

**Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Química**



Guilherme Rabelo Carneiro da Silva

**ESPECTROFOTÔMETRO DE CÓDIGO ABERTO DESENVOLVIDO EM
LABORATÓRIO**

**Rio de Janeiro
2018**

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Química



Guilherme Rabelo Carneiro da Silva

**ESPECTROFOTÔMETRO DE CÓDIGO ABERTO DESENVOLVIDO EM
LABORATÓRIO**

Trabalho de conclusão do curso de Química com Atribuições Tecnológicas do Instituto de Química, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a conclusão da graduação em Química.

Orientador: Ricardo Cunha Michel

Rio de Janeiro
2018

Guilherme Rabelo Carneiro da Silva

**ESPECTROFOTÔMETRO DE CÓDIGO ABERTO DESENVOLVIDO EM
LABORATÓRIO**

Trabalho de conclusão do curso de Química com Atribuições Tecnológicas do Instituto de Química, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a conclusão da graduação em Química.

Orientador: Ricardo Cunha Michel

Aprovado em 27 de fevereiro de 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Cunha Michel

Prof. Dr. João Francisco Cajaíba da Silva

Prof. Dr. Pierre Mothé Esteves

**Rio de Janeiro
2018**

**Para Maira e Rafael,
sempre presentes.**

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente à minha mãe, Claudia Carneiro da Cunha, meu pai, Edson Rabelo da Silva e minha irmã, Tainnah Rabelo Carneiro da Silva, pelo apoio estrutura e privilégios que me permitiram chegar até aqui e sem os quais nada disso seria possível.

À todos os professores que me acompanharam ao longo desse caminho, um agradecimento especial para Dilma Cunha, que me iniciou nesse caminho e também para Sérgio de Paula Machado e Roberto Marchiori, que além de terem sido grandes orientadores, foram grandes mestres e exemplos na minha vida acadêmica.

Ao meu orientador, Ricardo Cunha Michel, por todo o apoio e por conseguir me mostrar novos caminhos dentro da química, o que me permitiu achar o meu.

À todos os amigos que eu fiz ao longo dos anos que protagonizaram os momentos mais alegres e me apoiaram nos momentos mais difíceis, um agradecimento em especial para: Aline Rolim, Amanda Dornela, Amir Perlin, Andressa Lamarca, Anna Karolyna Gomes, Camilla Machado, Felipe Xavier, Felippo D'Angelis, Gabriela Camargo, Guilherme Dantas, Gustavo Carvalho, Gustavo Henrique, Igor Vogel, Isabela Alencar, Juliana Loiola, Julio Wysard, Kleber Jendiroba, Ligia Menezes, Lucas Alex, Luiza Benincá, Marcos Aurélio, Mariana Telles, Paula Dias, Paulo Victor, Roger Correa e Thaissa Fontoura

Um agradecimento em especial para Thais Hancio, minha companheira de toda hora. Muito obrigado por alegrar meus dias, por estar do meu lado, por acreditar em mim mesmo quando eu não acredito e principalmente por me incentivar sempre a ser a melhor versão de mim mesmo.

Citados ou não citados, todas as pessoas que estiveram na minha vida em todos esses anos foram indispensáveis, de suas próprias maneiras, para que fosse possível eu chegar até esse ponto, direta ou indiretamente cada um trilhou um pedaço do meu caminho até aqui, e por isso eu sempre terei a agradecer.

RESUMO

Projeto de Curso – IQWX01

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM ESPECTROFOTÔMETRO

ALUNO: Guilherme Rabelo Carneiro da Silva

ORIENTADOR: Ricardo Cunha Michel, DQA/IQ/UFRJ.

Ao passo que o conhecimento científico se desenvolve e as novas tecnologias surgem e crescem em complexidade e refino, uma característica que se torna mais comum nos aparelhos de laboratório é o conceito de “caixa-preta” onde as partes internas do aparelho que não são utilizadas diretamente pelo usuário ficam praticamente seladas, o que dificulta o processo de ensino da tecnologia e dos processos envolvidos nas técnicas analíticas. Esse trabalho traz o conceito de desenvolvimento local da instrumentação científica, no projeto e fabricação de um espectrofotômetro de feixe simples para luz visível, um aparelho de larga utilidade em laboratórios de química. O aparelho desenvolvido conta com tecnologia de baixo custo, como lâmpadas de carro como fonte de luz e uma webcam como detector, junto com uma estrutura produzida utilizando impressão 3D. Os resultados obtidos do aparelho desenvolvido mostram a possibilidade de utilização do aparelho em sala de aula, tanto para análises qualitativas, quanto para ensino de instrumentação e química instrumental, apesar de não produzir, em sua versão atual, resultados adequados para garantir precisão em análises quantitativas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: (a) SpecPhone, um espectrofotômetro com estrutura impressa em 3D, que utiliza um smartphone como detector; (b) Esquema do funcionamento do SpecPhone. Adaptado de (Grasse et al, 2016)	15
Figura 2: Espectrofotômetro desenvolvido utilizando peças de LEGO como estrutura contendo fonte de luz (A), lente óptica(B), espaço para uma cubeta (C), rede de difração (D), suporte rotativo para o sensor de luz (E), fotodiodo (F), multímetro(G), dobradiça (H), fonte de energia para o LED(I). (Albert, 2012)	16
Figura 3: O espectro eletromagnético e suas regiões. No destaque o espectro denominado visível. Adaptado de ZEDH, 2017.....	18
Figura 4: Tipos de interferência de ondas. Adaptado de PECSOK, 1976.....	19
Figura 5: (a) Representação do experimento da fenda dupla de Young; (b) Detalhe na região próxima as fendas. Adaptado de HALLIDAY, 2010	20
Figura 6: Figura de Interferência resultante do experimento da fenda dupla de Young, onde é possível observar os máximos e mínimos resultantes da interferência construtiva e destrutiva, respectivamente. Adaptado de HALLIDAY,2010	20
Figura 7: Representação de um experimento de uma fenda simples com largura finita. Adaptado de HALLIDAY,2010	21
Figura 8: Figura obtida de um experimento na qual a luz passa pro uma fenda de largura finita, demonstrando o fenômeno de difração. Adaptado de HALLIDAY,2010	22
Figura 9: (a) Representação gráfica do resultado de um experimento envolvendo a combinação dos fenômenos de interferência e difração; (b) Foto que apresenta o resultado do experimento. Adaptado de HALLIDAY,2010	22
Figura 10: Esboço do projeto do espectrofotômetro desenvolvido, denominado LabitanSpec. (a) Vista superior; (b) Vista lateral.	26
Figura 11: Projeto do módulo de iluminação do LabitanSpec. (a) Vista frontal apresentando o cone central onde será introduzida a lâmpada do tipo W5W; (b) Vista superior que permite a visualização do sistema de juntas dovetail.	27
Figura 12: Projeto do módulo de amostra do LabitanSpec. (a) Vista superior apresentando o espaço destinado a uma cubeta de 1cm; (b) Vista tridimensional que permite a visualização do espaço destinado à passagem do feixe de luz.	27

Figura 13: Projeto do módulo de detecção do LabitanSpec. (a) Vista superior onde é possível observar o espaço destinado a rede de difração parte interna à esquerda; (b) Vista tridimensional que permite a visualização do espaço destinado à passagem do feixe de luz. .	28
Figura 14: Início do programa desenvolvido em Python para operar o LabitanSpec, denominado PySpec	30
Figura 15: Função principal do PySpec, responsável pela estrutura do processo de medida. .	31
Figura 16: Função Medida(), responsável pela captura, suavização e armazenamento da imagem referente à análise	31
Figura 17: Função Img_para_Espectro(), responsável pelo processamento da imagem capturada e pelo armazenamento dos resultados da medida.	34
Figura 18: Espectrofotômetro modelo USB-2000+ da Ocean Optics e tela do programa SpectraSuite versão 2.0.162.....	35
Figura 19: <i>Probe</i> de análise <i>in situ</i> utilizado para realizar as análises no aparelho da Ocean Optics.....	36
Figura 20: Objeto 3d desenvolvido referente ao módulo da fonte de luz do LabitanSpec. (a) Vista Frontal, Vista externa.	37
Figura 21: Objeto 3d desenvolvido referente ao módulo do suporte de amostra do LabitanSpec. (a) Vista Frontal, Vista externa.....	38
Figura 22: Objeto 3d desenvolvido referente ao módulo do detector do LabitanSpec. (a) Vista Frontal, Vista externa.	39
Figura 23: Imagens obtidas no LabitanSpec referentes aos espectros de emissão da lâmpada W5W em diferentes aberturas da lente da câmera detectora: (a) Valor de abertura 2500; (b) Valor de abertura 500	39
Figura 24: Configuração final utilizada para a câmera do aparelho.....	40
Figura 25: O aparelho desenvolvido, LabitanSpec, montado ao final do desenvolvimento. (a) Vista tridimensional contendo a visualização das peças montadas incluindo as tampas do aparelho;(b) aparelho montado e destampado, permitindo a visualização da webcam fixada no seu interior e o espaço destinado a cubeta.	40
Figura 26: O módulo de iluminação após a finalização. (a) Peças separadas; (b) Peça final após montagem.	41
Figura 27: Módulo de amostra após a finalização. (a) Vista tridimensional apresentando as adições externas à peça; (b) Vista superior, que apresenta o espaço destinado a cubeta, contendo adesivos acolchoados.	41

Figura 28: Análise da fenda produzida a fim de definir suas dimensões.	42
Figura 29: Módulo de detecção após montagem. (a) Vista tridimensional; (b) Vista superior apresentando a rede de difração e a webcam utilizadas fixadas no local.	42
Figura 30: Imagens da luz emitida pela lâmpada incandescente do tipo W5W. Imagens obtidas através do programa PySpec desenvolvido. (a) imagem original colorida; (b) imagem em escala de cinza, utilizada para o processamento.	43
Figura 31: Gráfico referente ao espectro de emissão da lâmpada W5W obtido utilizando diferentes métodos de análise de imagem, em azul a análise dos valores RGB da imagem e em vermelho a análise da intensidade de luz apresentada na escala de cinza. Gráfico obtido utilizando o PySpec	43
Figura 32: Espectro de emissão da lâmpada W5W obtido utilizando o aparelho comercial da marca Ocean Optics.....	44
Figura 33: Gráfico referente ao espectro de emissão da lâmpada W5W obtido utilizando diferentes métodos de captura de imagem, em azul é apresentado o espectro obtido a partir da média de 10 capturas e em vermelho é apresentado o espectro obtido com apenas a captura de uma imagem. Gráfico obtido utilizando o PySpec	45
Figura 34: Imagem da luz emitida pela lâmpada fluorescente do tipo Warm Light 20W da marca Soleil . Imagem obtidas através do programa PySpec desenvolvido.	46
Figura 35: Gráfico referente ao espectro de emissão da lâmpada fluorescente do tipo Warm Light 20W da marca Soleil.....	46
Figura 36: Espectro de emissão da lâmpada florescente do tipo Warm Light 20W da marca Soleil obtido utilizando o aparelho comercial da marca Ocean Optics.	47
Figura 37: Curva de calibração obtida para a conversão de Colunas no espectro obtido no PySpec para comprimento de onda.	48
Figura 38: Espectros de absorção de soluções de CoCl_2 em água em diversas concentrações, obtidos utilizando o PySpec com um sistema de aquisição da média de 10 imagens e utilizando a análise dos valores de RGB da imagem obtida.	49
Figura 39: Curva de calibração obtida para a conversão de Colunas no espectro obtido no PySpec para comprimento de onda.	50
Figura 40: Relação entre concentração e absorvância obtida no LabitanSpec, em preto a reta referente a regressão linear dos pontos apresentados e em vermelho a curva referente a uma regressão polinomial de segunda ordem.....	51

Figura 41: Curva de calibração obtida para a conversão de Colunas no espectro obtido no PySpec para comprimento de onda.	52
Figura 42: Selo referente à licença Creative Common – Atribuição 4.0 Internacional a qual o trabalho desenvolvido fica submetido	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela relacionando os resultados em colunas obtidos no LabitanSpec com seus correspondentes em comprimento de onda obtidos no aparelho comercial da marca Ocean Optics	47
Tabela 2: Resultados de absorvância obtidos pelo LabitanSpec e pelo aparelho da Ocean Optics para as diversas concentrações trabalhadas.	50

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (Acrilonitrila Butadieno Estireno)

CSG – *Constructive Solid Geometry* (Geometria Construtiva de Sólidos)

LED – *Light Emitting Diode* (Diodo emissor de Luz)

RGB – *Red Green Blue* (Vermelho, Verde e Azul)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO:	15
2	OBJETIVO:	17
3	REFERENCIAIS TEÓRICOS:	18
3.1	RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA:	18
3.2	INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO:	19
3.3	REDES DE DIFRAÇÃO	23
3.4	ABSORÇÃO DE LUZ PELA MATÉRIA	23
3.5	ESPECTROFOTOMETRIA	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS:	25
4.1	MATERIAIS:	25
4.2	MÉTODOS:	25
4.2.1	Design do aparelho:	25
4.2.2	Medida das dimensões de objetos em imagens	28
4.2.3	Impressão 3d:	28
4.2.4	Configuração da câmera:	29
4.2.5	Programação computacional:	29
4.2.6	Calibração:	35
4.2.7	Análises	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO:	37
5.1	PROJETO E FABRICAÇÃO DO APARELHO	37
5.1.1	Modelagem 3D	37
5.1.2	Configuração da câmera:	39
5.1.3	Impressão 3d e montagem das peças:	40
5.2	PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL:	43
5.3	CALIBRAÇÃO DO APARELHO:	46
5.4	ANÁLISE DE AMOSTRAS:	48
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
6	CONCLUSÃO:	53

8	REFERÊNCIAS:	54
9	APÊNDICE:	55

1 INTRODUÇÃO:

Hoje em dia, as ciências se encontram em um ponto de grande difusão mundial. Os avanços tecnológicos tornaram possível o desenvolvimento científico e vice-versa. O desenvolvimento de novos equipamentos permite realizar descobertas que por sua vez abrem portas para novos e melhores equipamentos. Isso é a instrumentação científica, o estudo e desenvolvimento de instrumentos de laboratório.

A espectrofotometria é uma técnica largamente utilizada, devido a grande quantidade de informações que podem ser obtidas a partir dela. Os espectrofotômetros utilizados tiveram uma grande evolução ao longo dos anos permitindo análises de alta qualidade. No entanto, como apontado por Wilson & Wilson (2016) um problema oriundo desses avanços é o fato de que aparelhos como esse, hoje são tratados como “caixas pretas” onde a tecnologia e conceitos envolvidos são de difícil acesso, o que limita as possibilidades de ensino com relação à técnica. Esse problema pode ser resolvido com incentivos em desconstruir esse conceito de “caixa preta”, entre os quais a produção de aparelhos mais simples, porém com muito mais alcance acadêmico.

O espectrofotômetro é um ótimo aparelho para desmistificar esse conceito atual de equipamentos, por se tratar de um aparelho que pode ser construído de forma simples. O equipamento em si pode ser dividido em quatro partes principais: a fonte de luz, um espaço para amostras, um sistema de monocromadores e um detector. Aparelhos comerciais tendem a ter uma maior complexidade no sistema dos monocromadores, envolvendo diversos espelhos e uma óptica elaborada para garantir alta resolução, no entanto aparelhos como o SpecPhone, desenvolvido por Grasse e colaboradores (2016) e apresentado na Figura 1 são capazes de apresentar boa resolução com sistemas muito mais simples.

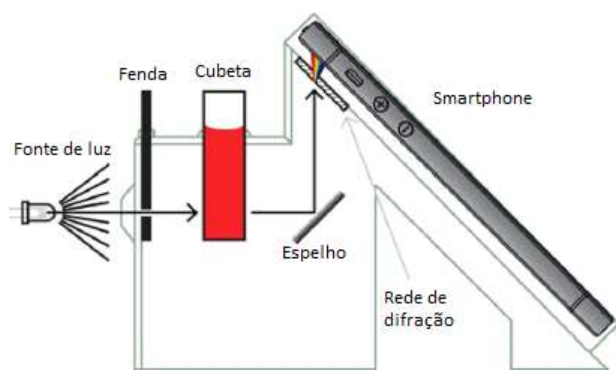


Figura 2: (a) SpecPhone, um espectrofotômetro com estrutura impressa em 3D, que utiliza um smartphone como detector; (b) Esquema do funcionamento do SpecPhone. Adaptado de (Grasse et al, 2016)

Esses novos aparelhos são possíveis devido a técnicas alternativas acessíveis para o desenvolvimento desses equipamentos, como uso de *webcams* ou câmeras de celular como elementos detectores, uso de LED's como fontes de luz ou a utilização de impressão 3d ou até

mesmo blocos montáveis como LEGO para a estrutura geral do aparelho, como apresentado na Figura 2 (Albert et al, 2012).

