

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO FELIPE MAIHACH

**DESENVOLVIMENTO DE UM ESPECTRÔMETRO PORTÁTIL PARA REGIÃO
VISÍVEL DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO**

MEDIANEIRA

2022

BRUNO FELIPE MAIHACH

**DESENVOLVIMENTO DE UM ESPECTRÔMETRO PORTÁTIL PARA REGIÃO
VISÍVEL DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO**

**Development of a Portable Spectrometer for the Visible Region of the
Electromagnetic Spectrum**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Alex Lemes Guedes.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNO FELIPE MAIHACH

**DESENVOLVIMENTO DE UM ESPECTRÔMETRO PORTÁTIL PARA REGIÃO
VISÍVEL DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 22/junho/2022

Alex Lemes Guedes
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leandro Herculano da Silva
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Diogo Marujo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

Dedico esse trabalho os meus pais por dedicarem seu tempo e trabalho árduo a fim de oferecer asas aos meus sonhos, acreditar no meu potencial para que tivesse condições de romper barreiras e investir em minha carreira profissional.

AGRADECIMENTOS

Não há dúvidas que faltaria espaço para deixar meus agradecimentos a todos que contribuíram nesse importante período da minha vida. Entretanto, saibam que de qualquer modo sou extremamente grato a todos que estiveram ao meu lado, deixando aqui as minhas desculpas àqueles cujos nomes não estão presentes abaixo.

Gostaria primeiramente de reafirmar meu agradecimento à minha família, pois possuem boa parte do mérito dessa conquista.

Agradeço ao meu orientador e amigo Prof. Me. Alex Lemes Guedes, pelo conhecimento e experiência transmitida em toda essa trajetória e por ter me auxiliado de diversas formas durante a graduação.

Agradeço ao Prof. Dr. Leandro Herculano, pelo conhecimento, amizade e todos os trabalhos realizados.

Agradeço ao Prof. Dr. Gustavo Vinivius Bassi Lukasiewicz, por ter me orientado e me dado a oportunidade de realizar três iniciações científicas.

Aos amigos que conheci durante o curso, no qual tiveram um papel importante na minha formação profissional e pessoal. Onde pude compartilhar momentos maravilhosos e que representaram uma segunda família para mim nesse período. Em especial todos do LAD.

Agradeço ao meu namorado, por ter me dado força e suporte em momento e decisões difíceis da minha vida.

Em geral a todos os professores, e funcionários da UTFPR.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a concretização dessa etapa da minha vida.

Além de todas essas pessoas, meus agradecimentos também vão as agências de fomento de pesquisa CNPq e UTFPR por terem me auxiliado com bolsas de pesquisa durante o curso.

A ciência é um insumo importante para muitas escolhas sociais, mas é apenas um insumo. E quando mantemos nossa ciência focada nos padrões históricos de valores científicos de objetividade, deixando a política e a opinião pessoal para os outros, acho que contribuimos o máximo que podemos para o mundo.

Susan Solomon

RESUMO

Esse trabalho tem a finalidade de desenvolver um dispositivo para o estudo analítico de substâncias sensíveis a luz visível através da espectroscopia de absorção. Essa técnica permite o estudo não destrutivo de materiais translúcidos de qualquer estado físico, tornando essa técnica um método muito utilizado em diversas áreas da ciência. Para o desenvolvimento desse aparelho foram impostas algumas condições: deverá ser portátil, portável, e que não haja a necessidade de conexão com nenhum fio para o seu funcionamento. Dessa forma o aparelho pode ser levado a qualquer ambiente para se realizar um estudo, desde um laboratório de pesquisa, ou até no meio de uma lavoura. Essa pesquisa surgiu da necessidade de aparelhos como esse a preços acessíveis no mercado e pela gama de aplicações em que pode atuar. Entretanto, pela falta de documentação sobre o uso de sensores dessa área, foi utilizado o método de pesquisa exploratória para a base de construção desse trabalho, onde algumas decisões foram tomadas com base nos resultados que foram surgindo. O aparelho foi finalizado e realizado as leituras do espectro indicando curvas parecidas com as de outro espectrômetro utilizado como referência, porém os máximos de intensidade ficam levemente deslocados para um dos lados, tendo como a principal causa o posicionamento do sensor.

