempo que mesmo corrido, foi preenchido com conhecimento, risadas, fofocas, brigas, dominó e o bastante para uma outra monografia, não posso dizer que eu mudaria algo, foi assim porque tinha que ser.

Meu fado é de não entender quase tudo.

Sobre o nada eu tenho profundidades.

— Manoel de Barros

## RESUMO

A experimentação para o ensino de física destaca-se como metodologia, ilustrando fenômenos físicos e aproximando o discente da atividade científica. O trabalho em questão se estrutura na elaboração de um produto educacional, direcionado a docentes e licenciandos em física, abordando o desenvolvimento de ferramentas educacionais para o ensino da Ótica. Constituindo-se em primeira instância, por um equipamento redesenhado à automação eletrônica, o interferômetro de Michelson-Morley, um instrumento utilizado para mensurar o comprimento de onda de feixes de luz monocromática. Com o uso da plataforma de prototipagem Arduino e de um motor de passo, visa-se a precisão em ajustes finos, unido a materiais de custo acessível relativo a interferômetros laboratoriais. O outro componente deste produto, diz respeito a uma sequência didática de postura interdisciplinar. Contemplando a partir do interferômetro automatizado, os âmbitos teórico, experimentais e históricos, observada a relevância deste experimento para Ótica e Física Moderna. Os resultados obtidos para o interferômetro automatizado, evidenciam sua acurácia com intervalo de proximidade a valores teóricos. A junção do interferômetro automatizado à sequência didática, demonstra aptidão a um processo de ensino-aprendizagem significativo, associando os conteúdos específicos da interferometria e a formação integral discente.

**Palavras-chave:** experimentação; interferômetro de Michelson-Morley; arduino; sequência didática; Ótica.



## ABSTRACT

Experimentation in physics education stands out as an effective methodology, as it illustrates physical phenomena and brings students closer to scientific practice. This work is centered on the development of an educational product aimed at physics teachers and undergraduate students, focusing on the creation of teaching tools for Optics instruction. The first component involves the redesign of a Michelson-Morley interferometer for electronic automation—an instrument traditionally used to measure the wavelength of monochromatic light. By employing the Arduino prototyping platform and a stepper motor, the project aims to achieve high-precision fine adjustments, while utilizing cost-effective materials suitable for educational laboratory interferometers. The second component of the product consists of a didactic sequence with an interdisciplinary approach. By addressing the theoretical, experimental, and historical dimensions of the automated interferometer, the pedagogical value of this experiment in the contexts of Optics and Modern Physics becomes evident. The results obtained from the automated interferometer demonstrate measurement accuracy within a range close to theoretical values. The integration of this automated apparatus with the accompanying teaching sequence supports a meaningful teaching-learning process, linking the specific content of interferometry with the comprehensive education of students.

**Keywords:** experimentation; Michelson-Morley interferometer; arduino; teaching sequence; Optics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Folha em um lago com ondas. ....                                                  | 23 |
| Figura 2 – Onda eletromagnética e os campos elétrico ( $E$ ) e magnético ( $B$ ). ....       | 24 |
| Figura 3 – Espectro eletromagnético. ....                                                    | 24 |
| Figura 4 – Referenciais $S'$ e $S$ sobrepostos no instante $t=0$ . ....                      | 25 |
| Figura 5 – Referenciais $S'$ e $S$ separados, com $S'$ se movendo com velocidade $V$ . ....  | 26 |
| Figura 6 – Gráfico da função cosseno. ....                                                   | 27 |
| Figura 7 – Gráfico da função cosseno para diferentes constantes de fase. ....                | 30 |
| Figura 8 – Frentes de onda para uma onda harmônica de amplitude $A$ . ....                   | 30 |
| Figura 9 – Sobreposição de ondas com diferentes fases. ....                                  | 32 |
| Figura 10 – Experimento de dupla fenda de Thomas Young. ....                                 | 33 |
| Figura 11 – Valor médio temporal da intensidade luminosa. ....                               | 34 |
| Figura 12 – Montagem do interferômetro de Michelson-Morley. ....                             | 36 |
| Figura 13 – Padrões de interferência obtidos para o interferômetro de Michelson-Morley. .... | 37 |
| Figura 14 – Configuração ótica geométrica do interferômetro de Michelson-Morley. ....        | 37 |
| Figura 15 – Formação dos padrões de interferência. ....                                      | 38 |
| Figura 16 – Velocidade relativa da luz. ....                                                 | 41 |
| Figura 17 – Interferômetro de 1881 produzido por Michelson. ....                             | 42 |
| Figura 18 – Desvio encontrado por Michelson. ....                                            | 43 |
| Figura 19 – Interferômetro de 1887 produzido por Michelson e Morley. ....                    | 44 |
| Figura 20 – Placa Arduino Uno. ....                                                          | 45 |
| Figura 21 – Representação esquemática do interferômetro automatizado. ....                   | 48 |
| Figura 22 – Lanterna LASER diodo vermelha. ....                                              | 48 |
| Figura 23 – Apresentador multimídia com ponteira LASER vermelha. ....                        | 49 |
| Figura 24 – Feixes de luz divergidos após o ponto focal ( $f$ ) de uma lente biconvexa. .... | 49 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 – Lente biconvexa com suporte.....                                           | 50 |
| Figura 26 – I) Percurso tomado pela luz incidente no espelho móvel.....                | 51 |
| Figura 27 – Prisma divisor de feixes com suporte.....                                  | 51 |
| Figura 28 – Reflexão primária (vidro) e secundária (camada reflexiva) no espelho. .... | 52 |
| Figura 29 – Disco reflexivo com suporte. ....                                          | 53 |
| Figura 30 – Inclinação no suporte do espelho .....                                     | 53 |
| Figura 31 – Espelho móvel.....                                                         | 54 |
| Figura 32 – Driver de micropasso. ....                                                 | 55 |
| Figura 33 – Lista de comandos exibida no monitor serial do <i>Arduino IDE</i> . ....   | 55 |
| Figura 34 – Comando de deslocamento e seu valor atribuído na porta serial. ....        | 56 |
| Figura 35 – Base de MDF para os componentes óticos. ....                               | 56 |
| Figura 36 – Base de MDF para o trilho do espelho móvel.....                            | 57 |
| Figura 37 – Acolchoamento das bases do interferômetro. ....                            | 57 |
| Figura 38 – Arruelas de EVA para parafusos fixadores.....                              | 58 |
| Figura 39 – Interferômetro automatizado montado.....                                   | 58 |
| Figura 40 – Centralização do feixe incidente no espelho fixo. ....                     | 59 |
| Figura 41 – Centralização do feixe refletido na origem da fonte. ....                  | 59 |
| Figura 42 – Adição e centralização do prisma divisor de feixes. ....                   | 59 |
| Figura 43 – Sobreposição dos feixes refletido e transmitido no anteparo.....           | 60 |
| Figura 44 – Centralização e ajuste da lente. ....                                      | 60 |
| Figura 45 – Centralização e ajuste das franjas. ....                                   | 60 |
| Figura 46 – Deslocamento das franjas de interferência.....                             | 63 |
| Figura 47 – Compensadores de altura para o trilho.....                                 | 72 |
| Figura 48 – Sistema fuso trapezoidal e motor. ....                                     | 73 |
| Figura 49 – Eixo linear. ....                                                          | 73 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 50 – Correções de folgas do trilho. ....                           | 74 |
| Figura 51 – Diagrama do esquema elétrico do trilho do espelho móvel. .... | 75 |
| Figura 52 – Ligação driver-motor. ....                                    | 76 |
| Figura 53 – Ligação Arduino-Driver.....                                   | 77 |
| Figura 54 – Posição dos <i>switches</i> do driver.....                    | 77 |
| Figura 55 – Gerenciamento de bibliotecas do <i>Arduino IDE</i> . ....     | 78 |
| Figura 56 – Pesquisa e instalação da biblioteca <i>Accelstepper</i> ..... | 78 |
| Figura 57 – Escolha da placa Arduino UNO.....                             | 78 |
| Figura 58 – Escolha da porta COM.....                                     | 79 |
| Figura 59 – Executando o monitor serial para início de medidas. ....      | 79 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Medidas obtidas ao deslocar o espelho móvel em cem passos.....                    | 63 |
| Tabela 2 – Médias aritméticas do deslocamento do espelho e da constante de deslocamento..... | 63 |
| Tabela 3 – Desvio padrão das medidas. ....                                                   | 64 |
| Tabela 4 – Incertezas referentes à $k$ . ....                                                | 64 |
| Tabela 5 – Valor encontrado para $e$ relativo ao deslocamento teórico de $k$ .....           | 64 |
| Tabela 6 – Medidas obtidas ao contar-se cinquenta franjas. ....                              | 65 |
| Tabela 7 – Valor encontrado para o comprimento de onda da ponteira LASER .....               | 65 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

BNCC Base Nacional Comum Curricular

DCNs Diretrizes Curriculares Nacionais

CIDEPE Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa

HeNe Hélio-Neônio

IDE Integrated Development Environment

LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

USB Universal Serial Bus

## SUMÁRIO

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                           | <b>16</b> |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                                  | <b>19</b> |
| 2.1 EXPERIMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA .....                                    | 19        |
| 2.2 A SEQUÊNCIA DIDÁTICA .....                                                      | 21        |
| 2.3 INTERFERÊNCIA DA LUZ E A ANÁLISE DO INTERFERÔMETRO DE<br>MICHELSON-MORLEY ..... | 23        |
| 2.3.1 Ondas .....                                                                   | 23        |
| 2.3.2 Ondas harmônicas .....                                                        | 25        |
| 2.3.3 Princípio da Superposição de Ondas Unidimensionais .....                      | 30        |
| 2.3.4 Interferência de ondas eletromagnéticas.....                                  | 32        |
| 2.4.5 Análise do Interferômetro de Michelson-Morley .....                           | 35        |
| 2.4 O INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY E O ÉTER DE FRESNEL .....                  | 40        |
| 2.5 MICROCONTROLADOR ARDUINO .....                                                  | 45        |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>                                                           | <b>47</b> |
| 3.1 INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY AUTOMATIZADO.....                            | 47        |
| 3.1.1 Mecanismo de funcionamento e componentes.....                                 | 47        |
| 3.2 CONSTRUÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA .....                                          | 61        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                              | <b>62</b> |
| 4.1 MENSURANDO A INCERTEZA ASSOCIADA AO DESLOCAMENTO DO ESPELHO<br>MÓVEL .....      | 62        |
| 4.2 MEDIDA DO COMPRIMENTO DE ONDA DA LUZ .....                                      | 65        |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                                  | <b>67</b> |

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                             | <b>68</b>  |
| <b>APÊNDICE A – MONTAGEM E COMPONENTES ESPECÍFICOS.....</b>                          | <b>71</b>  |
| <b>APÊNDICE B – CÓDIGO DO TRILHO DO ESPELHO MÓVEL.....</b>                           | <b>85</b>  |
| <b>APÊNDICE C – SEQUÊNCIA DIDÁTICA .....</b>                                         | <b>96</b>  |
| <b>APÊNDICE D – RELATIVE MOTION OF THE EARTH AND THE ETHER<br/>LUMINIFEROUS.....</b> | <b>97</b>  |
| <b>APÊNDICE E – ROTEIRO DA ATIVIDADE LABORATORIAL .....</b>                          | <b>111</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a Física no Brasil, enquanto ciência, adquiriu alta notoriedade, consolidando-se como referência em estudos, pesquisas e produções no ramo acadêmico. Em contrapartida, o atual ensino de física enfrenta recorrentes desafios, como a aprendizagem por repetição, a hipervalorização do formalismo matemático e a descontextualização do conhecimento. Deste modo, qualificando o processo de ensino-aprendizagem, como puramente mecanicista e unilateral, centralizado na figura do professor, que detém todo o saber, o qual não se relaciona com o mundo externo à sala de aula (Moreira, 2021).

Ocasionados amplamente pela dissociação entre a Física como prática científica e escolar, tais obstáculos, por muitas das vezes, atuam como desestimulantes ao discente. Fomentando uma perspectiva distorcida, de teor exclusivamente técnico e transformando a disposição natural a aprender, em aversão (Batista, 2004). Desenvolvendo indivíduos de perfil acrítico e desnorteado em relação à Ciência, consequentemente, erguendo maiores barreiras ao seu acesso, caracterizando um ciclo que se perpétua, caso não haja a devida intervenção (Delizoicov; Angotti; Pernambuco, 2002).

Dentre as mais diversas abordagens, que se propõem a mitigar essas disfunções, a utilização de experimentos para o ensino ocupa posição de enfoque, por sua flexibilidade e a possibilidade de integração entre os mais diversos campos da Física. A experimentação apresenta-se como competência obrigatória no currículo do licenciado em Física previstas pelas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs), nas disciplinas de laboratório e como fator primordial do trabalho científico e sua construção (Wesendonk, 2016). Carvalho e Gil-Pérez (2011) pontuam a importância do experimento para educação, como não apenas para a análise de dados e grandezas, mas um momento de confronto cognoscitivo e a reestruturação do conhecimento. Expondo-se como facilitador para o elo de ligação entre teoria e realidade, como também, aluno e a Física, propiciando-a significado por meio da materialização de fenômenos e conceitos, tal como, evidenciando sua aplicabilidade tecnológica na sociedade.

Contudo, a utilização de experimentos encontra empecilhos à sua aplicação, por custos elevados ou dificuldade de aquisição, problemas alavancados com o aumento da complexidade e rigor técnico de cada material. A construção de instrumentos para a experimentação se encontra como alternativa viabilizadora, aproximando-se aos resultados e benefícios didáticos, presentes em práticas com materiais de fornecedores especializados (Siqueira; Bedin; Lima, 2023). Recebendo ampla força com o avanço computacional e popularização tecnológica, possibilitando a incorporação de sensores, microcontroladores e a modelagem de fenômenos.

Os computadores adquirem desta forma papel de importância para o ensino, não apenas como ferramentas didáticas, mas como instrumentos auxiliares na construção de laboratórios, com uma alta gama de aplicações, simplificando e otimizando a réplica de equipamentos (Martinazzo et al, 2014). A elaboração de experimentos, apesar de necessária, pela variedade de contextos socioeconômicos, não é uma aptidão natural ou habitualmente desenvolvida na formação do professor de física, apesar de sua significância ao ensino.

Logo, o seguinte trabalho tem por finalidade elaborar um produto educacional. Constituído de um interferômetro do tipo Michelson-Morely automatizado com Arduino, para ajustes finos, em junção a uma sequência didática interdisciplinar, como instrumentos didáticos potencializadores, direcionados ao ensino de Ótica ondulatória e o fenômeno de interferência da luz, a nível superior e médio. Possuindo como objetivos específicos:

- Desenvolver um protótipo de interferômetro de Michelson-Morley automatizado, utilizando o microcontrolador Arduino, visando acessibilidade e controle de precisão;
- Avaliar o deslocamento obtido pelo espelho móvel, utilizando como referência uma lanterna LASER laboratorial de comprimento de onda conhecido, estimando sua acurácia;
- Mensurar o comprimento de onda de um LASER de comprimento desconhecido, através da análise dos padrões de interferência e de deslocamentos das franjas geradas no anteparo;
- Registrar o processo de desenvolvimento do interferômetro, catalogando materiais utilizados e apresentando diagramas, orientações de montagem e métodos de alinhamento, viabilizando sua reprodução;
- Produzir uma sequência didática que contemple os conhecimentos de interferometria, associando-os em atividades experimentais e ao resgate histórico de sua aplicação na superação da hipótese do éter luminífero de Fresnel.

Este trabalho se organiza em capítulos, onde inicialmente, é direcionado à exposição do referencial teórico, apresentando a relevância do uso de experimentos e de sequências didáticas no ensino de física. Em seguida, ocorrerá a contextualização e o levantamento de implicações do interferômetro produzido por A. Michelson e E. Morley para Ótica. Posteriormente, um apanhado conceitual de ondas harmônicas, superposição e interferência de ondas eletromagnéticas e a análise do Interferômetro de Michelson-Morley. Logo após, a apresentação dos microcontroladores Arduino.

A seguir, será realizada a discussão acerca da metodologia de pesquisa, descrevendo o

desenvolvimento do interferômetro automatizado através dos procedimentos de montagem, com esquemas dos componentes físicos e eletrônicos. Detalhando o código da parte lógica do equipamento, o sua função e seu controle operacional via software. Será apresentado o funcionamento do instrumento construído, com seu processo de alinhamento, controle de ambiente e coleta de dados. Na sequência, discutiremos o planejamento da sequência didática, como seus objetivos, momentos, atividades e métodos de avaliação.

Por fim, analisaremos os resultados obtidos, por meio da estatística, definindo erro e precisão associados ao protótipo elaborado. Comparando-o aos valores teóricos esperados, discutindo possíveis flutuações nos resultados obtidos e fatores impactantes. As considerações finais, descreverão em um panorama geral a estrutura desta pesquisa, levantando suas contribuições, a sua relevância como produto educacional e aplicabilidade em salas de aula e laboratórios estudantis.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico constitui a estrutura que fundamenta esta pesquisa, reunindo a teoria e estudos primordiais para síntese do problema investigado. Esta seção, apresenta a base teórica utilizada, expondo-a de maneira crítica e a contextualizando na temática deste trabalho. Embasando sua metodologia empregada e norteando reflexões e conclusões.

### 2.1 EXPERIMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA

A Física enquanto ciência da natureza, fundamenta-se em um extenso e permanente processo de construção de saberes, orientados a compreender a dinâmica da natureza e seus fenômenos, tal como, sua aplicação em novas tecnologias. Enquanto, O ensino de física, de acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), possui como objetivo a formação de indivíduos letrados e alfabetizados cientificamente, capazes de exercer plena cidadania em uma sociedade estruturada pelo avanço científico (Brasil, 2018).

Nesta perspectiva, a experimentação se caracteriza como elemento essencial, quer seja, à atividade científica, ou em âmbito educacional, como material curricular significante. Hoffman (2017), aponta a indispensabilidade do emprego de experimentos para o ensino de física como metodologia alternativa ou complementar às aulas tradicionais expositivas.

No ensino da Física essa complementaridade é essencial para uma aprendizagem significativa dos conteúdos físicos. Mas, na prática, esse ensino é conduzido sem atividades experimentais, segue o modelo expositivo no qual o professor “dá a matéria” para os alunos anotarem em seus cadernos ou fotografarem com seus celulares. (Moreira, 2021, p. 3)

O caráter exclusivamente teórico e matemático, devido à alta abstração, frequentemente ocasiona na segregação entre aluno e objeto de estudo, resultando em obstáculos para assimilação e a sua percepção para além da instituição educacional. As atividades experimentais, como instrumento para demonstração, atuam de maneira a propiciar o contato entre teoria e prática, por meio da verificação de leis ou fenômenos físicos, podendo vir promover a incorporação de ferramentas matemáticas, por meio de análises quantitativas. Ainda, significando o momento de sala de aula, ilustrando e materializando conceitos científicos. Embora seja um potencial benéfico, tal metodologia pode reproduzir uma visão de inflexibilidade e indutividade à Física. Atuando como atividade de mera reprodução, com roteiros limitantes, negligenciando conhecimentos prévios e aprendizagem para além da aquisição dados, ocasionando resultados contrários à sua premissa inicial (Fonseca; Soares,

2017).

Carvalho e Gil-Pérez (2011, p.46), destacam a experimentação investigativa, metodologia na qual o aluno detém papel ativo em seu decorrer, estratégia que dispõem da capacidade de desencadear “conflitos cognoscitivos e conduzir a formulação de novas hipóteses que levem a (re)construção das concepções científicas”. Onde o professor, assume a atribuição de mediador, ofertando situações que ofereçam aos discentes “problemas” experimentais em aberto, comparações entre resultados da literatura e obtidos em laboratório, atividades que incentivem o desenvolvimento de um método científico pessoal. A observação, o questionamento e a proposição dos discentes constituem-se como procedimentos fundamentais e não lineares na superação desses cenários, que utilizam conhecimentos previamente adquiridos, incumbindo ao docente guiá-los e conceder ferramentas para sua ocorrência. Dessa forma, os alunos constroem hipóteses, a partir do confronto e da aquisição de novos conhecimentos, oriundos da necessidade da reformulação de suas resoluções iniciais para com as situações-problema (Carvalho; Gil-Pérez, 2011).

Entretanto, diversos autores apontam que tais atividades necessitam, ainda, da integração entre Ciência, Sociedade e Tecnologia, campos que promovem a evolução científica. A experiência rompe com um simples papel de instrumento de validação, tornando-se meio para edificação desse elo (Solbes; Vilches, 1989; Krasilchik, 1987; Cobb *et al.*, 1991 *apud* Carvalho; Gil-Pérez, 2011, p.47).

[...] o ensino escolar, com frequência, banaliza os procedimentos de aquisição do conhecimento assim como os próprios conhecimentos selecionados para serem tratados. Os primeiros porque no ensino das ciências muito pouco é trabalhado com referência a processo, em relação à investigação com vistas a fazer com que os estudantes percebam as características e procedimentos da pesquisa científica. Em relação aos conhecimentos, em geral, são recortados, fragmentados, descontextualizados, tanto do mundo da vida como do seu próprio processo de constituição pela via da ciência e da história (RAMOS, 2008, p. 31).

O modelo de sala de aula de conhecimentos ilhados, perpetua a concepção da Física dissociada em eixos que não se correlacionam, delimitando conhecimentos e desvincilhando-se de sua natureza social. Consequentemente, caracterizando-a em uma visão simplista como impassível de erros, estática, ou mesmo, arbitrária. Seguindo contra a vertente do ensino de ciências para qualificação de cidadãos críticos, capazes de compreender contextos histórico-sociais e aplicar conhecimentos científicos no meio coletivo (Borba; Lima, 2024).

A valorização do processo para o ensino de física, associa os benefícios de ensino-aprendizagem contidos em cada perspectiva, seja a experiência, a história ou filosofia da física, oferecendo organicidade a estas, superando idealizações de neutralidade e inumanidade (Silva;

Zanon, 2000). Ainda, segundo Costa (2019):

A Experimentação, a História e Filosofia da Ciência são reconhecidas como abordagens que podem promover motivação e desafios e com isso aprimorar o ensino e aprendizagem de ciências, especialmente na Física. Partindo de pressupostos diferentes, ambas abordagens têm o mesmo objetivo: tornar as aulas de ciências em ambientes que possibilitem a aprendizagem de forma não mecânica, promovendo a argumentação e participação dos alunos (p. 39-40).

Segundo o autor, o resgate de métodos e seus fundamentos destacam aplicações, motivações e a constante reestruturação da Física, a situando no espaço-tempo. Destacando a postura do trabalho científico diante de impasses, da validação de teorias e a mudança derivada de sua aceitação. A historicidade pode atuar como recurso didático, onde, identificar obstáculos epistemológicos enfrentados na construção de conceitos, disponibiliza ao docente a previsão e a oportunidade de preparo, para lidar com possíveis dificuldades que serão vivenciadas por seus alunos (Carvalho; Gil-Pérez, 2011).

## 2.2 A SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Toda e qualquer prática profissional, se estrutura em procedimentos direcionados a lidar com determinado caso, sejam estes a análise inicial, construção de métodos de intervenção, tomada de decisão e avaliação de resultados. Analogamente, a atividade docente tem seu início mesmo antes de adentrar à sala de aula, articulando competências e particularidades dos mais diversos níveis de complexidade.

Desta maneira, a sequência didática se objetiva em organizar e alinhar cada componente essencial em uma ação pedagógica, vinculando-os em uma única unidade dotada de sentido, que busca ser efetiva ao ambiente a qual foi direcionada (Silva; Oliveira, 2009). Possuindo a capacidade de enfatizar as características de cada etapa e como estas se relacionam a fase de ensino-aprendizagem, evidenciando sua necessidade ou carências a serem sanadas (Zabala, 1998).

Para Zabala (1998, p.21), uma atividade pedagógica deve ser antecedida por questões norteadoras, como “Para que educar?” e “Para que ensinar?”, uma vez que, a sua justificativa parte de um intuito bem definido, da motivação oriunda de um objetivo educacional, sendo este origem e orientador.

O desenvolvimento de uma sequência didática arranja-se em um total de três fases fundamentais: Planejamento, aplicação e avaliação. O planejamento, alinha-se a fase de direcionamento, com a seleção do tema, coordenação e sistematização de conteúdos, definindo sua interação com o discente, e por qual meio se dará, o método avaliativo a ser utilizado e a

delimitação do tempo para cada etapa (Siqueira, 2022). Ademais, destacam-se as relações professor-aluno e aluno-aluno, variáveis de influência direta à aprendizagem, não devendo ser desprezadas, pela significância na construção do conhecimento emergida da troca de conhecimentos e da interação social, (Zabala, 1998).

Posteriormente, a fase de aplicação ocorre de maneira ordenada e sequencial, orientada pelo planejamento prévio. Portanto, o docente assume a postura de mediador, almejando a conclusão de cada sub-etapa, contudo, flexível na ocorrência de impasses e situações adversas, reconhecendo sua relevância e da contribuição advinda do próprio aluno. Neste momento, o professor apresenta o conteúdo ou a atividade, situando o discente, de modo que, aparenta estar ao seu alcance, o motivando a participar deste momento. Paralelamente é feita aquisição de dados qualitativos de maneira indireta, através da observação atitudinal e comportamental dos discentes durante as atividades ocorridas, pelo professor (Siqueira, 2022).

A avaliação, fase final de uma sequência didática, propõe a aplicação do instrumento ou método avaliador selecionado previamente na etapa de planejamento. Na qual, o docente sintetiza e qualifica o processo de ensino-aprendizagem individual e geral de uma turma, não limitado puramente por resultados quantitativos de uma última etapa. O professor ou equipe de intervenção, igualmente, atuam como sujeito da avaliação, a partir desta análise é possível reestruturar atividades, etapas ou objetivos, de modo a suprir lacunas ou ainda a repensar a prática docente, possuindo esta, uma formação contínua e perpétua (Zabala, 1998).

Cada etapa de uma sequência ou unidade didática estabelece vínculo vital entre si, dispondo de mesma significância procedural.

As atividades organizadas em sequência didática, se bem planejadas, trazem propostas ricas para se desenvolver em sala de aula, possibilitando o professor apreender o conhecimento prévio do aluno, seu desempenho, além de visualizar o que ainda precisa ser trabalhado para que se concretize a aprendizagem. (Ugalde e Roweder, 2020, p. 11)

Ugalde e Roweder, destacam a aptidão da sequência didática bem estruturada como ferramenta dialógica, que promove a interação entre professor e aluno em distintos níveis. Dispondo ao docente a capacidade diagnóstica da sala de aula e dos recursos utilizados, mutuamente, a elaboração de novas linhas de pensamento do aluno quanto a temática estudada, viabilizando o uso de sequências em uma dinâmica de ensino-aprendizagem. Por sua vez, Zabala (1998, p. 139) aponta a correlação aluno e conteúdo presente:

A forma de apresentação e a relação que existe entre eles nunca são arbitrárias; ao contrário, obedecem a certos critérios que fazem com que a seleção dos conteúdos de cada unidade e o tipo de relações que entre eles se estabelecem sejam de uma maneira

e não de outra. Isto supõe que estas unidades girem em torno de temas, perguntas, tópicos, lições, etc., que articulam e relacionam os diferentes conteúdos de uma maneira determinada.

Nessa perspectiva, o tema, as atividades e a avaliação requerem uma disposição de maneira gradual e progressiva, valorizando a construção do conhecimento e a aquisição de habilidades. Através da contextualização, favorece-se a superação de conflitos cognoscitivos, desfragmentando o conhecimento e o interligando-o em uma ampla esfera que transcende o ambiente escolar, ofertando sentido a aquela prática educacional e estímulo à aprendizagem.

## 2.3 INTERFERÊNCIA DA LUZ E A ANÁLISE DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY

Esta seção apresentará os conceitos-chave do interferômetro de Michelson-Morley, referenciado na seção anterior, para o estudo de padrões de interferência. Empregando-se das propriedades advindas da natureza ondulatória da luz, superposição de ondas e a defasagem por diferença de percurso entre feixes.