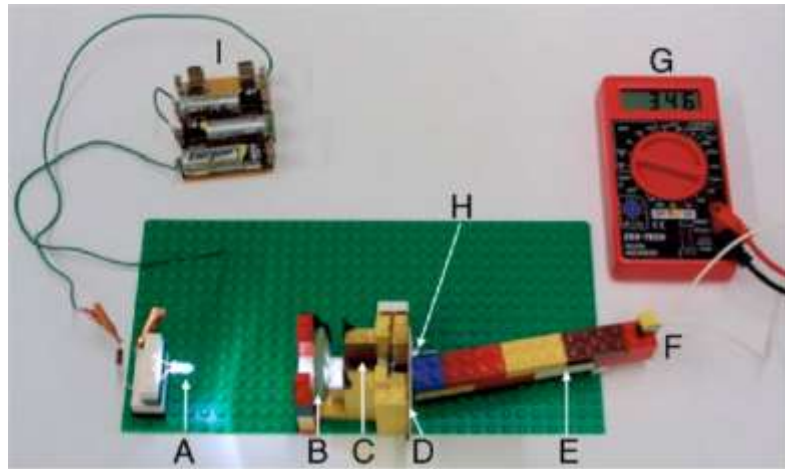


Figura 2: Espectrofotômetro desenvolvido utilizando peças de LEGO como estrutura contendo fonte de luz (A), lente óptica(B), espaço para uma cubeta (C), rede de difração (D), suporte rotativo para o sensor de luz (E), fotodiodo (F), multímetro(G), dobradiça (H), fonte de energia para o LED(I). (Albert et al, 2012)

Com isso, a proposta de produção de um espectrofotômetro, nomeado de ***LabitanSpec*** surge como uma alternativa para substituir os equipamentos de alto custo e com baixo valor educativo, trazendo maior compreensão dos processos físicos envolvidos nas análises. Para permitir uma maior acessibilidade ao produto final, essa proposta deve ser produzida com o uso de materiais acessíveis.

2 OBJETIVO:

Geral:

Desenvolver, utilizando materiais de baixo custo, ferramentas abertas e técnicas de impressão 3D, um espectrofotômetro de feixe simples capaz de analisar amostras na região do visível, com a finalidade de desmistificar o entendimento de instrumentação química.

Específicos:

- Projetar e construir o equipamento proposto
- Desenvolver um software de aquisição e tratamento dos dados
- Analisar amostras que possuam absorção em diferentes regiões do visível e comparar os resultados obtidos com aqueles obtidos por um aparelho comercial.

3 REFERENCIAIS TEÓRICOS:

Nessa seção são apresentados alguns conceitos físicos e químicos referentes ao projeto, desde o que é a luz e suas propriedades, até conceitos sobre o que é a espectrofotometria e seus fundamentos.

3.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA:

A radiação eletromagnética ou onda eletromagnética é um tipo de onda formada por um componente elétrico e um componente magnético capaz de se propagar no vácuo com a velocidade da luz. Duas das principais propriedades de uma onda eletromagnética são o seu comprimento de onda (λ), a distância entre dois pontos equivalentes da mesma onda e sua frequência (ν), que seria a quantidade de vezes que tal onda passa por um ponto em um espaço de tempo. Tais propriedades permitem apresentar o chamado espectro eletromagnético, que mostra os diferentes tipos de onda eletromagnética de acordo com sua frequência e seu comprimento de onda (PECSOK, 1976).

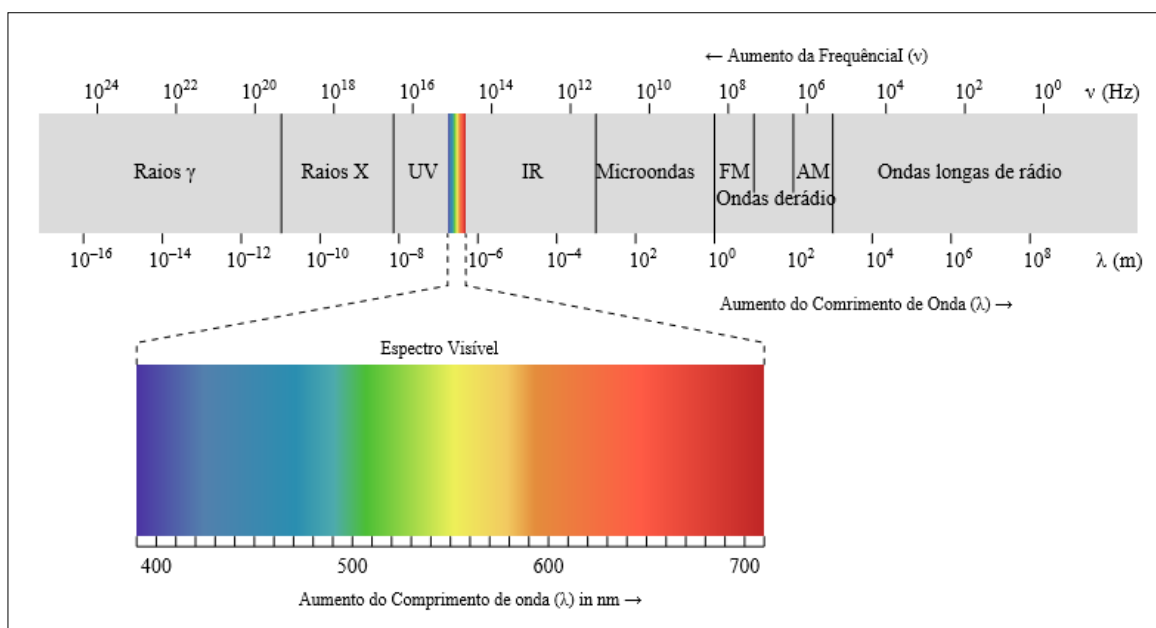


Figura 3: O espectro eletromagnético e suas regiões. No destaque o espectro denominado visível. Adaptado de ZEDH, 2007

Como é possível observar na Figura 3 o comprimento de onda e a frequência de uma onda são grandezas inversamente proporcionais, tal proporcionalidade é dada pela equação de onda:

$$\nu\lambda = c \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo que é constante com valor de $2,9976 \times 10^8$ m/s.

3.2 INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO:

Quando analisado o comportamento ondulatório da luz, alguns fenômenos devem ser avaliados, como os fenômenos de interferência e difração. Ambos os fenômenos surgem do fato de que, por se tratar de uma onda, um feixe de luz é capaz de realizar processos de interação denominados construtivos e destrutivos ao interagir com outro feixe. Essencialmente esse processo dita que em um ponto no qual dois ou mais feixes de luz se encontram, a intensidade luminosa nesse ponto é dada em função da soma das amplitudes das ondas naquele ponto.

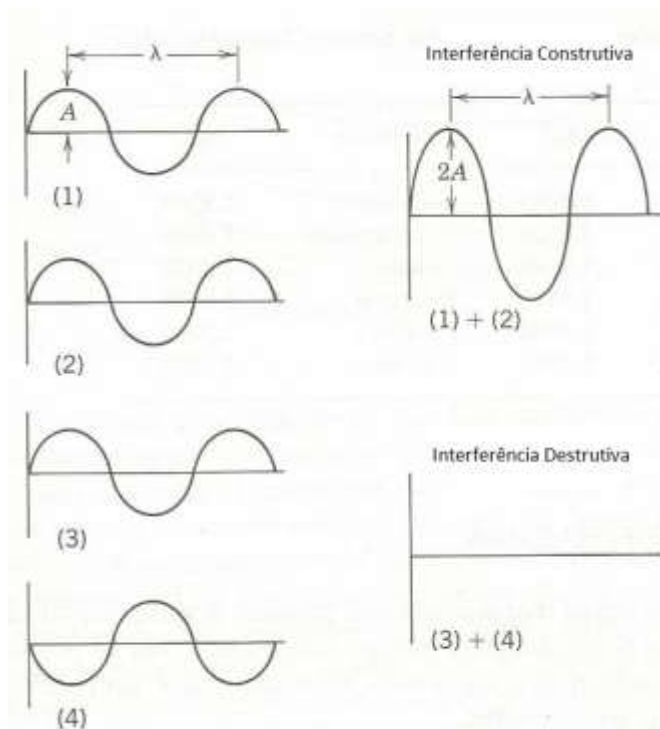


Figura 4: Tipos de interferência de ondas. Adaptado de PECSOK, 1976

O exemplo da Figura 4 mostra um modelo simplificado do que ocorre nos processos de interferência em duas dimensões geralmente utilizada para representar a interferência em ondas mecânicas como em uma corda. Para a luz, os estudos de Thomas Young se apresentam de forma mais clara. Ele propôs um experimento denominado Experimento da fenda dupla, no qual uma fonte incide uma luz monocromática em um anteparo contendo duas fendas separadas por uma distância d e equidistantes à fonte, isso garante que a luz emitida por uma das fendas é idêntica em frequência, comprimento de onda, fase e amplitude em relação à outra. A luz que atravessa as fendas é interrompida em um anteparo plano a uma distância R , paralelo ao anteparo contendo as fendas, como apresentado na Figura 5.a (YOUNG, 2009).

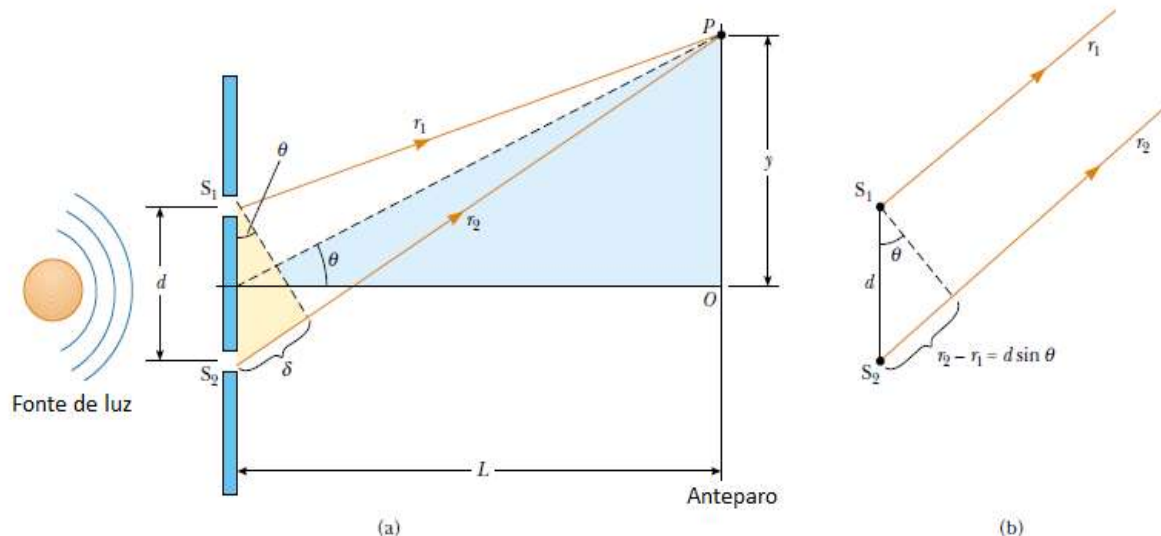


Figura 5: (a) Representação do experimento da fenda dupla de Young; (b) Detalhe na região próxima às fendas. Adaptado de HALLIDAY, 2010

Como pode ser visto na Figura 5, considerando que a distância R é muito maior que a distância d , pode-se assumir que os dois feixes são paralelos na região próxima às fendas. Isso resulta em que para um ponto P no anteparo, a diferença de caminho percorrido entre os cada feixe ao sair da sua respectiva fenda é igual a $d \cdot \sin(\theta)$. Essa diferença de caminho percorrido resulta que para alguns pontos no anteparo, as ondas provenientes de cada fenda interferem construtivamente enquanto para outros tal interferência é destrutiva. O resultado do experimento de Young foi uma imagem chamada de Figura de interferência (Figura 6) na qual no centro do anteparo era visto um feixe de luz enquanto nas laterais do feixe central era possível observar feixes claros e escuros alternados. (YOUNG, 2009)

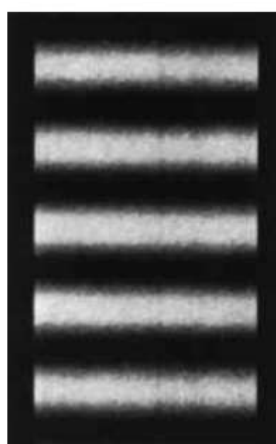


Figura 6: Figura de Interferência resultante do experimento da fenda dupla de Young, onde é possível observar os máximos e mínimos resultantes da interferência construtiva e destrutiva, respectivamente. Adaptado de HALLIDAY, 2010

Como a luz emitida pelas fendas é idêntica, é possível calcular o padrão apresentado na Figura 6. Para que se tenha a interferência construtiva, é preciso que a diferença de caminho percorrido entre os feixes, seja um múltiplo inteiro do comprimento de onda da luz das fendas, enquanto a interferência destrutiva completa é obtida no meio desses intervalos, assim são obtidas as equações de máximos e mínimos de interferência desse experimento, respectivamente (YOUNG, 2009):

$$d \cdot \text{sen}(\theta) = m\lambda \quad (\text{onde } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (2)$$

$$d \cdot \text{sen}(\theta) = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\text{onde } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (3)$$

Analisando as equações 2 e 3 tem-se que o fenômeno de interferência é dependente do comprimento da luz incidida, no experimento apresentado a fonte luminosa emitia uma luz monocromática, esse requisito facilita a visualização do experimento e seus resultados, mas não é a única condição que o fenômeno de interferência acontece. Com uma fonte policromáticas, os resultados observados são diversas figuras de interferência deslocadas umas das outras.

Outro fenômeno observado do comportamento ondulatório é o fenômeno de difração. Esse fenômeno é descrito como a capacidade de uma onda se curvar ao atravessar um obstáculo contendo uma abertura ou uma extremidade. A difração é explicada pelo princípio de Huygens, que dita que cada ponto da frente de uma onda age como uma fonte de luz, propagando a luz em todas as direções. O fenômeno de difração é o fenômeno que permite que seja observado o fenômeno de interferência, já que no caso anterior é necessária que a luz de uma fenda seja propagada em todas as direções.

Ao abordar o fenômeno de difração em um caso de uma fenda com largura finita tem-se um tratamento semelhante ao do experimento de Young, no entanto, ao invés de termos duas fendas agindo como fontes pontuais, cada ponto dentro da fenda age como uma fonte pontual (YOUNG, 2009).

