



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em ensino de Física



CONSTRUÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E APLICAÇÕES NO ENSINO DE ÓPTICA

Hercilio Pereira Cordova

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador (es):

Helio Salim de Amorim

Carlos Augusto Domingues Zarro

Rio de Janeiro

Setembro de 2016

CONSTRUÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E APLICAÇÕES NO ENSINO DE ÓPTICA

Hercilio Pereira Cordova

Orientador(es):

Hélio Salim de Amorim

Carlos Augusto Domingues Zarro

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dr. Carlos Augusto Domingues Zarro

Dr. Carlos Eduardo Magalhães de Aguiar

Dr^a. Tatiana da Silva

Dr. Roberto Affonso Pimentel Júnior

Rio de Janeiro

Setembro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

C794c Cordova, Hercilio Pereira

Construção de um de Michelson e aplicações no ensino de óptica / Hercilio Pereira Cordova - Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2016. ix, 116 f.: il.;30cm.

Orientador: Helio Salim de Amorim

Coorientador: Carlos Augusto Domingues Zarro

Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2016.

Referências Bibliográficas: f. 56.

1. Ensino de física. 2. Construção de um de Michelson e aplicações no ensino de óptica. 3. Medida do comprimento de onda da luz. 4. Medida do índice de refração do ar. 5. Medida do índice de refração da água. I. Amorim, Helio Salim de. II. Zarro, Carlos Augusto Domingues. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. IV. Construção de um de Michelson e aplicações no ensino de óptica.

Dedico esta dissertação à minha esposa Leticia.

Agradecimentos

A minha esposa Leticia pelo constante apoio.

À minha mãe, Senhora Nadir, por sempre incentivar o seu filho a estudar.

Ao meu falecido pai, Sr. Antônio, por me ensinar a usar ferramentas desde cedo.

A meus professores, que sempre acreditaram no seu aluno.

A José Carlos Santana, por sempre me deixar usar as máquinas e estoque da sua serralheria.

A CAPES por fornecer a bolsa de estudo que me permitiu uma maior dedicação ao mestrado no MNPEF.

RESUMO

CONSTRUÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E APLICAÇÕES NO ENSINO DE ÓPTICA

Hercilio Pereira Cordova

Orientador(es):

Helio Salim de Amorim

Carlos Augusto Domingues Zarro

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

O presente trabalho visa mostrar em detalhes a construção de um interferômetro de Michelson de baixo custo para uso em sala de aula. O equipamento também foi utilizado para a realização de medidas físicas, como o comprimento de onda da luz usada no interferômetro e o índice de refração do ar em função da pressão. Os roteiros de aplicação em sala de aula, bem como o resultado da aplicação didática com alunos do ensino médio, em uma escola estadual do Rio de Janeiro são mostrados em conjunto com um grupo de alunos de um curso técnico, como forma de melhorar o equipamento sem prejudicar alunos em curso normal do ensino médio. Por se tratar de um equipamento físico complexo com componentes muito precisos, cada peça é representada em detalhes construtivos, com desenhos detalhados, munidos de cada medida para permitir a sua reprodução, não somente por um professor, mas também por uma metalúrgica ou serralheria, integrando a escola aos meios de produção local. O produto final, um interferômetro de Michelson funcional, a quase 1/40 do custo de um interferômetro usado em laboratórios didáticos é apresentado.

Palavras-chave: Ensino de física, Interferômetro de Michelson, Interferômetro de baixo custo, Medidas do comprimento da luz, Medidas do índice de refração do ar, Medida do índice de refração da água.

Rio de Janeiro

Setembro de 2016

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF A MICHELSON INTERFEROMETER AND APPLICATIONS IN OPTICS EDUCATION

Hercilio Pereira Cordova

Advisors:

Helio Salim de Amorim

Carlos Augusto Domingues Zarro

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

This thesis aims to show how to build a low-cost Michelson interferometer designed for use in Physics classes. Moreover, a guide to use this interferometer to measure some physical quantities such as the laser wavelength and the air refraction index, by measuring the pressure of vacuum chamber is presented. The above experiment guides were tested in two different type of students, namely high-school and technical students. These results were also discussed and compared. As the interferometer is a complex equipment with demands very precisely built components, each piece is described in a detailed way, hence each part of this interferometer can be rebuilt, not only by the instructors but also by a technical staff. Also, this interferometer costs approximately 1/40 of an analogous commercial model.

Keywords: Physics teaching, Michelson interferometer, low-cost experiments, light wavelength measurement, air's index of refraction measurement, water's index of refraction measurement.

Rio de Janeiro

September 2016

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Interferômetro de Michelson	2
1.2	O que é o interferômetro e interferometria?	3
1.3	Historia e evolução	7
1.4	Fundamentação teórica de ondas	11
1.4.1	Propriedades básicas de uma onda	12
1.4.2	Fase.....	12
1.4.3	Interferência construtiva e destrutiva	13
1.4.4	Coerência da fonte de luz	15
2	Construindo um Interferômetro de baixo custo.....	17
2.1	Proposta construtiva de um interferômetro de Michelson	17
2.2	Opções analisadas de construção	19
2.3	Construção de um protótipo.....	28
2.4	A inserção da placa Arduino e sensores de pressão.....	28
2.5	Modelo final.....	32
3	Testes com o modelo final	37
3.1	Obtenção da figura de interferência.....	37
3.2	Medida do comprimento de onda do laser usado	38
3.3	A medida do índice de refração do ar em função da pressão.....	42
3.4	Comparativo o modelo construído e de equipamentos de laboratório.....	44
4	Aplicação pratica em sala de aula	47
4.1	Aplicação com alunos da 3º série do Colégio Estadual Professor José de Souza Marques no RJ	48
4.2	Aplicação em alunos de um curso técnico pós-médio do colégio NETINFO .	51
4.3	Comparativo entre as turmas de médio e pós-médio	54
5	Considerações finais.....	56
6	Referência.....	58
7	Apêndices	59
7.1	Orçamento de Interferômetro de Michelson.....	60
7.2	Desenho da base de granito e tripé	61
7.3	Desenho do suporte do divisor de feixe de lâmina de microscópio.....	62
7.5	Desenho do suporte do divisor de feixe.....	64
7.6	Desenho do suporte do laser	66

7.7	Desenho do suporte do espelho fixo	68
7.8	Desenho do suporte do espelho móvel	70
7.9	Desenho do suporte do disco de espelho de HD.....	74
7.10	Desenho do suporte do espelho de máquina copiadora (Xerox).....	76
7.11	Desenho do suporte da lente	78
7.12	Desenho da célula de Ar	80
7.13	Desenho do suporte do piezelétrico	82
7.14	Desenho do interferômetro completo.....	84
7.15	Foto do interferômetro foto da versão final	87
7.16	Foto do suporte de espelho de disco de Hd	89
7.17	Foto do suporte do LASER com circuito regulador de tensão	90
7.18	Foto do suporte da lâmina de microscópio	91
7.19	Foto do suporte do espelho de fotocopiadora	92
7.20	Foto do suporte do espelho móvel com espelho de fotocopiadora.....	93
7.21	Foto do suporte da lente.....	94
7.22	Foto da célula de Ar.....	95
7.23	Diagrama elétrico do regulador de tensão do laser.....	96
7.24	Roteiro didático – Medida do comprimento de onda do laser	97
7.25	Circuito do módulo Arduino de leitura da Célula de Ar.....	102
7.26	Roteiro didático – Medida do índice de refração do ar.....	103
7.27	Código fonte do Arduino (Sketch).....	108

1 Introdução

O presente trabalho é uma contribuição ao esforço de produção de material didático para o ensino de Física. Dentre as muitas dificuldades que encontramos na qualificação do ensino de Ciências, e de Física em particular, no Brasil é o acesso a produtos que auxiliem o professor na instrumentalização de suas aulas. Isso é particularmente sensível na área da Física por se tratar de uma ciência eminentemente experimental.

Considerando os problemas crônicos de financiamento de projetos educacionais no Brasil, têm-se dado ênfase nas propostas que envolvem baixo custo. Podemos dizer que o critério “baixo custo” se tornou uma quase obsessão para validação de um projeto de instrumentação. Outra condição importante perseguida em projetos de instrumentação é a simplicidade de execução: todo o material deve ser facilmente preparado. A preocupação é procedente e surge do fato de que o professor em geral não tem qualificação técnica, e nem os instrumentos necessários, para execução de projetos muito elaborados.

Neste trabalho procuramos explorar outro caminho. Existe uma enorme gama de profissionais técnicos, de diferentes especialidades, que podem contribuir enormemente no esforço de produção de instrumentação para o ensino, que estão a nossa volta e são praticamente ignorados por professores na elaboração de seus projetos. São mecânicos, carpinteiros, marceneiros, serralheiros, soldadores e etc., organizados em oficinas de bairro e com grande suprimento de recursos em ferramentas e habilitações. Por que não usar essa magnífica infraestrutura que, como sabemos, pode ser encontrada desde os grandes centros urbanos até pequenas cidades do interior?

Se considerarmos o apoio dessa infraestrutura podemos ser naturalmente mais ousados ao projetar a instrumentação para o ensino. Caberá ao projetista construir um protótipo, testá-lo e produzir a documentação pertinente para que sirva de base aos professores interessados e o pessoal técnico a ser envolvido na reprodução do projeto. Como ficará claro na apresentação que se segue, o projeto que desenvolvemos foi pensado para ser realizado com auxílio de um profissional técnico e não diretamente pelo professor, seja em sua própria casa ou na sua escola. Espera-se do professor interessado a orientação do técnico nos aspectos científicos e pedagógicos envolvidos no projeto. É interessante dizer que o pessoal técnico envolvido nestes trabalhos se sente, geralmente, muito gratificado em participar, tanto pelo alcance social do projeto quanto pelo contato com a Ciência.

1.1 Interferômetro de Michelson

No Ensino Médio os alunos se deparam com temas relacionados à ciência Física, alguns atuais e outros como parte da evolução da história da Física. Um destes temas é o Interferômetro de Michelson, visto como uma pesquisa que auxiliou no desenvolvimento da teoria da relatividade restrita, em poucos casos é visto à fundo em sua história e fundamentação teórica. A teoria que explica o funcionamento do interferômetro de Michelson, interferência construtiva e destrutiva de ondas, é vista no terceiro ano do Ensino Médio. [NUSSENZVEIG, 1997]

Contudo o interferômetro de Michelson não é apenas um equipamento desenvolvido no século XIX que permitiu avançar no estudo de Física ondulatória, mas sim um equipamento atual muito usado em pesquisas e laboratórios didáticos, não como ferramenta histórica, mas sim como um equipamento de medidas de alta precisão, sendo responsável por diferentes medidas, desde refração do ar em função da pressão que permitiu melhorar medidas astronômicas, a medidas de deslocamento com meio comprimento de onda além de vasto uso na espectroscopia. [SEEDUC, currículo mínimo, 2016]

Por possuir uma gama vasta de conceitos físicos a serem estudados, é proposta nesta dissertação a construção de um interferômetro de Michelson de baixo custo. Como indicamos já no início desta introdução, não será um equipamento a ser construído por um professor de Física do Ensino Médio em uma aula com duração limitada, mas sim um equipamento que necessitará de auxílio de uma oficina metalúrgica ou pessoa com conhecimento em metalurgia que disponha de ferramentas básicas, como furadeira, chaves de fenda, lima e outras. Depois de construído, porém, terá uma vida útil grande, sendo seu uso possível para aulas de ondulatória, interferometria e demonstrações em feiras, não como um experimento com laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) e espelhos, mas sim um equipamento com contextualização histórica e finalidades prática atual de medidas Físicas.

O interferômetro de Michelson deve permitir não só a demonstração pelo professor, o que acarretaria numa aula eminentemente expositiva, mas um equipamento onde o aluno pode manusear e realizar uma medida física envolvendo o próprio ajuste e calibração do sistema de laser. O uso de experimento em aulas de Física não é em si

nada novo, mas a sua utilização com a devida preparação e orientação do professor irá fornecer ao aluno um problema, uma hipótese e um plano de trabalho ou roteiro. Caberá ao aluno uma interação com liberdade intelectual, onde será possível coletar os dados e elaborar as conclusões [CARVANHIO, 2015]. Vemos que o aluno participará não apenas de uma aula prática, mas terá vivência com um equipamento importante para a ciência e uma interação com uma área tecnológica que o experimento faz uso para o seu funcionamento.

Outro ponto importante do aprendizado é a experiência de lidar com um equipamento, pois o uso de um experimento não é uma operação de simples coleta de dados, mas sim uma vivência onde será possível adquirir uma bagagem emocional referente ao sentimento de descoberta e de frustração. Um experimento é sujeito a erros como qualquer outra atividade humana, onde é preciso lidar com os sucessos e fracassos de forma a melhorar a personalidade, investindo em novas tentativas e melhorias do processo no qual se obteve dado resultado. Paciência é uma virtude fundamental para o experimentalista. No ponto de vista didático, este processo mostra como é feita a evolução da ciência, não de descoberta ao acaso, mas sim de um trabalho contínuo de pessoas que se dedicaram por longos períodos de sua vida.

1.2 O que é o interferômetro e interferometria?

Podemos definir interferômetro como o equipamento onde se faz uso da técnica de interferometria, contudo é uma definição muito limitada a uma área com muita abrangência de técnicas, equipamentos e de teoria.

Vamos considerar para fins práticos que o interferômetro é um equipamento que faz uso de propriedades (interferometria) da luz em seu caráter ondulatório, como interferência, coerência, fase e reflexão, além da sua velocidade e comprimento de onda. Assim o interferômetro de Michelson aqui considerado é um equipamento com uma configuração específica de espelhos, divisor de feixe e fonte de luz. Sendo a fonte de luz, um diodo laser, que historicamente não é a fonte original usada por Michelson, mas é adequada à tecnologia de fontes de luz atual.

Esta configuração do interferômetro de Michelson é tal que o feixe de luz que sai do módulo laser é dividido em dois por um divisor de feixe, ou também chamado

semi-espelho, onde cada parte da divisão segue um caminho diferente, que denominamos caminho óptico. No final de cada um destes caminhos há um espelho que reflete o feixe de luz novamente para o divisor, sofrendo uma nova divisão (ver Figura 1). No final dos percursos e divisões 50% da potência inicial voltou à fonte e 50% vai em direção a um anteparo, que pode ser uma parede, tela ou qualquer objeto que permita projetar a luz. [AGUIAR, 2016]

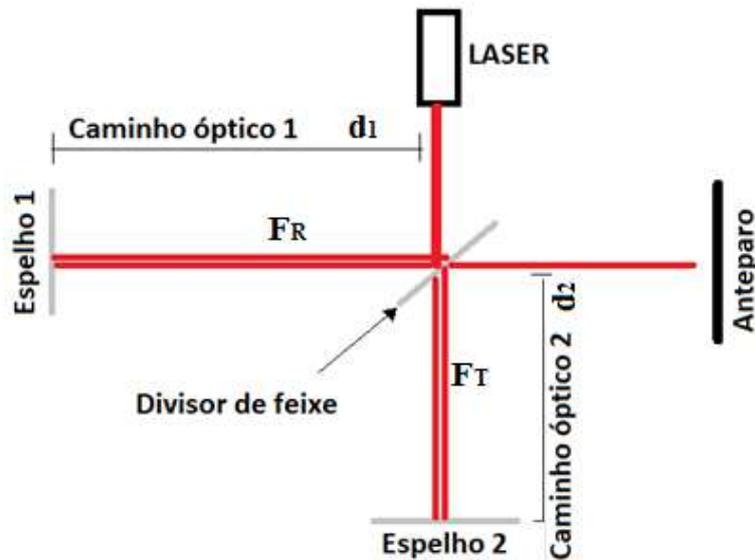


Figura 1. Diagrama de um interferômetro de Michelson

A interação da luz esperada no anteparo é uma figura de interferência que pode se apresentar de duas formas: uma na configuração de barras paralelas, a outra, na forma círculos concêntricos (ver Figura 2). Os círculos surgem quando todos os espelhos estão alinhados, já as barras paralelas são resultados de quando os espelhos não estão perpendiculares entre si. Ambas as figuras de interferência servem para medidas interferométricas. Para fins mais didáticos, tanto as barras paralelas como os círculos concêntricos serão chamados de franjas. Já quando citamos feixe de luz se considera um feixe colimado, ou seja, os raios de luz são paralelos entre si e monocromático, pois possuem somente um comprimento de onda (λ) e coerente já que possuem a mesma fase.

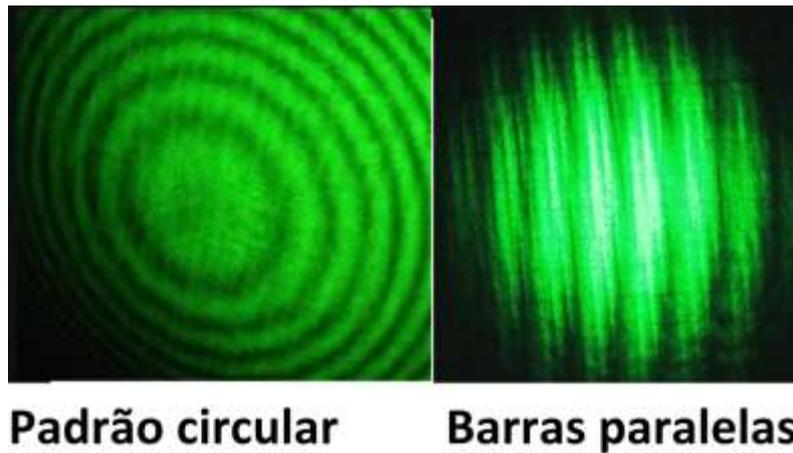


Figura 2. Padrões de figuras de interferência.

Um fato importante é que o feixe colimado deve ser expandido ao sair da segunda divisão do divisor de feixe, ou seja, quando for em direção ao anteparo, para termos uma figura com dimensões visíveis a olho nu. Se o feixe for expandido logo após sair do laser torna o alinhamento dos espelhos mais simples, porém há muita perda da intensidade do laser. O expensor de feixe é basicamente combinação de lentes biconvexas e bicôncavas que permitem ajustar o tamanho da imagem de interferência projetada no anteparo.

Assim, sempre que for feita uma referência ao interferômetro de Michelson, vamos considerar esta configuração. Há outras configurações de interferômetros, como o de Fabry-Pérot, interferômetro de Mach-Zehnder e outros, mas não é o tema abordado nesta dissertação. O interferômetro de Michelson foi escolhido devido a sua fácil montagem e ser um dos mais simples de manusear.

Quanto à interferometria, podemos considerar como a técnica que usa as propriedades da luz já citadas em conjunto, no equipamento interferômetro, dele tirando em termos mais gerais, medidas de comprimento de onda, ou mesmo variações no comprimento físico de certos objetos, a partir do deslocamento das franjas de interferência. Desta forma a exatidão do interferômetro vem do comprimento de onda da luz usada e da qualidade dos espelhos e divisor de feixes usados.

Voltando à Figura 2, o feixe inicial do laser usado é dividido em dois feixes, um que é refletido que chamaremos de F_R , e um que passa, ou seja, é transmitido pelo divisor de feixe que será chamado de F_T . Cada feixe percorre um caminho óptico de distância d_1 para o espelho 1 e d_2 para o espelho 2, após passarem novamente pelo

divisor de feixe e se encontrarem no anteparo, a diferença de caminho percorrido pelas duas ondas é $2(d_2 - d_1)$.

Sempre que a distância do espelho é alterada as franjas são deslocadas. Esse deslocamento é proporcional ao comprimento de onda da luz usada, assim se um dos espelhos é deslocado $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda é deslocada uma franja, ou seja, uma franja clara ocupa o lugar de uma escura, como se ela estivesse andando. Observe que o deslocamento do espelho é multiplicado por dois, pois a luz vai e volta pelo mesmo caminho. Assim cada franja que andou de claro para escuro, temos um deslocamento de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda da luz usada (ver Figura 3).

Mudança dos anéis concêntricos em função da alteração do caminho óptico

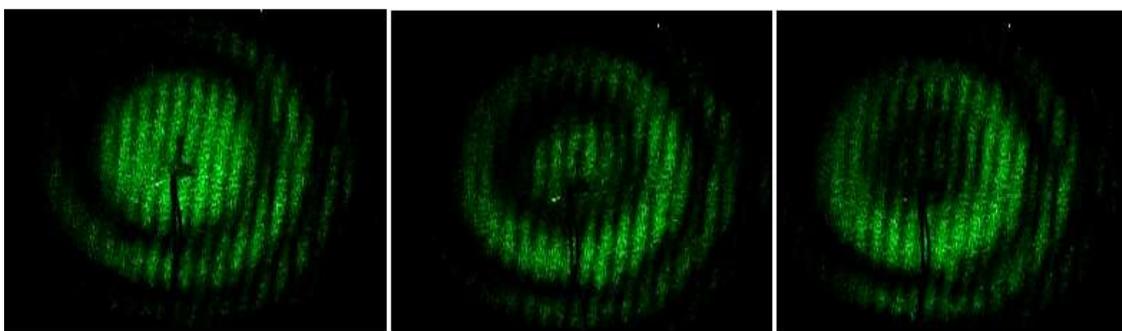


Figura 3. Da esquerda para a direita o deslocamento da franja em $\frac{1}{2}$ comprimento de onda. Imagem obtida do Interferômetro de Michelson

Uma observação importante na figura 3 é a presença de franjas paralelas, provenientes de reflexões secundárias na superfície do semi-espelho usado.

Contudo a franja não sofre alterações somente com a mudança nas distâncias entre os espelhos, caso um objeto transparente à luz utilizada seja inserido em um dos caminhos ópticos teremos uma alteração da velocidade da luz ao percorrer este objeto transparente. Por consequência esta frente de onda sofre uma defasagem em relação à outra frente que percorreu o caminho inalterado, resultando no deslocamento das franjas, após a interferência entre ondas.

A capacidade do interferômetro como equipamento de medida de alta resolução e exatidão vem justamente da quantidade de franjas deslocadas, isto é, do número de franjas que se deslocaram durante a alteração do caminho óptico que por sua vez é um múltiplo do comprimento de onda do laser utilizado. Como o comprimento de onda é da

ordem de 10^3 nm, ou 10^{-6} m, a precisão final da medida direta está na faixa de 1 micrômetro.

1.3 História e evolução

O uso do interferômetro remonta às primeiras experiências de Física que fazem uso da interferência entre as ondas de luz para obter medidas do índice de refração do ar, ou simplesmente comprovar que a luz é ou possui propriedades ondulatórias. Sendo assim o experimento da dupla fenda realizado por Thomas Young em 1801 pode ser considerado o primeiro interferômetro. Muitos outros vieram em sequência, cada qual com uma finalidade e configuração diferente, como o duplo tubo de Arago para medir o índice de refração do ar ou o interferômetro de Jamin que tinha o mesmo objetivo. [PIMENTEL, 2012]

O modelo de interferômetro criado pelo físico estadunidense Albert Abraham Michelson (1852-1931) tinha um objetivo mais crucial para a Física do final do século XIX, a existência do éter, ou seja, a velocidade do vento que o éter poderia causar no deslocamento da luz neste meio onde ela se propagaria.

No âmbito da teoria ondulatória, quando temos uma perturbação em um meio material, como o ar ao redor da membrana de um alto falante, por exemplo, ao vibrar essa membrana temos a compressão das moléculas do ar ao redor. Essa compressão resulta na transmissão de energia através do meio material, que no caso do ar compreendemos como sendo o som. Esta é uma onda mecânica que como foi dito precisa de um meio material. Uma das propriedades da propagação de uma onda em um meio material é que quanto maior a densidade do meio, maior a velocidade da onda, assim no ar a velocidade do som beira os 341m/s, na água temos em torno de 1450 m/s [NUSSENZVEIG, 2014]. Contudo para uma onda eletromagnética o efeito é o contrario, quando maior a densidade menor a velocidade da luz, sendo a velocidade da luz no vácuo cerca de 3.10^8 m/s, [NUSSENZVEIG, 1997]. Com esta linha de pensamento é intuitivo, ou mesmo necessário crer que para a luz se propagar é preciso um meio. Este era chamado de éter com propriedades Físicas estranhas, como uma alta densidade, mas com fluidez o suficiente para os corpos materiais passarem por ele.

O interferômetro projetado por Michelson tem justamente esse objetivo, medir a diferença na velocidade da luz provocada pelo arrasto da Terra ao passar ou transpassar pelo éter, ou o vento do éter. Considerando os caminhos ópticos percorridos pelos feixes de luz, estando ambos os caminhos com a mesma orientação em relação ao deslocamento da Terra com o éter, teríamos que os dois feixes percorram a mesma distância, ver Figura 4. O que, por exemplo, formaria uma imagem de interferência com um ponto central claro, ou seja, um ponto onde há interferência construtiva das ondas de luz.



Figura 4. Movimento orientado com o Éter

Ao rotacionar o interferômetro em 45° no sentido anti-horário (ver Figura 5) o caminho óptico 1 que se move ao longo do sentido de movimento de deslocamento da Terra em relação ao éter teria um comprimento menor que o caminho óptico 2 que estaria em movimento perpendicular ao movimento de deslocamento da Terra, como os lados de um triângulo. O resultado dessa rotação na imagem de interferência seria a mudança do ponto central de claro para escuro, ou seja, teríamos uma interferência destrutiva entre as frentes de onda dos feixes de luz produzidas pela mudança no caminho óptico percorrido pela luz. Observando que escuro nesta referência é a ausência de luz. Uma interferência de uma mudança de franja é apenas uma exemplificação exagerada, pois Michelson preparou o interferômetro para mediar pequenas alterações de franjas, com valores de até 8 partes em 100.

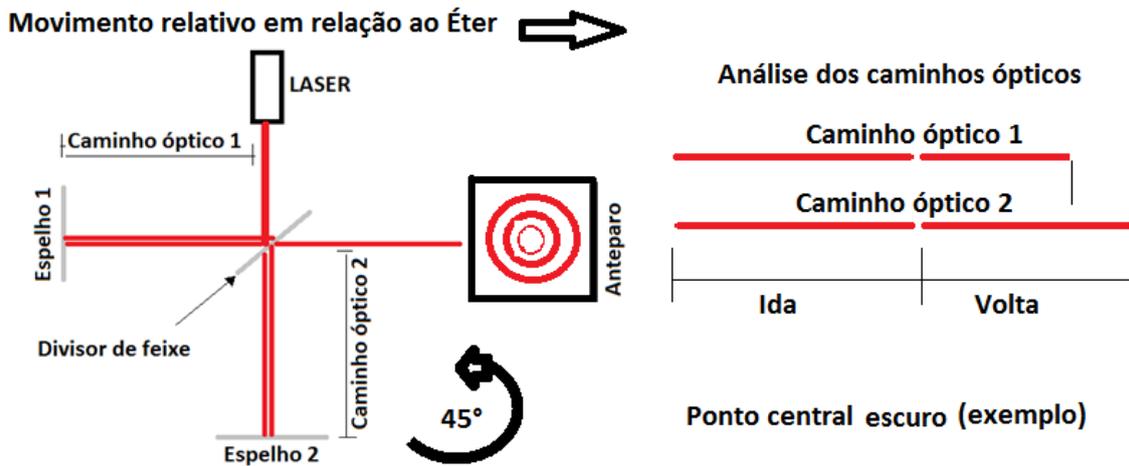


Figura 5. Movimento não orientado com o Éter

As mudanças aqui representadas estão exageradas apenas para demonstração. No projeto de original de Michelson em 1881 realizado em Berlim, a mudança de franja esperada era de $4/100$ do comprimento de onda da luz amarela, sendo a resolução do seu interferômetro calculada em $1/100$. Após os testes, não houve nem uma mudança de franja, assim o experimento não teve o seu objetivo alcançado. As medidas obtidas por Michelson eram muito pequenas para considerar que houve uma mudança real no caminho óptico percorrido pela luz. Michelson era um jovem físico na época, e já conhecido por ter realizado a medida da velocidade da luz com exatidão aprimorada usando os espelhos rotatórios de Foucault em 1878 na academia da marinha de Anápolis.

Em 1887 já com parceria formada com Edward Morley, Michelson desenvolveu melhorias nas configurações do primeiro interferômetro, aumentando os braços dos espelhos (caminho óptico) e colocando o equipamento em cima de um bloco de granito que flutuava em um tanque de mercúrio, assim eliminando vibrações externas. Ver Figura 6. [PIMENTEL, 2012]

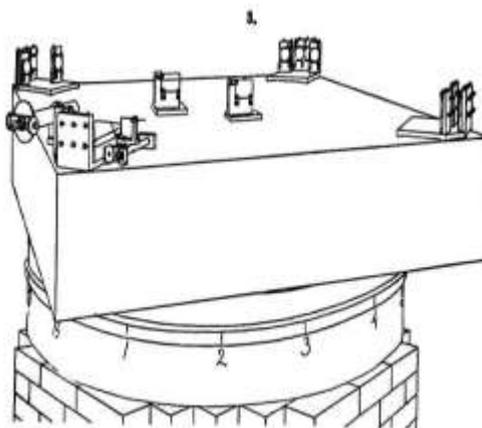


Figura 6. Desenho do interferômetro de Michelson.

A nova configuração tornava o modelo mais estável com resultados mais precisos, porém o resultado foi o mesmo, menos de 1% de variação da franja. Assim o interferômetro de Michelson não atingiu o objetivo de medir o vento do éter.

Contudo isso não significou um fracasso na ciência, as configurações de espelhos e divisores de feixe criados permitiram o extenso uso do interferômetro de Michelson em diversas medidas, sendo um dos experimentos mais usados em metrologia. Devido a sua flexibilidade e simplicidade de montagem, bem como a possibilidade de inserir objetos a serem medidos em seus caminhos ópticos sem alteração dos feixes de luz o torna um equipamento prático para medidas físicas. Como exemplo, temos a medida da unidade do metro realizada pelo próprio Michelson e Morley estabelecendo que o padrão do metro (barra do metro) como equivalente a 1.556.163,5 comprimentos de onda de uma fonte de luz monocromática emitida por uma fonte de cádmio.

Por essa medida e demais aperfeiçoamentos que tornaram o interferômetro de Michelson um instrumento de medida de alta precisão e flexibilidade, Michelson recebeu o prêmio Nobel de Física de 1907 pelo interferômetro e suas aplicações.

Observando que Michelson e posteriormente somente o Morley repetiram diversas vezes o experimentos em condições e locais diferentes, sempre com o mesmo resultado, não há perturbações do éter que possam ser medidas. Contudo Michelson nunca deixou de acreditar na capacidade do experimento, mas sim da precisão e de que o éter era algo que necessitava de um interferômetro de maior precisão para ser medido.

Um segundo ponto de grande importância para o experimento de Michelson é sua aplicação na teoria da relatividade restrita proposta em 1905 por Albert Einstein. Há

divergências quando ao fato de Einstein ter conhecimento do experimento do interferômetro de Michelson durante a elaboração da teoria da relatividade, mesmo com o experimento sendo realizado em 1887 e a teoria da relatividade concluída em 1905.

O fato o interferômetro não ter medido o deslocamento da luz em relação ao éter, não foi um insucesso, mas uma comprovação empírica da teoria da relatividade, já que a teoria da relatividade considera a velocidade da luz constante independente da velocidade do observador, e segundo, pela ausência de um meio para propagação de ondas de luz, ou seja, o éter não é necessário. Assim o interferômetro de Michelson e suas medidas realizadas em 1887, e posteriores, complementam a validação da teoria da relatividade restrita.

Atualmente o interferômetro de Michelson é utilizado como instrumento de medida, entre elas a do próprio comprimento de onda da fonte de luz do interferômetro, índice de refração de gases, magnetostricção onde um metal sofre alteração das suas medidas na presença de um campo magnético e efeito Doppler da luz. Muito usado em laboratórios didáticos de Física para o estudo de fenômenos ondulatórios da luz.

1.4 Fundamentação teórica de ondas

Para o estudo do interferômetro de Michelson é preciso abordar várias propriedades do comportamento ondulatório da luz, ou seja, um tratamento da luz como onda.

Dentre os temas que devem ser estudados para a compreensão da interferometria, por consequência o entendimento do funcionamento do interferômetro de Michelson, temos:

1. Propriedades de uma onda.
2. Fase.
3. Interferência construtiva e destrutiva.
4. Coerência da fonte de luz.

1.4.1 Propriedades básicas de uma onda

A origem do tratamento ondulatório para a luz não é objetivo deste texto, mas sim suas propriedades básicas, como: comprimento de onda, frequência e amplitude. Considerando uma onda plana (ver Figura 7), temos o comprimento de onda representado pela letra grega λ (lambda) e sua amplitude por E_0 .

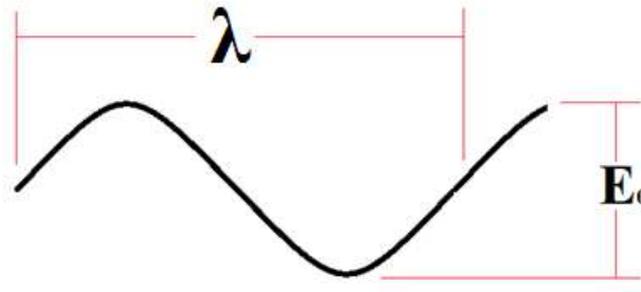


Figura 7. Amplitude e comprimento de onda

Considerando que esta se desloque com a velocidade da luz ($\sim 3 \cdot 10^8$ m/s) temos a relação de quanto tempo T dura um comprimento de onda, ou seja, o seu período T .

Já o número de vezes que ela se repete por unidade de tempo, a frequência é dada por:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.4.1)$$

E, finalmente, temos a relação da frequência com a velocidade e comprimento de onda, dada por:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.4.2)$$

Na equação 1.4.3 temos a relação que descreve o comprimento de onda como função da frequência e da velocidade.

1.4.2 Fase

Diferença de fase consiste em um deslocamento angular ou temporal entre duas ou mais ondas de mesma frequência f , observando que este conceito se aplica independente da forma da onda. Na Figura 8 temos duas ondas, e as consideraremos com a mesma amplitude.

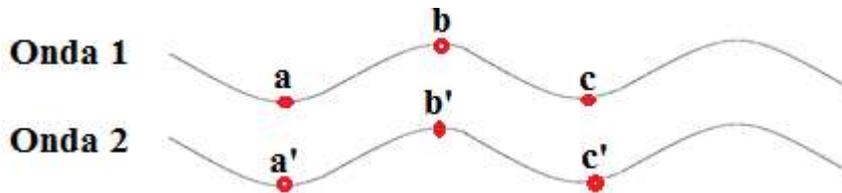


Figura 8. Ondas em fase.

Analisando os pontos a e a' da Figura 8, temos que eles se encontram na mesma posição de amplitude, mesmo estando em ondas diferentes, assim podemos afirmar que eles estão em fase, ou as ondas estão em fase. O mesmo pode ser aplicado aos pontos b , b' e c e c' . Contudo se os mesmo pontos não estiverem na mesma posição, podemos dizer que as ondas estão fora de fase ou defasadas. Ver Figura 9.

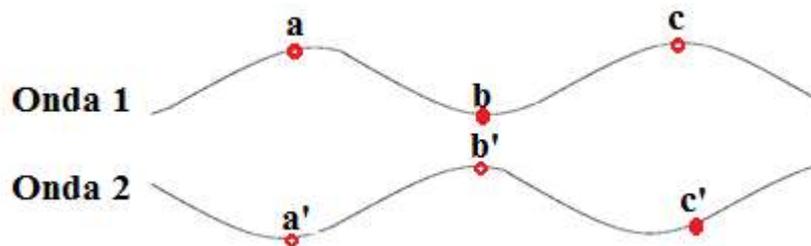


Figura 9. Ondas defasadas.

Na Figura 9 os pontos a e a' estão em posições diferentes da onda, o que resulta em uma defasagem. Observando que esta defasagem pode ser em uma consideração angular, qualquer valor entre 0 e 2π rad.

1.4.3 Interferência construtiva e destrutiva

Retomando o conceito de fase de uma onda: quando temos duas ou mais ondas que se superpõem, resulta numa propriedade chamada de interferência. Esta pode se manifestar de duas formas, construtiva quando as ondas estão em fase, ou destrutiva quando as ondas estão 180° fora de fase. Na Figura 10, temos um exemplo de duas

ondas interagindo de forma construtiva, sendo o resultado uma sobreposição de ondas, com uma soma da amplitude.