### 2.3.1 Ondas

Em sua definição geral, uma onda é caracterizada como uma perturbação transmitida entre dois pontos, transportando energia e momento, não havendo deslocamento efetivo de matéria. Como exemplo, uma pedra lançada na superfície de um lago calmo, provoca o surgimento de ondas que se deslocam de forma radial do seu ponto de origem, caso venham a colidir com um corpo, como um barco ou um banhista, parcela de sua energia será transferida a ele, empurrando-o.

Figura 1 – Folha em um lago com ondas.



Fonte: Lianne Darley (2016).

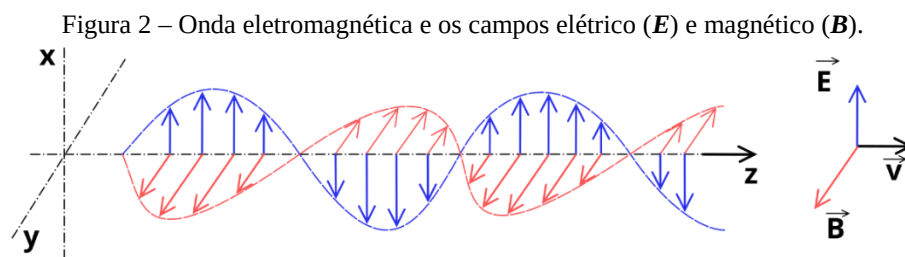
Para uma folha situada sobre esse lago, observa-se sua oscilação vertical e



horizontalmente em torno do seu eixo de repouso, ilustrando o movimento da matéria do lago, as partículas de água, que mantêm sua posição média invariável com o tempo (Figura 1) (Nussenzveig, 2013).

As ondas ocorridas em um lago, em cordas ou o próprio som (ondas sonoras) são classificadas como ondas mecânicas, pela necessidade da presença de um meio material elástico para que possam se propagar.

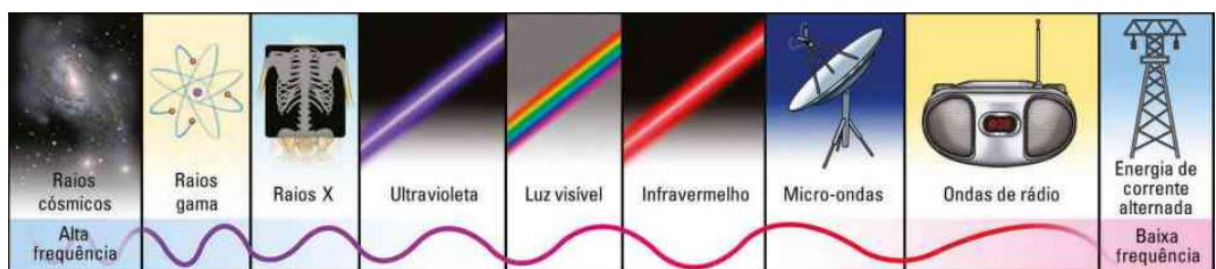
De distinta natureza, as ondas eletromagnéticas, não estabelecem tais dependências com um meio, podendo se difundir pelo completo vácuo. Constituídas por campos elétricos e magnéticos oscilantes e perpendiculares entre si, de modo que a variação de um destes campos tem a propriedade de originar o outro, o qual também varia com o tempo, constituindo um ciclo contínuo onde a onda eletromagnética se auto induz por toda sua extensão, podendo se propagar por três dimensões simultaneamente ou em perfis bi e unidimensionais (Figura 2).



Fonte: Emmanuel Boutet (2007).

As ondas eletromagnéticas assim como ondas mecânicas possuem propriedades intrínsecas a elas, como a frequência e o comprimento de onda. Ondas de rádio, raio x, micro-ondas e até a luz são exemplos de ondas eletromagnéticas. Suas características são provenientes da frequência com que oscilação e da distância entre seus picos de onda, classificadas no que chamamos de espectro eletromagnético, ilustrado a seguir:

Figura 3 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Paulo César Pereira (2016).

### 2.3.2 Ondas harmônicas

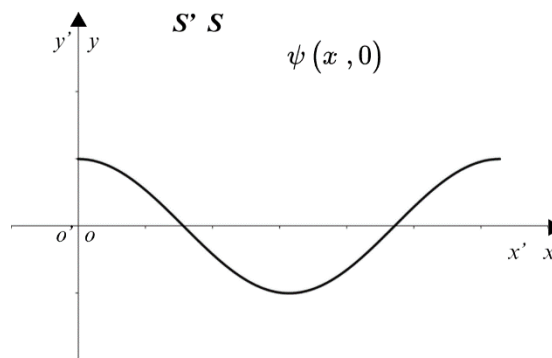
Representada em termos de uma função seno ou cosseno, a onda harmônica é a forma de onda mais básica, correspondendo ao comportamento oscilatório de um movimento harmônico simples, dependente do deslocamento e do tempo. A combinação de ondas harmônicas pode representar toda e qualquer onda, assim, assumindo alta relevância no estudo das propriedades ondulatórias (Nussenzveig, 2013). Portanto, o perfil de uma onda harmônica é dado por:

$$\psi(x') = f(x') = A \cos(kx') \quad (1)$$

Onde  $k$  é uma constante positiva, o número de onda. Como a função cosseno não admite dimensionalidade em seu argumento, o número de onda tem por finalidade converter  $x'$  em um termo adimensional, possuindo dimensão de  $m^{-1}$ . Dessa forma  $kx' = m/m$ , com seu produto dado em radianos. Como cosseno varia de  $+1$  a  $-1$ , o valor máximo da onda harmônica é equivalente a  $A$ , a amplitude de onda. (Hecht, 2017).

Para uma onda se propagando de maneira contínua no tempo, definiremos dois referenciais inerciais  $S$  e  $S'$  com coordenadas  $(x, y)$  e  $(x', y')$  respectivamente (Figura 4).

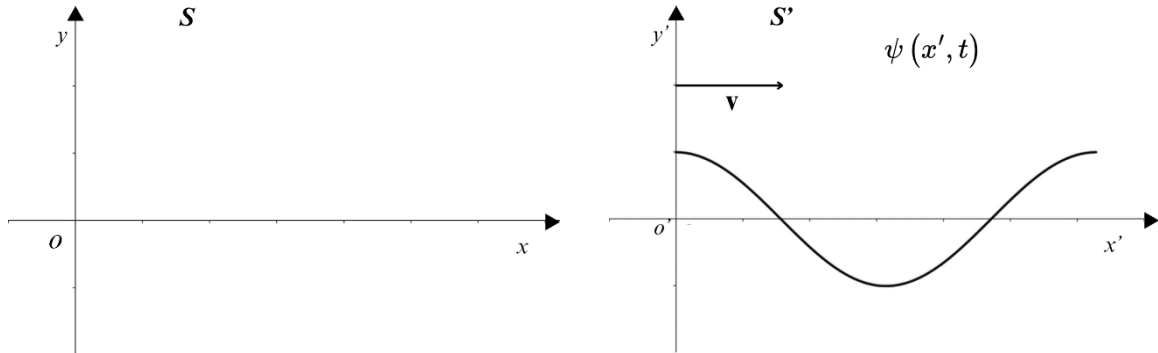
Figura 4 – Referenciais  $S'$  e  $S$  sobrepostos no instante  $t=0$ .



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para  $t = 0$ , as origens de ambos os referenciais coincidem, assim  $O' = O$ . Em um instante  $t$  posterior, correspondente a um número inteiro de oscilações completas o referencial  $S$  se mantém em repouso, enquanto o referencial  $S'$  se afasta com velocidade constante  $V$  para direita junto à onda harmônica, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Referenciais  $S'$  e  $S$  separados, com  $S'$  se movendo com velocidade  $V$ , no instante  $t$ .



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Aplicando as transformações de Galileu para dois referenciais com movimento retilíneo uniforme relativos entre si, obtemos as seguintes relações:

$$x' = x - Vt \quad ; \quad y' = y \quad (2)$$

Assim a equação (1) para um referencial em repouso:

$$\psi(x, t) = f(x - Vt, t) = A \cos[k(x - Vt)] \quad (3)$$

O comprimento de onda ou periodicidade espacial de onda,  $\lambda$ , representa a distância entre dois pontos equivalentes em um padrão de onda, ou ainda, entre duas cristas de onda (pontos de amplitude máxima) ou dois vales (pontos de amplitude mínima (Hecht, 2017).

Portanto, a variação de comprimento  $\lambda$  em  $x$  mantém a função  $\psi$  inalterado:

$$\psi(x, t) = \psi(x \pm \lambda, t) \quad (4)$$

De modo que tal modificação de  $\lambda$ , resulta em uma oscilação periódica completa. Como a onda harmônica é caracterizada por uma função cosseno, sua periodicidade é representada por um fator de  $2\pi$ , como visto na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico da função cosseno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De maneira equivalente à equação (3),

$$\cos[k(x - Vt)] = \cos\{k[(x \pm \lambda) - Vt]\} = \cos[k(x - Vt) \pm 2\pi] \quad (5)$$

Comparando os argumentos entre os cossenos, obtemos:

$$|k\lambda| = 2\pi \quad (6)$$

Como  $k$  e  $\lambda$  são valores positivos,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

O número de onda angular, ou apenas, número de onda  $k$ , representa a quantidade de ondas em uma oscilação completa por unidade de comprimento.

O número de onda  $k$ , pode ser representado ainda, como a quantidade de ondas por unidade de comprimento.

$$k = 1/\lambda \quad (8)$$

Resgatando a equação (1) e substituindo o número de onda angular  $k$  pelo valor obtido,

$$\psi(x) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \rightarrow A \cos\left(2\pi \frac{\alpha(m)}{\beta(m)}\right) = A \cos(\varphi) \quad (9)$$

No qual  $\alpha$  e  $\beta$  são valores reais com dimensão de metro para  $x$  e  $\lambda$ , respectivamente. O

termo  $\varphi$  é denominado fase de onda, que se relaciona diretamente com a função de onda, se  $\cos(\varphi) = 0$  a função  $\psi(x) = 0$ , para os valores de  $\cos(\varphi) = \pi; 2\pi; 3\pi \rightarrow \psi(x) = \lambda/2; \lambda; 3\lambda/2$ , respectivamente. A fase determina a posição da oscilação de uma onda em relação ao eixo  $x$  e  $y$  (Hecht, 2017).

Similarmente as equações (4) e (5),  $\tau$  representa o período de uma onda, tempo necessário para que uma oscilação completa se realize. Um acréscimo ou diminuição de  $\tau$  em  $t$ , não altera a função  $\psi$ . Podemos escrever a função de onda como:

$$\cos[k(x - Vt)] = \cos\{k[x - V(t \pm \tau)]\} = \cos[k(x - Vt) \pm 2\pi] \quad (10)$$

Logo:

$$|kV\tau| = 2\pi \quad (8)$$

Sendo  $k$ ,  $V$  e  $\tau$  grandezas de módulo positivo e  $k = 2\pi/\lambda$

$$\tau = \frac{\lambda}{V} \quad (9)$$

O período de uma onda ( $\tau$ ) corresponde a quantidade de tempo por onda, seu inverso por sua vez, é a frequência temporal ( $\nu$ ), número de ciclos de oscilação por unidade de tempo (Halliday; Resnick, 2016). A equação (9) para  $\nu$  faz-se

$$\nu = \frac{V}{\lambda} \quad (10)$$

Com a velocidade de propagação de uma onda:

$$V = \lambda\nu \leftrightarrow V = \frac{\lambda}{\tau} \quad (14) \text{ e } (15)$$

Análoga a velocidade de uma partícula que se move com o decorrer do tempo, a velocidade de propagação diz respeito ao deslocamento de  $n$  comprimentos de onda em determinado período, em m/s (Halliday; Resnick, 2016).

As equações (14) e (15) e suas relações foram determinadas, em 1687, por Isaac Newton em seu livro *Principia*.

A notação referente a ângulos para frequência é comumente empregada no estudo de ondas harmônicas, por conta expressões seno e cosseno para função de onda.

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi\nu \quad (16)$$

Assim, a frequência angular ( $\omega$ ) denota a quantidade de radianos em um intervalo de intervalo de tempo.

Desenvolvendo a função de onda (3) e aplicando as expressões encontradas para  $k$ ,  $V$  e  $\omega$ , das equações (7), (15) (16), respectivamente.

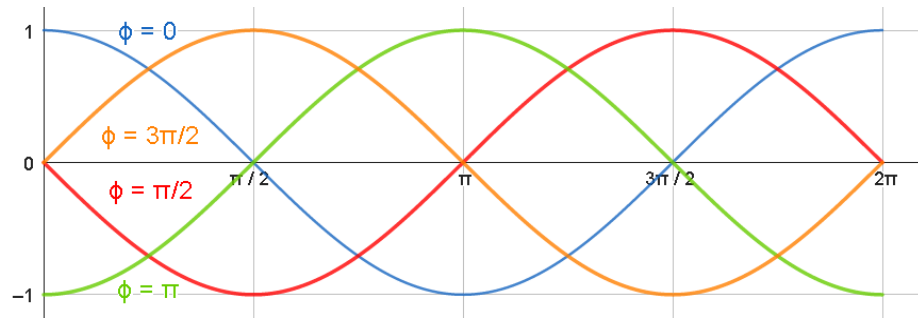
$$\begin{aligned} \psi(x, t) &= A \cos[k(x - Vt)] \rightarrow \psi(x, t) = A \cos(kx - kVt) \rightarrow \\ \psi(x, t) &= A \cos\left(kx - \frac{2\pi}{\lambda} Vt\right) \rightarrow \psi(x, t) = A \cos(kx - 2\pi\nu t) \rightarrow \\ \psi(x, t) &= A \cos(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (17)$$

Perfil de onda este, frequentemente empregado. Porém, para uma onda harmônica ideal, que para  $x = t = 0$  sua oscilação inicia-se necessariamente com amplitude  $A$ , não atendendo ao requisito de quaisquer ondas que não apresentem tal caráter inicial. Generalizando:

$$\psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \phi) \quad (18)$$

Onde  $\phi$ , é a constante de onda, ou seja, é a posição angular inicial (Figura 7) e para períodos múltiplos de  $2\pi$  de uma propagação.

Figura 7 – Gráfico da função cosseno para diferentes constantes de fase.



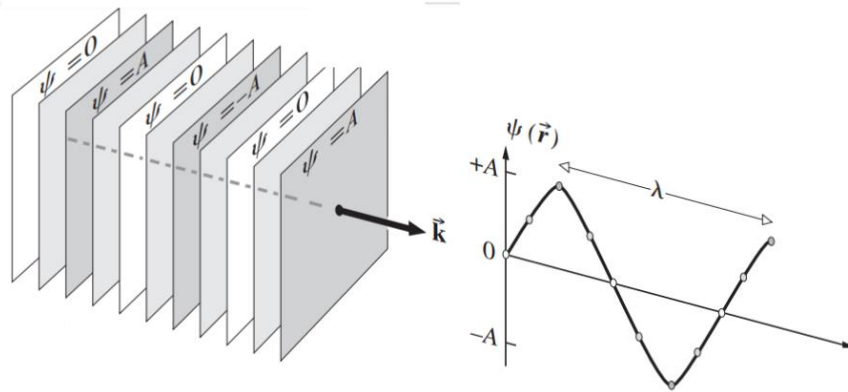
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De mesma maneira em (9), o argumento do cosseno é o ângulo de fase de onda ( $\varphi$ ), responsável por caracterizar o comportamento de uma onda harmônica no espaço e no tempo.

$$\psi(x, t) = A \cos(\varphi) ; \quad \varphi = kx - \omega t + \phi \quad (19)$$

Outra representação para ondas que se propagam unidimensionalmente com frequências bem definidas, são as frentes de onda (Figura 8). Um plano perpendicular atribuído a qualquer ponto em uma onda ou conjunto de ondas de mesma fase, que possui valor de amplitude constante por toda sua extensão.

Figura 8 – Frentes de onda para uma onda harmônica de amplitude  $A$ .



Fonte: Eugene Hecht (2017).

### 2.3.3 Princípio da Superposição de Ondas Unidimensionais

Um sistema linear (de grau 1), definido por duas ou mais funções lineares de distintas soluções, a superposição, ou seja, a soma de todas estas soluções satisfaz o estado do sistema. Propriedade presente no comportamento ondulatório, assim, sejam um par de funções de ondas

$\Psi_1(x,t)$  e  $\Psi_2(x,t)$  diferentes soluções para uma equação de onda, a sua soma  $\psi_1 + \psi_2$  é solução para esta equação (Hecht, 2017).

A equação de onda unidimensional surge com Jean D'Alembert, em sua publicação *Reflexões Sobre a Causa Geral dos Ventos* (1747), com aplicação derivadas parciais de segunda ordem em meios físicos, como as oscilações transversais em uma corda homogênea. Equação linear de segunda ordem e homogênea que determina o comportamento de uma onda em razão do deslocamento e do tempo em um meio ideal, entretanto, de forma geral, já que cada categoria de onda possui uma função específica com seus próprios parâmetros físicos (Hecht, 2017). Dada pela expressão:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (20)$$

Retornando a superposição de equações de onda  $\psi_1$  e  $\psi_2$ , temos respectivamente:

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2} \quad ; \quad \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2}$$

Somando-os,

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2} + \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2}$$

Portanto:

$$\frac{\partial^2 (\psi_1 + \psi_2)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 (\psi_1 + \psi_2)}{\partial t^2} \quad (21)$$

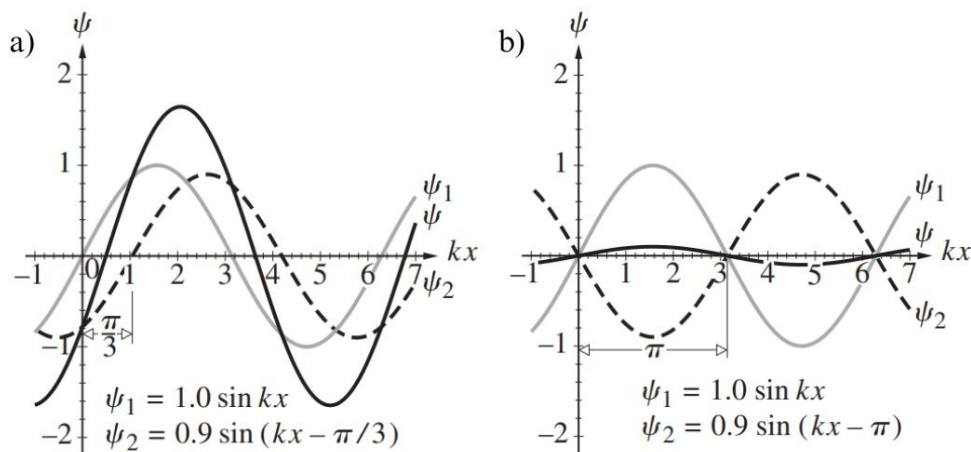
A superposição de ondas é análoga a combinação linear de funções. Ao serem sobrepostas as ondas podem crescerem-se ou diminuir resultando em uma única onda, no entanto, ao se afastarem as ondas mantêm seu comportamento anterior a sobreposição, como amplitude, velocidade e frequência (Nussenzveig, 2013).

A onda resultante se relaciona com a amplitude e o ângulo de fase, maiores amplitudes, maior aumento ou diminuição na onda inicial. Duas ondas de amplitudes iguais, com comprimentos de onda e frequência similares tem sua combinação realçada pela diferença entre



ângulos de fase de cada uma, caso possuam mesmo ângulo de fase, dizemos que essas ondas estão em fase, assim seus movimentos oscilatórios estão em sincronia, obtendo amplitude resultante máxima. De forma oposta, encontrando-se com diferença de fase de  $180^\circ$  ou  $\pi$ , ou fora de fase, as ondas tendem a se anular pela oscilação contrária, similarmente na Figura 9 (Hecht, 2017).

Figura 9 – Sobreposição de ondas com diferentes fases (cinza e pontilhada) resultando em uma única onda (preta).



Fonte: Eugene Hecht (2017).

Para a Ótica, área da Física que estuda o comportamento da luz, o princípio da superposição evidencia-se em ampla parcela de seus fenômenos como a perda de intensidade de um raio de luz refratado ou sua interferência.

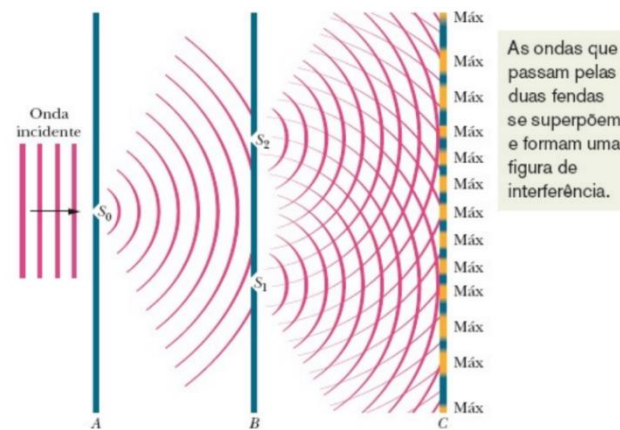
#### 2.3.4 Interferência de ondas eletromagnéticas

O primeiro registro da observação e análise de interferência para luz foi realizado por Robert Hooke, em 1665, no livro *Micrografia*. O fenômeno de interferência relatado por Hooke, ocorria na presença da luz branco, onde corpos finos transparentes como bolhas de sabão ou uma lâmina de ar formada pelo vão entre duas placas de vidro ao serem iluminados geravam cores diversas. A teoria de Hooke para o comportamento da luz observado, tomava a luz como consequência de vibrações de um meio homogêneo e até então indetectável, propagando-se através de ondas transversais (Rocha, 2015).

Em 1801, Thomas Young efetua o experimento de dupla fenda para a luz, demonstrando sua natureza ondulatória, por meio da difração e sobreposição de ondas, a interferência, propriedades presentes em ondas mecânicas. Young utiliza-se de uma fonte pontual

monocromática (de cor única) e três anteparos opacos  $A$ ,  $B$  e  $C$ , posicionados logo à frente do feixe de luz (Figura 10). O primeiro anteparo ( $A$ ) possui uma fenda central muito pequena, situado posteriormente com dada distância,  $B$  tem duas fendas afastadas simetricamente de seu centro e por fim,  $C$  está logo à frente e atua como anteparo de observação. O efeito obtido, ao contrário do que poderia ser imaginado, não era a soma de intensidade da luz, mas franjas claras e escuras, chamadas de franjas de interferência.

Figura 10 – Experimento de dupla fenda de Thomas Young.



Fonte: David Halliday; Robert Resnick (2016).

Young relaciona esse fenômeno ao caso semelhante de duas ondas na água se deslocando de diferentes pontos indo de encontro a um canal. Se suas cristas coincidirem ao se sobrepossem, como resultado suas amplitudes aumentaram, entretanto, se a crista de uma onda coincidir com o vale de outra, suas depressões serão preenchidas entre si e a água se manterá em repouso enquanto sobrepostos (Nussenzveig, 2013).

Como discutido anteriormente, as ondas eletromagnéticas são constituídas por campos oscilantes elétricos ( $E$ ) e magnéticos ( $B$ ) acoplados perpendicularmente, com  $E$  e  $B$  detendo relação e dependência entre si, sua evolução ao longo do tempo pode ser expresso por estas componentes de maneira mútua ou isolada, por uma função de onda  $E(x, t)$  ou  $B(x, t)$ . Para a análise quantitativa do fenômeno de interferência da luz utilizaremos o perfil de onda escalar, uma vez que para essas circunstâncias seus traços vetoriais podem ser desprezados. Assim a função para uma onda eletromagnética plana e monocromática (frequência única) é dada por:

$$E(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \phi) \quad (22)$$

Ou ainda, pela identidade de Euler, em notação complexa,

$$E(x, t) = \text{Re}[v(x)e^{-i\omega t}] \quad ; \quad v(x) = e^{i\phi} + e^{ikx} \quad (23)$$

A energia associada a propagação da luz diz respeito a seu caráter elétrico e magnético, no qual sua intensidade é determinada como a parcela de energia que transpassa um elemento de área perpendicular por certo intervalo de tempo. No entanto, para a luz visível sua frequência de oscilação é da ordem de grandeza de  $10^{14} \text{ s}^{-1}$ , período extremamente pequeno para que os atuais fotodetectores registrem alterações em sua intensidade, obtendo apenas seu valor médio temporal (Nussenzveig, 2013).

Figura 11 – Valor médio temporal da intensidade luminosa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A irradiância ou intensidade média temporal Figura 11 é descrita por:

$$I(x) = \varepsilon_0 v \langle E^2 \rangle = \frac{1}{2} \quad (24)$$

Tomando a notação complexa para a onda plana elétrica em (24),

$$I(x) = |v(x)|^2 \quad (25)$$

Como o valor médio diz respeito ao comportamento ondulatório de  $E(x, t)$ , as constantes podem ser desprezadas.

Na análise de interferência, a função de onda no anteparo de observação é resultado da sobreposição de duas contribuições vindas de diferentes orifícios, portanto, percorrendo distâncias  $x_1$  e  $x_2$ . Pelo princípio da superposição:

$$E(x, t) = \text{Re}[v_1(x)e^{-i\omega t} + v_2(x)e^{-i\omega t}] \quad (26)$$

$$I(x) = |v_1(x) + v_2(x)|^2$$

Como o argumento de fase depende do deslocamento,

$$I(x) = ||v_1|e^{\phi_1(x)} + |v_2|e^{\phi_2(x)}|^2$$

$$I(x) = |v_1|^2 + |v_2|^2 + 2|v_1||v_2|\cos(\phi_2 - \phi_1)$$

$$I(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\phi) \quad (27)$$

A equação (27) é denominada lei da interferência básica entre duas ondas, forma generalizada da interferência.

$\Delta\phi$  é conhecido como termo de interferência, visto que a irradiância depende apenas dessa variável a diferença de fase entre as duas contribuições. Como a função cosseno varia de  $+1$  a  $-1$ , para  $I_1 = I_2$  os máximos de interferência serão:

$$\Delta\phi = 2\pi n; n = 1, 2, 3 \dots \Rightarrow \cos(\Delta\phi) = 1 \therefore I(x) = 4I_1 - \text{Construtiva} \quad (28)$$

$$\Delta\phi = (2n + 1)\pi; n = 1, 2, 3 \dots \Rightarrow \cos(\Delta\phi) = -1 \therefore I(x) = 0 - \text{Destrutiva}$$

Para ondas com fase coincidente, ou seja, transladadas por múltiplos pares inteiros de  $\pi$  ocorrerá acréscimo na intensidade luminosa, franjas de interferência claras, no caso do extremo oposto, para fases contrárias, ímpares de  $\pi$ , o observável seria de completa escuridão ocasionada pela anulação entre ondas luminosas.

#### 2.4.5 Análise do Interferômetro de Michelson-Morley

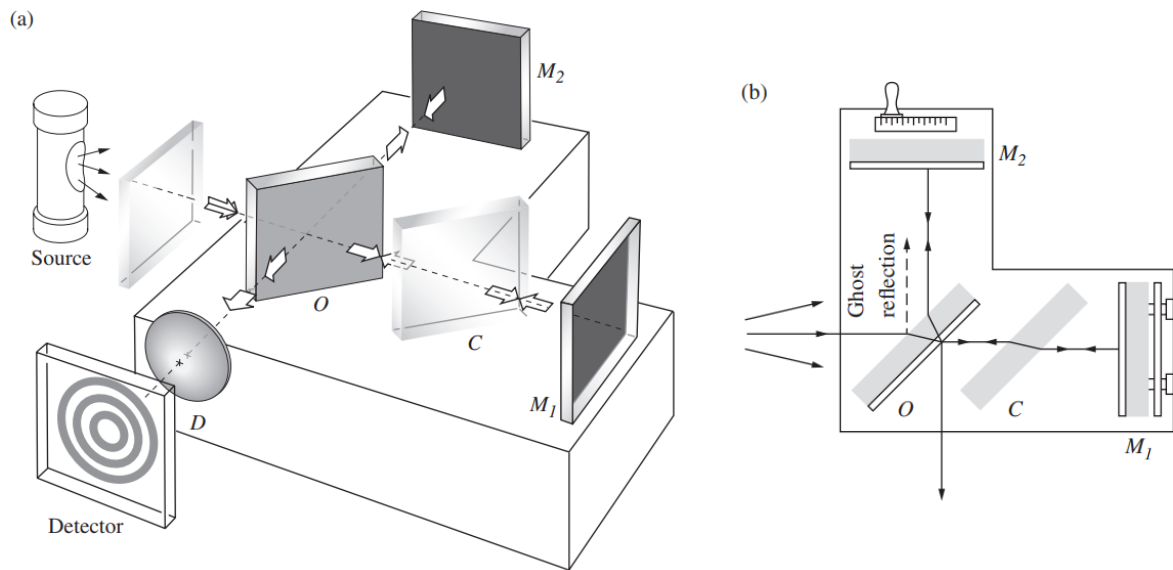
Empregando-se do fenômeno de interferência da luz, o método de interferometria tem por capacidade definir grandezas físicas com alto rigor de precisão, como índices de refração de meios translúcidos, irregularidades de superfícies, teste de componentes óticos, entre outros. Ainda utilizada nas áreas como Astronomia em observações celestes, na Física moderna para medida do efeito Doppler relativístico ou na espectroscopia (Garcia et al., 2009).

