



**Universidade de Brasília  
Instituto de Química**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON  
LAB-MADE**

**ESTEVÃO MATHEUS CÉSAR CASTRO**

Orientador

Prof. Dr. Alexandre Fonseca

BRASÍLIA, DF.  
2022



**UnB**

**Universidade de Brasília  
Instituto de Química**

**ESTEVÃO MATHEUS CÉSAR CASTRO**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON  
LAB-MADE**

Trabalho de conclusão do curso de Bacharelado em Química apresentado ao Instituto de Química da Universidade de Brasília como requisito parcial de obtenção do título de bacharel em Química.

Orientador

Prof. Dr. Alexandre Fonseca

BRASÍLIA, DF.  
2022

# DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON LAB-MADE

Estevão Matheus César Castro

---

Professor orientador: Dr. Alexandre Fonseca

---

Professor: Dr. Wender Alves da Silva

---

Professor: Dr. Jez William Batista Braga

Brasília, maio de 2022

*“Available energy is the main object at stake in the struggle for existence and the evolution of the world.”*

*"A energia disponível é o principal objeto em jogo na luta pela existência e evolução do mundo."*

**Ludwig Boltzmann**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, minha rocha, por me guiar em cada passo que tomei, e por ter me permitido conhece-lo melhor durante essa jornada, afinal é como uma vez disse o físico e matemático James Clerk Maxwell tomando sua frase de forma indireta livre: “Somente um principiante que não sabe nada sobre ciência diria que esta descarta a fé. Se realmente estudá-la, certamente ela o levará para mais perto de Deus”.

À minha família, principalmente meus pais que se tornaram meus principais conselheiros, nos mínimos detalhes; além de não terem medido esforços para que eu seguisse meu sonho, graças a eles que hoje sou a melhor versão de mim mesmo; também à minha irmã que sempre acreditou em mim. Aos meus avós e tios que são minhas inspirações e me auxiliaram em cada etapa, nas áreas secular, emocional, espiritual e financeira.

Ao meu professor e orientador Alexandre, com quem tive o prazer de trabalhar, mesmo que durante um período à distância, e que apesar de toda a complicação da situação mundial me aceitou como seu aprendiz e fez com que eu introjetasse em minha mente alguns dos conceitos mais importantes da graduação que com certeza levarei comigo em minha futura profissão. Aos demais professores em geral agradeço por todos os ensinamentos transmitidos que me permitirão atuar como um químico capacitado.

Aos meus amigos de curso, Natália, Vinícius, Pedro e João pelos almoços e conversas compartilhadas, pelas horas de estudo conjunto na Biblioteca, pela paciência ao me assessorar em algum exercício, prática ou relatório. Sem vocês minha trajetória seria muito mais difícil e bem menos prazerosa.

Agradeço a banca de avaliadores desse presente trabalho de conclusão de curso pela disponibilidade e, por fim, a todos que de alguma maneira me incentivaram a seguir em frente, ultrapassar obstáculos e a vencer desafios.

## RESUMO

A espectrometria no domínio do tempo em função da amplitude de movimento de um componente instrumental tal qual um espelho não fixo revolucionou a instrumentação analítica para realização de medidas na região do infravermelho do espectro. Análises que antes demandavam horas para serem completadas, hoje podem ser realizadas em curto intervalo de tempo (da ordem de minutos), com aumento significativo da razão sinal/ruído, o que melhora a qualidade dos espectros e a informação química que pode ser obtida por ele. Apesar destes avanços, o entendimento sobre o funcionamento de um interferômetro por estudantes de Química e a sua aplicação para a obtenção de espectros constituem desafios que uma abordagem prática instrumental pode ser capaz de solucionar. Embora estejam disponíveis instrumentos comerciais para estes propósitos, o custo elevado dificulta a sua aquisição por laboratórios com poucos recursos. Sendo assim, uma alternativa é construir o instrumento para a realização dos experimentos. A maioria das propostas na literatura permitem apenas a observação das franjas não viabilizando a obtenção de informações espectrais mais relevantes. Considerando esses aspectos, a finalidade principal deste trabalho é a construção de um interferômetro de baixo custo, no qual a movimentação de um espelho possa ser controlada com o auxílio de um motor de passos; espera-se, portanto, que seja possível a aquisição de interferogramas para uma fonte monocromática emitindo radiação eletromagnética em algumas faixas bem definidas e regiões discretas do espectro visível. Todo o aparato foi disposto em uma plataforma com suportes fabricados usando impressão 3D. As leituras foram feitas por um aplicativo desenvolvido especificamente para um smartphone compatível com sistema operacional Android, cuja comunicação é vinculada a um Arduíno se dando através da tecnologia bluetooth. Tanto o monitoramento do deslocamento do espelho móvel como o registro e gravação de dados gráficos foram possibilitados pela adaptação desse sistema. Estudos foram realizados para avaliar a capacidade desse dispositivo em determinar com acurácia os comprimentos de onda de emissão de lasers de diodo das cores vermelha, verde e violeta, dos quais foi possível obter interferogramas apenas para os dois primeiros, logo, usando a Transformada de Fourier, foram obtidos espectros com baixa resolução; para o vermelho, por exemplo, o comprimento de onda encontrado diferiu em menos de 1% em relação ao valor mensurado por um espectrofotômetro comercial. A partir dos resultados obtidos conclui-se que tal estratégia apresenta-se como uma alternativa ousadamente moderna pelo viés da automatização, mas que ainda requer certos ajustes finos.

**Palavras-Chave:** Interferômetro, espectro.

## ABSTRACT

Time domain spectrometry as a function of the motion extent of an instrumental component such as a non-fixed mirror revolutionized analytical instrumentation especially on the accomplishment of measurements in the infrared region of the spectrum. Analyzes that previously required hours to be completed, can now be performed in a very short time period (in a matter of minutes), with a significant increase in the signal/noise ratio, which improves the quality of the spectra and the respective chemical information obtained by it. Nevertheless, despite these advances, the understanding of how an interferometer works by Chemistry students and its application to obtain spectra are still challenges to be overcome and a practical instrumental approach may be able to solve them. Although commercial instruments are currently available for these purposes, the high-cost hampers for laboratories with few resources to acquire them. Therefore, a plausible alternative is to build the instrument to carry out the experiments. Most proposals allow only the observation of interference fringes without the possibility to obtain more relevant spectral information. Considering these aspects, the main purpose of this work is the construction of a low-cost interferometer, in which the movement of a mirror can be controlled with the support of a stepper motor; hence it is expected that it is possible to obtain interferograms using a monochromatic source that emits electromagnetic radiation in some well-defined bands and discrete regions of the visible spectrum. All apparatus was laid out on a platform with holders fabricated by a 3D printer; the acquisition was managed by an application developed for a smartphone compatible with the Android operating system with communication linked to an Arduíno through bluetooth. Both the monitoring of the moving mirror displacement and the recording of graphic data were made possible by the adaptation of this entire system. Studies were carried out to assess the ability of this device to accurately determine the emission wavelengths of violet, green and blue diode lasers, but it was practicable to attain interferograms only for the first two, thus, using the Fourier Transform, spectra with low resolution were obtained; for the red one, for example, the wavelength found differed by less than 1% when compared to the value measured by a commercial spectrophotometer. From the results, it is concluded that this strategy presents itself as a boldly and also a modern alternative by the automation bias, but still requires some adjustments.

**Keywords:** interferometer, spectra.

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| Lista de abreviaturas e acrônimos .....                                   | ix        |
| Lista de tabelas .....  | x         |
| Índice de figuras .....   | xi        |
| Índice de equações.....   | xvi       |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Revisão Bibliográfica e Histórico .....                               | 1         |
| 1.2 Instrumentos para medidas na região do IV .....                       | 11        |
| 1.3 Funcionamento do Interferômetro .....                                 | 13        |
| 1.4 Interferômetros Comerciais e LAB Made .....                           | 17        |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>3. PARTE EXPERIMENTAL.....</b>   | <b>22</b> |
| 3.1 Componentes para a construção do Instrumento.....                     | 22        |
| 3.2 Construção do Instrumento .....                                       | 23        |
| 3.2.1 Circuitos Eletrônicos.....  | 33        |
| 3.2.2 Programação.....  | 37        |
| 3.3 Procedimentos para obtenção de Interferogramas dos lasers.....        | 40        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                     | <b>44</b> |
| 4.1 Consolidação do Arranjo Instrumental .....                            | 44        |
| 4.2 Visualização dos padrões de interferência.....                        | 46        |
| 4.3. Avaliação dos Interferogramas obtidos .....                          | 48        |
| 4.4 Determinação do comprimento de onda da emissão máxima dos lasers..... | 53        |
| 4.5 Aplicação da Transformada de Fourier aos interferogramas.....         | 55        |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>   | <b>61</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                 | <b>62</b> |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS**

IV            Infravermelho

LAB MADE   Feito em Laboratório

FTIR        Infravermelho por Transformada de Fourier

PLA         Ácido Polilático

NEMA        National Electrical Manufacturers Association

## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1:</b> Relação entre gastos e montante de material adquirido..... | 22 |
|---|----|

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1:</b> Hipótese do deslocamento relativo da Terra sobre o Éter em duas estações distintas.....   | 2  |
| <b>Figura 2:</b> Experimento da Dupla Fenda.....   | 4  |
| <b>Figura 3:</b> Padrões de interferência de ondas eletromagnéticas.....   | 4  |
| <b>Figura 4:</b> Esquema genérico para elucidação dos fenômenos ópticos e eletromagnéticos estudados.....  | 6  |
| <b>Figura 5:</b> Projeto do aparato de Michelson-Morley.....   | 7  |
| <b>Figura 6:</b> Visão localizada do mecanismo de reflexões para obtenção das franjas de interferência.....  | 8  |
| <b>Figura 7:</b> Espectro de frequência obtido a partir do interferograma utilizando a Transformada de Fourier.....  | 14 |
| <b>Figura 8:</b> Esquema da montagem de um interferômetro genérico.....  | 15 |
| <b>Figura 9:</b> Explicação do padrão concêntrico de franjas; (A/B) Fontes virtuais; (X) Sobreposição das ondas.....   | 16 |
| <b>Figura 10:</b> Configuração do interferômetro comercial; (1) Divisor de Feixe CCM1-BS013; (2) Laser CPS532-C2; (3/4) Espelhos PF10-03-P01 fixo e móvel, respectivamente; (5) Lente LB1471; (6) Tela EDU-VS1.....  | 18 |
| <b>Figura 11:</b> Diagrama teórico e demonstrativo de um interferômetro LAB MADE.....  | 19 |
| <b>Figura 12:</b> Disposição dos componentes na superfície da caixa (aparato experimental); (1) Fonte de luz; (2) Suporte da lente; (3) Divisor; (4) Compensador; (5) Espelho Móvel; (6) Espelho Fixo; (7) Anteparo; (8) Parafuso do Deslocador.....   | 20 |
| <b>Figura 13:</b> Visão geral do instrumento proposto; (1) Fonte de radiação laser; (2) Lente Expansora; (3) Divisor de Feixe; (4) Espelho Móvel; (5) Patins da Guia Linear; (6) Alavanca de Redução; (7) Mancal com Rolamento; (8) Bloco de Alumínio; (9) Fuso; (10) Motor; (11) Espelho Fixo; (12) Anteparo..... | 24 |
| <b>Figura 14:</b> (A) Dimensões da Base após envelopamento com adesivo de vinil; em branco posição da chapa de aço; (B) Pés de Apoio da Base; (C) Altura das plataformas e entre elas.....   | 24 |
| <b>Figura 15:</b> Indicação do sentido de movimentação do Bloco de Alumínio (da esquerda para a direita) e do espelho (da direita para a esquerda); distâncias entre o ponto de apoio aos pontos de contato com o Bloco de Alumínio e com o Espelho Móvel...26   | 26 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 16:</b> Ampliação do sistema responsável pela movimentação do espelho...  | 26 |
| <b>Figura 17:</b> ( $D_1$ ) Distância da guia ao ponto fixo; ( $D_2$ ) Distância do ponto fixo ao bloco de Alumínio agregado ao fuso; ( $L_1$ ) Deslocamento do espelho; ( $L_2$ ) Deslocamento do Bloco de Alumínio.....   | 27 |
| <b>Figura 18:</b> Agregado Guia Linear e Patins.....  | 28 |
| <b>Figura 19:</b> Suporte confeccionado para o Espelho Móvel.....   | 29 |
| <b>Figura 20:</b> Suporte confeccionado para o Espelho Fixo.....  | 30 |
| <b>Figura 21:</b> Diferenças entre as reflexões promovidas por espelhos simples e pelos de 1º Plano.....  | 31 |
| <b>Figura 22:</b> Suporte do Divisor e suas dimensões à esquerda; em branco, à direita, as ranhuras nas abas por onde acontece o encaixe.....   | 32 |
| <b>Figura 23:</b> Suporte do laser, mais à esquerda e do alinhador, mais à direita; mais ao centro, lateral e fundo de ambos .....  | 33 |
| <b>Figura 24:</b> Laser apoiado sobre os suportes; adiante, o alinhador.....  | 33 |
| <b>Figura 25:</b> Circuito com laser ligado à fonte de 5V, à esquerda; à direita tem-se em foco o módulo; ao girar para a direita (sentido horário) o trimpot com o resistor variável, no local indicado, auxiliado por uma chave, altera-se a tensão de saída.....                 | 34 |
| <b>Figura 26:</b> (1) Soldagem dos terminais da placa (curto-circuitados no retângulo azul); (2) Fio Preto – Comum ligado ao Ground do Arduíno; Fio Azul – Saída (output) ligado a Entrada Analógica (A2) do Arduíno; Fio Vermelho – VCC (Alimentação) ligado ao 5V do Arduíno..... | 35 |
| <b>Figura 27:</b> Orifício no centro do Anteparo corresponde à janela de detecção, à esquerda; à direita, dimensões da lateral do suporte do sensor.....  | 35 |
| <b>Figura 28:</b> Circuito de Hardware – (A) Arduíno; (B) Módulo Bluetooth; (C) Driver; (D) Motor; (E) Fonte.....   | 36 |
| <b>Figura 29:</b> Disposição dos elementos de hardware do sistema conforme ordenamento evidenciado na Figura 28; demais dimensões da parte traseira do suporte, onde é fixado o detector.....   | 37 |
| <b>Figura 30:</b> Diagrama de Blocos explicitando a sucessão de acontecimentos até a aquisição do sinal analítico.....  | 38 |
| <b>Figura 31:</b> Telas do Aplicativo até a gravação dos dados.....   | 39 |
| <b>Figura 32:</b> Luz passa pelo alinhador e incide no centro do espelho móvel.....   | 40 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 33:</b> Ampliação mostrando Circunstância de não confluência, à esquerda; situação na qual o feixe refletido converge no mesmo ponto de incidência, à direita..... | 41 |
| <b>Figura 34:</b> Nebulizador de ar mostrando a trajetória dos feixes após passagem pelo divisor (visão lateral e superior, respectivamente).....                            | 42 |
| <b>Figura 35:</b> À esquerda, pontos de luz não confluem no mesmo local; à direita são coincidentes.....   | 42 |
| <b>Figura 36:</b> Posição do detector em relação às franjas.....   | 43 |
| <b>Figura 37:</b> Suporte do Espelho móvel diretamente apoiado sobre o Bloco de Alumínio; setas indicam locais de acomodação dos pesos.....                                  | 44 |
| <b>Figura 38:</b> Suporte do Espelho Móvel sobre o carrinho da guia linear.....  | 45 |
| <b>Figura 39:</b> Uso da alavanca de Madeira; seta indica a posição da espiga do rebite.....   | 46 |
| <b>Figura 40:</b> Laser Violeta no anteparo.....   | 47 |
| <b>Figura 41:</b> Franjas de Interferência obtidas após o alinhamento para os lasers verde e vermelho, respectivamente.....  | 48 |
| <b>Figura 42:</b> Interferograma obtido para o vermelho com Compressão da mola...48  |    |
| <b>Figura 43:</b> Interferograma obtido para o vermelho com Descompressão da mola...49   |    |
| <b>Figura 44:</b> Aquisição das leituras para o vermelho com mola ausente, à esquerda; à direita, ampliação do sinal a uma resolução de 3200 pulsos/revolução.....           | 50 |
| <b>Figura 45:</b> Aquisição das leituras para o vermelho com mola ausente e maior resolução.....   | 51 |
| <b>Figura 46:</b> Ampliação do sinal para o vermelho a uma resolução de 6400 pulsos/revolução para intervalos iguais.....  | 51 |
| <b>Figura 47:</b> Sinal para o vermelho após retirada da borracha.....   | 52 |
| <b>Figura 48:</b> Alternância entre intervalos de 100 leituras para sinais ampliados obtidos para o laser vermelho, mostrando conservação da quantidade de picos.....        | 52 |
| <b>Figura 49:</b> Gráfico de Sinal x Leituras para Laser Vermelho (sem mola e sem borracha.....  | 53 |
| <b>Figura 50:</b> Gráfico de Sinal x Leituras para Laser Verde (sem mola e sem borracha.....   | 54 |
| <b>Figura 51:</b> Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 1600 (laser vermelho) .....  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 52:</b> Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 2500 (laser vermelho) .....        | 56 |
| <b>Figura 53:</b> Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 200 a 3200 (laser vermelho) .....         | 57 |
| <b>Figura 54:</b> Espectro obtido com arranjo de diodo mostrando pico máximo de comprimento de onda do vermelho..... | 58 |
| <b>Figura 55:</b> Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 1600 (laser verde) .....           | 59 |
| <b>Figura 56:</b> Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 2500 (laser verde) .....           | 59 |
| <b>Figura 57:</b> Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 200 a 3200 (laser verde) .....            | 60 |
| <b>Figura 58:</b> Espectro obtido com arranjo de diodo mostrando pico máximo de comprimento de onda do verde.....    | 60 |

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

|                |    |
|----------------|----|
| Equação 1..... | 17 |
| Equação 2..... | 27 |
| Equação 3..... | 53 |
| Equação 4..... | 53 |
| Equação 5..... | 54 |
| Equação 6..... | 54 |
| Equação 7..... | 55 |
| Equação 8..... | 55 |
| Equação 9..... | 55 |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Revisão Bibliográfica e Histórico

James Clerk Maxwell, por volta de 1860, reuniu uma série de equações essenciais (que mais tarde seriam consideradas leis fundamentais) no estudo de certas observações experimentais no ramo do eletromagnetismo e as resumiu em uma única publicação, baseada em resultados probabilísticos, sob a seguinte suspeita: o deslocamento da luz tem velocidade finita, apesar de ser enorme (GIACOMELLI et al., 2017). Houve, portanto, a abertura de um leque de problemas relacionados a aferição da mesma sob referenciais distintos. Após os avanços nos entendimentos de campos perpendiculares oscilantes e suas propriedades, sendo a luz considerada uma onda pelos estudiosos, até então, a maioria delas exigia como requisito básico um meio para se alastrar, independentemente de suas classificações (mecânica, eletromagnética ou gravitacional em uma duas ou três dimensões de maneira longitudinal ou transversalmente). Era apenas lógico cogitar que no caso da luz, tal como o som viajando pelo ar, por exemplo, também haveria de existir um material que possibilitasse seu espalhamento, caso contrário como explicar a luz do sol que chega à Terra, a quase 150 milhões de quilômetros de distância, senão uma perturbação viajando através de uma certa substância de difícil identificação?

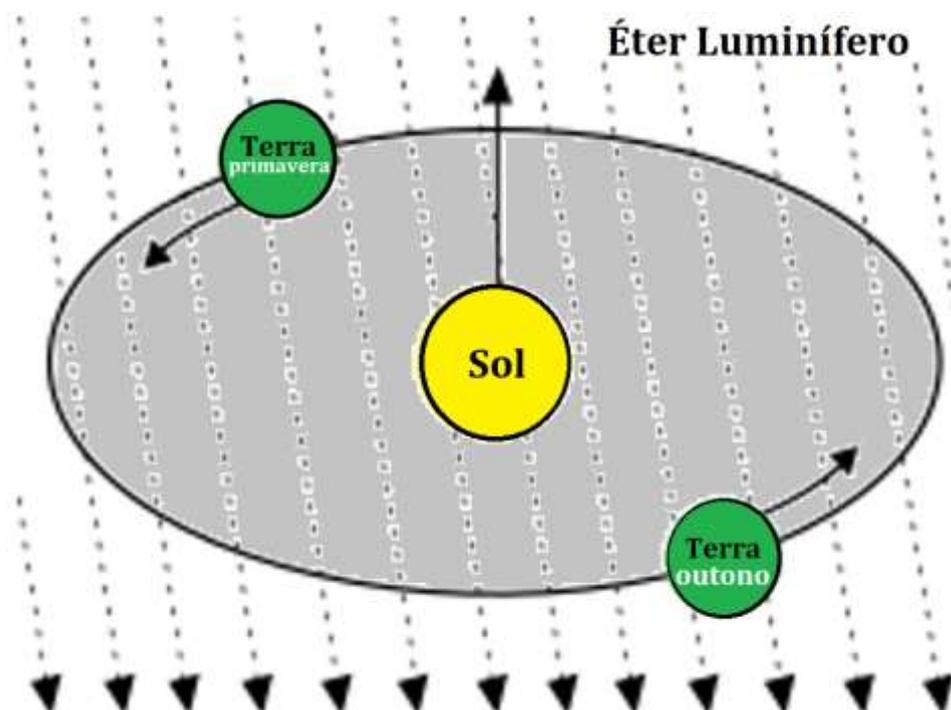
Como tentativa de solucionar essas indagações, vários físicos da época, sugeriram postulados embasados na inevitabilidade de um meio de propagação pelo qual a luz viajaria, o éter luminoso ou luminífero, o qual não era novidade, porquanto Aristóteles, cerca de dois milênios antes, já havia refletido sobre um meio infinito e pouco espesso para o alastramento da luz que preencheria toda a totalidade do universo, assim como alguns anos depois, também o fez Huygens. Esse último, em seu livro “Tratado sobre a Luz”, de 1690, sugeriu pela primeira vez uma natureza ondulatória para a luz e a imperiosidade de um meio para sua propagação.

Apesar de ser um conceito relativamente arcaico ainda era amplamente aceito principalmente devido às investidas anteriores de Augustin Fresnel (MICHAEL, 2012) e do próprio Maxwell juntamente com William Thomson que tentaram unificar de forma empírica esse mediador, que pouco se conhecia sobre, à eventual existência de um outro éter, agora de caráter magnético (LIMA, 2019).

Este fluido puro, contínuo, eterno, inacabável, invisível, indetectável, perfeitamente elástico e de densidade nula (em relação a essa mesma propriedade dos gases de números atômicos diminutos), estaria espalhado por toda a extensão do vácuo quântico, preenchendo onipresentemente cada “vazio” do macrocosmo, portando e propagando a luz (CAMPOS et al., 2014), contudo ainda não era possível senti-lo, observá-lo ou mensurá-lo.

. Sendo assim, a velocidade da luz, em tese, deveria permanecer inalterada diante desse espécime, mas poderia mudar se analisássemos o movimento sob a perspectiva de um outro referencial.

É evidente que a Terra está em movimento de rotação em torno do próprio eixo e trasladando o sol com uma velocidade orbital de trinta quilômetros por segundo, porém, o sol também orbita o centro da Via Láctea, segundo estimativas, duzentos quilômetros a cada segundo. Se pensarmos no éter como linhas de um campo, elétrico ou magnético, podemos estar em repouso em algum instante, porém na maior parte do tempo estamos em movimento relativo (um deslocando-se em relação ao outro, o que seria investigado como sendo um suposto vento de éter, decorrente da movimentação da Terra sobre o éter e vice-versa, haja vista que as posições são constantemente alteradas).