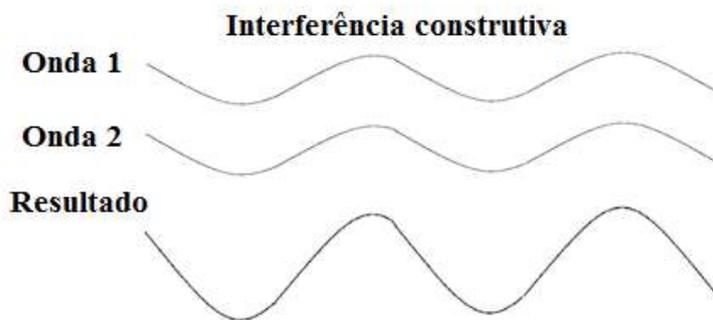


Figura 10. Interferência construtiva.

Caso as ondas estejam fora de fase, teremos uma sobreposição de pontos das ondas com amplitudes diferentes e se essa diferença de fase for igual a 180° , o resultado será uma interferência destrutiva, ou ausência completa das ondas (ver Figura 11).

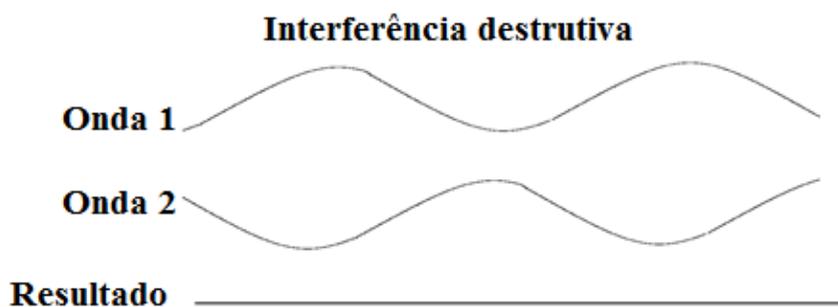


Figura 11. Interferência destrutiva.

No interferômetro essas interferências se manifestam na forma de franjas ou barras. Sendo as franjas claras (luz mais intensa) a interferência construtiva e as franjas escuras (ausência de luz) a interferência destrutiva (ver Figura 12).

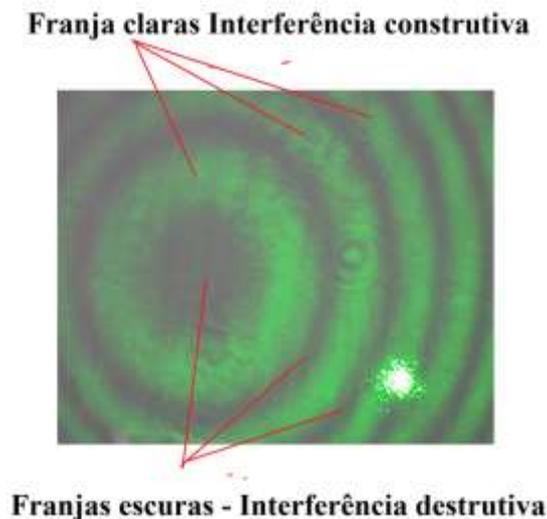


Figura 12. Imagem de interferência.

Uma consideração importante sobre a Figura 12: As franjas não são separadas somente em destrutivas e construtivas, ou seja, não há um fim/início marcado entre as franjas mostrando onde acaba a destrutiva e inicia a construtiva. Mas sim um esmaecimento das interferências, com um gráfico de seno, temos mínimos e máximos de interferência que vai aumentando e diminuindo de forma gradual.

1.4.4 Coerência da fonte de luz

Coerência de uma fonte de luz é coerente quando as ondas de luz são emitidas com a mesma frequência e direção, mantendo uma relação de fase entre si. A natureza da fonte que emite tem características próprias, sendo que duas fontes de luz dificilmente emitiram luz coerente, já que o intervalo de emissão de cada fonte pode variar muitas vezes em um pequeno espaço de tempo.

No caso de uma fonte de luz térmica, como o filamento de uma lâmpada incandescente ou um gás aquecido, temos elétrons oscilando entre órbitas que emitem pacotes de luz em um determinado período Δt , cerca de 10^{-8} s, assim temos uma sucessão de trens de ondas senoidais emitidas a cada instante, e não uma senoide ininterrupta. Sendo que temos n átomos enviando pacotes de ondas com fases emitidas ao acaso. Assim uma imagem de interferência usando uma fonte térmica mesmo que filtradas teriam a visibilidade das franjas diminuídas à medida que os caminhos ópticos aumentam.

Já para uma fonte laser a coerência é elevada, pois suas características físicas permitem que os trens de onda tenham um tempo de emissão Δt maior, cerca de 10^{-2} s. Assim o uso do laser permite um deslocamento maior dos caminhos ópticos, pois eles terão mais tempo para interagir de forma construtiva e destrutiva na imagem de interferência.

2 Construindo um Interferômetro de baixo custo

A utilização de um interferômetro em sala de aula, para fins didáticos, em contexto histórico e experimental, é uma grande oportunidade para uma aula melhor de Física. O experimento permite ao aluno não só visualizar o sistema físico em estudo, mas realizar medidas e vivenciar as dificuldades que a ciência impõe a quem a ela se dedica. Porém o equipamento não é simples em termos técnicos, pois é composto de várias peças, e muitas delas de precisão.

A proposta visa fornecer um caminho para a construção de um interferômetro de Michelson de custo baixo que forneça um mínimo de funcionalidades experimentais e didáticas. Além de ser durável para ser usado quando necessário, não como um objeto demonstrativo, mas sim um equipamento confiável para aplicação em sala de aula.

2.1 Proposta construtiva de um interferômetro de Michelson

O interferômetro em si é um equipamento de manuseio delicado, fabricado com tolerâncias menores que um centésimo de milímetro, requerendo um maquinário de precisão para a sua construção. Além da limitação de custo, o desafio era construir não só um interferômetro de Michelson onde fosse possível visualizar as franjas de interferência construtivas e destrutivas, mas também realizar alguma medida Física. Procuramos também tornar o equipamento um instrumento de para abordar a história da Física e da Tecnologia.

Os interferômetros de Michelson são utilizados em laboratórios didáticos para realizar normalmente os seguintes experimentos.

- Determinação do comprimento da luz usada (laser);
- Determinação do índice de refração do ar atmosférico em função da pressão;
- Efeito de magnetostricção;
- Efeito Doppler da luz.

Sendo estas as opções mais viáveis da aplicação do interferômetro. Uma análise dos componentes mecânicos (suporte de espelho, base, guias etc..) que constituem cada experimento permitiu determinar a viabilidade de construção com baixo custo. Sendo elas:

Determinação do comprimento da luz usada (laser): Este experimento tem por objetivo encontrar o comprimento de onda do laser usado no equipamento, usando um fuso micrométrico que desloca um dos espelhos, alterando o comprimento do caminho óptico percorrido pela luz. Esse deslocamento provoca a alteração das franjas, ou seja, elas mudam de lugar. Assim as franjas são contadas e feitos os cálculos para obter o comprimento da luz usado.

Determinação do índice de refração do ar atmosférico em função da pressão: Usa uma célula transparente ao comprimento de onda usado, onde se faz vácuo. Resultando em deslocamentos de franjas. De posse do número de franjas deslocadas e da diferença de pressão é possível obter o índice de refração do ar em função da pressão.

Efeito de magnetostricção: Utilizando um campo magnético em materiais como níquel, obtém-se um aumento ou redução do comprimento físico da amostra em função da intensidade do campo magnético usado. A diferença de comprimento está na ordem do micrometro.

Efeito Doppler da luz: Faz uso de um sistema mecânico, onde um espelho oscila no sentido de encontro e afastamento do laser que incide sobre o espelho.

Das quatro opções, foram selecionadas a medida do comprimento de onda da luz e o índice de refração do ar em função da pressão, dada as seguintes propriedades de construção do equipamento.

Medida do comprimento de onda da luz:

- O sistema mecânico do equipamento para medida do comprimento de onda da luz pode ser construído com uso de um micrômetro com resolução de 0,01 mm o que combinado com um braço de alavanca é possível atingir a resolução de até 1 μm ,
- A análise matemática é simples e acessível ao aluno do Ensino Médio.

Índice de refração do ar em função da temperatura:

- A célula de ar pode ser constituída de materiais simples, como chapa de aço fina, onde a união entre as peças pode ser feita com solda de estanho de eletrônica e resina epóxi;
- As janelas ópticas podem ser feitas de lâminas de microscópio;
- A diferença entre a pressão atmosférica e o vácuo máximo realizado é de no máximo 700 kPa em relação a pressão atmosférica;
- A análise matemática é razoável, sendo possível o uso de tabelas onde o aluno construa um gráfico de *pressão x índice de refração* e *pressão x número de franjas*;

Devemos observar que um equipamento com essa capacidade de experimentos e um LASER de HeNe, fabricado pelas empresas Cidepe e Scientific custa entre 21 e 24 mil reais. (Ver apêndice 7.1).

Neste ponto do projeto, temos definidos três parâmetros: obter as franjas de interferência, obter o índice de refração do ar em função da pressão e medir o comprimento de onda do laser usado no equipamento. Com base nestas especificações foi dado início a pesquisa de modelos possíveis e tipo de material a ser usado.

2.2 Opções analisadas de construção

O projeto do interferômetro não pode ser algo improvisado, mas sim um projeto mecânico com componentes a serem detalhados e testados. Considerando esta preocupação havia duas possibilidades de projeto, desenho manual ou uso de um software de CAD em 3D. A escolha de um software de CAD em 3D fornece várias vantagens, como permitir a visualização em 3D de todos os componentes envolvidos, alterações de medidas e locais de furos, verificação de obstrução entre peças e a criação de folhas com o desenho técnico de cada peça. O software utilizado foi o SOLIDWORKS versão 2014 estudante (ver Figura 13).

O benefício de ter cada item especificado em um desenho técnico é de padronizar a sua descrição/construção. Independentemente do local, as normas de

desenho técnico são as mesmas, assim qualquer metalúrgica que receba o projeto, pode construir o interferômetro, independente do conhecimento do metalúrgico sobre interferometria.

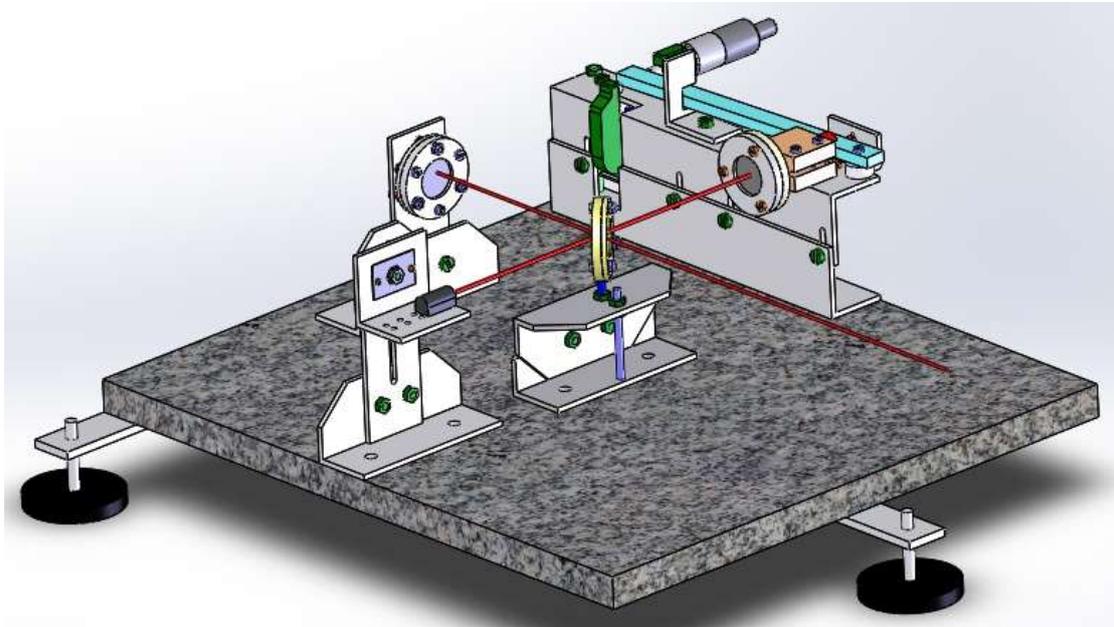


Figura 13. Exemplo de um desenho feito no software de desenho

Com os objetivos e softwares escolhidos o projeto construtivo foi subdividido em:

- Base do equipamento;
- Tipo de perfil metálico;
- Tipo de laser;
- Opções de espelhos e divisores de feixe.

Base: A Base do interferômetro constitui uma superfície plana com certa massa a fim de ter uma inércia a vibrações externas. Sob a base deve haver um sistema que absorva as vibrações. É um item muito crítico do projeto, pois mesmo uma pessoa caminhando na sala onde é realizado o experimento é suficiente para impedir a visualização da figura de interferência. Outro ponto é que a Base deve ter um sistema de nivelamento, propiciando uma superfície nivelada. Não é um item obrigatório, mas simplifica a calibração do equipamento e o direcionamento da imagem em um anteparo.

Temos as seguintes condições para a base: Ser plana, ter uma grande massa, amortecer vibrações e permitir nivelamento. Com esses dados objetivos, a opção de

escolha para a base foi usar uma placa de mármore ou granito, sob uma camada de espuma e um sistema de três pés rosqueáveis, a fim de permitir o nivelamento.

Esta opção de materiais é justificada pelo fácil acesso e baixo preço, tanto da placa de mármore como da espuma, que pode ser encontrada em lojas de colchões ou reforma de sofá.

Tipo de perfil: Perfil pode ser considerado uma barra longa com forma geométrica padronizada em termos industriais, que possa ser encontrada em qualquer lugar que forneça material para serralheria. Uma pesquisa em lojas que vendem artigos de serralheria indicou que uma barra em formato de L, chamada perfil *cantoneira*, e outro perfil chamado *barra chata* eram os mais indicados para a construção. Ambas são peças padronizadas em suas dimensões e facilmente encontradas.

Quanto ao material optamos por alumínio, pois fornece resistência mecânica adequada aos esforços do equipamento, não oxida, não necessita de pintura, além de ser mais fácil de usinar e cortar e é leve. O perfil cantoneira foi escolhido nas dimensões de 31,75 x 6,35 mm. A barra chata foi especificada nas medidas de 25,4 x 4,7 mm.

Tipo de laser: O tipo de laser a ser usado no interferômetro foi um ponto crítico do desenvolvimento do projeto. Em interferômetros usados em laboratórios didáticos geralmente se usa o laser de HeNe de 5 mW de potência, sendo que este tipo de laser pode ultrapassar o valor de U.S.\$ 800, um valor inaceitável para uma proposta de projeto de baixo custo. Uma saída foi usar um módulo de diodo laser de 650 nm de 5 mW. O diodo laser tem uma largura de banda de cerca de ± 10 nm, informação que vêm no rótulo do laser, (ver Figura 14).



Figura 14. Rótulo de um LASER. À esquerda laser verde, à direita LASER vermelho.

Em vantagem o módulo de diodo laser pode ser adquirido da China em sites de compra por menos de R\$ 1,5, ou em sites nacionais por cerca de R\$ 6,00. O módulo em si é idêntico ao que se encontram em apontadores laser, tendo a vantagem de ter apenas dois fios para ligação elétrica e operar em 5 VDC. Outro ponto a favor é que no módulo há uma lente para ajuste do foco do laser, permitindo um ajuste direto no módulo, eliminando um sistema de lentes para expandir as franjas.

Contudo havia uma dúvida em relação ao funcionamento do diodo laser, ele teria qualidades ópticas necessárias? Como esta situação não tinha saída teórica, a solução foi testar o laser em um interferômetro de laboratório. O módulo laser foi testado em um interferômetro de Michelson usado em laboratórios didáticos, sendo o laser de HeNe substituído pelo diodo laser (ver Figura 15). Como o módulo de diodo laser opera em 5 V, foi implementado um circuito eletrônico para reduzir a tensão de 9 V fornecida pela bateria para 5 V. A primeira observação deste arranjo é que a bateria não é adequada, pois o consumo do laser ficou em 120 mA, o que permite no máximo duas horas de uso, sendo necessário para mais testes futuros uma fonte CC/DC.

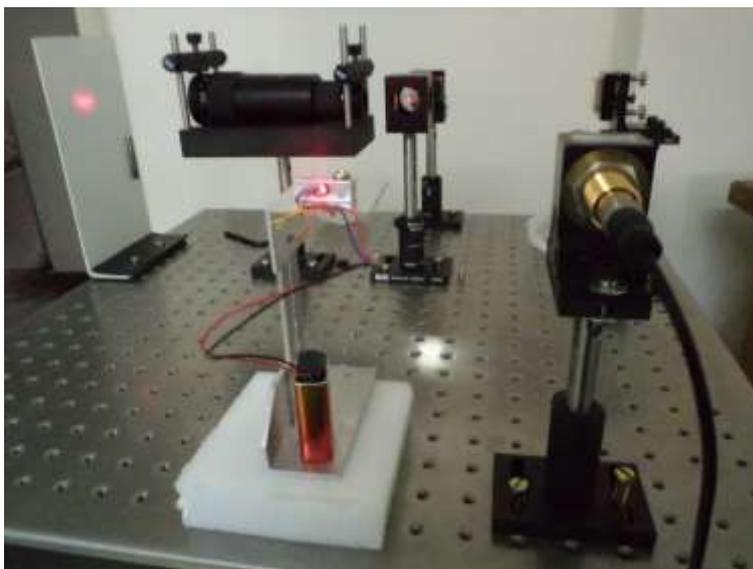


Figura 15. Diodo LASER sendo testado em um interferômetro de Michelson de laboratório.

Após um ajuste na lente do módulo do diodo laser o resultado foi uma figura de interferência limpa, com distinção clara entre os máximos e mínimos e com boa visualização (ver Figura 16). Um resultado com qualidade para apresentação em sala de aula com um custo baixo. Com os resultados obtidos com o módulo de diodo LASER, estava confirmado que era possível fazer um interferômetro de Michelson com ele.

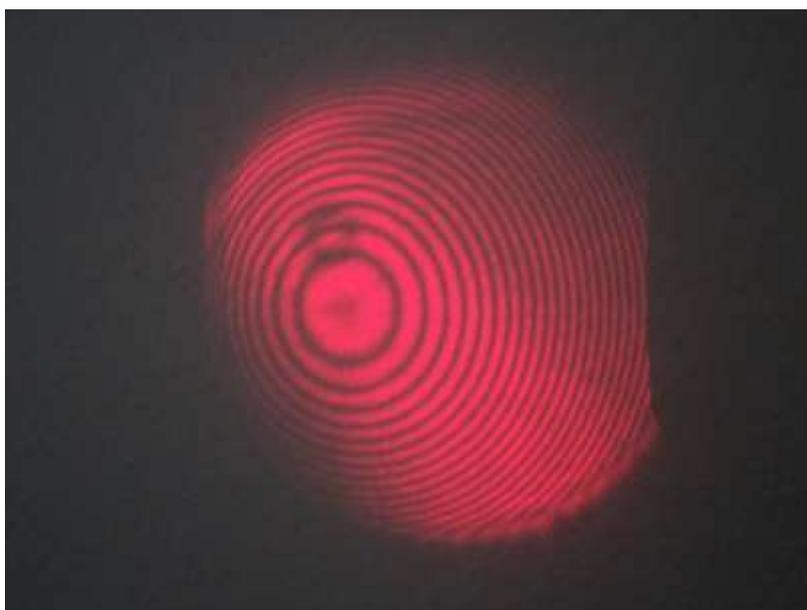


Figura 16. Imagem de interferência após ajuste na lente do módulo de diodo laser.

Opções de espelhos e divisor de feixe: Os espelhos e divisor de feixe (também conhecido por semi-espelho), são os itens de maior precisão no interferômetro, cuja planicidade varia de $\lambda/4$ a $\lambda/10$, ou seja, a média das ondulações da superfície refletora é igual ao um comprimento de onda específico dividido por um denominador, que quanto maior, mais qualidade óptica tem o espelho ou divisor de feixe. Com base nesta qualidade necessária foram listadas inicialmente duas opções de espelhos.

- Comprar de fornecedores locais;
- Comprar de fornecedores internacionais;

Fornecedores locais, como a Rio Link Tecnologia LTDA tem um alto valor, ultrapassando valores de 200 reais por espelhos com qualidade de $\lambda/10$ e 25 mm de diâmetro. Quanto aos fornecedores internacionais, sites americano e europeu também tinha valores muito altos para proposta do projeto, a solução foi adquirir em sites de compra da China, como o Aliexpress, onde um espelho com superfície refletora de alumínio e qualidade $\lambda/10$ é vendido a quatro dólares. A mesma opção foi utilizada para o divisor de feixe, onde uma peça é vendida a oito dólares.

No total foram adquiridos dois espelhos e um divisor de feixe, com valor total de R\$ 155, com frete incluso. Entretanto a encomenda levou quatro meses para ser entregue, o que inviabiliza a construção do projeto para uma construção de curto prazo,

porém para um projeto com planejamento maior esse tipo opção poder ser a mais indicada.

Neste ponto o interferômetro já tinha seus principais itens à disposição, contudo, o valor e tempo gasto estavam em desacordo com o que era a proposta inicial de um interferômetro de baixo custo. Foi preciso uma remodelação e pesquisa de soluções nacionais a um valor mais acessível. Foram encontradas duas alternativas para o espelho.

- Produzir e polir uma peça de vidro com qualidade óptica, seguido de metalização com prata em um processo químico.
- Testar superfícies espelhadas de equipamentos usados.

A primeira opção se mostrou cara e complexa, pois polimento de vidro não é uma técnica simples com informação disponível fora de fábricas especializadas. Estudando algumas técnicas para produção de espelhos planos apresentados em sites de Astronomia Amadora, podemos mesmo observar que é mais fácil produzir um espelho côncavo parabólico do que um espelho plano de qualidade. A utilização de produtos químicos para metalização da superfície polida torna esta alternativa mais onerosa, não sendo possível controlar o grau de qualidade do espelhamento a simples olho nu.

A pesquisa e teste de materiais espelhados indicaram dois itens bem comuns no mercado de produtos usados ou mesmo descartados: Espelhos refletores de máquinas copiadoras (Xerox) e disco de HD ou disco rígido (ver Figura 17).



Figura 17. Espelho de copiadora e disco de HD

Ambos mostraram qualidade suficiente para o experimento, além de serem facilmente encontrados em sucatas de lojas de informática e manutenção de máquinas copiadoras. Devemos observar que a maioria das copiadoras também tem um jogo de lentes de boa qualidade que podem ser usadas para montar um expensor de laser.

Esta opção trouxe um grande diferencial ao projeto, tornando-o realmente um equipamento de baixo custo, com a possibilidade de apresentar ao aluno como estamos cercados de tecnologia de alta precisão, mesmo em equipamentos de uso cotidiano. O seu reuso não é uma simples reciclagem dos materiais que o compõe, mas sim uma nova aplicação da tecnologia usada.

Quanto ao divisor de feixe, a opção foi usar uma lâmina de microscópio, pois são placas de vidro de qualidade e polidos a um grau que permitem serem usadas no interferômetro. As lâminas de microscópio podem ser facilmente encontradas em sites de venda na internet ou mesmo em laboratórios de exames. Para este projeto foi adquirida uma caixa com 50 lâminas a um valor de dez reais. Uma observação importante é que as lâminas têm resquícios do papel que a protege, sendo preciso lavar com álcool isopropílico e deixar secar naturalmente. Não é necessário o processo de metalização, pois usando a lâmina a um ângulo de 45° em relação ao laser incidente têm-se um feixe refletido e outro transmitido. A intensidade entre os feixes transmitidos

e refletido não é igual ou 50/50, contudo essa diferença pode ser desprezada usando dois artifícios simples:

1. Reduzir a distância entre o espelho divisor de feixe no caminho óptico do feixe refletido. Isto se deve ao fato que o feixe de laser usado não é colimado, mas expandido, ou seja, possui um pequeno ângulo de abertura, assim mudanças na distância entre os espelhos repercutem em diferenças na intensidade de cada caminho óptico.
2. Aumentar a potência do módulo de diodo laser.

A primeira solução foi de fácil implementação, a segunda foi um ponto necessário para tornar o experimento mais didático, com um laser de 5 mW foi obtida uma figura de boa qualidade, com no máximo 15cm de diâmetro, o que acarretaria uma dificuldade de visualização por alunos mais distantes, considerando uma sala média de 35 alunos.

Utilizando um laser de 100 mW a imagem obtida ultrapassa 80 cm de diâmetro, perceptível até mesmo no fundo de uma sala de sete metros de comprimento (ver Figura 18). Contudo uma preocupação com segurança surgiu nesta solução, pois um laser de 5 mW ao atingir o olho humano, causa uma reação de fechar os olhos de forma a não haver queimaduras. Já um laser de 100 mW poderia causar um acidente.

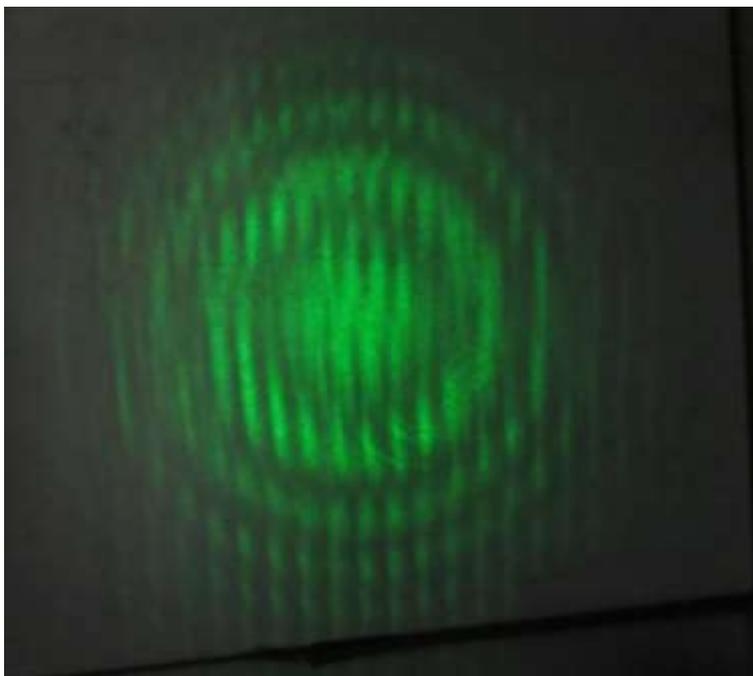


Figura 18. Figura de interferência projetada em um quadro branco

Para contornar este problema, um ajuste na lente do módulo laser, permite expandir o feixe, tornando mais simples o ajuste das franjas e reduzindo a intensidade do feixe. Com este ajuste a mesma intensidade do laser de 100 mW a uma distância de 3,87m que era de aproximadamente 1000 W/m^2 passou para 20 W/m^2 , ou seja, mesmo com uso de um laser de potência maior obtemos um feixe expandido seguro para ser usado em sala de aula (ver Figura 19).

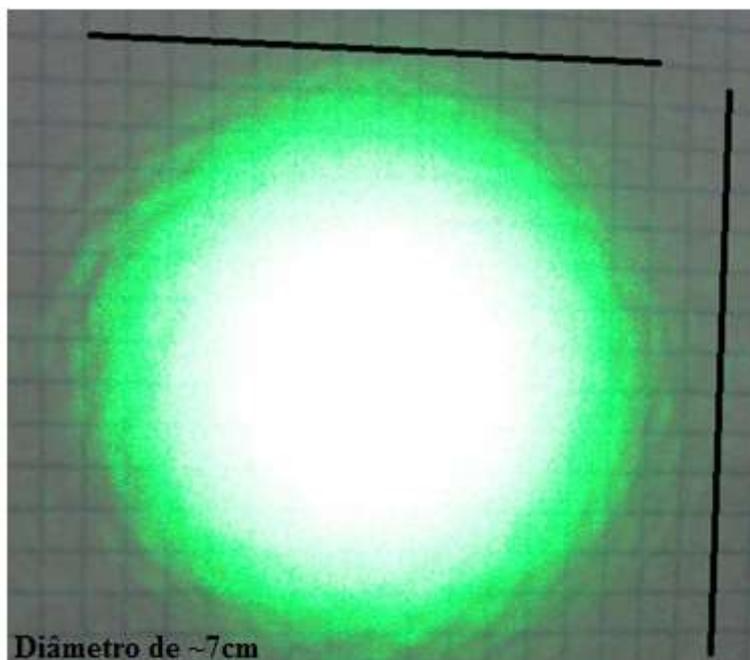


Figura 19. Projeção do feixe de laser expandido a 3,87 m do módulo

Um fato importante é que com essa alteração não temos mais um feixe de luz totalmente paralelo, mas sim um feixe que tem um ângulo de abertura, portanto quando formamos a imagem de interferência, não temos feixes pontuais, mas parte de circunferência se encontrando (frentes de onda) para formar a imagem de interferência. Estes feixes abertos têm intensidades diferentes dependendo do caminho óptico que percorre.

O resultado da pesquisa é uma proposta de um interferômetro de Michelson com módulo de diodo laser verde de 532nm removido de uma caneta laser, espelhos de disco de HD ou espelho de máquina de xeros e semi-espelho de lâmina de microscópio, com visualização da figura de interferência, medida do comprimento de onda do laser usado e medida do índice de refração do ar em função da pressão.

2.3 Construção de um protótipo

Com os materiais definidos, o passo seguinte foi o dos desenhos das peças que compõem o interferômetro. Utilizando um software de CAD, cada peça foi desenhada separada, em um formato de arquivo chamado *part* (parte), sendo posteriormente juntada a outros arquivos *part* em um novo arquivo no formato *assemble* (montagem). Assim cada item do projeto pode ser criado nos mínimos detalhes. Uma das funções do software de CAD gera sólidos em 3D, permitindo girar, mudar ângulo de visão ou mesmo ver no interior da peça desenho.

O interferômetro foi dividido em blocos para facilitar o projeto das suas partes, sendo eles:

- Base;
- Suporte do espelho de disco de HD;
- Suporte do espelho de máquina copiadora;
- Suporte do espelho com deslocamento micrométrico;
- Suporte do laser;
- Suporte do divisor de feixe;
- Suporte das lentes para expansão do feixe.
- Célula de ar.

Observando que eles foram projetados de acordo com os dois tipos de perfis usados a fim de reduzir os custos de aquisição de material.

2.4 A inserção da placa Arduino e sensores de pressão

No experimento de medida do índice de refração do ar em função da pressão, há dois dados fundamentais: a pressão dentro da *célula de ar* e o número de anéis, ou franjas que se deslocam. Contar a variação das franjas é relativamente simples, pois no centro da figura de interferência pode haver um ponto claro ou escuro. Assim, se temos um ponto claro que muda para escuro, temos a mudança do caminho óptico em $\frac{1}{2}$ comprimento de onda. Observando o fato que não temos uma mudança do espaço entre

os espelhos, já que os mesmos estão fixos em suas bases, o deslocamento das franjas é observado porque ocorre uma mudança de pressão do ar na célula implicando variação de densidade do ar e conseqüente variação na velocidade de propagação da luz e no índice de refração. Como o caminho ótico depende do índice de refração, qualquer variação de pressão na célula de ar acarreta uma variação na diferença de percurso ótico dos feixes de luz interferentes.

Por outro lado, em termos práticos, a medida da pressão é um problema maior, pois o recurso mais direto seria o uso de um manômetro e uma bomba de vácuo. Um equipamento que serviria ao propósito é uma bomba de vácuo usada em oficinas mecânicas para remover o óleo do sistema hidráulico do freio, (ver Figura 20).



Figura 20. Bomba de vácuo usada em oficinas mecânicas

Esta bomba é eficiente e alcança até 300 kPa, porém tem um custo elevado, chegando a custar mais de 500 reais, em oposição à proposta do projeto. Outro problema prático é a leitura dinâmica da pressão juntamente com a mudança da franja, acarretando em uma dificuldade para utilização do equipamento em atividades experimentais em sala de aula.

A solução mais simples foi o uso do sensor de pressão digital BMP180 [10] (ver Figura 22) em conjunto com uma placa microcontrolada Arduino e um resistor sensível à luz (LDR). O sensor BMP 180 é pequeno e pode ser colocado dentro da *célula de ar*.

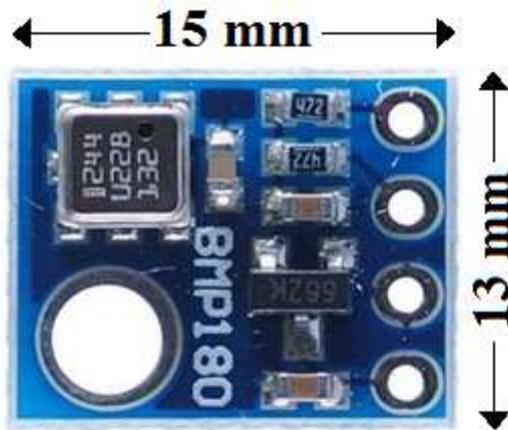


Figura 22. Sensor de pressão e temperatura Bmp180

O Arduino (ver figura 23) é um microcontrolador com *hardware livre* em uma placa com a facilidade de conexão a um computador via porta USB, onde é possível programá-lo com um software *Open source* fornecido pela própria fabricante Arduino. O Arduino depois de programado pode operar sozinho, sem uso de computadores, ou em conjunto a um computador onde ele pode enviar ou receber dados para execução de tarefas. Há um grande número de sensores que podem operar junto ao Arduino, como sensores de pressão, luminosidade, temperatura etc. Devido ao seu grande uso em projetos simples, tanto o Arduino como os sensores têm valores acessíveis para um projeto de baixo custo.



Figura 23. Exemplo do Arduino modelo UNO.

A linguagem de programação do Arduino é uma variante do C++, de fácil implementação, sendo disponibilizado um grande acervo de softwares de exemplos e dicas de uso de códigos.

Com o uso do Arduino e sensores, optou-se por construir um módulo de controle para uso em conjunto com o interferômetro de Michelson. Este módulo possui dois botões de controle e uma chave seletora de função, além de um display de LCD. Neste módulo é feita a leitura dos sensores, bem como a exibição dos dados no display, além de armazenar os valores de pressão e da franja correspondente na EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory), do Arduino, que embora seja limitada a 2 kb, é possível armazenar até 50 valores de pressão de seis dígitos sem comprometer a eficácia do sistema de processamento.

Outro ponto importante é que o Arduino pode ser ligado a uma porta USB e receber os valores de dados através do monitor de dados do software de programação ou direto em uma planilha de cálculos, usando para isso o software PLX-DAQ. Mas em termos pedagógicos, essa função que embora esteja programada não será usada em sala de aula com aluno do Ensino Médio devido a duas limitações:

1. Escassez de computadores na rede pública.
2. A necessidade de instruir o aluno nas configurações dos softwares Excel e do PLX-DAQ, o que resulta em um maior tempo para aplicação do experimento.

Assim temos uma unidade que além de medir a pressão, mede a franja deslocada e registra o valor da pressão no instante da mudança. O sensor LDR foi colocado no centro das franjas concêntricas com uso de uma ventosa, a cada ambiente novo é preciso calibrar a sensibilidade do LDR, mas isso é um procedimento inicial que o software faz a cada medida, possibilitando o uso do sensor em qualquer ambiente, independente da luminosidade (ver Figura 21).

O código fonte ou sketch permite a reprodução (compilação) do software em qualquer Arduino. (Ver apêndice 7.27).

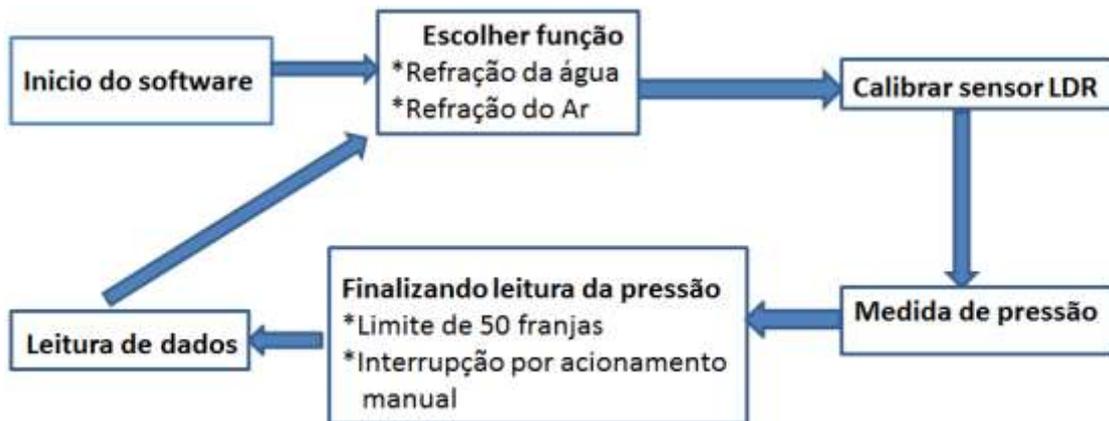


Figura 21. Fluxograma de funcionamento do software do Arduino.