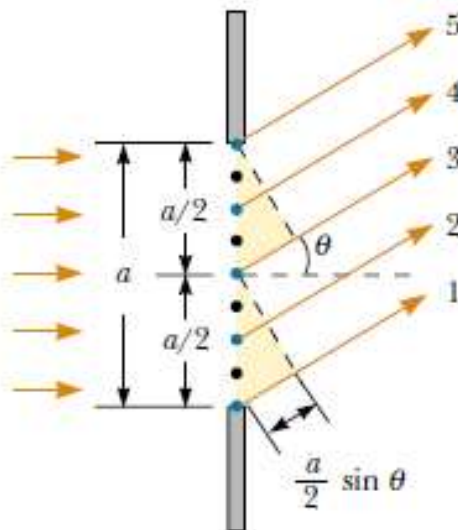


Figura 7: Representação de um experimento de uma fenda simples com largura finita. Adaptado de (HALLIDAY,2010)

Com o mesmo tratamento feito para o experimento da fenda dupla, tem-se que os mínimos de difração, ou seja, franjas escuras de interferência surgem de acordo com a equação 4:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{m\lambda}{a} \quad (\text{onde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (4)$$

O resultado desse fenômeno é uma franja central contendo a maior parte da intensidade luminosa, seguido de feixes de menor intensidade alternados com regiões escuras (Figura 8)



Figura 8: Figura obtida de um experimento na qual a luz passa por uma fenda de largura finita, demonstrando o fenômeno de difração. Adaptado de HALLIDAY, 2010

Para múltiplas fendas com largura finita, passa-se a ter uma combinação entre os dois fenômenos e o resultado é uma figura de interferência contida dentro de uma figura de difração, na qual as franjas de interferência decaem de intensidade luminosa à medida que se distanciam do centro da figura de difração (Figura 9). Quanto maior o número de fendas envolvidas no processo mais finas são as regiões de máximo de difração, o que resulta em feixes de luz mais bem definidos concentrando a luz nessas regiões. (YOUNG, 2009)

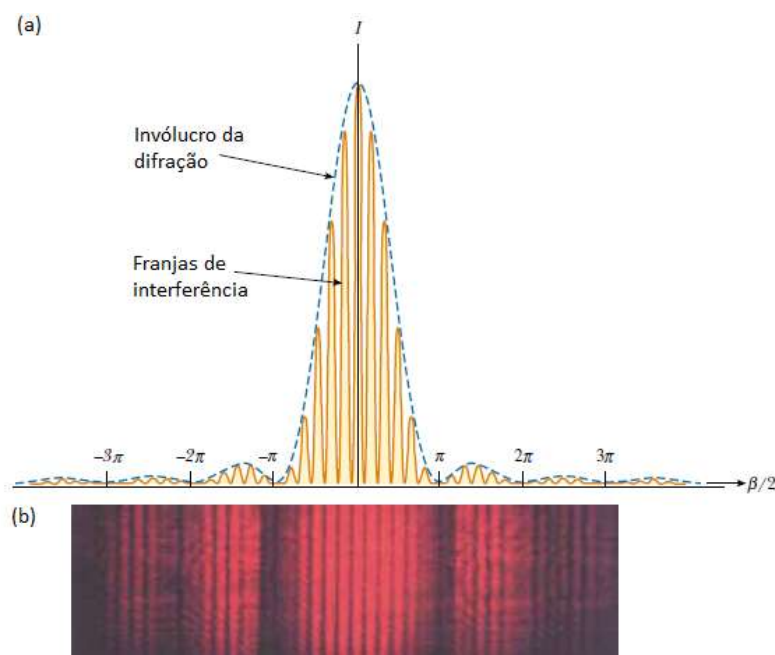


Figura 9: (a) Representação gráfica do resultado de um experimento envolvendo a combinação dos fenômenos de interferência e difração; (b) Foto que apresenta o resultado do experimento. Adaptado de HALLIDAY, 2010

3.3 REDES DE DIFRAÇÃO

Redes de difração são dispositivos que consistem de telas contendo múltiplas fendas como em um experimento de interferência. As redes de difração podem ser encontradas em dois tipos, diferenciados pelo modo com o qual a rede em si interage com a luz, as redes de transmissão, produzidas em materiais transparentes onde a luz atravessa suas fendas (comumente chamadas de linhas) e as redes de reflexão, onde as linhas são produzidas em um material reflexivo, como um filme metálico e a luz difratada é refletida da superfície da rede. As redes também podem ser diferenciadas pelo seu modo de produção, podendo ser gravadas mecanicamente ou holograficamente. As redes de difração atuais apresentam valores de número de linhas por unidade de comprimento da ordem de pelo menos 600linhas/mm o que as tornam ótimas ferramentas para resolução e análise de fontes luminosas. (MOORE, 2009)

A equação utilizada para determinar os máximos de interferência quando se utiliza uma rede de difração é a mesma equação 2 apresentada para determinar máximos no experimento de fenda dupla onde o valor da distância d entre as fendas é dado pelo inverso do número de linhas por unidade de comprimento.

3.4 ABSORÇÃO DE LUZ PELA MATÉRIA

A luz possui capacidade de interagir de diversas formas com a matéria, essas interações são dependentes da energia da radiação envolvida em relação aos processos possíveis. Para essa abordagem a melhor forma de tratar a luz deixa de ser como uma onda eletromagnética, mas sim um feixe de partículas denominadas fótons, um conceito introduzido por Einstein, baseando-se nos estudos de Planck sobre a quantização da energia para explicar o efeito fotoelétrico. Essas partículas possuem energia definida pela equação de Planck (Equação 5), que dita que a energia de tais partículas é quantizada e depende principalmente da frequência na radiação envolvida.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (5)$$

onde h é a chamada constante de Planck, ν é a frequência da radiação, λ é o comprimento de onda referente a tal radiação e c é a velocidade da luz (PECSOK, 1976).

Assim a interação entre a luz e matéria é dada pela transferência de energia de um fóton para a matéria durante colisões entre tais partículas. O processo de absorção é definido como o processo no qual a energia de um fóton é absorvida pela matéria para que ocorra algum processo interno na matéria. Esse processo interno é definido pela energia do fóton envolvido, isso ocorre devido ao fato de que os níveis de energia da matéria também são quantizados.

Fótons na região do visível (~400nm a ~700nm) possuem energia da ordem de processos eletrônicos como a excitação de elétrons de camada de valência para níveis excitados (SALLES, 2009).

3.5 ESPECTROFOTOMETRIA

A espectrofotometria é uma técnica analítica que consiste na análise da quantidade de luz que atravessa uma dada amostra. Essa técnica tem como fundamento a chamada lei de Lambert-Beer, que dita que a quantidade de luz absorvida por uma amostra depende da quantidade de absorvedores no caminho do feixe de luz, sendo assim dependente da concentração da amostra analisada e do caminho óptico percorrido pelo feixe de luz incidente dentro da amostra. Essa lei é dada pela equação 6.

$$A = \varepsilon bc \quad (6)$$

onde A é uma grandeza denominada Absorvância, ε é o chamado coeficiente de absortividade molar ou coeficiente de extinção molar, b é o caminho óptico da amostra e c é a concentração molar da amostra analisada(PECSOK,1976). Por sua vez a absorvância é obtida através da equação 7:

$$A = -\log(T) \quad (7)$$

em que T é denominada transmitância, uma grandeza que relaciona a intensidade luminosa transmitida por uma amostra (I) com a intensidade luminosa incidente na mesma amostra (I_0).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (8)$$

Através da lei de Lambert-Beer é possível utilizar a espectrofotometria como técnica quantitativa de análise, enquanto o espectro de absorção obtido é capaz de fornecer diversas informações com relação à espécie analisada, tal como estrutura eletrônica e geometria molecular de compostos de coordenação (SALLES, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS:

Nessa seção são apresentados os materiais utilizados durante o projeto, bem como a metodologia seguida para cada etapa.

4.1 MATERIAIS:

- Lâmpada
- Suporte de lâmpada W5W
- Adaptador de suporte de lâmpada W5W da marca Ford
- Webcam Microsoft LifeCam VX-800 (52,2mm x 52,3mm x 62,4mm)
- Rede de difração holográfica 1000 l/mm da marca Edmund Optics(#01-307)
- Fonte elétrica da marca Minipa modelo MPL-1305M
- Computador PC-compatível, rodando Linux Kubuntu 17.10
- Filamento de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) branco 1,75mm da marca GTMAX3D
- Filamento ABS preto 1,75mm da marca Filamentos 3D Brasil
- Tinta em Spray de uso geral preta da marca Colorgin
- Cloreto de Cobalto da marca Vetec
- Espectrofotômetro USB-2000+ da Ocean Optics

4.2 MÉTODOS:

Nesta seção são descritos o processo de design do equipamento, da modelagem das partes para impressão e da estrutura do programa de aquisição, bem como a rotina de calibração e análise.

4.2.1 Design do aparelho:

O desenvolvimento das peças do aparelho foi feito utilizando o software OpenSCAD versão 2015.03, um software de livre acesso desenvolvido por Marius Kintel que consiste em desenvolvimento de objetos em 3D utilizando um método procedural baseado em geometria construtiva de sólidos (CSG), no qual a forma desejada é descrita a partir de formas primitivas e operadores booleanos, o que permite grande controle e flexibilidade no desenvolvimento do projeto.

O conceito inicial proposto consiste de um aparelho que seja simples, versátil e de baixo custo, por isso optou-se por trabalhar com um design que não envolvesse uma óptica complexa contendo diversos espelhos e peças móveis. O uso impressão 3D se apresenta como uma ótima opção por se tratar de uma técnica que permite o desenvolvimento desde peças simples até peças mais complexas. Um conceito pretendido também no projeto era ter um aparelho que funcionasse de forma modular, ou seja, dividir o aparelho em módulos principais (por exemplo: fonte de luz, suporte de amostra e detector) nos quais tais módulos pudessem ser facilmente substituídos por outros, facilitando a introdução de aperfeiçoamentos e para

fornecer novas funcionalidades ao aparelho, como por exemplo, na parte do suporte de amostra substituir um apoio para cubetas por um módulo de análise em fluxo, permitindo que novos tipos de análise sejam realizados.

O esboço completo do aparelho é apresentado nas Figuras 10a e 10b, onde é possível observar os três módulos citados. A junção entre os módulos é feita utilizando um sistema de juntas *dovetail* (em português chamado de rabo de andorinha), que permitem a fixação fácil das peças sem precisar de parafusos ou outras formas de conexão.

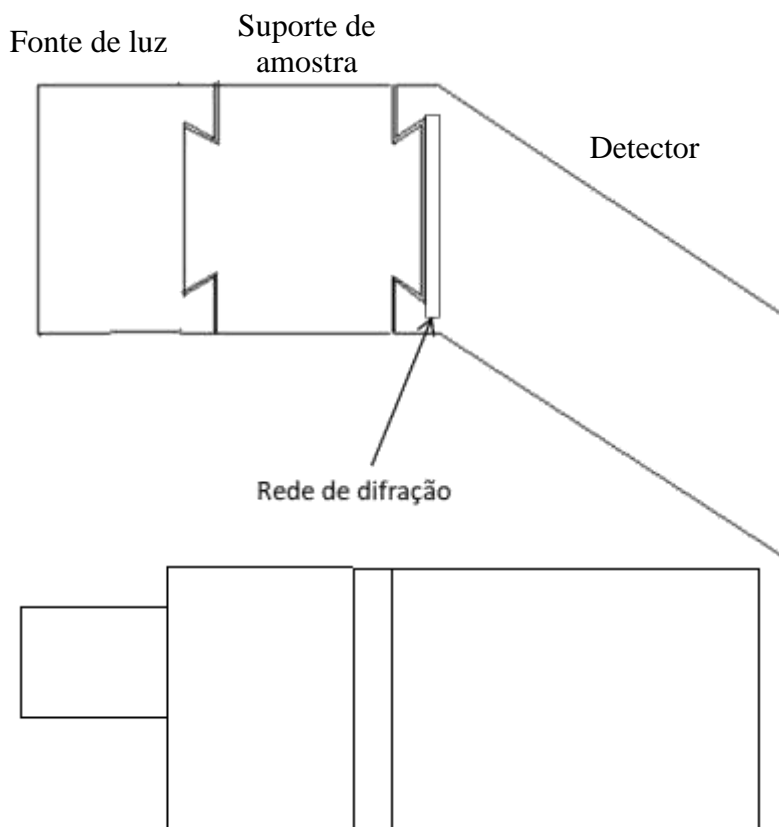


Figura 10: Esboço do projeto do espectrofotômetro desenvolvido, denominado LabitanSpec. (a) Vista superior; (b) Vista lateral.

- **Fonte de luz:** A fonte luminosa escolhida para o aparelho foi uma lâmpada Gauss GL2825 do tipo W5W, uma lâmpada de filamento de tungstênio capaz de operar com 12V e fornecer 5W de potência, utilizada principalmente em faróis e painéis de carro; essa escolha foi feita com base na necessidade de ter uma fonte de luz contínua no espectro visível, preferencialmente compacta, de fácil acesso, baixo custo e capaz de trabalhar em tensões menores que 110V, para diminuir riscos durante o manuseio. O módulo do aparelho que contém a fonte luminosa consiste de uma caixa contendo um cone interno para melhorar o direcionamento de luz, como pode ser visto nas Figuras 11a e 11b; a lâmpada em seu suporte é inserida no centro da peça pelo diâmetro menor do cone.

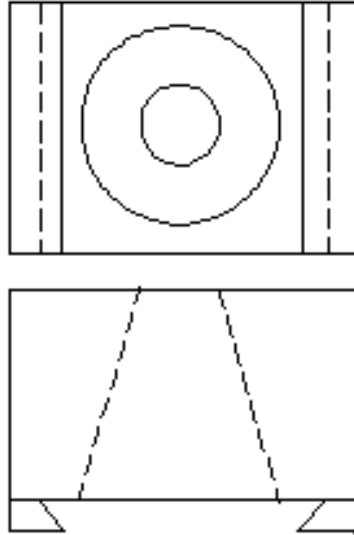


Figura 11: Projeto do módulo de iluminação do LabitanSpec. (a) Vista frontal apresentando o cone central onde será introduzida a lâmpada do tipo W5W; (b) Vista superior que permite a visualização do sistema de juntas *dovetail*.

- Suporte de Amostra: O suporte de amostra foi desenvolvido para conter uma cubeta comum de percurso óptico igual a 1cm. Como apresentado nas Figuras 12a e 12b, foi projetada uma caixa externa com tampa para impedir a entrada de luz na região da amostra; na parte interna foi projetada uma caixa para servir de apoio para a cubeta, fixando-a na direção do feixe de luz. A caixa interna foi projetada com dimensões um pouco maiores que as de uma cubeta comum a fim de serem colocados adesivos acolchoados nas laterais internas da caixa para evitar danos como arranhões na cubeta.

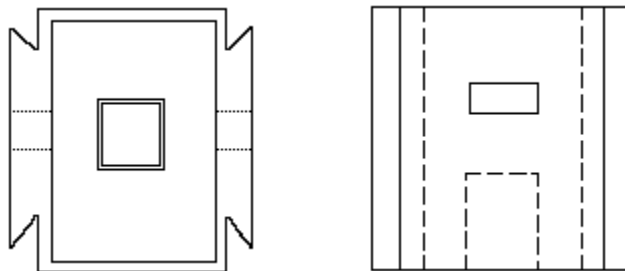


Figura 12: Projeto do módulo de amostra do LabitanSpec. (a) Vista superior apresentando o espaço destinado a uma cubeta de 1cm; (b) Vista tridimensional que permite a visualização do espaço destinado à passagem do feixe de luz.

- Detector: Para conter a *webcam* utilizada como o detector do aparelho, foi projetada uma peça na qual a câmera pode ser fixada (Figura 13). Essa peça também contém um compartimento no qual é introduzida a rede de difração que age como o monocromador do aparelho. A peça foi projetada em um ângulo de 34° por ser a angulação média entre as dispersões das extremidades do espectro visível (24° para o 400nm e 44° para o 700nm), com base na equação (2) e para a primeira ordem de difração, que foi escolhida por apresentar uma maior intensidade de luz. Dessa forma é

esperado que o detector seja capaz de adquirir uma imagem contendo todo o espectro visível.

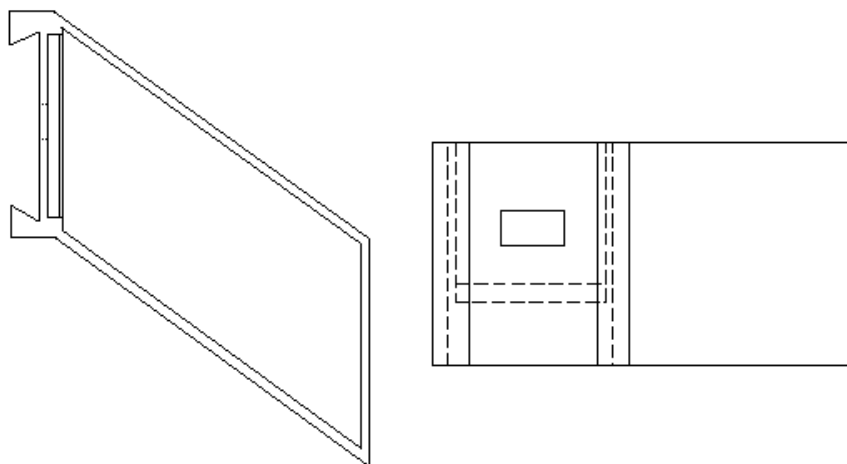


Figura 13: Projeto do módulo de detecção do LabitanSpec. (a) Vista superior onde é possível observar o espaço destinado a rede de difração parte interna à esquerda; (b) Vista tridimensional que permite a visualização do espaço destinado à passagem do feixe de luz.