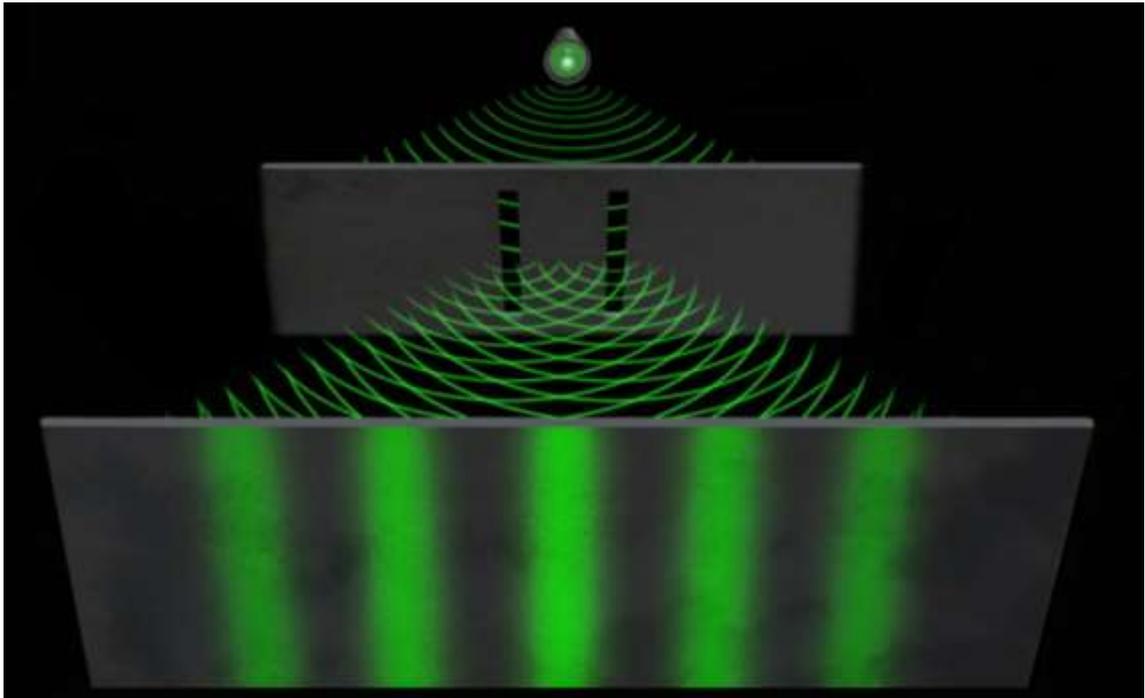
**Figura 1:** Hipótese do deslocamento relativo da Terra sobre o Éter em duas estações distintas.  
[Fonte: Traduzido de [https://pt.wikipedia.org/wiki/Experi%C3%Aancia\\_de\\_Michelson-Morley](https://pt.wikipedia.org/wiki/Experi%C3%Aancia_de_Michelson-Morley)]

Analisando uma situação hipotética e análoga poderíamos supor que a Terra fosse uma vitória-régia deslocando-se em um rio, cuja correnteza tem direção vertical e sentido para baixo. Ao jogarmos uma pedra no rio, seria possível acompanhar a propagação da onda pelo meio ao observar a posição das cristas. A perturbação viajaria mais rapidamente na mesma direção e sentido do movimento da água, ou seja, se houvesse um éter (que representa a água do rio) viajando com alguma velocidade, fazendo a luz (que é a onda provocada pela pedra) se propagar na mesma direção e no mesmo sentido, esta viajaria com mais velocidade no sentido do vento etéreo, sendo possível provar sua existência. Logo, é evidente que, no sentido oposto do deslocamento do éter, a luz deveria se mover mais lentamente e deveria ter uma velocidade relativa em relação a Terra.

Um dos obstáculos a transpor seria a magnitude da Velocidade da luz (viajando a quase trezentos milhões de metros por segundo) que por ser enorme, até a metade do século XIX, não haviam instrumentos para realizar essa medição e trabalhar nessa escala de valores com precisão de modo efetivo.

Nesse contexto é manifesta a vontade de um pesquisador de provar essa hipótese validando a existência desse meio: Albert Abraham Michelson, indivíduo cuja invenção, nomeada em sua homenagem, será o escopo deste presente trabalho. Surge então, na segunda metade do século XIX, em Potsdam, o interferômetro. Sua respectiva finalidade era medir amplitudes de onda em distâncias minúsculas com exatidão impressionante, e assim, comparar a velocidade relativa da luz emitida paralela e perpendicularmente ao movimento de rotação da Terra (objeto opaco de grande massa). Para se entender a linha de raciocínio que virá a seguir é primordial conceituar o que são franjas de interferência.

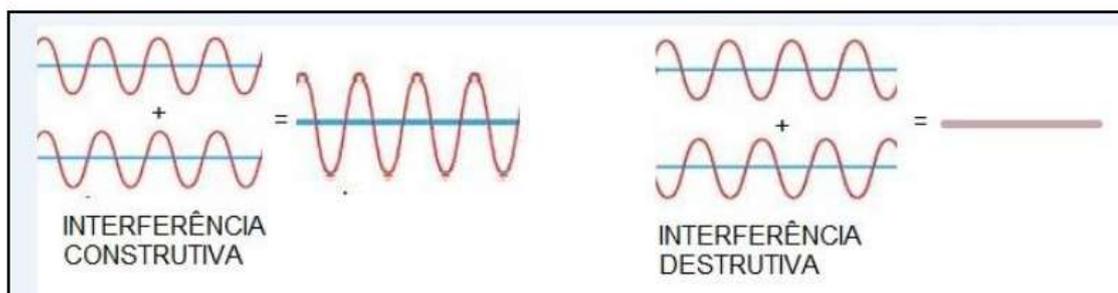
Em 1801, Thomas Young realizou um ensaio, cuja conclusão principal advinda dele foi que a luz proveniente de uma fonte era capaz de interferir com a proveniente de uma segunda. A luz se espalha sofrendo difração que atinge as fendas (estreitas e convenientemente próximas), assim cada uma delas funciona como fonte primária de ondas exatamente iguais as da origem (mesma frequência, comprimento de onda e velocidade), portanto o que se observa no anteparo é uma figura intercalando segmentos brilhantes e escuros. Esse padrão de faixas de luz é o que foi chamado de franjas de interferência.



**Figura 2:** Experimento da Dupla Fenda.

[Fonte: <https://blog-interno.enem.com.br/thomas-young-e-o-experimento-da-fenda-dupla/>]

O que acontece, na verdade é que, a luz é submetida a uma variação cíclica interferindo de modo construtivo se as fases coincidirem. Assim a superposição das ondas reforça seus picos, cujos sinais são somados resultando na obtenção de um sinal claro. Contudo, também podem interferir de modo destrutivo, cuja defasagem faz com que os picos de um feixe se sobreponham e sejam cancelados pelo vale do outro dando origem a uma franja enegrecida.



**Figura 3:** Padrões de interferência de ondas eletromagnéticas.

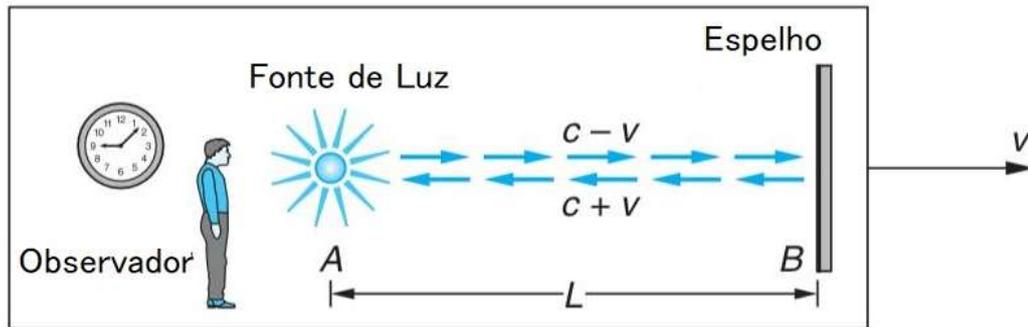
[Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, 2017]

Portanto, pode-se observar o padrão de interferência como um conjunto de duas ondas se superpondo na mesma região do espaço, resultando em uma terceira, ora

clara, ora escura, com intensidade diferente. Como visto acima, as variações entre um estado e outro é a própria franja.

A conjectura primária queria demonstrar essas pequenas variações entre os valores obtidos durante várias épocas do ano, isto é, em qualquer ponto da superfície terrestre a intensidade e a orientação do vento etéreo, poderiam alternar com a estação. Para isso, se os raios de luz fossem divididos em duas direções e depois recombinados, formando padrões de interferência, estes poderiam comprovar a previsão teórica (GRÄF et al., 2014). Porém, o resultado de 1881, realizado unicamente por Michelson na cidade alemã foi inconclusivo, pois os feixes luminosos percorriam a mesma distância em tempos equivalentes, não havendo diminuição da velocidade das reflexões, o que concordava mais com a pressuposição que o movimento planetário não proporcionava nenhuma influência na velocidade da luz, por conseguinte não havia nenhum elemento interferindo nesse caminho.

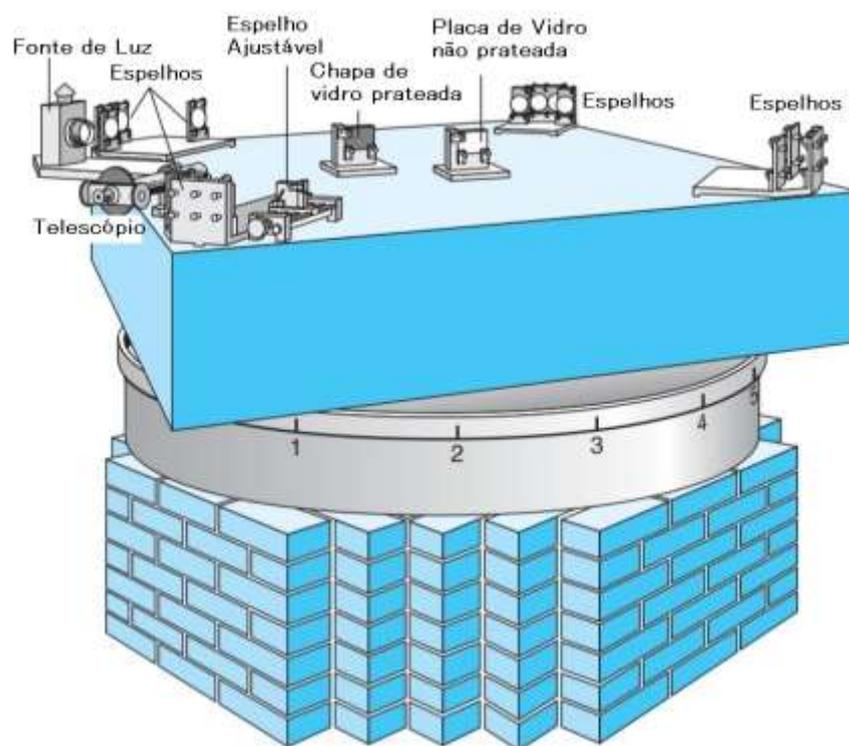
Antes de 1878 as técnicas disponíveis permitiam a aferição em breves intervalos de apenas uma parte desses padrões. Nesse sentido, inevitavelmente, não eram capazes de realizar a detecção de efeitos ínfimos. Por isso, já em 1887 (seis anos depois do primeiro ensaio solo) Edward Williams Morley iniciou uma cooperação com Michelson, objetivando a reformulação e o aprimoramento de sua descoberta para obtenção de respostas mais positivas e com o intuito de constatar o movimento da Terra através do éter, corroborando sua presença. Seguindo esse planejamento, a dupla conseguiu diminuir a influência de fatores externos (eliminando a produção de distorções) que possibilitou a elevação da confiabilidade da análise do instrumento óptico (SOUZA, 2019). Faz-se necessário, portanto, expor o restante do raciocínio bem como a fundamentação e o princípio de funcionamento do aparelho que utilizaram, através de uma interpretação analógica, isto é, explicação do exercício da aplicação utilizando o exemplo fictício a seguir:



**Figura 4:** Esquema genérico para elucidação dos fenômenos ópticos e eletromagnéticos estudados.  
 [Fonte: TIPLER; LLEWELLYN, 2008]

Todos os integrantes do esquema acima estão em movimento retilíneo uniforme com velocidade ( $v$ ) em relação ao referencial, na situação em questão, o éter. A distância ( $L$ ) entre a fonte e o dispositivo refletor foi uma grandeza dimensionada com base na multiplicidade de reflexões. Se adotássemos a teoria clássica, a velocidade da luz ( $c$ ) deveria ser subtraída por  $v$  para o observador que enxerga a luz saindo da fonte, propagando pelo meio e indo em direção ao espelho; e acrescida de  $v$  para a luz refletida dele (TIPLER et al., 2008). Colocando em termos mais compreensíveis, podemos comparar a uma onda sonora viajando com velocidade de 340 m/s em relação ao ar. Se o vento tiver uma velocidade de 10 m/s em relação a terra, e o som se propagar a favor dele, a velocidade do som em relação ao solo será de  $(340 + 10)$  m/s; quando contra haverá de ser realizada a subtração  $(340 - 10)$  m/s. A este fenômeno dá-se o nome de efeito do arraste, que era esperado na circunstância da luz e do éter medindo suas velocidades em relação a um referencial para direções distintas.

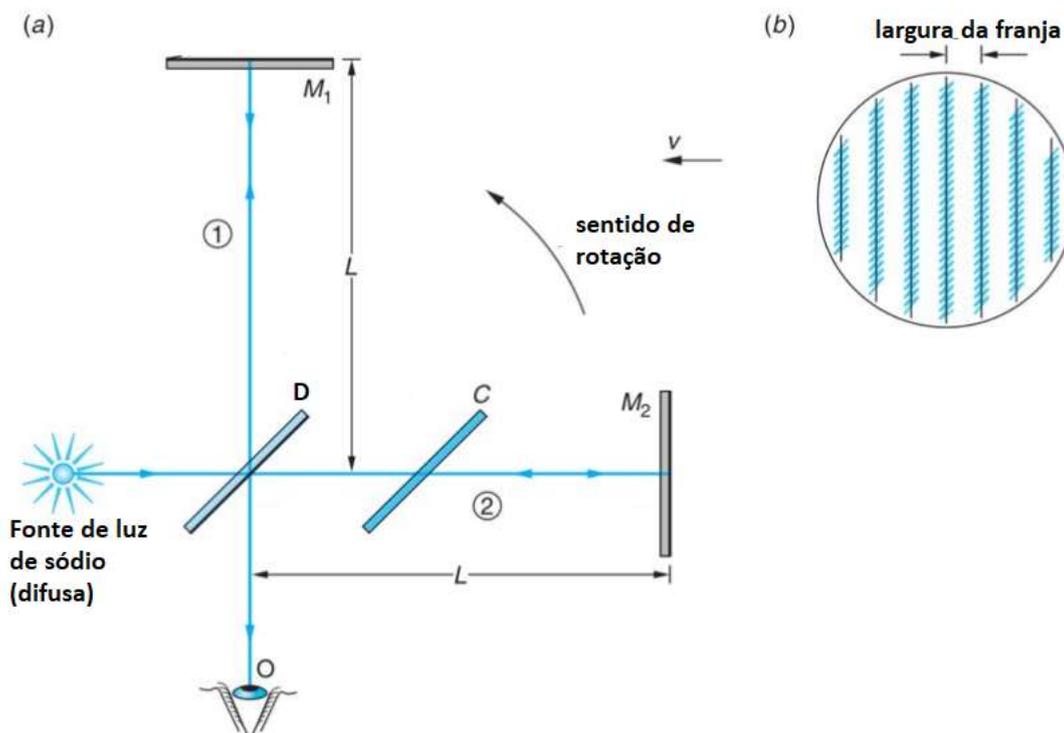
Abaixo é apresentada uma gravura (Figura 5) mostrando toda a plenitude da configuração sistemática, idêntica à do artigo original



**Figura 5:** Projeto do aparato de Michelson-Morley.

[Fonte: R. S. Shankland Copyright © novembro de 1964 por Scientific American, Inc.]

No ensaio mostrado acima (Figura 5), que é o experimento em si, foi usado uma fonte em repouso (para manter a frequência constante) e as peças foram posicionadas em uma laje de pedra maciça de arenito com 1,5 m<sup>2</sup> de área e 0,3 m de espessura. Montou-se o arranjo situando a placa como uma parte flutuante sob uma cova artificial pouco funda contendo mercúrio. Essa cavidade rasa era um tanque de ferro fundido de 1,5 cm de espessura, com uma folga de 1 cm para liberar espaço entre as peças. O reservatório é mantido imóvel e se encontra disposto sobre uma estrutura simétrica octogonal oca de cimento e tijolos com toda a porção superior, no momento das medidas, coberta por um pedaço de madeira, prevenindo rápidas mudanças de temperatura ou até mesmo correntes de ar que poderiam proporcionar adulteração dos sinais. O ajuste dos espelhos (altitude e azimutal) foi efetuado por parafusos fixos nos fragmentos fundidos, e pressionados por molas que os mantinham presos (MICHELSON; MORLEY, 1887).



**Figura 6:** Visão localizada do mecanismo de reflexões para obtenção das franjas.

[Fonte: TIPLER; LLEWELLYN, 2008]

No sistema em questão (Figura 6), em (a) a luz amarela proveniente da fonte monocromática (lâmpada de vapor sódio, emitindo em 590 nm) é separada em dois feixes em fase pelo divisor (D) parcialmente refletivo, e eles percorrem caminhos mutuamente perpendiculares (1 e 2) refletindo nos espelhos ( $M_1$  e  $M_2$ ) e retornando a D onde se recombinam e são vistos pelo observador (O). O Compensador (C) que é uma outra superfície refletora que tem a finalidade de fazer os dois caminhos de igual comprimento óptico ( $L$ ) contêm o mesmo número de onda ( $1/\lambda$ ). O campo de visão, o qual o espectador tem acesso, consistirá em bandas paralelas (b) alternadamente formadas por manchas amarelas e pretas (franjas), e a esperança era fundamentar na prática a teoria de que o movimento através do éter introduzisse uma diferença de fase mensurável.

Todas essas modificações que foram feitas a partir da tentativa original, asseguraram o amortecimento das vibrações durante a rotação, sem introduzir tensões mecânicas, uma das principais dificuldades que afetaram as primeiras investidas. Uma vez corrigidas essas deficiências, daí em diante poderiam ser feitas medidas em todas as direções; horizontalmente falando, bastava apenas impulsionar o giro bem lentamente de forma a atingir gradualmente cada uma das dezesseis

marcas equidistantes pré-assinaladas, durante seis revoluções. Cada volta em torno do eixo durava em média seis minutos, levando pouco mais de meia hora para finalizar as medições.

Essa precisão crescente, pretendia captar esses padrões mais consistentemente conforme a luz se propagasse em diferentes direções, ainda assim, contrariando as expectativas, não foi suficiente para tornar o instrumento eficiente na detecção de vento etéreo. Rotacionar o interferômetro em um ângulo reto, em relação a posição de origem (Figuras 5 e 6) deveria dobrar a diferença de tempo e mudar a fase, deslocando o padrão em uma quantidade  $\Delta N$  valendo cerca de quarenta vezes o deslocamento mínimo de 0,01 franja. Para a decepção dos dois parceiros de laboratório a mudança periférica foi de apenas 0,01 franja, ou seja, a própria incerteza. (PIMENTEL, 2012).

Inicialmente justificou-se esse desapontamento sustentando o argumento da sensibilidade do equipamento, contudo, a posteriori, percebeu-se que tal conclusão era a primeira evidência que possivelmente essa substância invisível seria indetectável simplesmente por não ser real ou então a segunda opção seria que sua dinâmica possuía um caráter não completamente assimilado ainda (CORDOVA, 2016).

Sendo assim, o experimento da dupla angariou um desfecho por um lado desfavorável por não decorrer como esperado; já por outro, bastante satisfatório para Michelson, levando em consideração que sua pesquisa excepcionalmente lhe rendeu um prêmio Nobel em 1907, histórico por ser o primeiro físico norte-americano a conquistá-lo. Sendo assim, começou-se a entender a luz como uma onda eletromagnética que se auto mantém, não necessitando de um meio para se propagar.

Entretanto, a pressuposição da essência do éter luminífero de mediar fenômenos eletromagnéticos não foi totalmente abandonada, e muitos outros cientistas fizeram tentativas frustradas nesse quesito, mais de uma dezena de vezes, sob várias condições (por exemplo Georg Joos que buscou alongar o caminho luminoso  $L$ ); mas em segundo plano tal ideia foi mediatamente rejeitada pela grande maioria da comunidade científica, após um certo tempo, dado que esse conceito não era tão útil quanto elegante, à medida que nunca houve aparelhagem capaz de garantir que esse sistema em repouso pudesse ser notado, significando que se houvesse movimento relativo seria extremamente pequeno, da ordem de  $10^{-8}$  m (TIPLER et al., 2008).

Um outro registro honroso que merece ser aqui declarado é a dedução realizada por Hendrik Lorentz, criador da teoria do arrastamento (ou hipótese da contração), que apesar de não conseguir evidências para provar que o éter poderia ser esse meio gravitacional mecânico, demonstrou que existiam partes elementais (virtuais) desse tecido espacial estacionário hipotético, que teriam o potencial de serem percebidas com uma grande perturbação (verificado por investigações subsequentes com aceleradores de partículas) e talvez até rastreadas ao longo do tempo, apesar do experimento de Michelson-Morley ter deixado explícito que a ideia de movimento poderia não ser aplicável aqui. Lorentz criou uma espécie de tubo de barômetro metálico, que quando inclinado expulsava o suposto éter do espaço acima, provando que ele era compressível, e poderia passar através de metais ou talvez até de objetos transparentes, se existisse. O que ele não soube explicar é se havia perfeita liberdade ou alguma espécie de resistência. Esse modelo abstrato e substancial foi considerado antecipado por ser inobservável, mas nunca foi integralmente descartado configurando quase como um paradoxo relativístico. Dito isso, até hoje não se nega completamente essa especulação de uma matéria que permeia tudo.

Em meio a tudo isso, a questão primordial é que graças a corrente de pesquisa iniciada com o experimento de Michelson-Morley que, mesmo involuntariamente, refutou com sucesso a teoria do éter, até então predominante, foram abertas perspectivas para um novo postulado que veio com a exposição do cientista alemão Albert Einstein de uma das descobertas mais importantes na história da evolução da ciência: a invariabilidade da velocidade da luz, assim como sua magnitude e extensão à teoria eletromagnética (EINSTEIN, 1905). Sobre o ensaio fundamental em questão Einstein escreveu a seguinte assertiva: “Se o experimento de Michelson-Morley não tivesse nos deixado fortemente constrangidos, ninguém teria considerado a teoria da relatividade como uma quase redenção”. Posto isso, o que ficou comumente conhecido por Relatividade Restrita estabeleceu que a variável em discussão é limitada, invariante, conhecida e independente do movimento da fonte em relação ao observador, isto é, não se somam. Esse novo princípio trouxe o pressuposto que a constante universal  $c$  é a mesma em todos os sistemas de referenciais inerciais e em todas as direções em que for medida, fato que enfim compatibilizou a teoria eletromagnética a relatividade.

Infere-se, portanto, que toda essa derivação conceitual teve como pedra angular, ou seja, fonte principal de inspiração justamente as reflexões e preceitos advindos como consequências da criação do interferômetro (BRAGA et al., 2004).

## **1.2. Instrumentos para medidas na região do IV**

Atualmente existem duas principais classes de técnicas para análises instrumentais disponíveis comercialmente quando se visa realizar medidas de absorção na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético: instrumentos multiplexados e não-multiplexados. Ambas possuem uma subdivisão que categoriza a aparelhagem em conjuntos: os dispersivos de redes, muito importantes no quesito qualitativo da análise; e os não-dispersivos, desenvolvidos para melhorarem o aspecto quantitativo (PASQUINI, et al., 1996)

Os da primeira classe fazem uso de apenas um detector recebendo dados codificados em um padrão característico que graças a equações matemáticas podem ser traduzidos em informações espectrais. Um exemplo mais clássico de um instrumento da primeira e segunda subdivisões citadas é o espectrofotômetro com transformada de Hadamard e de Fourier, respectivamente (SKOOG et al., 2002). Os mais conhecidos, evidentemente gozam dos benefícios da baixa complexidade da transformada de Fourier, que viabiliza maiores resoluções com a oportunidade de determinar com exatidão e reprodutibilidade frequências específicas em intervalos de tempo bastante breves entre duas varreduras consecutivas. Somando isso à favorável correção de fundo (capaz de sobrepor o obstáculo da radiação espúria, que não interage como o analito, ao modular as frequências com a utilização de fendas ou filtros) tornam-se, nas mãos de analistas experientes, dispositivos formidáveis.

Enquanto isso, os não-multicomplexados podem empregar apenas um (monocanais) ou uma variedade de detectores simultaneamente (multicanais). A diferença principal que a literatura menciona, salvo é claro, o posicionamento do monocromador, é o fato de que nos instrumentos monocanais ocorre a varredura de apenas um comprimento de onda por vez, enquanto nos multicanais há interação com todos os comprimentos de onda da radiação. Isso deve-se ao arranjo circunstancial de diminutos elementos fotoelétricos distribuídos uni (arranjo de fotodiodos) ou bidimensionalmente (dispositivos de transferência de carga) sobre um chip eletrônico

de um semicondutor. Tais circuitos sensoriais possibilitam a determinação do sinal elétrico de cada um desses integrantes sequencial e simultaneamente coletando cargas geradas em várias regiões da linha ou superfície do transdutor. Em seguida, é quantificada a acumulação das mesmas em um breve e determinado período e sua magnitude depende do tempo de exposição à luz. Com a promoção de lacunas (ou vacâncias), os elétrons se direcionam para o eletrodo mediante aplicação de carga elétrica e são coletados (comportando entre  $10^5$  e  $10^6$  deles antes que sejam transportados para o pixel adjacente).

Ainda nessa classe, também há a subdivisão vista na anterior, na qual os dispersivos normalmente utilizam redes de difração enquanto os não-dispersivos se limitam ao uso ou de filtros ou de diodos emissores.