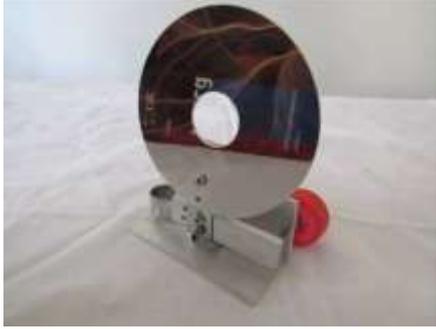
2.5 Modelo final

O modelo final do interferômetro é um equipamento que consegue atender aos objetivos estabelecidos, dentro dos limites da qualidade óptica dos materiais usados. Assim o equipamento pode formar a figura de interferência de anéis concêntricos, medir o comprimento de onda do laser usado e medir o índice de refração do ar em função da pressão.

O modelo final conta com os seguintes itens:

- Base em granito, com espuma para absorver vibração.
- Dois suportes para espelhos fixos, sendo um espelho constituído de um disco de HD e o outro de um pedaço de espelho de máquina cópias.
- Célula de Ar para realizar a medida do índice de refração do ar em função da pressão. A célula conta com sensor para medida de pressão interna.
- Suporte de espelho móvel com deslocamento micrométrico, usando espelhos de máquina de cópias.
- Dois suportes para lentes, sendo uma lente bicôncava e outra biconvexa. Estas formam o expensor de feixe.
- Suporte para o módulo laser, em conjunto com circuito de ajuste variável de tensão.
- Fonte de 9 VDC para alimentar o laser e o módulo Arduino.
- Módulo Arduino com display de LCD.

- Suporte do divisor de feixe, usando lâmina de microscópio.
- Suporte do espelho chinês.
- Suporte do divisor de feixe chinês.
- Cápsula de água.

Nome do Item	Fotos dos itens finalizados	
Base de granito		
Suporte de espelho fixo. Disco de HD		
Suporte de espelho fixo. Espelho de fotocopiadora		
Célula de ar.		

<p>Suporte do espelho móvel com deslocamento micrométrico.</p>	
<p>Suporte para lente côncava e convexa.</p>	
<p>Suporte do módulo diodo laser com regulador de tensão.</p>	
<p>Módulo Arduino com display de LCD e sensor LDR para detecção de mudança de franja.</p>	
<p>Suporte do divisor de feixe. Usando lâmina de microscópio.</p>	

<p>Suporte do espelho chinês.</p>	
<p>Suporte do divisor de feixe chinês.</p>	

Todos os itens ficam apenas apoiados na placa de granito, sem necessidade de fixação por parafusos ou sistemas de ímãs.

Os espelhos móveis usam um sistema de fuso para deslocamento do espelho, a fim de ajustar a figura de interferência. Este fuso é feito com um parafuso métrico de três mm e passo de 0,5 mm, ou seja, a cada volta o fuso avança ou retrocede 0,5 mm, em conjunto com um manipulador feito de tampa de garrafa PET, permite ajustar de forma precisa a imagem de interferência.

Focando no objetivo de baixo custo na produção do interferômetro, foram usadas ferramentas básicas para sua construção, como furadeira, arco de serra, limas, alicate e lixa. Para facilitar a construção foram feitas as roscas dos parafusos na peça de fixação, porém é apenas uma facilidade que estava à disposição, qualquer rosca poderia ser substituída por um simples sistema de parafuso com porca.

Os suportes dos espelhos, divisores de feixe e lentes foram confeccionados em perfil alumínio, somente a célula para medida do índice de refração do ar e a base do suporte do espelho com deslocamento micrométrico foram fabricados em aço. Isto foi necessário para dar maior estabilidade mecânica e simplificar a operação de solda.

O produto final, ver Figura 22 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é um interferômetro de Michelson funcional, resistente a ponto de ser usado em sala de aula tanto pelo professor como por um grupo de alunos. As medidas obtidas podem ser

manipuladas por uma matemática acessível a um aluno do Ensino Médio, bem como em um laboratório de Física para graduação.



Figura 22. Produto final, interferômetro de Michelson.

3 Testes com o modelo final

Os testes com o modelo final visam demonstrar a sua viabilidade como experimento, ou seja, se todas as funcionalidades projetadas estão de acordo, ou descobrir eventuais vícios do equipamento, como posição e distância entre espelho e divisor de feixe, tensão aplicada no diodo laser e necessidade de fixar os suportes na base. Estes testes aperfeiçoam o equipamento a ser usado em sala de aula, garantindo que durante o uso tanto o professor como o aluno possam manejar o experimento com segurança e de acordo com as propostas didáticas estabelecidas.

Os testes foram realizados em três blocos, sendo eles:

- Obtenção da figura de interferência.
- Medida do índice de refração do ar em função da pressão
- Medida do comprimento de onda do laser usado.

Cada teste permite descrever como foi obtido o resultado, bem como sua aplicação didática em sala de aula, permitindo tornar o interferômetro não apenas um aparelho de demonstração ou exposição, mas um instrumento para o estudo de interferometria e contextualização histórica sobre a evolução da interferometria.

3.1.1 Obtenção da figura de interferência

A figura ou imagem de interferência representa a interferência entre as ondas vindas dos caminhos ópticos, assim a simples obtenção da imagem já representa uma funcionalidade do experimento (ver Figura 23). Com esta imagem já é possível abordar diversos temas, como interferência construtiva e destrutiva, coerência temporal da fonte de luz, sensibilidade do interferômetro a vibrações, pois um toque no piso ou na mesa onde repousa o equipamento faz a imagem oscilar. Além da contextualização sobre a finalidade de Michelson ter construído o interferômetro.

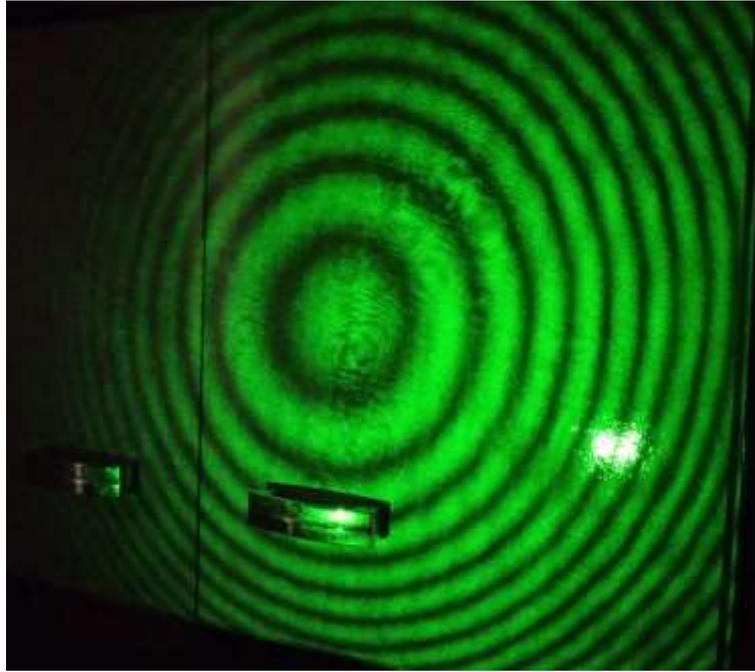


Figura 23. Figura de interferência do LASER usado

Para formar a imagem de interferência foram usados:

- Laser verde, juntamente com sua base e regulador de tensão.
- Divisor de feixe.
- Suporte de espelho de máquina copiadora.
- Suporte de espelho de disco de HD.
- Suporte de lente côncava e convexa para ajustar o tamanho da imagem no anteparo.
- Base de granito e tripé.

O anteparo deve ficar no mínimo a dois metros do interferômetro, sendo que a uma distância de cinco metros é possível obter uma imagem de interferência de até 1 metro de diâmetro, permitindo que ela seja visualizada pela sala toda.

3.2 Medida do comprimento de onda do laser usado

Um das funções mais interessantes do interferômetro é a medida do comprimento de onda da fonte de luz usada. Embora pareça simples, é uma medida da

ordem do nanometro, ou seja, uma medida muito pequena, mas de grande importância para o estudo de interferometria.

A matemática envolvida nas medidas é de simples compreensão, pois considerando o interferômetro e seus caminhos ópticos, temos que cada feixe de luz (caminho óptico 1 e 2) percorre uma determinada distância d do divisor de feixe até o espelho e novamente a mesma distância d do espelho ao divisor. Assim qualquer alteração na posição Δd de um dos espelhos repercute em mudanças das franjas da figura de interferência, veja a Figura 24.

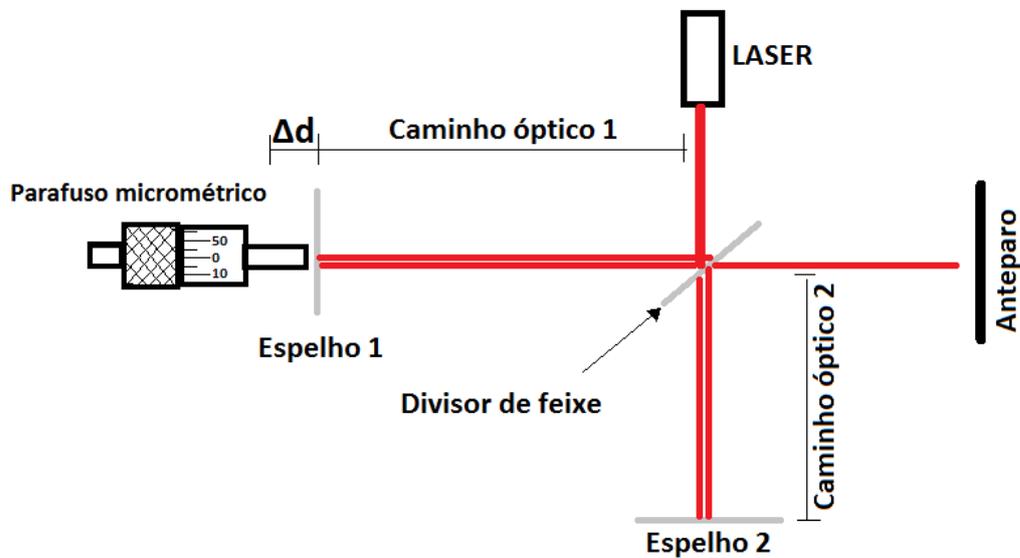


Figura 24. Interferômetro com parafuso micrométrico.

Quando o fuso micrométrico deslocar o espelho uma distância Δd , teremos um número n de franjas deslocadas, assim podemos estabelecer o comprimento (λ) de onda através de:

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{n}$$

Como o feixe vai e volta pelo mesmo caminho, assim à distância Δd deve ser multiplicada por dois.

Foram realizados cinco testes com o equipamento, resultando em comprimentos de onda variando de 529nm até 550nm para uma média de 100 a 120 (alterações) de franjas. Sendo que a etiqueta do LASER indica um comprimento de onda de 532nm ± 10 nm. Considerando os objetivos pedagógicos e a qualidade do material usado, é um

bom resultado, de fácil aplicação em sala de aula, já que os alunos podem em conjunto fazer as medidas, pois um grupo fica monitorando as mudanças de franjas (contagem do número de franjas que se moveram) enquanto outro grupo fica responsável pela movimentação do fuso micrométrico. Neste experimento não foi usado o módulo Arduino. Outro ponto que pode favorecer a contagem das franjas é a filmagem da movimentação das franjas com um celular e visualiza-la em câmera lenta, permitindo assim uma melhor contagem.

Um dos problemas técnicos em fazer esse experimento é encontrar um micrômetro com escala de 0,001mm e quando encontrados são em média cinco vezes mais caros que o que possuem escala de 0,01mm. A solução foi usar um micrômetro com escala de 0,01mm e um sistema de braço de alavanca com relação de 1:10, assim a cada 1 mm de avanço ou recuo do fuso micrométrico o espelho se movia 0,1mm. No equipamento o braço de alavanca ficou com uma relação de 3:32 (ver Figura 25). Outro ponto é que uma volta no tambor equivale ao movimento de aproximadamente 175 franjas para o laser verde, considerando que a contagem de até 100 franjas é o suficiente para o experimento, assim não é preciso instruir o aluno sobre o funcionamento do micrometro, equipamento que requer pelo menos uma aula para aprender a ler e manusear. Pois basta marcar a posição inicial e final do tambor sobre a escala, a posição da escala em mm não é necessária. Ver Figura 26.

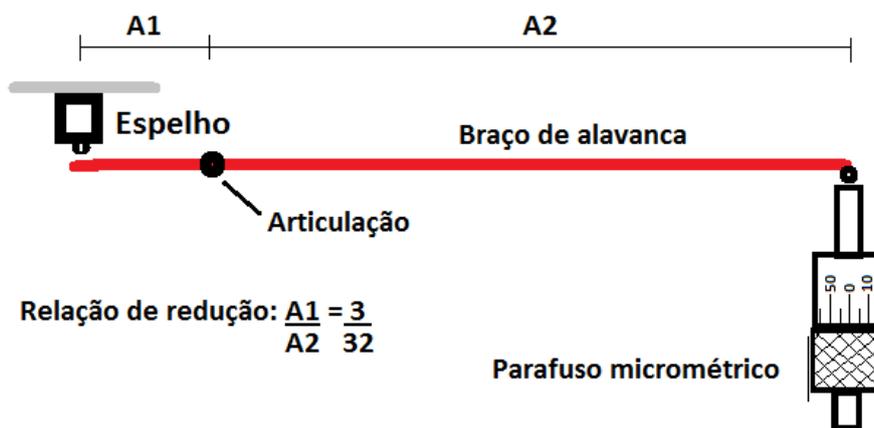


Figura 25. Diagrama do sistema de redução

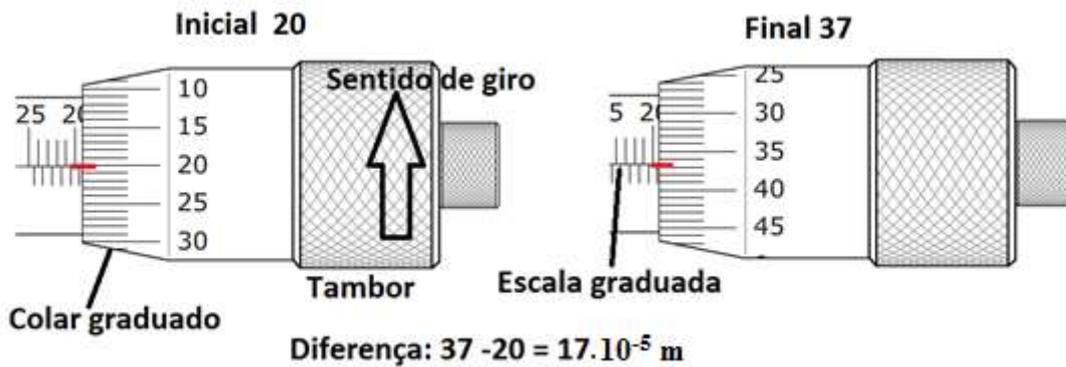


Figura 26. Exemplo de leitura no micrometro.

Observando o exemplo da Figura 26, não é preciso ler os valores da escala graduada, mas somente a diferença do tambor, que na figura representa 17 unidades, contudo é preciso fazer a equivalência da unidade do micrometro mais a relação do braço de alavanca para o sistema métrico. Assim temos a equação:

$$\lambda = \frac{3}{16} \frac{(\Delta L \cdot 10^{-5})}{n}$$

Sendo:

λ = comprimento de onda do LASER em metros.

ΔL = Diferença lida no colar graduado do micrometro. Posição final (P_f) – Posição inicial (P_i),

10^{-5} = Relação para equivalência para a unidade de metro. Pois o colar está na escala de 10^{-2} mm e o micrometro em escala de mm (10^{-3}), assim tem-se: $1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-5}$

n = Número de franjas que se deslocaram durante a medida.

$3/16$ = Produto dos dois caminhos ópticos (2) pelo fator de redução do braço de alavanca (3/32). Temos $2 \cdot 3/32 = 3/16$

Aplicando a equação acima em um teste do equipamento com as seguintes medidas.

$P_i = 39$

$P_f = 07$

$n = 109$ franjas.

Temos: $\Delta L = |P_f - P_i| \rightarrow \Delta L = |07 - 39| \rightarrow \Delta L = 32$

Inserindo os dados:

$$\lambda = \frac{3}{16} \frac{(32 \cdot 10^{-5})}{109} \quad \lambda = 550,46 \text{ nm}$$

Observando que é um experimento com finalidades didáticas, os erros não foram considerados nos cálculos, mas somente a sua aplicação e resultados. Considerando estes pontos, esta parte do interferômetro pode ser usada em sala de aula, com qualidade teórica e experimental suficientes para o estudo da interferometria.

3.3 A medida do índice de refração do ar em função da pressão

O ar atmosférico tem um índice de refração próximo a 1,003 tanto que o utilizamos em exemplos de difração simples com apenas 1. Contudo este índice é variável em função da pressão e temperatura, ou seja, qualquer alteração na sua densidade muda o índice de refração. Esta mudança fica em torno da quinta casa decimal, sendo o interferômetro capaz de realizar essa media.

Para isto é necessário uma câmara fechada onde seja possível alterar a densidade do ar, desta forma foi usada a Célula de ar, uma caixa com duas janelas ópticas e com um tubo para a saída do ar, este é removido com uso de uma seringa, ou seja, o êmbolo da seringa é puxado de forma a aumentar o volume do conjunto Célula, mangueira e seringa ver Figura 27. Com este aumento de volume a pressão decai linearmente, chegando a um mínimo de 400 kPa, sendo os valores de pressão registrados pelo sensor de pressão Bmp180 que está conectado ao módulo Arduino que registra a queda de pressão a cada deslocamento da franja.

A Célula de Ar foi construída com sobras de pedaços de barras de aço e pequenas chapas de aço, encontradas em sucata de serralheria, as soldas entre as peças foi feita com estanho de eletrônica. As janelas ópticas são feitas com lâmina de microscópio, a mesma usada como divisor de feixe.

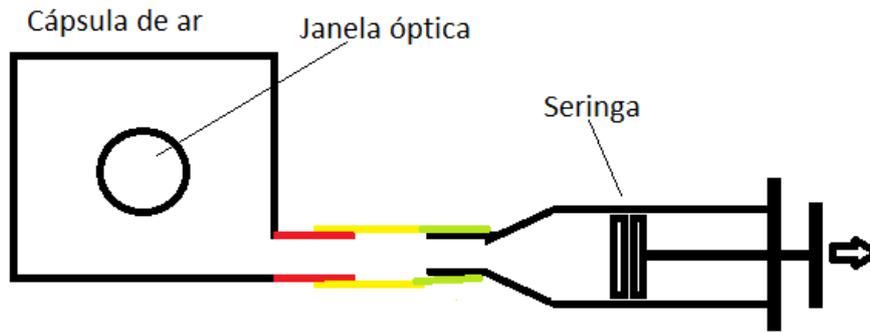


Figura 27. Diagrama do sistema Célula de ar, mangueira e seringa.

A Célula de ar é colocada em um dos caminhos ópticos do interferômetro, ou seja, ela fica entre o divisor de feixe e um dos espelhos, ver Figura 28. Ela é colocada após o interferômetro estar alinhado e já sendo visível a figura de interferência. Ao realizar o vácuo puxando a seringa as franjas iniciam o movimento de claro para escuro e escuro para claro, sendo que a cada mudança o sensor de pressão que está dentro da Célula envia o dado da pressão naquele instante, o módulo Arduino o responsável pelos registros de pressão e números de franja. [MICHELSON, 1887]

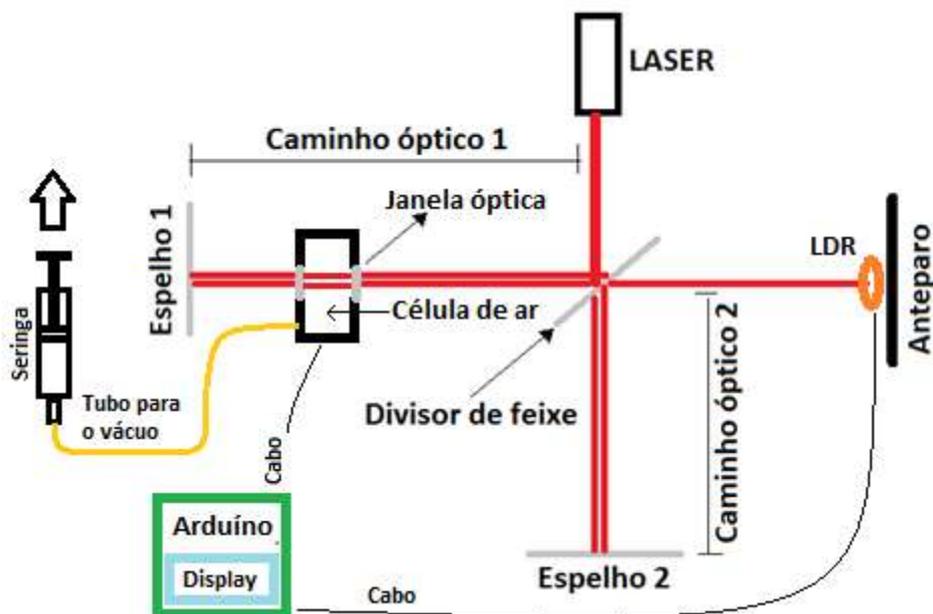


Figura 28. Diagrama da posição da Célula de ar no interferômetro.

Os dados podem ser lidos diretamente no display de LCD do módulo Arduino durante ou após as leituras buscando os dados da memória, que podem ser usados para montar um gráfico da pressão em função do número de franjas. Ver Figura 29.

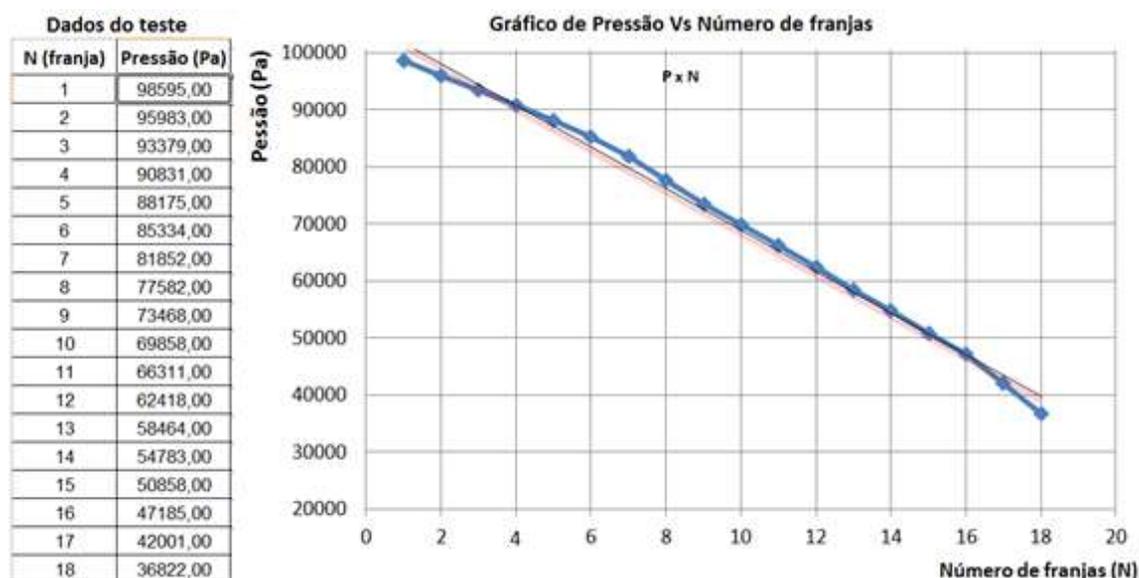


Figura 29. Dados e Gráfico do teste do índice de refração em função da pressão.

Observando a Figura 29 vemos que as franjas se deslocam com o decréscimo da pressão, assim poderíamos estender a linha de tendência e encontrar o ponto no eixo x onde a pressão é zero, ou seja, o vácuo, onde o índice de refração é igual a 1. Este experimento permite abordar o índice de refração, velocidade da luz em meios materiais diferentes, bem como a noção do significado de vácuo na Física.

Quanto a sua montagem e execução é relativamente simples, contudo para a análise e discussão dos dados com os alunos seria o ideal dois períodos de aula. Pois a montagem do gráfico e tabela de dados no quadro é prática, mas a análise de dados envolve operações de valores de pressão de até cinco dígitos, tornando-a mais lenta, mas perfeitamente aplicável em uma turma do terceiro ano do Ensino Médio.

3.4 Comparativo o modelo construído e de equipamentos de laboratório.

Por ser um projeto de baixo custo, muito da precisão foi perdida em comparação com equipamentos fornecidos por empresas especializadas. Porém a sua aplicação em sala de aula para o Ensino Médio é perfeitamente viável, não sendo encontrado similar no mercado a valor próximo. A construção por um professor exige um conhecimento

em mecânica básica. O ideal da aplicação deste produto seria a encomenda das peças que constituem o interferômetro a uma serralheria, pois todas as peças são de simples execução, com uso de ferramentas básicas, não houve a necessidade do uso de torno mecânico ou fresadora, o que reduz muito o custo de fabricação. Outra possibilidade seria a inclusão de um grupo de aluno e seus responsáveis, tornando-o um projeto inclusivo com a comunidade, lembrando que o uso do interferômetro não é para uma única aula, mas sim um produto de grande vida útil para uso em mais de uma aula.

O custo dos consumíveis para a realização do projeto ficou abaixo de 500,00 reais, ver

Figura 30, em um total de 60 horas para a construção de todos os itens. Observando que uma serralheria com profissionais da área realizaria em um número menor de horas.

Item	Valor unitário em R\$	Quantidade	Valor total em R\$
Espelho da China	16,00 *	2	32,00
Divisor de feixe da China	32,00 *	1	32,00
Espelho de Xerox	**	2	**
Espelhos de HD	**	1	**
Lâmina de microscópio	0,20	4	0,80
Espuma	24,00 o metro	1m	24,00
Cantoneira de alumínio	20,00 o metro	1 m	20,00
Barra chata de alumínio	10,00 o metro	1 m	10,00
Base de granito	250,00 o m ²	0,14m ²	35,00
Base de madeira	**	**	**
Barra chata de aço 1"	20,00	1m	4,50
Pé com fuso	1,50	3 unid	4,5
Cantoneira de aço 2"	**	**	**
Parafuso M4 x 8mm	3,00 o centro	-	3,00
Porca M4	2,00 o cento	-	2,00
Seringa de 60 ml	4,50 a unid	1	4,50
Borracha de garote	3,00	0,50	1,50
Arduino	40,00 *	1 unid*	40,00*
Sensor Bmp180	12,00 *	1unid*	12,00*
Display de LCD	12,00 *	1 unid*	12,00*
Componentes eletrônicos	15,00	-	15,00

Pedaços de tubo de cobre	**	**	**
Micrometro	37,50*	1 unid*	37,50*
Pedaços de alumino	*	*	**
		Total	290,30 Reais
<i>* Custo com frete não contabilizado.</i>			
<i>** Objetos encontrados em sucata de serralheria não tendo custo final significante.</i>			

Figura 30. Tabela de custos do interferômetro.

Em termos mais técnicos, a comparação deste interferômetro com modelos comerciais carece de estabilidade e amortização de vibrações externas ao equipamento, observando que os suportes são apenas apoiados sobre a placa de granito, não há fixação mecânica nem magnética. O diferencial que o torna mais didático é a ampliação da figura de interferência para diâmetros de até 1m, sendo projetado diretamente no quadro da sala de aula. É um experimento que pode ser visualizado por todos e não por um pequeno grupo que fica ao redor do equipamento. Isto permite que toda a sala conte as alterações das franjas e participem diretamente do experimento.

4 Aplicação prática em sala de aula

Aplicação em sala de aula consiste no teste final do equipamento, não somente o teste de resistência ao uso e maneabilidade, mas sim ao objetivo principal, o aprendizado dos alunos. O experimento aborda diversos temas relacionados à luz e suas propriedades ondulatórias.

O interferômetro foi projetado e testado de forma a ser um experimento de simples manuseio, o alinhamento dos espelhos é rápido e prático. Testes em sala de aula indicaram tempo de montagem inferior a 15 minutos, desde que o roteiro e instruções sejam passados previamente. Alguns cuidados a serem tomados nos dois experimentos são.

1. Abordagem matemática dos dados do experimento do índice de refração do ar em função da pressão. Não foi um ponto negativo no experimento, mas um fator a ser considerado, já que a manipulação de valores com cinco casas decimais não é habitual para alunos do Ensino Médio. Isto exige um planejamento sobre a matemática abordada, bem como o acompanhamento do professor durante a execução dos cálculos. A tomada de dados é perfeitamente acessível à realização por alunos.
2. A medida do comprimento de onda é muito sensível, qualquer toque na mesa faz as franjas oscilarem. Sendo preciso o professor mostrar como girar o fuso do micrômetro sem oscilar o equipamento, ou seja, instruções quanto à sensibilidade do experimento.

A aplicação foi realizada com dois grupos diferentes, alunos do Ensino Médio e alunos de um curso técnico, ou seja, situação com grupos de alunos com diferentes idades e níveis de conhecimento sobre Física. Sendo que o objetivo da aplicação com alunos de curso técnico é a melhoria do equipamento em si, já com alunos do Ensino Médio o principal objetivo é o ensino de acordo com o PCN e o currículo mínimo.

4.1 Aplicação com alunos da 3º série do Colégio Estadual Professor José de Souza Marques no RJ

O interferômetro foi usado em sala de aula de um colégio estadual do Rio de Janeiro em dezembro de 2015, ver Figura 31. Como o equipamento já havia sido usado por alunos do curso técnico, todos os itens estavam em bom funcionamento. O primeiro item apresentado aos alunos foi a imagem de interferência. Os alunos já tinham conhecimento prévio sobre ondas e interferência construtiva e destrutiva. Os alunos recebem um roteiro com um pequeno resumo sobre o que é o interferômetro e interferência, este roteiro contém um questionário e tabelas a serem preenchidas durante o experimento. Para o uso completo das funcionalidades do interferômetro é preciso três aulas, sendo duas delas com roteiro didático e coleta de dados pelos alunos.



Figura 31. Alunos do colégio estadual do RJ calibrando o interferômetro.

As práticas executadas com os alunos do curso técnico permitiram estipular o tempo necessário para a utilização do experimento. A prática ideal é dividida em três tópicos, cada qual com subdivisões, sendo elas:

1. Introdução ao interferômetro e a imagem de interferência.
 - 1.1 O que é o interferômetro.
 - 1.2 Como funciona e seus constituintes.
 - 1.3 Ajuste da imagem e o significado físico da imagem de interferência.
 - 1.4 Contextualização histórica do experimento de Michelson e sua importância na teoria da relatividade.

1.5 Desregulagem do equipamento para permitir que os alunos o calibrem e percebam suas sutilezas.

Para o item 1, são necessários cerca de 40 a 45 minutos. É preciso uma instrução sobre o cuidado com os espelhos, devido a sensibilidade da superfície refletora a arranhões.

2. Medida do comprimento de onda do laser usado no Interferômetro

2.1 Montagem do equipamento. Por terem passado pelo item 1 os alunos já estão cientes do funcionamento.

2.2 Mostrar em como o interferômetro vai realizar a medidas do comprimento de onda. Com demonstração e exemplificação dos cálculos.

2.3 Desregular o equipamento para os alunos realizarem as medidas.

Para o item 2, são necessárias duas aulas de 45 minutos. Pois além de coletar os dados é preciso deixar que os alunos tenham uma maior experiência com o manuseio do interferômetro. O uso do micrômetro requer varias tentativas até a percepção da sua sensibilidade, pois vibrações no giro do fuso micrométrico causam oscilações nas franjas que tornam impossível contar as suas mudanças. É preciso mais de uma rodada de medidas, sendo o ideal de cinco rodadas de medidas do comprimento de onda para fazer uma média.

3. Medida do índice de refração do ar em função da pressão.

3.1 Montagem do equipamento, citando que neste experimento três novos itens serão inseridos. A Célula de Ar, o Módulo Arduino e o sensor de movimento de franjas.

3.2 Demonstração de como funciona o Módulo Arduino e seus comandos básicos.

3.3 A Física por trás da Célula de Ar.

3.4 Calibração do sensor.

3.5 Medidas e manuseio do interferômetro pelos alunos, sem coleta de dados prévia do professor.

Para o item 3. são necessárias duas aulas de 45 minutos. Nesta aplicação é preciso realizar um gráfico com os dados coletados. A análise matemática é aceitável para um aluno do terceiro ano do Ensino Médio, sendo estimulado que grupos realizem os cálculos no quadro, (ver Figura 32). Uma observação é que nesta aplicação o módulo Arduino ainda não estava em sua caixa definitiva, mas sim em uma matriz de contatos (protoboard), devido aos ajustes que ainda estavam sendo feitos. Outro ponto é que os dados além de serem lidos no display de LDC também eram enviados via porta USB para um notebook para um melhor registro dos dados.



Figura 32. Alunos do colégio estadual do RJ analisando os dados.

Uma situação muito vantajosa para a aplicação do interferômetro é o uso de uma sala que seja possível o controle de luminosidade, como foi o caso da sala onde foram realizados os testes com os alunos da rede estadual.

A finalidade de deixar os alunos livres com o manuseio do equipamento citado no item 3.5 é permitir que eles tivessem um contato mais íntimo com uma atividade investigativa, para não dizer pesquisa, pois quando todo o equipamento é destrinchado pelo professor, pouco sobra para o aluno descobrir por si próprio, como um achado ou descoberta. Esse manuseio supervisionado permite ao aluno vivenciar o que é uma coleta de dados bem como as dificuldades relacionadas, desde a simples compressão da Física como a sensibilidade do equipamento. Claro que o professor deve estar atento para evitar falso aprendizado bem como seguir linhas de raciocínio duvidosas que possam levar a um tempo excessivo de manuseio, ocasionando frustração por parte do aluno.

4.2 Aplicação em alunos de um curso técnico pós-médio do colégio NETINFO

Uma das necessidades para o refino do experimento e do roteiro de aplicação é o teste em sala de aula. Como o teste com turmas normais do Ensino Médio pode acabar prejudicando o aluno (turmas que estão estudando normalmente), uma das opções foi testar a aplicabilidade do interferômetro em turmas de cursos técnicos pós-médios em novembro de 2015.

Este tipo de grupo de alunos é normalmente formado por alunos que já passaram pelo Ensino Médio, em alguns casos há mais de três décadas, (ver Figura 33). O grupo testado era composto por oito ou nove alunos voluntários do curso técnico de automação industrial e eletrotécnica do Curso Técnico NETINFO, sendo a grande vantagem que já possuem uma maturidade educacional, sendo simples definir os objetivos do projeto e como será feito o experimento. Por se tratar de técnicos de diversas idades e afinidades tecnológicas diferentes, cada parte do equipamento é tratada como um projeto, que permite não só aprender sobre interferometria, mas também a melhorar o produto, com indicações objetivas. Coube a eles após instruções a montagem e calibração do experimento, incluindo o ajuste das distâncias entre os espelhos, (ver Figura 34 e Figura 35).

Este teste foi de suma importância no desenvolvimento do equipamento, que foi refinado a um nível para ser usado no Ensino Médio, porém sem correr o risco de prejudicar o aprendizado de um aluno em curso normal do Ensino Médio.



Figura 33. Alunos do curso técnico.



Figura 34. Alunos do técnico calibrando o interferômetro.