Palavras-chave: espectrômetro; análise espectral; difração; sistema embarcado (computadores).

ABSTRACT

This work aims to develop a device for the analytical study of substances sensitive to visible light through absorption spectroscopy. This technique allows the non-destructive study of translucent materials of any physical state, making this technique a method widely used in several areas of science. For the development of this device, conditions were established: it must be portable, portable, and that there is no need for connection with any wire for its operation. In this way, the device can be taken to any environment to carry out a study, from a research laboratory, or even in the middle of a wash. This device search function needs affordable prices in the market and the range of power to act. However, due to the lack of studies on the use of methods in this area, the exploratory method was used for the construction of this work, where decisions were made based on the results that emerged. The device was finished and performed as a reference for the spectrum of apparent curvatures with the other spectrometer used, however, the maximum intensity is slightly shifted to one side, the main cause of which is the positioning of the sensor.



Keywords: spectrometer; spectral Analysis; diffraction; embedded system (computers).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Radiação eletromagnética polarizada se propagando no eixo x.....	17
Figura 2 - Espectro eletromagnético com destaque a região visível.	18
Figura 3 - Interação entre radiação e matéria.	19
Figura 4 - Diagrama de relação entre espectro de emissão e absorção.	20
Figura 5 - Componentes necessários para espectroscopia.	21
Figura 6 - Diferença física entre sensores CCD e CMOS.	22
Figura 7 - Camadas da uma fibra óptica.	23
Figura 8 - Refração para diferentes ordens.....	24
Figura 9 - Grade de difração.	24
Figura 10 - Fluxograma de funcionamento.....	26
Figura 11 - Visão expandida da caixa escolhida.	27
Figura 12 - Sensor TSL1401CL.....	28
Figura 13 - Resposta espectral do sensor.....	28
Figura 14 - Diagrama de funcionamento interno do sensor TSL1401CL.	29
Figura 15 - Placa de fixação do sensor.	30
Figura 16 – Visão superior e inferior da placa de controle.	31
Figura 17 - Placa de controle com os componentes soldados.	31
Figura 18 - Placa Blue Pill STM32F103C8T6.....	32
Figura 19 - <i>Pack</i> de baterias 18650 com placa BMS.	34
Figura 20 - Placa dos LEDs de status.	35
Figura 21 - Atenuação da fibra óptica em dB/Km.....	37
Figura 22 - Pontas da fibra óptica antes de serem clivadas.	38
Figura 23 - Pontas da fibra óptica depois da clivagem.....	39
Figura 24 - Rede de difração 33025FL01-290R.....	39
Figura 25 - Eficiência da rede com relação ao comprimento de onda.....	40
Figura 26 - Fenda.....	40
Figura 27 - Comparação da espessura da fenda com papel quadriculado.	41
Figura 28 - Posição e layout das peças fabricadas em acrílico.....	42
Figura 29 - Encaixe do sensor.....	43
Figura 30 - Encaixe da grade de difração.	43
Figura 31 - Alinhador da fibra óptica.	43
Figura 32 - Conector da fibra óptica.	43
Figura 33 - Ponta da fibra óptica.	44
Figura 34 - Gabarito para recorte das laterais da caixa.	44
Figura 35 - Ajuste da posição dos componentes.....	45
Figura 36 - Resultado da montagem completa.....	45
Figura 37 - Espectrômetro finalizado (visão frontal).	46
Figura 38 - Espectrômetro finalizado (visão traseira).	47

Figura 39 - Espectro de três LEDs lidos pelo LSP-2 tomados como referência.....	48
Figura 40 - Espectro de três LEDs lidos pelo aparelho desenvolvido.	48
Figura 41 - Ajuste linear entre comprimento de onda e pixel.	49
Figura 42 – Comparação entre os dados lidos pelos dois aparelhos após ajuste.	50
Figura 43 - Leituras de comparação.....	51
Figura 44 - Posicionamento do sensor.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de materiais.	26
Tabela 2 - Relação de terminais por funções.	32
Tabela 3 - Lista de comandos implementados.	36
Tabela 4 - Relação entre pixels de máxima intensidade e comprimento de onda.	49
Tabela 5 - Comprimentos de onda de máxima intensidade.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SI	Sistema Internacional
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
CMOS	Semicondutor de Óxido Metálico Complementar
PCB	Placa de Circuito Impresso
GND	Ground
ADC	Conversor Analógico-Digital
DMA	Acesso Direto à Memória
UART	Transmissor/receptor Assíncrono Universal
LED	Diodo Emissor de Luz
BMS	Placa de Controle de Carga
DC	Corrente Direta
CSV	Valores Separados por Vírgula