Normalmente, define-se uma separação instrumental com relação a uma particularidade: quando forem sujeitos a um feixe único (que alterna entre a amostra e o branco) ou caso contrário. É plausível e plenamente possível um instrumento de feixe único que também seja classificado como multicanal; para isso basta apenas acrescentar à instrumentação lentes colimadoras de modo a paralelizar o feixe. A única exigência é que o mecanismo seja extremamente fixo (sem peças móveis ou minimamente soltas). Destarte, pode-se eliminar problemas de calibragem, que porventura poderiam ser prejudiciais ao experimento.

Elucidando mais profundamente sobre a segunda circunstância, é natural que espectrômetros dispersivos funcionem com base na geração e emissão (pela fonte) de radiação que ao interagir com o espelho é dividida em dois feixes paralelos de mesma intensidade, que passam pelas células de referência e da amostra ao mesmo tempo, porém chegando em períodos distintos ao detector. Todos os efeitos ópticos como dispersão e reflexão que poderiam atrapalhar a análise são subtraídos (compensados) pela referência que desconta o *background*. Com a escolha do solvente adequado (para o infravermelho recomenda-se apolares), ao fazer a varredura do padrão (normalmente o ar), múltiplas vezes, o processo é seguido pela soma e armazenagem dessa coleção de dados. Por isso, é imprescindível trabalhar sempre com a umidade do ambiente sob controle e, se por acaso este não estiver seco o suficiente pode-se fazer um tratamento do material fazendo uso de uma peneira molecular ou sílica, a fim de eliminar ao máximo a presença de moléculas de

água. Ademais, é obrigatório a purga com Nitrogênio e Argônio, suprimindo bandas interferentes provenientes do sinal do dióxido de carbono.

Abrangendo tais instrumentos mais detalhadamente, temos algumas particularidades significativas que merecem ser mencionadas: o grande número de partes móveis que estes possuem muitas vezes é o motivo pelo qual seus custos são exorbitantes; a dependência da largura da fenda na resolução e, como consequência, a maior probabilidade de ocorrência de luz espúria, isto é, de radiação instrumental fora da faixa de comprimento de onda selecionada, resultante do espalhamento. À lista de desvantagens pode-se acrescentar também a velocidade um pouco reduzida da varredura devido a necessidade de seleção de comprimento de onda, que é um fator limitante, afinal impacta diretamente o tempo de análise e restringe sua aplicabilidade. Entretanto, em meio a tantos pontos negativos vale ressaltar que o instrumento dispensa ajustes mecânicos constantes, e quando se fazem necessários, se mostram bastante sintéticos graças a modernização e tecnologia atual.

Por outro lado, na porção positiva, uma vez que se recorra ao emprego da fenda estreita e sejam feitas várias medidas, pode-se melhorar substancialmente a razão sinal/ruído. Finalmente, hoje, houve uma expressiva redução nos custos de protótipos mais simples, que tornou exequível a substituição ampla dos modelos mais caros presentes em laboratório, obsoletos competitivamente falando (economicamente desfavoráveis).

### **1.3. Funcionamento do Interferômetro**

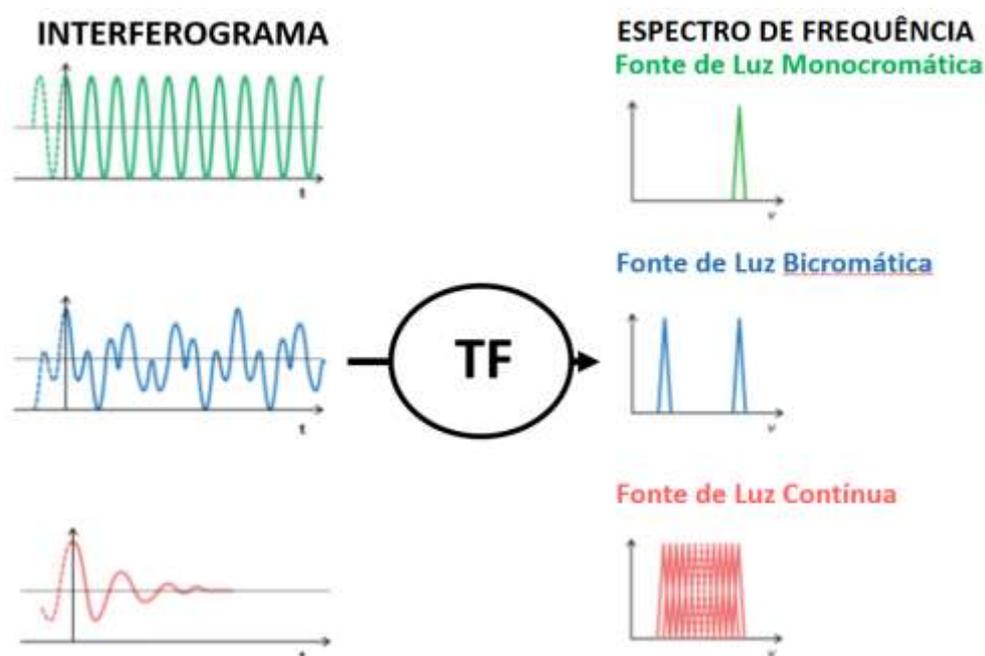
Todo fenômeno ondulatório pode ser descrito por uma soma de senos e cossenos. A transformada de Fourier, decompõe uma função temporal (que é a tradução matemática de um sinal) em frequências que auxiliam na interpretação das informações químicas através da decodificação e processamentos de uma série de dados. Em outras palavras, através dela pode-se representar ondas aperiódicas, fazendo com que os comprimentos de onda adicionados construam uma função desejada diferindo entre si infinitesimalmente, o que se denomina integral de Fourier. Essa integral é responsável pela tradução dos dados abstratos, visto que só com o interferograma não é possível interpretar efetivamente. Logo, o sinal obtido torna-se

primordial à análise, revelando informações sobre uma ou mais espécies químicas, dependendo da especificidade do equipamento.

Um espectrofotômetro FTIR, através da modulação das diferenças de fase das ondas por um espelho se movendo a uma velocidade constante, é capaz de gerar um gráfico de intensidade de radiação detectada pelo deslocamento do espelho, apresentando um comportamento senoidal no caso de fonte monocromática. Ao aplicar a transformada de Fourier obtêm-se um sinal único, referente a frequência da luz. Já no caso de bicromática, há componentes referentes a duas frequências de trabalho; sendo assim o diagrama torna-se ligeiramente mais complexo, e ao aplicar a transformada são explícitos não mais apenas um, mas dois sinais.

Por fim, se for usada uma fonte contínua, seu espectro será resultado da sobreposição de ondas de frequências distintas. Antes de o espelho se mover, no instante inicial da análise, não existe defasagem e a intensidade é máxima em todos os números de onda. Em qualquer momento que não esse, isto é, quando  $t > 0$ , as interferências fazem com que o sinal vá convergindo a zero.

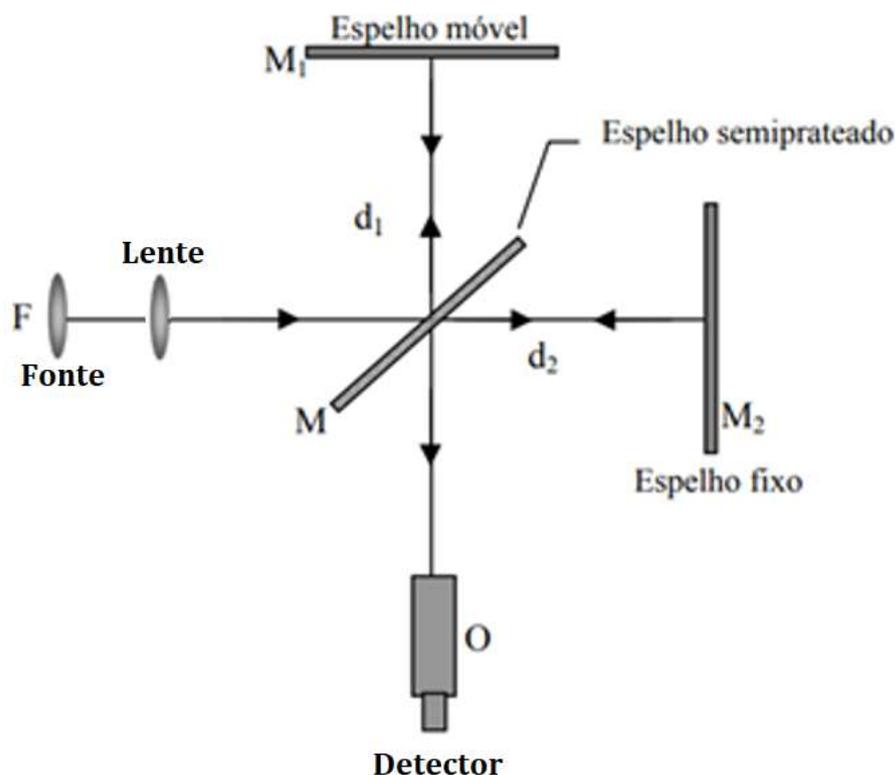
A representação gráfica do sinal pelo tempo é chamada de interferograma (sinal analógico). Fazendo uso da transformada de Fourier é possível mensurar a frequência do espectro original (sinal digital). Por isso a aquisição de espectros com essa técnica é mais veloz que fazendo uso de instrumentos dispersivos convencionais.



**Figura 7:** Espectro de frequência obtido a partir do interferograma utilizando a Transformada de Fourier.

[Fonte: Principles of Infrared Spectroscopy, JASCO 2020]

Apesar dos caminhos ópticos poderem ser periodicamente heterogêneos, a divisão dos feixes converge sobre o detector, e formam um padrão de interferência (anéis) o qual fornece a potência da radiação. Além disso, pode-se determinar, por exemplo, o comprimento de onda de um laser de diodo operando na faixa do visível.



**Figura 8:** Esquema da montagem de um interferômetro genérico.

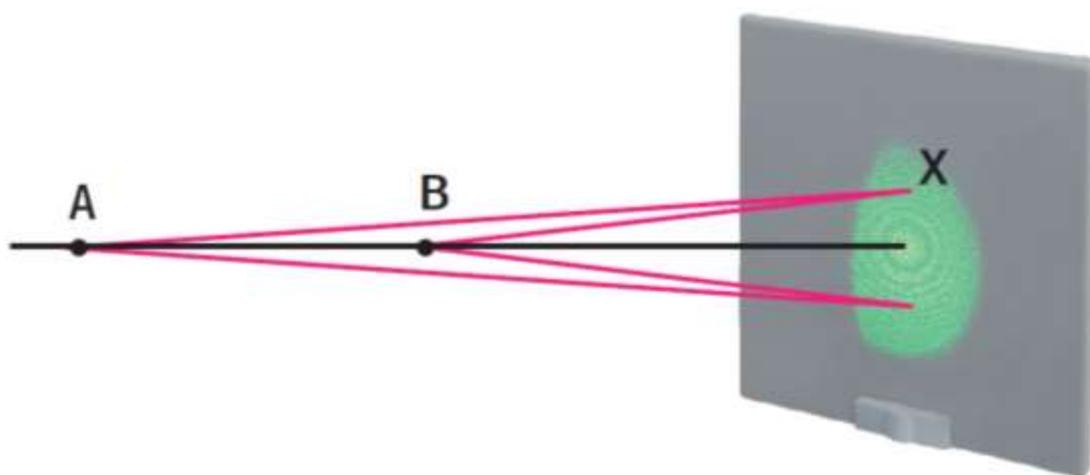
[Fonte: NASCIMENTO, 2005]

No arranjo acima (Figura 8), raios de luz provenientes da fonte F são separados por um divisor de feixe M de espessura desprezível, percorrendo caminhos diferentes para atingirem os espelhos  $M_1$  e  $M_2$  (revestidos por uma camada de prata super fina) posicionados nas extremidades, e, após passarem por uma lente (colimador) são recombinados em uma mesma trajetória antes de atingirem o detector situado em um anteparo que é o ponto de observação simbolizado por O.

Um ciclo de variação ocorre cada vez que o feixe é deslocado pela metade do comprimento de onda operacional da fonte, e este está sujeito ao índice de refração do meio que o feixe atravessa (usualmente o ar, por isso é importante manter temperatura, pressão e umidade relativa controladas para realizar a compensação caso haja variação em qualquer um dos parâmetros citados, lembrando sempre que

a dilatação térmica de peças isoladas ou da estrutura como um todo não é considerada). Tal instrumento, que hoje se mostra bem menor que a versão usada por Michelson e Morley, proporciona uma melhor resolução linear.

Surge, portanto, um anel característico no anteparo cujo tamanho (raio ou diâmetro) é intrínseco a distância que a luz percorre, como mostra a Figura 9. O formato é explicado pela variação dos comprimentos dos braços de apoio (alavanca) do interferômetro, fato que é inerente da impossibilidade de ajuste em escala nanométrica com a tecnologia atual disponível. Sendo assim, é como se a luz estivesse partindo de duas fontes virtuais, e as ondas passam a se sobrepor, uma vez que o feixe é dividido em dois.



**Figura 9:** Explicação do padrão concêntrico de franjas; (A/B) Fontes virtuais. (X) Sobreposição das ondas.

[Fonte: EDU MINT2 English Manual]

Se alteramos a posição do anteparo, mesmo em pequena escala, corresponderá a uma grande alteração no comprimento do caminho, e isso muda também o espaçamento entre as franjas devido a diferença de fase entre as funções de onda. Deve-se, portanto, ajustar essa posição de tal forma que se obtenha um padrão simétrico. É importante procurar uma conformação com os apoios idênticos ou o mais próximo possível disso.

A determinação do comprimento de onda ( $\lambda$ ) de um feixe de luz monocromática (como um laser verde ou vermelho, que são os mais comuns) pode ser feita com a Equação 1 cuja explicação vem a seguir. O padrão concêntrico, consiste de uma condição de extremo superior da onda que é levada a sua condição de máximo consecutiva (podendo ser também de extremo inferior), e isso ocorre cada vez e

sempre que uma distância definida por  $\Delta_x$  for um múltiplo inteiro de  $\lambda/2$ , pois a luz passa ao longo do sistema na ida e depois, semelhantemente, no retorno. Sendo assim, considerando um ponto fixo como o centro da franja circular, pode-se deduzir uma relação entre as variáveis, deslocando o espelho transladável por  $\Delta_x$  e contando o número  $N$  de máximos (crista) e mínimos (vale) da onda, que pode ser traduzido graficamente por um pico, aplica-se a seguinte fórmula para a determinação do  $\lambda$ :

$$N\lambda = 2 \Delta_x \rightarrow \lambda = \frac{2 \Delta_x}{N} \quad (1)$$

*[Fonte: EDU MINT2 English Manual]*

#### **1.4. Interferômetros Comerciais e LAB Made**

Mormente, insta salientar que uma das principais funções de um interferômetro é a obtenção de espectros.

Como alternativas disponíveis no mercado, no presente trabalho serão citadas três delas.

Tal fato deve-se a grande precisão e complexidade na montagem de suas peças e demais componentes, cuja matéria prima dos mesmos deve ser específica, a fim de evitar uma grande porcentagem de perturbação mecânica. Por isso a versão final é extremamente eficiente na obtenção de informações químicas fidedignas.

Na contemporaneidade, um exemplo de instrumento comercial de confiança que aqui será usado como referência é o EDU MINT2 de patente pertencente aos laboratórios Thor com múltiplas aplicações (EDU MINT2 English Manual – Michelson Comercial). Serão brevemente demonstradas algumas características e particularidades de seu funcionamento, baseando no arranjo mostrado na Figura 10.

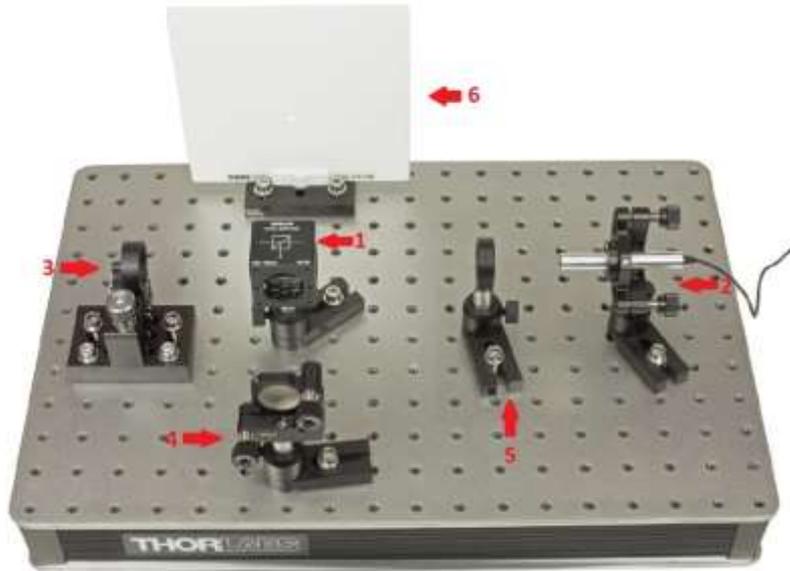


Figura 10: Configuração do interferômetro comercial; (1) Divisor de feixe CCM1-BS013. (2) Laser CPS532-C2. (3/4) Espelhos PF10-03-P01 fixo e móvel, respectivamente. (5) Lente LB1471. (6) Tela EDU-VS1.

[Fonte: EDU MINT2 English Manual]

Cada uma das partes e seus devidos locais de posicionamento na chapa metálica são semelhantes ao que foi explicitado na *Figura 4*. O instrumento é composto de um cubo divisor de feixe que transmite 50% da luz e reflete os 50% restantes, de tal forma que a posição permita que os feixes transmitido e refletido estejam a  $90^\circ$  entre si; uma fonte de luz monocromática emitindo na região do verde; uma lente divergente biconvexa; espelho não móvel fixado por parafusos nivelado com o espelho refletor móvel para atenuar distorções. Todavia, cabe ressaltar que a aquisição desse equipamento é um investimento de custo elevado, afinal todo esse arranjo chega a valer U\$ 2.850,00 conforme o site oficial da empresa. Ao converter para o real, mediante cotação atual, pode custar até R\$ 16.000,00. Cabe citar também que, apesar do valor, esse instrumento possibilita apenas a contagem das franjas, não permitindo a obtenção de interferogramas ou de espectros.

Por outro lado, existem os chamados interferômetros LAB MADE que são substancialmente mais simples, logo, também mais baratos. Seus constituintes são gerais, diversos e até mesmo alternativos, se adequando a necessidade e disponibilidade, podendo ser facilmente substituídos. Normalmente os espelhos são fixados por parafusos micrométricos segundo a representação a seguir (*Figura 11*):

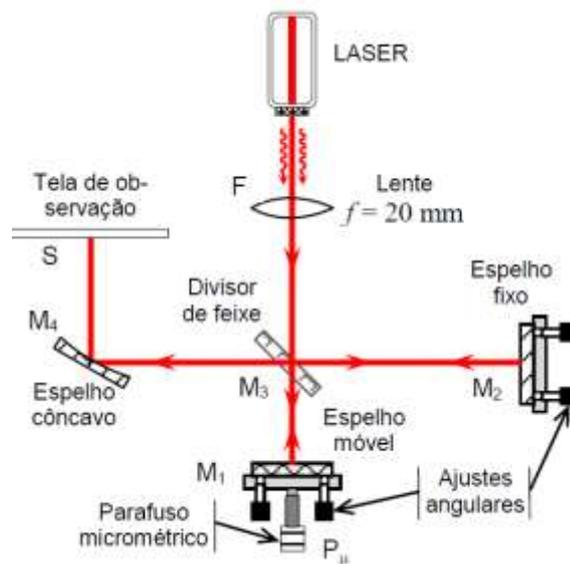


Figura 11: Diagrama teórico e demonstrativo de um interferômetro LAB MADE.

[Fonte: SUAVE, 2007]

Pode-se, por exemplo, construir um divisor de feixe eficiente a partir de retalhos de uma lâmina espessa, de acrílico ou vidro transparente, visto que a quantidade de luz refletida sob uma incidência de angulação ordinária é perfeitamente suficiente para garantir que as reflexões estejam mais distantes umas das outras facilitando a visualização de franjas de interferência com bom contraste. Sob essa concepção, os espelhos podem ser reciclados de pedaços provenientes de CD (menor nitidez das franjas) ou improvisados com lentes de óculos de sol sem grau e na etapa de inserção dos artefatos pode-se fazer uso de alguma espécie de massa de modelar ou cola (como superbonder ®) em uma laje de pedra, por exemplo, como fizeram os pesquisadores da Universidade de Caxias do Sul para evitar maiores vibrações mecânicas (CATELLI et al., 2004).

Um exemplar que merece citação é o trabalho realizado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (SOUZA et al., 2019), que tiveram êxito na construção de um interferômetro com material de fácil acesso e baixo custo.

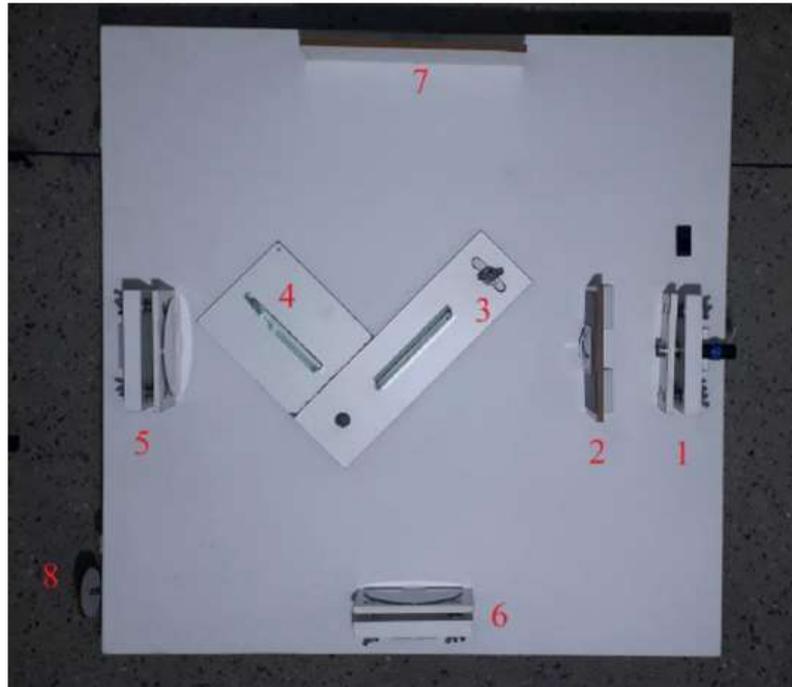


Figura 12: Disposição dos componentes na superfície da caixa (aparato experimental): (1) Fonte de luz; (2) Suporte da lente; (3) Divisor; (4) Compensador; (5) Espelho Móvel; (6) Espelho Fixo; (7) Anteparo; (8) Parafuso do Deslocador.

[Fonte: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/D4r6ss6FJ5hKPTCdYJqWYmm/?lang=pt&format=pdf>]

Nesse sentido, boa parte do processo é manual, afinal o analista marca as bordas dos anéis e averigua a quantidade de franjas enquanto prossegue girando o parafuso do deslocador com o intuito de observar e contar a alternância de máximos e mínimos no centro da tela de projeção, porém sua desvantagem é a mesma do instrumento de referência citado acima, não sendo possível adquirir os interferogramas, além do fato de que há de se ter em mente que todo o equipamento é extremamente sensível e necessita de bastante cautela no ajuste.

É razoável concluir que a missão deste trabalho nada mais é que encontrar um meio termo entre a simplicidade e acessibilidade material do LAB MADE e que também permita a obtenção de alguma informação espectral, assim como os comerciais, sem o revés de ser oneroso.

## 2. OBJETIVOS

Tendo em vista o contexto já explanado, o presente projeto tem como propósito contribuir para a confecção de um interferômetro de Michelson automático, controlado remotamente por smartphone, que permita a a movimentação motorizada do espelho e a aquisição de interferogramas e espectros de fontes luminosas monocromáticas.

Em outras palavras, a pretensão era gerar uma solução elegante para favorecer o ensino de óptica, disponibilizando uma nova estratégia para aplicação didática, oferecendo ao estudante/aluno a oportunidade de tanto entender os princípios básicos de funcionamento do aparelho, quanto executar na prática os conceitos teóricos assimilados sobre o manuseio e performance de um instrumento analítico com suas partes internas e funcionalidades específicas, tornando mais concreto aquilo que as vezes pode ser um pouco abstrato em livros ou aulas, expandindo assim a gama de conhecimentos interdisciplinares palpáveis.

Neste contexto, teve-se como objetivos específicos:

- a montagem de circuitos eletrônicos e de aparatos mecânicos intrínsecos ao instrumento.
- o interfaceamento digital do instrumento com um smartphone através de um aplicativo feito no laboratório.
- a avaliação dos dados gerados pelo instrumento para a obtenção de espectros de fontes de radiação monocromáticas (lasers).

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

#### 3.1. Componentes para a construção do Instrumento

Todos os componentes do instrumento, com exceção das estruturas impressas em 3D, foram adquiridos via internet, sendo os fornecedores referenciados. A Tabela 1 lista os itens com seus respectivos valores, em reais, para a sua aquisição.