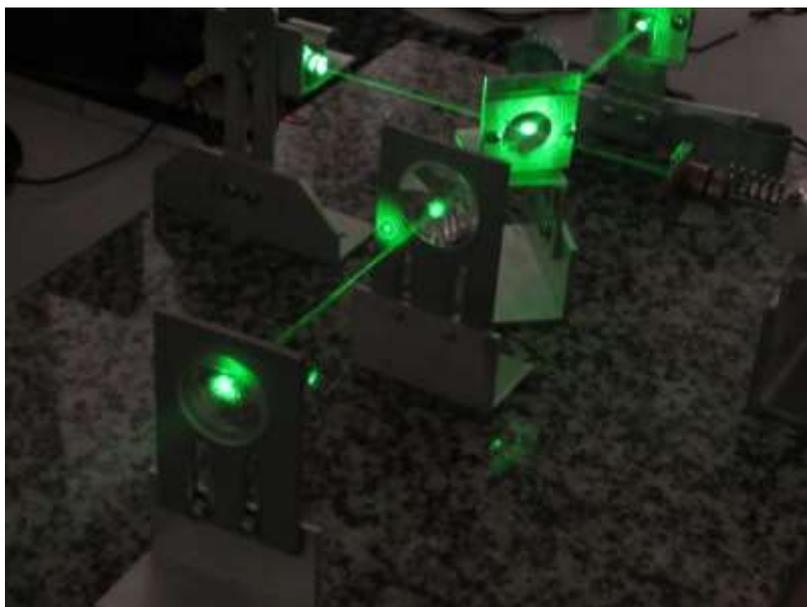


Figura 35. Interferômetro ajustado para medida do comprimento de onda

Foram realizadas três sessões de quatro horas de duração, sendo os principais pontos de dificuldades encontrados pelos alunos:

- Preenchimento da tabela de dados nas medidas de pressão.
- Vibração do interferômetro nas mesas usadas em salas de aula.
- Aquecimento do regulador de tensão do laser.
- Tamanho da imagem de interferência.
- Leitura do micrometro nas medidas de comprimento de onda.

Com esse *feedback* dos alunos foram feitas melhorias na apresentação teórica do preenchimento da tabela de dados nas medidas de pressão, aumento da camada de espuma que absorve vibrações externa, sempre que possível montar o interferômetro em cima de uma base firme e a montagem do interferômetro no final da sala de aula, gerando imagem de até 80 cm de diâmetro e inclusão da leitura do micrômetro no roteiro didático.

Um ponto didático importante é a aplicação das equações usadas, pois relataram certa dificuldade nas operações com notação científica, ficando claro que o roteiro deve apresentar um exemplo de como deve ser procedido à parte matemática do experimento.

Quanto à fundamentação teórica, não houve dificuldades, observando que para um grupo de técnicos o interferômetro não é uma ferramenta didática para o estudo de ondas, mas sim um equipamento que realiza medidas de precisão usando a luz, ou seja, o interferômetro de Michelson não tem uma complementação histórica e conceitual

sobre interferometria e seu uso na ciência, como na teoria da relatividade, mas somente como foi citada pelo grupo de alunos “*uma régua de luz*”.

4.3 Comparativo entre as turmas de médio e pós-médio

O principal objetivo de fazer testes em grupos de alunos diferentes é tirar o máximo que o experimento pode fornecer em aprendizagem. Alunos do Ensino Médio têm idades variando de 15 a 18 anos, ou seja, um grupo em uma fase da vida com muitas expectativas com relação ao que a educação vai oferecer em um futuro breve, como ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio), vestibular, e outros testes como escolas militares ou cursos técnicos. O ponto a ser visto não é o aprendizado depois que o interferômetro foi usado em sala de aula, mas sim o período no qual ele foi testado junto ao aluno. Pois neste período o desenvolvimento é possível mediante análise do professor sobre a interação aluno e experimento, portanto é preciso rever se detalhes no manuseio do equipamento e análise dos dados estão realmente ao alcance do aluno do Ensino Médio, ou se simplesmente o aluno afirma que compreendeu e que o manuseio é fácil apenas para concordar com o professor, temendo pela sua nota futura, mesmo que a aplicação didática não repercuta em nota. Não é uma afirmação que o aluno vá omitir uma resposta sincera e objetiva, mas sim que o contrato didático é atuante e resulte em uma resposta vaga, que não repercuta em melhorias no equipamento.

Outro ponto de grande importância é o fator teste, pois alunos regulares não podem ter seu aprendizado prejudicado em aulas testes, onde é feita a aplicação do interferômetro e ao final o professor detecte erros, que futuramente não se repetirão. Assim houve de fato melhoria na didática, mas a turma de alunos acaba por ter seu aprendizado prejudicado, não por mau planejamento da aplicação didática, mas apenas uma questão de ajustes e melhorias, inerentes a qualquer projeto.

Para suprir essa lacuna na melhoria, foi abordado o experimento em alunos de um curso técnico, não sendo objetos de teste como cobaias, mas sim estudantes com expectativas relacionadas ao ensino diferentes das do aluno do Ensino Médio. Não são melhores ou piores, mas um foco de aprendizado direcionado para a tecnologia do interferômetro, como a sua capacidade de medir ordens de grandeza do nanômetro, ou o circuito eletrônico que estabiliza a tensão do laser. Desta forma várias melhorias no

experimento foram realizadas antes do teste com alunos do Ensino Médio. Citando algumas melhorias:

- Adição de um buzzer (emite som de bip) quando uma franja é detectada pelo Arduino. Permite ouvir quando a franja é deslocada, assim há mais praticidade durante o experimento.
- Salvar na memória do Arduino os dados do experimento. Permite voltar e ver os dados depois de concluído o experimento.

Já a aplicação de medida do comprimento de onda e medida do índice de refração do ar em função da pressão com alunos do Ensino Médio foi direcionada à fundamentação teórica, história e aplicação do interferômetro. Sendo que por si só o interferômetro já causa um impacto na sala de aula, pois é um equipamento grande e com muitos itens de forma estranha, além do uso de um laser. Este impacto positivo manifesta-se em muitas perguntas sobre o equipamento e no seu funcionamento. Mostrando de forma clara que é preciso um bom preparo do professor, pois nesta situação temos perguntas práticas voltadas a uma teoria (ondulatória) que requer explicações indicadas no experimento.

O uso de grupos de alunos com diferentes idades e objetivos educacionais, permitiu melhoras significativas no contexto geral do interferômetro, sendo o seu uso inicial em sala de aula um pequeno *show* que atrai a atenção dos alunos. E este momento de atenção continua não só na obtenção da imagem de interferência, mas em todo o processo de aplicação.

5 Considerações finais

A aplicação de um interferômetro em sala de aula, como vimos, não é impraticável, mas sim um experimento didático complexo de grande abrangência de conteúdo físico e histórico. Não só a sua importância como precursor de uma nova forma de trabalhar com medidas precisas “*usando a luz como régua*”, mas sim um equipamento que permite sentir o desenvolvimento de coleta de dados e o significado prático que é passado no quadro pelo professor.

Seu projeto e construção provaram ser um desafio, pois a precisão era e é a pedra angular do interferômetro. A condição inicial de baixo custo era o fator decisivo, pois do contrário como seria aplicado em escolas públicas. A busca por soluções simples levou a um equipamento que não só permite demonstrar, mas também medir grandezas que só seriam possíveis com um interferômetro, claro que deixa a desejar em termos de qualidade, mas supera em algum ponto os interferômetros comerciais, como:

- Custo.
- Praticidade da montagem.
- Leitura eletrônica da variação de franjas.
- Possibilidade de construção pelo professor e/ou grupos de alunos.

A aplicabilidade em sala de aula se mostrou eficaz e prática desde que seja planejada e os alunos estejam a par da teoria ondulatória e suas constituintes, como a interferência destrutiva, construtiva e reflexão. A coerência de fase o funcionamento do laser podem ser vistos durante o experimento.

A reação dos alunos ao equipamento se mostrou excelente, pois causa um choque inicial, devido ao seu tamanho e quantidades de peças, além do fato do uso do laser ser chamativo, que se bem aproveitado permitirá a atenção contínua dos alunos durante a fase de explicação do funcionamento.

O fator que mais pesa é a construção do equipamento, não pelo custo, mas por requerer habilidades mecânicas por quem o desenvolver, observando que os desenhos com as medidas são fornecidos. Cabe a quem o construir buscar ajuda/auxílio de uma metalúrgica ou serralheria. Porém isso é um fator positivo, pois integra o professor e alunos com os meios de produção locais, sendo que as medidas não são valores que devem ser cumpridos com perfeição, mas passíveis de alterações durante a construção.

A utilização de materiais reciclados, como o espelho e lentes de máquinas copiadoras e o disco de HD, demonstra que é possível aplicar tecnologia ao Ensino Médio com baixo custo, sem perda na qualidade do experimento, bem como na análise de dados. Permitindo ao aluno não só uma aula prática, mas uma pequena demonstração de como a ciência funciona, com descobertas contínuas de um grande grupo de pessoas dedicadas e motivadas a querer compreender a natureza ao redor.

Finalmente, sua aplicação permitiu abranger um grande conteúdo da Física, que muitas vezes se resume a meia página dos livros didáticos do terceiro ano do Ensino Médio, como algo que não é um complemento para a relatividade, mas uma área de estudo com aplicações atuais e com uma alta tecnologia de fabricação envolvida, que faz parte do cotidiano.

6 Referência

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Interferência: Coerência. In: MOYSÉS NUSSENZVEIG, Herch. Curso de Física Básica. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1997. cap. 3, p. 73-80. v. 4.

CURRÍCULO MÍNIMO DO ESTADO DO RJ. Acessado em 24/07/2016. <http://www.rj.gov.br/web/seeduc/exibeconteudo?article-id=759820>

CARVALHO, A. M. P. As práticas experimentais no ensino de Física. 2010, p 55.

AGUIAR, Carlos Eduardo. Mecânica quântica : Uma Abordagem Conceitual. 03 mar. 2015, 07 jul. 2016. 208 p. Notas de Aula.

PIMENTEL, Roberto Affonso Júnior. Uma história da interferometria no século XIX. 2012. Tese (Doutorado em Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE)) - UFRJ. Rio De Janeiro.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Som: Velocidade do som em gases. In: MOYSÉS NUSSENZVEIG, Herch. Curso de Física Básica. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014. cap. 6, p. 159-161. v. 2.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. As equações de Maxwell: A equação de ondas. In: MOYSÉS NUSSENZVEIG, Herch. Curso de Física Básica. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1997. cap. 12, p. 268-271. v. 3.

CATELLI, FRANCISCO; VICENZI, SCHEILA. Interferômetro de Michelson. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis. v. 2. n. especial. p. 350-358. abr 2004

MICHELSON, ALBERT, A; MORLEY. W. EDWAR. On the Relative Motian of the Earth the Luminiferous Ether. American Jounal of Science. New Haven. v. 34.n. 203. P. 333-345. 1887.

DATA sheet BMP180 : Digital pressure sensor. 2013. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2015.

7 Apêndices

Nas páginas que se seguem apresentamos uma relação de informações adicionais que detalham, entre outras coisas, as peças que compõem o interferômetro. Os desenhos foram feitos com auxílio do *software* do tipo CAD (*computer-aided design*) SolidWorks 2014 versão básica, com o intuito de dar uma visão clara e intuitiva para um professor não experiente e ao mesmo tempo suficientemente informativa para a um técnico experiente. Evitamos assim o uso do desenho técnico tradicional, que são muito mais detalhados e informativos, mas muito mais complicados de serem entendidos pelo leigo.

Deste conjunto de apêndices preparamos os produtos finais do projeto. Esses produtos constam dos seguintes documentos:

Produto I: Construindo um interferômetro de Michelson de baixo custo.

Produto II: Roteiro didático – Medida do comprimento de onda do laser.

Produto III: Desenho da célula de Ar.

Produto IV: Circuito e programa do módulo Arduino de leitura da Célula de Ar.

Produto V: Roteiro didático – Medida do índice de refração do ar

7.1 Orçamento de Interferômetro de Michelson

RIO LINK TECNOLOGIA LTDA EPP
 Estrada do Galvão, 1154 sala 301
 Ilha do Governador
 21.931-522 Rio de Janeiro - RJ
 Fone: (21) 2463-2731 / 2463-2644
 Fax: 3393-5327
 rlink@rlink.com.br
 www.rlink.com.br



Rio de Janeiro, 28 de Janeiro de 2016.

Empresa	UFRJ	Tel	
Endereço	Instituto de Física	Fax	
CEP / Cidade	Rio de Janeiro - RJ	E-Mail	hercilio@hotmail.com
A/C	Prof. Hercílio Córdoba	Mens.	RL-363A/2015
Ref. Proposta de Preços			

Item 01	<p>Quantidade: 01</p> <p>CONJUNTO PARA INTERFEROMETRIA, LASER HENE - EQ073B Cidepe</p> <p>Função: Destinado ao estudo de fenômenos físicos pertinentes à interferometria, experimento de Michelson, etc.</p> <p>Áreas de ação: física, óptica, indústria; física moderna, conjuntos de física, química, arquitetura, engenharia, física engenharia, fenômenos de transporte, escola técnica.</p>	<p>Preço Unitário</p> <p>R\$ 24.030,00</p>
----------------	--	--



RIO LINK TECNOLOGIA LTDA EPP
 Estrada do Galvão, 1154 sala 301
 Ilha do Governador
 21.931-522 Rio de Janeiro - RJ
 Fone: (21) 2463-2731 / 2463-2644
 Fax: 3393-5327
 rlink@rlink.com.br
 www.rlink.com.br



Item 01.1	<p>Quantidade: 01</p> <p>INTERFEROMETRO COM LASER HENE - 3B Cientific</p> <p>Conjunto completo de aparelhos com componentes óticos de alta qualidade sobre placa base rígida e pesada para medições precisas e reprodutíveis. Os grandes elementos óticos permitem a ilustração de imagens de interferência claras e bem definidas à luz do dia. A tela refletora de observação é ajustável na sua inclinação. Graças às posições pré-definidas dos componentes, é possível uma desmontagem e montagem rápidas para a execução de diversas experiências, reduzindo assim extremamente o tempo de preparação da experiência. Inclui caixa sólida de material plástico para armazenamento do interferômetro montado e ajustado, assim como da placa de base para laser.</p> <p>Divisor de feixe: diâmetro: 40 mm Plano: A/10 (lado anterior), A/4 (lado posterior) ; Espelho de superfície: Dimensões: 40x40 mm² Plano: A/2; Ajuste do espelho: Redução: aprox. 1:1000 (calibragem individual indicada na base) Placa base: Massa: aprox. 5,5 kg Dimensões: aprox. 245x330x25 mm³ Inclui U21840 Laser He-Ne</p>	<p>Preço Unitário</p> <p>R\$ 21.891,00</p>
------------------	--	--



7.2 Desenho da base de granito e tripé

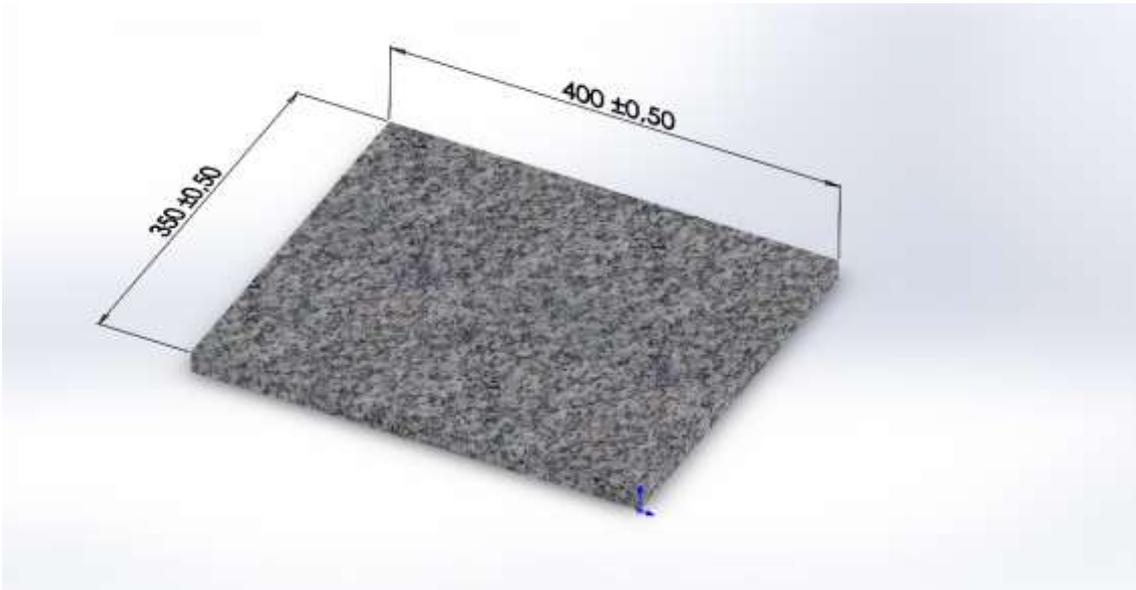


Figura 36. Base em granito

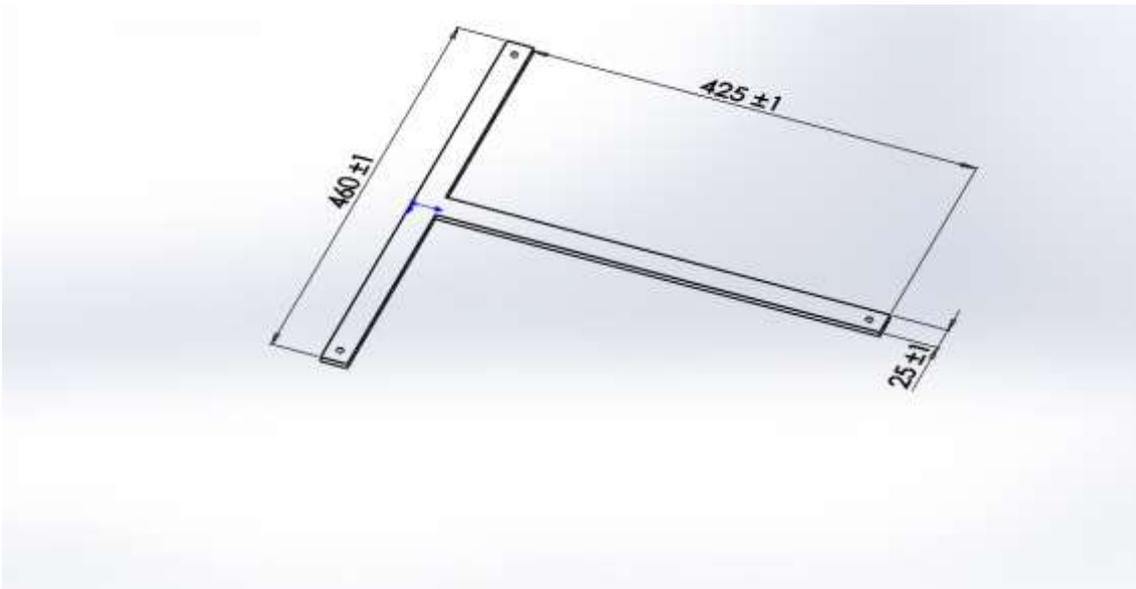


Figura 37. Apoio em aço para a base e tripé.

Unidade: mm

7.3 Desenho do suporte do divisor de feixe de lâmina de microscópio

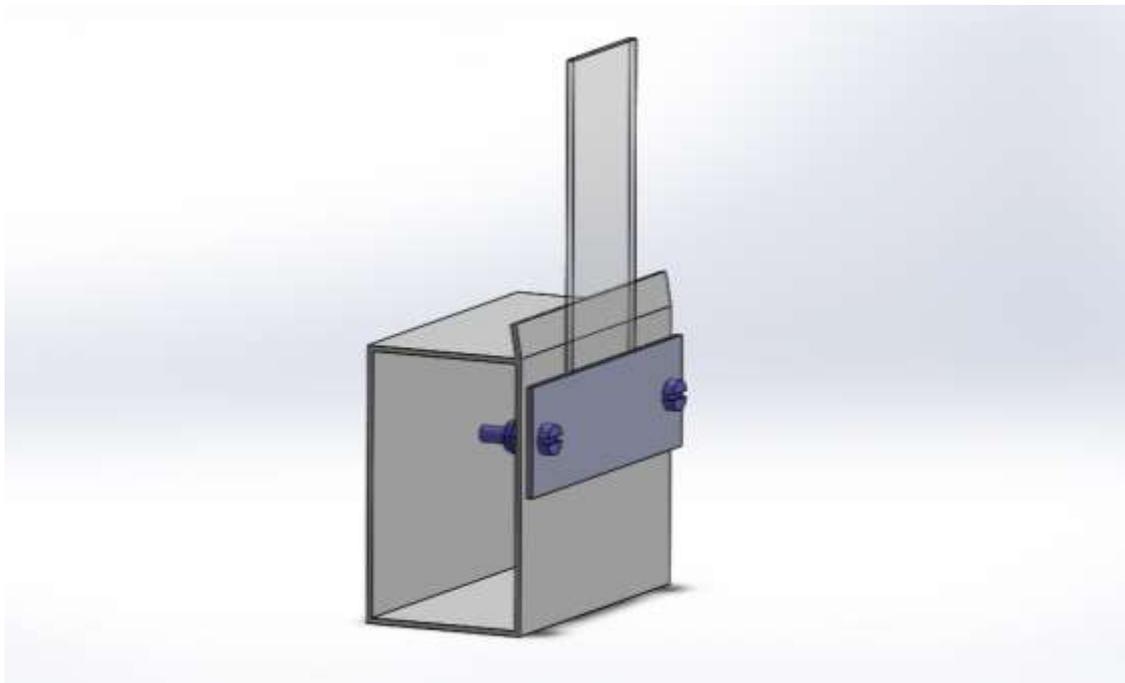


Figura 38. Suporte de lâmina de microscópio. Vista frontal

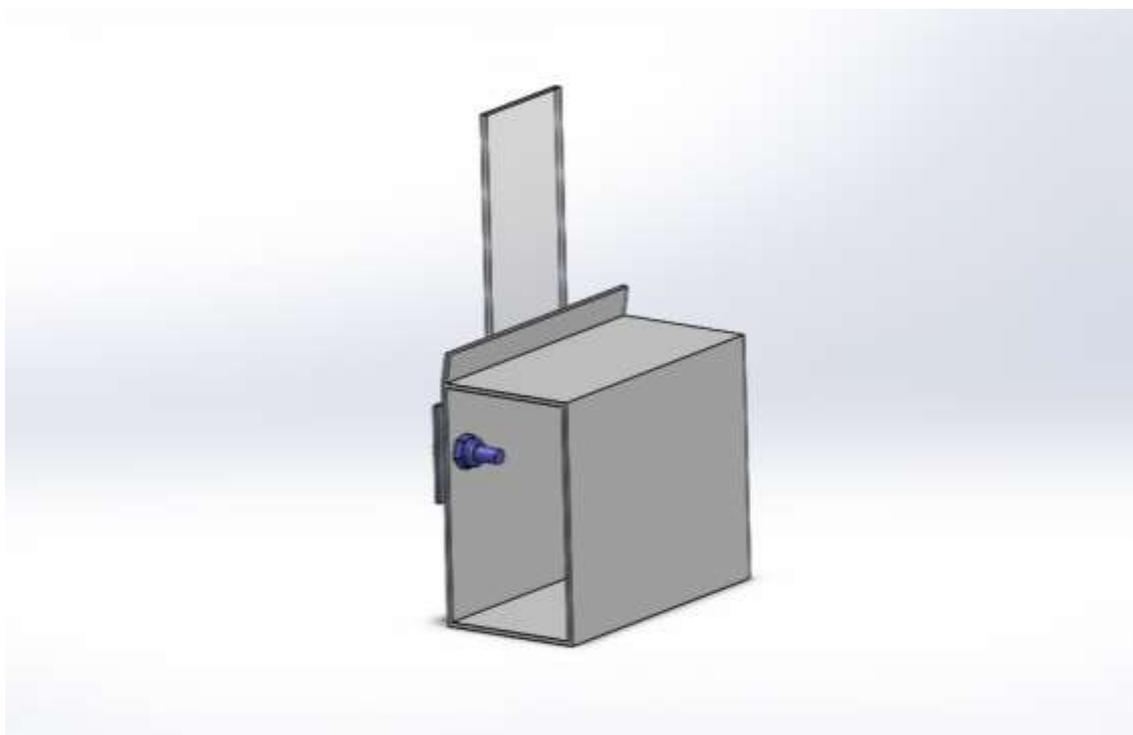


Figura 39. Suporte de lâmina de microscópio. Vista de trás.

Unidade: mm

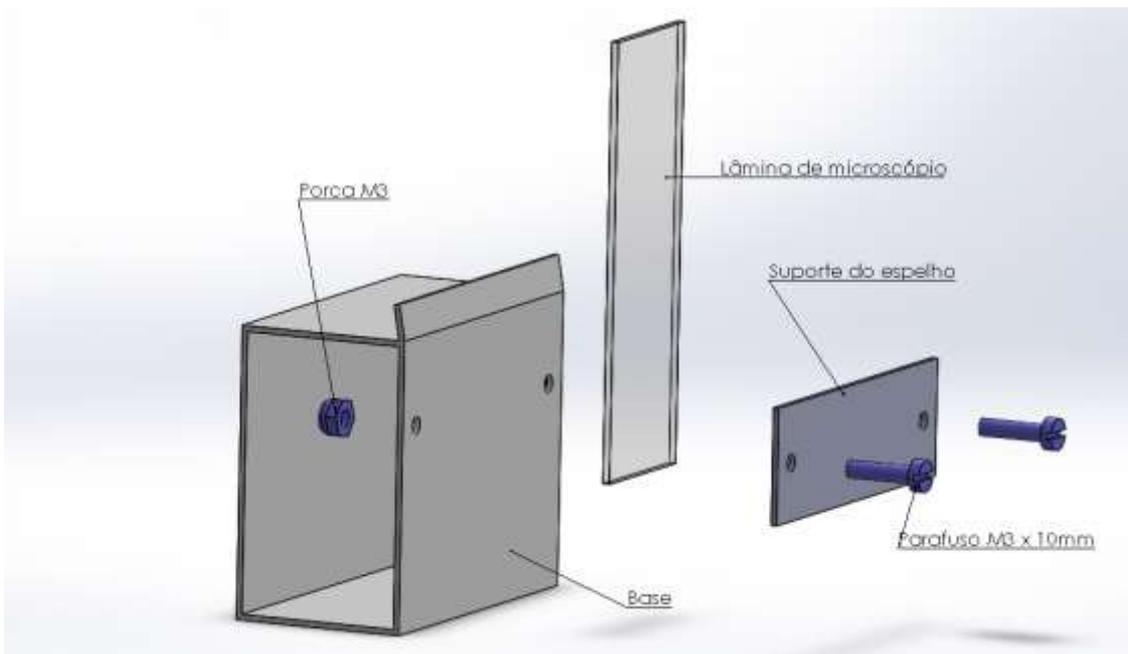


Figura 40. Suporte de lâmina de microscópio. Vista explodida.

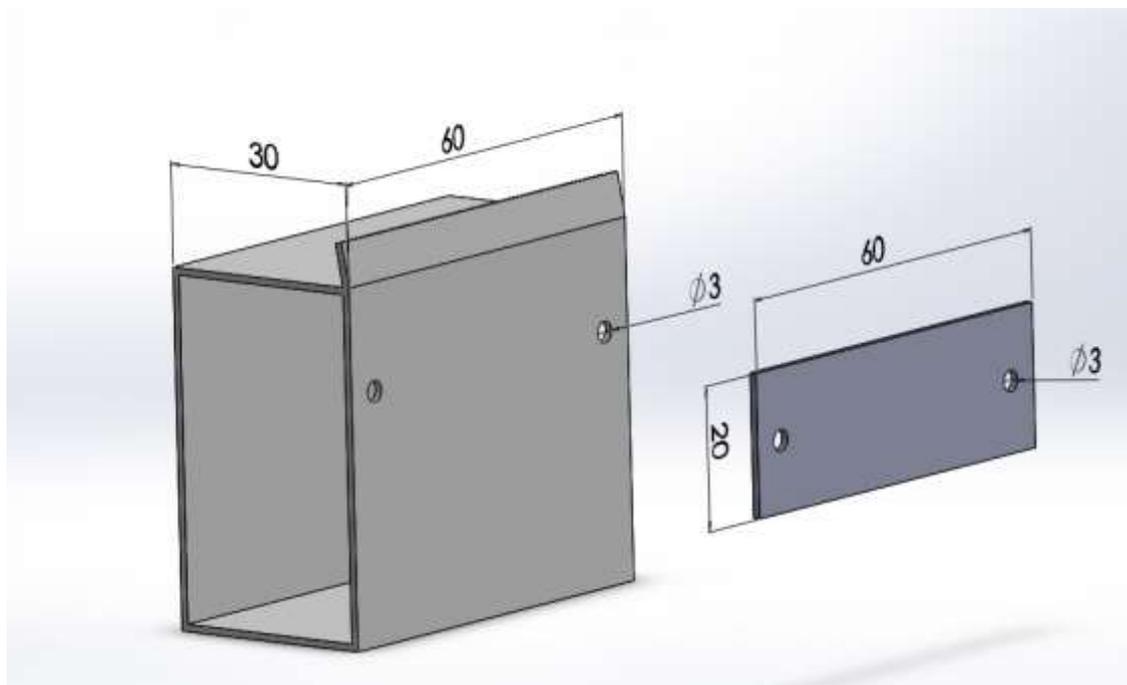


Figura 41. Suporte de lâmina de microscópio. Vista explodida com medidas.

Unidade: mm

7.5 Desenho do suporte do divisor de feixe

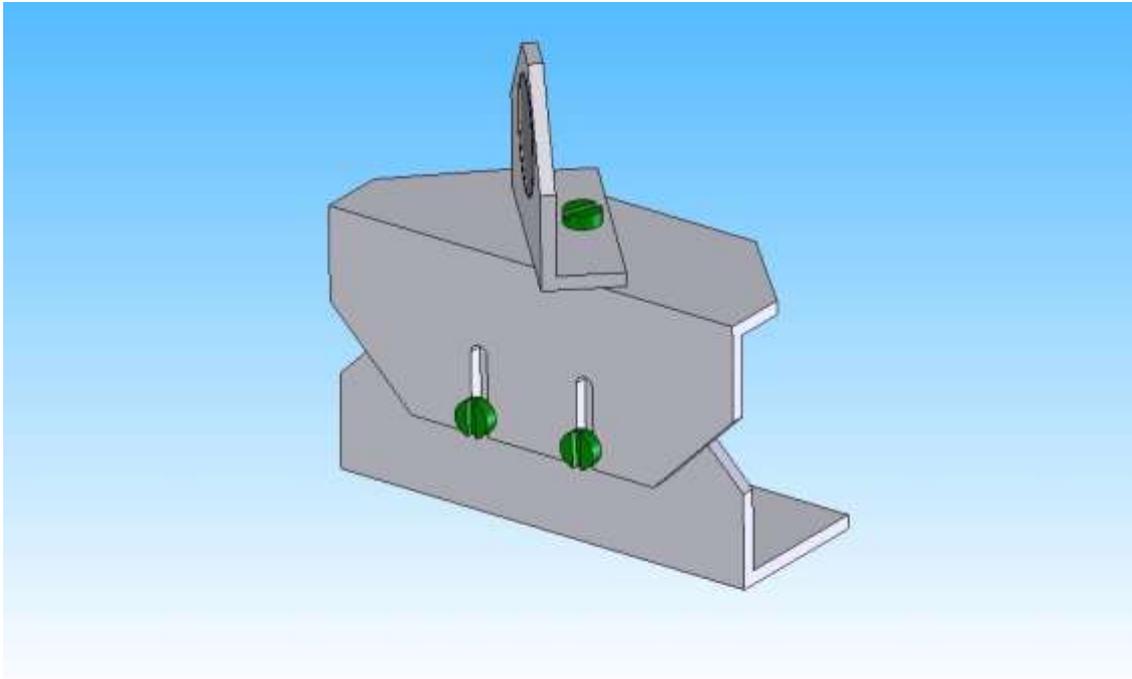


Figura 42. Suporte do divisor de feixe. Vista frontal.

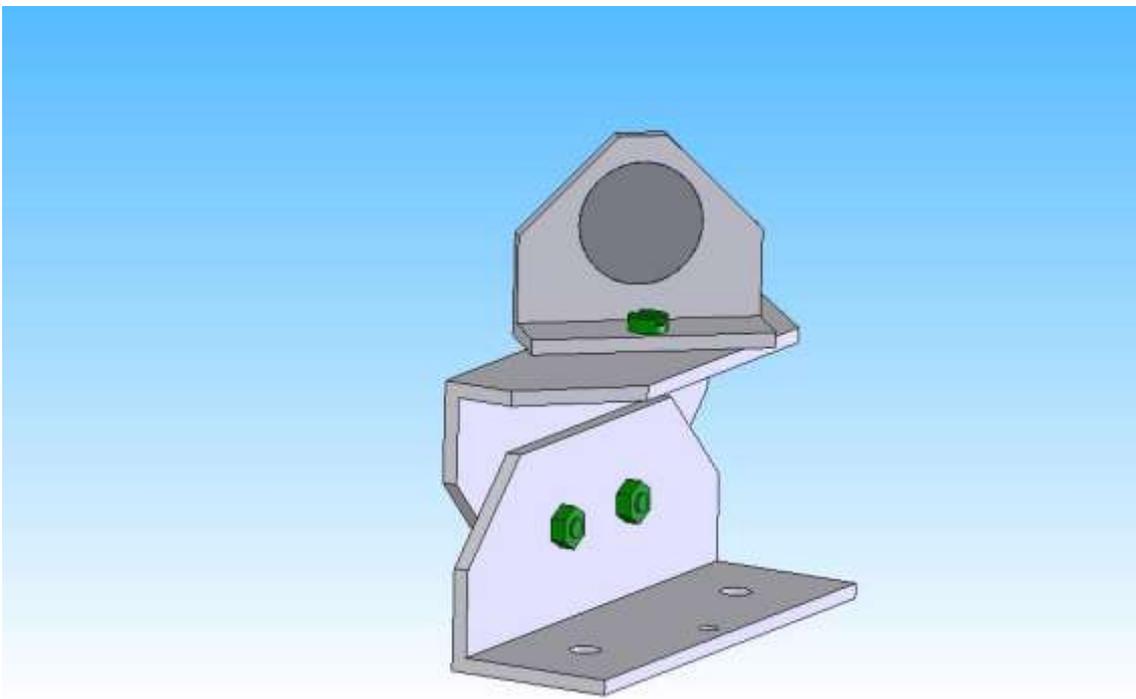


Figura 43. Suporte do divisor de feixe. Vista de trás.