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Luz e Espectro Eletromagnético	17
2.2	Espectroscopia de Absorção	19
2.3	Funcionamento e Componentes de um Espectrômetro	20
2.3.1	Sensores	21
2.3.2	Fibra óptica.....	22
2.3.3	Rede de Difração.....	23
3	PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS.....	25
3.1	Planejamento	25
3.2	Materiais utilizados	25
3.3	Caixa.....	27
3.4	<i>Hardware</i>	27
3.4.1	Sensor CCD	27
<u>3.4.1.1</u>	<u>Funcionamento interno.....</u>	<u>28</u>
<u>3.4.1.2</u>	<u>Placa do sensor.....</u>	<u>30</u>
3.4.2	Placa de controle.....	30
3.4.3	Microcontrolador.....	32
3.4.4	Comunicação bluetooth.....	33
3.4.5	Alimentação.....	33
3.4.6	LEDs de <i>status</i>	34
3.5	<i>Software</i>	35
3.5.1	Comandos	35
3.5.2	Procedimento de leitura do sensor	36
3.5.3	Saída de energia	37
3.6	Óptica	37
3.6.1	Fibra óptica.....	37
3.6.2	Grade de difração.....	39
3.6.3	Fenda	40
3.7	Suportes	41
3.8	Montagem	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46

4.1	Estrutura física e usabilidade.....	46
4.2	Conversão pixel para comprimento de onda.....	47
4.3	Teste comparativo do espectro de um filtro	50
5	CONCLUSÕES E MELHORIAS FUTURAS	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A espectroscopia é uma técnica experimental que utiliza a luz para estudar a composição, a estrutura e as propriedades da matéria. A luz, ou radiação eletromagnética tem a capacidade de transportar energia consoante à sua frequência. Os sistemas atômicos e moleculares da matéria, por seu lado, possuem estados que quando excitados por radiação eletromagnética, alteram seus estados fundamentais de energia. Essas mudanças são perceptíveis analisando a luz transmitida, refletida ou emitida do material estudado (CLARO, 2017), necessitando assim, de um aparelho capaz de identificar a quantidade de luz absorvida nesse processo. Essas análises podem fornecer informações sobre o material que está sendo observado, como por exemplo a concentração de uma substância ou composto específico. Esse aparelho é denominado de espectrômetro.

Existem diversas técnicas dentro da espectroscopia, para cada qual, existe um modelo de aparelho compatível. Pela sensibilidade que as técnicas impõem, o aparelho utilizado para fazer a análise é construído em cima de componentes altamente sensíveis e de alta resolução, o que na maioria das vezes, tornam esses aparelhos caros para laboratórios de médio e pequeno porte. Em uma matéria sobre os avanços da espectrometria de massas nos laboratórios clínicos (LABNETWORK), foi descrito que o Laboratório Sabin teve um investimento de três milhões de reais para equipar-se com um sistema de espectrometria de massa para a área de hormônios esteroides.

Apesar dos valores desses aparelhos ainda serem um impeditivo para alguns laboratórios, seu uso é essencial pela quantidade de aplicações. Como exemplo na saúde, há estudos recentes onde através de espectroscopia Ramam foi possível diferenciar sangues saudáveis de sangues leucêmicos. Segundos os autores, essa técnica se mostrou eficiente, rápida e minimamente invasiva (SILVA, 2018).

A espectroscopia de infravermelho médio também se mostrou uma alternativa eficiente na determinação de teores de argila, silte e areia na análise de solos (FERRARESI, SILVA, *et al.*, 2012), possibilitando o aumento de número de análises diárias, e a facilidade na preparação das amostras. Outro exemplo, na área de alimentos, utilizou a espectroscopia de infravermelho para determinar a adulteração de café torrado por adição de casca de café (TAVARES, GUALBERTO, *et al.*, 2012).