**TABELA 1** – Relação entre gastos e montante de material adquirido

| Material   | Quantidade    | Valor médio (R\$) por unidade / origem |
|--|---------------|--|
| Laser Pointer (Vermelho, Verde e Violeta) <sup>[16]</sup>              | 3             | 21,97                                  |
| Divisor de Feixe <sup>[15]</sup>                                       | 1             | 20,25                                  |
| Chapas de madeira da Base  | 2             | Residuo de reforma do laboratório      |
| Espelhos de primeiro plano   | 2             | Reciclado de disco rígido interno      |
| Lente Biconvexa Divergente <sup>[27]</sup>                             | 1             | 78,69                                  |
| Filamento de PLA (Rolo Preto e Branco com 380 m, cada) <sup>[18]</sup> | 2             | 89,90                                  |
| Nebulizador portátil <sup>[26]</sup>                                   | 1             | 24,50                                  |
| Molas (20 mm) <sup>[20]</sup>  | 4             | 2,49                                   |
| Parafusos M3 (45 mm) <sup>[20]</sup>                                   | 4             | 2,49                                   |
| Ímãs <sup>[19]</sup>   | 8             | 1,62                                   |
| Motor de Passo Nema 17 <sup>[12]</sup>                                 | 1             | 68,89                                  |
| Driver CNC Tb6600 <sup>[13]</sup>                                      | 1             | 59,90                                  |
| Arduíno Uno R3 <sup>[17]</sup>   | 1             | 69,90                                  |
| Fuso TR8 com passo de 2 mm (com Acoplamento e Mancais) <sup>[14]</sup> | 1             | 113,05                                 |
| Guia Linear com Patins <sup>[25]</sup>                                 | 1             | 199,90                                 |
| Regulador de Tensão LM317 <sup>[21]</sup>                              | 1             | 12,90                                  |
| Detector fotodiodo OPT 101 <sup>[22]</sup>                             | 1             | 7,47                                   |
| Bloco de Alumínio (Suporte para fuso TR8) <sup>[24]</sup>              | 1             | 39,52                                  |
| Módulo Bluetooth JDY-31-SSP <sup>[23]</sup>                            | 1             | 14,95                                  |
| <b>TOTAL</b>   | <b>988,51</b> |  |

A diminuição do custo é uma das consequências da simplicidade da aparelhagem. Fica manifesto que os locais de aquisição são apenas sugestões e o valor de cada material pode variar dependendo da loja

### **3.2. Construção do Instrumento**

A Figura 13 mostra a visão geral de uma das versões do instrumento proposto com a disposição de todos os seus componentes. Devido a alguns motivos, cuja dissertação das causas será feita na etapa de discussão, foram empregadas duas bases com dimensões de 33 cm de largura por 46 cm de comprimento: uma para o motor, fuso e espelho móvel e outra para a fonte, divisor e espelho fixo, sendo essa última suspensa por 3,5 cm em relação à anterior (Figura 14). Após inserir parte da base mais baixa no vão entre a mais alta e o solo, incorporou-se à porção inferior de ambas três pares de pés de apoio em silicone para sustentação na bancada. Ulteriormente, instalou-se uma chapa de aço de 44 cm de comprimento por 30 cm de largura e 1 mm de espessura na parte de cima da base superior (com um retângulo de 12 cm por 9 cm livre na lateral direita), que permitiu o melhor assentamento dos acessórios por magnetismo, após a inserção de ímãs nos suportes como será mostrado adiante.

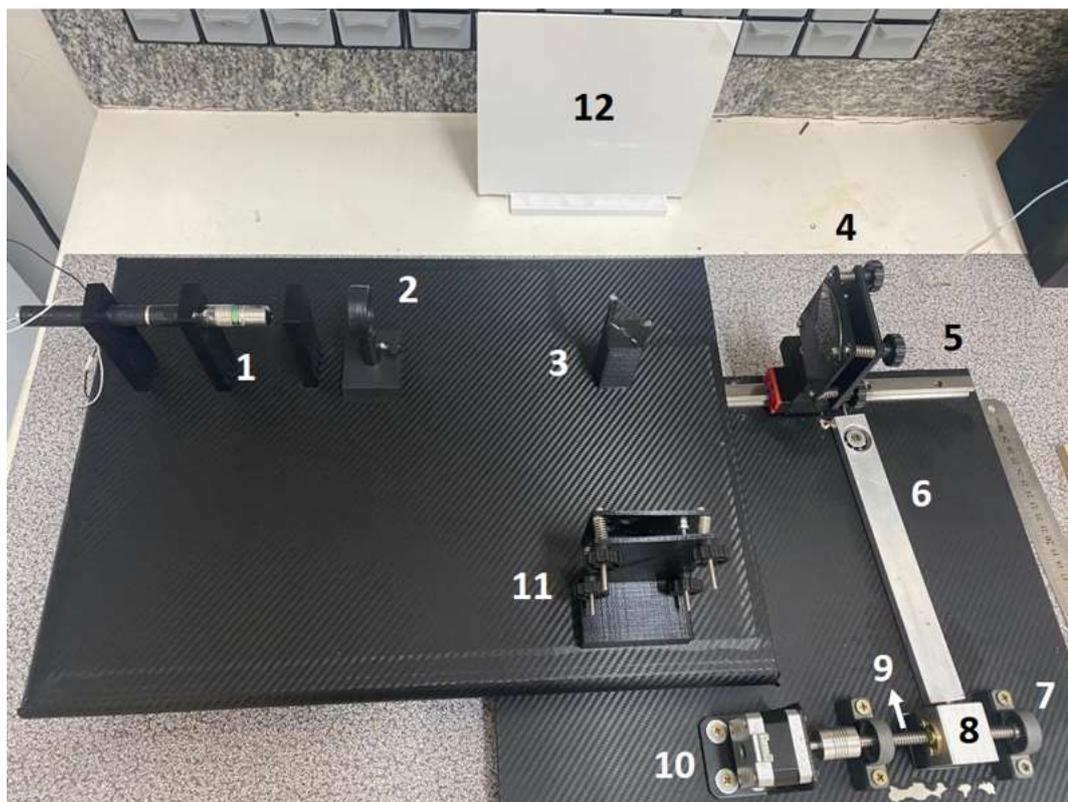


Figura 13: Visão geral do instrumento proposto. (1) Fonte de radiação laser; (2) Lente Expansora; (3) Divisor de Feixe; (4) Espelho Móvel; (5) Patins da Guia Linear; (6) Alavanca de Redução; (7) Mancal com Rolamento; (8) Bloco de Alumínio; (9) Fuso; (10) Motor; (11) Espelho Fixo; (12) Anteparo.

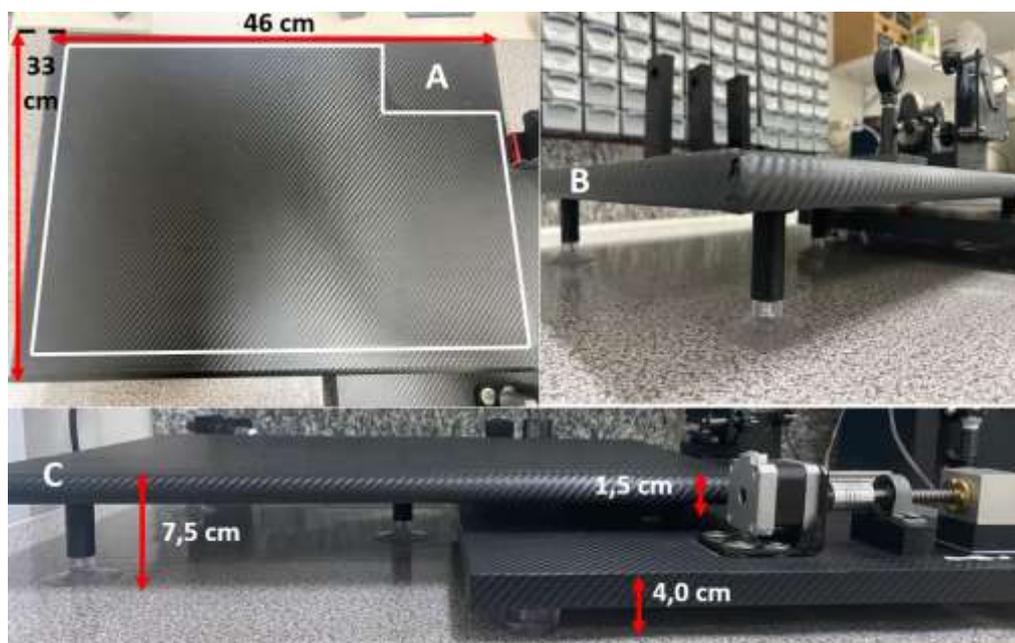
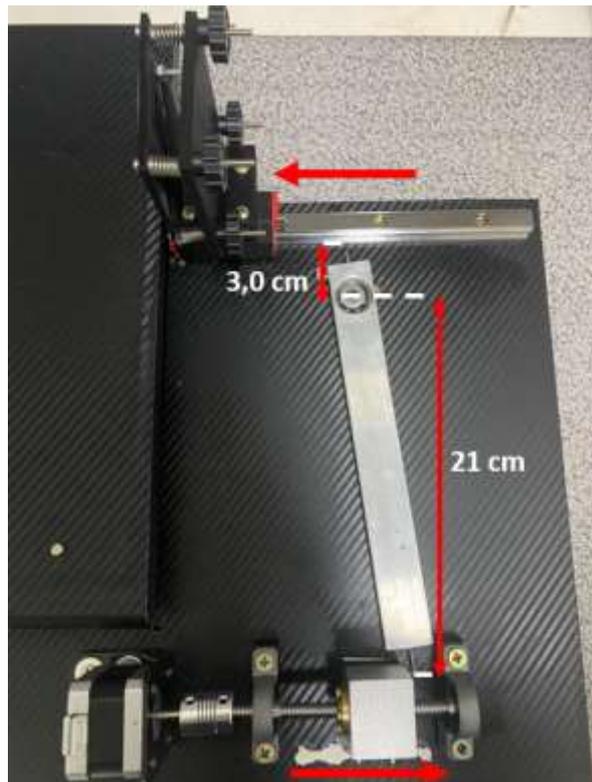


Figura 14: (A) Dimensões da Base após envelopamento com adesivo de vinil; em branco posição da chapa de aço; (B) Pés de Apoio da Base; (C) Alturas das plataformas e entre elas.

Um motor de passo da marca JKong modelo NEMA 17 <sup>[12]</sup>, foi utilizado para a movimentação do espelho móvel. Para isso, o seu eixo foi acoplado a um fuso <sup>[14]</sup> trapezoidal com comprimento de 15 cm e passo de 2,0 mm (Figura 13), o qual foi montado sobre mancais e rolamentos (Figura 13) para permitir a movimentação de um suporte de alumínio <sup>[24]</sup> (Figura 13) devidamente fixado ao fuso por uma castanha de latão de mesmo passo.

Um *Microstep Driver* CNC Tb6600 <sup>[13]</sup> configurável para 32 micropassos, foi utilizado para o controle do motor de passos através de uma placa Arduino Uno R3 <sup>[17]</sup>, possibilitando uma resolução de até 6400 pulsos para rotação completa do eixo do motor. Em outras palavras, esse driver permite que o motor gire em incrementos tão baixos quanto 1/6400 de volta, o que corresponde a um deslocamento linear mínimo de 0,3125  $\mu\text{m}$  do suporte de alumínio acoplado ao fuso.

Para que fosse possível movimentar o espelho móvel em incrementos menores que 0,3125  $\mu\text{m}$ , foi utilizado a estratégia de redução de deslocamento com uma alavanca, de forma semelhante ao que foi proposto no projeto referência (SOUZA et al., 2019). Com esse mecanismo, explicado com mais detalhes adiante, o espelho móvel não é fixado diretamente ao fuso, mas em uma base linear localizada em uma das extremidades da alavanca. Assim, o motor movimenta o suporte de alumínio, empurrando a alavanca que gira em seu ponto de apoio, de forma a empurrar o espelho no sentido oposto ao do movimento do suporte de alumínio, conforme demonstrado na Figura 15 a seguir:



*Figura 15: Indicação do sentido de movimentação do bloco de Alumínio (da esquerda para a direita) e do espelho (da direita para a esquerda); Distâncias entre o ponto de apoio aos pontos de contato com o Bloco de Alumínio e com o Espelho Móvel.*

A alavanca de redução, com a qual se obteve os melhores resultados nesse trabalho, consistiu em uma barra de alumínio com 23 cm de comprimento, 2,5 cm de largura e 1,0 cm de espessura. Em suas extremidades, alinhados ao centro, foram fixados pinos de alumínio com 5,0 mm de comprimento cada, conforme indica a Figura 16.



*Figura 16: Ampliação do sistema responsável pela movimentação do espelho*

Um rolamento com 2,2 cm de diâmetro foi ainda fixado em uma das extremidades da alavanca e um parafuso foi utilizado para ancoragem à base de madeira. Com esse arranjo, a distância do ponto de contato da alavanca com o suporte de alumínio ao centro do rolamento (ponto de apoio) foi de 21 cm e a distância do centro do rolamento ao ponto de contato da alavanca com a base de apoio do espelho móvel foi de 3,0 cm, conforme indicado na Figura 15.

Optou-se por esse mecanismo para contornar o contratempo da amplitude excessiva de movimentação do espelho, para tanto a alavanca foi instalada operando em função da distância entre suas extremidades e do ponto de apoio (centro de rotação da alavanca).

De fato, utilizando semelhança de triângulos temos a relação indicada na Equação 2 para calcular o fator de redução ( $F_R$ ) do movimento, onde  $D_1$  e  $D_2$  são as distâncias indicadas na Figura 17.

$$F_R = \frac{D_2}{D_1} = \frac{21 \text{ cm}}{3 \text{ cm}} = 7 \quad (2)$$

[Fonte: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/D4r6ss6FJ5hKPTCdYJqWYmm/?lang=pt&format=pdf>]

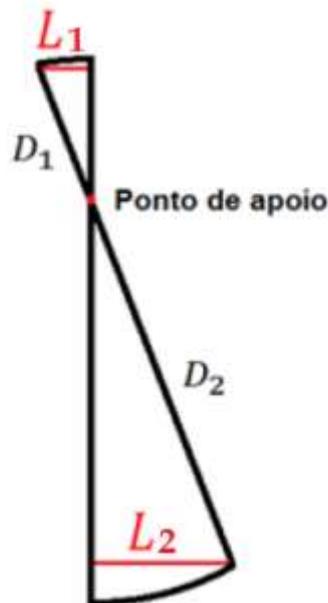


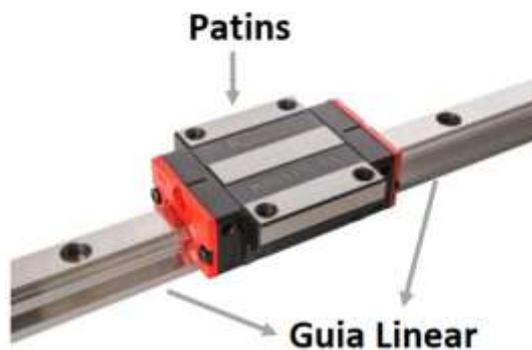
Figura 17: ( $D_1$ ) Distância da guia ao ponto fixo; ( $D_2$ ) Distância do ponto fixo ao bloco de alumínio agregado ao fuso; ( $L_1$ ) Deslocamento do Espelho; ( $L_2$ ) Deslocamento do Bloco de Alumínio

[Fonte: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/D4r6ss6FJ5hKPTCdYJqWYmm/?lang=pt&format=pdf>]

Assim, para uma alavanca com  $D_2$  dez vezes maior que  $D_1$ , o fator de redução seria de 10; levando a um deslocamento do espelho ( $L_1$ ) de 0,1 mm quando o suporte de alumínio no fuso deslocar 1,0 mm ( $L_2$ ).

Considerando a necessidade de movimentação do espelho com o mínimo de atrito e folga, utilizou-se a guia linear com patins <sup>[25]</sup>, indicada na Figura 18, para apoiar o espelho móvel e realizar as medidas. Nesse sistema os patins possuem rolamentos devidamente ajustados à guia que permitem a suavização da movimentação do sistema, aplicando uma pequena força em qualquer um dos sentidos da guia.

Sobre os patins foi fixado um suporte, fabricado por impressão 3D em ácido polilático (PLA), ao qual foi acoplado o espelho móvel. A Figura 19, mostra a disposição final do suporte sobre os patins. Cabe ressaltar ainda que, ao fim do curso da guia, foi posicionado um sistema de mola (push button) com a finalidade de retornar o espelho à posição inicial ao finalizar a leitura (movimentação no sentido contrário, voltando a situação de origem).



*Figura 18: Agregado Guia Linear e Patins*



*Figura 19: Suporte confeccionado para o Espelho Móvel.*

Com o software *Sketchup* 2016, em um computador, foram desenvolvidos os projetos para as peças do instrumento, impressos tridimensionalmente com PLA de cor preta. Uma impressora 3D (Cliever – CL1 Black Edition) foi utilizada para a construção dos suportes dos componentes, mas não é efetivamente necessário ter posse dela; tal serviço pode ser terceirizado por alguma empresa especializada. Nesse caso, pode-se colocar como prioridade no cálculo dos custos apenas o preço da matéria-prima que é o PLA <sup>[18]</sup> ou ácido polilático, um polímero sintético termoplástico biodegradável economicamente acessível, posto que um rolo de 380 m do material é uma quantidade mais que suficiente para a confecção dos componentes.

Para apoiar os espelhos criou-se dois elementos diferentes de sustentação. O suporte para o espelho fixo é mais simples que o do espelho móvel, visto que há apenas uma base (composta por uma parte retangular suspensa de 7,0 cm por 8,4 cm e 0,3 cm de espessura e de uma plataforma de 4,0 cm de largura, 7,0 cm de comprimento e 1,9 cm de altura) e a porção onde o espelho será colocado (semelhante a parte suspensa, porém dessa vez quadrática, de 7,0 cm por 7,0 cm e mesma espessura) aglutinadas por um kit de quatro parafusos do tipo M3 45 mm e quatro molas de 20 mm <sup>[20]</sup>, que usualmente são empregados para nivelamento de mesa de impressoras 3D. No presente trabalho, esses parafusos permitem ajustar a posição dos espelhos de forma que os feixes de luz fiquem alinhados, permitindo a visualização das franjas.

Em seguida, foram perfurados dois orifícios em lados opostos a 4,3 cm de distância entre eles, para fixar as extremidades do espelho ao suporte com o auxílio de parafusos e porcas comuns de fixação. Vale destacar, que ao fundo do suporte para o espelho fixo foram colocados quatro imãs <sup>[19]</sup> (5 mm de diâmetro), os quais auxiliaram a sua fixação à base metálica do instrumento. Na Figura 20 abaixo se encontra o sistema completo:

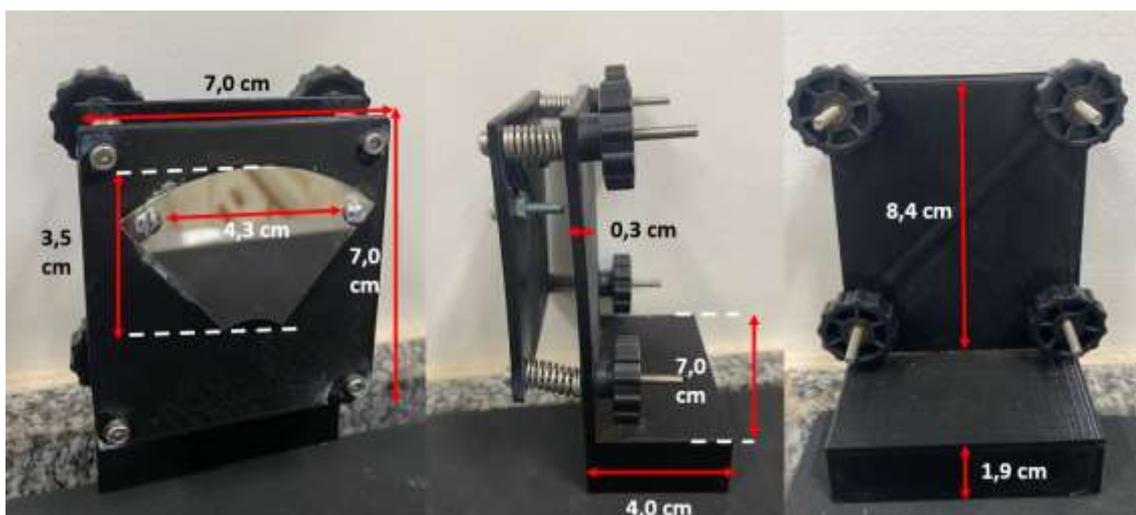


Figura 20: Suporte confeccionado para o Espelho Fixo

A mudança do suporte realizada para o espelho móvel em relação à utilizada para o espelho fixo ocorreu apenas no apoio, afinal parafusou-se, de acordo com a Figura 19, uma peça A, de 4,0 cm por 3,5 cm e uma outra B de 4,0 cm por 5,0 cm, sendo que esta última fica em contato direto com os patins da guia linear, responsável pelo deslocamento.

Os espelhos utilizados no interferômetro devem ser de primeiro plano. O fundamento que rege tal afirmativa é que nos demais há uma superfície metálica de prata por trás de uma placa de vidro, que gera uma dupla reflexão. Sendo assim, no anteparo para a visualização das franjas, passar-se-ia a enxergar o dobro de pontos de luz devido a múltiplas reflexões simultâneas. Ao usar o de primeiro plano, essa distorção é eliminada, visto que a porção reflexiva fica agora na seção mais externa. A Figura 19 ilustra bem essa diferença:

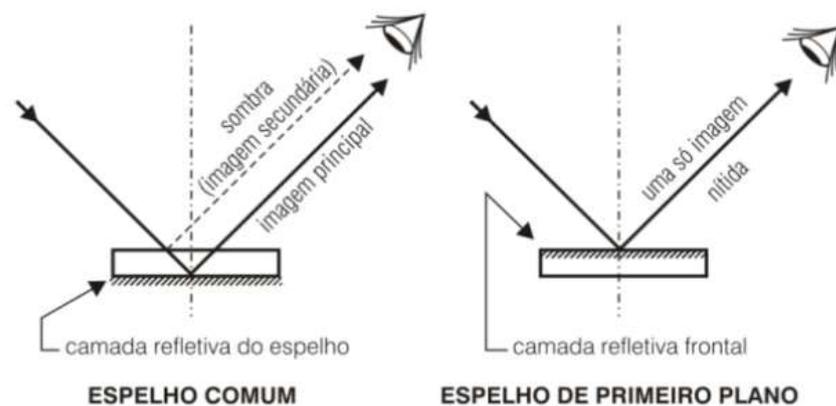


Figura 21: Diferenças entre as reflexões promovidas por espelhos simples e pelos de 1º Plano  
 [Fonte: <https://www.sswite.com.br/saibamais/sb07503.htm>]

Considerando este aspecto e como forma de diminuir os gastos, optou-se por utilizar, como espelho de primeiro plano, o disco rígido (*Hard Drive* ou *HD*) de um computador desativado, o qual foi cuidadosamente retirado para evitar qualquer tipo de arranhão e, posteriormente, serrado ao meio, com o fito de obter das metades dois recortes iguais de espelhos em forma de um arco de círculo cujo raio é de 3,5 cm (Figura 20). Conforme já relatado, esses espelhos foram fixados aos suportes com o auxílio de parafusos e porcas.

Um divisor de feixe óptico <sup>[15]</sup> em vidro com dimensões de 30 mm x 30 mm x 1,1 mm foi adquirido e utilizado para permitir a reflexão e transmissão do feixe de luz a 50% cada.

Urge salientar que, é interessante averiguar nas especificações do fabricante se o divisor já vem com tratamento antirreflexivo em um dos lados, caso não, é importante realizá-lo, com o intuito de reduzir interferências parasitas indesejadas (um feixe de luz menor dentro do maior), devido a reflexão de ambas as superfícies revestidas do vidro, que podem se configurar no anteparo como dois padrões superpostos. Como alternativa, pode-se, por exemplo, aumentar a espessura, distanciando as interferências, propiciando a possibilidade de trabalhar com apenas uma delas individualmente. A desvantagem seria que tal escolha eleva o peso do vidro, dificultando o manuseio.

No suporte do divisor de feixe há uma particularidade importante de ser mencionada. Para que o encaixe pudesse se dar da maneira mais suave possível, em uma das diagonais foram desenvolvidas pequenas ranhuras nas laterais com certa

folga, de tal forma que o divisor, que é reduzido, pudesse deslizar sem maiores complicações. Depois disso, para impedir que, mediante algum acidente que pudesse vir a ocorrer, ele quebrasse, foi firmado com cola. As dimensões do suporte são 6,0 cm de altura, 2,5 cm de largura assim como de comprimento, ressaltando que há ainda duas abas (por onde o divisor entrará) cada uma com 3,0 cm de altura (que é a mesma do *divisor* de acordo com a Figura 20. Para a fixação, assim como realizado para o suporte do espelho fixo, foram devidamente colados ao fundo do suporte dois pequenos ímãs com 5 mm de diâmetro cada.