- Fenda: Para garantir um feixe de luz fino que seja capaz de ser bem resolvido pela rede de difração, foi necessário desenvolver uma fenda para passagem de luz pelo aparelho. Por se tratar de uma fenda de dimensões mínimas, o uso da impressão 3D nessa parte não era aplicável, então para isso, foi utilizada uma folha de alumínio obtida de uma lata de refrigerante, nessa folha foi marcada uma protuberância, utilizando a parte traseira lisa de uma broca de furadeira com 0.8mm de diâmetro. A ponta dessa protuberância foi lixada utilizando uma lixa plana até ser possível observar um pequeno orifício na superfície da folha. A fenda produzida foi fotografada para posterior análise de seu diâmetro

4.2.2 Medida das dimensões de objetos em imagens

Foi realizada uma análise para descobrir as dimensões da fenda criada. A análise foi realizada utilizando o software FIJI (versão 1.51s) que é voltado para processamento de imagens especialmente com fins científicos. Utilizando as mesmas condições, foi feita uma fotografia da fenda produzida e de uma régua com marcações da ordem de milímetros, no software é possível criar uma escala na qual é medida uma distância no programa e informado a qual valor de comprimento essa distância indicada corresponde; após a criação da escala foi feita uma medida de distância entre as bordas da fenda para avaliar seu diâmetro.

4.2.3 Impressão 3d:

As peças desenvolvidas no OpenSCAD foram preparadas para impressão utilizando com o método de fatiamento, que consiste em dividir um objeto em 3D em diversas “fatias”

bidimensionais que contêm as informações dos caminhos no plano XY que cabeça de impressão deve seguir antes de passar para a próxima camada do eixo Z. Esse processo foi realizado utilizando o software Simplify3D® (versão 4.0) e as peças foram impressas em uma impressora GTMAX 3D Core A3v2. As impressões foram feitas com uma altura de camada de 0,2mm e com as devidas configurações de temperatura de impressão (110°C para a mesa de impressão e 235°C para a extrusora). A maioria das peças foi impressa em polímero ABS branco e posteriormente receberam uma pintura utilizando tinta em spray preta para bloquear a entrada de luz nas partes internas do aparelho, no entanto, o módulo de detecção foi impresso diretamente em polímero ABS preto por ser o mais sensível à iluminação externa.

4.2.4 Configuração da câmera:

Foi utilizado o software QT V4L2 versão 1.12.5, um software que permite acessar as configurações internas de uma *webcam* para avaliar tais configurações. Foram desativadas as configurações automáticas de abertura, uma função onde a câmera aumenta a sua abertura quando pouca luz é identificada, a fim de aumentar a quantidade de luz recebida. Essa é uma função comum em câmeras, no entanto é um problema já que interferiria com os resultados obtidos por alterar a quantidade de luz recebida na câmera. Ao ativar o modo manual, o valor fixado para a abertura da entrada de luz da câmera que era 2500 (em unidades da escala do programa) foi diminuído para 500, a fim de melhorar a visualização da luz recebida.

4.2.5 Programação computacional:

O desenvolvimento do software capaz de adquirir e fazer o tratamento dos dados provenientes do aparelho foi desenvolvido em Python3, uma linguagem de programação de utilização simples, bastante utilizada em diversas aplicações em áreas científicas.

A larga utilização e versatilidade da linguagem Python3, devido as suas bibliotecas externas, que são pacotes de código desenvolvidos por terceiros para realizar funções mais complexas na linguagem.

Para esse projeto em específico foi feito o uso da biblioteca OpenCV 3.0, que é uma biblioteca de código aberto que possui dentre diversas outras, ferramentas de aquisição e tratamento de imagens que são fundamentais para o objetivo do programa.

O conceito seguido durante o projeto foi de seguir um “*script*”, uma ordem de códigos capaz de nos fornecer os dados desejados. Nesse caso, a intenção do programa era seguir uma série de etapas:

- Pedir ao usuário um nome de arquivo para ser usado posteriormente para salvar os dados obtidos;
- Aguardar para que o usuário estivesse pronto para iniciar a análise;
- Iniciar a câmera que age como o detector do aparelho;
- Obter uma imagem da câmera;
- A partir da imagem obtida, seleccionar a região que contém o espectro de transmissão resultante da análise;

- Dentro dessa região, dividir a imagem em colunas de pixels e para cada coluna somar os valores das quantidades de cor em cada pixel para obter a quantidade total na coluna, esse processo pode ser feito de duas formas: somando os valores de vermelho, verde e azul (RGB) em cada pixel ou convertendo a imagem para uma escala de cinza e medindo os valores de “branco” em cada pixel. Esse valor corresponde à quantidade total de luz detectada na região deste pixel, fornecendo a informação da intensidade de luz nesse ponto;
- Salva os valores do número de cada coluna e sua respectiva quantidade de branco em um arquivo externo (com o nome fornecido inicialmente);
- Salva a imagem obtida inicialmente, também com o nome fornecido;
- Apresenta um gráfico do resultado obtido que também pode ser salvo no formato de imagem.

Utilizando as ferramentas corretas, tais etapas podem ser seguidas sem precisar desenvolver um código muito extenso e complexo. No entanto tais etapas fornecem um resultado final em unidades arbitrárias, para o eixo X é necessária uma calibração para realizar a conversão entre colunas das imagens e comprimento de onda.

Para a conversão do eixo Y para unidades usuais (transmitância ou absorvância) são necessários ajustes às etapas de códigos projetadas. Por se tratarem de unidades relativas, para a conversão entre intensidade de luz e transmitância (e posteriormente absorvância) é preciso adquirir uma imagem da análise da matriz da amostra. Assim, como apresentado na equação (8) os valores de Y obtidos pela soma da quantidade de intensidade luminosa em cada pixel da coluna durante a análise de uma amostra qualquer, devem ser divididos pelos valores de Y obtidos da coluna correspondente na análise da matriz. Essa operação fornece um valor de Y correspondente à transmitância da amostra analisada. Para valores em absorvância, basta converter os valores obtidos utilizando a equação (7).

O programa desenvolvido para operar o aparelho, que foi denominado PySpec se inicia com o preparo dos parâmetros iniciais, como a importação de módulos e bibliotecas e a definição de variáveis que serão utilizadas eventualmente no programa (Figura 14).

```
import numpy as np
import cv2
from matplotlib import pyplot as plt
import math as m

camera= cv2.VideoCapture(0) #Inicia a câmera

xsb=[]                      #Valores de x da matriz
ysb=[]                      #Valores de y da matriz

Hor_min=350                 #Limite mínimo horizontal
Hor_max=530                 #Limite máximo horizontal
Ver_min=191                 #Limite mínimo vertical
Ver_max=195                 #Limite máximo vertical
```

Figura 14: Início do programa desenvolvido em Python para operar o LabitanSpec, denominado

O “caminho” que o programa vai seguir, se inicia na função `main()`, apresentada na Figura 14. Como pretendido, a função aguarda até o usuário informar o nome desejado para os arquivos da análise e, após receber essa informação, ele aguarda o comando para iniciar a análise da matriz da amostra (branco), dando tempo para o usuário preparar a cubeta com a matriz no aparelho. Após o comando ser dado, é acionada uma função, denominada `Medida()`, responsável por fazer a captura e processamento da imagem. Após a medida da matriz estar pronta, novamente o programa aguarda o comando do usuário, porém dessa vez para iniciar a medida da amostra. Ao fim o programa se encerra.

```
def main():          #PROGRAMA PRINCIPAL

    arq = input("Digite o nome do arquivo: ")          #Recebe o nome do arquivo

    while True:
        iniciamedidaB= input("Iniciar a análise da matriz (branco)? (s/n): ") #Aguarda para iniciar a medida
        if iniciamedidaB == "s" :
            Medida(arq+"_branco",1)          #Inicia a medida do branco

            while True:
                iniciamedidaAm= input("Iniciar medida da amostra?(s/n): ") #Aguarda para iniciar a medida
                if iniciamedidaAm== "s":
                    Medida(arq,0)          #Inicia a medida da Amostra
                    break
                else:
                    pass
            print()
            print('Obrigado por utilizar o LabitanSpec')
            print()

            break

    else:
        pass
```

Figura 15: Função principal do PySpec, responsável pela estrutura do processo de medida.

A função `Medida()`, utilizada no trecho mostrado na Figura 15 pode ser vista na Figura 16:

```
def Medida(NomeArq,branco):

    n= 10          #número de imagens coletadas para a média
    for i in range(15):
        temp = Captura_Imagem() # Bate algumas fotos para ajustar a camera
        print('Capturando Imagem...')

        capMed=Captura_Imagem()

        for i in range(n):
            capMed= cv2.addWeighted(capMed, (1-i/n),Captura_Imagem(), (i/n),0)

        Img_para_Espectro(capMed,NomeArq, branco)

    if branco == 1:
        pass
    else:
        crop = capMed[Ver_min:Ver_max, Hor_min:Hor_max]
        cv2.imwrite(NomeArq+'.png',crop)#salva um arquivo de imagem da medida
        print('Arquivos Salvos!')
```

Figura 16: Função `Medida()`, responsável pela captura, suavização e armazenamento da imagem referente à análise

Essa função recebe dois argumentos, que são parâmetros principais que definem seu funcionamento. O primeiro, denominado “NomeArq” irá conter o nome de arquivo informado pelo usuário ao rodar o programa inicialmente, já o segundo argumento, denominado “branco” pode conter dois valores possíveis, 0 ou 1 e define a informação se a análise em curso é uma análise de amostra ou de uma matriz, respectivamente.

A função se inicia fazendo a captura de 15 imagens com a webcam, essas imagens não são armazenadas porém esse processo é feito para garantir que a câmera está ajustada ao ambiente para garantir que a imagem da medida não terá defeitos resultantes da súbita iluminação da câmera.

Após esse processo a função apresenta uma mensagem de controle para o usuário, informando que a medida será feita, imediatamente seguida da medida em si, que é a captura da imagem utilizando a função `Captura_Imagem()`, a informação obtida dessa função, ou seja a fotografia obtida do aparelho, fica armazenada na variável “capMed” que será utilizada durante o processamento, que é a conversão da imagem obtida em um espectro. Essa conversão será feita utilizando uma função criada, denominada “`Img_para_Espectro()`” utilizando os parâmetros devidos.

Após o processamento, foi introduzida uma condicional no programa, essa condicional dita que caso se trate de uma análise de matriz a função não deve fazer mais nada, no entanto caso seja a análise de uma amostra, ela corta a região da imagem referente ao espectro e salva essa imagem em um arquivo com o nome cedido pelo usuário e imprime uma nova mensagem de controle para o usuário informando que os arquivos foram salvos.

A função `Img_para_Espectro()` pode ser vista na Figura 17. A função recebe três argumentos, o primeiro, denominado “img” é a imagem que vai ser processada, o segundo “nome” é o nome do arquivo onde será salvo os dados da conversão e o terceiro argumento é a informação do tipo de análise que está sendo feito, nos mesmos moldes da função anterior, sendo o valor 0 para análise de uma amostra e 1 para análise de uma matriz.

A função começa definindo duas variáveis denominadas `xs` e `ys` nas quais serão listados os valores referentes aos eixos `x` e `y`, respectivamente. Após esse processo, é possível identificar uma linha de comentário em vermelho. Essa linha de código é uma das que serve para definir o tipo de análise que será realizada quanto ao processamento de imagem. Caso desejado, essa linha de código converte a imagem inserida como argumento da função para uma escala de cinza, o que retira da imagem a informação de cor o que resulta em uma imagem onde as partes com maior intensidade luminosa apresentam uma quantidade maior de cor branca e as partes com baixa intensidade de luz se apresentam de forma mais escura. Isso permite acessar os valores da quantidade de cor branca em cada pixel da imagem e realizar operações com esses valores.

A sessão seguinte do código da função recebe os valores obtidos da calibração realizada, que nos permite converter os valores do eixo `X` dos gráficos produzidos. A seguir, a imagem convertida é acessada e dividida em colunas dentro do intervalo horizontal definido pelas variáveis iniciais “`Hor_min`” e “`Hor_max`”, os valores de cada coluna são convertidos através da equação linear obtida na calibração e cada um é armazenado em uma variável denominada `x` e adicionado a uma lista de valores denominada “`xs`”. Em casos onde será feita a análise dos valores de RGB da imagem obtida, os valores de `R`, `G` e `B` de cada pixel da

coluna são obtidas nas variáveis definidas como “red”, “green” e “blue” e somados a uma variável denominada “y”. Já em casos onde a análise da imagem é feita através dos valores de intensidade luminosa da escala de cinza, os valores da intensidade de branco de cada pixel da coluna é somado à variável “y”.

O código segue com uma condicional, na qual para casos de análise de matriz, o valor de y da coluna é adicionado a uma lista de valores denominada “ysb”, enquanto para casos de análise de amostras, o valor de y da coluna da amostra é dividido pelo valor de y da coluna correspondente da matriz e armazenado em uma variável yT, ou seja, o valor de y em transmitância. O valor de yT é posteriormente convertido para absorvância e adicionado na lista de valores “ys”. A seguir, após todas as colunas serem analisadas, os valores obtidos nas listas “xs” e “ys” são salvos em um arquivo de texto externo e é exibido o gráfico obtido da análise.

```

def Img_para_Espectro(img, nome, branco):

    xs=[]                #Valores de x da Amostra
    ys=[]                #Valores de y da Amostra

    #PARA ANÁLISE DE CINZA RETIRE O # DO COMEÇO DA LINHA ABAIXO
    #gray= cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_BGR2GRAY) # converte a imagem para cinza

    #Dados de calibração da conversão Coluna->Comprimento de Onda (y=ax+b)
    a=1.8104
    b=-245.14

    print('Processando Dados...')
    for coluna in range(Hor_min,Hor_max): #Range de colunas analisadas

        x = a*coluna+b                #Aplica a calibração dos valores de x

        if branco==1:
            xsb.append(x)            #Adiciona o valor de x no branco
        else:
            xs.append(x)             #Adiciona o valor de x na medida
        y=0
        for linha in range(Ver_min,Ver_max): #range de linhas analisadas

            px=img[linha,coluna]      #Acessa o pixel em dadas coordenadas
            blue=px[0]                #Quantidade de azul no pixel
            green=px[1]               #Quantidade de verde no pixel
            red=px[2]                 #Quantidade de vermelho no pixel

            y=y+red+green+blue        #Soma os valores de cada pixel da coluna em y
            #PARA ANÁLISE DE CINZA RETIRE O # DO COMEÇO DA LINHA ABAIXO E ADICIONE UM # NA LINHA ACIMA
            #y=y+(gray[linha,coluna])

            if linha==Ver_max-1:      #Ao final da coluna, adiciona a soma de y na lista

                if branco==1:
                    ysb.append(y)
                else:
                    #CÁLCULOS DE TRANSMITANCIA E ABSORVANCIA
                    yT= (y*1.0)/ysb[coluna-Hor_min]          #converte o valor de y para Transmitância
                    yABS= - m.log(yT,10)                     #converte o valor de y de Transmitância para Absorvância
                    #ys.append(y)
                    ys.append(yABS)
                else:
                    pass

    if branco==0:
        texto= 'Comprimento de onda; Abs ; Abs Matriz \n'
        print('Salvando Arquivos...')
        for i in range(len(xs)): #adiciona cada par do espectro em um arquivo externo
            texto= texto+str(xs[i])+';'+str(ys[i])+';'+str(ysb[i])+'\n'
        salva= open(nome+'.txt','w')
        salva.write(texto)
        salva.close()
        plt.plot(xs,ys)
        plt.show()

```

Figura 17: Função Img_para_Espectro(), responsável pelo processamento da imagem capturada e pelo armazenamento dos resultados da medida.

4.2.6 Calibração:

Para realizar a calibração do aparelho, o que permitirá uma conversão do resultado obtido de “Colunas x Absorvância” para “Comprimento de onda X Absorvância”, foi realizada uma análise utilizando uma fonte de luz não contínua: uma lâmpada fluorescente da marca Soleil de 20W do tipo Warm Light, de temperatura de cor de 6500K, operando em 127V. Essa lâmpada fornece um espectro contendo picos de emissão, com comprimentos de onda específicos, sendo possível comparar esses picos com o obtido da imagem produzida pelo espectrofotômetro desenvolvido. O espectro real da lâmpada foi obtido utilizando um espectrofotômetro portátil modelo USB-2000+ da Ocean Optics utilizando um *probe* de análise de fontes luminosas; a aquisição de dados foi feita no software distribuído pela Ocean Optics para uso do aparelho, o SpectraSuite versão 2.0.162 (Figura 18). Posteriormente os dados obtidos dessa calibração foram inseridos no código do programa desenvolvido.