Ainda como exemplo de aplicação, pode-se citar a quantificação de biodiesel na mistura biodiesel/diesel. Em 2008 a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, estabeleceu obrigatoriamente uma distribuição de 2% de biodiesel no diesel comercial. Nessa quantificação (GUARIEIRO, 2008) mostrou que utilizando a espectroscopia de infravermelho obteve um erro de 0,2% na medida dos 2% permitido, se tornando um teste viável e dentro do estabelecido em norma para essa aplicação.

Este trabalho apresenta a segunda versão de um espectrômetro para a região visível construído pelo grupo de desenvolvimento do Laboratório de Automação e Desenvolvimento (LAD) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira. A primeira versão apresentou conceitos do ponto de vista didático, de modo que todas as suas peças eram móveis, de forma que permitiu um estudo sobre o posicionamento das mesmas e servindo como base para o desenvolvimento deste trabalho (ANTONIOLLI, 2018).

Considerando os fatos aprendidos na primeira a versão, este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de espectrômetro portátil, de tamanho máximo (15x15x5) cm, que possa realizar leituras de espectro eletromagnético visível, com resolução de pelo menos 2 nm, se aproximando de aparelhos comercialmente disponíveis. Diferente da primeira versão, os componentes ópticos serão fixos e este aparelho terá sua interface de comunicação sem fio com o usuário composto por programas (softwares) externos para configuração e visualização das leituras realizadas.

Para atingir o objetivo proposto, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Pesquisar sobre o desenvolvimento da tecnologia do espectrômetro e suas diversas áreas de aplicação;
- Conhecer componentes necessários para a construção do espectrômetro, e projetar sua parte física;
- Construir um sistema embarcado com comunicação com equipamentos externos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

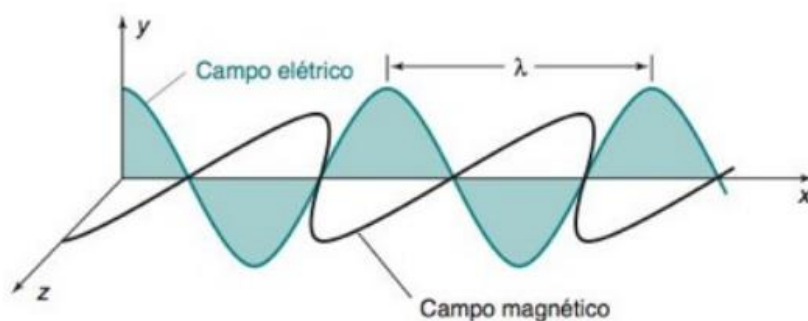
Apesar das diversas áreas de aplicação e do potencial inquestionável das técnicas espectroscópicas, um espectrômetro básico é composto por poucos componentes, como será descrito no tópico 2.3, entretanto envolvem componentes de alta sensibilidade, além de conceitos complexos de óptica e eletrônica, onde qualquer detalhe tem o potencial considerável de interferência no resultado do produto.

Por esses detalhes, existe a necessidade de compreender as partes que compõe o espectrômetro para otimizar a construção do aparelho garantindo um preço acessível e resultados coerentes. Antes disso, será comentado alguns conceitos importantes iniciando sobre o espectro eletromagnético.

2.1 Luz e Espectro Eletromagnético

A luz pode ser descrita tanto em termos de onda como partícula. As ondas luminosas são constituídas de campo elétrico e magnético oscilantes perpendicularmente, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Radiação eletromagnética polarizada se propagando no eixo x.