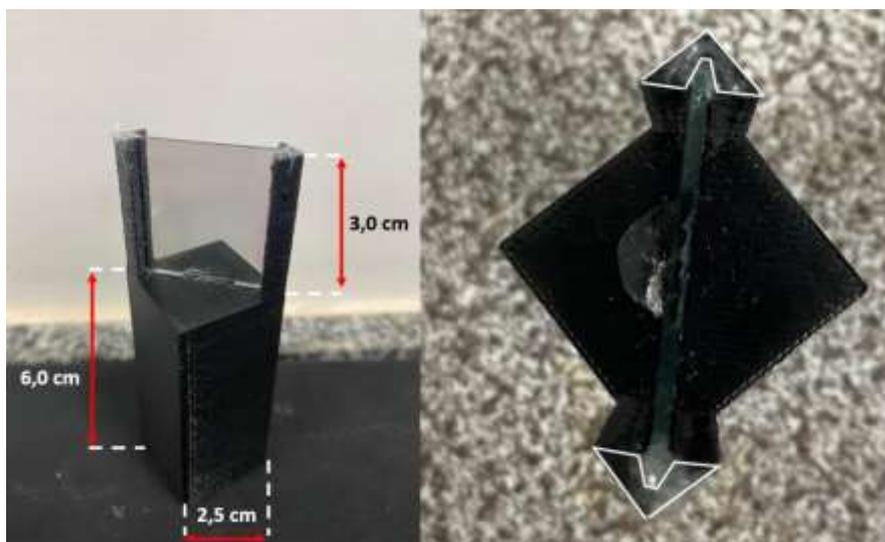


Figura 22: Suporte do Divisor e suas dimensões à esquerda; em branco, à direita, as ranhuras nas abas por onde acontece o encaixe

Foram avaliados três apontadores a laser genéricos como fontes de luz monocromática, os chamados *Laser Pointers* de diodo <sup>[16]</sup> genéricos, com 13,7 cm de largura, 12 mm de diâmetro, potência de 5 mW e alcance máximo de 50 m, emitindo nas regiões de comprimento de onda do vermelho (650 nm), verde (532 nm) e violeta (405 nm).

Para sustentar o *laser pointer* (apontador laser), foi confeccionado um par de blocos de tamanhos iguais, com altura de 9,0 cm, largura de 3,0 cm e 1,0 cm de espessura, com o formato de um paralelepípedo vazado e com um espaço circular de 1,5 cm de diâmetro na parte central superior por onde o laser é introduzido (Figura 23). Também neste suporte foram fixados dois ímãs na parte inferior, para a sua fixação à base metálica (Figura 23).

De maneira similar ao que foi feito para o suporte do laser, foi elaborado um alinhador (Figura 23), que consiste em um bloco com as mesmas dimensões do

suporte para o laser, porém com um furo de 0,2 cm de raio, por onde o feixe de luz deve passar. Ao final, o laser fica disposto como mostrado na Figura 24, apoiado sobre os dois suportes com o alinhador a frente.



Figura 23: Suporte do laser mais à esquerda e do alinhador mais à direita; mais ao centro lateral e fundo de ambos.



Figura 24: Laser apoiado sobre os suportes; adiante o alinhador

### 3.2.1 Circuitos eletrônicos

Para a alimentação dos lasers, utilizou-se uma fonte de 5,0 V/1,0 A acoplada a um regulador de voltagem ajustável Módulo LM317 <sup>[21]</sup> (Figura 25). À saída do regulador, foram conectados os terminais: positivo (carcaça) e negativo (mola) do apontador laser, de modo que, ao girar o trimpot indicado na Figura 25 foi possível

variar a tensão de alimentação do laser entre 0,0 e 3,0 V, o que altera a intensidade de emissão do diodo (seu brilho) e permite um ajuste adequado para a observação das franjas de interferência e sua detecção.



Figura 25: Circuito com laser ligado à fonte de 5V à esquerda; à direita tem-se em foco o módulo; ao girar para a direita (sentido horário) o trimpot com o resistor variável, no local indicado, auxiliado por uma chave, altera-se a tensão de saída.

Para o circuito de detecção utilizou-se o Módulo OPT 101 [22], que consiste em um chip com fotodiodo e amplificador operacional embarcados, alimentado com uma tensão unipolar de 5V. Associou-se em série ao circuito um resistor fixo de 1 M $\Omega$  (sendo esse valor de resistência o que respondeu melhor), com o intuito de aumentar o ganho do amplificador operacional, proporcionado um incremento da sensibilidade. Na preparação, o detector foi soldado ao Circuito Integrado (CI), e este conectado ao Arduíno conforme mostra a Figura 26.

Para acomodar o módulo sensor, foi impresso em PLA branco um suporte com 2,3 cm de largura 2,9 cm de comprimento e 1,5 cm de altura (Figura 29), o qual está acoplado à um anteparo quadrado com 8,0 cm x 8,0 cm e 0,3 cm de espessura (Figura 27). Na parte central do anteparo foi confeccionado um furo com 0,2 cm de diâmetro, utilizado como janela de detecção, por onde o sensor captura a radiação das franjas de interferência produzida pelo interferômetro. Destarte, o detector foi acoplado à parte de trás do anteparo, dentro do compartimento e colado com cola quente para imobilização. A fresta de observação foi perfeitamente alinhada com o sensor e foi utilizado um papel adesivo fosco no restante da superfície do anteparo com o propósito de evitar a reflexão da luz.

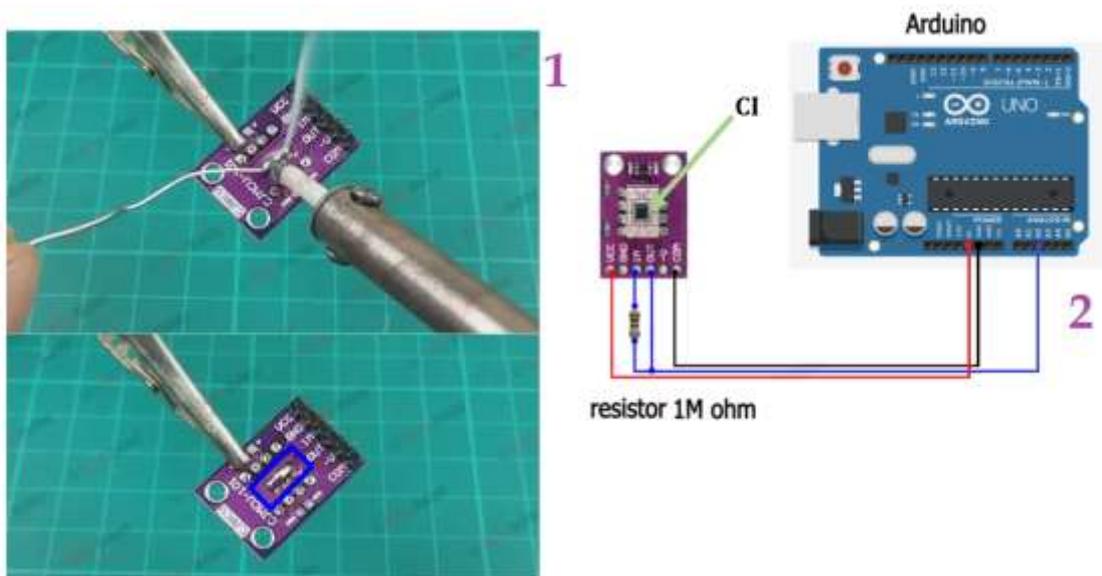


Figura 26: (1) Soldagem dos terminais da placa (curto-circuitados no retângulo azul); (2) Fio Preto – Comum ligado ao Ground do Arduino; Fio Azul – Saída (output) ligado a Entrada Analógica (A2) do Arduino; Fio Vermelho – VCC (Alimentação) ligado ao 5V do Arduino.

[Fonte: <https://srituhobby.com/cjmcu-101-opt101-analog-light-sensor-with-arduino/>]

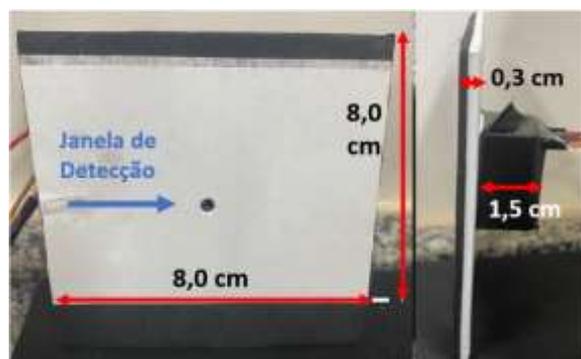


Figura 27: Orifício no centro do Anteparo corresponde à janela de detecção, à esquerda; à direita, dimensões da lateral do suporte do sensor.

Completando o sistema de automação, foi utilizado o Módulo Bluetooth 3.0 JDY-31-SSP [23], compatível com protocolo para telefones celulares Android, o qual permitiu o controle do motor e a aquisição do sinal do detector por um smartphone de maneira remota.

O arranjo de hardwares para o acionamento microcontrolado do espelho móvel conduzido pelo motor, assim como a detecção do sinal, foi arquitetado com todos esses dispositivos alimentados por uma fonte de 24V, conforme mostra a Figura 28:



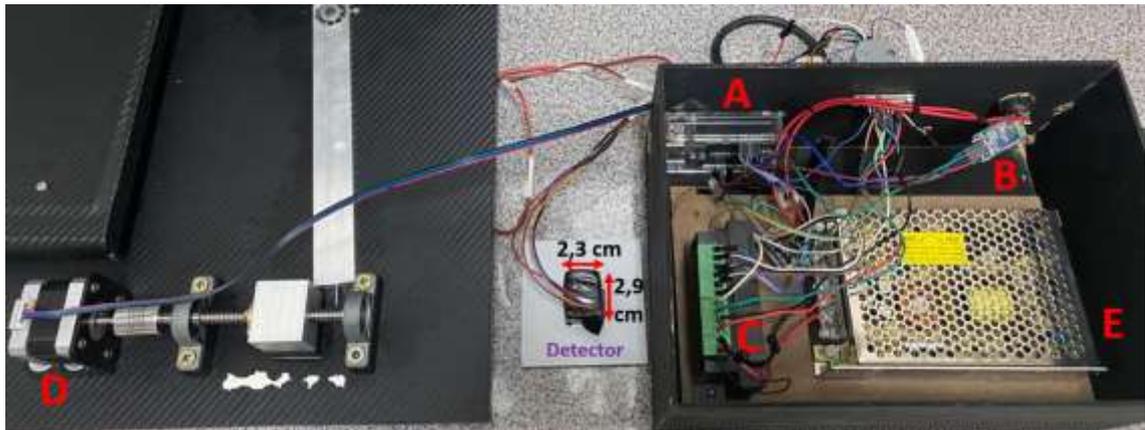


Figura 29: Disposição dos elementos de hardware do sistema conforme ordenamento evidenciado na Figura 28; demais dimensões da parte traseira do suporte, onde é fixado o detector

### 3.2.2 – Programação

Iniciando a descrição dos softwares temos dois programas, o primeiro do Arduino e o segundo do aplicativo. O Arduino, como já comentado, aciona o motor e realiza a leitura do sinal do detector, conforme comandos enviados pelo celular via Bluetooth. A sequência dessas operações é mostrada no diagrama de blocos na Figura 30.

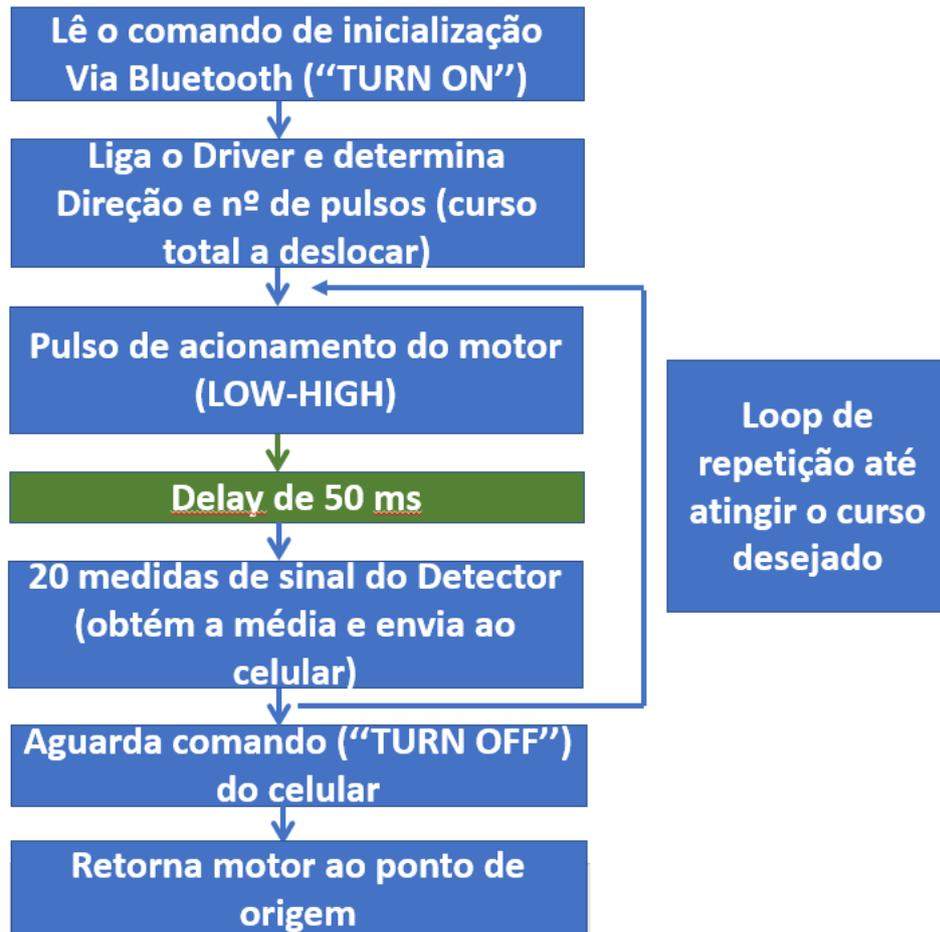


Figura 30: Diagrama de blocos explicitando a sucessão de acontecimentos até a aquisição do sinal analítico

Se o comando enviado ao arduíno for a string "TURN ON" (comando para se realizar as leituras) então são definidos o sentido de giro (horário) e o curso a ser deslocado (total de pulsos a ser performado), além de se acionar o driver para a realização da movimentação do motor. Na sequência, o Arduino gera o pulso para que o motor gire um incremento e, após o pulso, espera-se um intervalo de tempo (delay de cinquenta milissegundos) antes que sejam colhidas as medidas, como forma de atenuar o efeito de vibração do espelho no sinal. São colhidas vinte leituras e desse conjunto é calculada a média que é enviada para o celular. Esse processo de acionamento do motor e leituras se repete em loop até que o número de pulsos determinado seja atingido. Vale destacar que, com esse procedimento, uma leitura do sinal é obtida para cada incremento de deslocamento do espelho.

Finalizada as leituras, o Arduino aguarda o comando *string* "TURN OFF" via bluetooth, o que leva a inversão do sentido de giro do motor (para anti-horário), diminui

o delay entre os pulsos (para cinquenta microssegundos), e exclui a sub-rotina de leitura do sinal, fazendo com que o espelho retorne até a posição inicial de forma mais rápida que aquela empregada na primeira etapa.

As telas do aplicativo desenvolvido para o controle do interferômetro e aquisição dos interferogramas são mostradas a seguir, na sequência de sua utilização, conforme mostra a Figura 31.

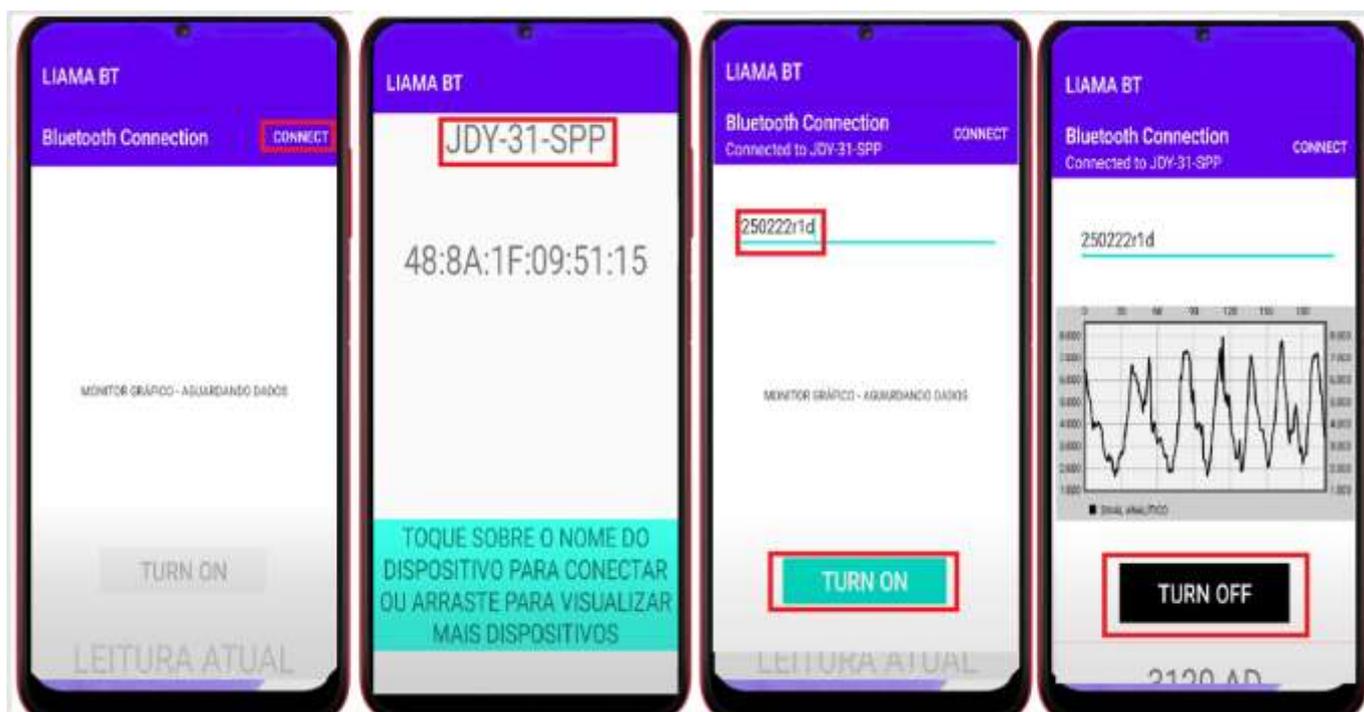


Figura 31: Telas do Aplicativo até a gravação dos dados

Após carregar o aplicativo, é feito o clique na parte superior direita da primeira tela para iniciar o processo de conexão com o bluetooth (conectado ao Arduíno). Na segunda tela, o usuário deve localizar o dispositivo bluetooth (JDY31-SPP) e clicar sobre ele para que a conexão seja estabelecida. Assim que efetivada a conexão, na terceira tela, nomeia-se o arquivo que será salvo e pressiona-se o botão "TURN ON" que envia ao arduíno, via Bluetooth, o comando string que desencadeia os procedimentos para leitura do sinal analítico. Na quarta tela, os sinais adquiridos e enviados pelo arduíno são plotados na porção central da tela como um interferograma. Ao término da aquisição (final do curso), o usuário deve clicar sobre o botão TURN OFF para salvar os dados e disparar o procedimento de retorno do motor (espelho) à posição de origem. Após a transmissão dos dados, eles são armazenados na memória

do celular em formato .txt e podem ser resgatados a qualquer momento com um cabo USB e um computador ou compartilhados via e-mail ou aplicativo de mensagens.

Os valores numéricos adquiridos são importados para o programa Origin para que possam ser feitas as devidas manipulações/ajustes antes de se aplicar a transformada de Fourier, a qual é realizada utilizando-se uma aplicação disponível online para esse propósito, capaz de calcular os coeficientes de Fourier e traçar o gráfico com a densidade espectral de potência específica existente no sinal para cada intervalo de frequência, restando apenas importar essas variáveis de volta para o Origin. [Referência: Principles of Infrared Spectroscopy, JASCO 2020].

### 3.3 Procedimentos para obtenção de Interferogramas dos lasers

Para a realização das medidas, o laser já ligado é colocado nos suportes sobre a base com o botão de ligar virado para cima. Essa posição serve para atenuar a intensidade de interferências inoportunas que poderiam contrastar com a franja principal que deve ser a mais forte. Tal afirmativa decorre das conclusões da Lei de Brewster (VUOLO, 1992) que dita sobre a assimetria ao girar o plano de polarização da luz.

Imediatamente após, posiciona-se o alinhador na frente do laser, de modo que a maior parte do feixe de luz passe pela pequena abertura e atinja o centro do espelho móvel.



Figura 32: Luz passa pelo alinhador e incide no centro do espelho móvel

Logo depois, o feixe refletido pelo espelho móvel deve coincidir exatamente com o feixe de origem da fonte no orifício do alinhador. Para isso, os parafusos de ajuste com molas, localizados atrás do espelho móvel, são ajustados até que seja observado um único ponto luminoso no orifício do alinhador. A Figura 33 mostra as situações antes e depois dessa etapa do alinhamento.



Figura 33: Ampliação mostrando Circunstância de não confluência (à esquerda) e a situação na qual o feixe refletido converge no mesmo ponto de incidência (à direita)

Após isso, o divisor de feixe é posicionado a  $45^\circ$  em relação ao laser e ao espelho móvel, utilizando um nebulizador portátil <sup>[26]</sup> para facilitar a observação das trajetórias dos feixes, as quais devem estar a aproximadamente  $90^\circ$  entre si, como exibido na Figura 34.

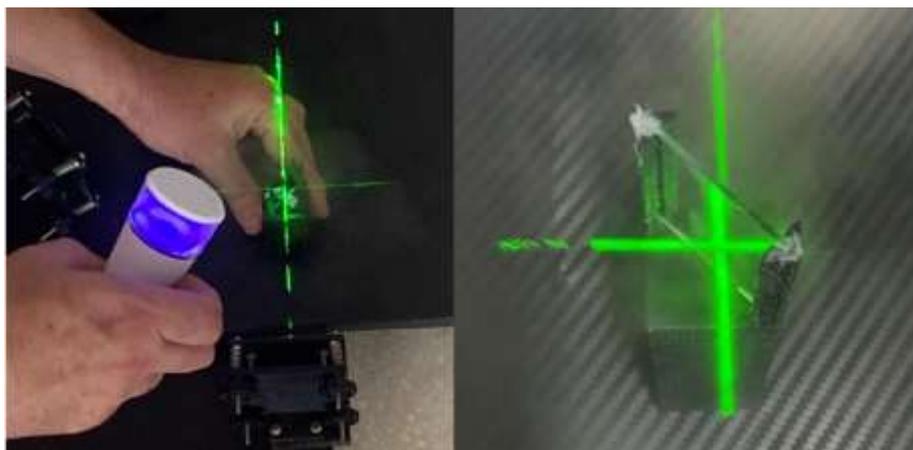


Figura 34: Nebulizador de ar mostrando a trajetória dos feixes após passagem pelo divisor (visão lateral e superior, respectivamente)

Posteriormente, o espelho fixo é disposto na plataforma com o auxílio dos imãs e o passo final é fazer que os pontos de luz no anteparo, que correspondem ao feixe refletido pelo espelho fixo e pelo espelho móvel, sejam coincidentes (Figura 35), isto é, se sobreponham no mesmo local de tal forma que, assim que unidos e posicionando-se a lente Divergente Biconvexa Expansora <sup>[27]</sup> na frente do alinhador do laser (regulada na altura certa), seja possível a observação nítida das franjas de interferência no anteparo do detector.