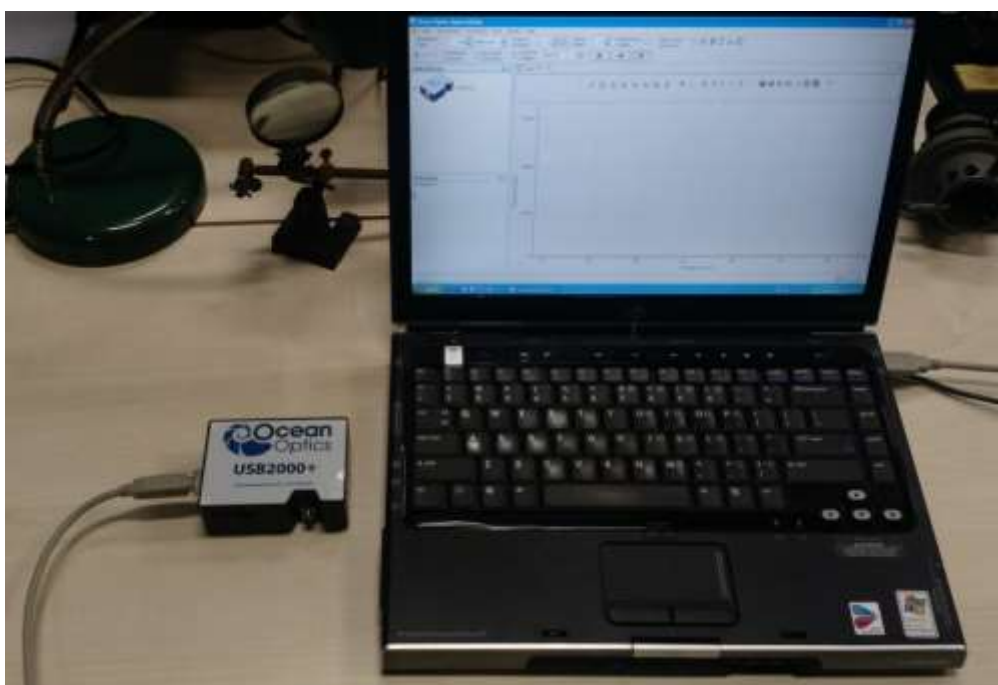


Figura 18: Espectrofotômetro modelo USB-2000+ da Ocean Optics e tela do programa SpectraSuite versão 2.0.162

4.2.7 Análises

Para avaliar as capacidades do aparelho desenvolvido foi realizada a análise de uma solução de CoCl_2 . Foram preparadas soluções de 20ml nas concentrações 0,1M, 0,2M, 0,3M, 0,4M e 0,5M. As análises foram feitas ligando o aparelho desenvolvido em uma fonte elétrica da marca Minipa operando em 12V como o indicado para o tipo de lâmpada utilizado. As mesmas soluções foram também analisadas no aparelho da Ocean Optics, no entanto utilizando um *probe* de análises *in situ* (Figura 19), a fim de avaliar os resultados obtidos.



Figura 19: *Probe* de análise *in situ* utilizado para realizar as análises no aparelho da Ocean Optics

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados obtidos das diversas etapas do projeto serão apresentados nessa seção, tal como uma avaliação de tais resultados

5.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO APARELHO

A seguir são apresentados os resultados do processo de modelagem 3D das peças projetadas, tal como as configurações utilizadas na câmera que age como detector e as peças finais após a impressão. Os códigos-fonte das peças encontram-se nos Apêndices A, B, C e D.

5.1.1 Modelagem 3D

- **Fonte de Luz:**

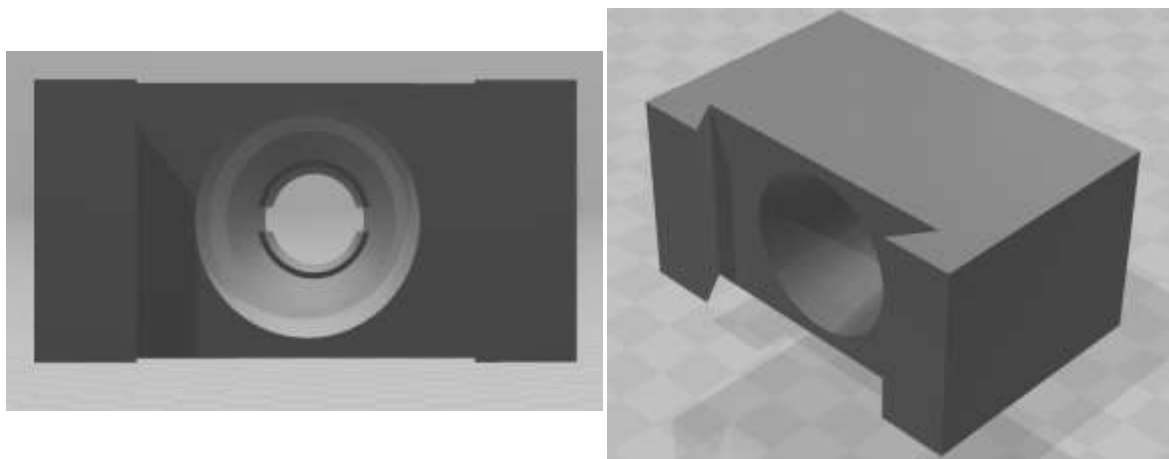


Figura 20: Objeto 3d desenvolvido referente ao módulo da fonte de luz do LabitanSpec. (a) Vista Frontal, Vista externa.

Em relação ao esboço apresentado inicialmente é possível observar a adição do sistema para inserção e fixação do suporte da lâmpada utilizada como fonte de luz, como pode ser visto no centro da Figura 20a.

O módulo projetado possui 40mm de comprimento, 70mm de largura e 35mm de altura sendo que o cone interno possui um diâmetro maior de 30mm e o diâmetro menor igual à 13mm, para devido ao diâmetro do suporte da lâmpada utilizada.

Para o processo de impressão, foi utilizada uma altura de camada de 0,2mm e 20% de preenchimento interno, que confere uma resistência estrutural suficiente para a peça.

- **Suporte de Amostra**

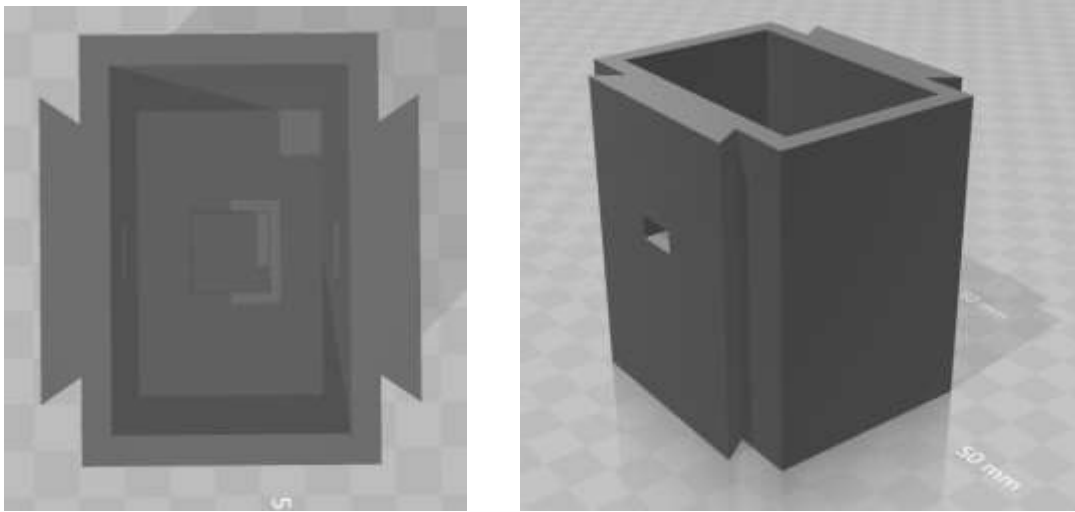


Figura 21: Objeto 3d desenvolvido referente ao módulo do suporte de amostra do LabitanSpec. (a) Vista Frontal, Vista externa.

O módulo apresentado na Figura 21 foi projetado contendo 63mm de comprimento (incluindo as travas *dovetail*), 70mm de largura e 70mm de altura com uma espessura das paredes de 5mm. O corte destinado ao feixe de luz foi feito a partir de um retângulo de 10mm de largura e 5mm de altura. O espaço interno para a cubeta foi feito com dimensões internas de um quadrado de 16mm de lado e uma espessura de 4mm. Foi projetada também para esse módulo uma tampa com as mesmas dimensões do módulo porém altura de 3mm, para impedir a entrada de luz durante as análises

Tal como o módulo apresentado na Figura 20, foi utilizada uma altura de camada de 0,2mm e um preenchimento interno de 20%. Para esse módulo, foi necessário o uso de suportes na região do espaço destinado ao feixe de luz, incluídos no fatiamento da peça para que não ocorresse a deformação da peça projetada.

- **Detector**

Na figura 22 é apresentado o módulo de detecção projetado, possuindo 110mm de comprimento, 70mm de largura e 70mm de altura. Foi adicionado um semi-cilindro com 6mm de diâmetro na parte traseira do módulo para permitir a saída do fio da câmera utilizada. O espaço destinado a entrada do feixe de luz no módulo foi desenvolvido a partir de um retângulo com 20mm de largura e 5 de altura, o aumento em relação ao módulo anterior foi feito como uma medida de precaução caso houvesse um desvio na luz durante o caminho óptico. Análogo ao módulo apresentado na Figura 21, foi projetada uma tampa de 3mm de altura para esse módulo. As configurações de impressão foram as mesmas utilizadas nos outros módulos e também foi necessário o uso de suportes no espaço destinado ao feixe de luz

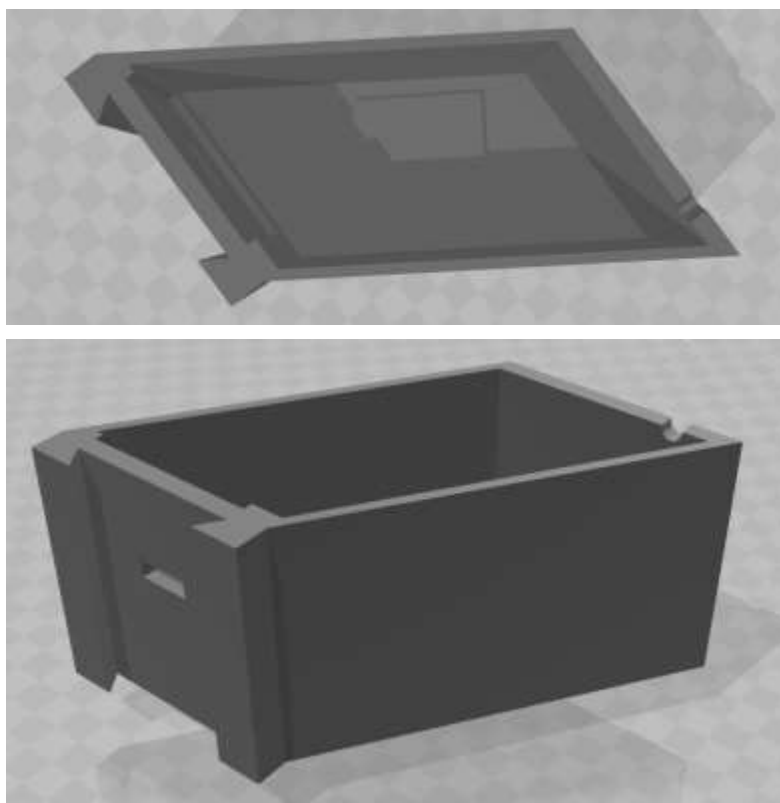


Figura 22: Objeto 3d desenvolvido referente ao módulo do detector do LabitanSpec. (a) Vista Frontal, Vista externa.

5.1.2 Configuração da câmera:

As mudanças na configuração interna da câmera foram realizadas para permitir a melhor visualização dos resultados do aparelho desenvolvido, nas Figuras 21a e 21b é possível visualizar que com um valor de abertura igual a 2500, a imagem obtida referente ao espectro de emissão da lâmpada W5W é muito mais brilhante, isso resulta na saturação dos sensores da câmera o que pode ser observado pela cor branca vista ao longo da imagem. Essa saturação é um problema por não permitir uma boa leitura do sinal recebido pela câmera. O valor 500 para a abertura foi definido por apresentar uma intensidade alta de luz recebida sem que ocorra a saturação do sensor, permitindo melhores análises.

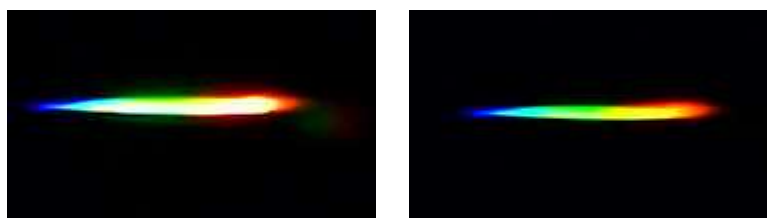


Figura 23: Imagens obtidas no LabitanSpec referentes aos espectros de emissão da lâmpada W5W em diferentes aberturas da lente da câmera detectora: (a) Valor de abertura 2500; (b) Valor de abertura 500

Na figura 24, é possível visualizar as configurações finais utilizadas na câmera, além das mudanças no valor de abertura, foi desativada a opção “*White Balance Temperature, Auto*” que consiste em ajustar automaticamente a coloração da imagem obtida de acordo com a iluminação do ambiente, ajustando os valores da “temperatura” da cor branca. Essa alteração foi feita para impedir ajustes automáticos que podem alterar as medidas realizadas.



Figura 24: Configuração final utilizada para a câmera do aparelho.

5.1.3 Impressão 3d e montagem das peças:

Após a impressão, pintura e montagem das peças o resultado final da parte física do aparelho desenvolvido pode ser visto na Figura 25:

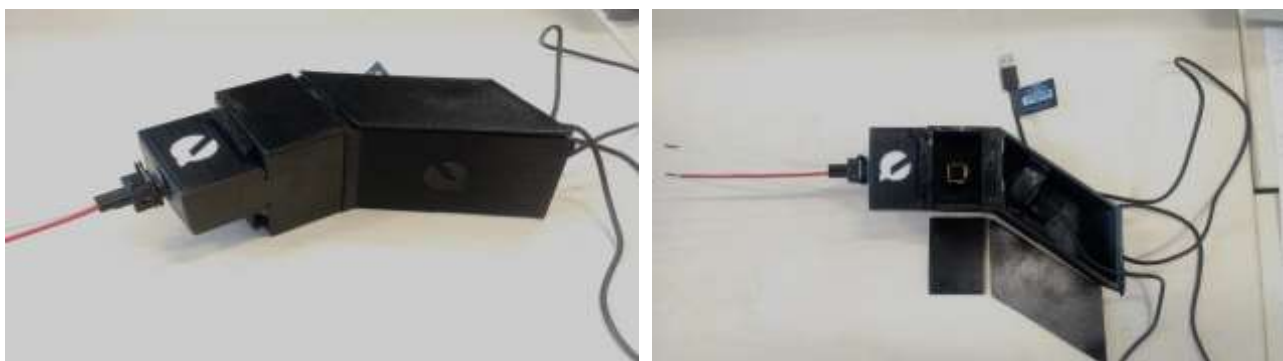


Figura 25: O aparelho desenvolvido, LabitanSpec, montado ao final do desenvolvimento. (a) Vista tridimensional contendo a visualização das peças montadas incluindo as tampas do aparelho;(b) aparelho montado e destampado, permitindo a visualização da webcam fixada no seu interior e o espaço destinado a cubeta.

Dentre as adições feitas nas peças após a impressão vale ressaltar que no módulo da fonte de luz, apresentado nas Figuras 26a e 26b foram adicionados adesivos acolchoados nas laterais, pois a trava no formato “dovetail” dessa peça foi projetado em dimensões maiores do que deveria, o mesmo problema foi corrigido na peça do detector antes da impressão, não sendo necessário fazer essa adição nessa peça também.

Ainda se tratando do módulo da fonte de luz, foi adicionado no cone interno da peça, uma cobertura de papel alumínio, para diminuir a perda de luz e direcioná-la para a região do feixe.

As duas peças que fazem parte do contato elétrico entre a lâmpada e uma fonte de energia foram feitos utilizando peças adquiridas em uma loja de auto-peças, sendo eles um soquete comum para lâmpadas W5W e outro um adaptador para esse soquete com saída para fios, fabricado pela Ford.