Dentre os instrumentos de interferometria, o interferômetro de Michelson-Morley recebe ampla notoriedade, por sua importância histórica para Ótica e como ponto de partida para teorias acerca da relatividade do comprimento. Classificado como um interferômetro de

dois feixes, consiste na separação de um raio de luz em duas parcelas que retornam a um mesmo ponto, permitindo a aplicação de variáveis óticas de maneira individual a um destes (Nussenzveig, 2013).

Seu arranjo se configura como ilustrado na Figura 12 (a), uma fonte luminosa ( $S$ ) emite luz radialmente através de um filtro monocromático, propagado luz de um único comprimento de onda de encontro a uma lâmina divisora de feixes inclinada em  $45^\circ$  a ele ( $O$ ).  $O$  é responsável por fracionar o feixe principal em dois feixes secundários de mesma amplitude por meio da reflexão e transmissão parcial. O segmento de luz refletido é redirecionado perpendicularmente, enquanto o raio de luz transmitido segue o percurso da onda original. Ambos os feixes são refletidos por espelhos planos ( $M_1$  e  $M_2$ ), retornando ao divisor de feixes, com uma de suas frações tomando percurso de volta a fonte e outra a uma lente convergente, os sobrepondo no detector ( $D$ ) (Hecht, 2017).

Figura 12 – (a) Montagem do interferômetro de Michelson-Morley.  
(b) Posicionamento do compensador paralelo ao divisor de feixes.

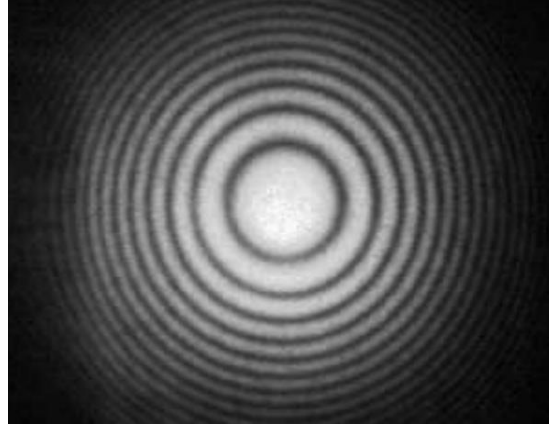


Fonte: Eugene Hecht (2017).

Entretanto, observados os caminhos de ambos feixes que chegam a  $D$  nota-se que o feixe refletido transpassa o separador  $O$  três vezes, enquanto o feixe transmitido uma única vez. Com o objetivo de igualar seus caminhos óticos, ou seja, para equiparar os desvios e a velocidade média entre ondas de luz é adicionado um compensador, uma lâmina de vidro de mesma espessura de  $O$  e paralela a ele, conforme a Figura 12 (b). Desta forma a diferença de fase é dada pela diferença de caminho real  $d$ , sendo o espelho  $M_1$  móvel para frente e para trás.

Posicionado um anteparo no local do detector D, este recebe um padrão de interferência circular de franjas claras e escuras concêntricas alternadas (Figura 13).

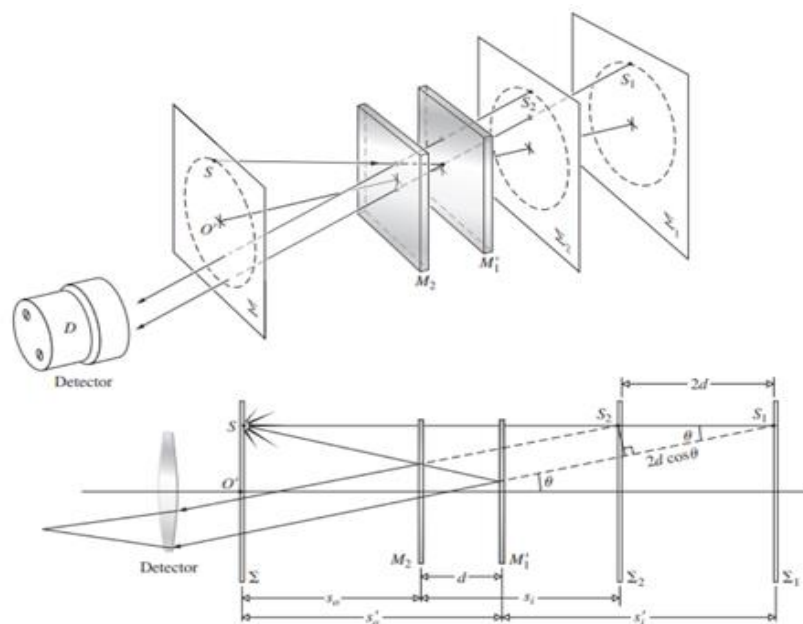
Figura 13 – Padrões de interferência obtidos para o interferômetro de Michelson-Morley.



Fonte: Eugene Hecht (2017).

Por meio da ótica geométrica, com a formação de imagens reais e virtuais podemos investigar o fenômeno observado, como na Figura 14. No referencial do anteparo se visualiza a fonte  $S$  e ambos os espelhos  $M_1$  e  $M_2$  no divisor de feixes  $O$ , de forma simultânea. O espelho deslocado  $M_1$  observado corresponde a sua imagem  $M_1'$ , já que não condiz com sua posição verdadeira. A fonte  $S$  emite diversos raios de luz, tomaremos o caminho de um raio qualquer com inclinação  $\theta$  ao eixo de simetria para a análise de seu comportamento.

Figura 14 – Configuração ótica geométrica do interferômetro de Michelson-Morley.



Fonte: Eugene Hecht (2017).

Um feixe que saído de  $S$  é sofre divisão, desvio e reflexão em  $M_2$  e  $M_1$ , em termos de imagem no anteparo este feixe pode ser representado como refletido em  $M_2$  e  $M_1'$  com suas parcelas vindas das imagens virtuais da fonte  $S_1$  e  $S_2$ .

De modo que a diferença de caminho para um frente de onda é descrita por  $2d\cos(\theta n)$  e diferença de fase  $k2d\cos(\theta n)$ , tendo a sobreposição de dois feixes de mesma frequência originados da mesma fonte. De modo que as franjas de interferência e suas posições dependam diretamente dos termos  $2d$  (um deslocamento  $d$  no espelho móvel acresce o percurso de passagem da luz em duas vezes, ida e volta) e  $\cos(\theta n)$ , cosseno do ângulo de incidência de um feixe  $n$  na lâmina divisora  $O$  ou nos espelhos.

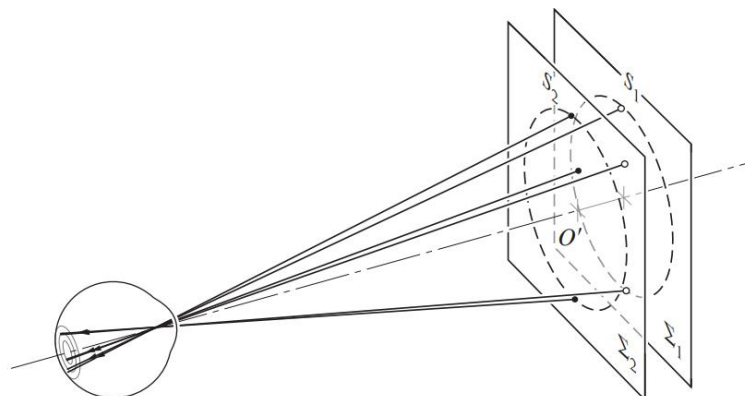
A equação de interferência destrutiva para o interferômetro de Michelson-Morley fica dada por:

$$2d \cos(\theta n) = m\lambda \quad ; \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (29)$$

Caso ambos os braços  $OM_1$  e  $OM_2$  sejam equidistantes ao anteparo, a primeira franja de interferência ( $\theta=0$ ) será escura, fato ocorrido do acréscimo de fase  $\pi$  para do raio refletido em primeira instância. A reflexão interna na lâmina, de um meio de maior refração para um de menor refração gera a inversão de fase dessa onda.

Como a condição é atendida para um raio de luz qualquer vindo da fonte  $S$ , podemos generalizar sua validade, com todos esses raios convergindo em imagens circulares, como na Figura 15.

Figura 15 – Formação dos padrões de interferência.



Fonte: Eugene Hecht (2017).

Para a primeira franja,

$$2d = m_0 \lambda_0 \quad ; \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (30)$$

O produto  $2d$  se relaciona diretamente com a posição dos anéis de interferência, para um deslocamento  $d$  muito grande como o de 1cm cerca de 40 mil franjas escuras diferentes surgiriam alternadamente no centro do anteparo.

Anéis escuros posteriores a franja central com  $d$  invariável sua expressão é apresentada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} 2d \cos \theta_1 &= (m_0 - 1) \lambda_0 \\ 2d \cos \theta_2 &= (m_0 - 2) \lambda_0 \\ &\dots \\ 2d \cos \theta_p &= (m_0 - p) \lambda_0 \end{aligned} \quad (31)$$

Assim suas posições angulares são obtidas relacionando as equações (30) e (31).

$$2d(1 - \cos \theta_p) = p \lambda_0 \quad (32)$$

A partir da observação do comportamento dos padrões de interferência no interferômetro de Michelson-Morley, é possível obter o valor do comprimento de onda para a fonte monocromática utilizada com grande proximidade ao seu valor real. Selecionando uma franja como referência, será feita a observação de quantas franjas tomaram seu lugar com um movimento  $d$  do espelho móvel. Isolando o comprimento de onda na equação (30).

$$\lambda = \frac{2d}{n} \quad ; \quad n = \text{número de franjas deslocadas} \quad (33)$$

A alteração da posição das franjas de interferência é sensível ao movimento do espelho móvel na ordem de grandeza de até 1/20 comprimentos de onda. Assim,

$$\Delta d = \frac{n\lambda}{2} \quad (34)$$

A variação do espelho, é equivalente a um termo que relaciona as franjas ao comprimento de onda do feixe.



## 2.4 O INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY E O ÉTER DE FRESNEL

No livro intitulado *Um Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo*, James Clerk Maxwell, em 1873, após unificar a eletricidade e o magnetismo, desenvolve a ideia de propagação de distúrbios eletromagnéticos, chegando a equações similares de ondas mecânicas em um sólido elástico e de velocidade idêntica à da luz. Posteriormente, apoiado em seus resultados Maxwell define a luz caráter eletromagnético e ondulatório. Sua teoria recebeu ampla força na comunidade científica pelas obras precedentes de Thomas Young e Augustin Fresnel, que verificaram fenômenos característicos de ondas como a interferência e difração para a luz (Pires, 2011).

A adoção da natureza da luz como ondulatória fomentou debates e hipóteses que já perduravam a mais de dois séculos acerca do éter luminífero, conceito já empregue por Maxwell em seus trabalhos. Desenvolvido por Christiaan Huygens, em seu livro *Tratado sobre a luz* (1680), o éter luminífero é um meio fluído que preencheria todo o espaço, não havendo vazios, e por qual a luz se propagaria. Concepção oriunda da Grécia Antiga com o éter aristotélico, onde este seria uma substância pura, inalterável e indetectável que permeava todo o universo exterior à abóbada terrestre, algo perfeito e comumente relacionado ao divino (Rocha, 2015).

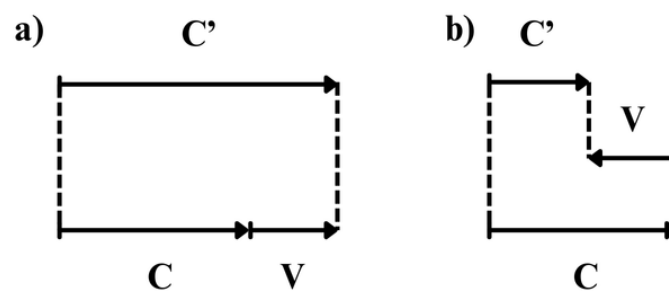
“Pensar sobre ondas luminosas sem um éter, na época, seria como pensar sobre ondas sonoras sem um meio material, ou ondas do mar sem a água – algo totalmente absurdo” (Martin, 2023; p.137). Para a propagação de ondas mecânicas a existência de um meio material faz-se primordial, por simetria, além das propriedades já compartilhadas esperava-se a mesma necessidade para ondas eletromagnéticas, um meio que propiciaria sua oscilação e deslocamento.

No início do século XIX, um novo modelo etéreo foi introduzido por Fresnel, sendo um meio rígido e elástico, estando em repouso em relação ao universo, ausentando-se completamente de movimento a um referencial externo, deste modo, estaria a Terra imergida nesse meio, com seus estados de movimentos independentes entre si. A suposição do éter como inerte, estruturou-se da aberração estelar da luz em observações astronômicas, uma alteração aparente da posição angular de uma estrela a cada período de 6 meses. Fresnel propôs que esse evento seria provocado pelo movimento relativo do éter ao referencial terrestre, consequência da rotação da Terra em torno do próprio eixo em conjunto ao movimento de órbita ao redor sol. (Rocha, 2015).

A luz propagando-se neste meio de maneira paralela ao movimento relativo do éter possuiria acréscimo ou diminuição no valor de sua velocidade total percebida por um

observador terrestre, onde perpendicularmente, seu módulo permaneceria inalterado, porém, apresentando desvio em sua trajetória (Martin, 2023). Comportamento similar ao de um banhista nadando a favor da corrente de um rio, atingindo maior velocidade, na qual essa resultante é dada pela soma da velocidade da correnteza e velocidade do nadador. No caso oposto, onde o banhista se encontra desfavorável à correnteza, ele possuirá menor velocidade, dada pela diferença entre suas velocidades (Figura 16).

Figura 16 – a) Velocidade relativa da luz acrescida pela velocidade da Terra no mesmo sentido.  
b) Velocidade relativa da luz relativa diminuída pela velocidade da Terra em sentido oposto.  
C – Velocidade da luz; C' – Velocidade da luz no referencial terrestre.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

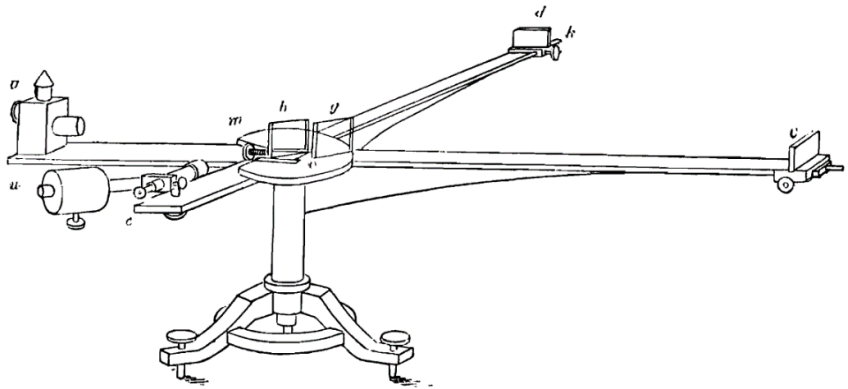
Após os trabalhos da teoria eletromagnética com a finalidade de determinar a velocidade relativa entre o éter e a Terra, uma série de experimentos são elaborados, dentre eles, alguns executados por Maxwell, o qual não obteve valores conclusivos, declarando: “[...] a variação dependeria do quadrado da razão entre as velocidades da Terra e da luz, pequeno demais para ser mensurado. ” (Maxwell, 1880, p. 109). Decorrente da relação entre suas velocidades, um termo ao quadrado representaria uma alteração de  $1/10^{10}$ , sensibilidade não alcançada por nenhum instrumento ótico da época. A aceitação do éter neste período era comum a grande parcela dos cientistas, portanto, sua não existência não se caracterizava como questão a ampla parte da comunidade científica (Passero, 2014).

Motivado pelas afirmações de Maxwell, em 1881, Albert Abraham Michelson, perito da marinha norte americana, na busca por evidenciar a dinamicidade relativa do éter, propõe uma abordagem interferométrica, capaz de detectar pequenas modificações na velocidade da luz. Fundamentado no fenômeno da interferência da luz, o interferômetro construído por Michelson tinha por finalidade comparar o tempo de percurso para as mesmas distâncias entre dois feixes luminosos, um paralelo e outro perpendicular ao movimento de translação da Terra (Pires, 2011).

Uma fonte de luz (Uma lanterna disposta com uma lente) emite um raio de luz que é

divido por um espelho semi-prateado, uma parcela é refletida perpendicularmente e a outra transmitida mantendo o percurso do feixe originário. Logo à frente ambos os raios são refletidos por espelhos prateados retornando ao espelho divisor, no qual o feixe refletido inicialmente é transferido e o transferido no primeiro momento é refletido, convergindo e se sobrepondo em um telescópio de observação, representado na Figura 17. A influência do movimento orbital do planeta Terra alteraria a velocidade da luz que se propagaria paralelamente, caso ambos os feixes viajassem por caminhos equidistantes franjas de interferência seriam visualizadas no telescópio pela diferença de fase de onda entre ambos. Posteriormente, o interferômetro seria rotacionado em um ângulo de  $90^\circ$  com sua posição inicial, alterando o padrão de interferência gerado em virtude da direção do caminho da luz em relação ao movimento da Terra (Michelson, 1881).

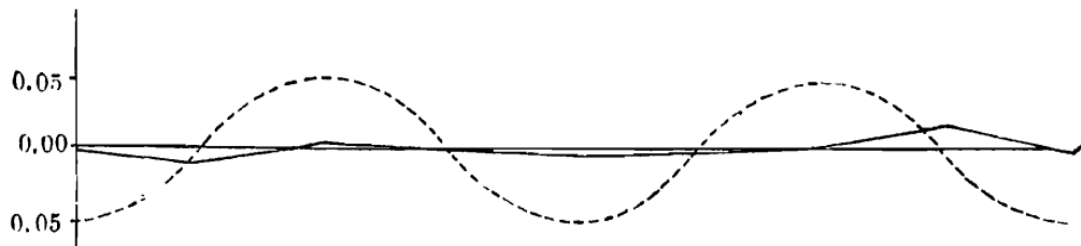
Figura 17 – Interferômetro de 1881 produzido por Michelson.



Fonte: Albert Michelson (1881)

Michelson tinha como resultado esperado um deslocamento de 0,05 mm entre as franjas de interferência, no entanto, ao fim da experimentação não observou quaisquer modificações que estariam de acordo com sua previsão, representado na Figura 18. Por consequência, concluiu que a hipótese de Fresnel de um éter totalmente estacionário era falha, contradizendo sua interpretação para a aberração ótica estelar (Passero, 2014).

Figura 18 – Desvio encontrado por Michelson. Pontilhado – Esperado; Preto – Encontrado.

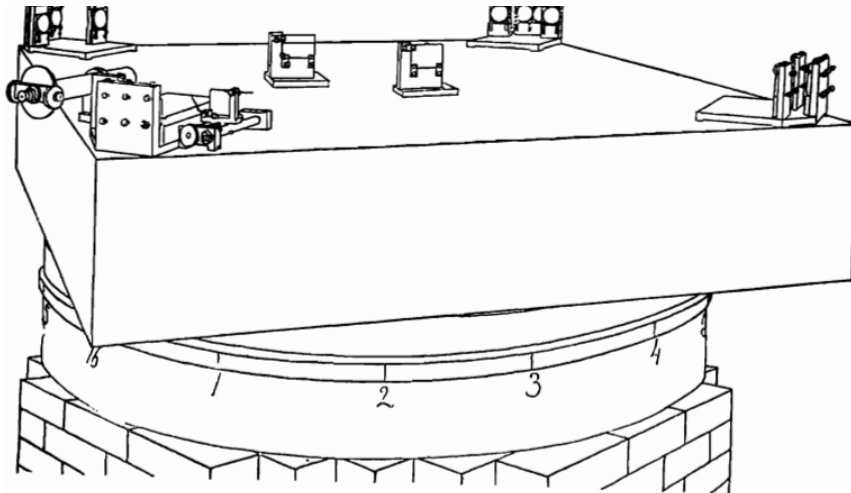


Fonte: Albert Michelson (1881).

O artigo publicado por Michelson, o qual documentava seu experimento, não repercutiu no ramo científico. Porém, Hendrik Lorentz, 6 anos mais tarde, em sua revisão bibliográfica quanto à ótica e o movimento da Terra pelo éter, analisa o trabalho de Michelson. Comprovando que os efeitos esperados por ele estariam em desacordo à teoria do éter de Fresnel, o dobro do que o verdadeiro valor a ser adquirido e indicando que seria imprescindível um aparelho de maior sensibilidade. Michelson ao determinar as mudanças de fase dos feixes de luz, desconsiderou o aumento de caminho para a luz na direção perpendicular ao movimento da Terra (Martin, 2023).

Em 1887, Michelson auxiliado por Edward Morley, professor na Universidade de Cleveland, realiza novamente o experimento de interferência de 1881, apoiados pelas correções de Lorentz e a alta aceitação da comunidade científica quanto ao éter em repouso. Modificações são feitas no corpo do interferômetro afim do aumento da precisão descrita por Lorentz, como o alongamento da distância percorrida pela luz a partir da sucessão de espelhos, posicionados de maneira a manter a metodologia da primeira experiência (Figura 19). Bem como, uma base composta por uma placa de arenito flutuando sobre mercúrio, visto que, pela alta sensibilidade era extremamente suscetível a vibrações externas, como movimentos, seja a rotação do interferômetro ou perturbações ocasionadas por pedestres, e sons de alta intensidade. Em adição, medidas foram realizadas a cada intervalo de 3 meses, em consideração a mudança de velocidade tangencial da Terra e sua direção no período de um ano (Michelson; Morley, 1887).

Figura 19 – Interferômetro de 1887 produzido por Michelson e Morley.



Fonte: Albert Michelson; Edward Morley (1887).

Contudo, as correções e aparato experimental mais robusto desenvolvidos por Michelson não geraram resultados distintos aos de 1881, refutando a presença de um éter estacionário. Embora seus não estivessem de acordo com Fresnel, não demonstrava a veracidade de qualquer outra hipótese a respeito do éter. (Michelson; Morley, 1887). Proposições à existência do éter luminífero ainda persistiram após o trabalho de Michelson e Morley, como suas próprias intenções para uma reformulação à teoria de Fresnel, entretanto, em nenhum momento alguma evidência foi identificada. (Martin, 2023).

O experimento realizado por Michelson e Morley apesar de apresentar conclusões contraditórias ao que se pressupunha a teoria da época, possui alta relevância, carregando seus nomes, bem como sua frequente utilização na interferometria para definição de índices de refração de um material e o comprimento de onda de uma fonte de luz (Albuquerque, 2013)

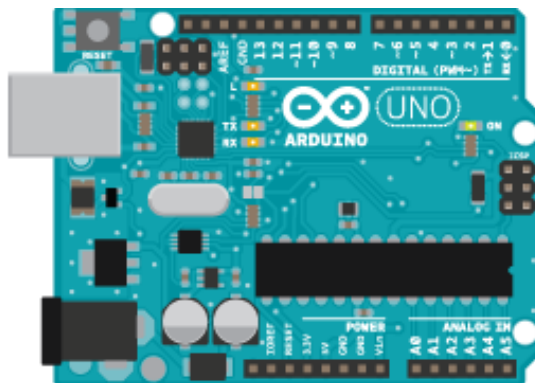
Além disso, utilizado de escopo para trabalhos importantes à ótica e eletromagnetismo, uma destas, a proposta da Contração de George FitzGerald e Lorentz. De forma independente ambos apresentam a hipótese de que um corpo em movimento no éter teria seu comprimento contraído, onde a observação de Michelson estaria, portanto, em conformidade com as suposições de Fresnel. Os estudos de FitzGerald e Lorentz embora utilizem-se do conceito errôneo de éter, são os primeiros trabalhos que consideram uma possível contração espacial, concepção retomada na Teoria da Relatividade Restrita por Albert Einstein (Pires, 2011).

## 2.5 MICROCONTROLADOR ARDUINO

Presente em praticamente todos os dispositivos eletrônicos, o microcontrolador é um circuito integrado que funciona como um pequeno computador. Ele possui um microprocessador capaz de processar informações, memória para armazenar dados, e diversos pinos que permitem a conexão com sensores e atuadores, possibilitando a interação com o ambiente. Além disso, recursos como temporizadores e comunicação serial tornam os microcontroladores versáteis e ideais para uma ampla gama de aplicações, desde eletrodomésticos até sistemas industriais (Cavalcante; Tavolaro; Molisani, 2011).

Um dos tipos de microcontroladores mais usados e estudados é o Arduino, considerado uma plataforma facilitadora ao acesso à construção de projetos e dispositivos baseados em eletrônica, vinculando computador e ambiente físico, com software de código aberto e hardwares multifuncionais. (Figura 20).

Figura 20 – Placa Arduino Uno.



Fonte: Arduino Corporation (2025).

Compatíveis com sensores de temperatura, pressão, intensidade luminosa, motores, compartilhamento de dados por Wi-Fi, entre outros, suas placas eletrônicas atendem a amplas aplicabilidades. Podendo ser programadas com funções específicas a partir de seu microcontrolador e as portas USB de qualquer computador, através do software *Arduino IDE*, que interliga código e todos os hardwares Arduino em segundos. Dispõem-se de uma linguagem própria de programação estruturada em linguagens amplamente difundidas como C e C++, de livre alteração e compartilhamento, contando com uma biblioteca própria que reúne produções de simples as de maior complexidade.

A popularidade do Arduino cresce a cada dia com entusiastas ou com professores de ciências, observada sua capacidade de interação com fenômenos físicos, simulação de ambientes controlados, precisão e automação. Unido a maior simplicidade e custo relativamente

baixo no mercado eletrônico, possibilitando o desenvolvimento de instrumentos para laboratório anteriormente inviáveis por seu preço e ferramentas de difícil aquisição ou montagem (Martinazzo et al, 2014).

### 3 METODOLOGIA

O seguinte capítulo tem por objetivo apresentar os procedimentos metodológicos aplicados no decorrer desta pesquisa, a partir da descrição da elaboração e análise do produto educacional que a orienta.

A abordagem adotada detém, portanto, caráter quanti e qualitativo, para Pereira (2023), o método quantitativo ocorre através da coleta direta de dados, sejam estas, grandezas, informações ou comportamentos, sem exceções, traduzindo-os em números, organizados e tratados de acordo com a Estatística. Ainda de acordo com o autor, a pesquisa qualitativa por outro lado, enfatiza a fluidez da relação que existe entre o objeto de estudo e o pesquisador. Confronto que surge do contexto o qual se submerge e a subjetividade crítica do sujeito, que dota esta relação de significados não quantizáveis.

#### 3.1 INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY AUTOMATIZADO

O desenvolvimento deste aparato experimental é direcionado à similaridade com interferômetros de Michelson-Morley laboratoriais, empregados na medida do comprimento de onda de feixes de luz. Contudo, por tratar-se de um material de finalidade ao ensino, optou-se por alterações afim de sua simplificação, preservando sua esquemática original. Acrescido da automação do deslocamento de seu espelho móvel, diminuindo a interferência e imprecisão humana em ajustes finos. A inclusão eletrônica e computacional dispensa a presença de um experimentador experiente no processo de medição, que pode ser feita a distância e por meio da interface do computador.