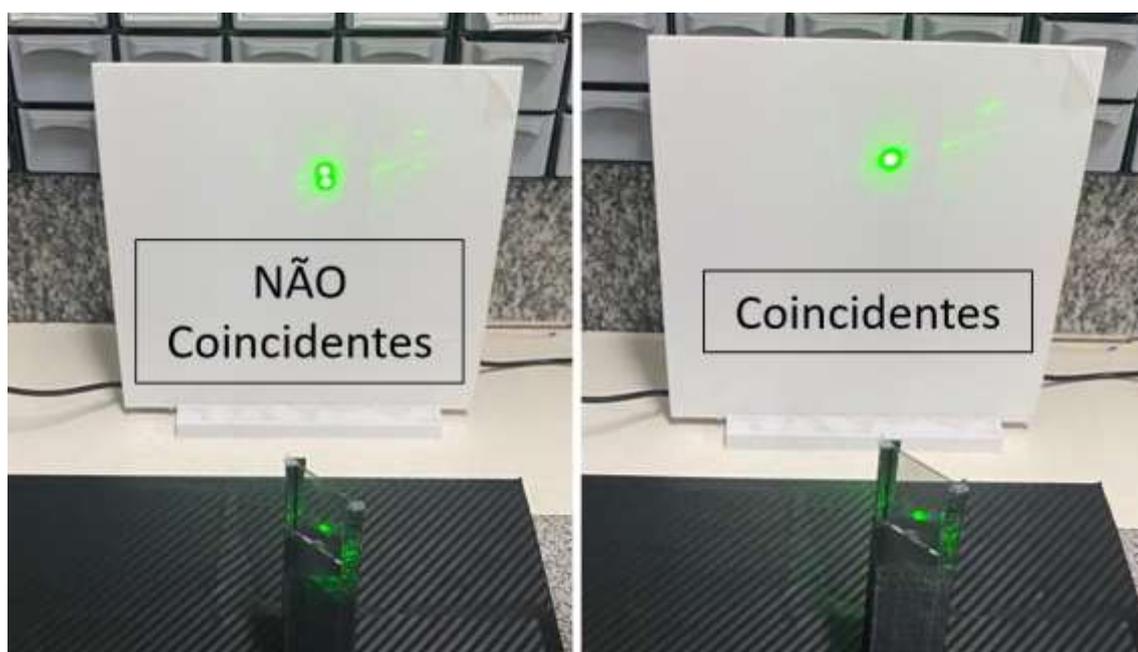


Figura 35: À esquerda pontos de luz não confluem no mesmo local, à direita são coincidentes

Não é mandatório que o ponto central do padrão de interferência circular ocorra exatamente no centro da janela de observação do detector. O interessante aqui é conseguir encontrar uma região que permita que o detector diferencie entre o claro e o escuro das franjas, captando separadamente a presença de luz em um momento e a ausência dela em outro instante, conforme as ondas vão se movimentando, sendo esse fato fundamental para uma boa qualidade das medidas.



*Figura 36: Posição do detector em relação às franjas*

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Consolidação do Arranjo Instrumental

A primeira constatação importante do trabalho, que é constantemente citada na literatura (HALLIDAY, 1996), foi a necessidade de se montar o sistema no andar térreo do Instituto de Química da UnB e, de preferência, diretamente no chão e longe de fontes de vibrações e de correntes de ar. De fato, os estudos aqui realizados foram conduzidos no laboratório de ensino de Química Analítica do IQ e, na maioria das vezes, no período noturno.

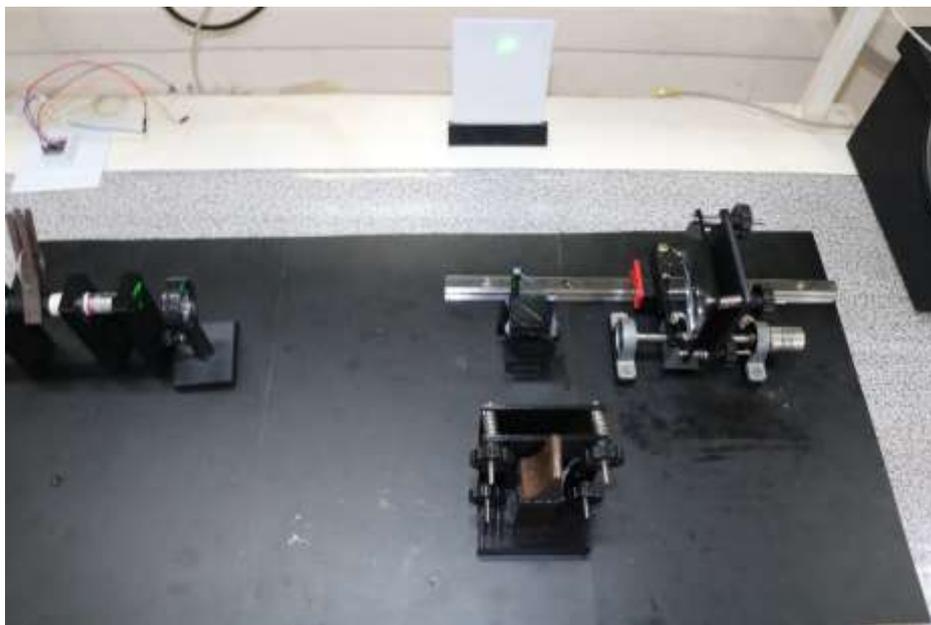
Inicialmente foi avaliado o uso do espelho móvel diretamente sobre o suporte de Alumínio, sem o uso do sistema de alavanca e da guia linear com patins, com todos os componentes sobre a mesma plataforma conforme mostra a Figura 37. Imediatamente, percebeu-se que havia uma grande trepidação do espelho móvel que dificultava a observação visual das franjas com o acionamento do motor, sendo um obstáculo considerável no momento das medidas. Verificou-se também, que mesmo após a colocação de pesos em posições estratégicas essa dificuldade persistiu.



*Figura 37: Suporte do Espelho móvel diretamente apoiado sobre o Bloco de Alumínio; setas indicam locais de acomodação dos pesos*

Então, foi avaliado um sistema de movimentação distinto para o espelho móvel, com a guia linear e patins paralelos ao fuso, conforme indicado na Figura 38. Porém,

esse artifício também não se mostrou adequado, uma vez que persistiram os problemas na visualização dos padrões no anteparo do detector com a movimentação do motor. Em outras palavras, o deslocamento ainda grande do espelho levava à uma variação brusca dos padrões de interferência que inviabilizava a sua detecção.



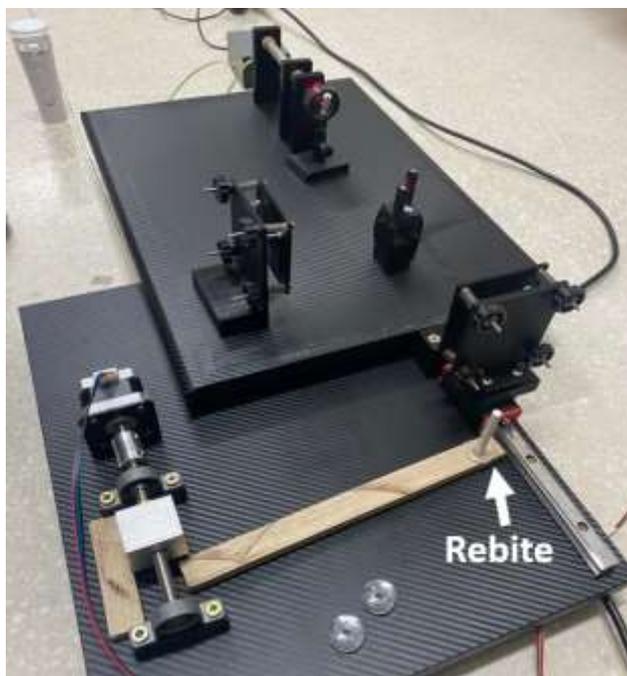
*Figura 38: Suporte do Espelho Móvel sobre o carrinho da guia linear*

Conjecturou-se também, que parte dessa dificuldade poderia ser derivada da vibração de todos os componentes do sistema, além do próprio espelho móvel, causada pela movimentação do motor, o qual estava fixado na mesma base de apoio.

Considerando esses aspectos, foram realizadas duas mudanças significativas no instrumento. A primeira delas foi utilizar um sistema de alavanca para movimentar o espelho em incrementos menores de distância e o segundo foi separar o mecanismo para acionamento do espelho móvel do restante do sistema óptico. Assim, uma base mais baixa foi utilizada para acomodar o motor, o fuso, a alavanca e a guia linear com o espelho móvel e a outra base (mais acima) recebeu o laser, a lente expansora, o divisor de feixe e o espelho fixo.

Primeiro tentou-se utilizar uma alavanca de madeira com um furo e um rebite de plástico como eixo no ponto de apoio, conforme ilustrado na Figura 39. Entretanto tal escolha não foi adequada uma vez que, ao se movimentar o motor, havia uma tensão excessiva no ponto de apoio, a qual levava a uma movimentação não uniforme do espelho móvel. De fato, o atrito entre a madeira e o rebite pode ter levado a essa

inconsistência, sendo necessária a substituição dessa alavanca por outra fabricada em alumínio e com rolamento no ponto de apoio, conforme já descrito na seção da parte experimental.



*Figura 39: Uso da alavanca de Madeira; Seta indica a posição da espiga do rebite*

Enfrentada a adversidade da elevada amplitude de movimentação, colocou-se nas extremidades da alavanca de alumínio pequenos pinos para melhorar o alinhamento entre o centro do ponto de apoio e do centro do contato com os patins da guia linear (Figura 16).

Ademais, foi verificado que os lasers funcionando com duas pilhas AAA de 1,5V cada apresentavam uma oscilação excessiva de sua intensidade luminosa conforme a bateria descarregava, o que ocorria devido a necessidade de estarem funcionando durante todo o processo de alinhamento e medidas. Logo, esse fator proporcionava uma alteração significativa nos sinais que ficavam sempre inconstantes, com o decorrer do tempo. Salienta-se ainda que com pilhas novas o brilho era tão intenso que era necessário colocar um meio opaco na frente da janela do detector para diminuir a intensidade da luz incidente. Diante disso, a saída foi alimentar os lasers de com uma fonte de corrente contínua e um regulador variável de tensão.

## **4.2 Visualização dos padrões de interferência**

Para o laser violeta não foi possível enxergar as franjas de interferência. Acredita-se que, em decorrência de sua emissão ocorrer com o menor comprimento de onda, as franjas são menos espaçadas e de mais difícil visualização. Além disso, o divisor de feixe utilizado opera de forma adequada, segundo o fabricante, entre os comprimentos de onda de 400 nm e 700 nm de forma que a emissão máxima do laser (405 nm) ocorre muito próxima ao limite inferior do divisor, o que pode ter contribuído para esse resultado. De fato, o laser violeta não é utilizado para demonstração em nenhum dos interferômetros apresentados na literatura com objetivos didáticos, o que pode ser uma consequência dessas dificuldades. A Figura 40 mostra o anteparo do instrumento proposto ao realizar o experimento com esse laser.



*Figura 40: Laser Violeta no anteparo*

Para os lasers verde e vermelho (Figura 41), franjas circulares bem definidas foram observadas, o que não é comum para instrumentos lab-made que empregam placas de vidro sem tratamento reflexivo, como divisor de feixe. De fato, considerando a facilidade atual para se adquirir esse acessório à baixo custo (cerca de R\$ 20,00) por importação direta, a sua substituição por um material alternativo pode ser desencorajada considerando o ganho na resolução da imagem.

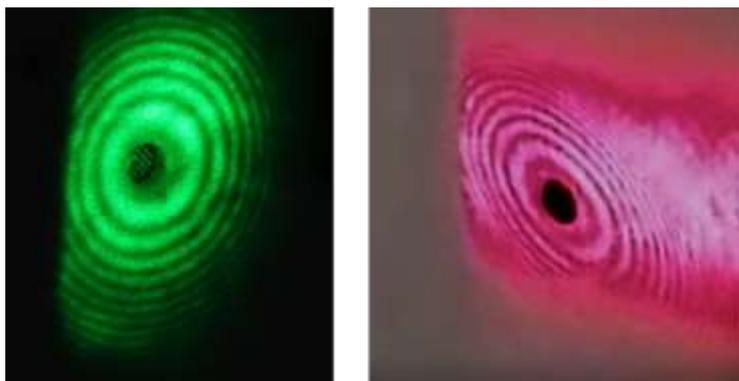


Figura 41: Franjas de Interferência obtidas após o alinhamento para os lasers verde e vermelho, respectivamente

### 4.3 Avaliação dos Interferogramas obtidos

A aquisição média de um interferograma dura de 7 a 8 minutos. A Figura 42 mostra o interferograma obtido para o laser vermelho com a versão final do instrumento proposto, contendo duas bases e a alavanca de alumínio com rolamento. Como pode ser visto, houve um aumento do número de picos registrados para o mesmo intervalo de leituras (deslocamento do espelho) realizadas no início e no fim da aquisição. Em outras palavras, observa-se um número maior de picos entre as leituras de 2500 a 3000 do que o número de picos contidos entre as leituras 500 e 1000, por exemplo. Isso mostra que a movimentação do espelho não ocorreu de maneira uniforme, uma vez que eram esperados o mesmo número de picos para intervalos de leitura idênticos.

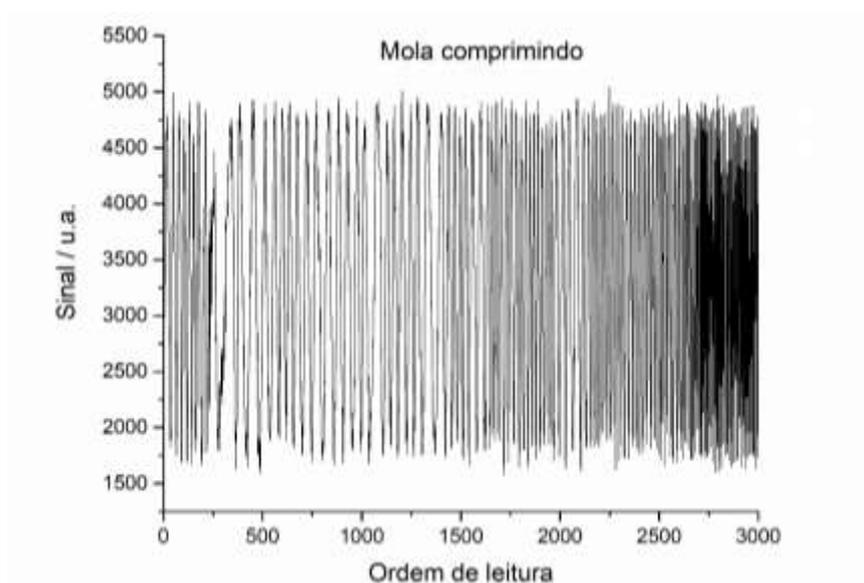


Figura 42: Interferograma obtido para o vermelho com Compressão da mola

Com o objetivo de verificar se a mola presente ao final da guia linear estava afetando as medidas, realizou-se as leituras com a movimentação do espelho em sentido contrário. Ou seja, realizou-se as medidas com a mola sendo descomprimida durante a movimentação do espelho, obtendo-se o resultado mostrado na Figura 43. Novamente, um comportamento similar foi obtido, com um maior número de picos ao final das leituras.

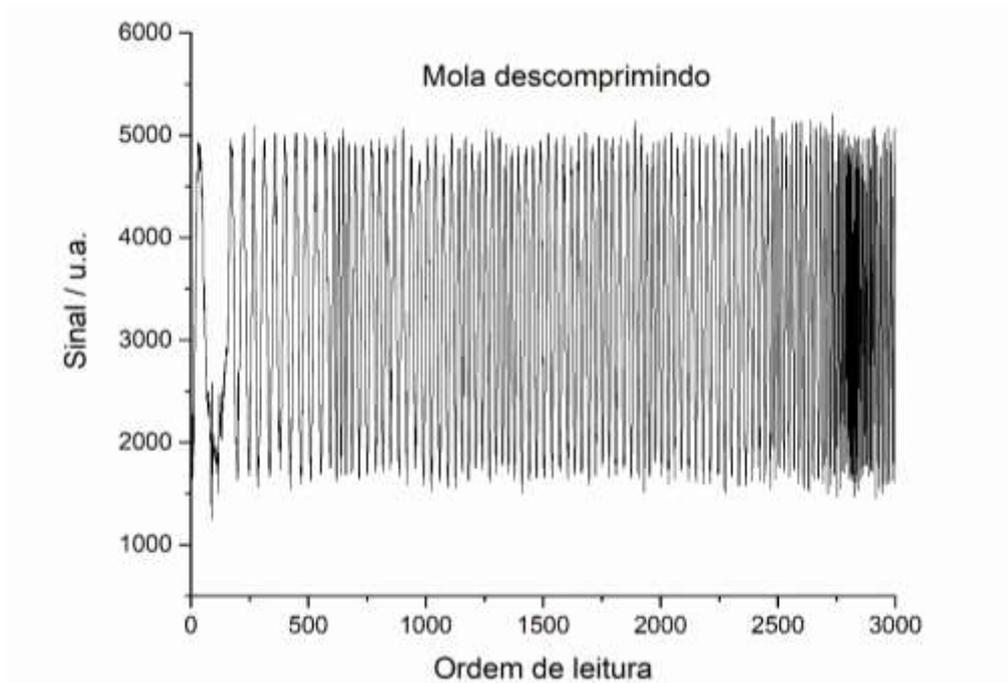


Figura 43: Interferograma obtido para o vermelho com Descompressão da mola

Considerando esses resultados, optou-se por retirar a mola do final do curso da guia linear de forma a eliminar a força contrária ao movimento do espelho. O resultado obtido com essa configuração (Figura 44) indicou uma maior uniformidade na aquisição do interferograma para a fonte monocromática, com o número de picos por intervalo de leituras mais similar ao início e fim das medidas. Apesar disso, como pode ser visto na ampliação de uma faixa de leituras, também na Figura 44, em apenas 100 leituras são detectados cerca de 22 picos, de modo que apenas 4 leituras de sinal são utilizadas para descrever um pico, indicando que o incremento de deslocamento do espelho era ainda elevado para este propósito.

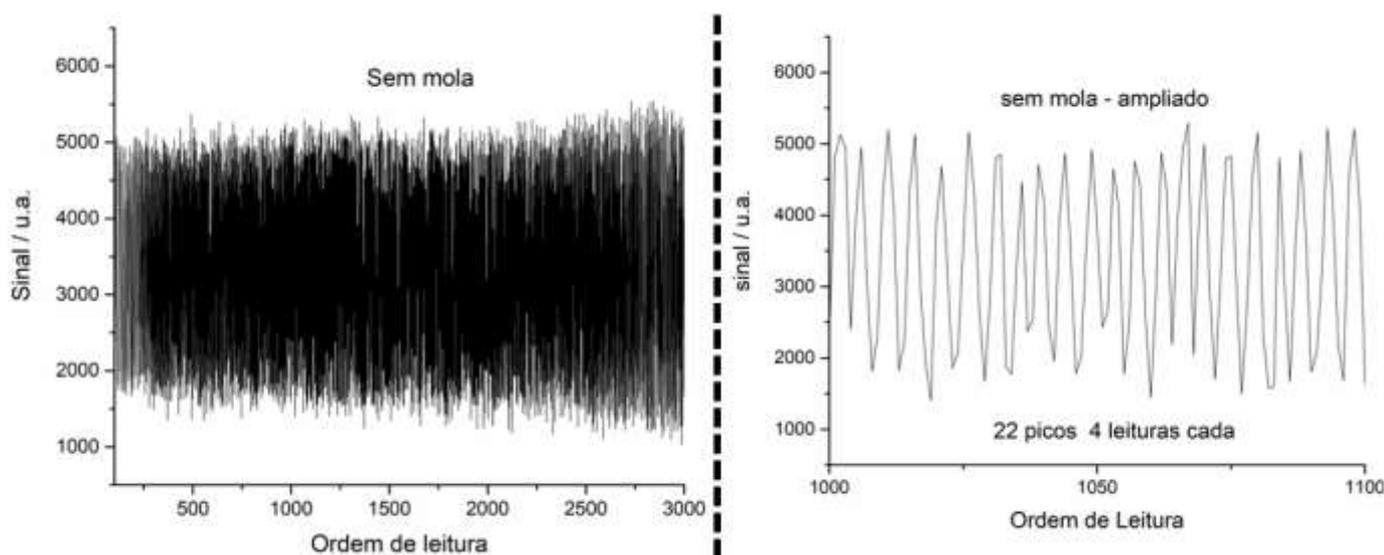


Figura 44: Aquisição das leituras para o vermelho com mola ausente, à esquerda; à direita, ampliação do sinal a uma resolução de 3200 pulsos/revolução

É importante destacar que esses três interferogramas (Figuras 42, 43 e 44) foram obtidos com o driver do motor de passo ajustado para uma resolução de 3200 pulsos por revolução completa (3200 pulsos para 2 mm de deslocamento linear). Assim, considerando que o fator de redução da alavanca utilizada nestes estudos foi de 1/7 (aproximadamente 0,1429), pode-se inferir que a cada pulso (que corresponde a uma leitura nos interferogramas citados) o espelho móvel era deslocado cerca  $0,0893 \mu\text{m}$  ( $(2000 \mu\text{m}/3200) \times 0,1429$ ), o que confirma um incremento ainda elevado para a aquisição dos sinais.

Nesse sentido, ajustou-se o driver de forma a diminuir o torque para que uma rotação completa do motor (deslocamento linear de 2 mm do suporte no fuso) fosse realizada com 6400 pulsos, o que, considerando o fator de redução da alavanca, levaria a um deslocamento linear do espelho de aproximadamente  $0,0446 \mu\text{m}$  (metade do valor anterior). Com essa alteração e sem o uso da mola, obteve-se o interferograma mostrado na Figura 45, o qual ainda indicou uma falta de regularidade na distribuição do número de picos para um intervalo fixo de deslocamento do espelho (faixa de leituras). De fato, como mostra a Figura 46 (A-D), o número de picos para intervalos de 100 leituras em diferentes pontos do interferograma tende a aumentar do início para o fim da aquisição. Entretanto, cada um dos picos passou a ser descrito por uma média de 7 pontos de leitura, o que mostra uma melhora da aquisição dos dados.

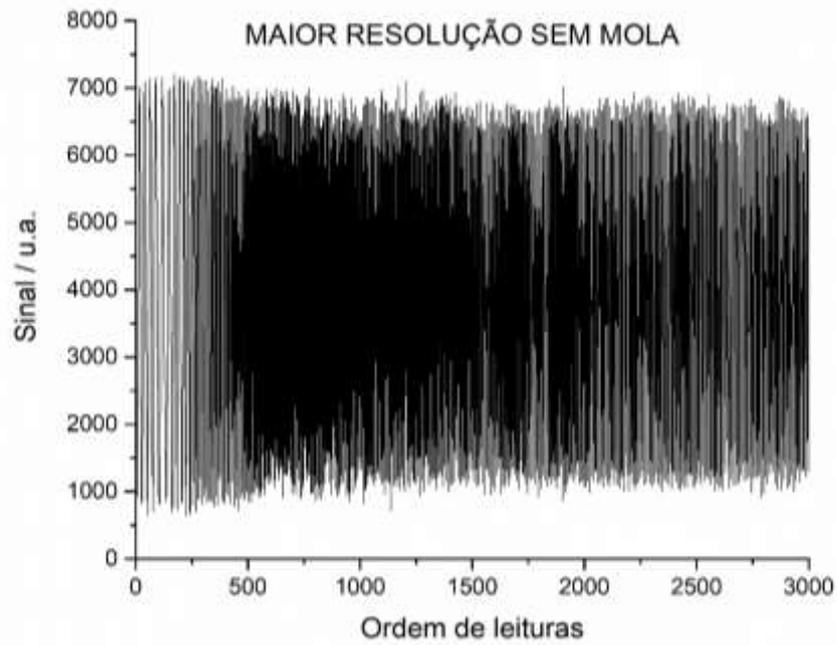


Figura 45: Aquisição das leituras para o vermelho com mola ausente e maior resolução

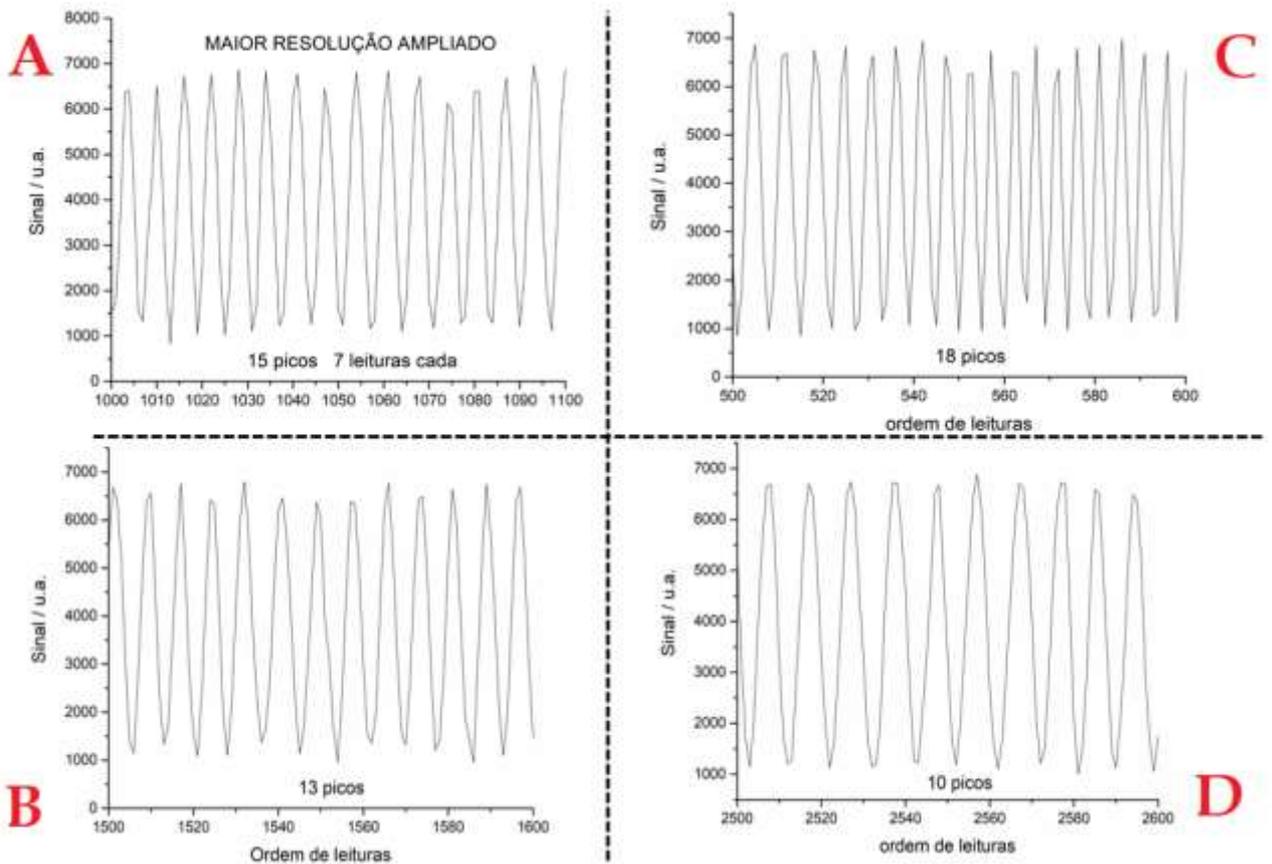


Figura 46: Ampliação do sinal para o vermelho a uma resolução de 6400 pulsos/revolução para intervalos de leitura iguais

Com base nos resultados obtidos, buscou-se identificar a fonte da não inconsistência dos registros e observou-se que o pino da extremidade da alavanca, próximo ao rolamento, ficava em contato com uma borracha de proteção dos patins e que a sua compressão e descompressão poderia estar levando a essas inconsistências. De fato, como mostra a Figura 47, ao retirar essa borracha houve uma maior repetibilidade de distribuição dos picos ao longo das 3200 leituras realizadas, o que foi confirmado pela contagem dos mesmos em 6 pontos distintos do registro, resumidos na Figura 48, indicando uma variação média entre 13 e 14 picos por 100 leituras.