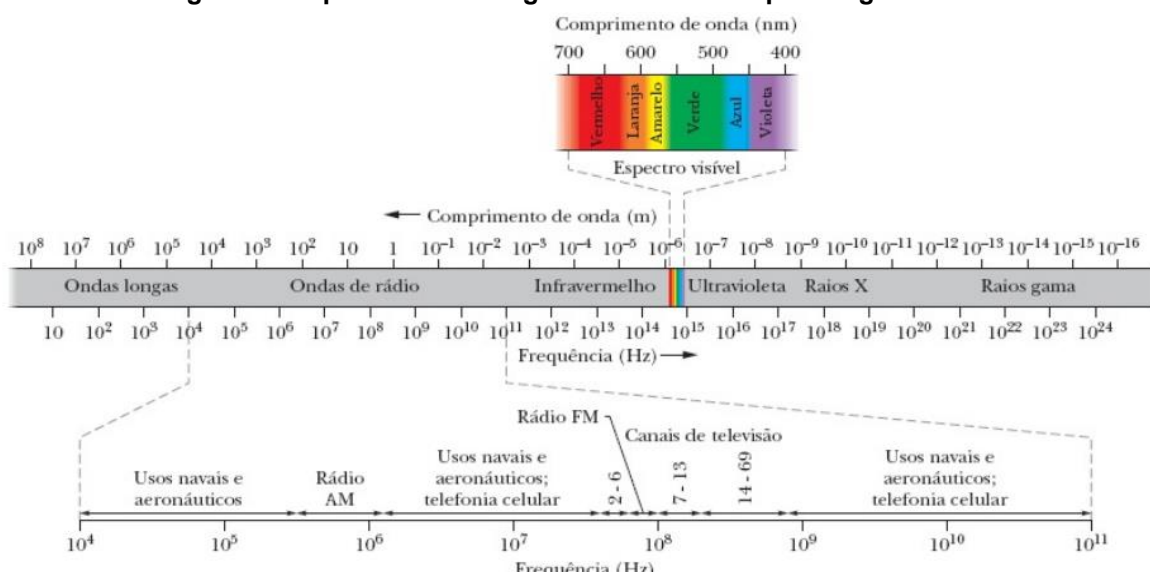
Fonte: (HARRIS, 2012).

O comprimento de onda (λ) estabelece a distância na qual a onda completa um ciclo, ou seja, a distância entre duas cristas. A frequência (f) corresponde a quantidades de oscilações em determinado período, no Sistema Internacional (SI) corresponde a oscilações por segundo, com unidade Hertz (Hz). O produto dessas duas grandezas é a velocidade da luz (HARRIS, 2012). A relação entre as frequências com a intensidade da mesma gera o que é conhecido como espectro eletromagnético

(LEITE e PRADO, 2012), desde as longas ondas de rádio, até o raio gama. A Figura 2 ilustra o espectro eletromagnético, destacando a luz visível.

O espectrômetro, junto às técnicas de espectroscopia, analisa as interações da radiação eletromagnética com a matéria a fim de determinar informações relevantes do que se está estudando (ATVARS e MARTELLI, 2018). Os conjuntos de radiação (bandas eletromagnéticas) podem ser marcadas conforme seus efeitos de alteração na matéria, sendo essas alterações a nível atômico ou molecular (HARRIS, 2012).

Figura 2 - Espectro eletromagnético com destaque a região visível.