Unidade: mm

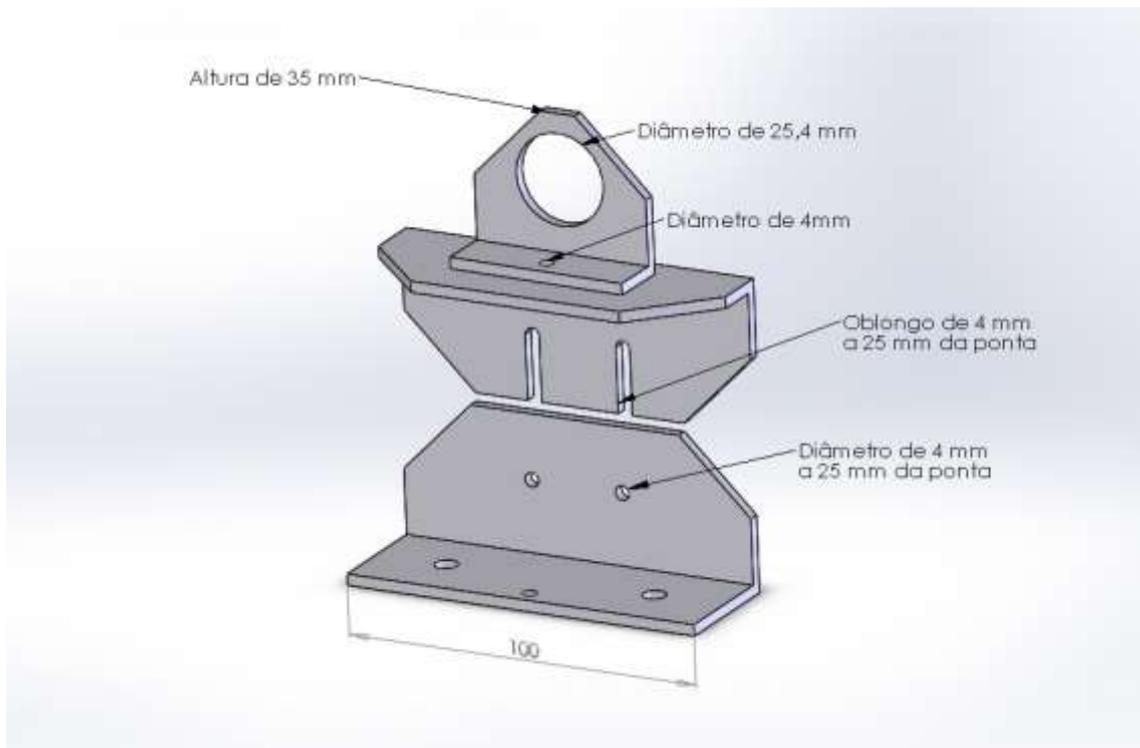


Figura 44. Suporte do divisor de feixe. Medidas

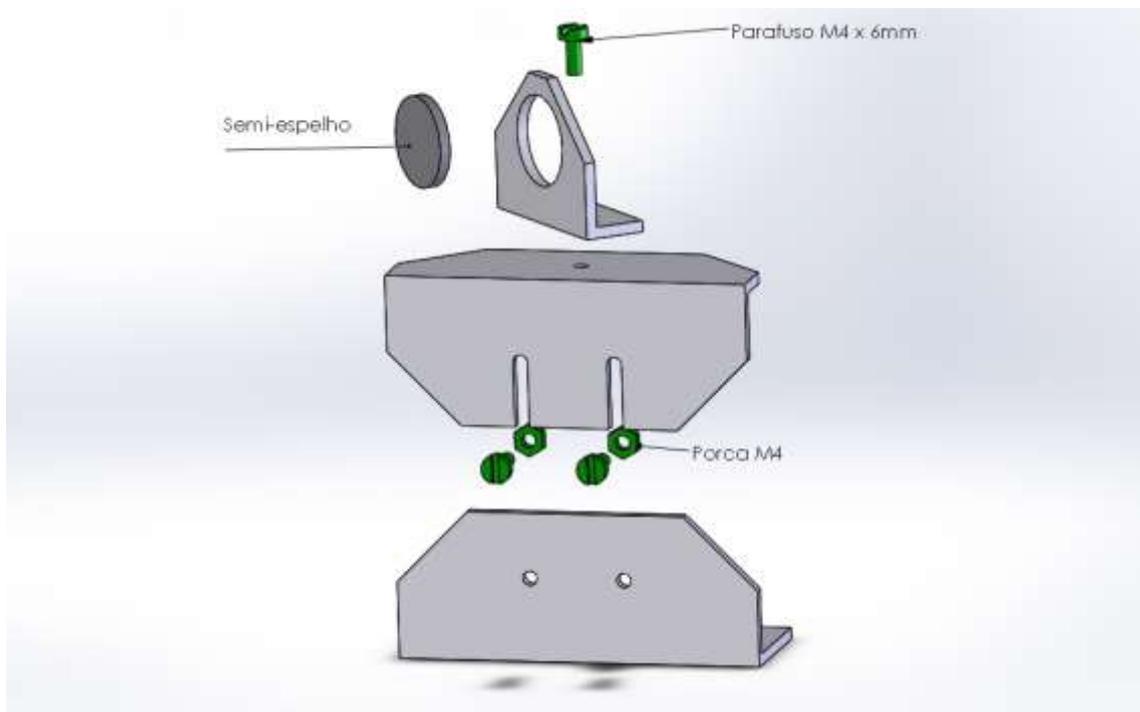


Figura 45. Suporte do divisor de feixe. Vista explodida.

Unidade: mm

7.6 Desenho do suporte do laser

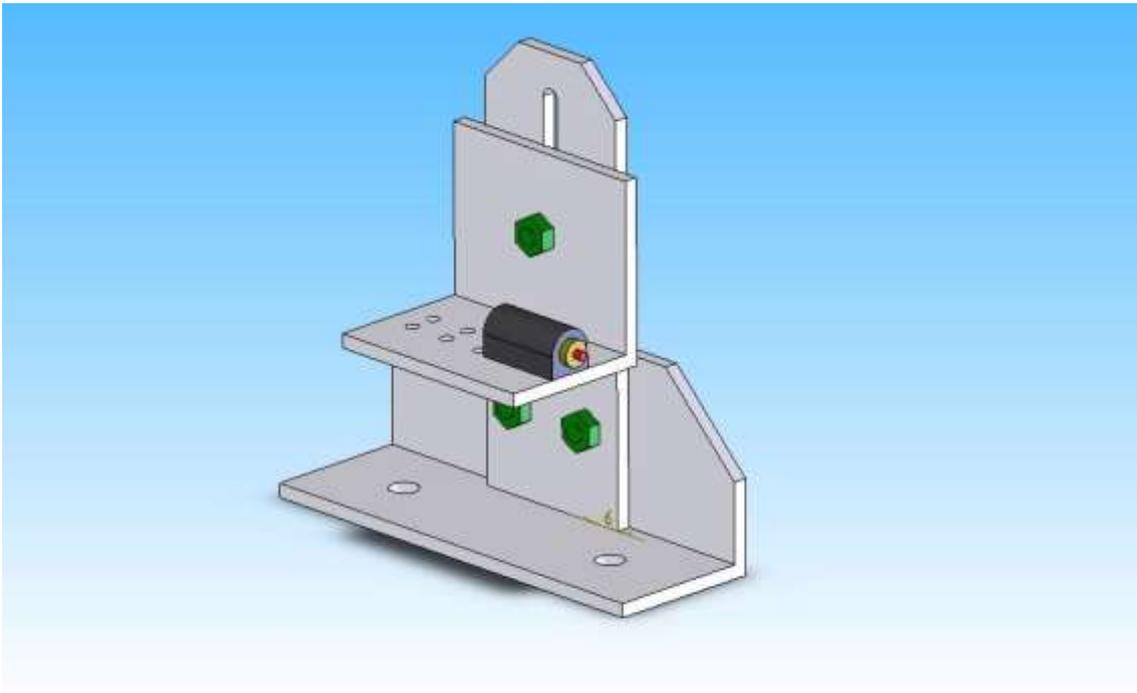


Figura 46. Suporte do laser. Vista frontal.

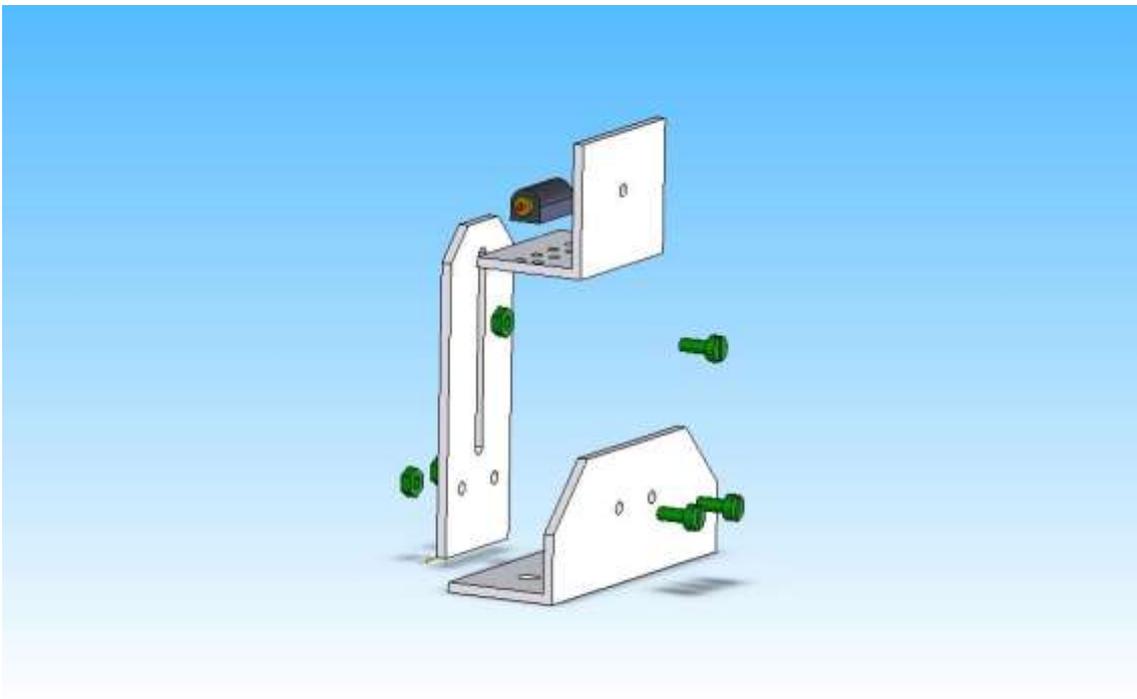


Figura 47 Suporte do laser. Vista explodida.

Unidade: mm

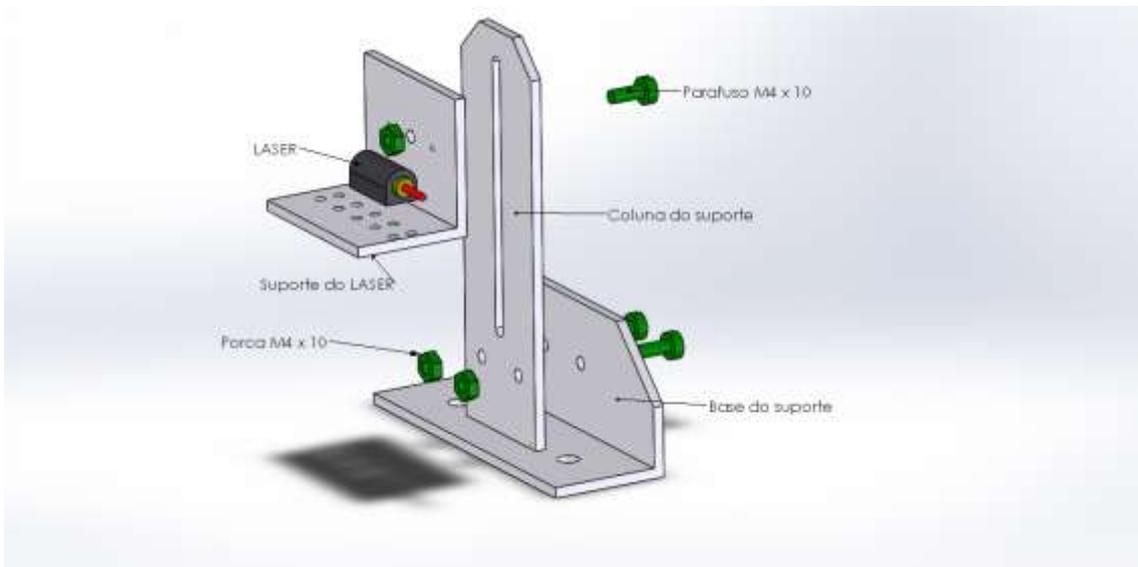


Figura 48 Suporte do laser. Vista explodida com detalhes construtivos.

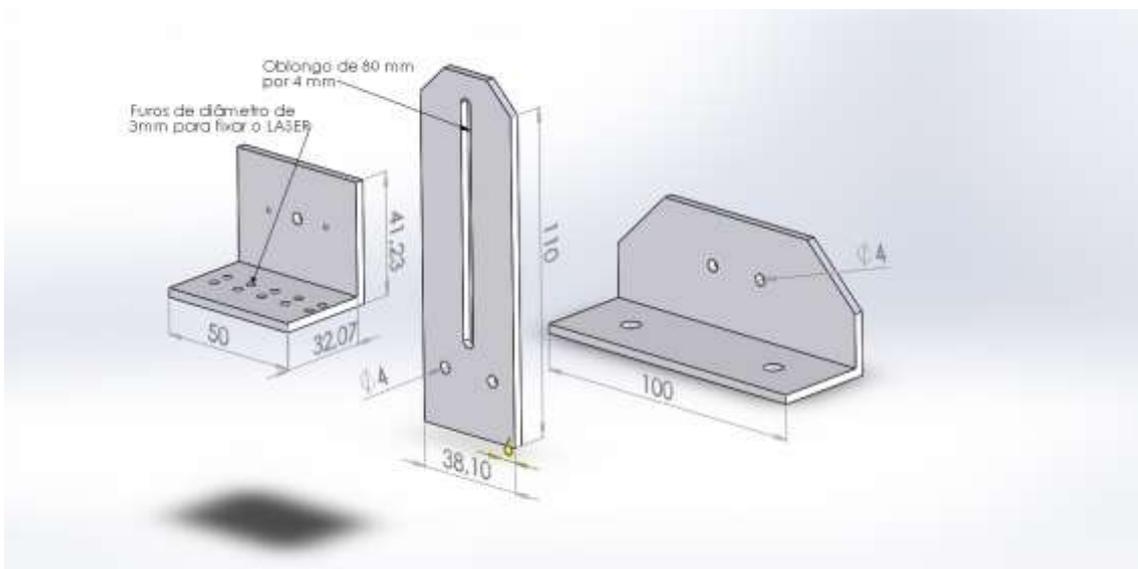


Figura 49. Suporte do laser. Vista explodida com medias.

Unidade: mm

7.7 Desenho do suporte do espelho fixo

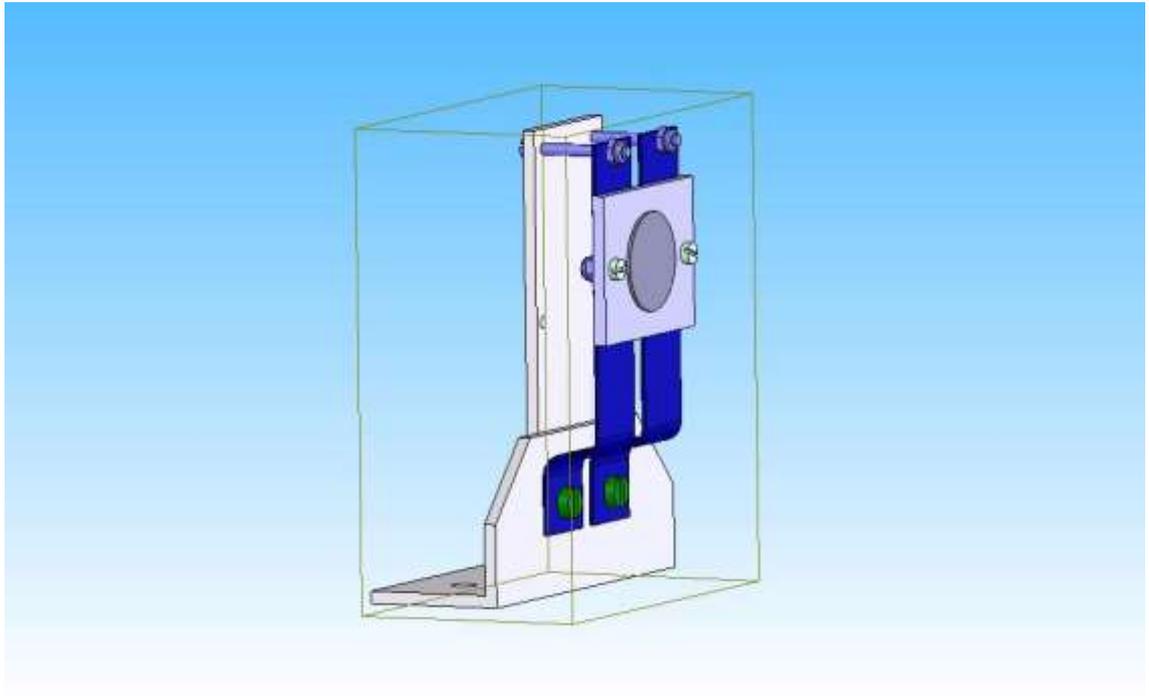


Figura 50. Suporte do espelho fixo. Vista frontal.

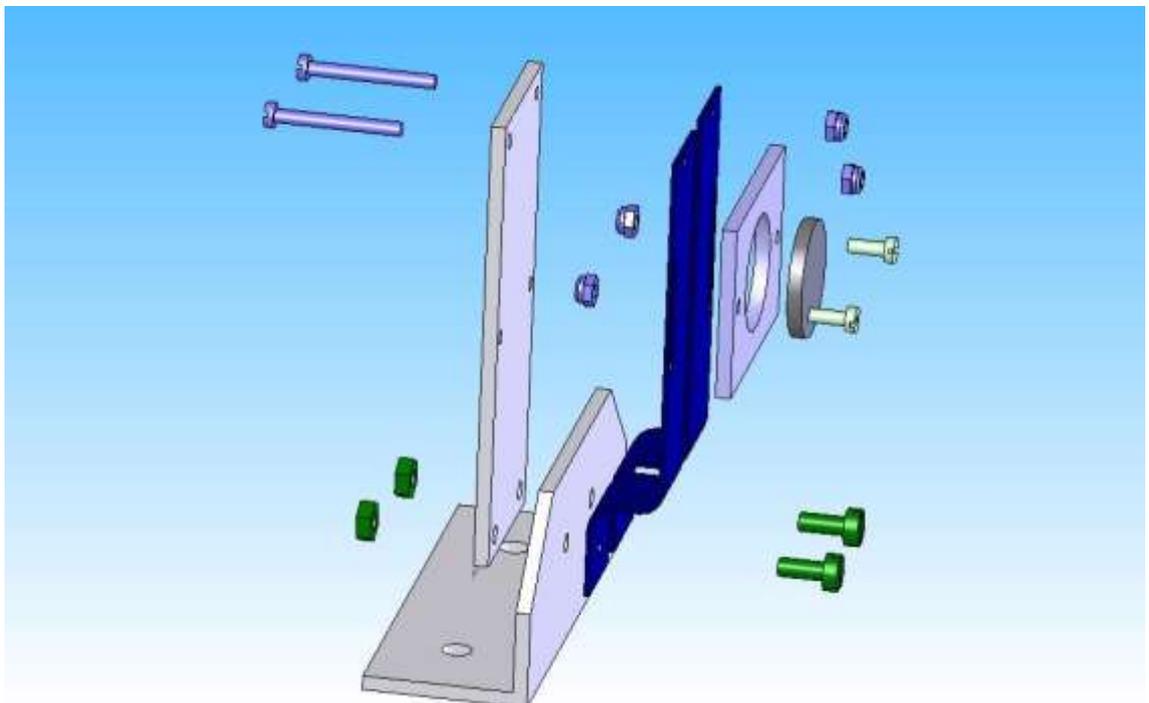


Figura 51. Suporte do espelho fixo. Vista explodida.

Unidade: mm

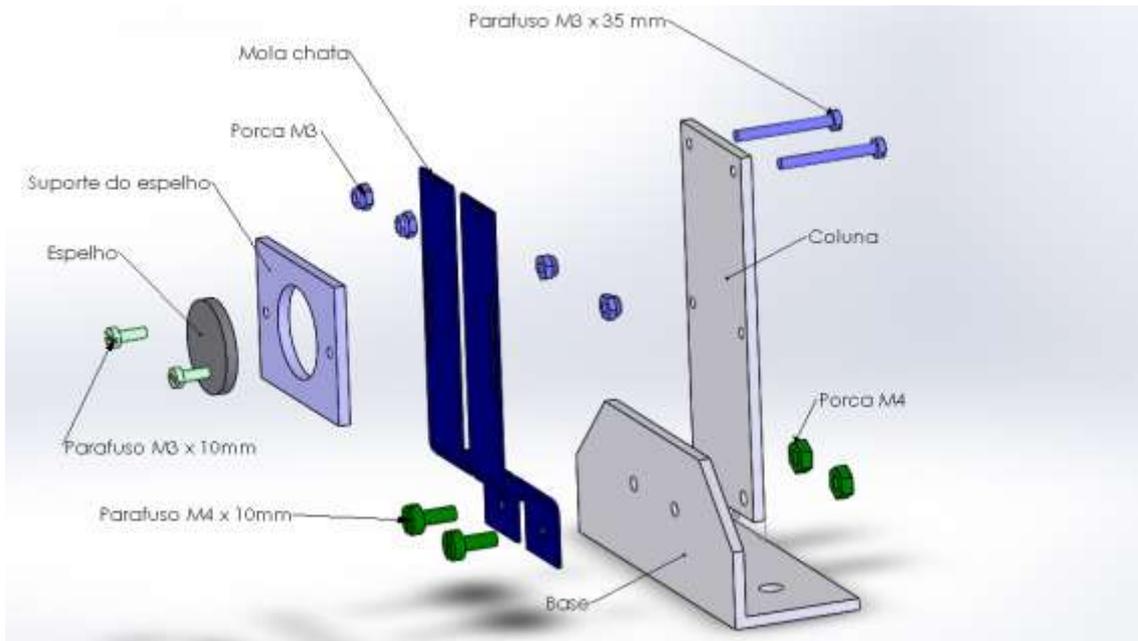


Figura 52 Suporte do espelho fixo. Vista explodida com detalhes construtivos.

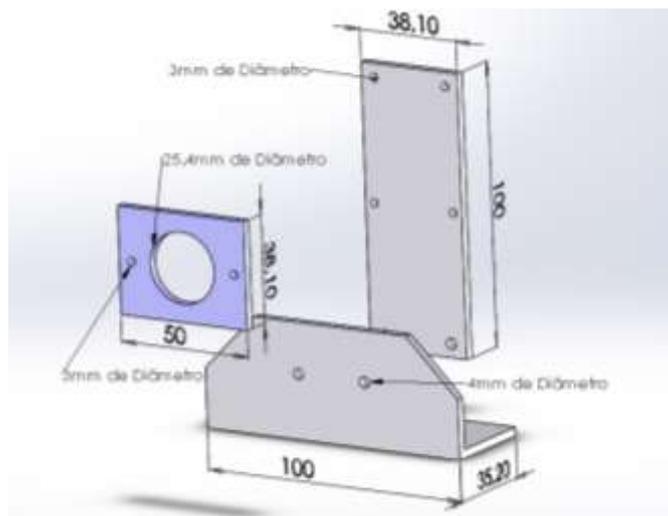


Figura 53 Suporte do espelho fixo. Vista explodida com medidas.

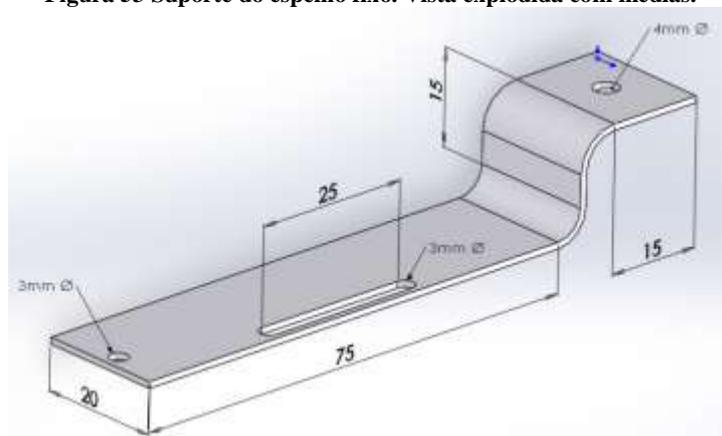


Figura 54. Mola do espelho fixo. Vista com medidas.

Unidade: mm

7.8 Desenho do suporte do espelho móvel

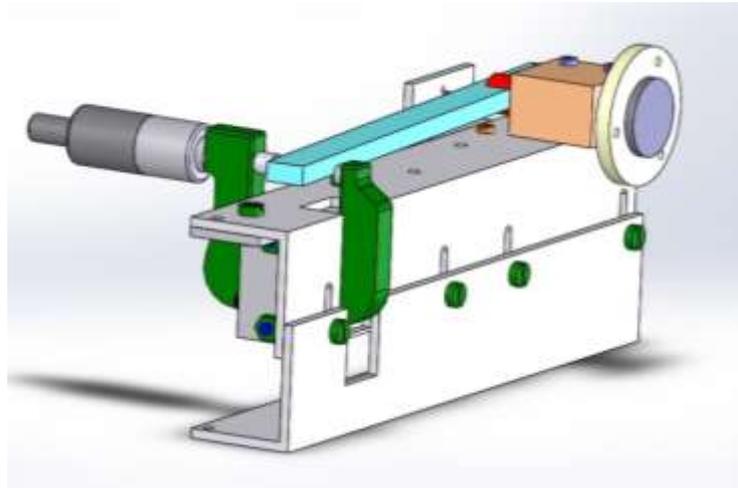


Figura 55. Suporte do espelho móvel. Vista direita.

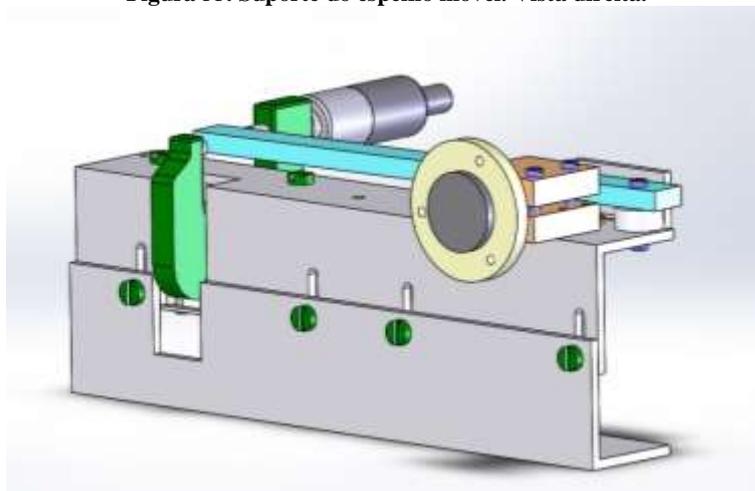


Figura 56 Suporte do espelho móvel. Vista esquerda.

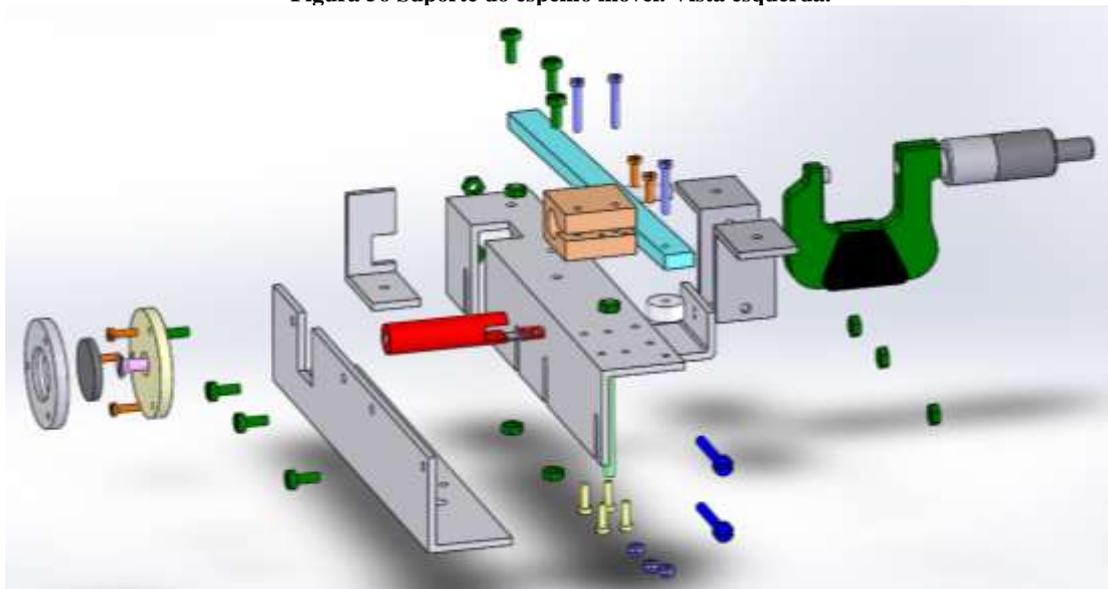


Figura 57 Suporte do espelho móvel. Vista explodida.

Unidade: mm

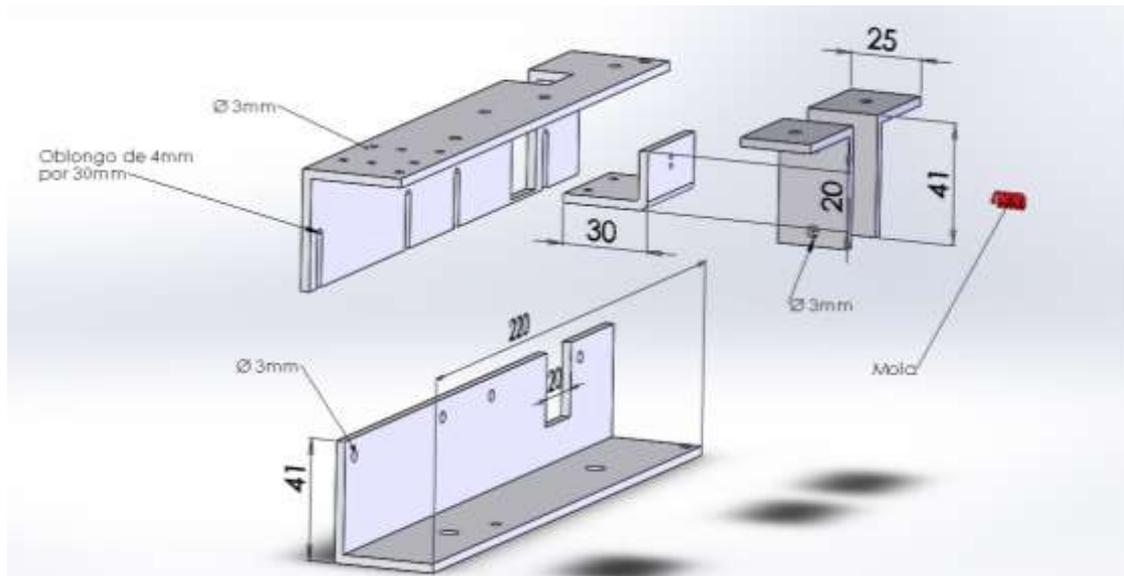


Figura 58. Suporte do espelho móvel. Vista explodida com medidas

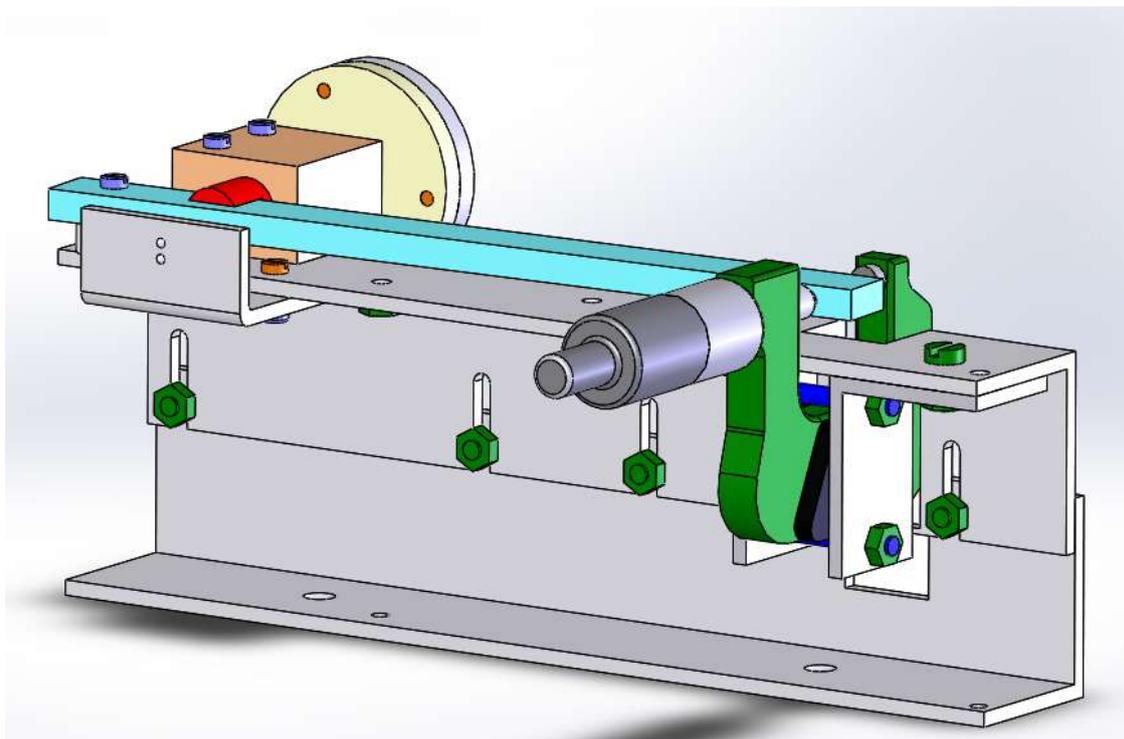


Figura 59. Suporte do espelho móvel. Vista de trás.

Unidade: mm

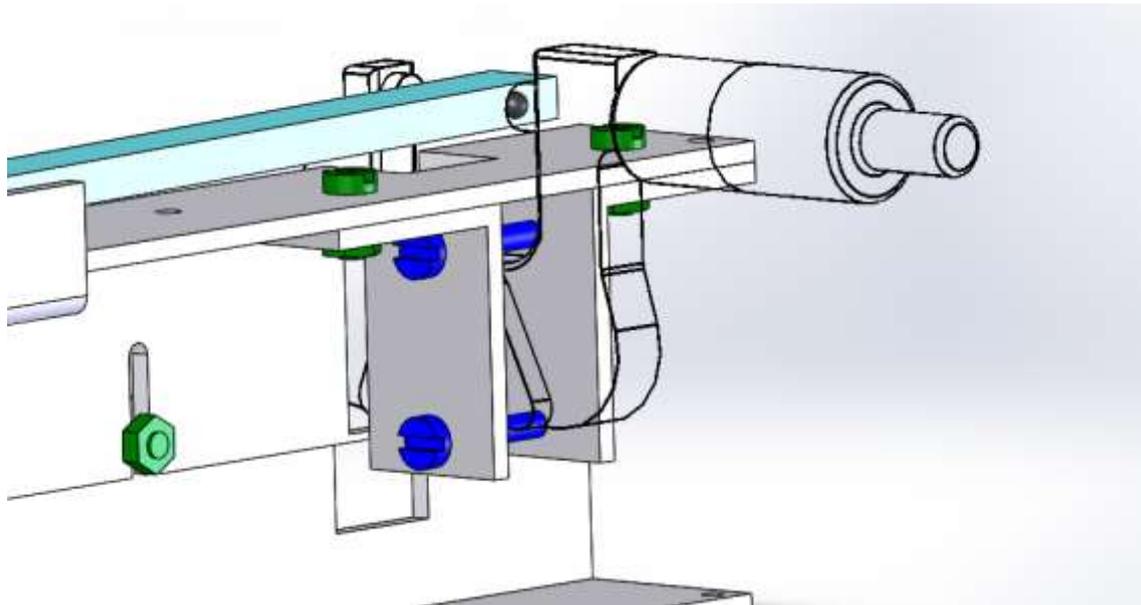


Figura 60. Suporte do espelho móvel. Detalhe do suporte do micrômetro.

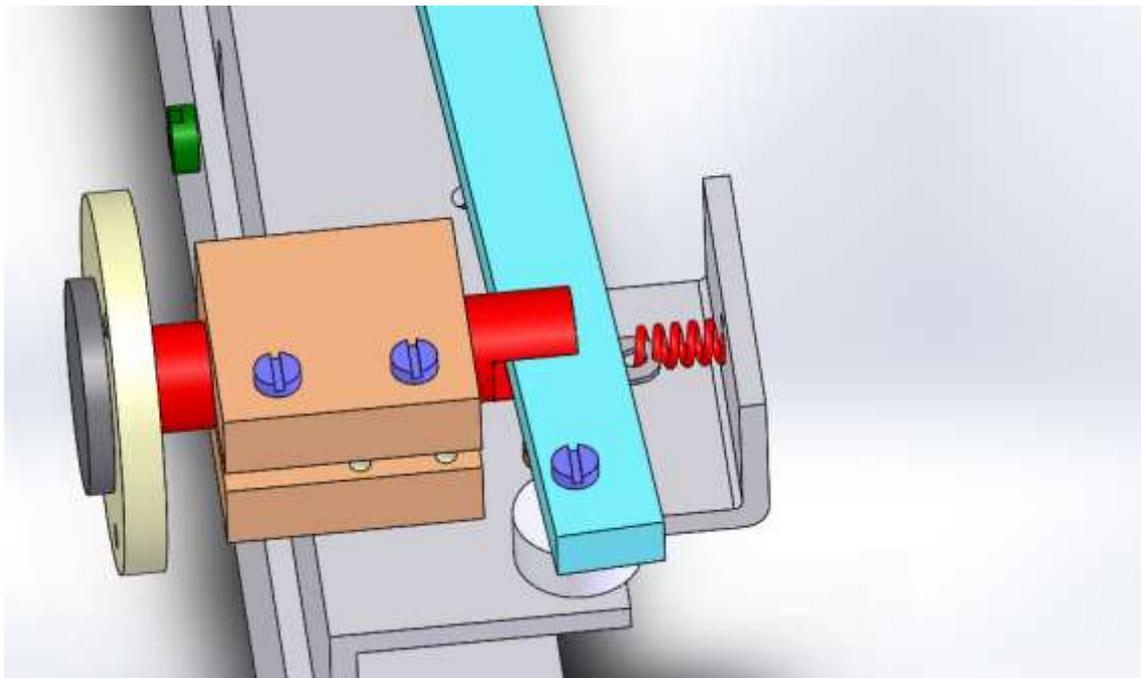


Figura 61. Suporte do espelho móvel. Detalha pra o guia do espelho com mola de retorno.