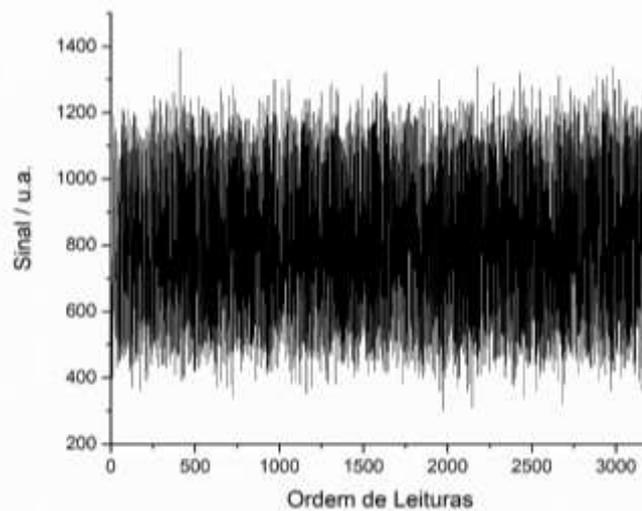


Figura 47: Sinal para o vermelho após retirada da borracha

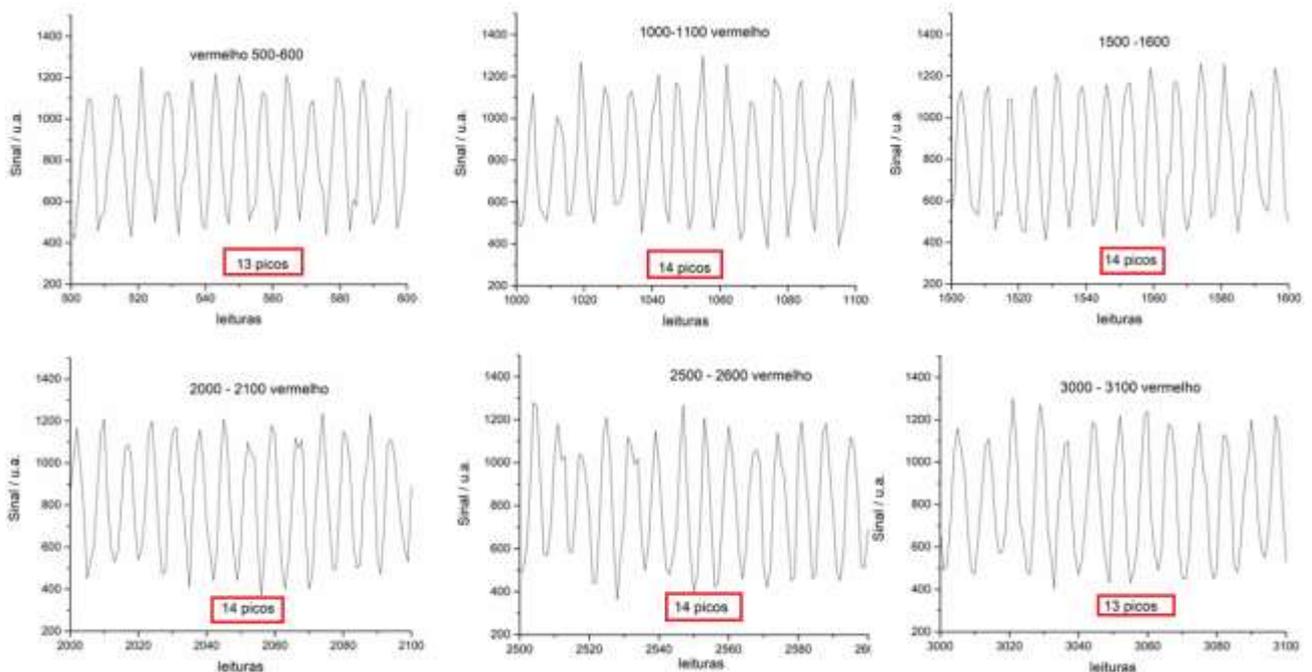


Figura 48: Alternância entre intervalos de 100 leituras para sinais ampliados obtidos para o vermelho, mostrando conservação da quantidade de picos

#### 4.4 Determinação do comprimento de onda de emissão máxima dos lasers

Para a determinação do comprimento de onda do laser vermelho, utilizou-se a região central do interferograma da Figura 49 que comporta um intervalo de quinhentas leituras (de um mil duzentos e cinquenta a um mil setecentos e cinquenta) na qual são mostrados um total de 68 picos.

Para calcular a distância total ( $\Delta_x$ ) percorrida pelo espelho nesse intervalo de leituras basta multiplicar o número de leituras pelo incremento de deslocamento que é realizado a cada leitura ( $0,0446 \mu\text{m}$ )

$$\Delta_x = d \times 500 = (0,0446 \mu\text{m}) \times 500 = 22,3 \mu\text{m} \quad (3)$$

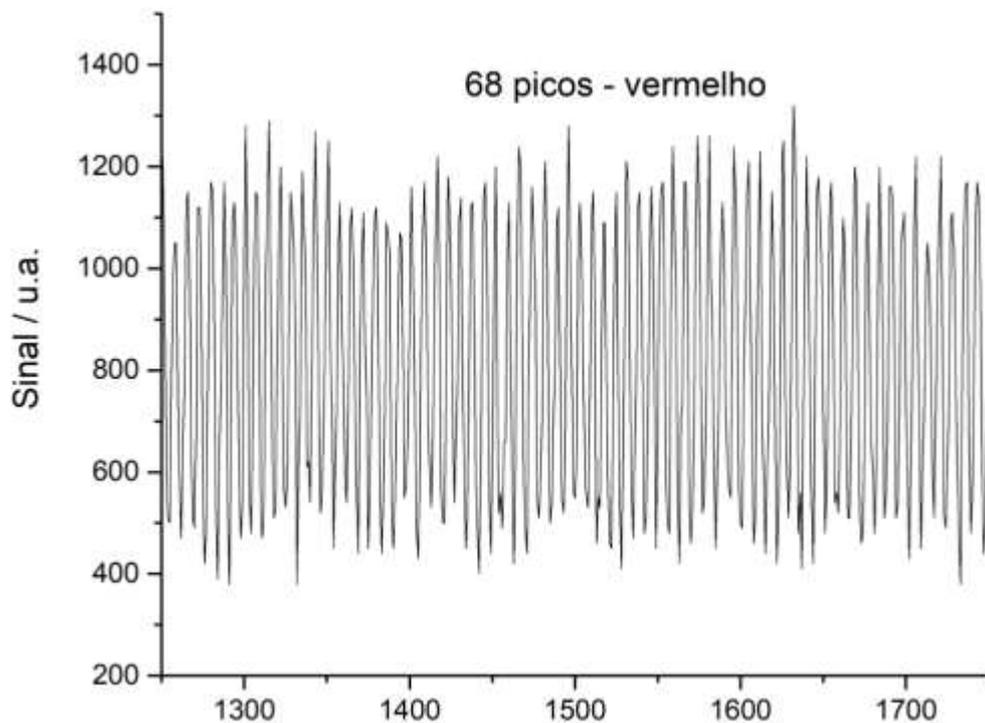


Figura 49: Gráfico de Sinal x Leituras para Laser Vermelho (sem mola e sem borracha)

Aplicando esse valor na Equação 1 é exequível a obtenção do comprimento de onda da radiação através do número de picos (N):

$$\lambda = \frac{2 \Delta_x}{N} = \frac{2 \times 22,3}{68} \cong 0,6559 \mu\text{m} = 655,9 \text{ nm} \quad (4)$$

Vale destacar que a multiplicação da distância total por dois no numerador se deve ao aumento do percurso não só do feixe que sai do divisor e atinge o espelho móvel, mas também do feixe que é refletido pelo espelho móvel e atinge o divisor antes de ser direcionado ao detector.

Por fim pode-se calcular o erro absoluto ( $E_A$ ) e o relativo ( $E_R$ ) em relação ao valor do comprimento de onda de referência, determinado por espectrometria com arranjo de diodos (655,9 nm).

$$E_A = |\text{Valor real} - \text{Valor encontrado}| = |649,5 - 655,9| = |-6,4| = 6,4 \quad (5)$$

$$E_R = \frac{E_A}{\text{Valor encontrado}} \times 100\% = \frac{6,4}{655,9} \times 100\% \cong 0,96\% \quad (6)$$

[Fonte: <https://sites.google.com/site/melhordesete/atividade-1>]

Considerando a instrumentação lab-made e um erro relativo de menos de um por cento, pode-se afirmar que o instrumento funcionou de maneira satisfatória para a determinação do comprimento de onda de emissão máxima do laser vermelho.

Para a determinação do comprimento de onda do laser verde procedeu-se de maneira semelhante, sendo adquirido o interferograma da Figura 50 para o intervalo de leituras de 1250 a 1750, que compreende 73 picos (franjas).

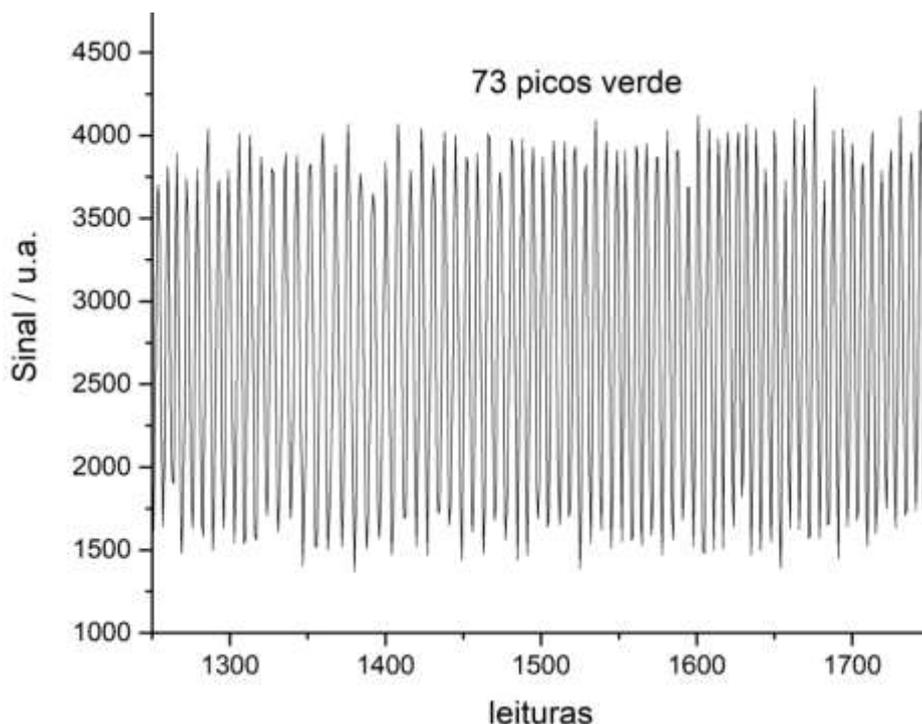


Figura 50: Gráfico de Sinal x Leituras para Laser Verde (sem mola e sem borracha)

De fato, para o laser verde era esperado que houvessem bem mais picos para o mesmo intervalo de deslocamento, em função das franjas serem mais próximas que aquelas obtidas para a radiação vermelha. Na prática o que se obteve foram apenas setenta e três em comparação com os sessenta e oito do vermelho (apenas cinco a mais). Conseqüentemente, realizando o mesmo cálculo proposto acima:

$$\lambda = \frac{2 \Delta_x}{N} = \frac{2 \times 22,3}{73} \cong 0,6101 \mu m = 610,1 \text{ nm} \quad (7)$$

$$E_A = |\text{Valor real} - \text{Valor encontrado}| = |610,1 - 532,19| = 77,91 \quad (8)$$

$$E_R = \frac{E_A}{\text{Valor encontrado}} \times 100\% = \frac{77,91}{655,9} \times 100\% \cong 11,9\% \quad (9)$$

Como pode ser observado o erro calculado (11,9 %) é cerca de doze vezes maior que aquele obtido para o laser vermelho (0,96 %), o que confere uma adversidade para a medida do verde, não funcionando tão bem quanto para o vermelho. De fato, acredita-se que a posição da janela de aquisição do detector em relação ao padrão de interferência projetado, assim como o tamanho desta janela podem estar influenciando na contagem dos picos. Como a janela é posicionada ao centro do padrão circular de interferência e seu tamanho pode não ter sido suficientemente diminuto é possível que o detector não capture individualmente as faixas de intensidade máxima e mínima, dificultando a interpretação dos dados.

#### 4.5 Aplicação da Transformada de Fourier aos interferogramas

Para que a transformada de Fourier pudesse ser aplicada aos dados e gerar espectros no domínio de frequência (ou comprimento de onda) foi necessário converter os dados de leitura (deslocamento do espelho móvel) em unidade de intervalo de tempo. Para isso, considerando o incremento de 0,0446  $\mu m$  de deslocamento por leitura e a velocidade da luz no vácuo ( $3,0 \times 10^8$  m/s) determinou-se um deslocamento temporal de 0,00015 picossegundos. Porém, esse deslocamento deve ser dobrado, pois a distância percorrida pelo feixe de luz é proporcional ao dobro da distância percorrida pelo espelho móvel. Em outras palavras, a cada leitura há um atraso temporal de 0,0003 ps, entre o feixe que atinge o espelho móvel em relação ao

feixe oriundo do espelho fixo. Vale destacar também que a unidade ps é uma das unidades de tempo aceitas na plataforma Fourier Analysis of Real Data Sets [28] e, por isso, foi utilizada na transformação dos dados. Exportando os coeficientes de Fourier e manipulando matematicamente os dados (através da equação fundamental da onda) dos espectros de frequência é possível obter espectros de comprimento de onda.

As Figuras 51, 52 e 53 mostram os espectros obtidos para o laser vermelho, aplicando-se a transformada de Fourier em diferentes faixas de leitura, a saber, de 1500 a 1600, de 1500 a 2500 e de 200 a 3200, respectivamente.

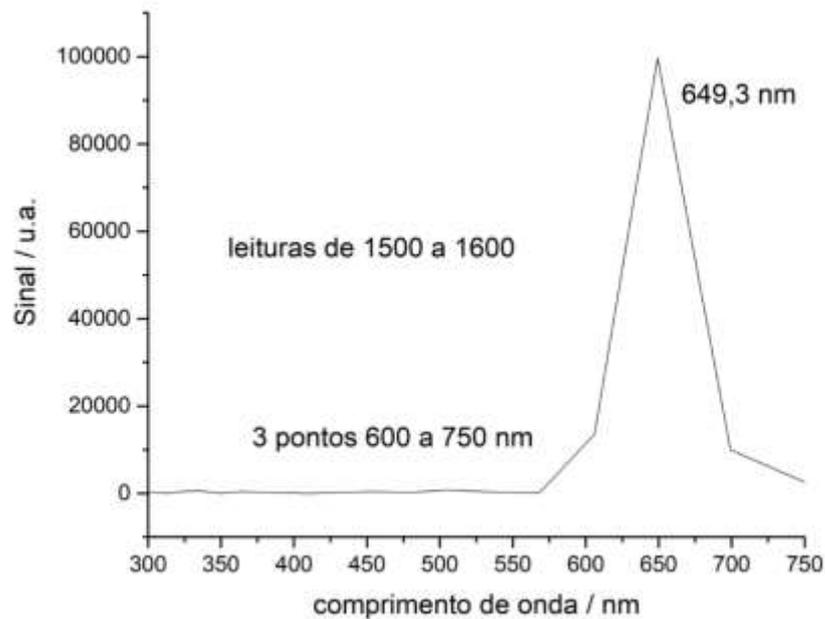


Figura 51: Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 1600 (laser vermelho)

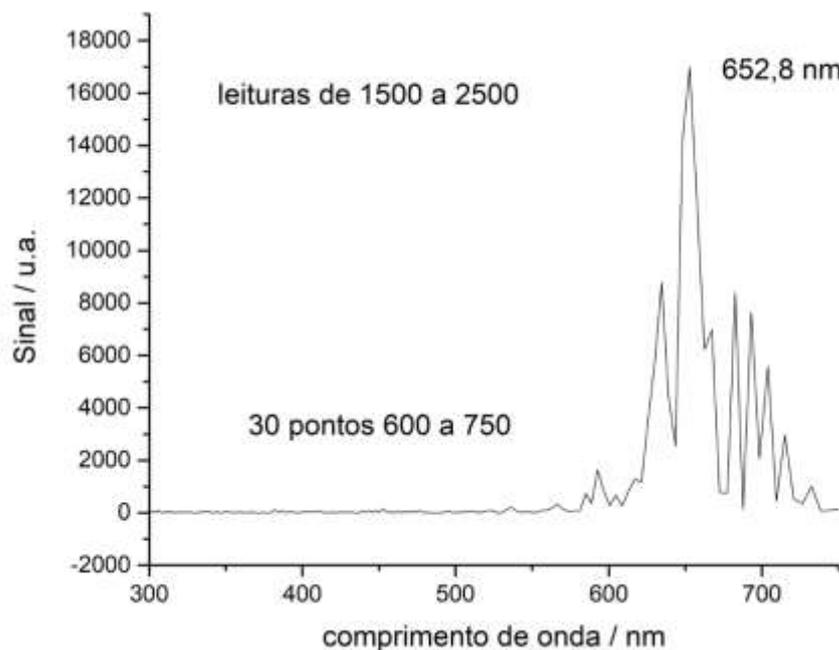


Figura 52: Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 2500 (laser vermelho)

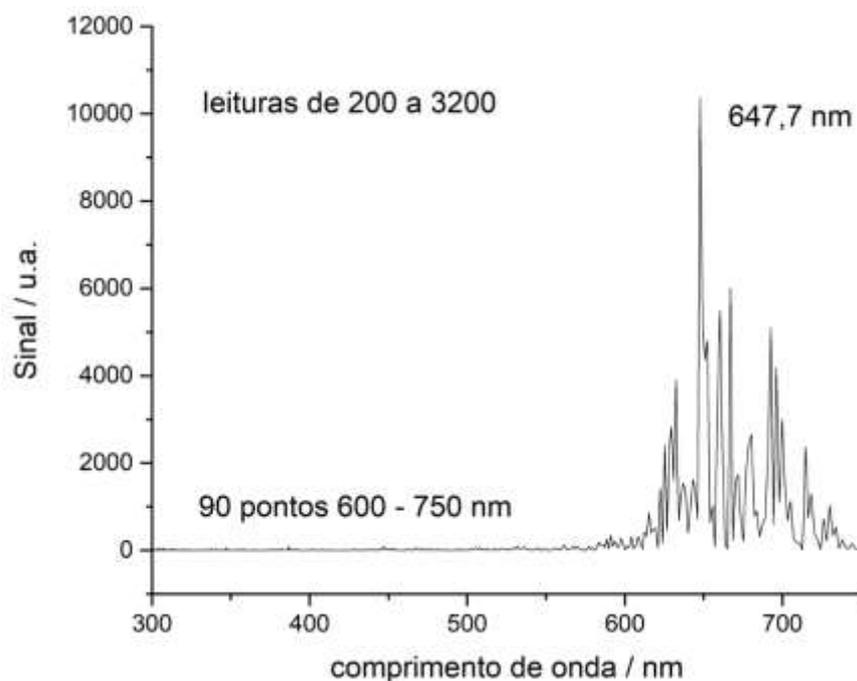


Figura 53: Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 200 a 3200 (laser vermelho)

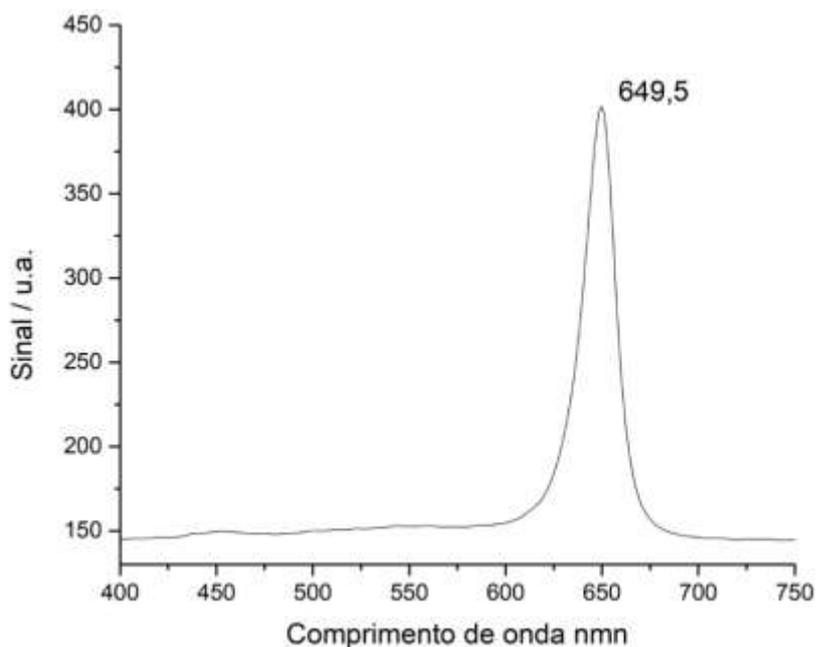
Usando as leituras de um mil e quinhentos até um mil e seiscentos (intervalo de cem medidas), é gerado um determinado número de oscilações (em torno de dezoito), as quais aplica-se a Transformada de Fourier para o laser vermelho, obtendo um espectro (Figura 51) que gera um pico que só possui três pontos para descrevê-lo, no intervalo de 600 e 750 nm, isto é, o espectro produzido possui uma resolução ruim (150/3) devido ao pequeno número de leituras, mas apresenta um máximo de emissão (649,3 nm) muito próximo ao máximo de referência (649,5 nm)

Adotando a estratégia complementar de operar com um maior número de medidas (cerca de um mil para o intervalo de 1500 a 2500), observa-se um aumento no número de pontos do espectro (Figura 52) para descrição da mesma região (30 pontos entre 600 e 750 nm), o que mostra uma melhora da resolução (150/30) do espectro com a introdução de mais informações no interferograma. Porém, como pode ser observado, é introduzido ruído ao espectro, embora torne mais evidente a região de emissão máxima do laser no visível.

Por fim, o espectro obtido pela aplicação da transformada de Fourier a 3000 leituras no intervalo de 200 a 3200 (Figura 53) mostra uma resolução melhor ainda

(150/90), uma vez que 90 pontos são gerados para descrever a região de 600 a 750 nm, trazendo mais informação e mais ruído ao espectro.

É importante observar que embora haja porções carregadas de ruído no espectro, o seu perfil é bastante similar aquele de um espectro obtido com um espectrômetro comercial (Ocean Optics – USB2000) com sistema de arranjo de diodos e mostrado na Figura 54 (referência), indicando a possibilidade de uso do interferômetro proposto como ferramenta didática para ilustrar a aquisição de um espectro no domínio de tempo.