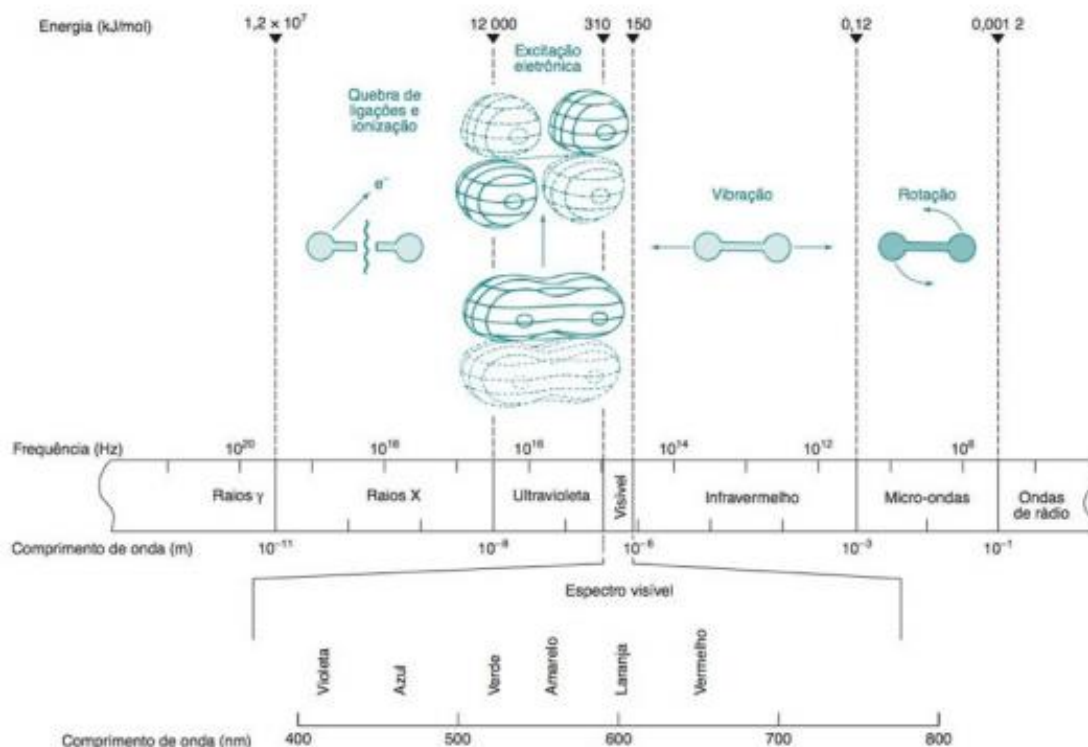


Fonte: (HALLYDAY, RESNICK e WALKER, 2016).

A Figura 3 mostra quais as interações que diferentes bandas do espectro eletromagnético têm com a matéria. É possível classificar a radiação em duas áreas principais: as ionizantes e as não ionizantes (SALICIO e CASTRO). A primeira causa uma ruptura irreversível na organização estrutural da matéria, como é o caso do Raio X e Raio Gama. As não ionizantes causam desorganizações temporárias na matéria, de forma a voltar ao seu estado fundamental de menor energia após um tempo, fenômeno chamado de excitação.

Uma das grandes vantagens de análises de espectroscopia é capacidade de não ser invasiva (LEITE e PRADO, 2012), porém, existe a necessidade de adequar a banda utilizada para não destruir amostra e maximizar a capacidade analítica. Desta forma, as regiões mais comuns de serem utilizadas compreende a região visível e infravermelho, ou seja, entre 400 e 1 000 000 nm.

Figura 3 - Interação entre radiação e matéria.



Fonte: (HARRIS, 2012).

2.2 Espectroscopia de Absorção

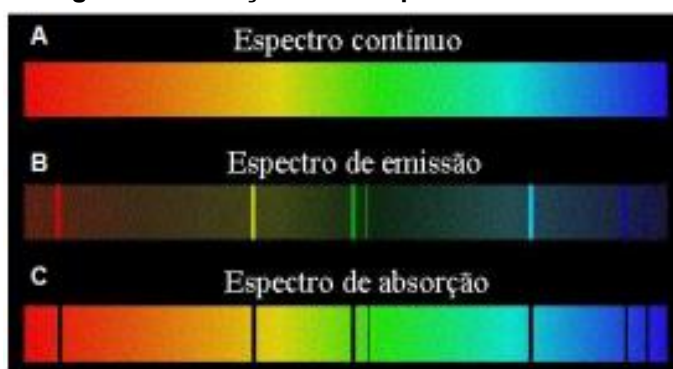
Em suas teorias, Einstein propôs que o processo de absorção ou emissão de luz ocorre nos átomos da matéria. Portanto, se um fóton de energia hf é absorvido pelo átomo, a energia do átomo é somada à do fóton. Assim também ocorre para o processo inverso, o de emissão de luz (HALLYDAY, RESNICK e WALKER, 2016).

Entender o que foi dito por Einstein é imprescindível para compreender o funcionamento da espectroscopia de absorção, pois conforme a Figura 4, a forma de determinar o espectro absorvido é medir o espectro contínuo e o de emissão, a subtração entre esses dois espectros resulta na energia absorvida pela amostra, conforme a Equação 1.

$$Esp_{absorção} = Esp_{contínuo} - Esp_{emissão} \quad (1)$$

- $Esp_{absorção}$: Espectro de absorção;
- $Esp_{contínuo}$: Espectro contínuo;
- $Esp_{emissão}$: Espectro de emissão;

Figura 4 - Diagrama de relação entre espectro de emissão e absorção.



Fonte: (LEITE e PRADO, 2012).