Unidade: mm

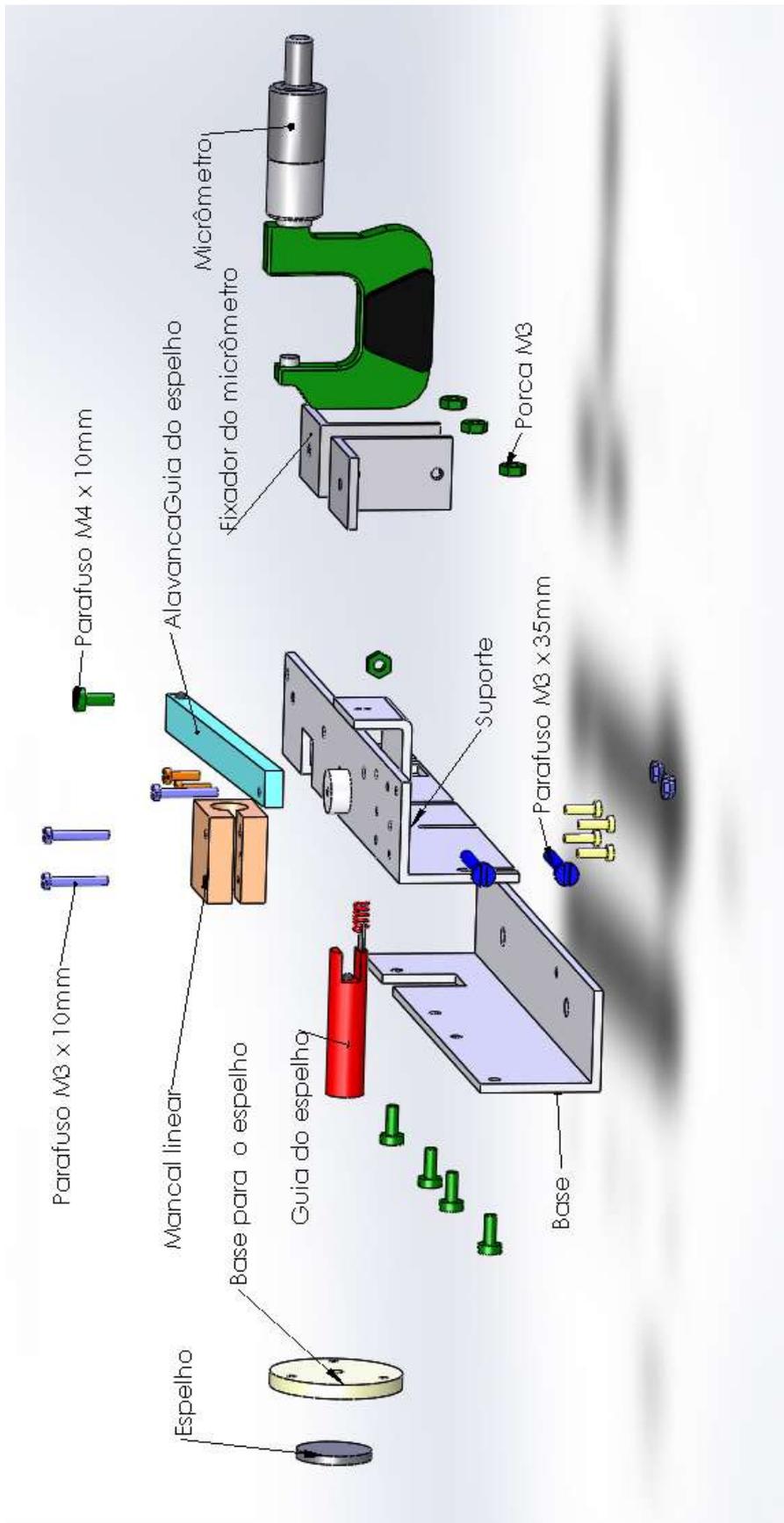


Figura 62. Suporte do espelho móvel. Vista explodida descritiva.

Unidade: mm

7.9 Desenho do suporte do disco de espelho de HD

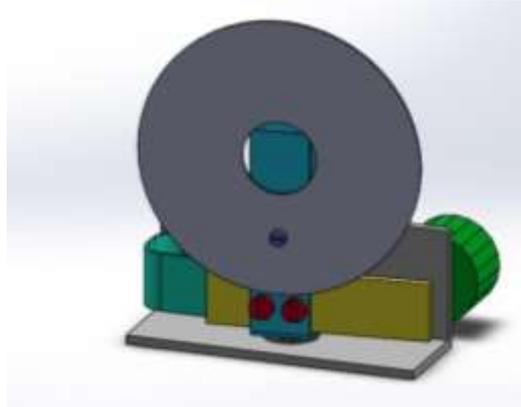


Figura 63. Suporte do espelho de Hd. Vista frontal.

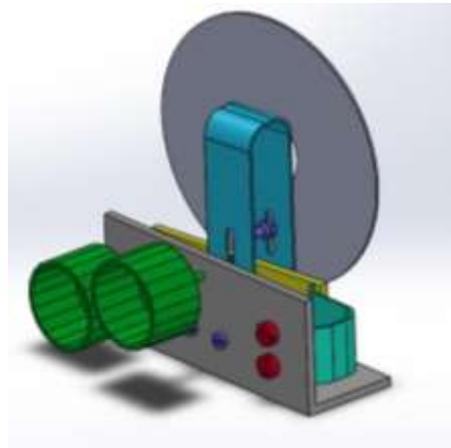


Figura 64 Suporte do espelho de Hd. Vista de trás.

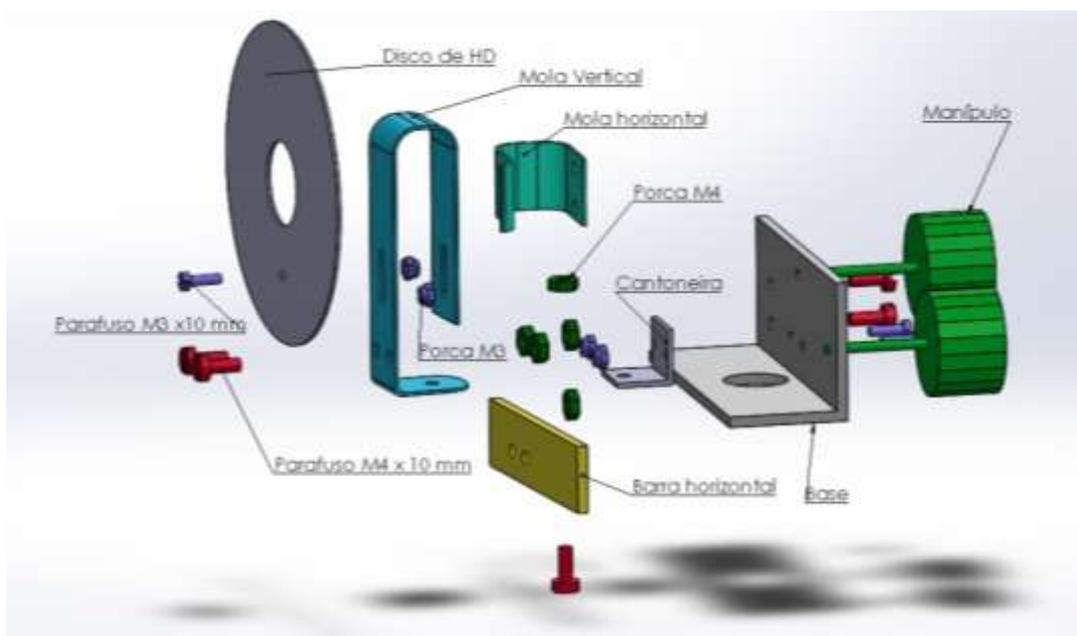


Figura 65 Suporte do espelho de Hd. Vista explodida com descrição.

Unidade: mm

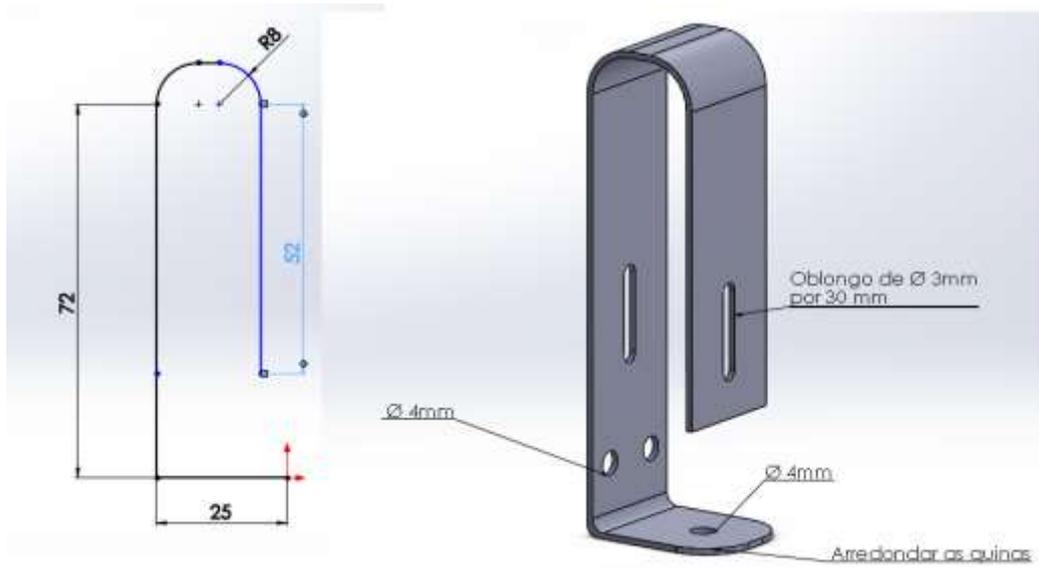


Figura 66. Suporte do espelho de Hd. Detalhes da mola vertical.

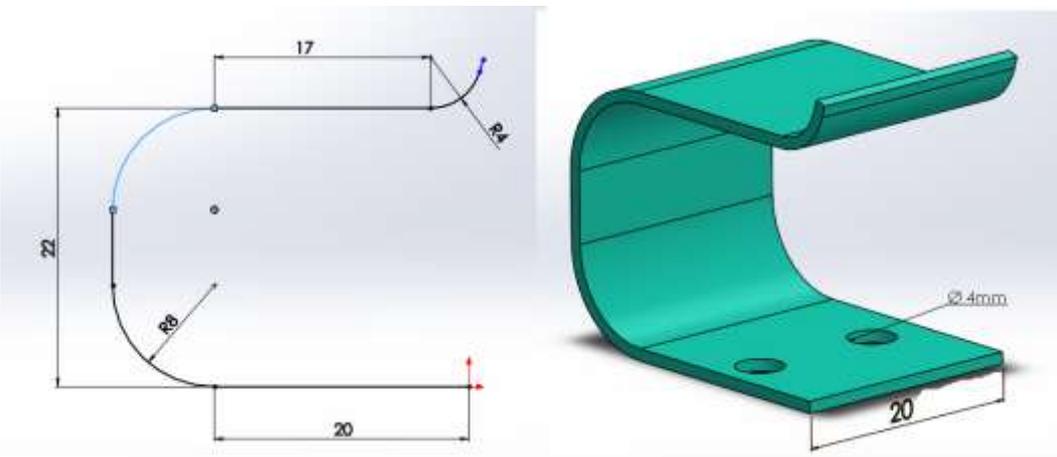


Figura 67 Suporte do espelho de Hd. Detalhes da mola horizontal.

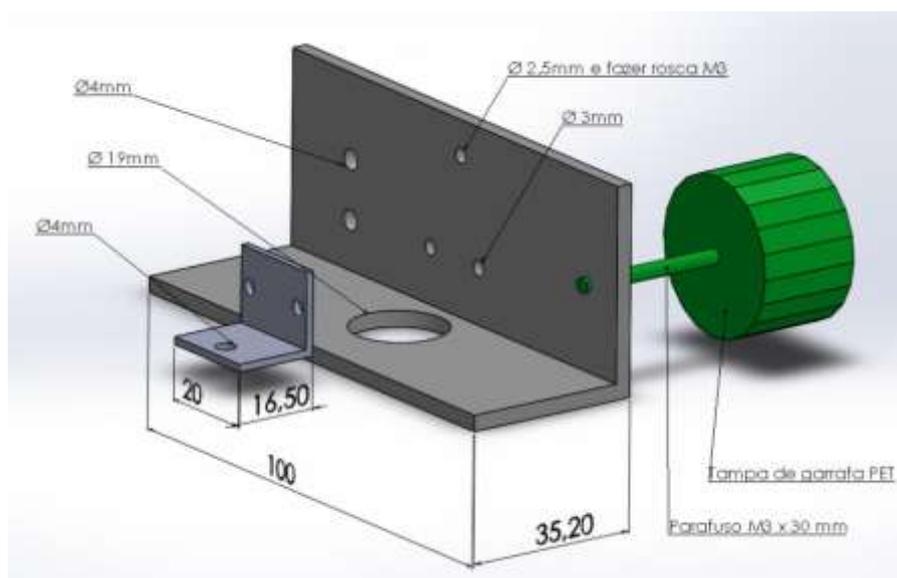


Figura 68 Suporte do espelho de Hd. Medidas da base.

Unidade: mm

7.10 Desenho do suporte do espelho de máquina copiadora (Xerox)

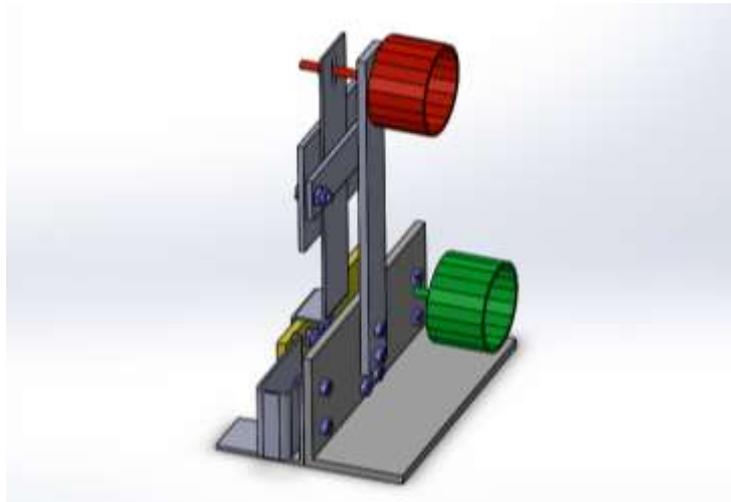


Figura 69. Suporte de espelho de máquina de Xerox. Vista frontal.

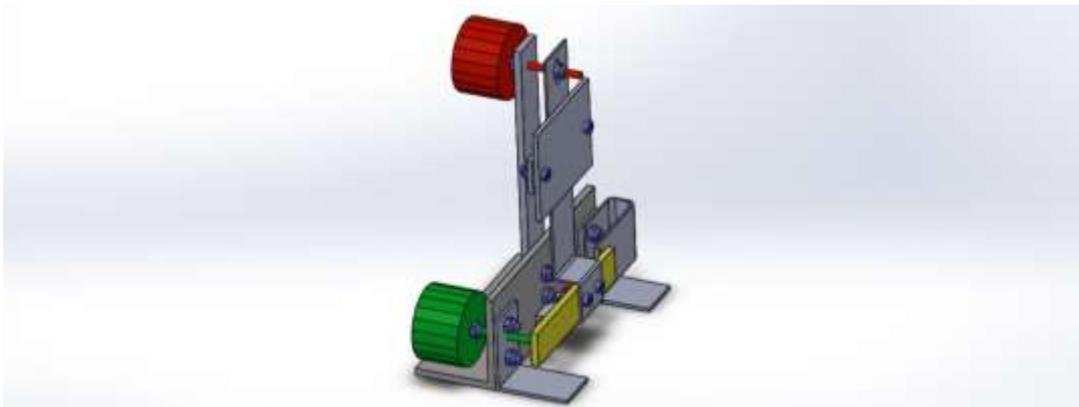


Figura 70. Suporte de espelho de máquina de Xerox. Vista lateral esquerda.

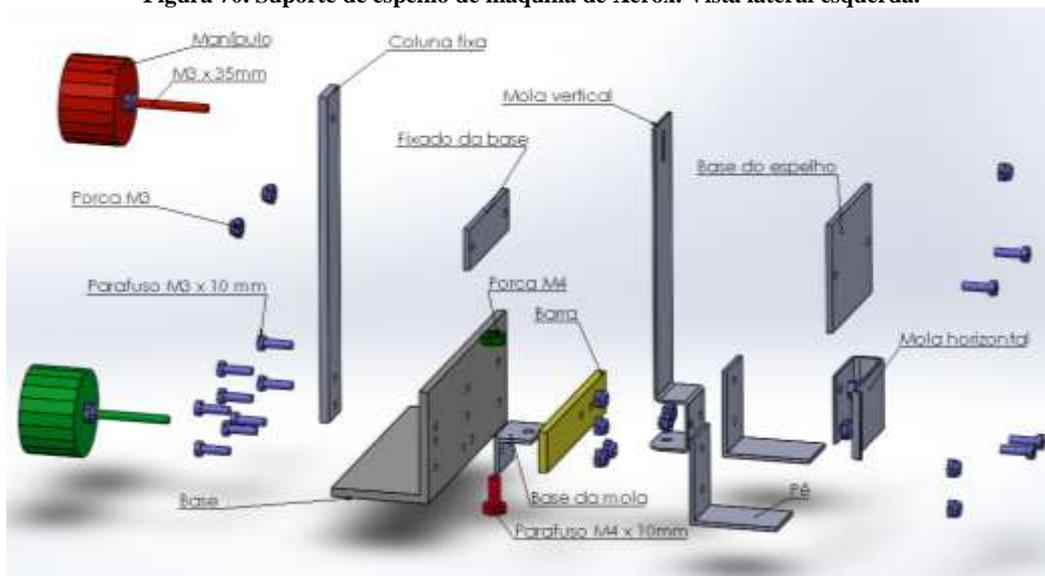


Figura 71. Suporte de espelho de máquina de Xerox. Vista explodida descritiva.

Unidade: mm

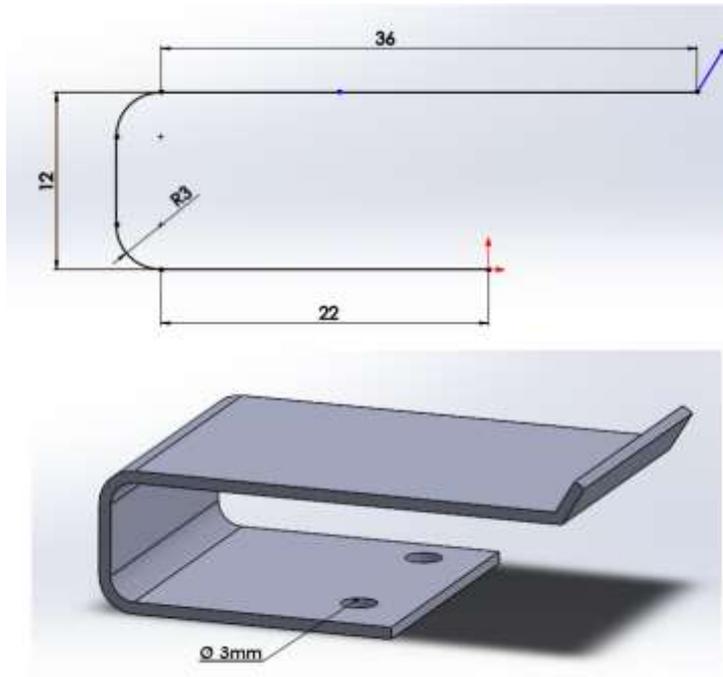


Figura 72. Suporte de espelho de máquina de Xerox. Vista detalha da mola horizontal.

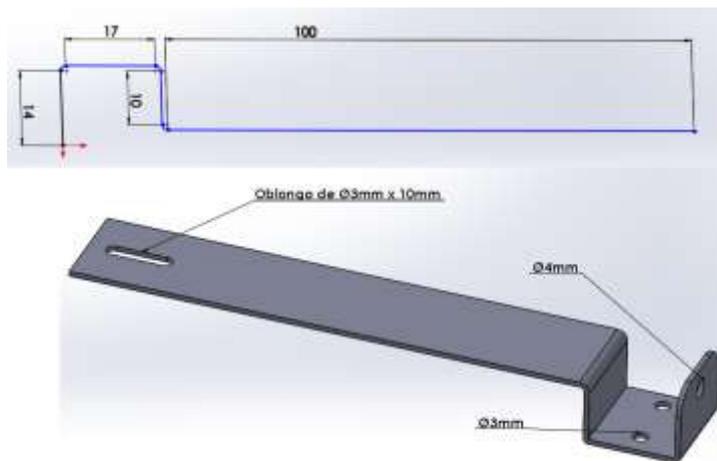


Figura 73. Suporte de espelho de máquina de xerox. Vista detalhada da mola vertical.

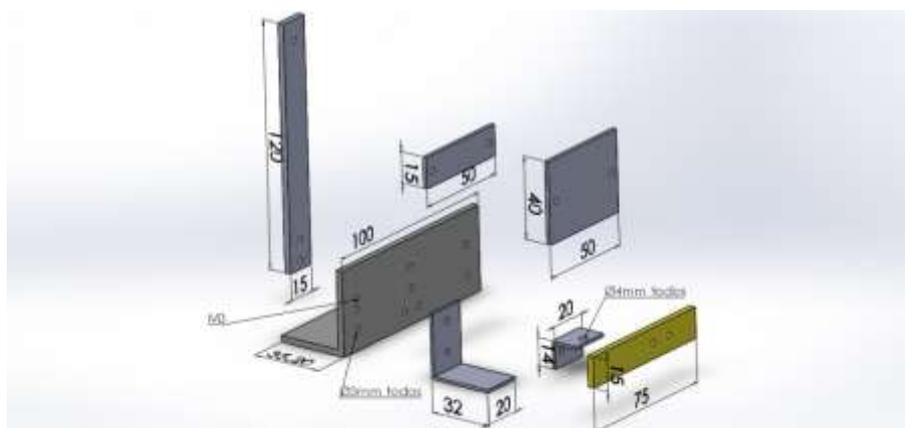


Figura 74. Suporte de espelho de máquina de xerox. Vista explodida com medidas.

Unidade: mm

7.11 Desenho do suporte da lente

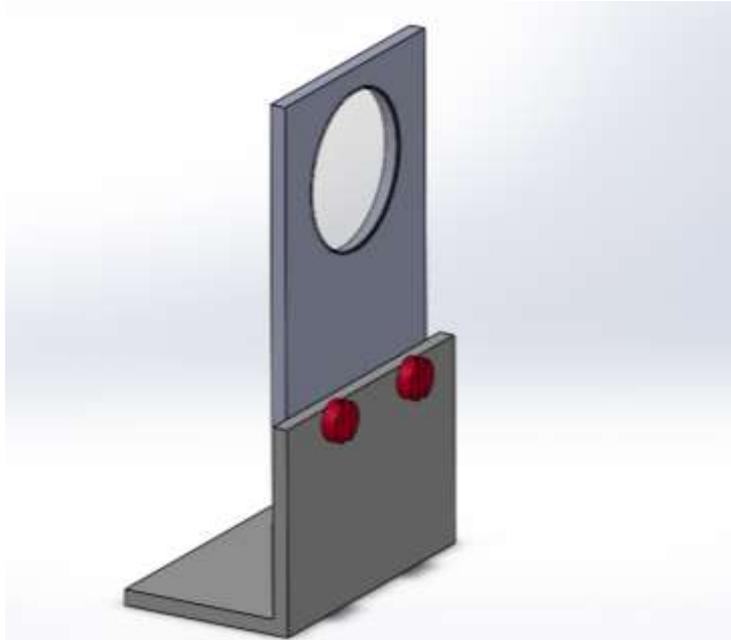


Figura 75. Suporte da lente. Vista frontal.

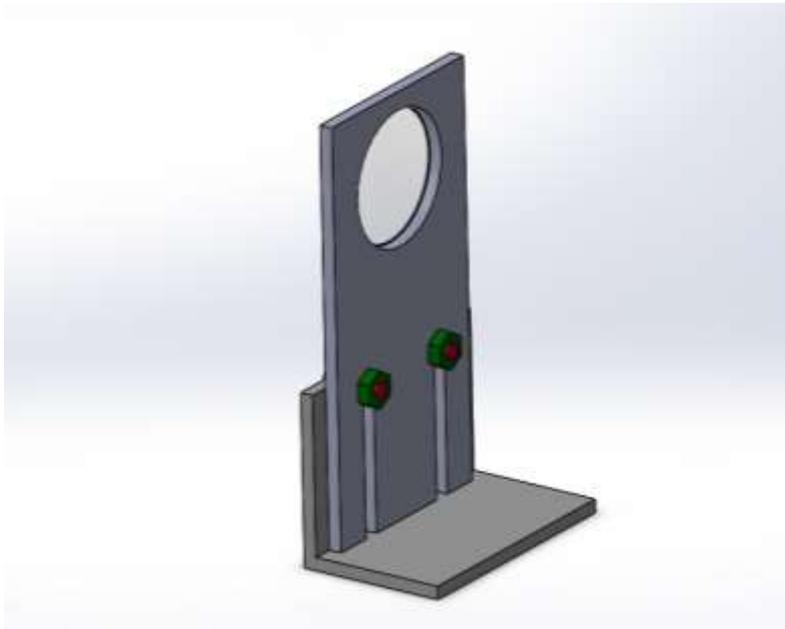


Figura 76. Suporte da lente. Vista de trás.

Unidade: mm

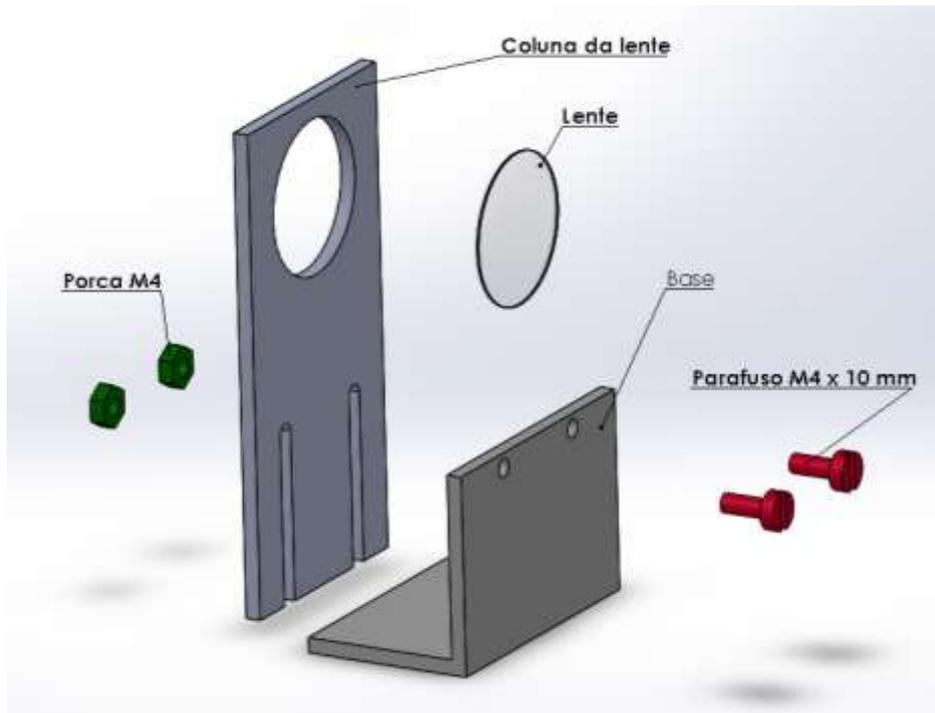


Figura 77. Suporte da lente. Vista explodida descritiva.

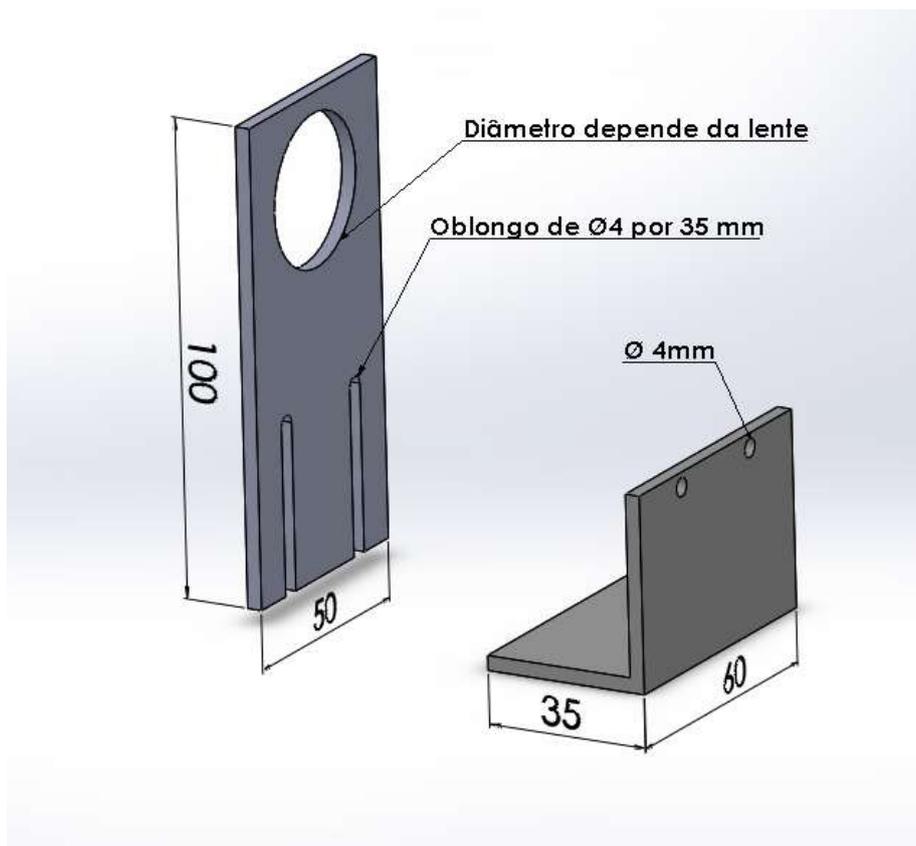


Figura 78. Suporte da lente. Vista explodida com medidas.

Unidade: mm

7.12 Desenho da célula de Ar

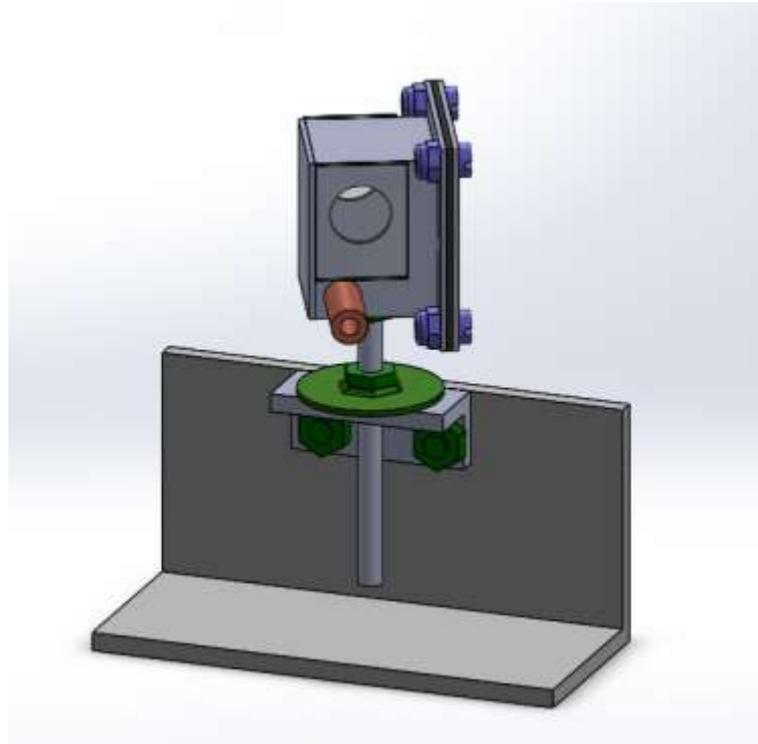


Figura 79. Célula de Ar. Vista frontal.

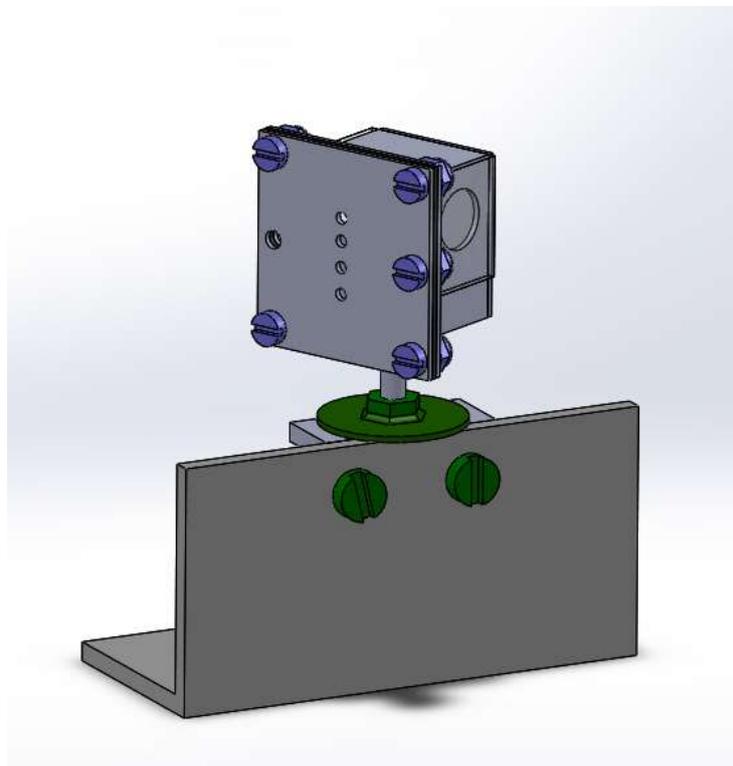


Figura 80. Célula de Ar. Vista de trás.