*Figura 54: Espectro obtido com arranjo de diodo mostrando pico máximo de comprimento de onda do vermelho*

As Figuras 55, 56 e 57 mostram os espectros obtidos para o laser verde utilizando as mesmas faixas de leitura utilizadas anteriormente para o laser vermelho. Observa-se novamente uma diminuição (aprimoramento) da resolução dos espectros obtidos com o aumento do número de picos utilizados do interferograma, porém, como já esperado, houve uma certa discrepância entre os valores dos comprimentos de onda de emissão máximos obtidos com o instrumento proposto e o valor de referência obtido com um espectrofotômetro de arranjo de diodos (Figura 58). Além da possibilidade da influência da localização e tamanho da janela de detecção já citada acima, outro fator que pode ter levado à esta inconsistência é o fato de o laser verde utilizado não ser monocromático. Como pode ser visto na Figura 58, além da emissão no verde (em 532 nm) o laser “verde” emite também no infravermelho próximo (804

nm), de modo que a diferenciação destes picos deveria ser observada pelo instrumento proposto que ainda necessita de ajustes para esse tipo de aplicação.

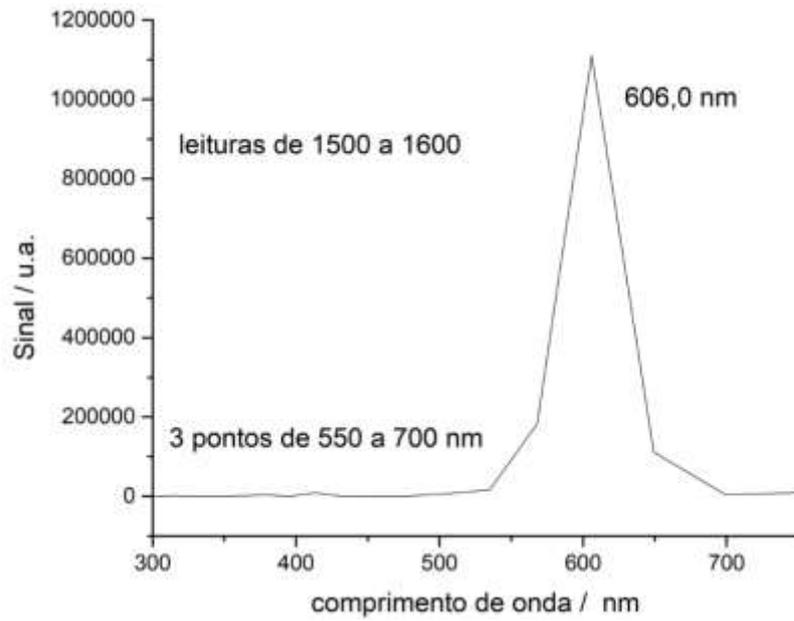


Figura 55: Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 1600 (laser verde)

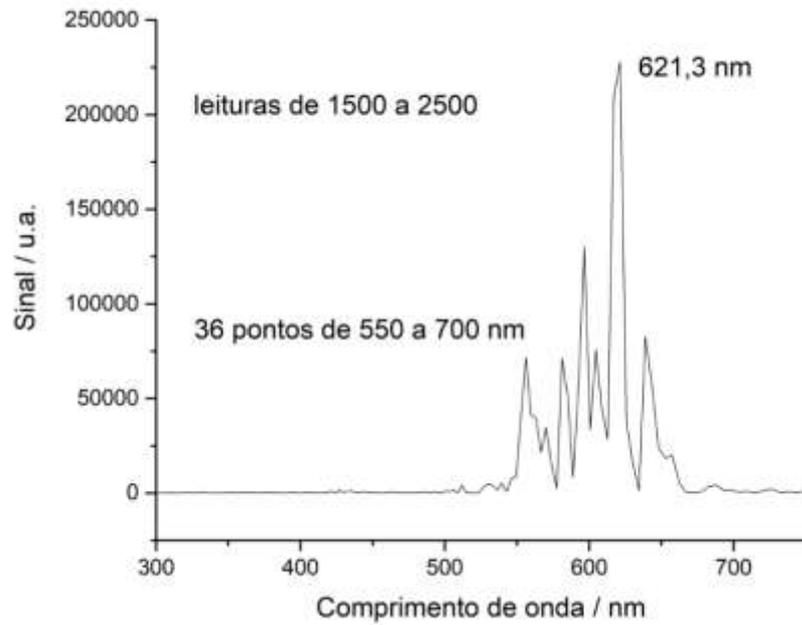


Figura 56: Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 1500 a 2500 (laser verde)

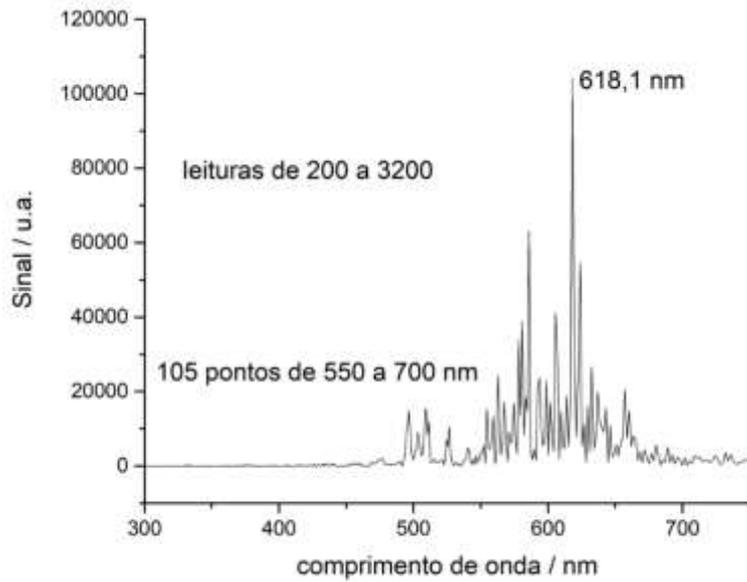


Figura 57: Espectro de Sinal x Comprimento de Onda para leituras de 200 a 3200 (laser verde)

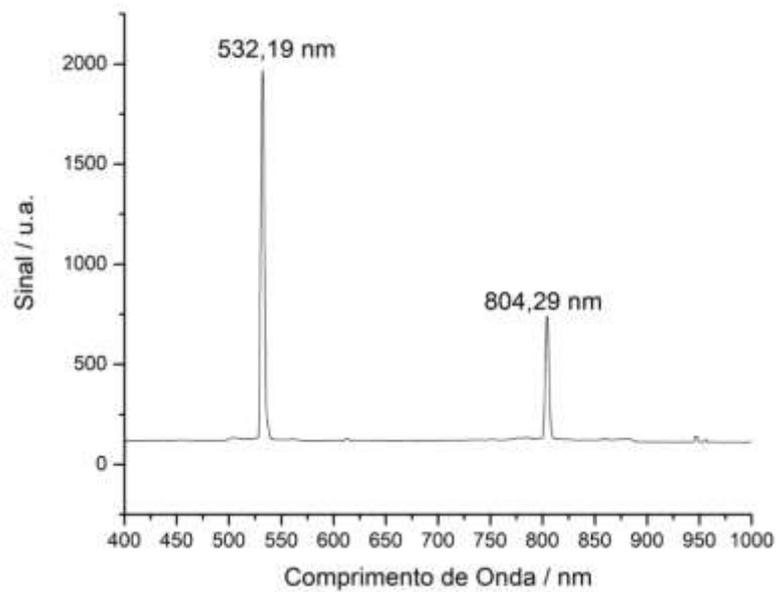


Figura 58: Espectro obtido com arranjo de diodo mostrando pico máximo de comprimento de onda do verde

A distribuição verdadeiramente não bate com o comprimento de onda de fato, provavelmente devido ao fato de ele não ser monocromático ou até mesmo porque a janela para leitura do verde pode estar excessivamente grande. Ao reduzi-la talvez seja razoável admitir que, ao invés do detector ler as duas simultaneamente, haja uma possibilidade de captar só a parte clara em algum momento e só a escura em outro para registrar melhor o espectro.

## 5. CONCLUSÃO

Os estudos demonstraram a possibilidade de automatizar um interferômetro através de um mecanismo de detecção bastante moderno e elegante. O instrumento proposto é fácil de manusear e transportar e foi capaz de captar oscilações constantes ao alterar alguns fatores mecânicos, permitindo a tomada de leituras durante um determinado intervalo de tempo. A partir delas foi possível tirar um espectro para duas cores de Laser com um aparato cuja estimativa de custo total chega a ser dezesseis vezes menor que um comercial e com mais funcionalidades específicas, permitindo sua construção em laboratórios de ensino.

O espectro gerado não é perfeito, mas é possível plotar ao menos um perfil espectral para ambas as fontes de luz com a população majoritária de respostas na faixa do previsto. Quando se trabalha com um intervalo de leituras muito pequeno, poucas oscilações são geradas, portanto o espectro correspondente terá baixa resolução (distância muito grande de um comprimento de onda para outro, afinal haverão poucos pontos para descrever um pico). Para progredir na melhora da resolução é primordial aumentar o número de leituras, fato que acaba inserindo um pouco mais de ruído na medida.

Infere-se, portanto que é indubitável que com mais tempo e tendo à disponibilidade novas técnicas para melhoria da constância do sinal, como por exemplo aumentar o número de leituras para cerca de dez mil sem as distorções advindas dessa tática, implementando novos recursos para estabilidade e amortecimento do sistema sem introduzir compressões indesejadas e eliminando a maior parte das interferências provenientes do ambiente seja possível adquirir espectros bastante fidedignos em novas aplicações.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SILVA, C. C. E.; GIACOMELLI, A. C.; PÉREZ, C. A. S.; SILVA, B. L. Construção de um interferômetro de Michelson-Morley com materiais de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 10, n. 1 p. 1-15, abr. 2017. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/rbect/article/view/5691>. Acesso em: 29 ago. 2021

[2] CATELLI, F.; VICENZI, S. Interferômetro de Michelson. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 350-358, jan. 2001. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10025>. Acesso em: 12 set. 2021

[3] PASQUINI, C.; JUNIOR, I. M. R. Espectrofotometria Multicanal e Arranjo de Fotodiodos. *Química Nova*, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 1-6, fev. 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/C98BrJYLHNSSR79T6jkk4Fy/?lang=pt>. Acesso em: 07 set. 2021

[4] GRÄF, C. et al. Design of a speed meter interferometer proof-of-principle experiment. **Classical and Quantum Gravity**, [s. l.], v. 31, n. 21, p. 1-17, out. 2014. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/31/21/215009>. Acesso em: 02 ago. 2021

[5] EDU-MINT2 & EDU-MINT2/M Michaelson Comercial Interferometer Kit, English Manual, User Guide. **Thor Labs Discovery Rev. A**, [s. l.], nov. 2018. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=EDU-MINT2/M>. Acesso em: 13 mai. 2021

[6] SUAVE, R. N. Interferômetro de Michelson – Experimento B5. **Física Experimental IV, Laboratório de Espectrofotometria e Ensino de Óptica, UNICAMP**, [s.l.], p.1-7. Disponível em: [https://fisica.ufes.br/sites/fisica.ufes.br/files/field/anexo/fis.exp\\_iv-b5-michelson.pdf](https://fisica.ufes.br/sites/fisica.ufes.br/files/field/anexo/fis.exp_iv-b5-michelson.pdf). Acesso em: 10 ago. 2021

[7] SOUZA, L. G.; SANTIAGO L. R.; JESUS V. L. B. Interferômetro de Michelson construído com material de fácil acesso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 1-7, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0070>. Acesso em: 06 ago. 2021

[8] COSTA, R. F. O interferômetro de Michelson e Morley em abordagens dos livros didáticos de Física da Educação Básica Brasileira. **Centro de Ciências e Tecnologia do Departamento de Física, Biblioteca Digital UEPB**, [s. l.], p. 1-53,

2013. Disponível em: <http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/123456789/2351>.

Acesso em: 7 set. 2021

[9] CORDOVA, H. P. Construção de um interferômetro de Michelson e Aplicações no Ensino de Óptica. **Instituto de Física, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, UFRJ**, [s. l.], p. 1-125, set. 2016. Disponível em: <http://www1.fisica.org.br/mnpef/constru%C3%A7%C3%A3o-de-um-interfer%C3%B4metro-de-michelson-e-aplica%C3%A7%C3%B5es-ao-ensino-de-%C3%B3ptica>. Acesso em: 1º out. 2021

[10] MICHELSON, A. A.; MORLEY, E. W. On the relative motion of the Earth and the Luminiferous ether. **American Journal of Science**, [s. l.], 3<sup>rd</sup> series, Art. XXXVI, p. 1-7, nov. 1997. Disponível em: <https://www.ajsonline.org/content/s3-34/203/333>. Acesso em 31 jul. 2021.

[11] TIPLER, P. A.; LLWELLYN, R. A. *Modern Physics*. **W. H. Freeman and Company, New York** [s.l.], 5<sup>th</sup> edition, 2008. Disponível em: [http://web.pdx.edu/~pmoeck/books/Tipler\\_Llewellyn.pdf](http://web.pdx.edu/~pmoeck/books/Tipler_Llewellyn.pdf). Acesso em: 19 jul. 2021.

[12] HU INFINITO, <https://www.huinfinito.com.br/motores/696-motor-de-passo-unipolar-bipolar-nema-17.html> Acesso em: 22 ago. 2021.

[13] PISCALED COMPONENTES ELETRÔNICOS, [https://www.piscaled.com.br/driver-motor-passo-tb67s109aftg-35a-similar-tb6600?utm\\_source=Site&utm\\_medium=GoogleMerchant&utm\\_campaign=GoogleMerchant&gclid=CjwKCAjwopWSBhB6EiwAjxmqDaVDwOEW3-AJN\\_R4q9R98wCj-r0FsfpGteppe\\_s8XsXjuiOEIz9luxoC7OsQAvD\\_BwE](https://www.piscaled.com.br/driver-motor-passo-tb67s109aftg-35a-similar-tb6600?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&gclid=CjwKCAjwopWSBhB6EiwAjxmqDaVDwOEW3-AJN_R4q9R98wCj-r0FsfpGteppe_s8XsXjuiOEIz9luxoC7OsQAvD_BwE) Acesso em: 27 set. 2021.

[14] MERCADO LIVRE, <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1098834911-kit-fuso-tr8-x-400-passo-2-2-kp08-acopla-5-x-8-JM?quantity=1> Acesso em: 13 out. 2021.

[15] ALIEXPRESS, [https://pt.aliexpress.com/item/4001156765847.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order\\_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP](https://pt.aliexpress.com/item/4001156765847.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP) Acesso em: 27 set. 2021.

[16] MERCADO LIVRE, [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1947362087-3-canetas-laser-pointer-5mw-vermelho-verde-e-azul-JM?variation=90931057467#reco\\_item\\_pos=1&reco\\_backend=machinalis-v2p-pdp-boost-v2&reco\\_backend\\_type=low\\_level&reco\\_client=vip-v2p&reco\\_id=91d5dac2-849a-4352-8d03-65f898cb3e3b](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1947362087-3-canetas-laser-pointer-5mw-vermelho-verde-e-azul-JM?variation=90931057467#reco_item_pos=1&reco_backend=machinalis-v2p-pdp-boost-v2&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-v2p&reco_id=91d5dac2-849a-4352-8d03-65f898cb3e3b) Acesso em: 22 ago. 2021.

[17] MERCADO LIVRE, [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1964590566-arduino-uno-r3-JM?matt\\_tool=56291529&matt\\_word=&matt\\_source=google&matt\\_campaign\\_id=14303413604&matt\\_ad\\_group\\_id=133074303519&matt\\_match\\_type=&matt\\_network=g&matt\\_device=c&matt\\_creative=584156655498&matt\\_keyword=&matt\\_ad\\_position=&matt\\_ad\\_type=pla&matt\\_merchant\\_id=240277701&matt\\_product\\_id=MLB1964590566&matt\\_product\\_partition\\_id=1413191054866&matt\\_target\\_id=aud-1008379684294:pla-1413191054866&qclid=CjwKCAjwxZqSBhAHEiwASr9n9KVt0XTEr3Rn\\_CTTADQRq4gkuR1HloAlb8FVHcq\\_d2hBQ3PXCQRYRRoCLpcQAvD\\_BwE](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1964590566-arduino-uno-r3-JM?matt_tool=56291529&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413604&matt_ad_group_id=133074303519&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=584156655498&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=240277701&matt_product_id=MLB1964590566&matt_product_partition_id=1413191054866&matt_target_id=aud-1008379684294:pla-1413191054866&qclid=CjwKCAjwxZqSBhAHEiwASr9n9KVt0XTEr3Rn_CTTADQRq4gkuR1HloAlb8FVHcq_d2hBQ3PXCQRYRRoCLpcQAvD_BwE) Acesso em: 10 ago. 2021.

[18] MERCADO LIVRE, [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2004420536-filamento-pla-cliever-3d-1kg-175mm-preto-glitter-JM?matt\\_tool=31508429&matt\\_word=&matt\\_source=google&matt\\_campaign\\_id=14303413595&matt\\_ad\\_group\\_id=125984286477&matt\\_match\\_type=&matt\\_network=g&matt\\_device=c&matt\\_creative=539354956065&matt\\_keyword=&matt\\_ad\\_position=&matt\\_ad\\_type=pla&matt\\_merchant\\_id=481897357&matt\\_product\\_id=MLB2004420536&matt\\_product\\_partition\\_id=1636348405419&matt\\_target\\_id=aud-532123541969:pla-1636348405419&qclid=Cj0KCCQjwxtSSBhDYARIsAEn0thRMAr1WKyfWTCkKHnC217gvbY24c1cw9hvTaT5jGQ-5G6R91NyD14caAqCyEALw\\_wcB](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2004420536-filamento-pla-cliever-3d-1kg-175mm-preto-glitter-JM?matt_tool=31508429&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413595&matt_ad_group_id=125984286477&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539354956065&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=481897357&matt_product_id=MLB2004420536&matt_product_partition_id=1636348405419&matt_target_id=aud-532123541969:pla-1636348405419&qclid=Cj0KCCQjwxtSSBhDYARIsAEn0thRMAr1WKyfWTCkKHnC217gvbY24c1cw9hvTaT5jGQ-5G6R91NyD14caAqCyEALw_wcB) Acesso em: 22 ago. 2021.

[19] DAISO JAPAN, <https://www.daiso.com.br/produto/ima-forte-multiuso-05cm-8-unidades/4973030> Acesso em: 13 out. 2021.

[20] TDTEC, <https://www.tdtec.com.br/impressao-3d/kit-parafuso-e-mola-alinhamento-mesa-aquecida-impressora-3d-> Acesso em: 15 set. 2021.

[21] MERCADO LIVRE, [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-813366945-lm317-dc-dc-step-down-regulador-tenso-ajustavel-modulo-JM?matt\\_tool=56291529&matt\\_word=&matt\\_source=google&matt\\_campaign\\_id=14303413604&matt\\_ad\\_group\\_id=133074303519&matt\\_match\\_type=&matt\\_network=g&matt\\_device=c&matt\\_creative=584156655498&matt\\_keyword=&matt\\_ad\\_position=&matt\\_ad\\_type=pla&matt\\_merchant\\_id=325976021&matt\\_product\\_id=MLB813366945&matt\\_product\\_partition\\_id=1413191054866&matt\\_target\\_id=aud-](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-813366945-lm317-dc-dc-step-down-regulador-tenso-ajustavel-modulo-JM?matt_tool=56291529&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413604&matt_ad_group_id=133074303519&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=584156655498&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=325976021&matt_product_id=MLB813366945&matt_product_partition_id=1413191054866&matt_target_id=aud-)

[387561341739:pla-1413191054866&gclid=CjwKCAjwrqgSBhBbEiwAIQeqGvCE48kitUCI4sGTB2XsQ972eXB1\\_bvVVRQnV3oCpuc0BAYwRKnVExoCLeUQAvD\\_BwE](https://www.aliexpress.com/item/32841744484.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP) Acesso em: 14 set. 2021.

[22] ALIEXPRESS, [https://pt.aliexpress.com/item/32841744484.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order\\_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP](https://pt.aliexpress.com/item/32841744484.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP) Acesso em: 1º out. 2021.

[23] BANGGOOD, [https://br.banggood.com/JDY-31-DC-3\\_6-6V-bluetooth-2\\_0-or-3\\_0-Module-SPP-Protocol-Android-Compatible-with-HC-05-or-06-JDY-30-p-1476235.html?utm\\_source=googleshopping&utm\\_medium=cpc\\_organic&gmcCountry=BR&utm\\_content=minha&utm\\_campaign=minha-brg-pt-pc&currency=BRL&cur\\_warehouse=CN&createTmp=1&utm\\_source=googleshopping&utm\\_medium=cpc\\_bgcs&utm\\_content=dcr&utm\\_campaign=dcr-pla-brg-all-rm-cart-0323-pc&ad\\_id=427229187766&gclid=CjwKCAjwopWSBhB6EiwAjxmqDQHaS0ypaU1oPuUks-nheCd-NoWXNIBE5vrM9WUahOcEURRmkNF4MRoC3NYQAvD\\_BwE](https://br.banggood.com/JDY-31-DC-3_6-6V-bluetooth-2_0-or-3_0-Module-SPP-Protocol-Android-Compatible-with-HC-05-or-06-JDY-30-p-1476235.html?utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_organic&gmcCountry=BR&utm_content=minha&utm_campaign=minha-brg-pt-pc&currency=BRL&cur_warehouse=CN&createTmp=1&utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_bgcs&utm_content=dcr&utm_campaign=dcr-pla-brg-all-rm-cart-0323-pc&ad_id=427229187766&gclid=CjwKCAjwopWSBhB6EiwAjxmqDQHaS0ypaU1oPuUks-nheCd-NoWXNIBE5vrM9WUahOcEURRmkNF4MRoC3NYQAvD_BwE) Acesso em: 9 ago. 2021.

[24] MERCADO LIVRE, [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1655274139-suporte-para-castanha-tr8-em-bloco-de-aluminio-anodizado-JM#position=5&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=1d0767b3-3d36-4588-acf8-88e77897b410](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1655274139-suporte-para-castanha-tr8-em-bloco-de-aluminio-anodizado-JM#position=5&search_layout=stack&type=item&tracking_id=1d0767b3-3d36-4588-acf8-88e77897b410) Acesso em: 27 set. 2021.

[25] MERCADO LIVRE, [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1290667517-guia-linear-1-trilho-15-x-200-mm-1-patins-15-sem-aba-JM?matt\\_tool=93690476&matt\\_word=&matt\\_source=google&matt\\_campaign\\_id=14302215525&matt\\_ad\\_group\\_id=134553700548&matt\\_match\\_type=&matt\\_network=g&matt\\_device=c&matt\\_creative=539425477855&matt\\_keyword=&matt\\_ad\\_position=&matt\\_ad\\_type=pla&matt\\_merchant\\_id=319247189&matt\\_product\\_id=MLB1290667517&matt\\_product\\_partition\\_id=1469248454877&matt\\_target\\_id=pla-1469248454877&gclid=CjwKCAjwopWSBhB6EiwAjxmqDfd95TGf-Blw7wAz1h\\_RmBN9uwIM2v8RPnASYIS5c3JKPa9uBPC\\_HhoCJTMQAvD\\_BwE](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1290667517-guia-linear-1-trilho-15-x-200-mm-1-patins-15-sem-aba-JM?matt_tool=93690476&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14302215525&matt_ad_group_id=134553700548&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539425477855&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=319247189&matt_product_id=MLB1290667517&matt_product_partition_id=1469248454877&matt_target_id=pla-1469248454877&gclid=CjwKCAjwopWSBhB6EiwAjxmqDfd95TGf-Blw7wAz1h_RmBN9uwIM2v8RPnASYIS5c3JKPa9uBPC_HhoCJTMQAvD_BwE) Acesso em: 7 out. 2021.

[26] ALIEXPRESS, [https://fr.aliexpress.com/item/1005001731217378.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.5da96887Mcz8ck&algo\\_pvid=39802ad8-4c71-4ba2-9f2b-ff4130eabe81&aem\\_p4p\\_detail=20220331055011768064661762760050582301&alg](https://fr.aliexpress.com/item/1005001731217378.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.5da96887Mcz8ck&algo_pvid=39802ad8-4c71-4ba2-9f2b-ff4130eabe81&aem_p4p_detail=20220331055011768064661762760050582301&alg)

[o\\_exp\\_id=39802ad8-4c71-4ba2-9f2b-ff4130eabe81-39&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000017377119461%22%7D&pdp\\_pi=-1%3B24.65%3B-1%3B17.39%40salePrice%3BBRL%3Bsearch-mainSearch](https://pt.aliexpress.com/item/33002800308.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP) Acesso em: 13 out. 2021.

[27] ALIEXPRESS, [https://pt.aliexpress.com/item/33002800308.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order\\_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP](https://pt.aliexpress.com/item/33002800308.html?gatewayAdapt=glo2bra&spm=a2g0o.order_list.0.0.21efcaa4ZEpZZP) Acesso em: 22 ago. 2021.

[28] FOURIER ANALYSIS OF REAL DATA SETS, <http://lampx.tugraz.at/~hadley/num/ch3/3.3a.php#:~:text=Consider%20a%20series%20of%20N,series%20is%20N%CE%94t>. Acesso em: 09 fev. 2022.