Ou seja, conhecendo o espectro contínuo e o emitido, pode-se determinar o espectro absorvido. Na prática, significa que os espectrômetros precisam ter parâmetros de luz sem a influência da amostra e com a influência da mesma, ou seja, é realizado uma leitura sem a amostra (espectro contínuo) e outra com amostra (espectro emitido) para então determinar matematicamente o espectro absorvido.

2.3 Funcionamento e Componentes de um Espectrômetro

Como dito no capítulo anterior, é necessário realizar a leitura do espectro contínuo e emitido para determinar o espectro absorvido pela amostra. Há várias formas possíveis de medir espectrômetros, sendo uma delas descrita na Figura 5. Nesta forma de montagem, os componentes principais são:

- Fonte de luz: responsável pela geração de radiação eletromagnética;
- Obturador: permite a entrada de luz no aparelho;
- Célula de amostra: espaço apropriado para colocação amostra a ser analisada;
- Fenda: Auxílio na colimação dos raios;
- Rede de difração: Decomposição dos comprimentos de onda;
- Fotodiodo: sensor responsável por transformar energia luminosa em elétrica;

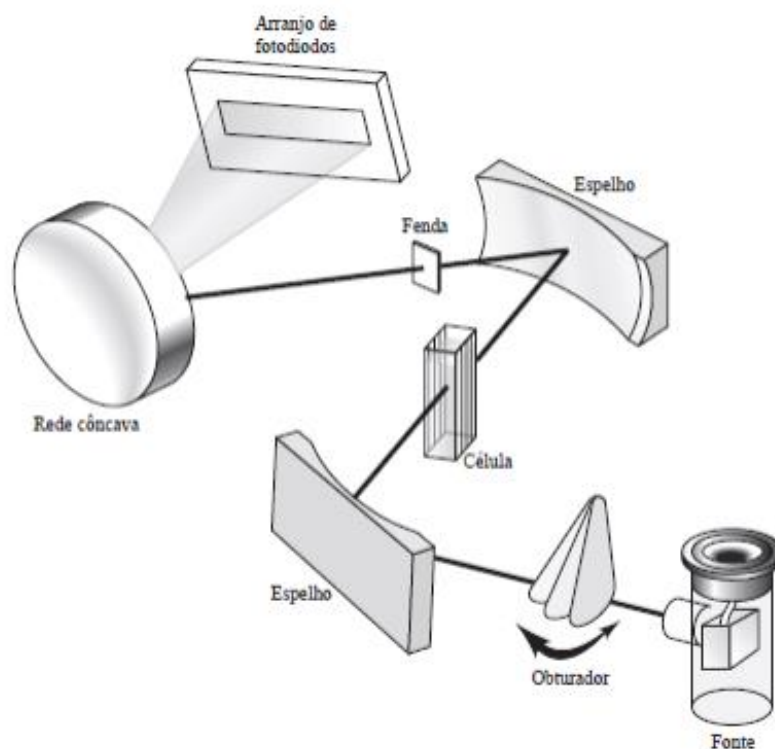
Atualmente outras montagens também são possíveis através da utilização de fibra óptica, grade de difração e sensor.

2.3.1 Sensores

Existem no mercado atualmente dois tipos de tecnologia de sensores comumente usados. Suas diferenças estão na tecnologia de transformação da energia luminosa para energia elétrica (SOUZA e CARDOZA, 2009). O sensor tipo CCD (dispositivo de carga acoplada) e CMOS (semicondutor de óxido metálico complementar).

A fotocondução ocorre com a absorção do fóton por material fotossensível. Caso a energia absorvida seja maior do que a barreira para conduzir, o processo de condução é iniciado (COSTA, 2010).

Figura 5 - Componentes necessários para espectroscopia.