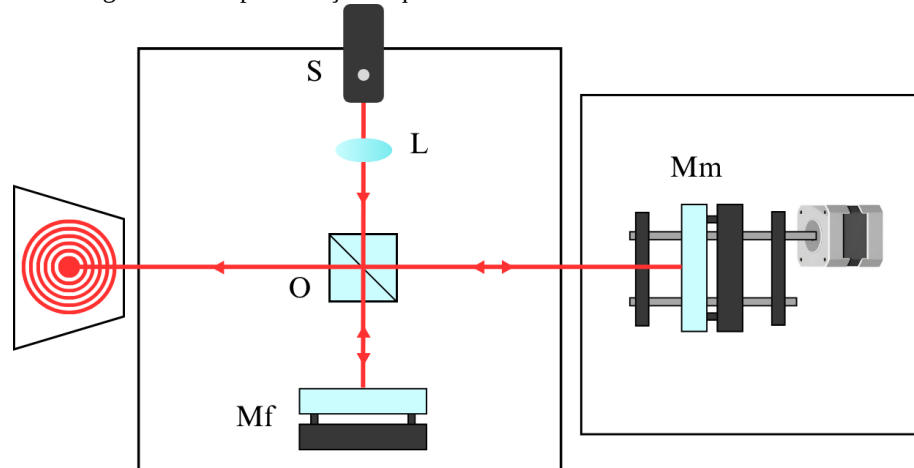
##### 3.1.1 Mecanismo de funcionamento e componentes

Diferentes configurações podem ser observadas quando se refere a interferômetros do tipo Michelson-Morley, utilizaremos para efeito comparativo o interferômetro referenciado em capítulos anteriores deste trabalho. Informações técnicas e específicas se encontram nos Apêndices A, B e C.

A figura logo abaixo representa o desenho esquemático do interferômetro automatizado:



Figura 21 – Representação esquemática do interferômetro automatizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### a) Fontes luminosas monocromáticas

Para o controle de dados, utilizou-se um LASER de comprimento de onda previamente conhecido, deste modo, foi adotada uma lanterna LASER diodo de HeNe do kit de ótica do CIDEPE. Possuindo como comprimento de onda  $665 \pm 15$  nm (nanômetros), localizado assim, na faixa do espectro da luz vermelha (Figura 22).

Figura 22 – Lanterna LASER diodo vermelha.



Fonte: CIDEPE (2025).

Como laser de comprimento desconhecido, foi utilizado uma ponteira LASER de um apresentador multimídia qualquer, por ser comumente utilizado e de fácil aquisição. Possuindo a cor vermelha de feixe de luz, tal como o LASER de controle.

Figura 23 – Apresentador multimídia com ponteira LASER vermelha.

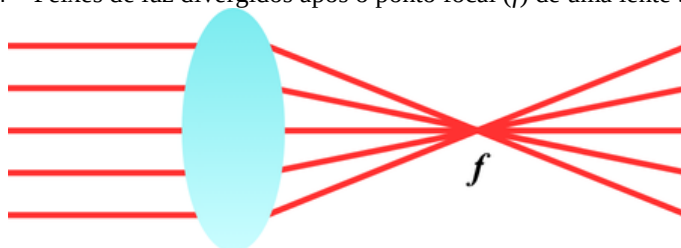


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### b) Lente convergente

A utilização de uma fonte de luz radial monocromática possui suma importância para definição de padrões de interferência. Originadas da diferença de percurso ( $d$ ), cada franja relaciona-se diretamente com o ângulo ( $\theta$ ) do feixe paralelo central, angulação que ditará se a interferência será construtiva e destrutiva, formando no anteparo padrões circulares concêntricos. Na substituição a uma fonte radial policromática com filtro de luz, optou-se, como citado anteriormente, por LASERs monocromáticos, em conjunto a uma lente biconvexa ( $L$ ) situada logo após a fonte ( $S$ ), atuando como propagação de luz radial a partir de seu ponto focal (Figura 24). Ampliando a imagem visualizada ao fim do trajeto, comportamento equivalente ao da lente posicionada entre o divisor de feixes e o anteparo, requerendo distâncias moderadas para nitidez.

Figura 24 – Feixes de luz divergidos após o ponto focal ( $f$ ) de uma lente biconvexa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

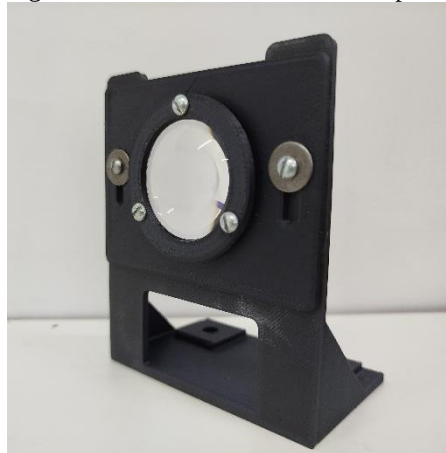
O teste de imagem foi realizado com distintas lentes convergentes, alcançando resultados satisfatórios a partir de lentes biconvexas de faces de raios assimétricos. Padrões de interferência são comuns a lentes de menor custo ao serem transpassadas por feixes monocromáticos, por materiais e construção simples, dificultando a visualização de franjas de interferência geradas diretamente pelo interferômetro. Esses padrões são oriundos da

sobreposição da luz refratada pela lente diretamente, e a refletida internamente e em sequência refratada, originando padrões circulares concêntricos, análogo ao princípio utilizado por Fabry e Perrot na interferometria. A sobreposição destas imagens, presentes em lentes biconvexas e plano-convexas comuns, no interferômetro, se apresentam como franjas totalmente verticais, impossibilitando sua contagem e a transição de posições entre elas. Lentes biconvexas de diferentes raios de curvatura reduzem essas formas de interferência, com o aumento do espalhamento das reflexões internas.

Deste modo, selecionou-se lentes biconvexas assimétricas feitas de PMMA, geralmente empregadas em dispositivos de realidade virtual de baixo custo. Possuindo como distância focal 45 mm. Deve-se salientar que é necessário que seu ponto focal esteja anterior a reflexão nos espelhos, para que resulte em uma divergência de raios luminosos em seu encontro, para a ocorrência regular de franjas.

Como apoio para lente, foi confeccionado um suporte em PLA através de impressão 3D, por maior praticidade. Dispondo de altura ajustável, observada a necessidade de centralização da lente com a fonte luminosa e a possibilidade de fixação com auxílio de parafusos e porcas (Figura 25).

Figura 25 – Lente biconvexa com suporte.

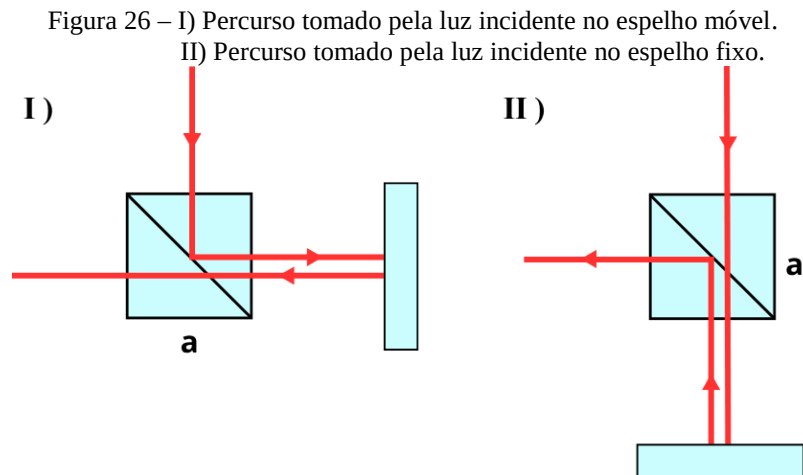


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### **c) Divisor de feixes**

A quantia de componentes óticos, como fonte, espelhos, divisor de feixes, lente e compensador, torna o alinhamento uma tarefa que aumenta de complexidade à medida que se insere um novo item na listagem. Buscando otimizar e reduzir-los, modificou-se o sistema de lâmina de face semi-reflexiva e compensador, indispensável devido a diferença de caminho

ótico, substituindo-os por um prisma cúbico semi-reflexivo (*O*). Executando a mesma função dada a tal conjunto, sua simetria faz com que as parcelas de luz que percorrem o braço refletido e transmitido do interferômetro se desloquem por caminhos óticos idênticos (Figura 26).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Caso os lados do prisma meçam  $a$ , o percurso interno tomado por ambos os feixes equivale a  $2a$ , dispensando a necessidade de adaptações. Devido suas reflexões serem ocorridas internamente no prisma, os raios de luz centrais se sobrepõem em exata fase de oscilação, tornando a franja  $n_0$  neste caso, clara.

Por suas dimensões de lados de 10 mm, o prisma conta com um suporte próprio de PLA com furos de fixação e de altura coincidente a do LASER, posicionado perpendicularmente a sua face e refratando em seu centro geométrico (Figura 27).

Figura 27 – Prisma divisor de feixes com suporte.

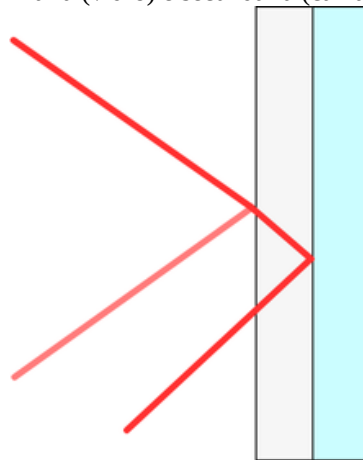


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### d) Espelhos

Para superfícies reflexiva, referentes aos espelhos fixo e móvel, foi feita escolha de um HD, especificamente o disco magnético, presente em ampla quantidade de computadores de mesa e notebooks. É composto de alumínio polido, processo que ocorre a nível nanométrico, reduzindo significativamente as imperfeições da superfície do disco, refletindo a luz com desvios quase imperceptíveis e sem perda de intensidade. Comparativamente, o disco e um espelho convencional, refletem a luz de maneiras distintas, enquanto o disco a reflete em sua superfície, a reflexão principal no espelho ocorre internamente. Devido ao seu arranjo, que se constitui em camadas de vidro e alumínio ou prata para reflexão, feixes secundários são gerados, uma vez que, a luz reflete externamente, no vidro e em seguida em sua camada reflexiva. Ocorrendo o espalhamento de luz em distintas direções, ocasionado pela alteração do trajeto da luz que é refratado, desvio que impacta diretamente na nitidez da imagem (Figura 28).

Figura 28 – Reflexão primária (vidro) e secundária (camada reflexiva) no espelho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Foram feitos os recortes do disco em duas superfícies menores e de mesmo tamanho. Em seguida, colocados cada um a seu suporte próprio de PLA, relativos aos espelhos móvel e fixo. Sua fixação se deu por meio de fita dupla-face. Esse método evita a aplicação de tensão excessiva em diferentes pontos do disco, de maneira contrária a colas ou parafusos, que podem gerar deformação na superfície, ocasionado em distorções nos padrões vistos no anteparo (Souza; Santiago; Jesus. 2019) (Figura 29).

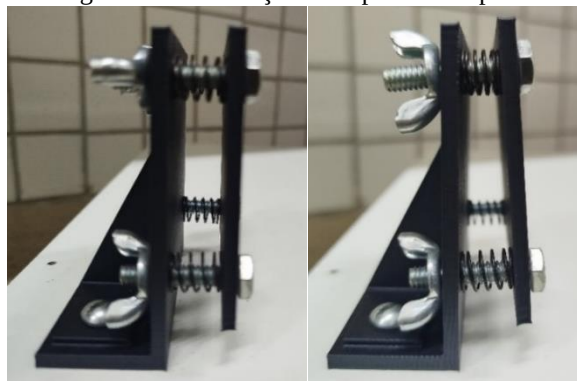
Figura 29 – Disco reflexivo com suporte.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os suportes do espelho possuem funcionamento idêntico, constituídos de uma base fixa à superfície, conectada a outra base suspensa, a qual leva o espelho. Sua conexão é feita a partir do conjunto de molas, parafusos e roscas-borboleta, responsáveis pelo sistema de realinhamento do interferômetro. Seu ajuste é realizado a partir do aperto ou folga das roscas, inclinando o espelho nos quatro possíveis sentidos (Figura 30).

Figura 30 – Inclinação no suporte do espelho



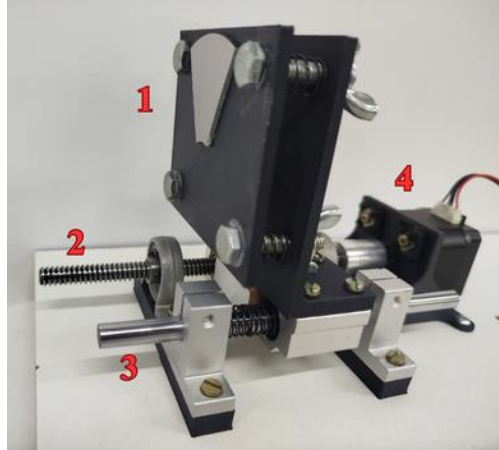
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### **e) Espelho móvel automatizado**

A visualização e contagem da mudança de posição entre franjas subsequentes realizada a olho nu, por sua correspondência a distância de meio comprimento de onda, ocorre exclusivamente em deslocamentos em micro ou nanoescala. O sistema de ajustes finos adotado para o espelho móvel corresponde aos modelos de trilhos adotados em impressoras, routers e máquinas de corte a laser CNC de entrada, com custo de maior acessibilidade. Estruturado por

um fuso trapezoidal acoplado a um motor nema 17 com um eixo linear como suporte, representado na Figura 31. Possibilitando o controle de movimento com maior precisão, sem a exigência do manejo direto do instrumento

Figura 31 – Espelho móvel  
1) Espelho; 2) Fuso; 3) Eixo linear; 4) Motor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A revolução completa do fuso escolhido, linearmente, equivale a uma distância de 2 mm para frente ou para trás. Enquanto o motor detém o passo, ou seja, o deslocamento mínimo de  $1,8 \pm 0,09^\circ$ . A junção desses elementos proporciona em resolução mínima, movimentos de cerca de  $1 \cdot 10^{-5}$  m a cada passo do motor, no entanto, ainda 20 vezes maior do que qualquer comprimento de onda de luz visível.

A diminuição do tamanho do passo de um motor é possível a partir da utilização de drivers de micropasso. Atuam como um controlador de pulsos elétricos que chegam as bobinas de um motor, definindo o tamanho de passo, sua orientação e a velocidade com que ocorrem. Enviando pulsos intermediários ou intervalos de intensidade ainda menores, a depender da sua configuração, mais reduzido será o tamanho de passo alcançados. Portanto, são responsáveis por fracionar um passo em passos de tamanho inferior, tornando o que viria a ser a distância tomada por um único passo, em uma distância ocorrida em 10 micropassos, por exemplo.

Selecionou-se o driver de micropassos Dm556, com subdivisão de 1/128 passos, ilustrado na Figura 32, agregado a uma fonte de alimentação de 24 V. Deste modo, o movimento anterior dado por  $1 \cdot 10^{-5}$  m referente a um passo é segregado em 128 frações de percurso, atingindo aproximadamente  $78 \cdot 10^{-9}$  m, ou melhor, 78 nanômetros. Ressalta-se que este valor é puramente teórico, desprezando folgas, oscilações de corrente elétrica, temperatura, trepidações do motor e fatores externos, assim como, a própria incerteza associada ao motor e ao driver.

Figura 32 – Driver de micropasso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O gerenciamento do driver, por sua parte, é efetuado por um microcontrolador Arduino Uno, que por função, informa ao driver o comportamento a ser adotado pelo motor. Sua programação utiliza-se da biblioteca do Arduino, *Accelstepper*, a qual se dedica ao controle de motores de passo, portanto, utilizando como grandeza de deslocamento, o passo.

A manipulação do espelho móvel ocorre através de um computador, conectado diretamente ao microcontrolador Arduino via cabo USB. Por meio da interface serial do *Arduino IDE*, podem ser inseridos comandos básicos e valores associados, propiciando a automatização de mudanças de fase de modo predefinido pelo experimentador. Informações como posição, velocidade e aceleração, são armazenadas na memória do Arduino, podendo ser acessadas pelo computador, sem a necessidade de anotações. Na Figura 33, são listados os possíveis comandos do espelho móvel.

Figura 33 – Lista de comandos exibida no monitor serial do *Arduino IDE*.

```
Para imprimir os comandos, digite 'C'.

Padrão: Velocidade: 0.3 p/s (Um passo a cada 3 segundos.)
        Aceleração: 1 p/s^2 (Um passo por segundo ao quadrado.)

'F' : Move o espelho para frente
'T' : Move o espelho para trás.
'P' : Para o movimento do motor
'V' : Altera o valor da velocidade.
'A' : Altera o valor da aceleração.
'O' : Retorna à posição de origem.
'N' : Define a posição atual como origem.
'L' : Informa a atual localização do motor.
'v' : Informa a atual velocidade do motor.
'a' : Informa a velocidade e aceleração predefinidas do motor.
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, os comandos atribuídos ao trilho podem ser categorizados em comandos de informação, no qual a inserção de seu caractere referente na porta serial, retorna um valor de



grandeza correspondente armazenado no Arduino, não atribuindo uma ação direta ao motor. Os demais, correspondem a atividade do motor, responsáveis pela sua alteração de estado, seja a mudança de uma grandeza predefinida ou uma ação direta de movimento. A modificação de variáveis, bem como, o controle de deslocamentos, é realizada a partir da combinação do caractere de comando com o valor numérico, assim, atribuindo à ação tomada, uma magnitude (Figura 34).

Figura 34 – Comando de deslocamento e seu valor atribuído na porta serial.

```
Movimento positivo de: 200.00 passos
```

```
F 200
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### f) Bases e sistemas de amortecimento

Os componentes ópticos foram distribuídos em duas bases independentes, construídas com chapas de MDF de 15 mm de espessura. A escolha do material surge por seu fácil acesso como reuso ou em marcenarias, unido ao seu manuseio simples se comparado a outras matérias primas.

A primeira base possui como dimensões 45x45x6 cm, constituída da sobreposição horizontal de duas chapas à quatro recortes de 6cm de largura e dupla camada de MDF. Dispostos por toda a borda da base, estes recortes são formados de uma dupla de 45 cm de comprimento e a outra de 33 cm de comprimento. As peças são fixadas entre si de forma mista com a utilização de parafusos e cola, para maior resistência.

Sua macicez e a quantia de material derivam da necessidade de estabilidade e absorção de vibrações, elementos significativos para esta estrutura, visto que movimentos microscópicos influenciam a formação de padrões de interferência (Figura 35).

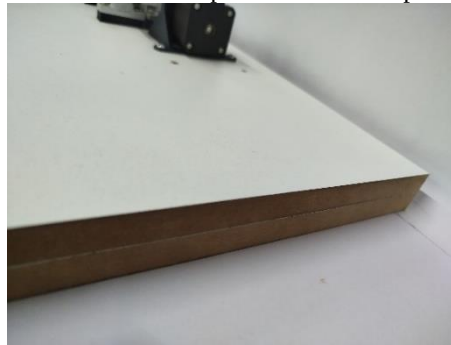
Figura 35 – Base de MDF para os componentes óticos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O espelho móvel (*mf*) e o sistema de trilho contam com uma base independente, em função da trepidação natural de qualquer motor, seu tremor seria transferido através da estrutura aos demais componentes, dificultando o alinhamento e a formação de franjas. Com medidas de 40x40x3 cm, sua base é composta de uma placa de MDF de mesma medida, dois recortes de 40x10 cm e dois recortes de 20x10 cm, posicionados e fixos de mesma maneira a primeira base (Figura 36).

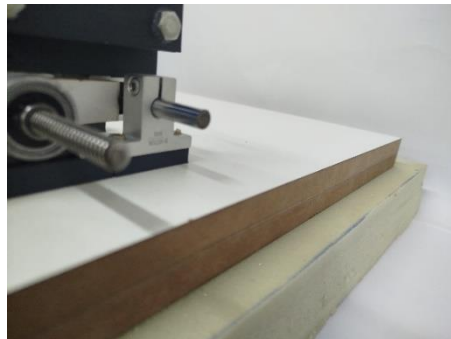
Figura 36 – Base de MDF para o trilho do espelho móvel.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A rigidez das estruturas atua de modo a amortecer vibrações de baixa frequência, como passos ou tráfego de veículos, entretanto, ainda sendo suscetível aos ruídos acústicos e provenientes do próprio motor. Dispondo-se à diminuição de tais influências, foram propostos métodos de amortecimento. Sob as bases do interferômetro, adicionou-se espuma D33 de 5 cm de espessura, com medidas similares a de cada uma das bases (Figura 37).

Figura 37 – Acolchoamento das bases do interferômetro.

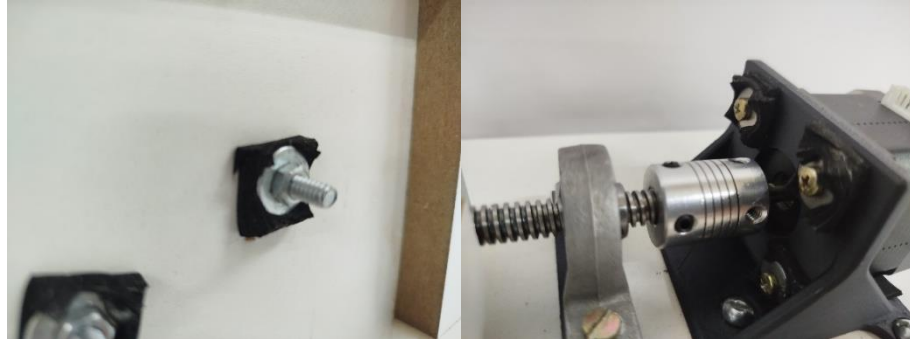


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para o trilho e seus parafusos de fixação, utilizou-se pedaços de EVA de 1mm, empilhados e colados em um total de 6 camadas, atuando como arruelas amortecedoras, em

conjunto com o motor que atua a baixas velocidades, fornecendo tempo ao sistema para dispersar vibrações entre cada passo (Figura 38).

Figura 38 – Arruelas de EVA para parafusos fixadores.

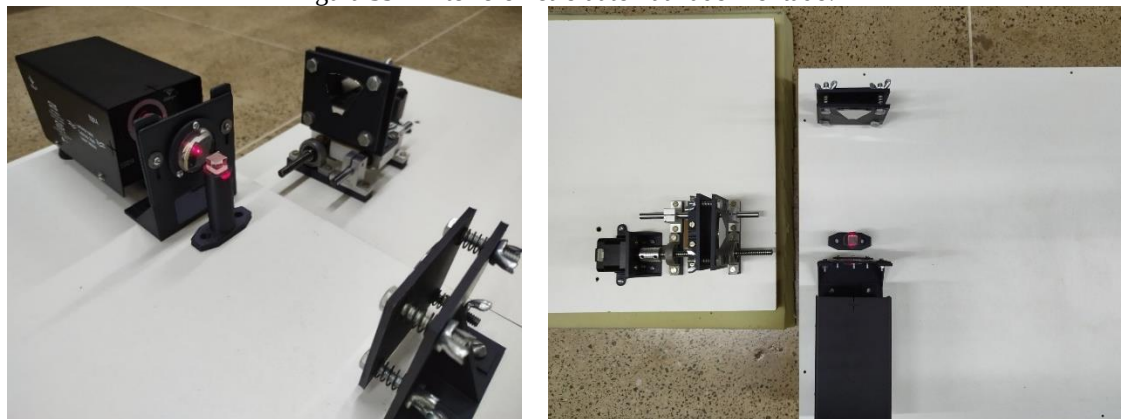


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pela ausência de superfícies de alta estabilidade, o interferômetro foi montado e operou diretamente sobre o chão ou em uma bancada de material maciço, pela absorção de impactos de baixa frequência com maior intensidade e evitando ressonância.

Deste modo, o arranjo do interferômetro automatizado é disposto da seguinte forma:

Figura 39 – Interferômetro automatizado montado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

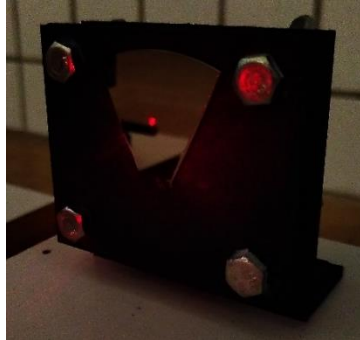
### g) Alinhamento

A centralização de componentes óticos é vital para o processo de observação e medição das franjas de interferência. Desalinhamentos de um único item podem ser responsáveis por padrões distorcidos, ou ainda, sua ausência.

Como mencionado anteriormente, os ajustes a serem feitos encontram dificuldades devido ao número de componentes óticos a serem alinhados simultaneamente. Desta forma, para simplificar esse processo, tomamos seu alinhamento de forma gradativa, iniciando a partir da centralização de espelho *fixo* (*Ef*) e fonte luminosa (*S*). O feixe de luz incidente é direcionado

estar ao centro do espelho, evitando escapes de luz, assim como na (Figura 40).

Figura 40 – Centralização do feixe incidente no espelho fixo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Posteriormente, localizamos o feixe refletido e o redirecionamos por meio do mecanismo de regulação do espelho ao ponto de saída da luz na fonte (Figura 41).

Figura 41 – Centralização do feixe refletido na origem da fonte.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em seguida, acrescentamos o divisor de feixes ( $O$ ) posicionado perpendicularmente e a 15 cm do espelho fixo, de modo que o feixe refrate diretamente no centro de sua face (Figura 42).

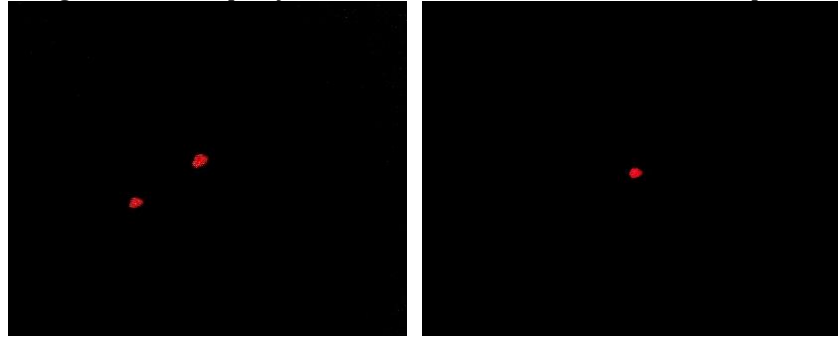
Figura 42 – Adição e centralização do prisma divisor de feixes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No braço do interferômetro do espelho móvel ( $mf$ ), a base deverá ser movida de encontro ao feixe refletido pelo prisma. Para o alinhamento entre as duas parcelas de luz, utilizamos sua visualização no anteparo, os sobrepondo por meio do ajuste do espelho móvel (Figura 43).

Figura 43 – Sobreposição dos feixes refletido e transmitido no anteparo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, incluímos a lente divergente ( $L$ ) centralizada à fonte, a rotacionando para centralização de reflexos sobre a saída da fonte (Figura 44).

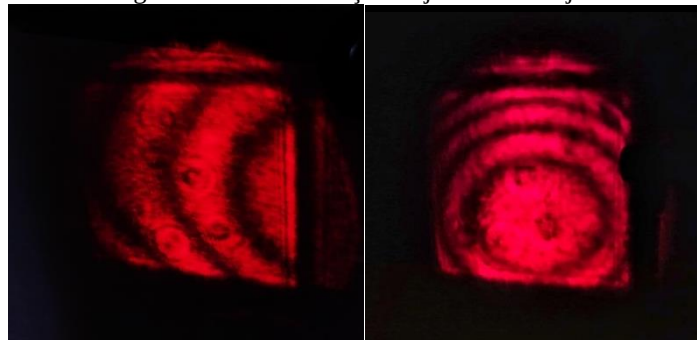
Figura 44 – Centralização e ajuste da lente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A franja central deve-se encontrar no centro da sombra do prisma no anteparo, caso contrário, redirecionamentos devem ser feitos em um dos espelhos. Como a lente inverte a imagem gerada, o controle do espelho é feito de forma contrária (Figura 45).