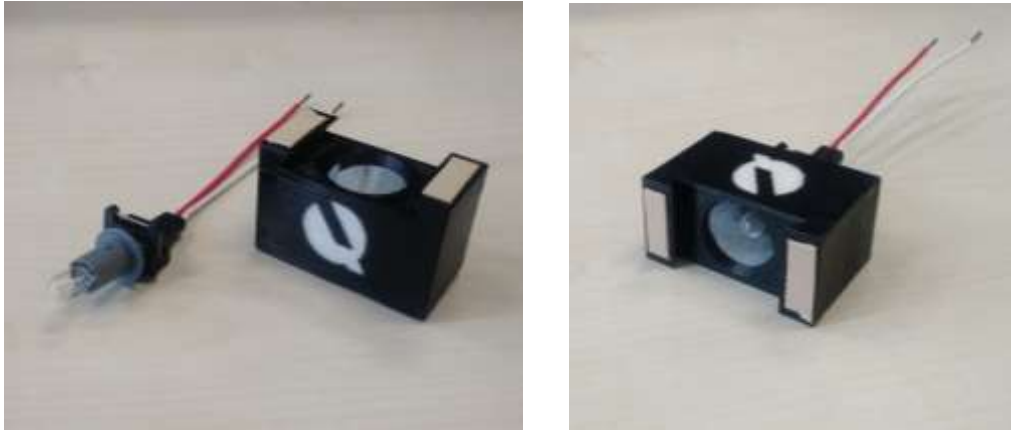


Figura 26: O módulo de iluminação após a finalização. (a) Peças separadas; (b) Peça final após montagem.

No módulo de amostra, apresentado nas Figuras 27a e 27b foram adicionados adesivos do tipo Silen-Gotas, utilizados como antiderrapantes em placas de vidro e afins, para agir como travas do módulo da fonte de luz. Foram adicionados também os adesivos acolchoados na parte interna para proteção da cubeta, como previamente descrito.

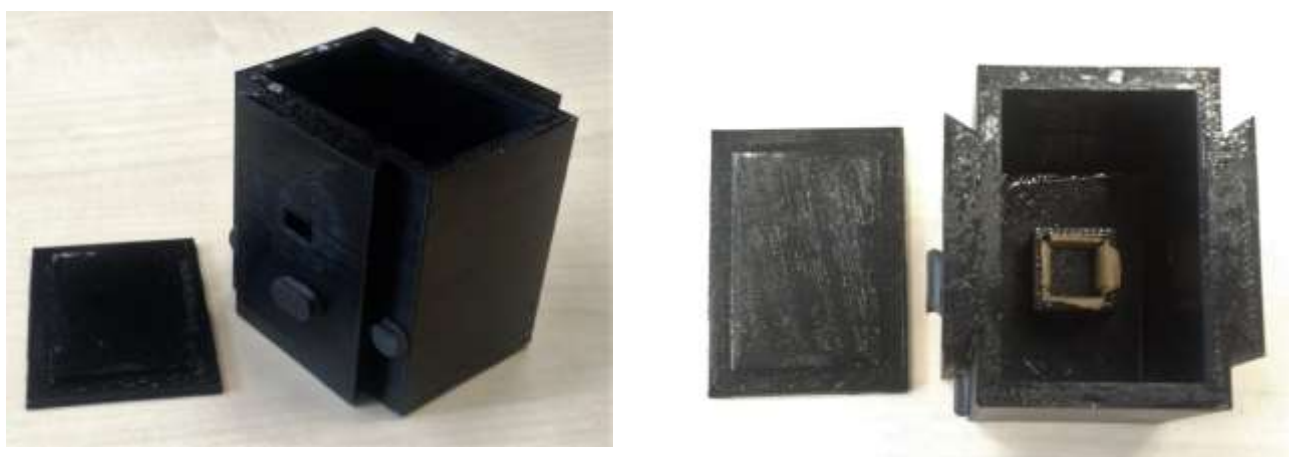


Figura 27: Módulo de amostra após a finalização. (a) Vista tridimensional apresentando as adições externas à peça; (b) Vista superior, que apresenta o espaço destinado a cubeta, contendo adesivos acolchoados.

A fenda desenvolvida foi acoplada no módulo de amostra, na parte interna anterior ao espaço destinado à cubeta no sentido do feixe de luz produzida. O resultado obtido da avaliação das dimensões da fenda (Figura 28) aponta uma fenda com uma largura de 0,30mm e altura de 0,25mm.

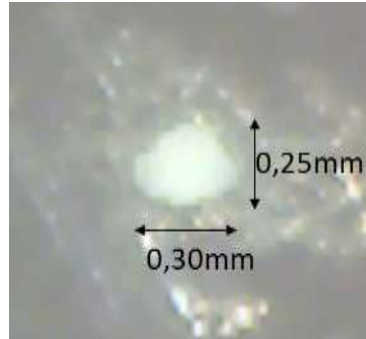


Figura 28: Análise da fenda produzida a fim de definir suas dimensões.

No módulo de detecção não foram feitas adições ao projeto, no entanto após a introdução da webcam utilizada, a mesma foi fixada no módulo utilizando fita isolante para garantir que ela não se mova, mesmo com o movimento do módulo. O mesmo foi feito com a rede de difração utilizada, para garantir melhor fixação, mesmo que a rede já estivesse alocada em um compartimento próprio, como mostrado na Figura 29.



Figura 29: Módulo de detecção após montagem. (a) Vista tridimensional; (b) Vista superior apresentando a rede de difração e a webcam utilizadas fixadas no local.

5.2 PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL:

Na Figura 30 é apresentada a imagem obtida de uma análise da fonte de luz do aparelho, sem a presença de uma amostra, obtida a fim de avaliar a funcionalidade do aparelho, é também apresentada a imagem em escala de cinza. Para ambas foi obtido um espectro de emissão da lâmpada W5W utilizando o programa desenvolvido, sendo que para a imagem colorida foi utilizado o método de análise e soma dos valores de RGB de cada pixel, enquanto na imagem em escala de cinza foram medidos e somados os valores referentes a quantidade de branco em cada pixel, o que forneceria uma informação análoga à quantidade de luz nesse ponto. Na Figura 31 é apresentado o resultado de ambas as análises a fim de comparar entre si os métodos utilizados. Os valores do eixo y são dados em unidades arbitrárias de intensidade luminosa, já que não está sendo avaliada uma amostra nesse caso. Os valores do eixo x são os valores já corrigidos em nanômetros para melhor visualização das cores apresentadas na imagem original e seus correspondentes comprimentos de onda.



Figura 30: Imagens da luz emitida pela lâmpada incandescente do tipo W5W. Imagens obtidas através do programa PySpec desenvolvido. (a) imagem original colorida; (b) imagem em escala de cinza, utilizada para o processamento.

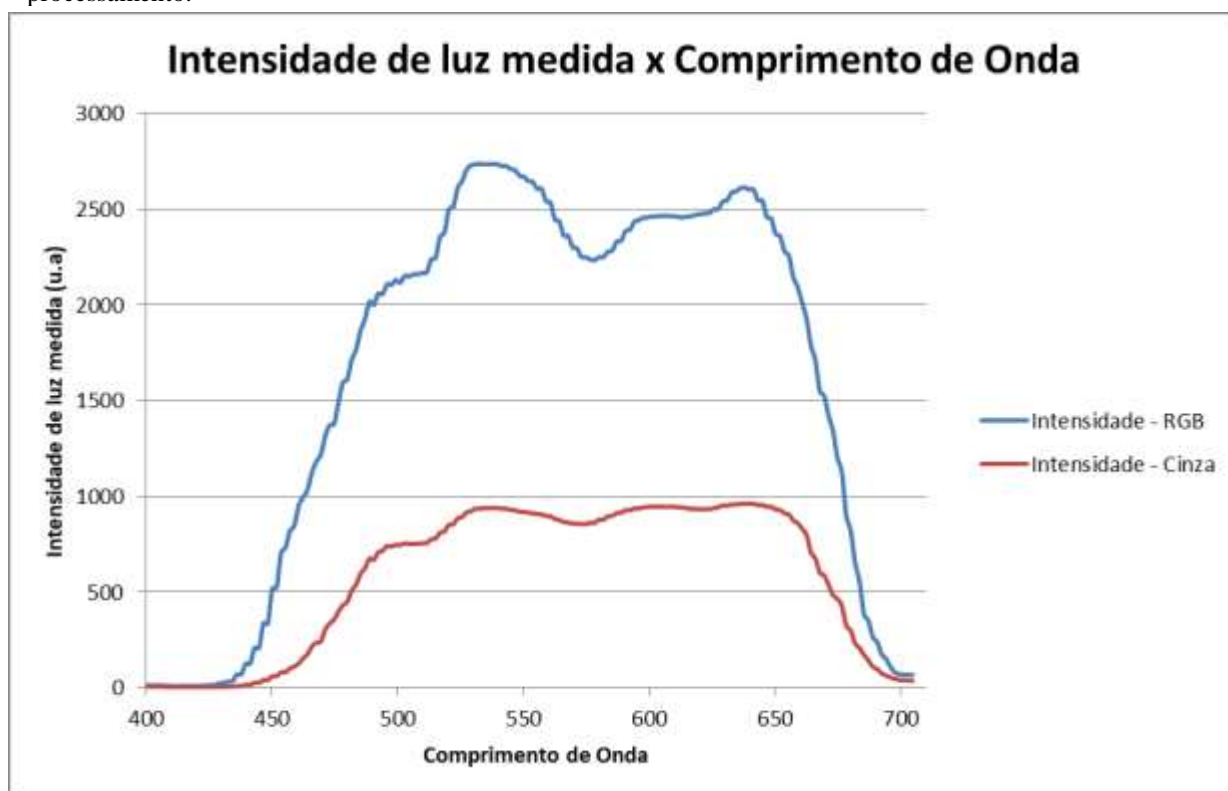


Figura 31: Gráfico referente ao espectro de emissão da lâmpada W5W obtido utilizando diferentes métodos de análise de imagem, em azul a análise dos valores RGB da imagem e em vermelho a análise da intensidade de luz apresentada na escala de cinza. Gráfico obtido utilizando o PySpec

Como é possível observar na imagem, a intensidade de luz emitida pela lâmpada na região do azul é bem baixa, isso era esperado devido à coloração amarelada característica de lâmpadas de filamento de tungstênio como essa. No entanto a intensidade medida na região próxima à 450nm decai mais rapidamente quando utilizado o método de análise da imagem em escala de cinza, isso provavelmente é resultado da fórmula interna de conversão que foi utilizada no programa desenvolvido para converter a imagem de colorida para uma escala de cinza. Comumente os algoritmos de conversão atribuem uma menor “importância” para o azul em relação às cores vermelha e verde, isso é feito para simular o processamento de cores do olho humano, que tem menor sensibilidade na região do azul (COOK, 2009).

Ao serem comparados os dois gráficos obtidos pode-se afirmar que o método que utiliza a soma dos valores RGB da imagem é mais recomendado para o uso, isso se dá pelo fato de que as intensidades medidas são muito maiores, o que deve fornecer um maior intervalo de concentração onde é possível realizar as medidas.

Comparando o espectro da Figura 31 com o espectro normalizado na mesma região obtido utilizando o aparelho comercial da Ocean Optics (Figura 32), podem-se observar algumas características, como o fato de que o aparelho desenvolvido não apresenta um espectro idêntico ao esperado, apesar de apresentar uma boa resposta. Outra característica apresentada é o fato de que na região próxima de 700nm o LabitanSpec deixa de apresentar resposta, apesar de que pelo resultado apresentado pelo aparelho da Ocean Optics, é possível observar um espectro contínuo inclusive na região do infravermelho próximo. Isso ocorre devido ao fato de que câmeras como a utilizada possuem um filtro que impede a passagem de radiação no infravermelho próximo para os sensores, supostamente isso é feito para ser obtida uma melhora nas imagens, no entanto para os fins pretendidos desse trabalho, o ideal seria ter uma câmera capaz de adquirir informações dessa região do espectro também (LIU, Y.; YU, F., 2014).

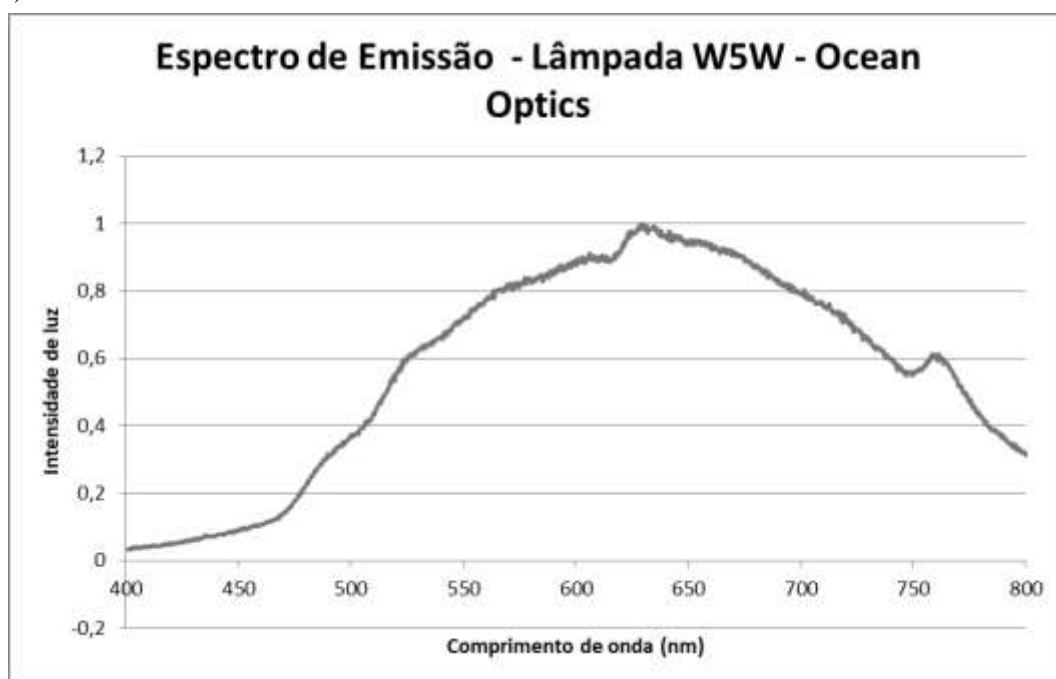


Figura 32: Espectro de emissão da lâmpada W5W obtido utilizando o aparelho comercial da marca Ocean Optics

O segundo parâmetro avaliado no código desenvolvido foram as diferenças em relação à captura da imagem a ser processada. Foi avaliada a possibilidade de melhora nos resultados obtidos ao se utilizar ao invés de uma única captura por medida, uma média referente a uma série de medidas. Essa modificação pode possibilitar melhores resultados devido ao fato de que sinais referentes a ruídos eletrônicos são aleatórios então podem ser atenuados ao se utilizar uma média (MOORE, 2009). A relação obtida entre os dois métodos de aquisição de imagem estão apresentados na Figura 33, na qual para o caso da média de imagens foi utilizada uma média de 10 capturas já que com o aumento do número de capturas realizadas ocorre o aumento no tempo de análise. Este Cálculo de média é realizado na função “Medida()” descrita no item 4.2.5, para valores de ‘n’ diferentes de “1”.