Unidade: mm

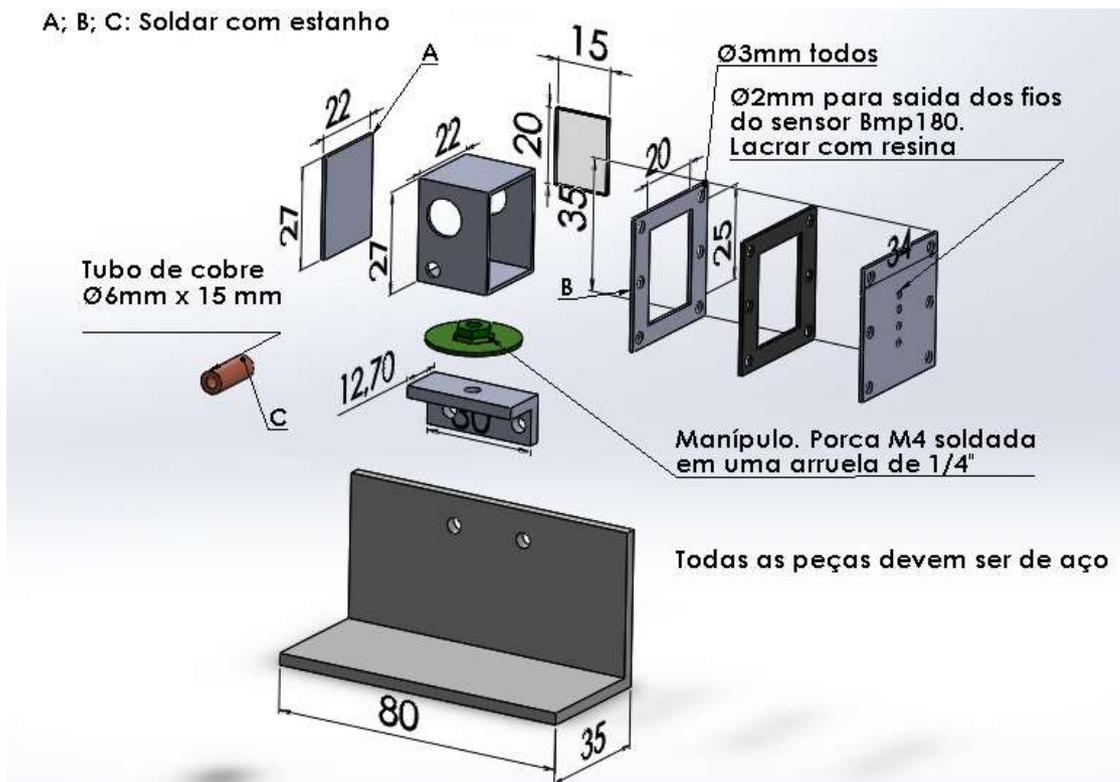


Figura 81. Célula de Ar. Vista explodida com medidas.

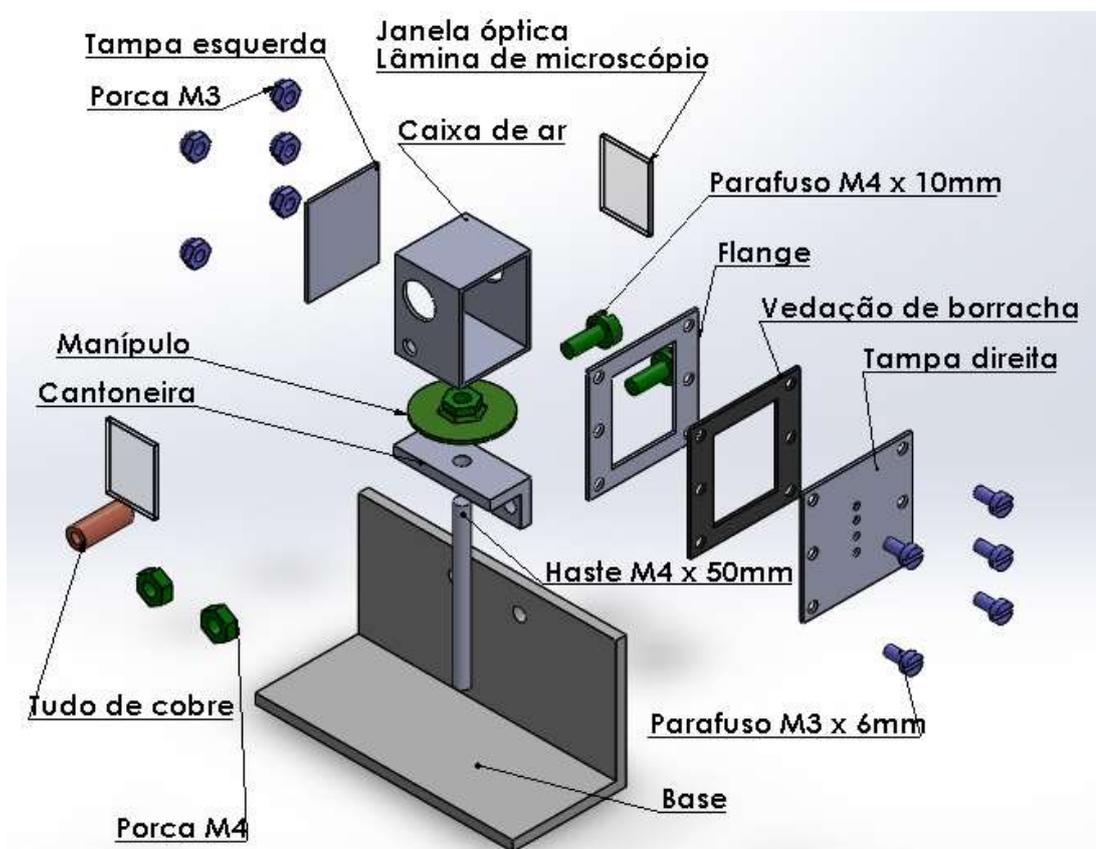


Figura 82. Célula de Ar. Vista explodida descritiva.

Unidade: mm

7.13 Desenho do suporte do piezelétrico

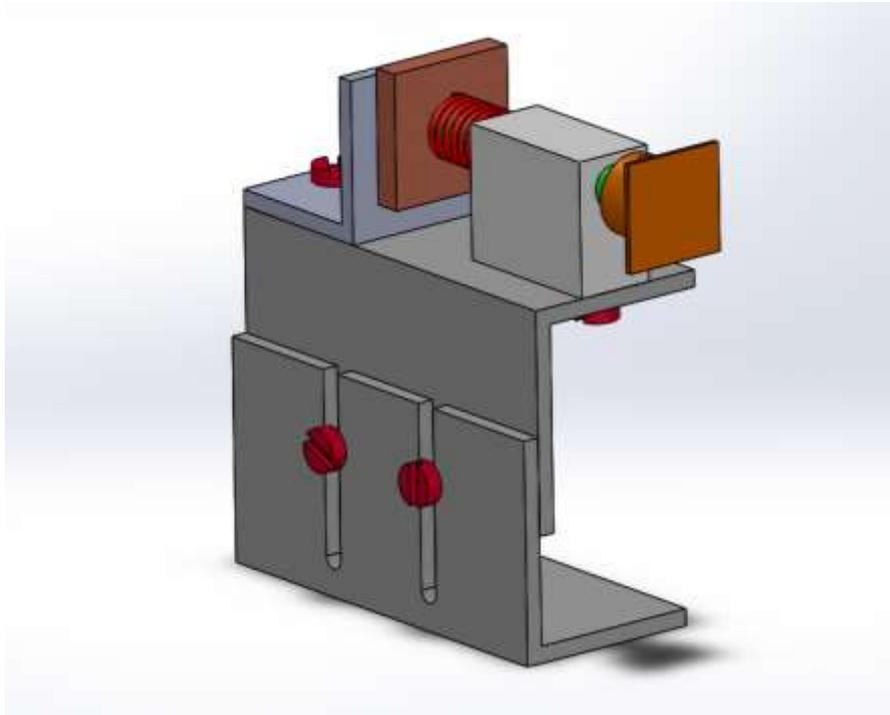


Figura 83. Suporte do cristal piezoelétrico. Vista frontal.

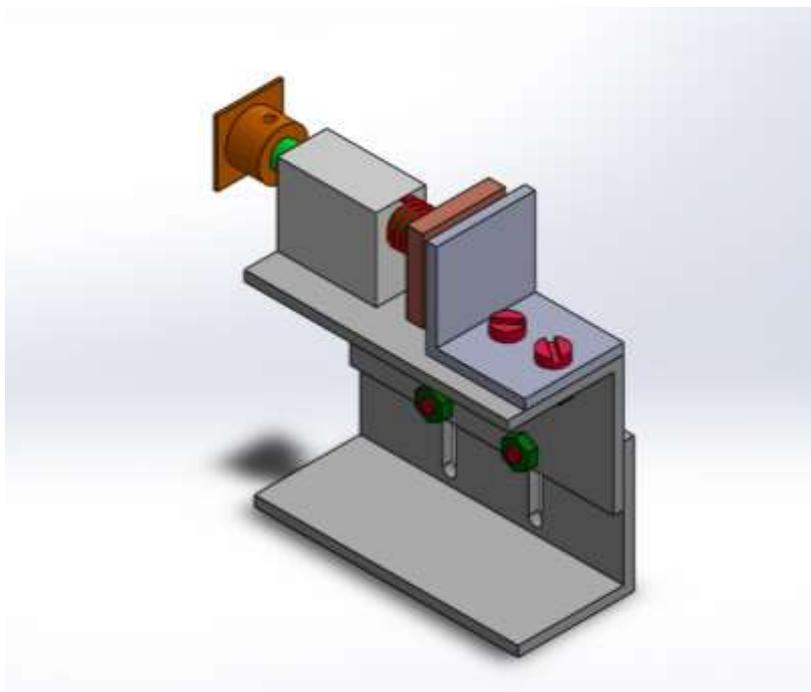


Figura 84. Suporte do cristal piezoelétrico. Vista de trás.

Unidade: mm

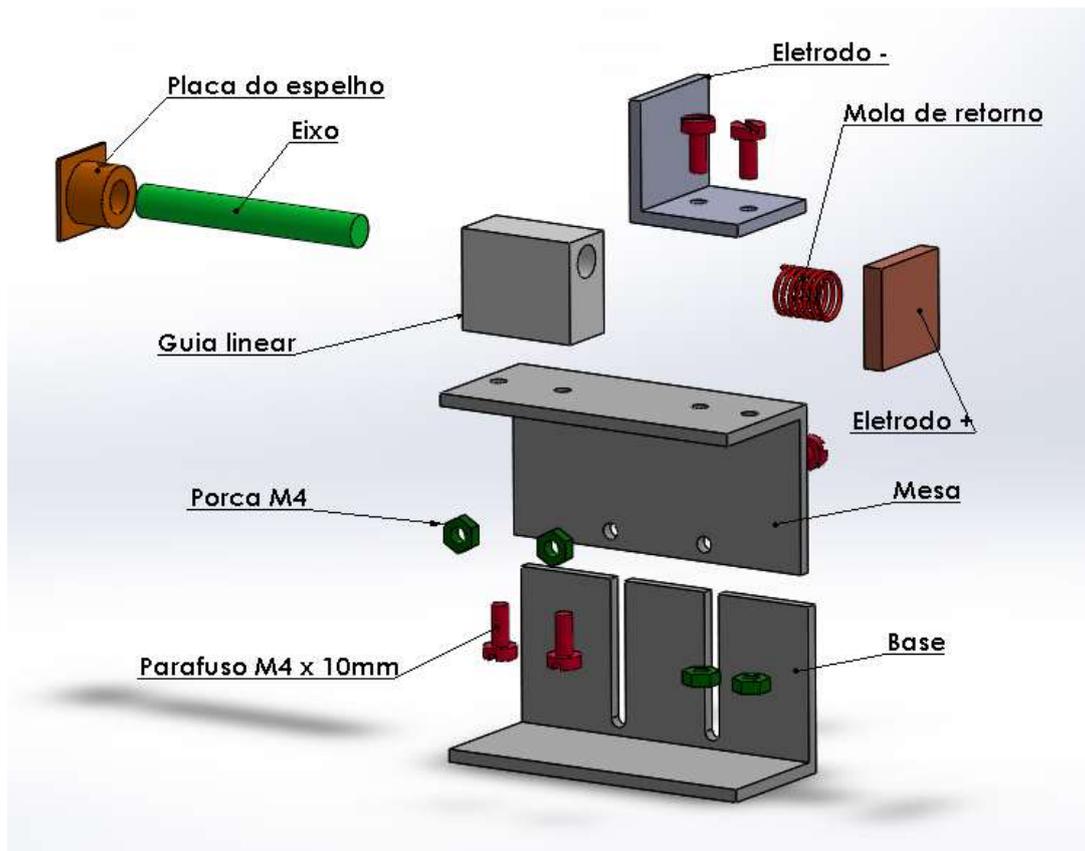


Figura 85. Suporte do cristal piezoelétrico. Vista explodida descritiva.

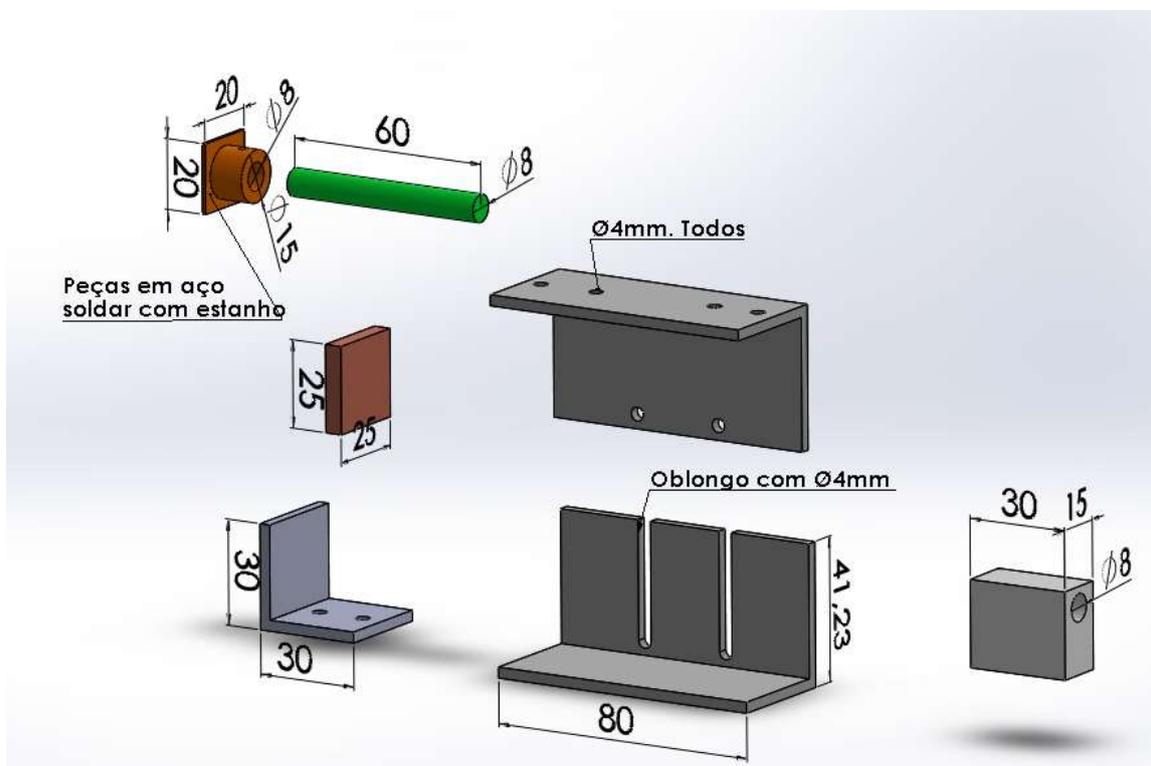


Figura 86. Suporte do cristal piezoelétrico. Vista explodida com medidas.

Unidade: mm

7.14 Desenho do interferômetro completo

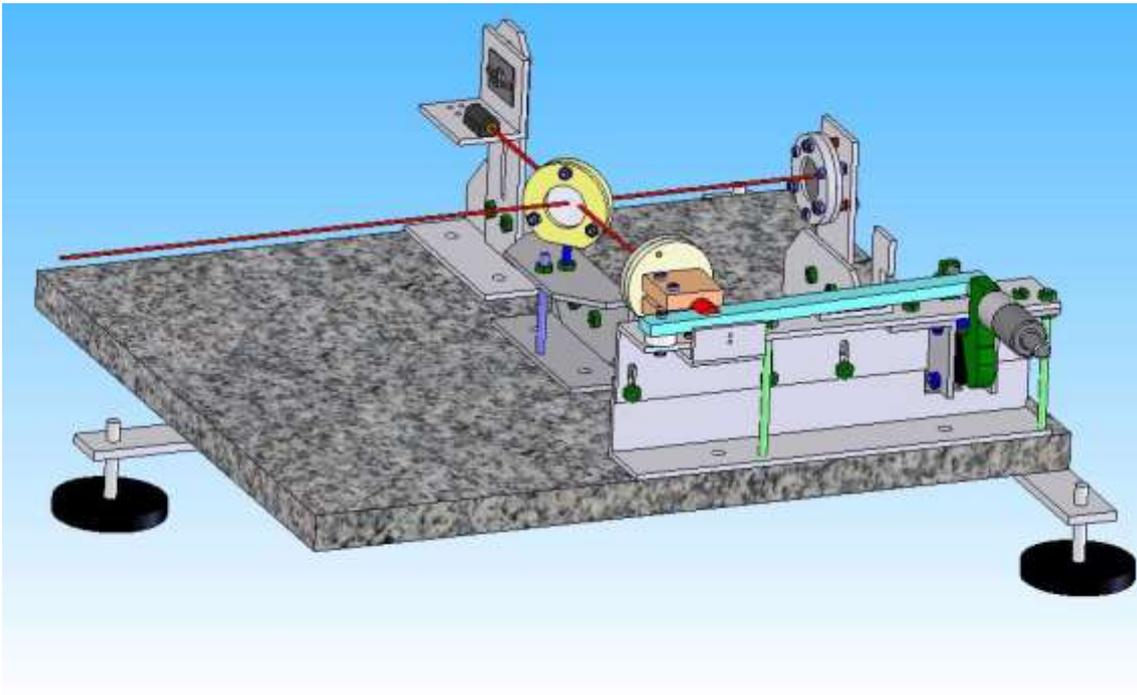


Figura 87. Primeira versão. Vista frontal.

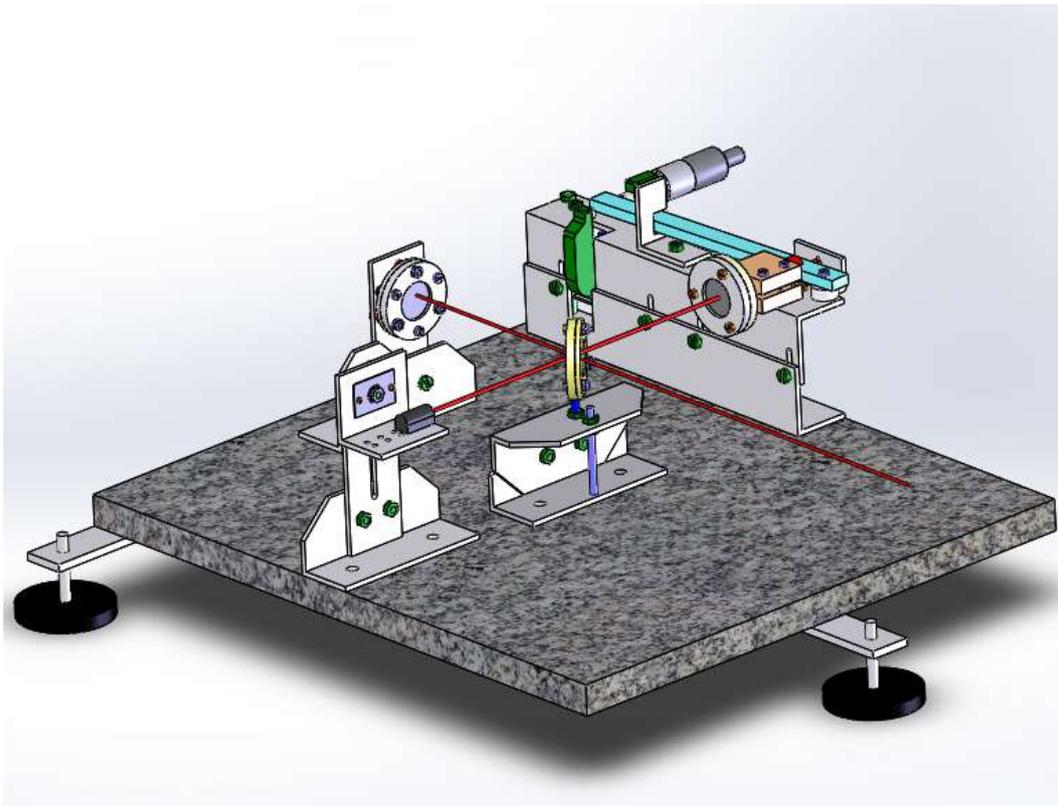


Figura 88. Primeira versão. Vista lateral

Unidade: mm

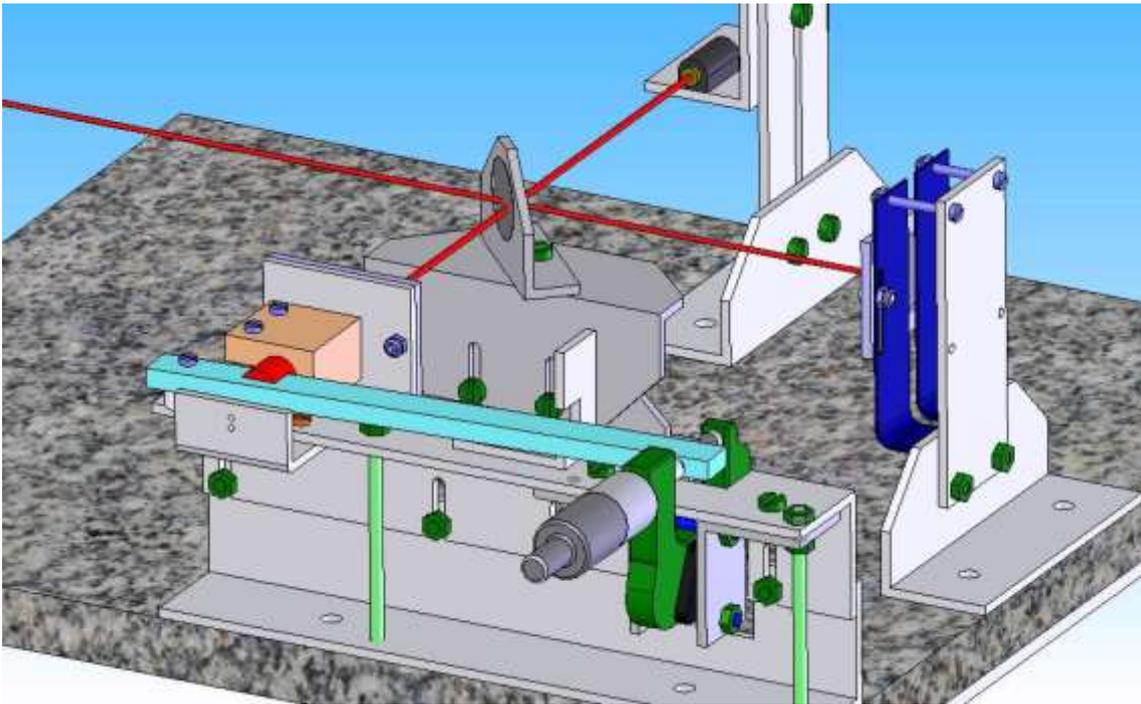


Figura 89. Segunda versão. Vista frontal

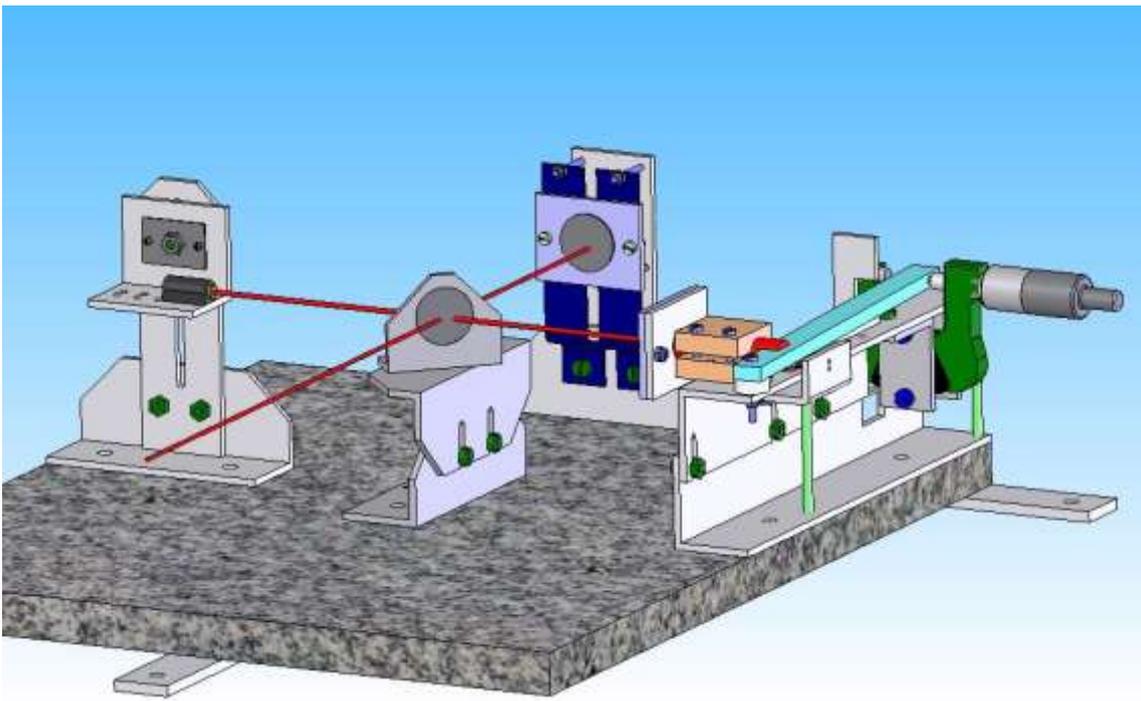


Figura 90. Segunda versão. Vista lateral direita.

Unidade: mm

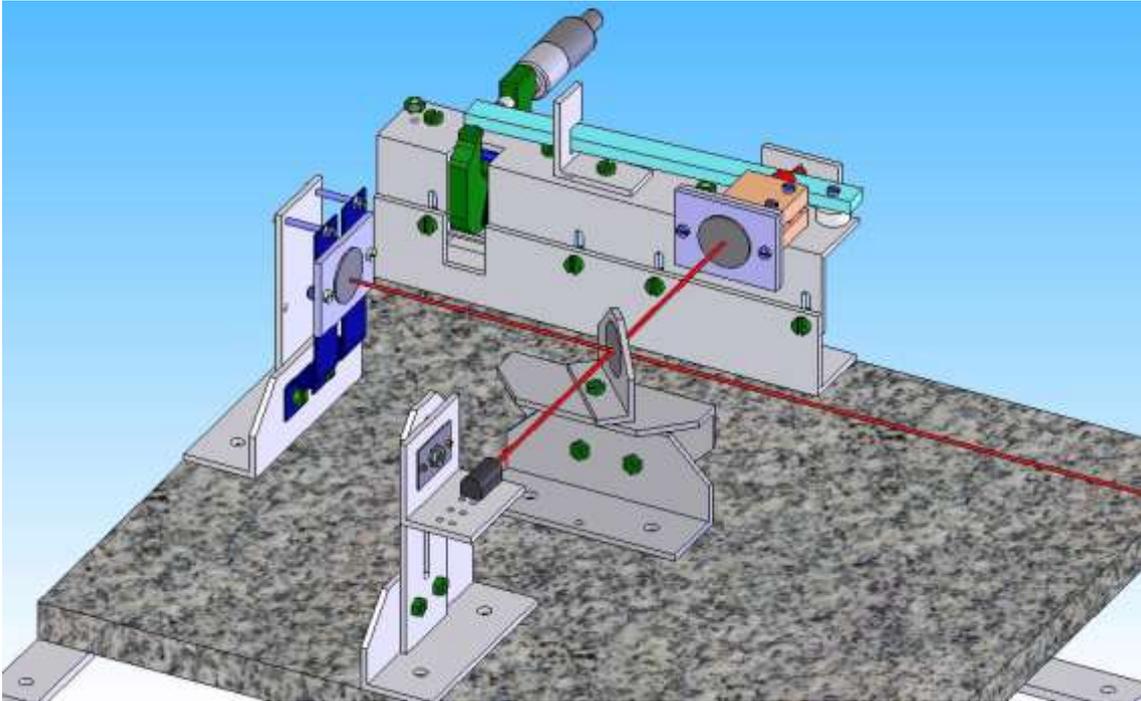


Figura 91. Segunda versão. Vista lateral esquerda.

Unidade: mm

7.15 Foto do interferômetro foto da versão final



Figura 92. Interferômetro completo. 1



Figura 93. Interferômetro completo. 2



Figura 94. Interferômetro completo. 3



Figura 95. Interferômetro completo. 4

7.16 Foto do suporte de espelho de disco de Hd

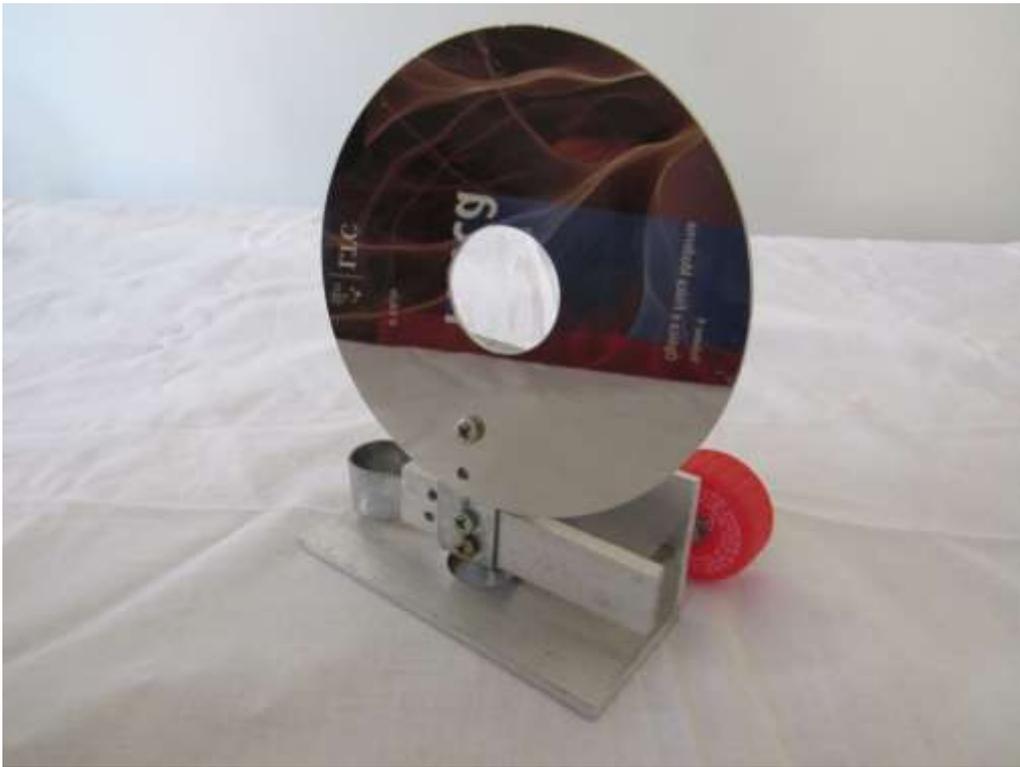


Figura 96. Suporte do espelho de Hd. Vista frontal.



Figura 97. Suporte do espelho de Hd. Vista de trás.

7.17 Foto do suporte do laser com circuito regulador de tensão



Figura 98. Suporte do laser com circuito regulador de tensão. Vista frontal.

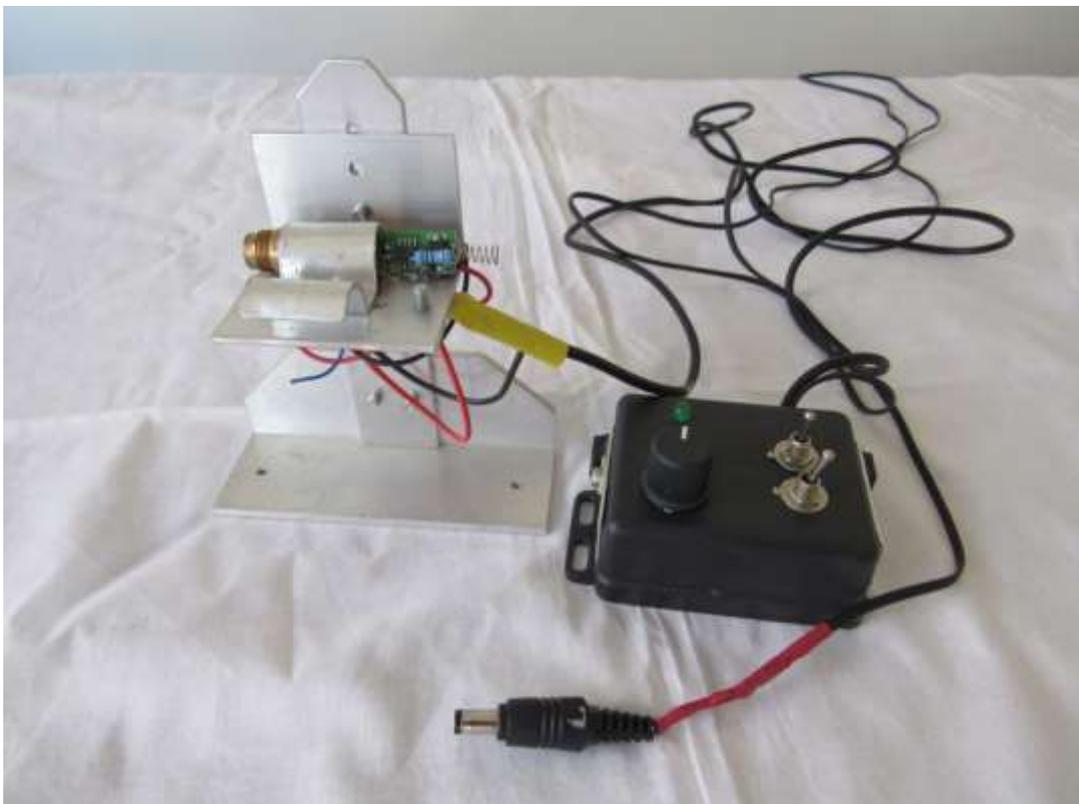


Figura 99. Suporte do laser com circuito regulador de tensão. Vista lateral.

7.18 Foto do suporte da lâmina de microscópio



Figura 100. Suporte da lâmina de microscópio. Vista frontal.



Figura 101. Suporte da lâmina de microscópio. Vista da lateral esquerda.

7.19 Foto do suporte do espelho de fotocopidora



Figura 102. Suporte do espelho de maquina fotocopidora. Vista frontal.



Figura 103. Suporte do espelho de maquina fotocopidora. Vista de trás.

7.20 Foto do suporte do espelho móvel com espelho de fotocopiadora



Figura 104. Suporte do espelho móvel. Vista frontal.

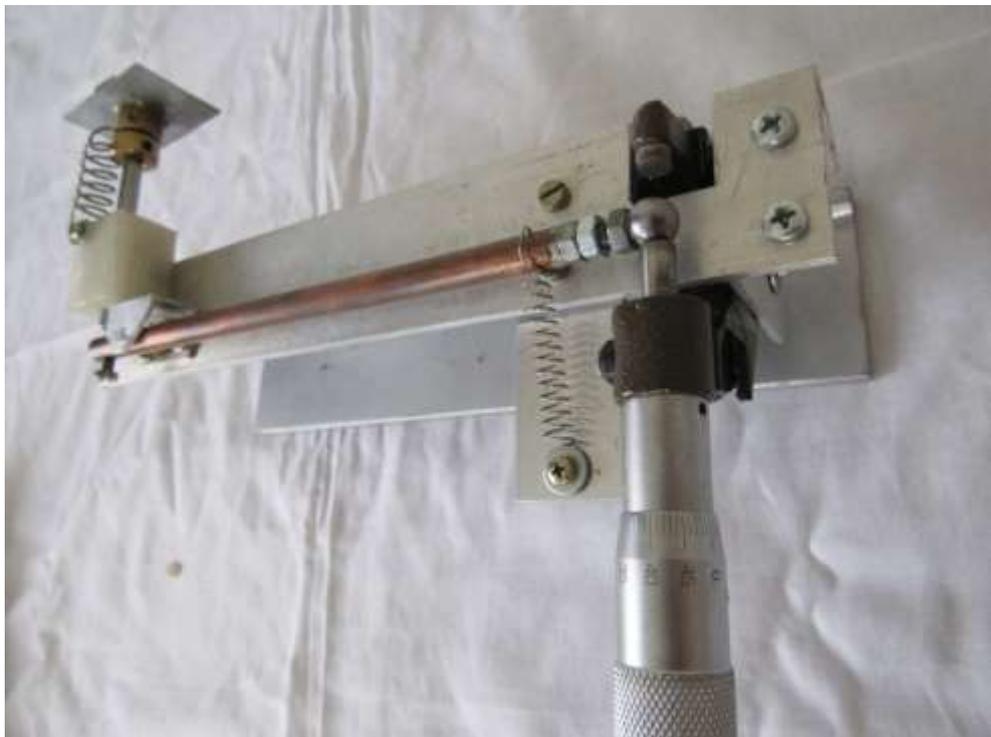


Figura 105. Suporte do espelho móvel. Vista superior.