Figura 45 – Centralização e ajuste das franjas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 3.2 CONSTRUÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Ao fim da testagem e validação do interferômetro de Michelson-Morley automatizado, realizou-se a elaboração de uma sequência didática que contemple seu uso. Abordando os conteúdos de interferometria, da Ótica. Estruturada em 8 etapas, em um total de 10 horas, a sequência didática possui como seu objetivo geral o estudo acerca da natureza ondulatória da luz e seu fenômeno de interferência, assim como, suas aplicações tecnológicas, detalhadamente no Apêndice D.

Diante da relevância do interferômetro desenvolvido por A. Michelson e E. Morley para Ótica, a Física Moderna e a Tecnologia, a sequência didática se direciona a sua contextualização em uma postura investigativa. No Apêndice D, como material auxiliar, consta o artigo “*On The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*” traduzido, relativo ao desenvolvimento do interferômetro e a proposta de confirmação da hipótese do Éter Luminífero Estacionário de Fresnel. Sua utilização se dará como meio de pesquisa ativa dos discentes sobre os conceitos e as rupturas teóricas sobre a luz e ondas eletromagnéticas, complementada por instrumentos de pesquisas situados na temática. Em último momento, através de uma roda de conversa ocorrerá a divulgação de informações, questões ou discussões, mediadas pelo docente, afim de valorizar a aquisição de conhecimentos sobre a luz, a análise das alternativas tecnológicas empregadas e conflitos cognoscitivos.

A sequência didática, em uma etapa posterior conta com um roteiro de atividade experimentais, intitulado “Medindo o comprimento da luz”, Apêndice E. Empregando o interferômetro de Michelson-Morley automatizado através do *software Arduino IDE*, na medição do comprimento da luz vermelha proveniente de uma fonte luminosa qualquer. De início os alunos irão fazer o processo de alinhamento de componentes óticos do interferômetro, avaliando variáveis em seu decorrer. Logo após, é feita a coleta de dados, com a contagem de franjas observadas no anteparo para determinados deslocamentos no espelho móvel. Assim, calculando o comprimento de onda para o feixe e a média aritmética dos valores obtidos. Por fim, o método avaliativo baseia-se em um relatório com base na atividade experienciada, com o tratamento de medidas e proposição de hipóteses para desvios aparentes e fenômenos observados, identificando a influência de fatores externos e comparando os resultados observados com a teoria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguinte seção destina-se a exposição de dados adquiridos a partir do emprego do interferômetro automatizado, como também, a síntese dos mesmos. Ocorrida em duas etapas distintas, os processos de medições visaram definir o comprimento de passo do trilho do espelho móvel e o comprimento de onda de um LASER monocromático, seguido do intervalo de confiança atribuído a cada um.

### 4.1 MENSURANDO A INCERTEZA ASSOCIADA AO DESLOCAMENTO DO ESPELHO MÓVEL

A equação de interferência da luz para o interferômetro automatizado pode ser representada por:

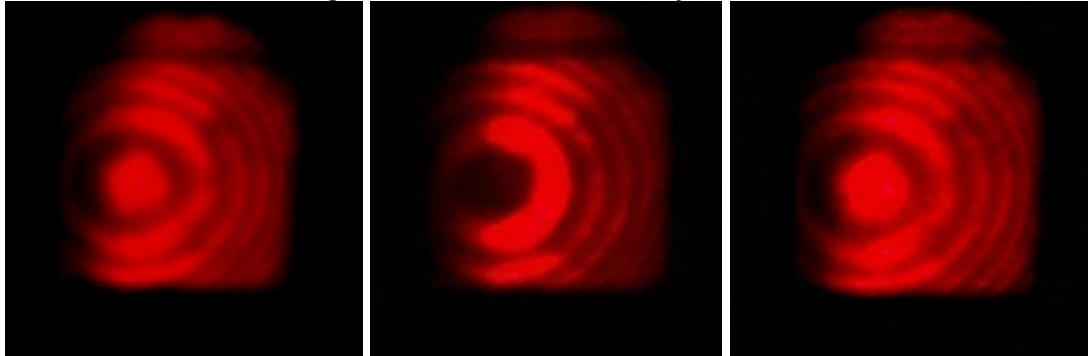
$$k = \frac{m\lambda}{2p} \quad (35)$$

O deslocamento do espelho móvel a partir do trilho é dado pelo produto entre o número de passos do motor (**p**) e a constante de deslocamento (**k**), ou seja, a resolução mínima da variação da distância entre espelhos alcançada pelo interferômetro.

Com a utilização da lanterna LASER diodo de HeNe, foram realizadas cinco medidas, nas quais o espelho é movimentado a uma quantidade fixa de duzentos passos para cada de medição. O processo se deu em um ambiente controlado, para obtenção de dados de maior confiabilidade, evitando eletrodomésticos de controle de temperatura, horários de pico, superfícies instáveis e alta luminosidade.

O instrumento de medida utilizado para este teste corresponde a contagem a olho nu de franjas de interferência construtiva e destrutiva que sobrepõem a posição inicial da franja central (Figura 46). Ainda, desconsiderou-se alterações no padrão de franjas no anteparo em intervalos de repouso do motor, diminuindo a influência de interferências externas.

Figura 46 – Deslocamento das franjas de interferência.



Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados obtidos para contagem de franjas de interferência, o deslocamento do espelho móvel e a constante de deslocamento, podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Medidas obtidas ao deslocar o espelho móvel em cem passos.

| Nº de passos ( $p$ ) | Nº de franjas ( $m$ ) | $d$ ( $1 \cdot 10^{-6}$ m) | $K_{med}$ ( $1 \cdot 10^{-9}$ m) |
|----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 200                  | $49 \pm 0,5$          | 16,29                      | 81,46                            |
| 200                  | $45 \pm 0,5$          | 14,96                      | 71,49                            |
| 200                  | $50 \pm 0,5$          | 16,52                      | 83,12                            |
| 200                  | $45 \pm 0,5$          | 14,96                      | 71,49                            |
| 200                  | $47 \pm 0,5$          | 15,63                      | 78,14                            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

E suas médias na Tabela 2.

Tabela 2 – Médias aritméticas do deslocamento do espelho e da constante de deslocamento.

| $\bar{d}$ ( $1 \cdot 10^{-6}$ m) | $\bar{k}_{med}$ ( $1 \cdot 10^{-9}$ m) |
|----------------------------------|----------------------------------------|
| 15,62                            | 77,14                                  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como auxílio para contagem, realizou-se a filmagem no decorrer da prática. Foi feita desconsideração de avanços e recuos nas franjas de interferência, no breve momento de repouso do motor, em que suas vibrações se propagavam pela base do interferômetro.

A média das grandezas apesar de condizentes e próximas aos valores de referência, não ilustra com fidelidade os resultados obtidos. A constante  $k$  se comparada na primeira e segunda medição se distância em cerca de 10 nm, ou ainda, cerca de 10 % de seu valor, quantia atenuada



por se tratar da diferença entre valores médios.

Determinando o desvio padrão das medidas em relação à média, obtemos:

Tabela 3 – Desvio padrão das medidas.

| $\sigma_d (1 \cdot 10^{-6} \text{ m})$ | $\sigma_k (1 \cdot 10^{-9} \text{ m})$ |
|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 0,72                                   | 5,46                                   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os desvios, por sua vez, sofrem influência direta de fatores externos. A reprodução do experimento em sala de aula, tende a extrapolar estes resultados, pela presença de várias pessoas, e por consequência tremores advindos de fala, passos, respiração e o erro associado a contagem somente a olha nu.

Para estabelecer a incerteza relativa ao deslocamento do braço de interferômetro, devemos considerar os desvios já calculados, associando-os às incertezas contidas em cada instrumento do experimento (Tabela 4).

Tabela 4 – Incertezas referentes à  $k$ , ao comprimento de onda do LASER e a contagem das franjas de interferência, respectivamente.

| $u_k (1 \cdot 10^{-9} \text{ m})$ | $u_s (1 \cdot 10^{-9} \text{ m})$ | $u_m$ |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------|
| 2,44                              | 15                                | 0,5   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Assim o valor para a constante de deslocamento combinado as incertezas de medida e instrumentais, é:

Tabela 5 – Valor encontrado para  $k$  e relativo ao deslocamento teórico de  $k$ .

| $k (1 \cdot 10^{-9} \text{ m})$ | $k_{rel}$ |
|---------------------------------|-----------|
| $77,14 \pm 3,18$                | 4,07 %    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As flutuações presentes nos dados obtidos são provenientes de folgas e imperfeições dos materiais, e equipamentos utilizados, suscetíveis a interferências do ambiente. Em interferometria fatores ambientais contém alto peso nos resultados, por tratar de movimentos menores que comprimentos de onda luz. É importante ressaltar que a incerteza atribuída ao deslocamento do espelho móvel cresce à medida que a frequência da fonte aumenta, consequentemente há o encurtamento do comprimento de onda, diminuindo a resolução relativa do espelho e resultando em um maior intervalo de incerteza.

Entretanto, são resultados satisfatórios, relativamente próximos à experimentos encontrados em laboratórios estudantis, ainda, tratando de uma nova abordagem e proposta de automação para interferômetro de Michelson-Morley.

#### 4.2 MEDIDA DO COMPRIMENTO DE ONDA DA LUZ

Conhecido o deslocamento de um único passo para o trilho do espelho móvel, utilizaremos da equação (35) citada anteriormente. Para o cálculo do comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{2kp}{m}$$

Similarmente a medição anterior, fixaremos desta vez, o valor de franjas visualizadas em total de 50 franjas. Serão feitas cinco medidas e ao fim, analisados os passos realizados da posição inicial à final.

Tabela 6 – Medidas obtidas ao contar-se cinquenta franjas.

| Nº de franjas ( <i>m</i> ) | Nº de passos ( <i>p</i> ) | <i>d</i> ( $1 \cdot 10^{-6} \text{m}$ ) |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| 50±0,5                     | 215                       | 16,58                                   |
| 50±0,5                     | 207                       | 15,96                                   |
| 50±0,5                     | 212                       | 16,35                                   |
| 50±0,5                     | 200                       | 15,42                                   |
| 50±0,5                     | 201                       | 15,49                                   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A medida do deslocamento obtida na Tabela 6 corresponde a multiplicação direta do número de passos pela constante *k*. O percentual de incerteza obtido para *k*, reflete diretamente nas incertezas associadas a medida do comprimento de onda, por relacionar todas as possíveis variáveis e parte dos instrumentos (Tabela 7).

Tabela 7 – Valor encontrado para o comprimento de onda da ponteira LASER

| $\lambda$ ( $1 \cdot 10^{-9} \text{m}$ ) |
|------------------------------------------|
| 638 ± 26                                 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os dados obtidos concordam com e estão contidos totalmente no intervalo do comprimento de onda vermelho no espectro eletromagnético de cerca de 600 a 700 nm. Por se tratar de um produto genérico, a ponteira LASER utiliza das tecnologias de baixo custo, como diodos LASERs de GaAs ou AlGaInp, possibilitando a restrição por suposição de valores de mínimos e máximos por volta de 630 a 670 nm, de acordo com o comprimento de onda obtido.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aparato experimental Interferômetro de Michelson-Morley desenvolvido, com abordagem à sua automação, revelou-se positivamente satisfatório. A análise dos resultados obtidos, indica uma relevante acurácia na defasagem entre feixes luminosos por meio do deslocamento do trilho do espelho móvel, o qual encontra-se de acordo com o intervalo de confiança com os valores teóricos previstos.

O equipamento produzido possui o potencial para atividades laboratoriais de custos menos levados, viabilizando sua utilização por professores e alunos no ensino de ótica. Contemplando conteúdos da ótica geométrica, como a formação de imagens em espelhos e lentes e a ótica ondulatória, com a caracterização da luz e o fenômeno de interferência. O seu uso apresenta a capacidade de tornar mais dinâmica a relação existente entre a Tecnologia e a Física, oferecendo diferentes caminhos a aplicabilidade de método científicos e matemáticos.

O produto educacional proposto estende-se a uma sequência didática, que contempla a interdisciplinaridade no avanço e conhecimento científico. O contato propiciado entre atividades de pesquisa e de laboratório, em comunhão a aulas teóricas tem a aptidão de romper com a visão da Física segregada em ramos que não se relacionam e ainda associar os benefícios ao processo-aprendizagem presentes em cada perspectiva.

A integralização deste experimento fomentou o desenvolvimento do atual trabalho, como produto educacional e roteiro à licenciados em Física e entusiastas. Pressupõe-se que o interferômetro automatizado, vinculado a uma sequência didática bem estruturada tenha a aptidão de fornecer uma aprendizagem significativa, motivando e desenvolvendo competências dos discentes.

Almeja-se que o presente trabalho sirva como escopo para futuras produções, desenvolvendo o interferômetro produzido, incluindo sistemas para medida de índices de refração, testes com LASERs de diferentes cores e aplicativos com interface para operação remota.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. S. Medida do índice de refração utilizando o interferômetro de Michelson. 2013.
- BATISTA, I. L. Uma adoção da História e Filosofia da Ciência no desenvolvimento dos saberes docentes interdisciplinares. In: BATISTA, I. L (Org). **Conhecimentos e saberes na educação em ciências e matemática**. 372p, Londrina, UEL, 2016.
- BORBA, O. V. d S.; LIMA, E. F. Desenvolvimento de um recurso multimídia integrador da História da Ciência e da Experimentação à luz da Teoria Cognitiva da Aprendizagem Multimídia. **História da Ciência e Ensino**: construindo interfaces, v. 29, p. 188-209, 2024.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, p. 4503-4503, 2011.
- COSTA, M. **Experimentos históricos em ambiente virtual**: uma abordagem histórico-didática a respeito da teoria eletrofraca para o estudo de física de partículas no ensino superior. **2019. 423f**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina
- DE CARVALHO, A. M. P; GIL-PÉREZ, D. Formação de professores de ciências: tendências e inovações.
- DE SIQUEIRA, L. E.; BEDIN, E.; DE LIMA, V. F. Arduino como Recurso Educacional Aberto: Construção de Experimentos Acessíveis para o Estudo de Movimento e Gravidade. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 6, n. 2, 2023.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. **Ensino de ciências**: fundamentos e métodos. São Paulo: Cortez, 2002.
- FLICK, U. **Introdução à pesquisa qualitativa-3**. Artmed editora, 2008.
- FONSECA, W.; SOARES, J.A. A experimentação no ensino de ciências: relação teoria e prática. **Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE: Cadernos PDE**, v. 1, 2016.
- GARCIA, P. V.; MARQUES, P. V.; GHASEMPOUR, A.; LEITE, A. P. Astrofotônica: Instrumentação Óptica Avançada em Astronomia. 2009.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**, v. 4, 10. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- HECHT. E. **OPTICS**, 5. Ed. Harlow: Pearson, 2017.
- HOFFMANN, J. L. **O panorama de uso da experimentação no Ensino da Física em municípios da região Oeste do Paraná**: uma análise dos desafios e das possibilidades. **2017.198f**. Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade Estadual do Oeste do

Paraná, Cascavel, 2017

MARTIN, R. d A. Em busca do éter: de Maxwell a Michelson, Morley e Miller. 2023.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio et al. Arduino: Uma tecnologia no ensino de física. **Revista Perspecfiva**, v. 38, n. 143, 2014.

MAXWELL, J. C. On a possible mode of detecting a motion of the solar system through the luminiferous ether. By the late Professor J. Clerk Maxwell, F.R.S. In a letter to Mr. D. P. Todd, of the Nautical Almanac Office, Washington, U.S. Communicated by Professor Stokes, Sec.R.S. Proceedings of the Royal Society of London, 30: 108-110, 1880.

MAXWELL, J. C. On a possible mode of detecting a motion og the solar system through the luminiferous ether. **Royal Society of London**, v. 30, p. 108-110, 1880.

MICHELSON, A. A. The relative motion of the earth and the luminiferous ether. **American Journal of Science**, v. s3-34, ed. 128, p.120-129, 1881.

MICHELSON, A. A; MORLEY, E. W. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. **American Journal of Science**, v. s3-34, ed. 203, p. 333-345, 1887.

MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. e20200451, 2021

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**, v. 2, 5. Ed. São Paulo: Blucher, 2014.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**, v. 3, 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2015.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**, v. 4, 1. Ed. São Paulo: Blucher, 1998.

PASSERO, T. S. O experimento de Michelson-Morley na transição da Física clássica para a Física relativística: Leituras filosóficas e historiográficas. 2014.

PEREIRA, J. B. **Metodologia do trabalho científico**. Editora IFPB, 2023.

PIRES, A. S. T. **Evolução das ideias da Física**. 2. Ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

RAMOS, M. G. Epistemologia e Ensino de Ciências: compreensões e perspectivas. In.:

MORAES, R. (org.). Construtivismo e ensino de ciências: reflexões epistemológicas e 102 Formação de professores no Ensino de Ciências metodológicas. 3. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2008. p. 13-36.

ROCHA, J. F. M. Origem e evolução do Eletromagnetismo. In: ROCHA, J. F. M. (org.). **Origens e evolução das ideias da Física**. 2. ed. Salvador: EDUFBA, 2015. Cap. 3, p. 185-265.

SALEM, S. Perfil, evolução e perspectivas da pesquisa em Ensino de Física no Brasil. 2012.

SCHNETZLER, R. P.; ARAGÃO, R. M. R. de. (Orgs.). Ensino de Ciências: fundamentos e

abordagens. CampinasCapes/Unimep, 2000. p. 120-153.

SILVA, A. P. B. d; Oliveira, M. M. A sequência didática interativa como proposta para formação de professores de matemática. **VII ENPEC. Encontro Nacional em Educação em Ciências. Florianópolis**, 2009.

SILVA, L. H. de A.; ZANON, L. B. A experimentação no ensino de Ciências. In.: SCHNETZLER, R. P.; ARAGÃO, R. M. R. de. (Orgs.). **Ensino de Ciências: fundamentos e abordagens**. CampinasCapes/Unimep, 2000. p. 120-153.

SIQUEIRA, K. S. d. **Uma proposta de sequência didática para o ensino da física de materiais semicondutores. 2022. 281f.** Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física. Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022;

SOUZA, L. G.; SANTIAGO, L. R.; JESUS, V. L. B. d . Interferômetro de Michelson construído com material de fácil acesso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, p. e20190070, 2019.

UGALDE, M. C. P.; ROWEDER, C. Sequência didática: uma proposta metodológica de ensino-aprendizagem. **Educitec – Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico**. Manaus. Brasil, v. 6, n. ed. especial, p e99200, 2020

WESENDONK, F. S.; TERRAZZAN, E. A. Caracterização dos focos de estudo da produção acadêmico-científica brasileira sobre experimentação no Ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 3, p. 779-821, 2016.

ZABALA, A. **A prática educativa: como ensinar**. Penso Editora, 2015. Tradução Ernani F. da F. Rosa - Porto Alegre; Artmed, 1998.

## APÊNDICE A – MONTAGEM E COMPONENTES ESPECÍFICOS

### I - Trilho do espelho móvel (Mecânica)

Materiais utilizados:

- 01 – 01 Fuso trapezoidal de 150 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro com passo de 2 mm por revolução;
- 02 – 02 Mancais Kp08 com rolamento;
- 03 – 01 Castanha para fuso para fuso trapezoidal de 8 mm;
- 04 – 01 Bloco suporte para castanha de alumínio;
- 05 – 01 Eixo linear retificado de 150 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro;
- 06 – 02 Mancais fixos Sk08;
- 07 – 01 Pillow Block Sc8uu;
- 08 – 01 Motor de passo Nema 17 17HS4401.
- 09 – 01 Acoplador flexível 5mm 8mm;
- 10 – 01 Suporte para motor Nema 17;
- 11 – 08 Parafusos M4 de 40 mm;
- 12 – 04 Parafusos M4 de 30 mm;
- 13 – 12 Porcas M4;
- 14 – 12 Arruelas M4;
- 15 – 02 Mola de compressão 15x10 mm;
- 16 – 02 Compensadores de altura para o fuso;
- 17 – 02 Compensadores de altura para o eixo;
- 18 – 04 Parafusos M3 de 14 mm;
- 19 – 04 Arruelas M3;
- 20 - Amortecedores de EVA confeccionados.

Observado o intuito de desenvolvimento de um aparato de precisão e baixo custo relativo a um interferômetro de laboratórios estudantis, foram selecionadas peças de retificas e empregadas em usinagem, por suas menores folgas e imperfeições, com o emprego de alternativas e métodos para aquisição de resultados satisfatórios

Em primeiro momento, a castanha (03) é anexada ao seu suporte (04) e em seguida rosqueada ao fuso trapezoidal (01). Os mancais (02) são posicionados cada um em uma das

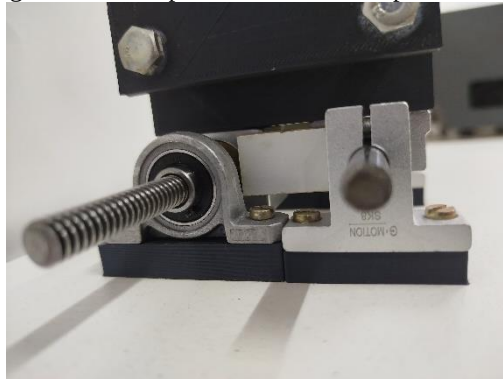


extremidades do fuso trapezoidal, cercando a castanha e seu suporte, O espaço livre para o movimento da castanha deve ser cerca de 80 mm, afastar os mancais de apoio a distâncias maiores podem resultar na flexão do fuso, causando instabilidade em rotações. Além disto, ao definir o lado que o motor (08) será fixo, apenas cerca de 18 mm do fuso deverão transpassar o mancal mais próximo ao motor. Este comprimento será dedicado inteiramente ao acoplamento com o eixo do motor

O motor é anexado ao seu suporte (10) utilizando os parafusos (18) e arruelas M3 (19) juntamente aos amortecedores de borracha (20). Os amortecedores desenvolvidos, utilizam 6 camadas de EVA de 1 mm presas por cola, evitando deslizamento entre recortes e possuindo por objetivo absorver parte da vibração transferida pelo motor. Os amortecedores ficam situados entre a base e arruela, o parafuso é rosqueado deformando o EVA até o fim da rosca do motor (Figura 38).

Para a ligação entre fuso e motor, é necessária a correção da diferença de altura entre os dois sistemas. Por impressão 3D foram desenvolvidos compensadores de altura (16), aplicados diretamente sob os mancais do fuso (Figura 47).

Figura 47 – Compensadores de altura para o trilho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

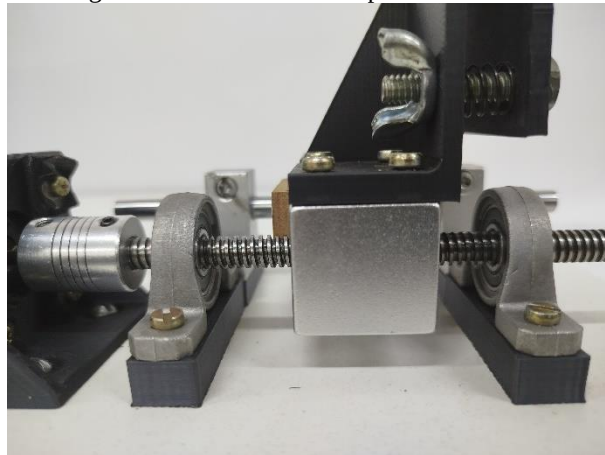
A conexão de ambos é realizada por meio de um acoplador flexível (9). Seus posicionamentos internamente ao acoplador devem ser dispostos meio a meio, evitando que se toquem. No eixo do motor, o parafuso de fixação do acoplador deve estar alinhado à sua parte chata, não gerando estresse a sua estrutura e assim ignorando a existência do parafuso subsequente.

Após a ligação de todos os componentes, o mecanismo pode ser fixo à base de MDF do espelho móvel. Centralizando-o, demarca e perfura-se as posições das fendas correspondentes aos mancais com compensadores e relativos ao suporte de motor. Este procedimento é crítico para o bom funcionamento do experimento, que carece de um bom alinhamento entre motor e

fuso, tal como, trilho e base. Para isto, utilizou-se uma régua em todo seu decorrer. Feitos os furos, são usados os parafusos de 40 mm (11), porcas (13) e arruelas M4 (14) com os amortecedores para sua instalação. Analogamente para o motor, sua parafusação utiliza os parafusos de 30 mm (12), porcas e arruelas M4, como também os amortecedores.

Sua configuração está representada na figura a seguir:

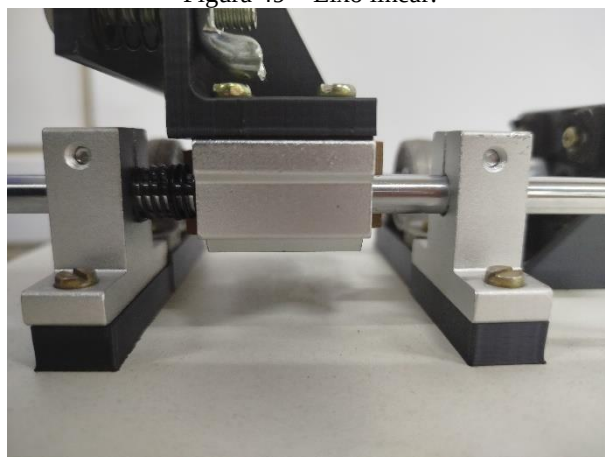
Figura 48 – Sistema fuso trapezoidal e motor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A montagem do suporte deslizante se inicia inserindo o pillow block (07) no eixo linear (05), que por sua vez é colocado nos mancais (06). De forma semelhante à delimitação de 80 mm no fuso, o passo a passo é refeito para eixo e seus mancais.

Figura 49 – Eixo linear.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O espelho e seu suporte serão presos ao suporte da castanha e ao pillow block simultaneamente, buscando igualar a altura do topo de ambos, são produzidos compensadores para os mancais fixos (Figura 47). O suporte de deslizamento é preso à base de mesmo modo

ao realizado anteriormente para o fuso, dispondo seus mancais lado a lado aos mancais com rolamentos, os alinhando com o auxílio de régua e por fim fixando-os com os parafusos de 40 mm, porcas e arruelas M4 com os amortecedores emborrachados. Desta forma, após sua montagem o eixo linear está organizado no modelo da Figura 49.

A escolha por materiais usinados parte do impacto direto nos resultados advindos de folgas, contudo, os itens escolhidos por seu custo abaixo no mercado dispõem de menor qualidade, com ainda presença de folga e imprecisões. Ocasionalmente na resistência do eixo ao deslocamento do fuso em primeira instância, rotacionando o espelho em torno do pillow block. A aplicação de tensão axial fornece a atenuação desses resultados, desse modo, incluiu-se ao eixo, duas molas de compressão, que forçam constantemente o pillow block a manter o movimento paralelo ao suporte da castanha. Além disso peças de MDF foram coladas a estes dois, para distribuição de forças de maneira igualitária (Figura 50).

Figura 50 – Correções de folgas do trilho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

## II - Trilho do espelho móvel (Elétrica)

Materiais utilizados:

- 01 – 01 Driver de micropassos Dm556;
- 02 – 01 Microcontrolador Arduino Uno;
- 03 – 01 Fonte de 24 V;
- 04 – 01 Protoboard;
- 05 – 11 Jumpers.

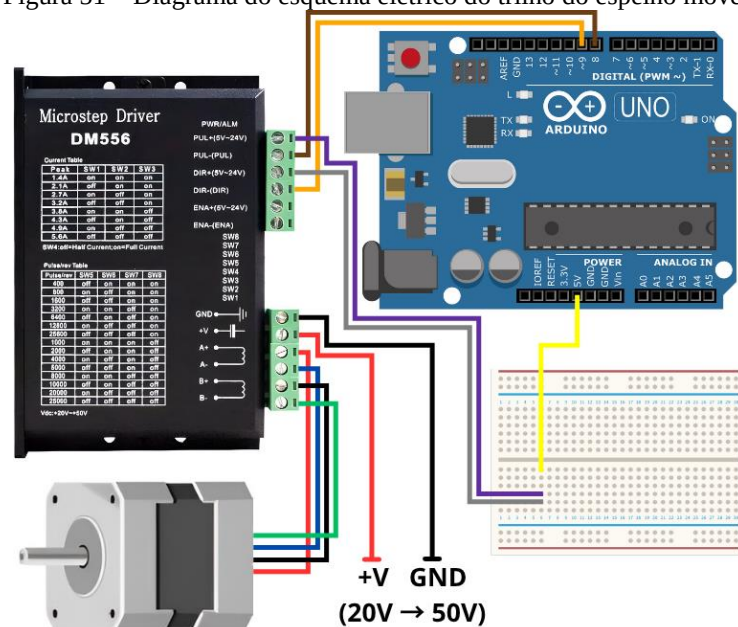
O sistema elétrico do motor do espelho móvel assemelhasse a sistemas de controle de alta precisão de maquinários industriais, contudo, estruturado em um arranjo simples e de fácil

reprodução. A Figura 51 apresenta o diagrama de distribuição de componentes:

A alimentação elétrica para motor ocorre de forma indireta, onde uma fonte de 24 V (03) fornece energia ao driver Dm556 (01) pelas portas GND e V+, que repassa em valores discretos à corrente elétrica ao motor a partir da sua configuração de *switches*.