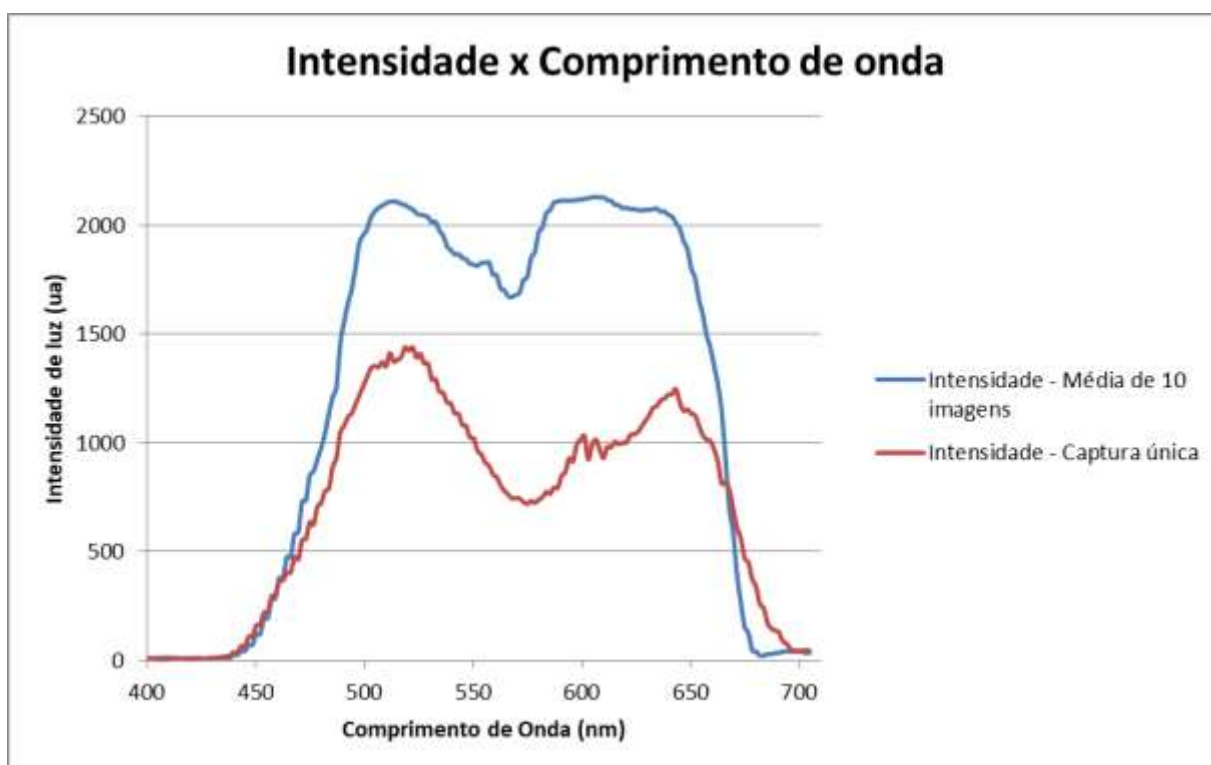


Figura 33: Gráfico referente ao espectro de emissão da lâmpada W5W obtido utilizando diferentes métodos de captura de imagem, em azul é apresentado o espectro obtido a partir da média de 10 capturas e em vermelho é apresentado o espectro obtido com apenas a captura de uma imagem. Gráfico obtido utilizando o PySpec.

É possível observar que quando utilizado o método de captura única, o resultado obtido mais ruidoso e possui uma menor intensidade de sinal para as mesmas condições de análise. Isso aponta que o método que realiza uma média de múltiplas imagens é mais apropriado para o aparelho.

5.3 CALIBRAÇÃO DO APARELHO:

A imagem obtida da lâmpada fluorescente (Figura 34) forneceu o seguinte espectro após a análise no programa desenvolvido (Figura 35):

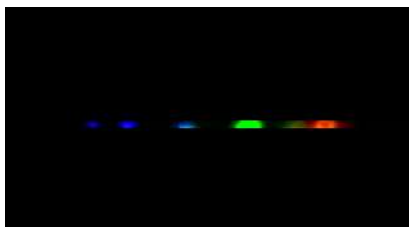


Figura 34: Imagem da luz emitida pela lâmpada fluorescente do tipo Warm Light 20W da marca Soleil . Imagem obtidas através do programa PySpec desenvolvido.

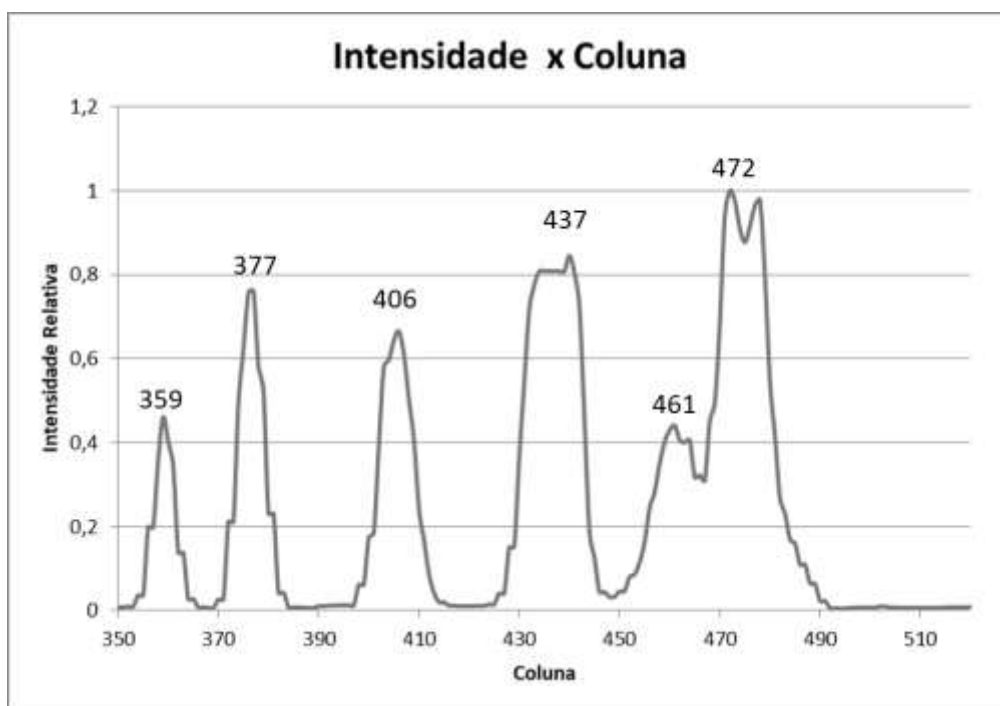


Figura 35: Gráfico referente ao espectro de emissão da lâmpada fluorescente do tipo Warm Light 20W da marca Soleil.

O espectro obtido, em unidades arbitrárias de intensidade luminosa, com valores de intensidade registrados contra os números das colunas da imagem adquirida, foi comparado com o espectro obtido no aparelho comercial (Figura 36). Os valores obtidos no aparelho comercial estão de acordo com os valores encontrados na literatura para lâmpadas semelhantes (ELVIDGE, 2010). A relação entre os comprimentos de onda de cada pico (conforme o aparelho comercial) e sua posição na imagem adquirida pelo aparelho desenvolvido permite estabelecer uma função de transferência entre os dois conjuntos de dados, permitindo a calibração das colunas da imagem adquirida em termos de comprimento de onda. Esta relação mostrou-se aproximadamente linear e foi modelada por uma equação de reta.

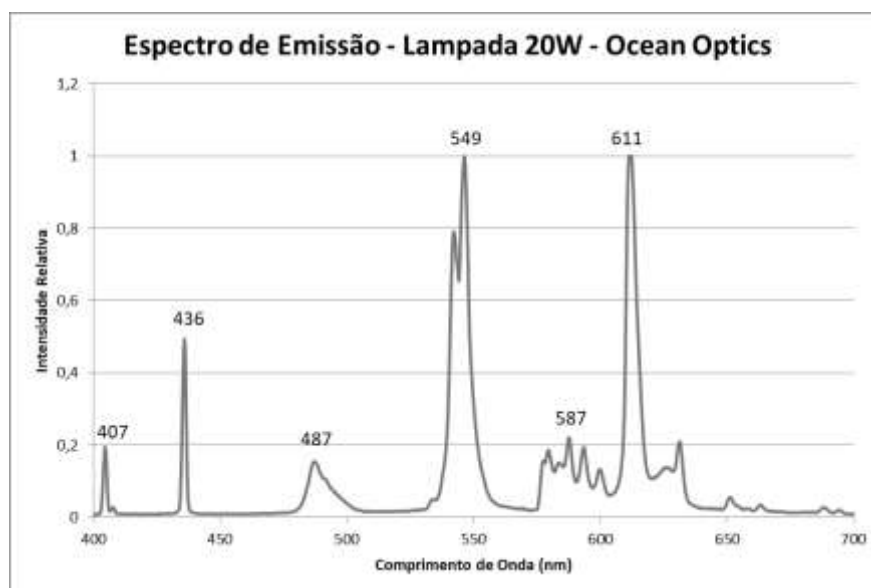


Figura 36: Espectro de emissão da lâmpada fluorescente do tipo Warm Light 20W da marca Soleil obtido utilizando o aparelho comercial da marca Ocean Optics.

A correlação entre os picos assinalados está apresentada na Tabela 1, seguida do gráfico correspondente, que fornece conversão dos dados de coluna da imagem obtida no aparelho para comprimento de onda em nm.

LabitanSpec (Coluna)	Ocean Optics (comprimento de Onda em nm)
359	407
377	436
406	487
437	549
461	587
472	611

Tabela 1: Tabela relacionando os resultados em colunas obtidos no LabitanSpec com seus correspondentes em comprimento de onda obtidos no aparelho comercial da marca Ocean Optics

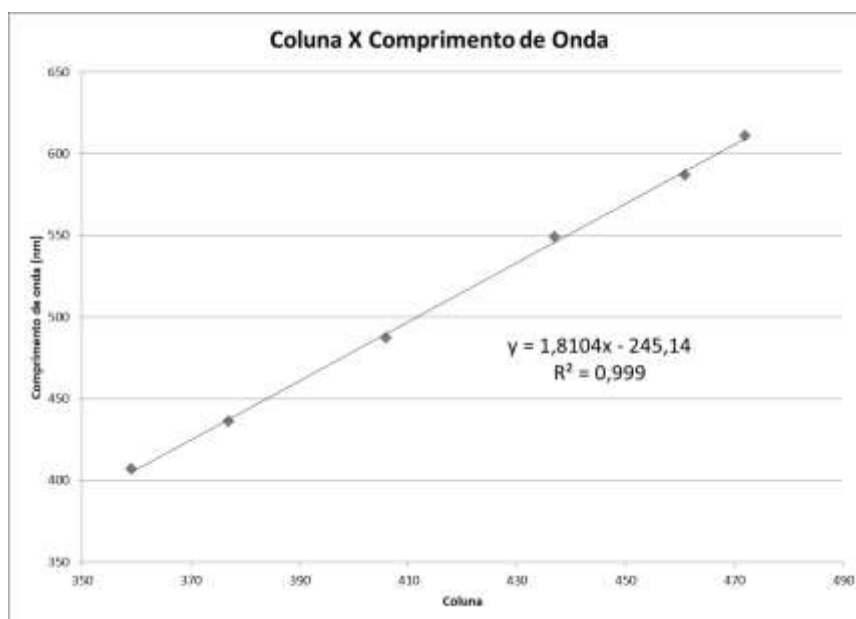


Figura 37: Curva de calibração obtida para a conversão de Colunas no espectro obtido no PySpec para comprimento de onda.

A equação obtida e o coeficiente de linearidade da reta mostram que a correlação dos pontos foi realizada corretamente, não apresentando problemas em relação à linearidade do sensor do aparelho desenvolvido. Os dados obtidos nessa calibração foram inseridos no programa PySpec, como parte da função “Img_para_Espectro()” (item 4.5.2), antes de serem realizadas as análises de amostras.

5.4 ANÁLISE DE AMOSTRAS:

As amostras de soluções de CoCl_2 foram analisadas no LabitanSpec e no aparelho comercial da Ocean Optics, utilizando o método de captura da média de múltiplas imagens e com análise dos valores de RGB para que fosse possível avaliar o desempenho do aparelho desenvolvido.

Os resultados obtidos na análise das soluções de CoCl_2 são apresentados na Figura 38:

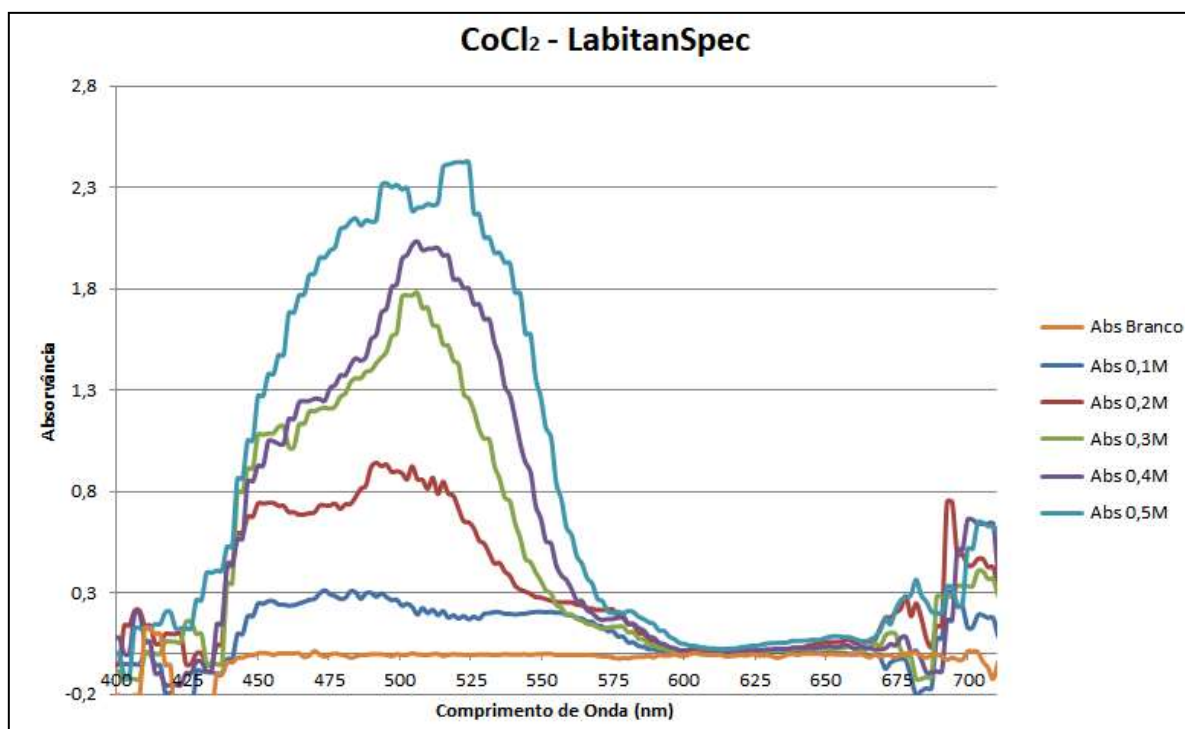


Figura 38: Espectros de absorção de soluções de CoCl_2 em água em diversas concentrações, obtidos utilizando o PySpec com um sistema de aquisição da média de 10 imagens e utilizando a análise dos valores de RGB da imagem obtida.

Na Figura 38, é possível observar uma resposta do aparelho ao aumento da concentração da amostra analisada. No entanto o gráfico obtido ainda apresenta muitos ruídos e inconsistências em relação ao gráfico obtido no aparelho comercial (Figura 39). Especificamente, nas regiões acima de 650 nm e abaixo de 450 nm o resultado apresentado se dá essencialmente por ruídos, por se tratar de regiões onde a intensidade de luz captada nos sensores da câmera é praticamente nula devido ao fato de que abaixo de 450 nm a lâmpada utilizada emite basicamente nenhuma intensidade luminosa e acima de 650 nm a luz emitida pela lâmpada é bloqueada pelo filtro presente na lente da câmera. Tais problemas podem ser resolvidos com mudanças nas peças utilizadas, como lâmpadas que possuam uma cor mais branca, contendo maior intensidade na região do azul e câmeras onde o filtro da região do infravermelho não é presente ou é possível de ser retirado.

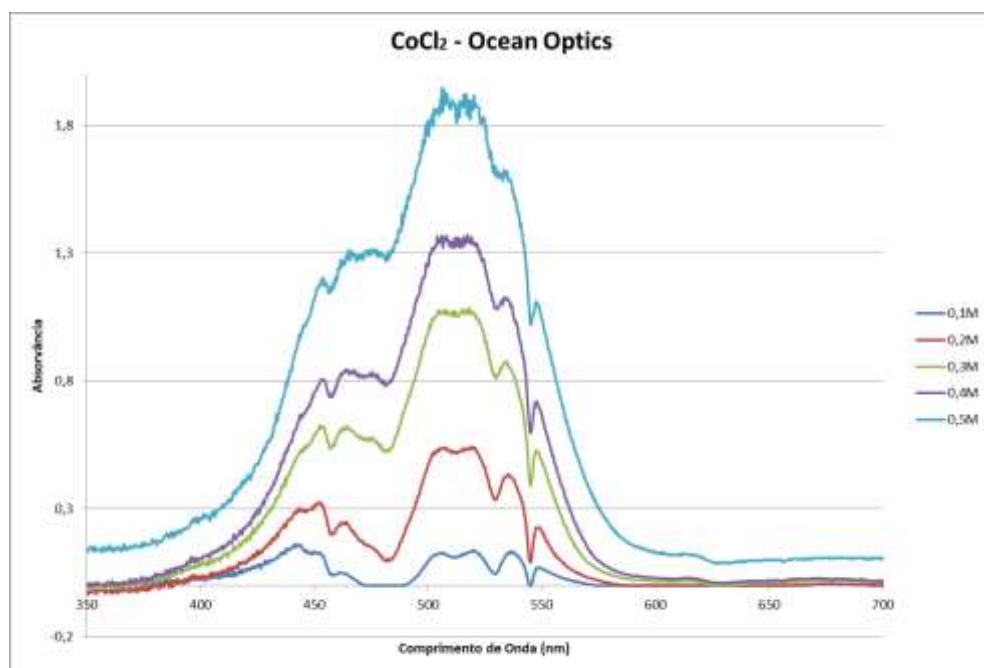


Figura 39: Curva de calibração obtida para a conversão de Colunas no espectro obtido no PySpec para comprimento de onda.