7.21 Foto do suporte da lente



Figura 106. Suporte da lente. A direita lente côncava. A esquerda lente convexa.

7.22 Foto da célula de Ar



Figura 107. Célula de Ar, com seringa para vácuo e mangueira de borracha.



Figura 108. Célula de Ar, destaque para a janela óptica feita com lâmina de microscópio.

7.23 Diagrama elétrico do regulador de tensão do LASER

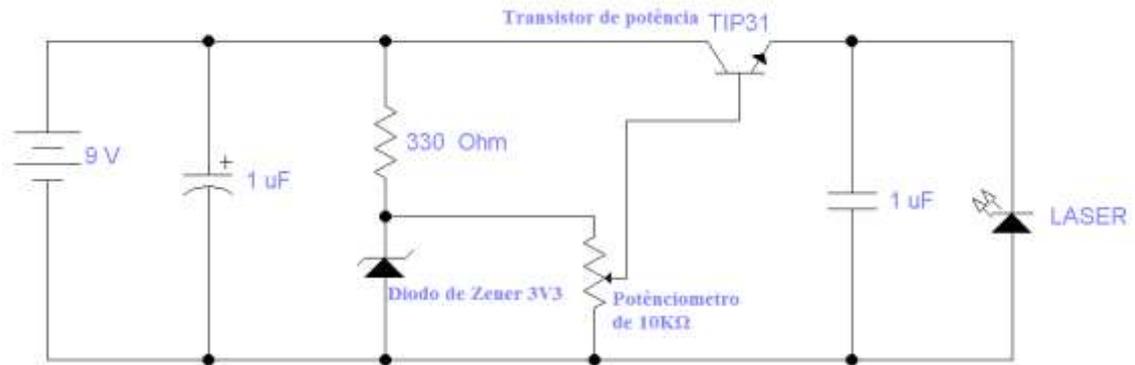


Figura 109. Diagrama elétrico do circuito regulador de tensão.

7.24 Roteiro didático – Medida do comprimento de onda do LASER

Roteiro didático para aplicação do equipamento “Interferômetro”

Medindo o comprimento de onda do LASER

Professor: Hercílio P. Cordova.

Data ___/___/___

Nome:..... n°.....

Nome:..... n°.....

Nome:..... n°.....

Objetivos: Apresentar os conceitos envolvidos no interferômetro de Michelson, seu contexto histórico e suas funções como ferramenta de medidas da ordem do nano metro. Aplicando as propriedades de interferência da luz, reflexão, espelhos e lentes.

Como faremos? Utilizando um equipamento, chamado interferômetro e com uma configuração de espelhos de forma que um feixe de LASER é dividido em dois feixes, para posteriormente serem combinados formando uma figura de interferência construtiva e destrutiva.

Fundamentação teórica: Interferômetro pode ser definido como um equipamento que faz uso das interações de interferências de ondas eletromagnéticas para realizar medidas.

Utilizando uma fonte de luz coerente e monocromática na forma de feixe, o interferômetro faz uso de um divisor de feixe, que consiste em um semi-espelho, que reflete 50% do raio incidente e deixa passar ou transmitir os outros 50%. Cada feixe percorre um trajeto diferente, o qual é chamado de caminho óptico.

Em cada caminho óptico o feixe é refletido de volta pelo mesmo caminho por um espelho, assim os dois feixes retornarão ao divisor de feixe sendo novamente uma parcela transmitida e outra refletida. A parcela transmitida retorna a fonte, a parcela refletida é direcionada a um anteparo, que pode ser uma tela de projeção, parede ou qualquer superfície que permita visualizar o feixe. Veja a figura 1 abaixo.

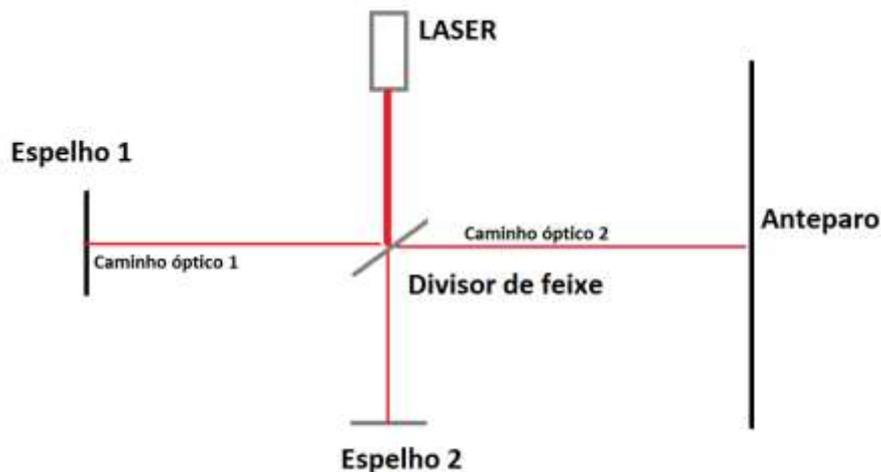


Figura 1. Interferômetro de Michelson

Ao se encontrarem no anteparo cada feixe de luz sofre interferência, que pode ser construtiva ou destrutiva.

Interferência construtiva: Considerando a luz uma onda, e estando em fase, a interação de duas ondas resulta em uma soma de amplitudes, que no interferômetro é visualizado como um anel ou barra mais intensa.

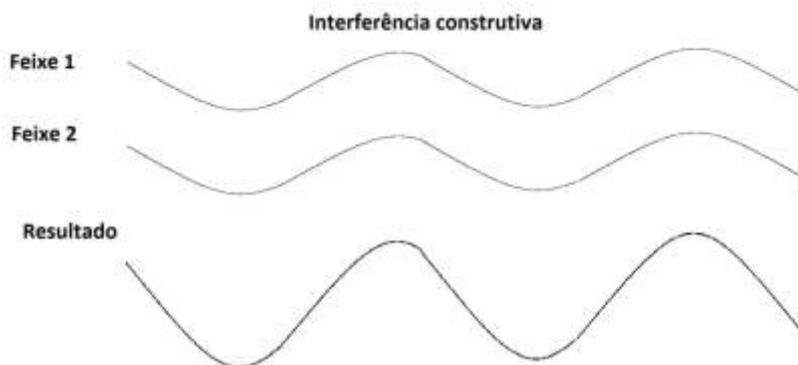


Figura 2. Interferência construtiva entre ondas

Interferência destrutiva: Considerando a mesma situação, mas as ondas estando fora de fase a resultante é nula, ou seja, é visualizada como a ausência de luz, como barras ou anéis escuros.



Figura 3. Interferência destrutiva entre ondas

Olhando o anteparo de frente devemos ver uma figura com anéis concêntricos ou barras paralelas.



Figura 4. Anéis concêntricos e barras paralelas

A propriedade de medida do interferômetro encontra-se no fato que sempre que um dos caminhos ópticos sofre uma alteração de comprimento igual a meio comprimento de onda da luz usada, os anéis ou barras a qual chamaremos de franjas sofrem um deslocamento (como se andassem). Assim no caso dos anéis concêntricos o ponto escuro no meio se torna claro, caso haja mais uma mudança no caminho igual a meio comprimento de onda ele voltara a ser escuro.

Contando o número de mudança de claro → escuro → claro, temos uma forma de realizar medidas com uma alta precisão.



Figura 5. Interferômetro de Michelson

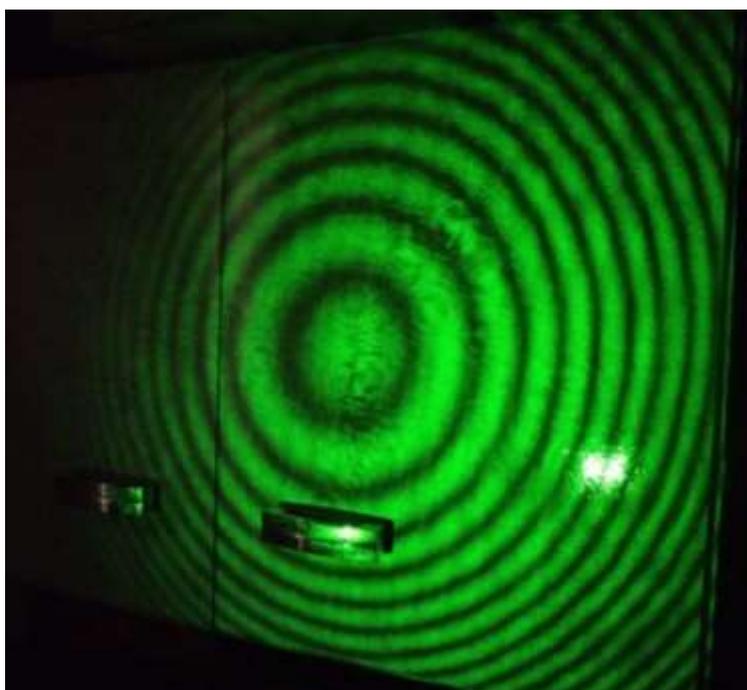


Figura 6. Imagem de interferência

Medida do Comprimento de onda do LASER

Utilizando as propriedades da interferência entre onda, vamos medir o comprimento de onda do LASER usado no interferômetro. O fabricante diz que esse comprimento é de 532nm, contudo o diodo LASER pode ter uma variação de $\pm 10\text{nm}$, ou seja, o comprimento pode ir de 442 a 522 nm.

Como faremos a medida? Em primeiro vamos estabilizar a figura de interferência, e usando o micrômetro vamos medir o deslocamento do espelho que está no caminho óptico do feixe transmitido. Assim o caminho óptico vai sofrer uma alteração, que resulta na mudança dos anéis ou franjas de interferência.

Para chegar ao valor do comprimento de onda vamos usar as seguintes operações:

- Estabilizar imagem de interferência.
- Anotar o valor em que se encontra o micrometro.
- Girar lentamente tambor do micrometro e contar o numero de franjas que mudaram.
- Quando chegar a 100 alterações ou mais, parar de girar o tambor.
- Anotar o valor final.

Com esses dois dados, o numero de franjas e os valores final e inicial, vamos fazer as seguintes considerações:

Varição do micrômetro = Valor final – valor inicial $\rightarrow \Delta d = |df - di|$

Devemos considerar que o feixe que reflete no espelho móvel passa duas vezes pelo mesmo caminho, assim temos que o comprimento de onda seja duas vezes o caminho real que o espelho foi movimentado dividido pelo numero de franjas:

$$\text{Sendo:}$$
$$\lambda = \frac{3}{16} \frac{(\Delta L \cdot 10^{-5})}{n}$$

λ = comprimento de onda do LASER em metros.

ΔL = Diferença lida no colar graduado do micrometro. Posição final (Pf) – Posição inicial (Pi),

10^{-5} = Relação para equivalência para a unidade de metro. Pois o colar está na escala de 10^{-2} mm e o micrometro em escala de mm (10^{-3}), assim tem-se: $1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-5}$

n = Numero de franjas que se deslocaram durante a medida.

$3/16$ = Produto dos dois caminhos ópticos (2) pelo fator de redução do braço de alavanca (3/32).
Temos $2 \cdot 3/32 = 3/16$

Anotações das medidas

1° medida

di =

df =

n =

λ =

2° medida

di =

df =

n =

λ =

3° medida

di =

df =

n =

λ =

7.25 Circuito do módulo Arduino de leitura da Célula de Ar

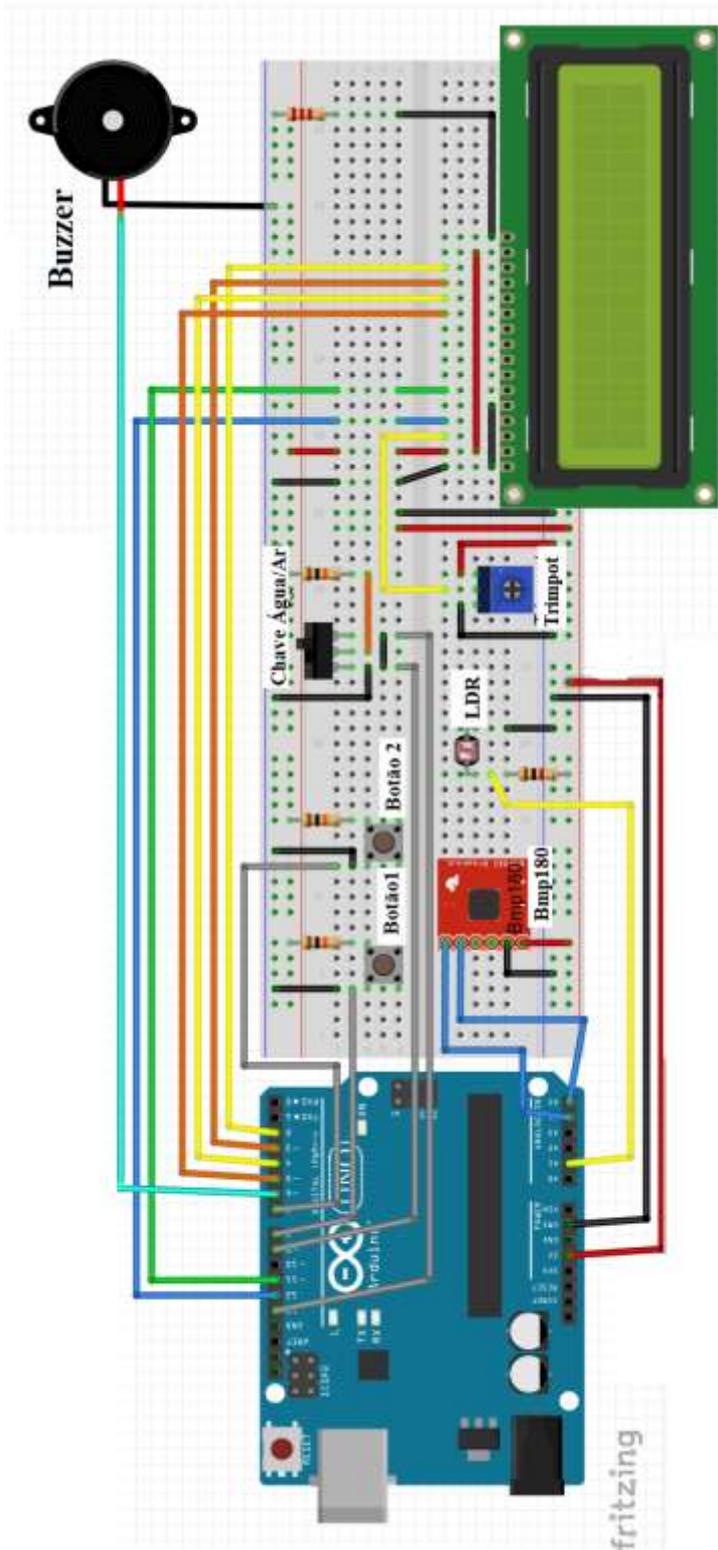


Figura 110. Diagrama de montagem do módulo Arduino.

7.26 Roteiro didático – Medida do índice de refração do ar

Roteiro didático para aplicação do equipamento “Interferômetro”

Professor: **Hercílio P. Cordova.** Data ___/___/_____

Nome:..... n°

Nome:..... n°

Nome:..... n°

Objetivos: Apresentar os conceitos envolvidos no interferômetro de Michelson, seu contexto histórico e suas funções como ferramenta de medidas da ordem do nano metro. Aplicando as propriedades de interferência da luz, reflexão, espelhos e lentes.

Como faremos? Utilizando um equipamento, chamado interferômetro e com uma configuração de espelhos de forma que um feixe de LASER é dividido em dois feixes, para posteriormente serem combinados formando uma figura de interferência construtiva e destrutiva.

Fundamentação teórica: Interferômetro pode ser definido como um equipamento que faz uso das interações de interferências de ondas eletromagnéticas para realizar medidas.

Utilizando uma fonte de luz coerente e monocromática na forma de feixe, o interferômetro faz uso de um divisor de feixe, que consiste em um semi-espelho, que reflete 50% do raio incidente e deixa passar ou transmitir os outros 50%. Cada feixe percorre um trajeto diferente, o qual é chamado de caminho óptico.

Em cada caminho óptico o feixe é refletido de volta pelo mesmo caminho por um espelho, assim os dois feixes retornarão ao divisor de feixe sendo novamente uma parcela transmitida e outra refletida. A parcela transmitida retorna a fonte, a parcela refletida é direcionada a um anteparo, que pode ser uma tela de projeção, parede ou qualquer superfície que permita visualizar o feixe. Veja a figura abaixo.

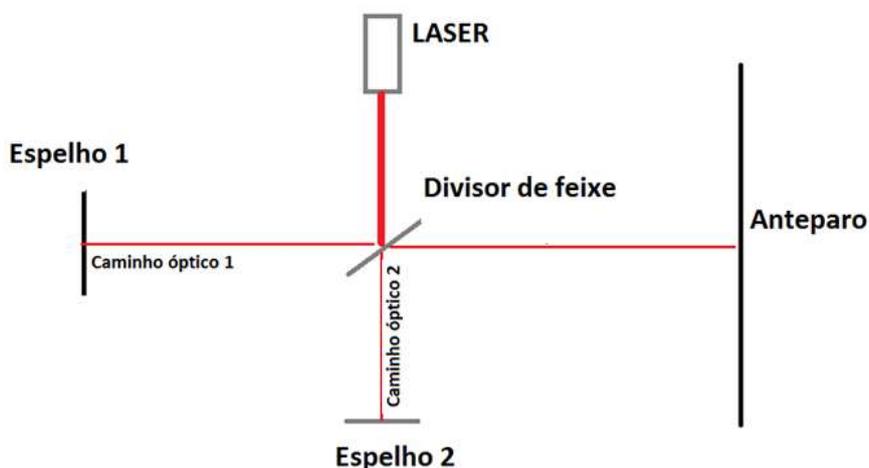


Figura 1. Interferômetro de Michelson.

Ao se encontrarem no anteparo cada feixe de luz sofre interferência, que pode ser construtiva ou destrutiva.

Interferência construtiva: Considerando a luz uma onda, e estando em fase, a interação de duas ondas resulta em uma soma de amplitudes, que no interferômetro é visualizado como um anel ou barra mais intensa.

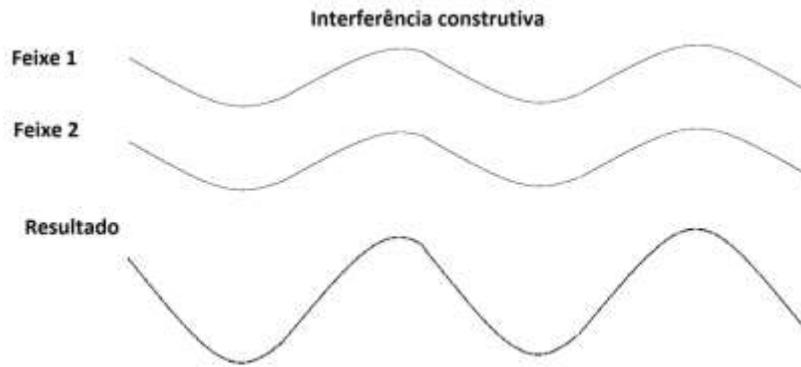


Figura 2. Interferência construtiva entre ondas

Interferência destrutiva: Considerando a mesma situação, mas as ondas estando fora de fase a resultante é nula, ou seja, é visualizada como a ausência de luz, como barras ou anéis escuros.

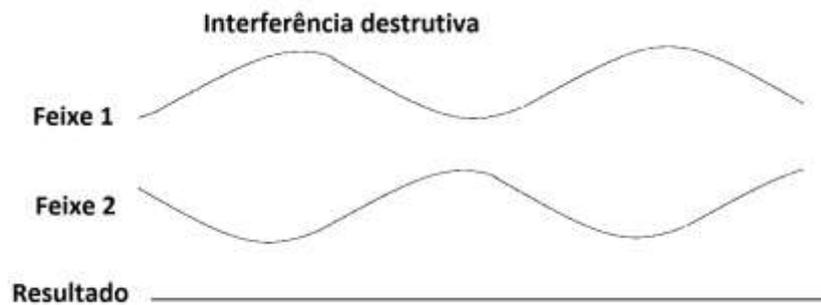


Figura 3. Interferência destrutiva entre ondas

Olhando o anteparo de frente devemos ver uma figura com anéis concêntricos ou barras paralelas.



Figura 4. Anéis concêntricos e barras paralelas

A propriedade de medida do interferômetro encontra-se no fato que sempre que um dos caminhos ópticos sofre uma alteração de comprimento igual a meio comprimento de onda da luz usada, os anéis ou barras a qual chamaremos de franjas sofrem um deslocamento (como se andassem). Assim no caso dos anéis concêntricos o ponto escuro no meio se torna claro, caso haja mais uma mudança no caminho igual a meio comprimento de onda ele voltara a ser escuro.

Contando o número de mudança de claro → escuro → claro, temos uma forma de realizar medidas com uma alta precisão. O exemplo do equipamento usado, temos um LASER

de 502nm de comprimento de onda, assim é possível realizar medidas de deslocamento de 251nm.



Figura 5. Interferômetro de Michelson

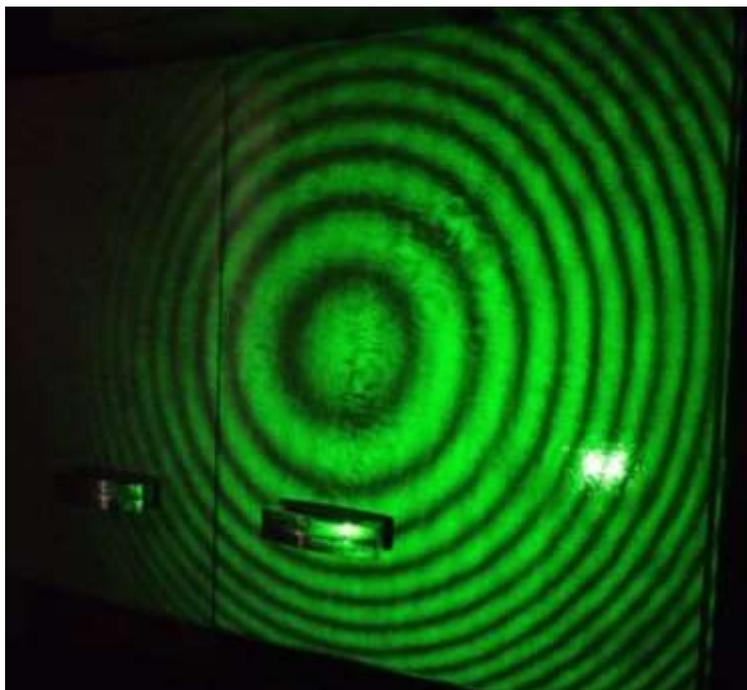


Figura 6. Imagem de interferência

Medida do índice de refração do ar.

Refração: Mudança da direção (ângulo) de uma onda quando muda de meio material, sendo sempre um valor maior que 1. Sendo representado pela letra n .

O experimento de medida que vamos realizar consiste em medir o índice de refração do ar em função da pressão. Assim em um dos caminhos ópticos iremos colocar uma célula selada com duas janelas para passagem dos feixes de luz. Com uso de uma seringa iremos realizar um vácuo dentro da célula, ou seja, a pressão irá cair de acordo com que puxamos o êmbolo da seringa. Ver a figura 7.

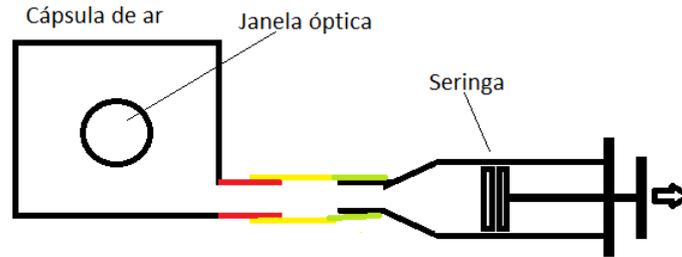


Figura 7. Esquema do sistema Célula de Ar, mangueira de borracha e seringa.

A cada vez que a pressão é reduzida o índice de refração do ar reduz, observando que ao atingir o vácuo completo este índice é igual a 1. A pressão é registrada com uso de um sensor de pressão BMP180 inserido dentro da célula. Os valores são lidos por uma placa microcontrolada Arduino, sendo os valores de pressão apresentados num display de LCD.

Assim sempre que há um deslocamento completo de um anel, que chamaremos de franja, com símbolo de N , significa que o caminho óptico sofreu alteração de meio comprimento de onda e a pressão dentro da capsula foi alterada.

Em posse da pressão e do número de franjas deslocadas, podemos medir o índice de refração do ar em função da pressão com o uso da expressão:

$$\frac{\Delta n}{\Delta P} = - \frac{\Delta N}{\Delta P} \frac{\lambda}{2s}$$

Sendo:

Δn = Variação do índice de refração do meio e $\Delta n = |n_f - n_i|$

n_i = Índice de refração do ar a 1atm. (1,000283)

n_f = Índice de refração do ar a pressão P .

ΔP = Variação da pressão em hecto Pascal.

ΔN = Variação de franja.

s = Comprimento da célula de ar (0,02250m)

λ = comprimento de onda do LASER (532nm)

Podemos reagrupas as variáveis de forma a isolar o índice de refração do ar dentro da célula.

Tabela de dados do experimento de medida do índice de refração do ar em função da pressão.

ΔN	Pressão	$\Delta P (P_f - P_i)$	n_f
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

7.27 Código fonte do Arduino (Sketch)

Para programação do módulo Arduino Uno foi usado a versão 1.6.7 do software Arduino. Foi usada uma variação do C++.

```
/*Para o bmp180
* Fio vermelho = Vcc5 V
* Fio preto = GND
* Fio verde = SDA, porta analogica A4 para arduino UNO
* Fio branca = SCL, porta analogica A5 para arduino UNO*/
/*Para o LDR
* conectado na porta analogica A1*/
/* Para o LM35
* Conectado na porta analogica A0*/
#include <Wire.h> // referente ao sensor bmp180
#include <Adafruit_BMP085.h> // referente ao sensor bmp180
Adafruit_BMP085 bmp;
#include <avr/eeprom.h> // referente a gravação na EEPROM
#include <EEPROM.h> // referente a gravação na EEPROM
#include <Streaming.h> // referente a gravação na EEPROM
#include <LiquidCrystal.h> //Inclui a biblioteca do LCD
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); //Configura os pinos do Arduino para se comunicar com o
LCD
// variaveis e pins usados___Inicio
int LABEL = 1;
int franja_N = 0;
int valor = 0;
int botao = 8; //botão para iniciar a medida
int botao2 = 7; // para calibrar o sensor LDR
int chaveAr = 13; // Ir para medir refração do ar
int chaveAgua = 9 ; // ir para medir refração da agua
int som = 6; // aciona o bip
int ldr = 1; // calibração do ldr
int claro = 0; //variavel de controle
int escuro = 1; //variavel de controle
int memo = 0; // valor de posição de memoria
int N = 0; //variavel de controle
int N2 = 0; //variavel de controle
int zero = 0; //variavel de controle
int calibrado; // registra se o ldr foi calibrado
float pressao = 0; //variavel de pressão
float temperatura; // variavel de temperatura
float memoX; //variavel dmemoria da pressão
unsigned int maximo = 0; // ddp maxima no ldr
unsigned int minimo = 1020; // ddp minimo no ldr
unsigned int intensidade = 0; //variavel de controle
const int LM35 = A0; // Pino Analogico onde vai ser ligado ao pino 2 do LM35
const float base_Celsius = 0.4887585532746823069403714565; //Base de conversão para
Graus Celsius ((5/1023) * 100)
//const int sensor=0;
// variaveis e pins usados___Fim
void setup()
{
Serial.begin(9600); // ativa a comunicação com monitor de dados
Serial.println("CLEARDATA");// ativa comunicação com o PLX.DAQ
```

```

Serial.println("LABEL,Tempo,Pressao,Temperatura, Franja,");// Joga na planilha de excel
pinMode (botao, INPUT);// botão 1
pinMode (botao2, INPUT);// botão 2
pinMode (chaveAr, INPUT);// chave de alavanca para opção Ar
pinMode (chaveAgua, INPUT);// chave de alavanca para opção agua
pinMode (som, OUTPUT); // buzzer
lcd.begin(16, 2); //Inicia o LCD com dimensões 16x2(Colunas x Linhas)
bmp.begin();// ativa o sensor bmp180
pinMode(A0, INPUT);
calibrado = 0; // verifica se o ldr já foi calibrado
}
void loop()
{
if (calibrado == 0) // verifica se o ldr foi calibrado
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Calibre o LDR");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Aperte o botao 2");
for ( int x = 0; x < 1000; x++)
delay(1);
{
if (digitalRead(botao2) == 1)
{
digitalWrite(som, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(som, LOW);
calibrado = 1;
calibrando();
}}
if (calibrado == 1)
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Interferometro");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" de Michelson");
delay(1000);
for (int w = 0; w < 10000; w++)
{
if (digitalRead(chaveAr) == 1)
{
Ar();
}
if (digitalRead(chaveAgua) == 1)
{
Agua();
}}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Mova a chave");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("A P/agua B P/Ar");
delay(1000);
}
}

```

```

for (int f = 0; f < 10000; f++)
{
delay(1);
if (digitalRead(chaveAr) == 1)
{
Ar();
}
if (digitalRead(chaveAgua) == 1)
{
Agua();
}} }
void Ar() // rotina para leitura de franja e gravacao na EEPROM da pressao
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Refracao do Ar");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("com a pressao");
delay(3000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Inicie o vacuo");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("ao som do Pib");
delay(3000);
tone(6, 1000, 2000);
for (unsigned long x = 0; x < 90000; x++)
{
if (analogRead(ldr) > maximo && claro == 1 && franja_N < 50)
{
pressao = (bmp.readPressure());
franja_N++;
N2 = franja_N;
claro = 0;
escuro = 1;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("P =");
lcd.setCursor(4, 0);
lcd.print(pressao);
lcd.setCursor(11, 0);
lcd.print("Pa");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Franja numero ");
lcd.print(franja_N);
memo = memo + 5;
eeprom_write_float( (float *) memo, pressao ); //escreve na memoria o valor da pressao
Serial.print(franja_N);
Serial.print(" ");
Serial.println(pressao);
//joga os dados para a planilha d Excel usando o PLX_DAQ
Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.print(pressao);
Serial.print(",");
Serial.print(bmp.readTemperature());

```

```

Serial.print(",");
Serial.println(franja_N);
Serial.println("SET,2");
x = 0;
}
if (digitalRead(botao) == 1 || franja_N >= 50)
{
franja_N = 51;
zero = 0;
delay(500);
}
if (analogRead(ldr) < minimo && escuro == 1 && franja_N < 50)
{
escuro = 0;
claro = 1;
zero = 0;
digitalWrite(som, HIGH);
delay(15);
digitalWrite(som, LOW);
delay(15);
}
if (franja_N == 51) //zera a variavel memo para poder reproduzir no display
{
if (zero == 0)
{ memo = 0;
memoX = 0;
zero = 1;
}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Teste finalizado");
delay(1000);
for ( int x = 0; x < 4; x++)
{
digitalWrite(som, HIGH);
delay(15);
digitalWrite(som, LOW);
delay (15);
}
delay(00);

for (int x = 0; x < 3000; x++)
{
delay(1);
if (digitalRead(botao) == 1)
{
leitura();
}}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Aperte o botao 1");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("p/ ver os dados");
for (int x = 0; x < 3000; x++)
{

```

```

delay(1);
if (digitalRead(botao) == 1)
{
  leitura();
}} } }
void leitura()
{
for (unsigned long x = 0; x < 900000; x++)
{
if (digitalRead(botao) == 1) // apresenta os valores de pressão salvo na memoria EEPROM no
display
{
digitalWrite(som, HIGH);
delay(50);
digitalWrite(som, LOW);
memo = memo + 5;
N = N + 1;
memoX = eeprom_read_float( (float *) (memo) );
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("P =");
lcd.setCursor(4, 0);
lcd.print(memoX);
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print(" Pa");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Franja numero ");
lcd.print(N);
x = 0;
if ( N > N2)
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" Fim dos dados");
N = 0;
memo = 0;
memoX = 0;
}
delay(500);
} } }
void Agua()
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Refracao da Agua");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("c/ a temperatura");
delay(3000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Ligue o Resistor");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("ao som do Pib");
delay(3000);
tone(6, 1000, 2000);

```

```

for (unsigned long x = 0; x < 90000; x++)
{
if (analogRead(ldr) > maximo && claro == 1 && franja_N < 50)
{
temperatura = 0;
for (int i = 0; i < 1000; i++)
{
temperatura = temperatura + (analogRead(LM35) * base_Celcius );
}
temperatura = temperatura / 1000; //Media de mil leituras
franja_N++;
N2 = franja_N;
claro = 0;
escuro = 1;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("T =");
lcd.setCursor(4, 0);
lcd.print(temperatura);
lcd.setCursor(9, 0);
lcd.print("*C");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Franja numero ");
lcd.print(franja_N);
memo = memo + 5;
eeprom_write_float( (float *) memo, temperatura ); //escreve na memoria o valor da pressao
Serial.print(franja_N);
Serial.print(" ");
Serial.println(temperatura);
//joga os dados para a planilha d Excel usando o PLX_DAQ
Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.print("-----");
Serial.print(",");
Serial.print(temperatura);
Serial.print(",");
Serial.println(franja_N);
Serial.println("SET,2");
x = 0;
}
if (digitalRead(botao) == 1 || franja_N >= 50)
{
franja_N = 51;
zero = 0;
delay(500);
}
if (analogRead(ldr) < minimo && escuro == 1 && franja_N < 50)
{
escuro = 0;
claro = 1;
zero = 0;
digitalWrite(som, HIGH);
delay(15);
digitalWrite(som, LOW);
delay(15);
}
}

```

```

if (franja_N == 51) //zera a variavel memo para poder reproduzir no display
{
if (zero == 0)
{ memo = 0;
memoX = 0;
zero = 1;
}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Teste finalizado");
delay(1000);
for ( int x = 0; x < 4; x++)
{
digitalWrite(som, HIGH);
delay(15);
digitalWrite(som, LOW);
delay (15);
}
delay(00);
for (int x = 0; x < 3000; x++)
{
delay(1);
if (digitalRead(botao) == 1)
{
leituraAgua();
}}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Aperte o botao 1");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("p/ ver os dados");
for (int x = 0; x < 3000; x++)
{
delay(1);
if (digitalRead(botao) == 1)
{
leituraAgua();
}
} } } }
void leituraAgua()
{
for (unsigned long x = 0; x < 900000; x++)
{
if (digitalRead(botao) == 1) // apresenta os valores de pressao salvo na memoria EEPROM no
display
{
digitalWrite(som, HIGH);
delay(50);
digitalWrite(som, LOW);
memo = memo + 5;
N = N + 1;
memoX = eeprom_read_float( (float *) (memo) );
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("T =");
}
}
}

```

```

lcd.setCursor(4, 0);
lcd.print(memoX);
lcd.setCursor(9, 0);
lcd.print("*C");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Franja numero ");
lcd.print(N);
x = 0;
if ( N > N2)
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" Fim dos dados");
N = 0;
memo = 0;
memoX = 0;
}
delay(500);
} }
void calibrando() // rotina para calibra a intensidade maxima e minima no LDR
{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Calibrando o LDR");
delay(2000);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Movas as franjas");
digitalWrite(som, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(som, LOW);
delay(100);
digitalWrite(som, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(som, LOW);
for (unsigned int x = 0 ; x < 5000; x++)
{
intensidade = analogRead(ldr);
if (intensidade > maximo)
{
maximo = intensidade;
}
if (intensidade < minimo)
{
minimo = intensidade;
}
delay(1);
}
maximo = maximo - 20;
minimo = minimo + 20;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Sensor Calibrado");
digitalWrite(som, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(som, LOW);

```

```
delay(100);
digitalWrite(som, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(som, LOW);
delay(100);
digitalWrite(som, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(som, LOW);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("T=");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print(maximo * 0.0049);
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print("V");
lcd.setCursor(9, 1);
lcd.print("t=");
lcd.setCursor(11, 1);
lcd.print(minimo * 0.0049);
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print("v");
delay(2000);
loop();
}
```