O modelo de motor Nema 17 17HS4401, trabalha com corrente nominal de 1,7 A, mas será optou –se pelo valor de 1,4 A no driver. Correntes altas não necessariamente correspondem a qualidade de operação do motor e sim o ganho de torque a troco maiores vibrações e aquecimento. Nosso intuito, no entanto, é que o motor trabalhe com baixas cargas e velocidades, resultando em menores trepidações.

Figura 51 – Diagrama do esquema elétrico do trilho do espelho móvel.

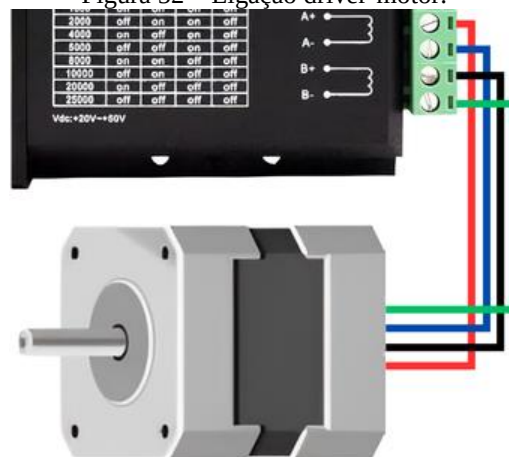


Fonte: Elaborado pelo autor.

O posicionamento dos *switches* 1, 2 e 3 são encarregados de regular a quantia de corrente que é enviada ao motor, com a combinação de seus estados ON e OFF. Para 1.4 A, tomaremos a posição ON para ambos os três.

O driver se conecta ao motor controlando fornecimento de corrente a seus indutores. Por ser um motor bipolar, seu movimento se dá da combinação dos dois campos induzidos internamente em sua bobina respectiva. O par A+ e A- diz respeito a um destes indutores, enquanto B+ e B- o outro indutor. A ligação entre os pinos de saída dos pares de bobinas é feita à respectiva bobina do motor, caso a saída do driver seja A+ deve ser conectada a entrada A+ do motor, por exemplo (Figura 52).

Figura 52 – Ligação driver-motor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)..

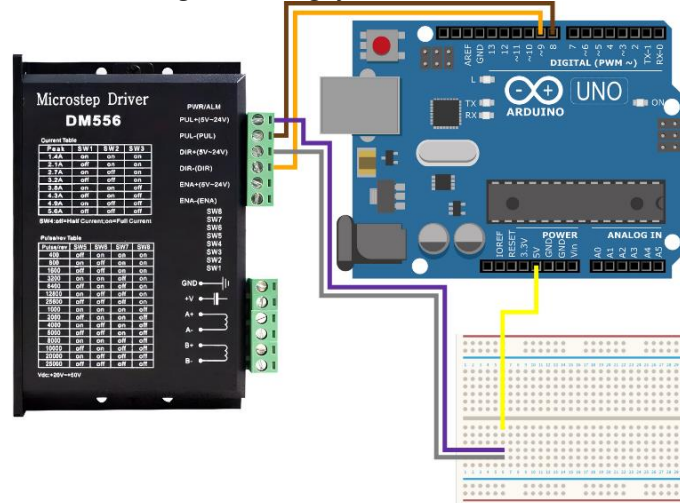
O fornecimento elétrico do driver por si só apenas trava o motor. O microcontrolador Arduino Uno (2) atua como o “cérebro”, encarregando o driver do envio de pulsos condizentes com determinada ação requerida pelo operador repassada ao Arduino. A conexão de ambos é feita por portas de saída (-) e entrada (+), diferentemente do caso driver e motor, que possui um único sentido de envio de corrente. As “ordens” do microcontrolador saem para o driver por suas portas digitais às portas “-”, no par PUL e DIR

O pino PUL tem como atribuição os valores de movimento, definindo a velocidade dos pulsos do driver e por consequência a velocidade dos passos do motor. O Arduino gera um sinal, sua largura representa a potência repassada pelo driver. Já o pino DIR, estabelece o sentido de rotação do motor, caso a porta receba o sinal de 5 V do Arduino o motor toma um sentido de giro, caso o sinal seja de 0 V toma o sentido inverso.

A atribuição dos pinos “+” ao microcontrolador carece do uso de uma protoboard (4), já que ambos são ligados a porta de alimentação única de 5 V do Arduino. Por sua vez, os pinos PUL (-) e DIR (+) são conectados respectivamente as portas digitais “8” e “9” do Arduino (Figura 53).

Por fim, o microcontrolador recebe fornecimento de energia direta da porta USB de um computador. Esse canal é responsável não apenas pela alimentação, como também a comunicação serial entre ambos, com envio e recebimento de informações.

Figura 53 – Ligação Arduino-Driver.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A divisão de passos escolhida corresponde a transformação de 200 passos por revolução para 25600 passos por revolução, resultando em uma resolução de 1/128 passos. A alteração é feita pelos *switches* 5, 6, 7 e 8, dispostos como ilustrado na figura a seguir.

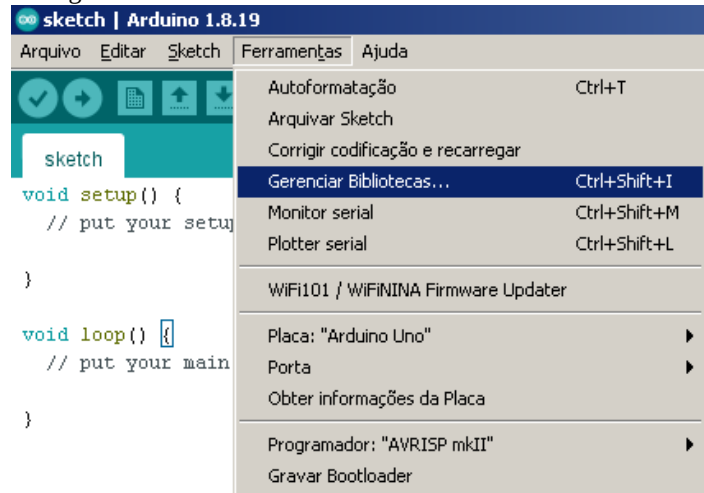
Figura 54 – Posição dos *switches* do driver.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### III - Configuração do software *Arduino IDE*

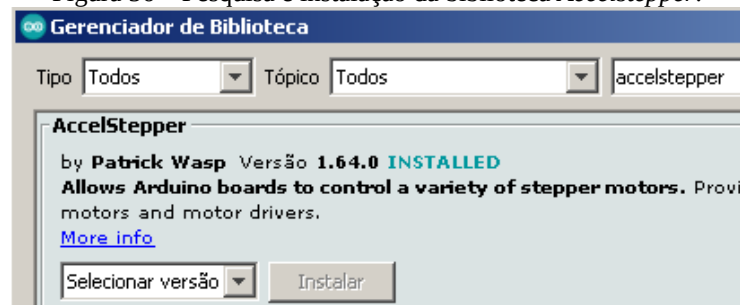
O código atribuído ao motor se baseia integralmente na biblioteca *Accelstepper*. Possibilitando a atribuição de funções e controle pela linguagem direta em passos. O software de programação utilizado é fornecido pelo próprio Arduino, o *Arduino IDE*, por sua gratuidade e suporte a todos os microcontroladores da marca.

A instalação do *Accelstepper* é realizada diretamente no software, na ferramenta de gerenciamento de bibliotecas (Figura 55).

Figura 55 – Gerenciamento de bibliotecas do *Arduino IDE*.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

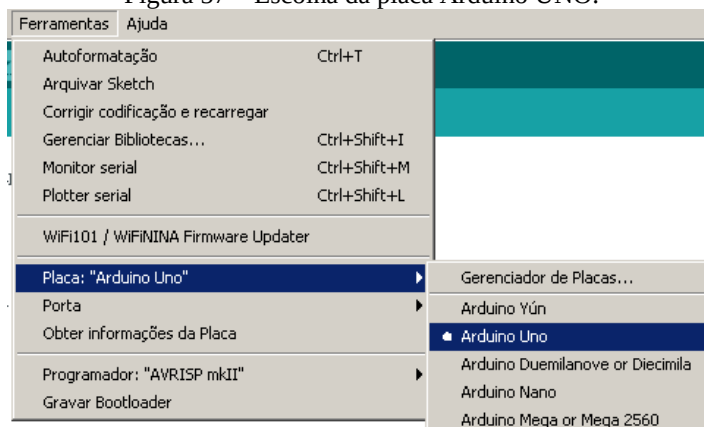
Sua busca é feita, então, a partir da pesquisa de biblioteca, como ilustrado na figura abaixo:

Figura 56 – Pesquisa e instalação da biblioteca *AccelStepper*.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Configurações como a escolha do modelo de microcontrolador e da porta USB a qual o Arduino está conectado são necessárias (Figura 57

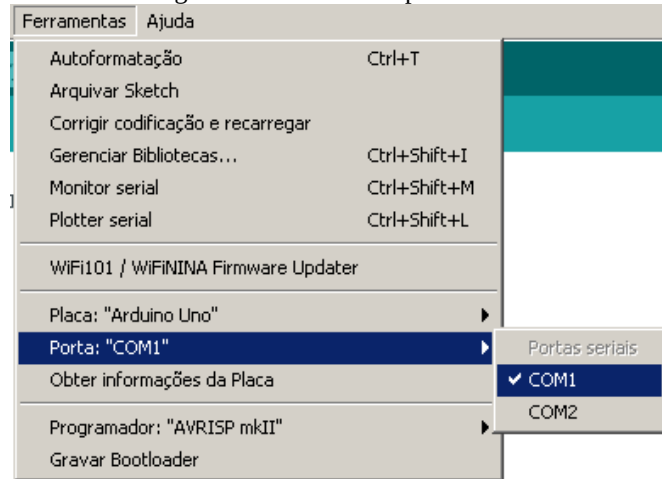
Figura 57 – Escolha da placa Arduino UNO.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A porta USB pode ser identificada verificando-se a porta COM que surge ao conectar o microcontrolador ao computador (Figura 58).

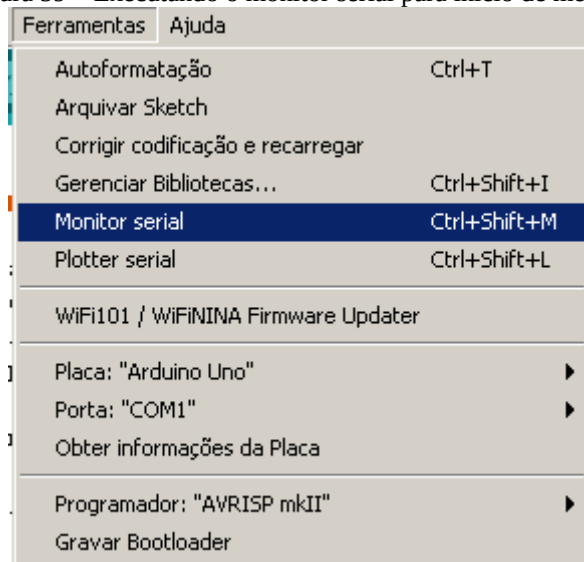
Figura 58 – Escolha da porta COM.



Fonte: Elaborado pelo autor

Realizado os ajustes iniciais, o código pode ser carregado e executado pelo Arduino. A operação do motor acontece pela entrada de comandos pelo monitor serial do Arduino IDE, como visto na figura a seguir:

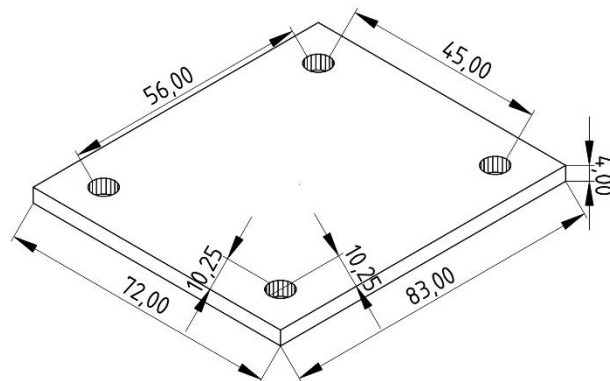
Figura 59 – Executando o monitor serial para início de medidas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

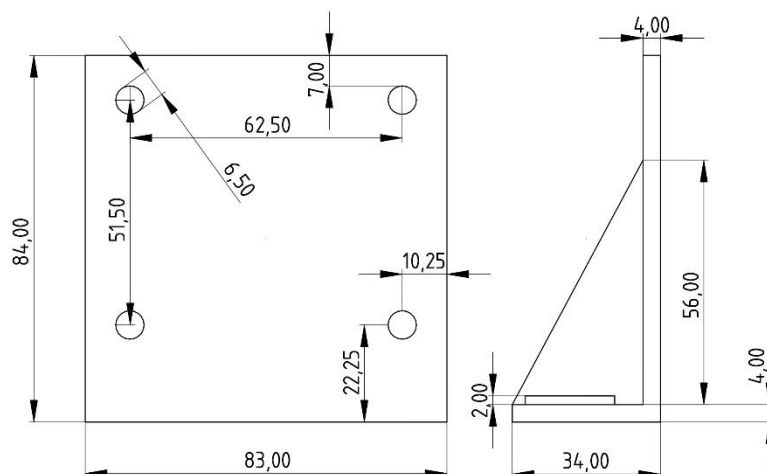


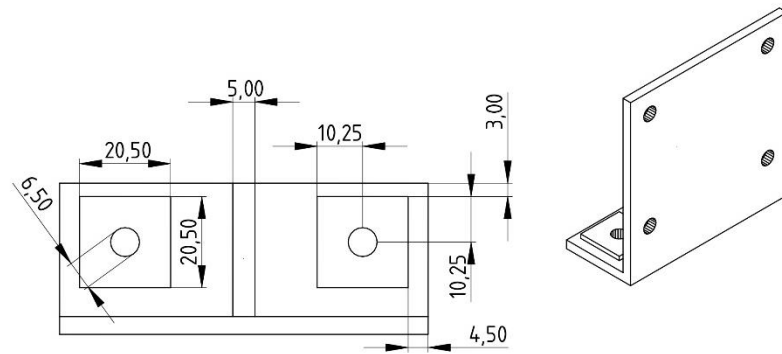
### V – Base do espelho (mm)



### VI – Suporte para o espelho fixo (mm)

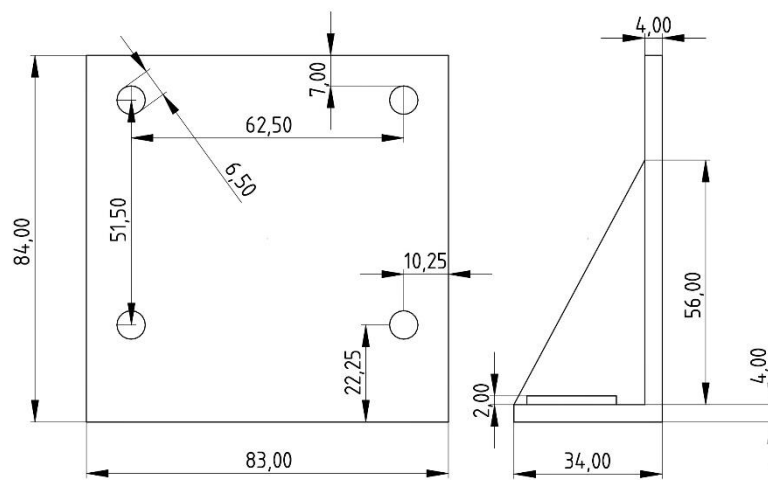
- 01 – 01 Base do espelho;
- 02 – 01 Suporte para o espelho fixo;
- 03 – 04 Parafusos sextavados M6 de 30 mm;
- 04 – 04 Mola de compressão 15x10 mm;
- 05 – 04 Porcas borboleta M6;
- 06 – 02 Parafusos M6 com fenda para fixação de 30 mm;
- 07 – 02 Porcas M6.

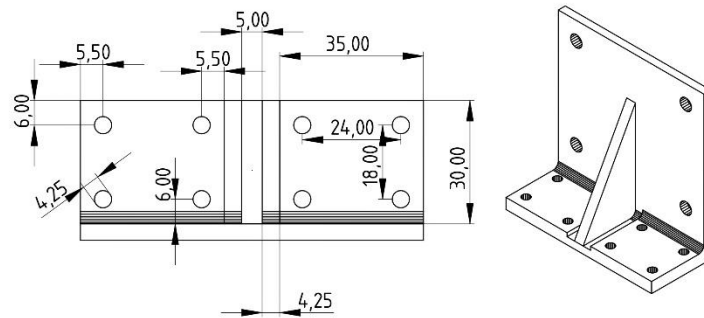




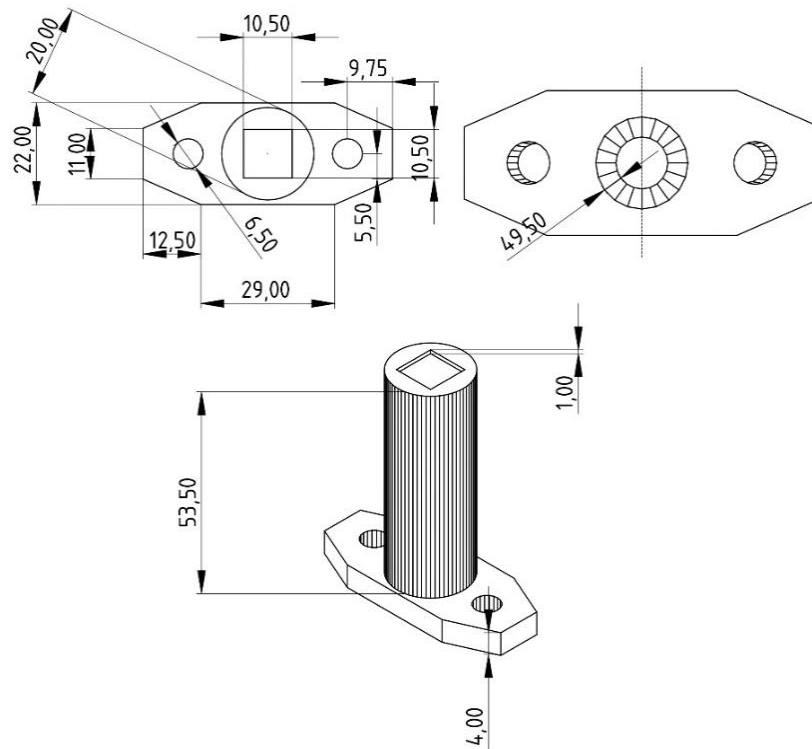
### VIII – Suporte para o espelho móvel

- 01 – 01 Base do espelho;
- 02 – 01 Suporte para o espelho móvel;
- 03 – 04 Parafusos sextavados M6 de 30 mm;
- 04 – 04 Mola de compressão 15x10 mm;
- 05 – 04 Porcas borboleta M6;
- 06 – 08 Parafusos de fixação M3 de 10 mm.



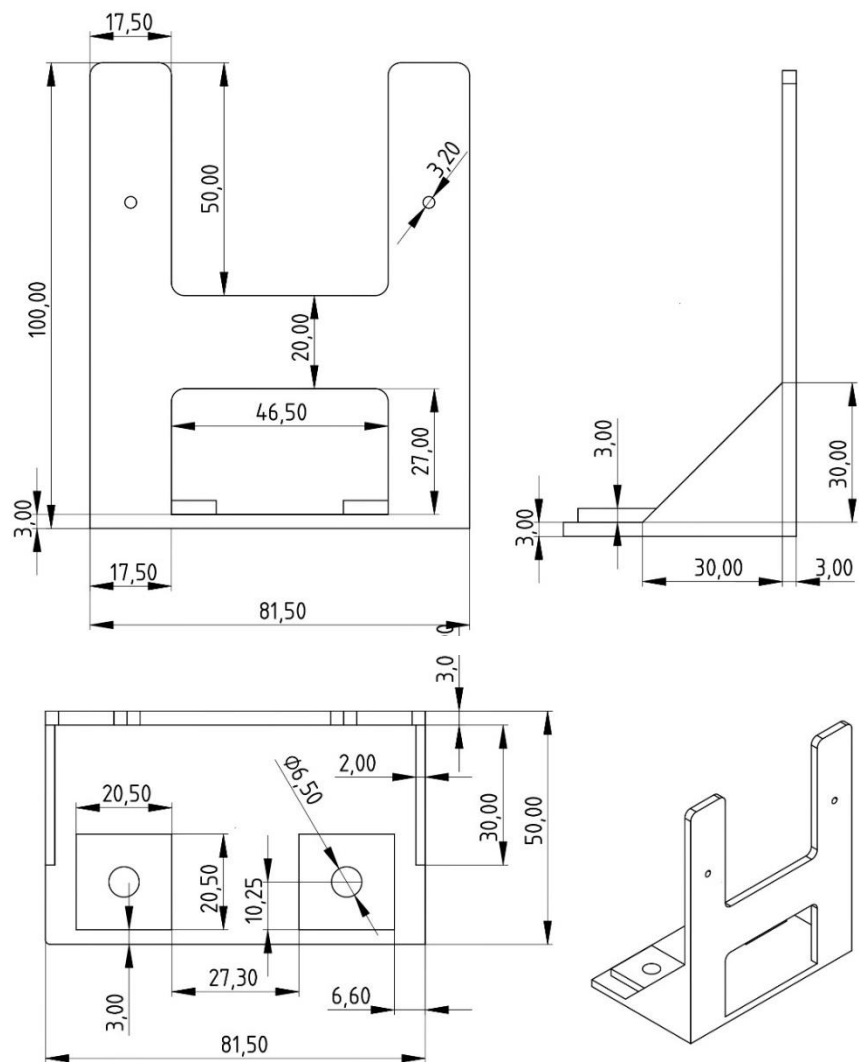
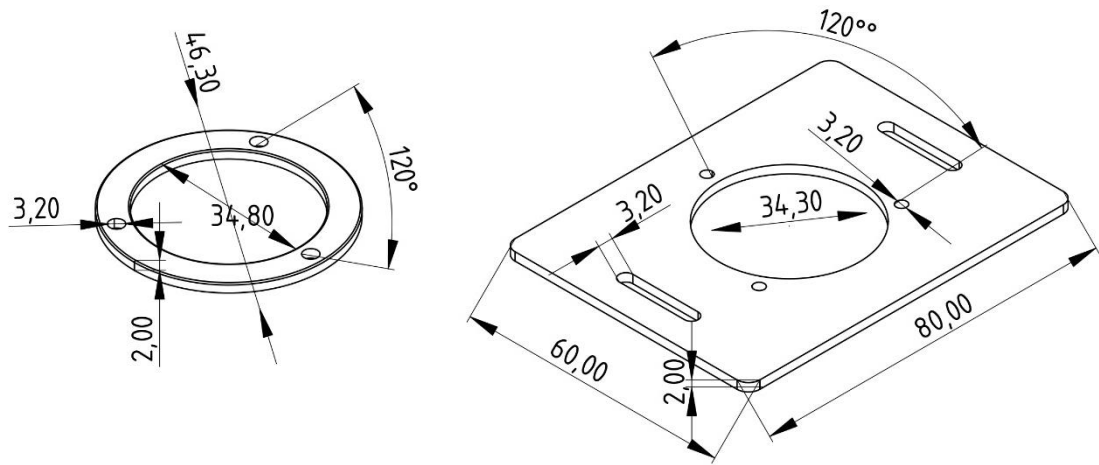


## VII – Suporte para o prisma



## IX – Suporte para a lente.

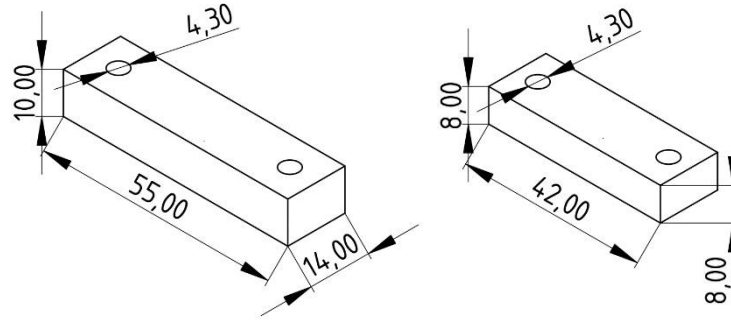
- 01 – Suporte para a lente;
- 02 – 05 Parafusos M3 de 5 mm de comprimento;
- 03 – 05 Porcas M3;
- 04 – 05 Arruelas M3.



**X – Compensadores de altura para o fuso trapezoidal e eixo linear**

01 – 02 Compensadore de altura para o fuso trapezoidal;

02 – 02 Compensadores de altura para o eixo linear.



## APÊNDICE B – CÓDIGO DO TRILHO DO ESPELHO MÓVEL

Incluída a biblioteca e definidas placa e porta serial o código já pode ser carregado no Arduino Uno e executado.

```
#include <AccelStepper.h>
```

`float` receivedSteps = 0; // Declara a variável receivedSteps e seu valor base, responsável por determinar o número de passos do motor.

`float` receivedSpeed = 0.3; // Declara a variável receivedSpeed e seu valor base, responsável por determinar a velocidade do motor em p/s (Passos por segundo).

`float` receivedAcceleration = 1; // Declara a variável receivedAcceleration e seu valor base, responsável por determinar a aceleração do motor em p/s<sup>2</sup> (Passos por segundo ao quadrado).

`int` directionMultiplier = 1; // Declara a variável directionMultiplier e seu valor base, responsável por determinar o sentido do movimento. 1 = positivo e -1 = negativo.

`char` receivedCommand; // Declara a variável responsável por determinar o comando recebido e a ser executado.

`bool` newData, runallowed = `false`; // Declara da variável newData e runallowed como falsas, responsáveis por informar o recebimento de novos dados e funcionamento do motor, respectivamente.

```
AccelStepper stepper(8, 9); // PUL Digital 8 e DIR Digital 9.
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
    Serial.begin(9600); // Baud rate máximo.
```

```
    Serial.println("Para imprimir os comandos, digite 'C'."); // Imprime na porta serial a
```

mensagem.

```
Serial.println();
```

```
Serial.println("Padrão: Velocidade: 0.3 p/s (Um passo a cada 3 segundos.) \n
Aceleração: 1 p/s^2 (Um passo por segundo ao quadrado.)");
```

```
// Imprime na porta serial a velocidade e aceleração padrão do motor.
```

```
stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.
```

```
}
```

```
void loop() // Executa periodicamente as funções dentro deste void.
```

```
{
```

```
checkSerial(); // Checa a entrada de comandos na porta serial.
```

```
RunTheMotor(); // Faz o motor executar a função respectiva determinada no serial.
```

```
}
```

```
void RunTheMotor() // Executa a função RunTheMotor, definindo se o motor irá ou não
executar alguma ação.
```

```
{
```

```
if (runallowed == true) // Se a variável runallowed é verdadeira...
```

```
{
```

```
stepper.enableOutputs(); // Habilita os pinos de saída.
```

```
stepper.run(); // Aciona o motor.
```

```
}
```

```
else // Caso contrário...
```

```

{

    stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.
    return; // Reinicia o loop de verificação.

}

}

```

`void checkSerial()` // Executa a função `checkSerial`, que caso possua algum valor referente a um comando, o efetua.

```

{
    if (Serial.available() > 0) // Se algo é enviado ao serial...

    {
        receivedCommand = Serial.read(); // Repassa o valor do serial a variável
receivedCommand.
        newData = true; // Define newData agora como verdadeiro.

        if (newData == true) // Se a variável newData é verdadeira...

        {
            switch (receivedCommand) // Checa o valor da variável receiveCommand e
executa o comando atribuído a ela.

            {

                case 'F': // Caso o valor da variável receivedCommand, ou seja, o valor informado
na porta serial seja 'F' move o motor...
                    // para determinada posição relativa e posterior a sua posição inicial.

                    receivedSteps = Serial.parseFloat(); // Valor de passos informados pelo

```



experimentador através da porta serial.

directionMultiplier = -1; // Define o sentido do movimento do espelho para frente. Devido ao uso de um fuso de rosca direita...