Apesar das discrepâncias apresentadas, é possível observar que o LabitanSpec foi capaz de identificar uma região de absorção na entre 450nm e 550nm, o que era esperado a partir do espectro de absorção da amostra obtido utilizando o aparelho da Ocean Optics. Isso mostra que o aparelho desenvolvido possui uma capacidade de avaliar soluções de amostras que absorvam luz na região entre 450 e 650nm.

Algumas mudanças podem ser realizadas para melhorar os espectros obtidos, quanto à sensibilidade e resolução, como, por exemplo, a redução da fenda de entrada de luz, o uso de uma segunda fenda, após a célula da amostra, o aumento da distância entre a câmera e a grade de difração, o que resulta em um maior espaço ocupado do sensor da câmera e o uso de uma câmera de maior resolução.

Para avaliar a resposta à variações de concentração apresentada pelo LabitanSpec, na Tabela 2 e na Figura 40 são apresentados os valores de absorvância obtidos nos pontos médios das bandas na região próxima a 500nm apresentada no gráfico da Figura 38 e os valores de absorvância no comprimento de onda 506,22nm obtidos no espectrofotômetro da Ocean Optics (Figura 39):

Concentração	Absorvância LabitanSpec	Absorvância Ocean Optics
0,1	0,246003	0,128
0,2	0,924322	0,539
0,3	1,779214	1,064
0,4	2,033212	1,369
0,5	2,425697	1,948

Tabela 2: Resultados de absorvância obtidos pelo LabitanSpec e pelo aparelho da Ocean Optics para as diversas concentrações trabalhadas.

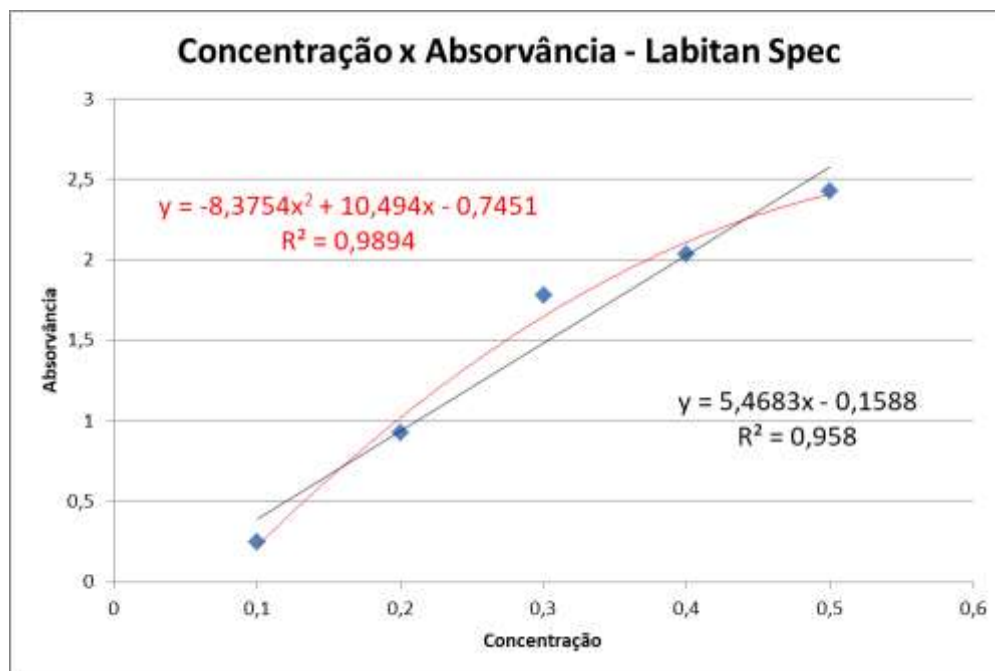


Figura 40: Relação entre concentração e absorvância obtida no LabitanSpec, em preto a reta referente a regressão linear dos pontos apresentados e em vermelho a curva referente a uma regressão polinomial de segunda ordem.

Na Figura 40 além dos pontos obtidos na Tabela 2 são apresentadas duas curvas de tendência: em preto é apresentada a reta referente à regressão linear obtida dos pontos, já em vermelho é apresentada uma regressão polinomial de segunda ordem para os mesmos pontos. Uma resposta linear seria a resposta ideal para um aparelho desse tipo, por apresentar uma relação direta com a lei de Lambert-Beer, no entanto uma resposta não linear, como a obtida pela regressão polinomial não é necessariamente descartável, ela indica uma resposta não linear do aparelho desenvolvido e pode ser utilizada como fator de correção dos valores de intensidade para que seja obtida uma resposta linear como esperado.

A Figura 41 apresenta os pontos de correlação entre a concentração e a absorvância medidos no aparelho da Ocean Optics, mostrando que as soluções preparadas para a análise apresentam uma variação linear entre a suas concentrações e absorvâncias, o que significa que os pontos fora da curva na Figura 40 não são resultados de um mal preparo de soluções.

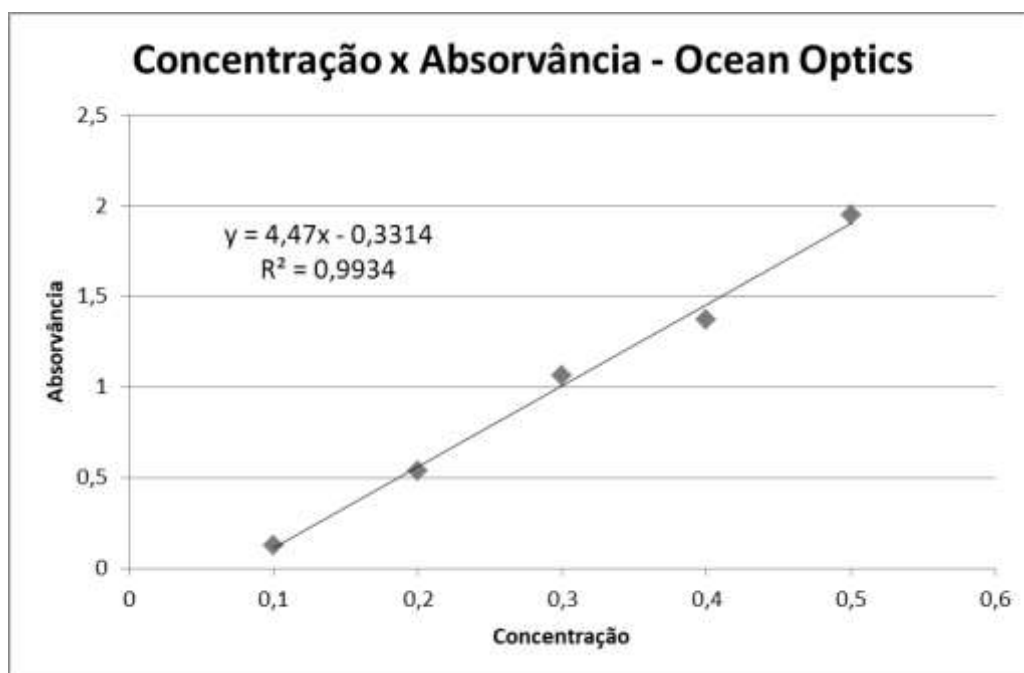


Figura 41: Curva de calibração obtida para a conversão de Colunas no espectro obtido no PySpec para comprimento de onda.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sob o conceito de se desenvolver um trabalho baseado em *Open Source* ou código aberto, os códigos desenvolvidos referentes ao programa produzido e as peças desenvolvidas para o aparelho serão disponibilizados na seção de apêndices sob a licença Ceative Commons – Atribuição 4.0 Internacional. A Figura 42 apresenta o selo indicativo desta licença.



Figura 42: Selo referente à licença Creative Common – Atribuição 4.0 Internacional a qual o trabalho desenvolvido fica submetido

6 CONCLUSÃO:

Quanto aos objetivos propostos, ao observar os resultados obtidos é possível afirmar que o objetivo geral foi alcançado. O aparelho desenvolvido se mostrou capaz fornecer espectros referentes à faixa do visível sendo capaz de diferenciar amostras contendo absorção em diferentes regiões do espectro. É válido ressaltar que o aparelho desenvolvido naturalmente ainda não se apresenta como alternativa para substituir aparelhos comerciais, por não apresentar uma resposta boa a variações de concentração, devido, entre outras coisas, à baixa relação sinal/ruído apresentada. Foram propostas alternativas para solucionar esse problema, como alterações no código desenvolvido ou melhorias nas peças utilizadas. No entanto apesar do baixo desempenho com relação a um aparelho comercial, o LabitanSpec traz uma nova proposta de inovação nos quesitos de ensino e desmistificação da instrumentação e de instrumentos de laboratório, por se tratar de um aparelho simples e bastante versátil. O conceito de um sistema modular se apresenta como ponto positivo por permitir a proposta de novos módulos e melhorias nos módulos já desenvolvidos trazendo possibilidades para sala de aula e laboratórios de instrumentação.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS:

Dentre as diversas melhorias possíveis para o aparelho desenvolvido algumas são listadas abaixo:

- Produção de uma fenda de menores dimensões, o que resultaria em uma maior resolução para o aparelho;
- Utilização de uma segunda fenda, montada após a passagem do feixe de luz pela amostra, o que reduziria a quantidade de luz captada devido a reflexões internas do aparelho;
- Utilização de uma câmera de maior resolução;
- Remoção do filtro infravermelho da câmera empregada, permitindo medidas em maiores comprimentos de onda;
- No módulo da fonte luminosa melhorias que aumentem a fixação do mesmo em relação ao aparelho;
- Também no módulo da fonte luminosa, adição de dutos para ventilação de ar, o que evitaria o superaquecimento da lâmpada e da estrutura plástica do aparelho;
- Realizar testes utilizando outras fontes luminosas contínuas, como leds brancos de alta intensidade para obter uma maior faixa de comprimento de onda permitida para a análise;
- Incorporar o processo de calibração como uma função do programa de aquisição;
- Realizar um estudo estatístico para avaliar a confiabilidade do aparelho.

8 REFERÊNCIAS:

ALBERT, D. R., TODT, M. A., DAVIS, H. F. A low-cost quantitative absorption spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, v.89, n11, p. 1432–1435, 2012

COOK, J. D., Three algorithms for converting color to grayscale. Disponível em <<https://www.johndcook.com/blog/2009/08/24/algorithms-convert-color-grayscale/>>. Acesso em 19 fev. 2018

ELVIDGE, C. D., KEITH, D. M., TUTTLE, B.T., BAUGH, K. E., Spectral Identification of Lighting Type and Character. *Sensors*, v.10, n.4 , p. 3961-3988. 2010

GRASSE, E. K., TORCASIO, M. H., SMITH, A. W., Teaching UV-Vis Spectroscopy with a 3D-Printable Smartphone Spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, v.93, n.1, p. 146–151. 2016

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fundamentals of Physics. 9.ed. New York: John Wiley & Sons, 2011. p. 1211-1228

LIU, Y., & YU, F., Automatic inspection system of surface defects on optical IR-CUT filter based on machine vision, *Optics and Lasers in Engineering*, v.55, p. 243–257. 2014

MOORE, JOHN H, DAVIS, CRISTOHPER C., COPLAN, MICHAEL A. AND GREER, SANDRA C. - Building Scientific Apparatus 4ed Cambridge 2009. p. 185-207, 551-553

PECSOK, R. L., SHIELDS, L. D., CAIRNS, T., MCWILLIAM, I. G., Modern Methods Of Chemical Analysis, 2.ed New York: John Wiley & Sons, 1976. p. 115-143

SALLES, M. R., Espectroscopia Eletrônica dos Compostos de Coordenação. In: FARIAS, R. F. (org.). Química de Coordenação: fundamentos e atualidades. 2. ed. Campinas: Átomo, 2009.

WILSON, M. V., & WILSON, E., Authentic performance in the instrumental analysis laboratory: Building a visible spectrophotometer prototype. *Journal of Chemical Education*, v.94, n.1, p. 44–51. 2017

YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A., Física IV: ótica e física moderna. 12.ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009. p. 84-122

ZEDH, Electromagnetic spectrum, disponível em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg > acessado em 4 fev. 2018

9 APÊNDICE:

APÊNDICE A - Código-fonte do módulo de suporte de amostra e tampa.

```
// Suporte De Amostra
// Desenvolvido Por Guilherme Rabelo

alt= 70 ;
comp=70;
larg=50;
borda=5;
AltCub=48;
largCub=12;
use <dovetail.scad>

module Holder(){
difference(){
union(){
difference(){
cube([comp,larg,alt],center=true); // cubo externo
translate([0,0,borda]){
cube([comp-2*borda,larg-2*borda,alt],center=true);}}
translate([0,0,-20]){
difference(){
cube([20,20,25],center=true); // cubo interno
translate([0,0,25]){
cube([16,16,48],center=true);}}}
translate([0,28,0]){rotate([0,0,180]){dovetail_plus(h=alt);}}//aba lateral
translate([0,-28,0]){rotate([0,0,0]){dovetail_plus(h=alt);}}// aba lateral
}
translate([0,0,7.5]){cube([10,75,5],center=true);} // furo horizontal do feixe
}}
module Tampa(){
cube([comp,larg,3],center=true);
translate([0,0,1.5]){cube([comp-2.5*borda,larg-2.5*borda,3],center=true);}}
```

APÊNDICE B – Código-fonte do módulo da fonte de luz:

```
// Módulo Fonte de luz
// Desenvolvido por Guilherme Rabelo

use <Dovetail.scad>
module Cone(){
difference(){
    cylinder(d1=15, d2=32, h=40, center=true);
    cylinder(d1=13, d2=30, h=41, center=true);
    translate([0,0,5])cylinder(d1=20, d2=30, h=40, center=true);
    translate([0,0,-20]){cube([3.5,20,12],center=true);}
}}

module caixa(){
difference(){
    cube([40,70,35],center=true);
    //translate([0,0,5]){cube([40-5,50-5,70], center=true);}
    translate([0,0,0])rotate([0,90,0]){cylinder(d1=15,      d2=32,
h=40.001, center=true);;}}

module Fonte(){
    caixa();
    translate([0,0,0])rotate([0,90,0]){Cone();}

    translate([23.5,0,0]){rotate([0,0,-90]){dovetail_minus(35);}}}
```


APÊNDICE C - Código-fonte do módulo do detector:

```
// Módulo do Detector
// Desenvolvido por Guilherme Rabelo

alt= 70 ;
comp=70;
larg=70;
largP=5;
t=0.4;
AltCub=48;
largCub=12;
A=[0,0];
B=[0,70];
C=[100,2];
D=[100,-68];
use <Dovetail.scad>
module paralelogramo(alt){
linear_extrude(height = alt, center = true){
polygon(points = [A,B,C,D]);} }

module monocromador(){
    union(){
    difference(){

        union(){
            paralelogramo(alt);
            translate([-5,35,0]){cube([10,70,70],center=true);} }

        translate([5,0,5]){ scale([0.90,0.90,1]){paralelogramo(alt);} }
            translate([0,35,7.5]){cube([20,15,5],center=true);}
            translate([4,35,10]){cube([3,51,51],center=true);}
            translate([3,35,10]){cube([1.5,51,55],center=true);}
            translate([-
7,35,0]){rotate([0,0,90]){scale([1.02,1.02,1]){dovetail_plus(71);} } }
            translate([92,-51,34.5]){rotate([90,0,90]){cylinder(r=3,h=10);} } }
```

APÊNDICE D – Código-fonte referente às juntas *dovetail*:

```
// Juntas Dovetail
// Desenvolvido por Guilherme Rabelo

base=50;
topo=40;

a=[base/2,-3.75];
b=[topo/2,3.75];
c=[-topo/2,3.75];
d=[-base/2,-3.75];
k=[a,b,c,d];

module dovetail_plus(h,p=k){
    linear_extrude(h, center=true){
        polygon(points=p,center=true);} }

module dovetail_minus(h=51)
    difference(){
        cube([70.1,7.4,h],center=true);
        scale([1.08,1.08,1.08]){dovetail_plus(52);} }
```