// o movimento anti-horário corresponde ao passo para frente.

**Serial.println();**

**Serial.println("Movimento positivo de: " + String(receivedSteps) + ("passos"));** // Imprime na porta serial a mensagem de direção do movimento como positiva.

RotateRelative(); // Executa a função RotateRelative.

// Exemplo: F 4000, inicia um movimento para frente com deslocamento de 4000 passos de sua posição inicial com a velocidade predefinida.

**break;** // Encerra o loop.

**case 'T':** // Caso o valor da variável receivedCommand. ou seja, o valor informado na porta serial seja 'T', move o motor...

// para determinada posição relativa e anterior a sua posição inicial.

receivedSteps = Serial.parseFloat(); // Valor de passos informados pelo experimentador através da porta serial.

directionMultiplier = 1; // Define o sentido do movimento do espelho para trás. Devido ao uso de um fuso de rosca direita...

// o movimento horário corresponde ao passo para trás.

**Serial.println();**

**Serial.println("Movimento negativo de: " + String(receivedSteps) + ("passos"));** // Imprime na porta serial a mensagem de direção do movimento como negativa.

RotateRelative(); // Executa a função RotateRelative.

// Exemplo: T 4000, inicia um movimento para trás com deslocamento de 4000 passos de sua posição inicial com a velocidade predefinida.

**break;** // Encerra o loop.

**case 'P':** // Caso o valor da variável receivedCommand, ou seja, o valor

informado na porta serial seja 'P', o motor cessa seu movimento.

```
stepper.stop(); // Para o motor.
```

```
stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.
```

```
Serial.println();
```

`Serial.println("O motor foi parado.");` // Imprime na porta serial a mensagem que o motor foi parado.

```
runallowed = false; // Suspende a atividade do motor.
```

```
break; // Encerra o loop.
```

`case 'A':` // Caso o valor da variável `receivedCommand`, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'A', é recebido um novo valor em  $\text{p/s}^2$  para aceleração do motor.

`runallowed = false;` // Suspende a atividade do motor para inserção da nova variável.

```
stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.
```

`receivedAcceleration = Serial.parseFloat();` // Valor da nova aceleração informada através da porta serial.

`stepper.setAcceleration(receivedAcceleration);` // Define o novo valor de aceleração.

```
Serial.println();
```

`Serial.println("Novo valor de aceleração: " + String(receivedAcceleration) + (" p/s^2"));` // Imprime na porta serial a mensagem.

// Exemplo: A 400, o motor terá sua aceleração anterior substituída pela aceleração de  $400 \text{ p/s}^2$ .

```
break; // Encerra o loop.
```

`case 'V':` // Caso o valor da variável `receivedCommand`, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'V', é recebido um novo valor em  $\text{p/s}$  para velocidade do motor.

`runallowed = false;` // Suspende a atividade do motor para inserção da nova

variável.

```
stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.
```

receivedSpeed = **Serial.parseFloat()**; // Valor da nova velocidade informada através da porta serial.

stepper.**setAcceleration**(receivedAcceleration); // Define o novo valor de velocidade.

```
Serial.println();
```

```
Serial.println("Novo valor de velocidade: " + String(receivedSpeed) + (" p/s")); // Imprime na porta serial a mensagem.
```

// Exemplo: V 400, o motor terá sua velocidade anterior substituída pela velocidade de 400 p/s.

// A biblioteca Accelstepper funciona com múltiplos inteiros de um passo por segundo, ou seja, resolução mínima de um passo.

// Portanto, decimais de velocidade implicam em uma velocidade média deste valor, porém, a passos inteiros.

// Exemplo: V 0.1, O motor se deslocará com velocidade média de 0.1 passos por segundo, sendo assim 1 passo a cada dez segundos;

```
break; // Encerra o loop.
```

**case 'L':** // Caso o valor da variável receivedCommand, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'L', informa a localização atual do motor.

```
runallowed = false; // Suspende a atividade do motor.
```

```
stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.
```

```
Serial.println();
```

```
Serial.println("Atual      localização      do      motor:      "      +  
String(stepper.currentPosition()) + (" passos da origem")); // Imprime na porta serial a mensagem.
```

```
break; // Encerra o loop.
```

`case 'O':` // Caso o valor da variável `receivedCommand`, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'O', move o motor de volta a origem.

```
runallowed = true; // Inicia a atividade do motor.
```

```
Serial.println();
```

```
Serial.println("Retorno à origem"); // Imprime na porta serial a mensagem.
```

```
GoHome(); // Executa a função Gohome.
```

```
break; // Encerra o loop.
```

`case 'N':` // Caso o valor da nova variável `receivedCommand`, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'N'...

```
// a atual localização se tornará a origem das coordenadas de movimento
```

```
runallowed = false; // Suspende a atividade do motor.
```

```
stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.
```

```
stepper.setCurrentPosition(0); //Define a posição atual do motor como em 0 passos, ou seja, uma nova origem.
```

```
Serial.println();
```

```
Serial.println("Nova origem definida"); // Imprime na porta serial a mensagem.
```

```
break; // Encerra o loop.
```

`case 'C':` // Caso o valor da variável `receivedCommand`, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'C', imprime no serial todos os comandos.

```
PrintCommands(); // Executa a função PrintCommands.
```

```
break; // Encerra o loop.
```

`case 'v':` // Caso o valor da variável `receivedCommand`, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'V' imprime no serial a velocidade predefinida do motor.

```
Serial.println();
```

```
Serial.println("Atual velocidade do motor: " + String(stepper.speed()) + ("p/s")); // Imprime na porta serial a mensagem.
```

```
break; // Encerra o loop.
```

`case 'a':` // Caso o valor da variável `receivedCommand`, ou seja, o valor informado na porta serial seja 'a' imprime no serial a velocidade e aceleração predefinidas do motor.

```
Serial.println();
```

```
Serial.println("Atual velocidade do motor: " + String(receivedSpeed) + ("p/s")); // Imprime na porta serial a mensagem.
```

```
Serial.println("Atual aceleração do motor: " + String(receivedAcceleration) + (" p/s^2")); // Imprime na porta serial a mensagem.
```

```
break; // Encerra o loop.
```

`default:` // Caso o valor da variável `receivedCommand` não corresponda a um comando específico encerra o loop.

```
break; // Encerra o loop.
```

```
}
```

```
}
```

`newData = false;` // Define `newData` como falso ao fim de uma função e a prepara para o recebimento de novos comandos.

```

    }

}

void GoHome()

{

    if (stepper.currentPosition() == 0) // Se a atual posição do motor é zero, ou seja, a
origem...

    {

        Serial.println();
        Serial.println("Já estamos na origem"); // Imprime na porta serial a mensagem.
        stepper.setAcceleration(1); // Define valor de aceleração ao seu valor inicial.
        stepper.disableOutputs(); // Desativa os pinos de saída.

    }

    else // Caso contrário...

    {

        stepper.setAcceleration(1); // Define um novo valor de aceleração de 100 p/s^2.
        stepper.setMaxSpeed(0.3); // Define um novo valor de velocidade de 400 p/s.

        stepper.moveTo(0); // Movimenta o motor de maneira absoluta a origem, portanto,
levando em conta todos os deslocamentos em sua memória.

    }

}

```

```
void RotateRelative()

{

    runallowed = true; // Inicia a atividade do motor.

    if (receivedSpeed == 0) // Se a velocidade recebida no serial seja 0, ou caso não seja
informada...

    {

        stepper.setMaxSpeed(1); // Define o valor de velocidade como 1 p/s.

    }

    else // Caso contrário...

    {

        stepper.setMaxSpeed(receivedSpeed); // Define o valor de velocidade de acordo
com o valor pré-definido.

    }

    stepper.move(directionMultiplier * receivedSteps); // Define o sentido e o
deslocamento a ser feito pelo motor

}

void PrintCommands()

{

    Serial.println();
```

```
Serial.println (" 'F' : Move o espelho para frente");  
Serial.println (" 'T' : Move o espelho para trás.");  
Serial.println (" 'P' : Para o movimento do motor");  
Serial.println (" 'V' : Altera o valor da velocidade.");  
Serial.println (" 'A' : Altera o valor da aceleração.");  
Serial.println (" 'O' : Retorna à posição de origem.");  
Serial.println (" 'N' : Define a posição atual como origem.");  
Serial.println (" 'L' : Informa a atual localização do motor.");  
Serial.println (" 'v' : Informa a atual velocidade do motor.");  
Serial.println (" 'a' : Informa a velocidade e aceleração predefinidas do motor.");  
  
}
```



## APÊNDICE C – SEQUÊNCIA DIDÁTICA

**Objetivo Geral:** Realizar o estudo a respeito da interferometria, reconhecendo a natureza ondulatória da luz e suas aplicações tecnológicas.

| <b>Etapas</b>                                                        | <b>Descrição de Atividade</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Duração</b> |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>1. Situação-Problema:<br/>De onde vem a cor azul na natureza?</b> | Baseado na questão disparadora “Como a natureza reproduz a cor azul sem um pigmento? ”, os discentes desenvolveram hipóteses. Direcionado pelo professor, esse momento será orientado a problematização do fenômeno. Posteriormente, são levantadas proposições de sua aplicabilidade tecnológica.                   | 1 hora         |
| <b>2. Percorso histórico da luz como onda.</b>                       | A partir de uma linha do tempo serão feitos os resgates da evolução da teoria acerca da propriedade ondulatória da luz de C. Huygens a J. Maxwell.                                                                                                                                                                   | 1 hora         |
| <b>3. Ondas mecânicas e eletromagnéticas.</b>                        | Resgate das propriedades de ondas mecânicas, como suas classificações e propriedades. Relacionando-as com as ondas eletromagnéticas, denotando suas semelhanças e suas características próprias.                                                                                                                     | 1 hora         |
| <b>4. Espectro eletromagnético e a luz visível.</b>                  | Análise das características do espectro eletromagnético e a categorização das diferentes cores de luz visível quanto sua frequência. Por fim, será apresentado um DVD como decompositor da luz branca, como problematização aos alunos, que retornarão a próxima aula com uma proposta ao observado na demonstração. | 1 hora         |
| <b>5. Interferência ótica.</b>                                       | A aula se iniciará pelo levantamento de argumentos trazidos pelos alunos ou ainda questões levantadas. Introduzindo-os ao fenômeno de interferência da luz, as diferenças de fase e caminhos óticos.                                                                                                                 | 1 hora         |
| <b>6. A Hipótese Etérea.</b>                                         | O docente comunicará a atividade aos discentes, como uma pesquisa a respeito do éter luminífero, como definições, surgimento e desafios. Artigos, livros, revistas e o trabalho “Sobre o movimento                                                                                                                   | 2 horas        |

|                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |         |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|                                                                    | relativo da Terra e o Éter Luminífero” de A. Michelson e E. Morley serão previamente selecionados pelo professor, delimitando e orientando a busca dos alunos. Logo após, em um momento de socialização, serão expostas as informações encontradas e as sínteses dos alunos. Nesta ocasião, cabe o professor o papel de questionador e mediador, visando não apenas avaliar o entendimento do aluno sobre o éter e a luz, mas também enfatizar o método científico adotado e a superação de hipóteses, ou ainda, sua resistência, como um processo fluído. |         |
| <b>7. O interferômetro de Michelson-Morley.</b>                    | Análise do interferômetro produzido por A. Michelson e E. Morley, revisitando os conceitos de interferência e fase de oscilação utilizados em sua construção. Avaliando as previsões para o experimento original.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1 hora  |
| <b>8. Atividade laboratorial:<br/>Medida do comprimento de luz</b> | Prévia apresentação do interferômetro automatizado e ao software de comandos. Medira-se o comprimento de onda da luz de uma ponteira LASER, investigando os padrões de interferência originados e o deslocamento de franjas com o uso do roteiro auxiliar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2 horas |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

APÊNDICE D – RELATIVE MOTION OF THE EARTH AND THE ETHER  
LUMINIFEROUS

THE  
  
AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE  
  
[T H I R D   S E R I E S.]



ART. XXXVI.-*Sobre o Movimento Relativo da Terra e o Éter Lumiífero*;  
por Albert A. Michelson e Edward W. Morley.\*

A descoberta da aberração da luz foi logo seguida por uma explicação de acordo com a teoria da emissão. O efeito foi atribuído a uma composição simples da velocidade da luz com a velocidade da Terra em sua órbita. As dificuldades nessa explicação aparentemente suficiente foram negligenciadas até que uma explicação sobre a teoria ondulatória da luz foi proposta. Essa nova explicação foi a princípio quase tão simples quanto a anterior. Mas não conseguiu explicar o fato provado por experimentos de que a aberração não mudou quando as observações foram feitas com um telescópio cheio de água. Pois se a tangente do ângulo de aberração é a razão entre a velocidade da Terra e a velocidade da luz, então, uma vez que a última velocidade na água é três quartos de sua velocidade no vácuo, a aberração observada com um telescópio aquático deve ser quatro terços de seu valor verdadeiro.†

\* Esta pesquisa foi realizada com o auxílio do Fundo Bache.

†Pode-se notar que a maioria dos escritores admite a suficiência da explicação de acordo com a teoria da emissão da luz; enquanto, na verdade, a dificuldade é ainda maior do que segundo a teoria ondulatória. Pois, na teoria da emissão, a velocidade da luz deve ser maior no telescópio aquático, e, portanto, o ângulo de aberração deveria ser menor; assim, para reduzi-lo ao seu verdadeiro valor, devemos fazer a hipótese absurda de que o movimento da água no telescópio carrega o raio de luz na direção oposta!

AM. JOUR. Sci.-THIRD SERIES, VOL. XXXIV, No. 203.-Nov., 1887.

Na teoria ondulatória, de acordo com Fresnel, primeiro, o éter deve estar em repouso, exceto no interior de meios transparentes, no qual, em segundo lugar, ele deve se mover com uma velocidade menor que a velocidade do meio na razão  $\frac{n^2-1}{n^2}$ , onde  $n$  é o índice de refração. Essas duas hipóteses dão uma explicação completa e satisfatória da aberração. A segunda hipótese, apesar de sua aparente improbabilidade, deve ser considerada como totalmente comprovada, primeiro, pelo célebre experimento de Fizeau,\* e, em segundo lugar, pela ampla confirmação de nosso próprio trabalho.† O ensaio experimental da primeira hipótese constitui o tema do presente artigo.

Se a Terra fosse um corpo transparente, talvez se pudesse admitir, em vista dos experimentos que acabamos de citar, que o éter intermolecular estava em repouso no espaço, apesar do movimento da Terra em sua órbita; mas não temos o direito de estender a conclusão desses experimentos a corpos opacos. Mas dificilmente pode haver dúvida de que o éter pode e passa pelos metais. Lorentz cita a ilustração de um tubo de barômetro metálico. Quando o tubo está inclinado, o éter no espaço acima do mercúrio é certamente forçado a sair, pois é incompressível.‡ Mas, novamente, não temos o direito de supor que ele escape com perfeita liberdade, e se houver alguma resistência, por menor que seja, certamente não poderíamos supor que um corpo opaco como toda a Terra oferecesse passagem livre por toda a sua massa. Mas, como Lorentz observa apropriadamente: "Seja como for, faríamos bem, na minha opinião, em não nos deixarmos guiar em uma questão tão importante, pelo grau de probabilidade ou simplicidade de uma ou outra hipótese, mas sim recorrer à experiência para aprender a conhecer o estado, de repouso ou movimento, em que se encontra encontre éter na superfície da Terra." §

Em abril de 1881, um método foi proposto e executado para testar a questão experimentalmente. ||

Ao deduzir a fórmula da quantidade a ser medida, o efeito do movimento da Terra através do éter no caminho do raio em ângulo reto com esse movimento foi negligenciado. ¶

\* Comptes Rendus, xxxiii, 349, 1851 ; Pogg. Ann. Ergänzungsband, iii, 457, 1853; Ann. Chim. Phys., III, lvii, 385, 1859.

† Influência do movimento do meio na velocidade da luz. Este jornal, III, xxxi, 377, 1886.

‡ Pode-se objetar que pode escapar pelo espaço entre o mercúrio e as paredes; mas isso poderia ser evitado pela fusão das paredes.

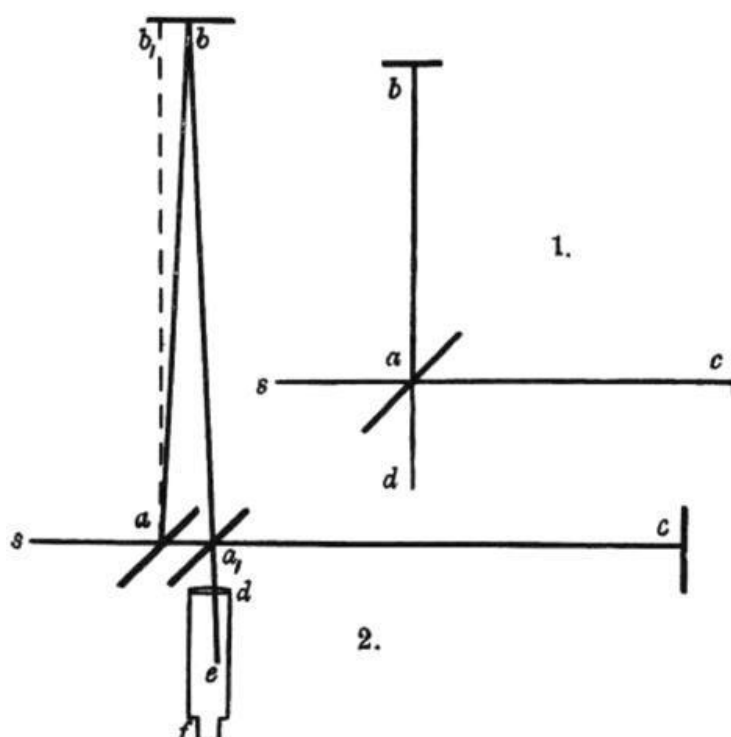
§ Arquivos Néerlandaises, xxi, 2<sup>me</sup> livr.

|| O movimento relativo da Terra e do éter luminífero, por Albert A. Michelson, este jornal, III, xxii, 120.

¶ Pode ser mencionado aqui que o erro foi levado ao autor do antigo artigo de M. A. Potier, de Paris, no inverno de 1881.

A discussão desse descuido e de todo o experimento é objeto de uma análise muito minuciosa de H. A. Lorentz,\* que descobre que esse efeito não pode de forma alguma ser desconsiderado. Em consequência, a quantidade a ser medida tinha, de fato, apenas metade do valor suposto, e como já estava pouco além dos limites dos erros do experimento, a conclusão tirada do resultado do experimento poderia muito bem ser questionada; Como, no entanto, a parte principal da teoria permanece inquestionável, decidiu-se repetir o experimento com modificações que garantissem um resultado teórico grande demais para ser mascarado por erros experimentais. A teoria do método pode ser resumidamente declarada da seguinte forma:

Seja **sa**, fig. 1, um raio de luz que é parcialmente refletido em **ab** e parcialmente transmitido em **ac**, sendo retornado pelos espelhos **b** e **c**, ao longo de **ba** e **ca**. **ba** é parcialmente transmitido ao longo de **ad**,



e **ca** é parcialmente refletido ao longo do anúncio. Se então os caminhos **ab** e **ac** são iguais, os dois raios interferem ao longo de **ad**. Suponha agora, estando o éter em repouso, que todo o aparelho se mova na direção **sc**, com a velocidade da Terra em sua órbita, as direções

\* Sobre a Influência do Movimento da Terra no Phen. Lum. Arquivos Holandeses, xxi, 2<sup>me</sup> livr., 1886.

e distâncias percorridas pelos raios serão alteradas assim: - O raio **sa** é refletido ao longo de **ab**, fig. 2; O ângulo **bab**, sendo igual à aberração  $=a$ , é retornado ao longo de **ba**, (**aba**  $=2a$ ), e vai para o foco do telescópio, cuja direção não foi alterada. O raio transmitido segue ao longo de **ac**, é retornado ao longo de **ca**, e é refletido em **a**, tornando **ca** e igual a  $90^\circ$ , e, portanto, ainda coincidindo com o primeiro raio. Pode-se observar que os raios **ba** e **ca** não se encontram agora exatamente no mesmo ponto **a**, embora a diferença seja de segunda ordem; Isso não afeta a validade do raciocínio. Sendo agora necessário encontrar a diferença nos dois caminhos **aba** e **aca**.

Nomeando  $V$  = Velocidade da Luz.

$v$  = Velocidade da Terra em sua órbita.

$D$  = Distância **ab** ou **ac**, fig. 1.

$T$  = Tempo para que a luz passe de **a** para **c**.

$T_1$  = Tempo para que a luz retorne de **c** para **a**.

Então  $T = \frac{D}{V-u}$ ,  $T_1 = \frac{D}{V+u}$ . O tempo total para ir e vir  $T + T_1 = 2D \frac{V}{V^2-u^2}$ , e a

distância percorrida neste tempo é  $2D \frac{V^2}{V^2-u^2} = 2D(1 + \frac{u^2}{V^2})$ , negligenciando os

termos da quarta ordem. O comprimento do outro caminho é evidentemente

$2D\sqrt{(1 + \frac{u^2}{V^2})}$ , ou com mesmo grau de precisão,  $2D(1 + \frac{u^2}{2V^2})$ . A diferença é,

portanto,  $D \frac{u^2}{V^2}$ . Se agora todo o aparelho for girado em  $90^\circ$ , a diferença será na

direção oposta, portanto, o deslocamento das franjas de interferência deve ser

$2D \frac{u^2}{V^2}$ . Considerando apenas a velocidade da Terra em sua órbita, isso seria  $2D \times$

$10^{-8}$ . Se, como foi o caso no primeiro experimento,  $D \times 10^{-6}$  ondas de luz amarela, o deslocamento esperado seria de 0,04 da distância entre as franjas de interferência.

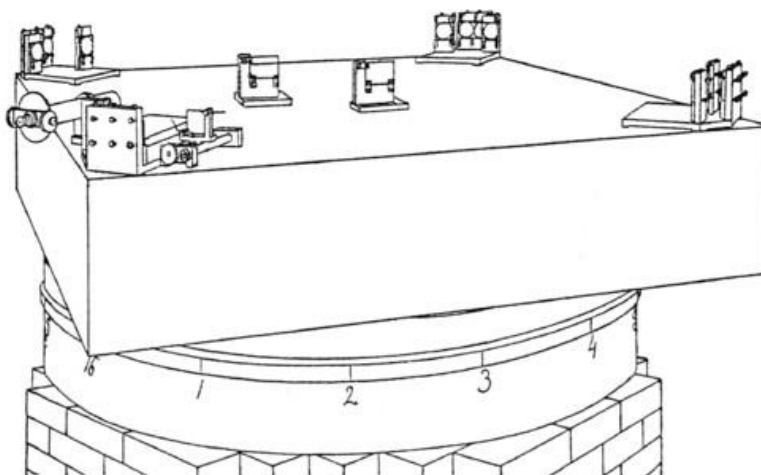
No primeiro experimento, uma das principais dificuldades encontradas foi a de girar o aparelho sem produzir distorção; e outra era sua extrema sensibilidade à vibração. Isso era tão grande que era impossível ver as franjas de interferência, exceto em breves intervalos do trabalho na cidade, às duas horas da manhã. Finalmente, como observado anteriormente, a quantidade a ser observada, ou seja, um deslocamento de algo menor que um vigésimo da distância

entre as franjas de interferência pode ter sido muito pequena para ser detectada quando mascarada por erros experimentais.

As primeiras dificuldades mencionadas foram inteiramente superadas pela montagem do aparelho em uma pedra maciça flutuando sobre mercúrio; e o segundo, aumentando, por reflexão repetida, o caminho da luz para cerca de dez vezes seu valor anterior.

O aparelho é representado em perspectiva na fig. 3, em planta na fig. 4 e em seção vertical na fig. 6. A pedra *a* (fig. 5) tem cerca de 1,5 metros quadrado e 0,3 metros de espessura. Ele repousa sobre um flutuador de madeira anular *bb*, 1,5 metro de diâmetro externo, 0,7 metros de diâmetro interno e 0,25 metros de espessura. O flutuador repousa sobre o mercúrio contido na calha de ferro fundido *cc*, com 1,5 centímetro de espessura, e de dimensões tais que deixam uma folga de cerca de um centímetro ao redor do flutuador. Um pino *d*, guiado por braços *gggg*, se encaixa em um soquete e preso ao flutuador. O pino pode ser empurrado para dentro do soquete ou ser retirado, por uma alavanca girada em *f*. Este pino mantém o flutuador concêntrico com a calha, mas não suporta nenhuma parte do peso da pedra. A calha de ferro anular repousa sobre um leito de cimento em um píer baixo de tijolos construído na forma de um octógono oco.

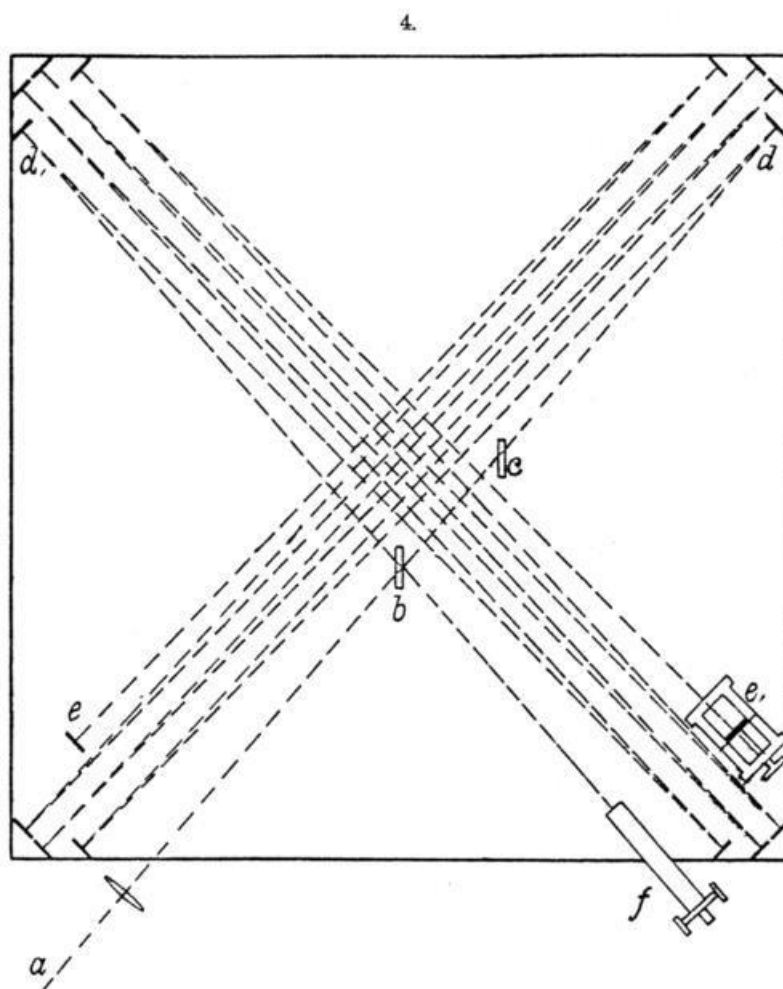
3.



Em cada canto da pedra foram colocados quatro espelhos *dd ee* fig. 4. Perto do centro da pedra havia um vidro paralelo ao plano *b*. Estes estavam dispostos de tal forma que a luz de um queimador de argand *a*, passando por uma lente, caía sobre *b* de modo a ser em parte refletida para *d*; Os dois lápis seguiram os caminhos indicados na figura, *bdedb* e *bd/e/d/bf* respectivamente, e foram observados pelo telescópio *f*. Tanto *f* quanto *a* giravam com a pedra. Os espelhos eram de metal especular cuidadosamente trabalhado para aplainar opticamente superfícies de cinco centímetros de diâmetro, e os vidros *b* e *c* eram paralelos ao plano e da mesma espessura. 1,25 centímetro;

suas superfícies mediam 5,0 por 7,5 centímetros. O segundo deles foi colocado no caminho de um dos lápis para compensar a passagem do outro pela mesma espessura de vidro. Toda a parte óptica do aparelho foi mantida coberta com uma tampa de madeira para evitar correntes de ar e mudanças rápidas de temperatura.

O ajuste foi efetuado da seguinte forma: Os espelhos foram ajustados por parafusos nas peças fundidas que seguravam os

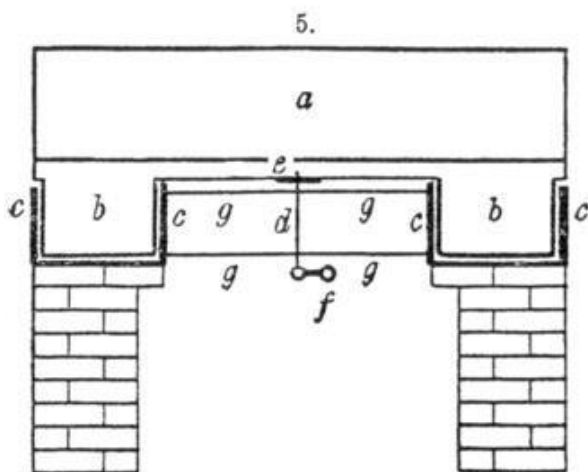


espelhos, contra os quais eram pressionados por molas, até que a luz de ambos os lápis pudesse ser vista no telescópio, os comprimentos dos dois caminhos eram medidos por uma haste de madeira leve que alcançava diagonalmente de espelho a espelho, a distância sendo lida de uma pequena escala de aço a décimos de milímetros. A diferença nos comprimentos dos dois caminhos foi então anulada movendo o espelho  $e$ . Este espelho teve três ajustes; tinha um ajuste de altitude e outro de azimute, como todos os outros espelhos,



mas mais fino; Ele também tinha um ajuste na direção do raio incidente, deslizando para frente ou para trás, mas mantendo-se muito precisamente paralelo ao seu plano anterior. Os três ajustes deste espelho podem ser feitos com a tampa de madeira na posição.

Os caminhos sendo agora aproximadamente iguais, as duas imagens da fonte de luz ou de algum objeto bem definido colocado na frente da lente de condensação foram feitas para coincidir, o telescópio foi agora ajustado para visão distinta das bandas de interferência esperadas e a luz de sódio foi substituída pela luz branca, quando as bandas de interferência apareceram. Estes agora eram os mais claros possível ajustando o espelho e /, então a luz branca foi restaurada, o parafuso alterando o comprimento do caminho foi movido muito lentamente (uma volta de um parafuso de cem fios por polegada



alterando o caminho quase 1000 comprimentos de onda) até que as franjas de interferência coloridas reaparecessem na luz branca. Estes agora receberam uma largura e posição convenientes, e o aparelho estava pronto para observação.

As observações foram conduzidas da seguinte forma: Ao redor da calha de ferro fundido havia dezesseis marcas equidistantes. O aparelho foi girado muito lentamente (uma volta em seis minutos) e depois de alguns minutos o fio transversal do micrômetro foi colocado na mais clara das franjas de interferência no instante de passar por uma das marcas. O movimento foi tão lento que isso pôde ser feito com rapidez e precisão. A leitura da cabeça do parafuso no micrômetro foi anotada, e um impulso muito leve e gradual foi dado para manter o movimento da pedra; Ao passar a segunda marca, o mesmo processo foi repetido, e isso continuou até que o aparelho completasse seis revoluções. Verificou-se que, mantendo o aparelho em movimento lento e uniforme, os resultados eram muito mais uniformes e consistentes do que quando a pedra era colocada em repouso para cada observação; pois os efeitos das tensões podiam ser notados por pelo menos meio minuto depois que a pedra parava, e durante esse tempo os efeitos da mudança de temperatura entravam em ação.

As tabelas a seguir fornecem as médias das seis leituras; o primeiro, para observações feitas perto do meio-dia, o segundo, aqueles perto das seis horas da noite. As leituras são divisões das cabeças dos parafusos. A largura das franjas variou de 40 a 60 divisões, sendo o valor médio próximo a 50, de modo que uma divisão

significa 0,02 comprimento de onda. A rotação nas observações ao meio-dia era contrária e, nas observações noturnas, com a dos ponteiros de um relógio.

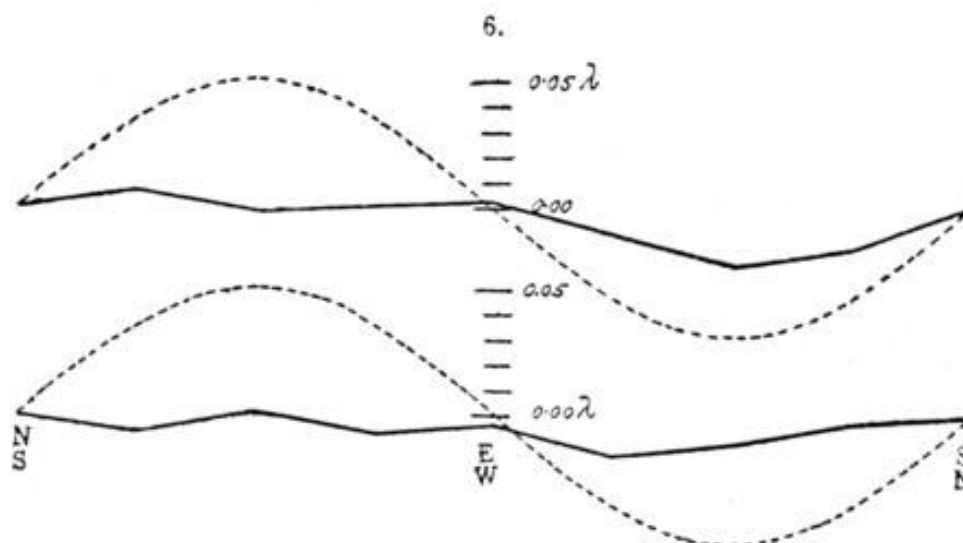
### Observações ao meio-dia

|                   | 16.  | 1.   | 2.   | 3.   | 4.   | 5.   | 6.   | 7.   | 8.   | 9.   | 10.  | 11.  | 12.  | 13.  | 14.  | 15.  | 16.  |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 8 de Julho        | 44.7 | 44.0 | 43.5 | 39.7 | 35.2 | 34.7 | 34.3 | 32.5 | 28.2 | 26.2 | 23.8 | 23.2 | 20.3 | 18.7 | 17.5 | 16.8 | 13.7 |
| 9 de Julho        | 57.4 | 57.3 | 58.2 | 59.2 | 58.7 | 60.2 | 60.8 | 62.0 | 61.5 | 63.3 | 65.8 | 67.3 | 69.7 | 70.7 | 73.0 | 70.2 | 72.2 |
| 11 de Julho       | 27.3 | 23.5 | 22.0 | 19.3 | 19.2 | 19.3 | 18.7 | 18.8 | 16.2 | 14.3 | 13.3 | 12.8 | 13.3 | 12.3 | 10.2 | 7.3  | 6.5  |
| Média             | 43.1 | 41.6 | 41.2 | 39.4 | 37.7 | 38.1 | 37.9 | 37.8 | 35.3 | 34.6 | 34.3 | 34.4 | 34.4 | 33.9 | 33.6 | 31.4 | 30.8 |
| Média em 1 semana | .862 | .832 | .824 | .788 | .754 | .762 | .758 | .756 | .706 | .692 | .686 | .688 | .688 | .678 | .672 | .628 | .616 |
| Média Final       | .784 | .762 | .755 | .738 | .721 | .720 | .715 | .692 | .661 |      |      |      |      |      |      |      |      |

### Observações à noite

|                   | 16.   | 1.    | 2.    | 3.    | 4.    | 5.    | 6.    | 7.    | 8.    | 9.    | 10.   | 11.   | 12.   | 13.   | 14.   | 15.   | 16.   |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8 de Julho        | 61.2  | 63.3  | 63.3  | 68.2  | 67.7  | 69.3  | 70.3  | 69.8  | 69.0  | 71.3  | 71.3  | 70.5  | 71.2  | 71.2  | 70.5  | 72.5  | 75.7  |
| 9 de Julho        | 26.0  | 26.0  | 28.2  | 29.2  | 31.5  | 32.0  | 31.3  | 31.7  | 33.0  | 35.8  | 36.5  | 37.3  | 38.8  | 41.0  | 42.7  | 43.7  | 44.0  |
| 11 de Julho       | 66.8  | 66.5  | 66.0  | 64.3  | 62.2  | 61.0  | 61.3  | 59.7  | 58.2  | 55.7  | 53.7  | 54.7  | 55.0  | 58.2  | 58.5  | 57.0  | 56.0  |
| Média             | 51.3  | 51.9  | 52.5  | 53.9  | 53.8  | 54.1  | 54.3  | 53.7  | 53.4  | 54.3  | 53.8  | 54.2  | 55.0  | 56.8  | 57.2  | 57.7  | 58.6  |
| Média em 1 semana | 1.026 | 1.038 | 1.050 | 1.078 | 1.076 | 1.082 | 1.086 | 1.074 | 1.068 | 1.086 | 1.076 | 1.084 | 1.100 | 1.136 | 1.144 | 1.154 | 1.172 |
| Média Final       | 1.047 | 1.062 | 1.063 | 1.081 | 1.088 | 1.109 | 1.115 | 1.114 | 1.120 |       |       |       |       |       |       |       |       |

Os resultados das observações são expressos graficamente na fig. 6. A superior é a curva para as observações ao meio-dia e a inferior para as observações noturnas. As curvas pontilhadas representam um oitavo dos deslocamentos teóricos. Parece justo concluir a partir da figura que, se houver algum deslocamento



Devido ao movimento relativo da Terra e do éter luminífero, isso não pode ser muito maior do que 0,01 da distância entre as franjas.

Considerando apenas o movimento da Terra em sua órbita,

Esse deslocamento deve ser  $2D \frac{u^2}{v^2} = 2D \times 10^{-8}$ . A distância **D** era cerca de 11

metros, ou  $2D \times 10^{-7}$  comprimentos de onda de luz amarela; portanto, o deslocamento esperado era de 0,4 franjas. O deslocamento real foi certamente menor do que a vigésima parte desta, e provavelmente menor do que a quadragésima parte. Mas como o deslocamento é proporcional ao quadrado da velocidade, a velocidade relativa da Terra e do éter é provavelmente menor que um sexto da velocidade orbital da Terra e certamente menos de um quarto.

No que precede, apenas o movimento orbital da Terra é considerado. Se isso for combinado com o movimento do sistema solar, sobre o qual pouco se sabe com certeza, o resultado teria que ser modificado; e é possível que a velocidade resultante no momento das observações fosse pequena, embora as chances sejam muito contrárias. O experimento será, portanto, repetido em intervalos de três meses e, portanto, todas as incertezas serão evitadas.

Parece, de tudo o que precede, razoavelmente certo que, se houver algum movimento relativo entre a Terra e o éter luminífero, ele deve ser pequeno; bastante pequeno o suficiente para refutar a explicação de Fresnel sobre a aberração. Stokes deu uma teoria da aberração que pressupõe que o éter na superfície da Terra esteja em repouso em relação a este último, e apenas exige, além disso, que a velocidade relativa tenha um potencial; mas Lorentz mostra que essas condições são incompatíveis. Lorentz então propõe uma modificação que combina algumas idéias de Stokes e Fresnel, e assume a existência de um potencial, juntamente com o coeficiente de Fresnel. Se agora fosse legítimo concluir do presente trabalho que o éter está em repouso em relação à superfície da Terra, de acordo com Lorentz não poderia haver um potencial de velocidade, e sua própria teoria também falha.

### **Suplemento**

É óbvio, pelo que foi dito antes, que seria inútil tentar resolver a questão do movimento do sistema solar por meio de observações de fenômenos ópticos na superfície da Terra. Mas não é impossível que, mesmo a distâncias moderadas acima do nível do mar, no topo de um pico de montanha isolado, por exemplo, o movimento relativo possa ser perceptível em um aparelho como o usado nesses experimentos. Talvez, se o experimento fosse tentado nessas circunstâncias, a tampa deveria ser de vidro ou removida.

Pode valer a pena notar outro método para multiplicar o quadrado da aberração o suficiente para trazê-lo para dentro do alcance da observação, que se apresentou durante

a preparação deste artigo. Isso se baseia no fato de que a reflexão das superfícies em movimento varia das leis comuns da reflexão.

Seja **ab** (fig. 1) uma onda plana caindo no espelho **mn** com uma incidência de  $45^\circ$ . Se o espelho estiver em repouso, a frente de onda após a reflexão será **ac**.

Agora suponha que o espelho se mova em uma direção que faça um ângulo  $\alpha$  com sua normal, com uma velocidade  $\omega$ . Seja **V** a velocidade da luz no éter supostamente estacionário, e seja **cd** o aumento na distância que a luz tem que percorrer para chegar a **d**. Neste tempo, o espelho terá se movido uma distância  $\frac{cd}{\sqrt{2} \cos \alpha}$ . Nós temos  $\frac{cd}{ad} = \frac{\omega \sqrt{2} \cos \alpha}{V}$  colocando  $= r$ , e  $\frac{ac}{ad} = 1 - r$ .

Para encontrar a nova frente de onda, desenhe o arco **fg** com **b** como centro e **ad** como raio; A tangente a este arco de **d** será a frente da Nova Onda, e a normal à tangente de **b** será a nova direção. Isso será diferente da direção **ba** pelo ângulo  $\theta$  que é necessário encontrar. Da igualdade dos triângulos **adb** e **edb** segue-se que  $\theta = 2\varphi$ ,  $ab=ac$ ,

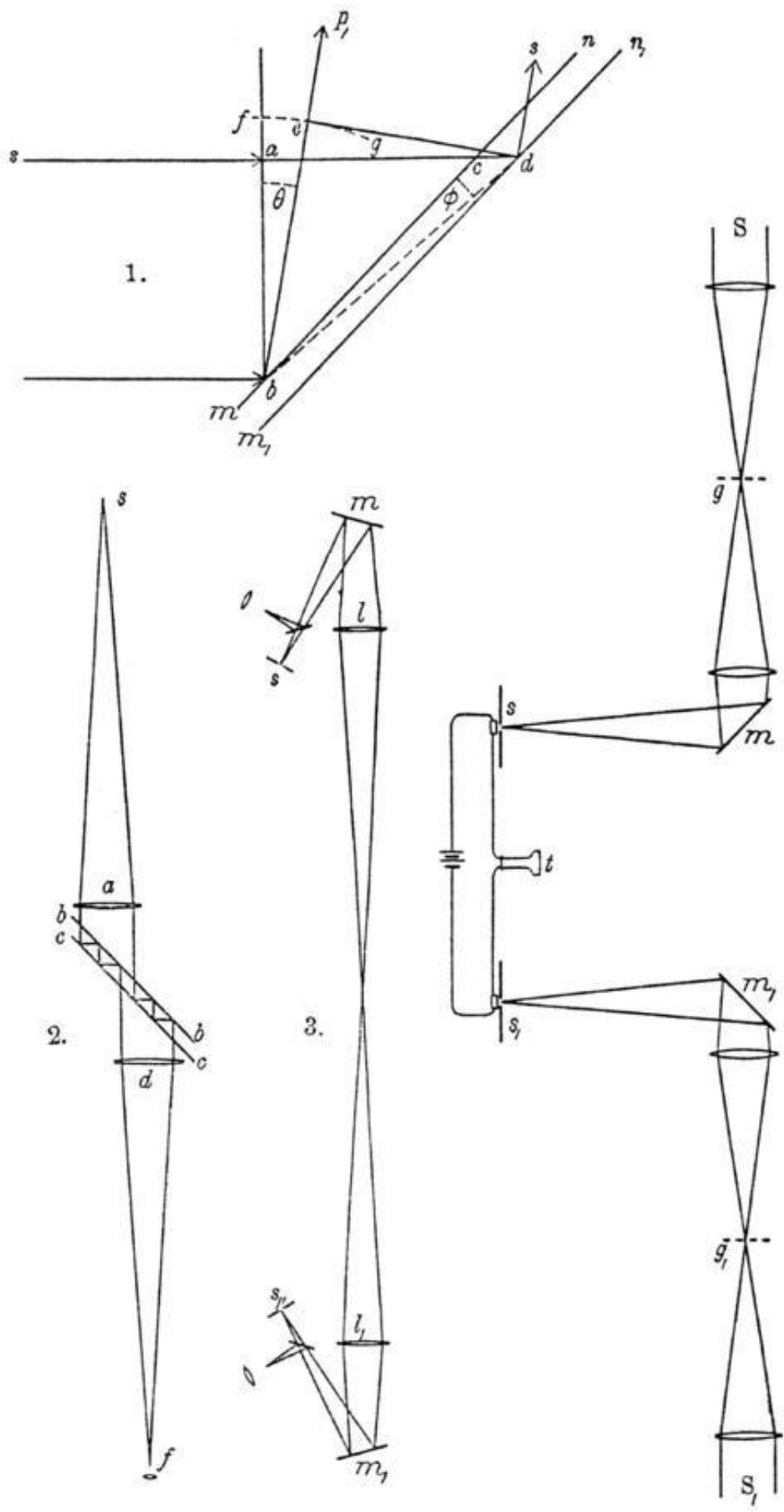
$$\tan adb = \tan(45^\circ - \frac{\theta}{2}) = \frac{1 - \tan \frac{\theta}{2}}{1 + \tan \frac{\theta}{2}} = \frac{ac}{ad} = 1 - r$$

ou negligenciando os termos de ordem  $r^3$

$$\theta = r + \frac{r^2}{2} = \frac{\sqrt{2} \omega \cos \alpha}{V} + \frac{\omega^2}{V^2} \cos^2 \alpha.$$

Agora deixe a luz incidir sobre um espelho paralelo voltado para o primeiro, devemos então ter  $\theta = \frac{\sqrt{2} \omega \cos \alpha}{V} + \frac{\omega^2}{V^2} \cos^2 \alpha$  e o desvio total seria  $\theta + \theta = \frac{2\sqrt{2} \omega \cos \alpha}{V} + \frac{2\omega^2}{V^2} \cos^2 \alpha$  onde  $\rho$  é o ângulo de aberração, se apenas o movimento orbital da Terra for considerado. O deslocamento máximo obtido girando todo o aparelho em  $90^\circ$  seria  $\Delta = 2\rho^2 = 0,004''$ . Com cinquenta desses pares, o deslocamento seria de  $0,2''$ . Mas observações astronômicas em circunstâncias muito menos favoráveis do que aquelas em que podem ser feitas foram feitas a centésimos de segundo; de modo que este novo método é justo ser pelo menos tão sensível quanto o anterior.

O arranjo do aparelho pode ser como na fig. 2; **s** no foco da lente **a**, é uma fenda; **bb cc** são dois espelhos de vidro opticamente planos e tão prateados que permitem, digamos, a passagem de um vigésimo da luz, e refletindo, digamos, noventa por cento. A intensidade da luz que incide sobre o telescópio de observação **df**



seria cerca de um milionésimo da intensidade original, de modo que, se a luz solar ou o arco elétrico fossem usados, ainda poderiam ser facilmente vistos. Os espelhos **bb**/ e **cc**/, difeririam do paralelismo o suficiente para separar as imagens sucessivas. Finalmente, o aparelho não precisa ser montado de modo a girar, pois a rotação da Terra seria suficiente.

Se fosse possível medir com precisão suficiente a velocidade da luz sem retornar o raio ao seu ponto inicial, o problema de medir a primeira potência da velocidade relativa da Terra em relação ao éter seria resolvido. Isso pode não ser tão desesperador quanto pode parecer à primeira vista, uma vez que as dificuldades são inteiramente mecânicas e podem ser superadas com o passar do tempo.

Por exemplo, suponha (fig. 3) **m** e **m**/, dois espelhos girando com velocidade igual em direções opostas. É evidente que a luz de **s** formará uma imagem estacionária em **s**/ e, da mesma forma, a luz de **s**/ formará uma imagem estacionária em **s**. Se agora a velocidade dos espelhos for aumentada o suficiente, suas fases ainda sendo exatamente as mesmas, ambas as imagens serão desviadas de **s** e **s**/, em proporção inversa às velocidades da luz nas duas direções; ou, se as duas deflexões forem iguais, e a diferença de fase dos espelhos for medida simultaneamente, isso será evidentemente proporcional à diferença de velocidade nas duas direções. A única dificuldade real está nessa medição. A seguir talvez seja uma solução possível: **gg**/ (fig. 4) são duas grades nas quais a luz solar está concentrada. Estes são colocados de forma que depois de incidir sobre os espelhos giratórios **m** e **m**/, a luz forme imagens das grades em **s** e **s**/, duas células de selênio muito sensíveis em circuito com uma bateria e um telefone. Se tudo for simétrico, o som no telefone será máximo. Se agora uma das fendas for deslocada pela metade da distância entre a imagem das barras de grade, haverá silêncio. Suponha agora que as duas deflexões tenham sido feitas exatamente iguais, a fenda seja ajustada para o silêncio. Então, se o experimento for repetido quando a rotação da Terra tiver girado todo o aparelho em 180°, e as deflexões forem novamente iguais, não haverá mais silêncio, e a distância angular através da qual **s** deve ser movida para restaurar o silêncio medirá a diferença necessária na fase.

Restam três outros métodos, todos astronômicos, para atacar o problema do movimento do sistema solar através do espaço.

1. A observação telescópica dos movimentos próprios das estrelas. Isso nos deu uma determinação muito provável da direção desse movimento, mas apenas uma suposição quanto à sua quantidade.

2. A observação espectroscópica do movimento das estrelas na linha de visão. Isso poderia fornecer dados apenas para os movimentos relativos,

embora pareça provável que, pelas imensas melhorias na fotografia dos espectros estelares, as informações assim obtidas sejam muito mais precisas do que qualquer outra.

3. Finalmente, resta a determinação da velocidade da luz por observações dos eclipses dos satélites de Júpiter. Se os métodos fotométricos aprimorados praticados no observatório de Harvard permitirem observá-los com precisão suficiente, a diferença nos resultados encontrados para a velocidade da luz quando Júpiter está mais próximo e mais distante da linha de movimento dará, não apenas o movimento do sistema solar em relação às estrelas, mas com referência ao próprio éter luminífero.

## APÊNDICE E – ROTEIRO DA ATIVIDADE LABORATORIAL

### Atividade I – Medida do comprimento da luz

#### **Materiais utilizados:**

- 01 Interferômetro de Michelson-Morley automatizado;
- 01 Anteparo;
- 01 Computador com o *software Arduino IDE* pré-instalado.

#### **Objetivos:**

- Analisar os padrões de interferência gerados no anteparo;
- Relacionar a defasagem entre ondas às franjas circulares e seus deslocamentos;
- Mensurar o comprimento de onda da fonte de luz utilizada;
- Observar as influências de fatores externos nos resultados.

#### **Procedimentos:**

##### **1. Alinhamento e montagem**

- 1.1 - Reserve todos os componentes óticos do interferômetro.
- 1.2 - Posicione o anteparo e o regule caso necessário a direta da base do interferômetro.
- 1.4 - Ligue a fonte luminosa e centralize seu feixe no espelho fixo.
- 1.5 - Ajuste o espelho fixo de modo que o feixe refletido retorne ao ponto de origem na fonte.
- 1.6 - Posicione o prisma divisor de feixes em seu suporte, dispondo-o perpendicularmente aos outros componentes e distando 15 cm do espelho fixo. Caso necessário, ajuste-o de modo que os feixes refratem no centro de sua face.
- 1.7 - Mova a base do espelho móvel de encontro ao feixe refletido pelo prisma em seu centro.



1.8 - Ajuste o espelho móvel de modo que o feixe refletido se sobreponha ao feixe do espelho fixo observado no anteparo.

1.9 - Acrescente a lente entre a fonte e o divisor de feixes, centralizando-o.

1.10 - O padrão observado no anteparo deve possuir centro coincidente a imagem da sombra do prisma. Caso contrário, a inclinação de um dos espelhos deve ser corrigida.

1.11 - Alinhado o interferômetro, o motor deverá ser ligado. Em seguida, conecte o Arduino a porta USB do computador.

1.12 - Inicie o *software Arduino IDE* e selecione o código relativo ao trilha do espelho móvel.

1.13 - Por fim, abra o monitor serial do *Arduino IDE*.

## **2. Mensurando o comprimento de onda da luz da fonte**

P.1 Qual a imagem observada no anteparo? O que pode explicar este padrão e seu formato?

P.2 Ao desalinhar minimamente um dos espelhos o que acontece com o padrão de interferência? Por que a imagem se altera para este novo padrão?

2.1 - Mova o espelho para frente em um total de 4 passos.

Obs.: Um passo corresponde a parcela de movimento realizada por um motor, assim como o passo humano.

P.3 Ao deslocar o espelho o que aconteceu com o padrão visto no anteparo? Esse comportamento era esperado? Por que?

2.2 - Mova o espelho para trás em um total de 4 passos.

P.4 – Houve alguma diferença entre o deslocamento positivo e negativo do espelho móvel? Qual? Caso haja, o que ocasionaria nessa distinção observada?

P.5 – Ao mover o espelho foi possível visualizar seu deslocamento? Como podemos confirmar que ele deixou sua posição inicial?

O processo de coleta de dados se dá diretamente da contagem de franjas (claras e escuras) deslocadas. Para isso, escolha uma franja, e observe quantas franjas tomarão seu lugar.

Obs.: Recomenda-se a escolha da franja central, por sua maior facilidade de visualização.

|           | Passos do espelho móvel (p) | Nº de franjas deslocadas (m) |
|-----------|-----------------------------|------------------------------|
| 1ª medida | 50                          |                              |
| 2ª medida | 50                          |                              |
| 3ª medida | 50                          |                              |
| 4ª medida | 100                         |                              |
| 5ª medida | 100                         |                              |
| 6ª medida | 100                         |                              |

Para preencher o quadro logo acima, faça um total de 3 (três) medidas para 50 passos deslocados e mais 3 (três) medidas para 100 passos deslocados.

| Passos do espelho móvel (p) | Nº médio de franjas deslocadas ( $\overline{m}$ ) |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 50 passos                   |                                                   |
| 100 passos                  |                                                   |

Obs.: O valor médio pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots x_n}{n}$$

P.6 Enquanto o espelho móvel estava em repouso, ou ainda, em movimento, foi observado algum deslocamento de franjas aleatório? O que poderia influenciar seu surgimento?

|                                | Comprimento de onda - $\lambda$ (nm) |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1ª medida (50 passos)          |                                      |
| 2ª medida (50 passos)          |                                      |
| 3ª medida (50 passos)          |                                      |
| Média das medidas (50 passos)  |                                      |
| 4ª medida (100 passos)         |                                      |
| 5ª medida (100 passos)         |                                      |
| 6ª medida (100 passos)         |                                      |
| Média das medidas (100 passos) |                                      |

Utilizando a equação de interferência para o interferômetro de Michelson-Morley calcule o comprimento de onda da luz da fonte utilizada para cada um dos casos.

Comprimento de onda para o interferômetro de Michelson-Morley:

$$\lambda = \frac{2d}{m}$$

Obs.: O deslocamento do espelho é dado pelo produto do número de passos (p) com o deslocamento de cada passo (k), onde,  $k = 78 \text{ nm}$  ou  $78 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ .

$$\lambda = \frac{2pk}{m}$$

### 3. Avaliação

Com base no observado, nos questionamentos e nas medidas realizadas, o aluno deverá produzir um relatório que contemple a atividade laboratorial ocorrida. Buscando construir hipóteses aos fenômenos observados, flutuações no resultados e distanciamentos à literatura.