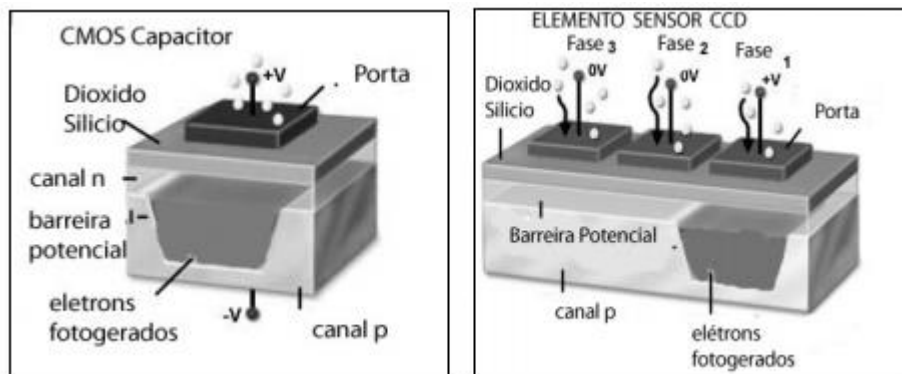
Fonte: (SKOOG, WEST e HOLLER, 2006).

Como mostra a Figura 6, a CCD é uma matriz de pixels na qual a leitura ocorre utilizando registradores de deslocamentos horizontais e verticais (somente horizontal para CCD linear). Esse sinal só é lido após a multiplexação e amplificação do sinal.

Já na tecnologia CMOS, a junção do material n e p do receptor fotossensível foi alterada de forma a dissipar menos energia. Essa melhoria permitiu que a amplificação ocorresse dentro do próprio pixel, tornando a integração mais estável.

Entretanto, com essa alteração o tamanho do pixel foi aumentado reduzindo a resolução da imagem (COSTA, 2010).

Figura 6 - Diferença física entre sensores CCD e CMOS.



Fonte: Costa (2010).

2.3.2 Fibra óptica

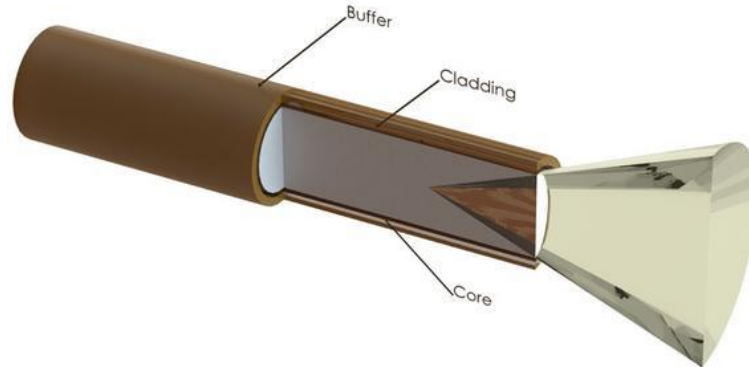
Segundo o livro Fundamentos de Comunicações Ópticas, as fibras ópticas são formadas basicamente por materiais dielétricos (sílica ou plástico) seguido por uma estrutura cilíndrica, transparente e flexível, com dimensões próximas a de um fio de cabelo humano, sendo dividida em duas partes principais: núcleo e casca (TRONCO, 2007).

O núcleo é responsável pela transmissão da luz e o material externo pela garantia de que a luz não se disperse ou que o núcleo sofra algum dano físico. A casca pode comportar fibras mecânicas que auxiliam na flexibilidade e rigidez da fibra.

Diferente das fibras de comunicação, que priorizam passar sinais digitais de luz, as fibras utilizadas para espectroscopia carregam a informação dentro luz. Portanto a luz não pode sofrer alterações nesse percurso.

Fibras para espectroscopia que operam na faixa do visível e infravermelho devem possuir baixa concentração de hidroxila (OH), pois esse composto absorve uma banda do infravermelho. Diferente para aparelhos que operam na região do ultravioleta onde esse composto auxilia a passagem da luz (MOLEX). Essa é uma condição implícita do material da fibra, onde a atenuação do núcleo pode ser calculada pela expressão dada na equação 2.

Figura 7 - Camadas da uma fibra óptica.



Fonte: (AVANTES).

$$\text{Atenuação (dB)} = -10 \log \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) \quad (2)$$

Onde $P_{saída}$ e $P_{entrada}$ correspondem respectivamente a potência de saída e potência de entrada de luz na fibra óptica.

2.3.3 Rede de Difração

A rede de difração opera através de reflexão ou transmissão de luz através de ranhuras paralelas em sua superfície. Cada ranhura se comporta como uma fonte independente de luz refletindo as componentes que a compõe em diferentes ângulos, esse processo é denominado difração (HARRIS, 2012), conforme indicado na Figura 8.

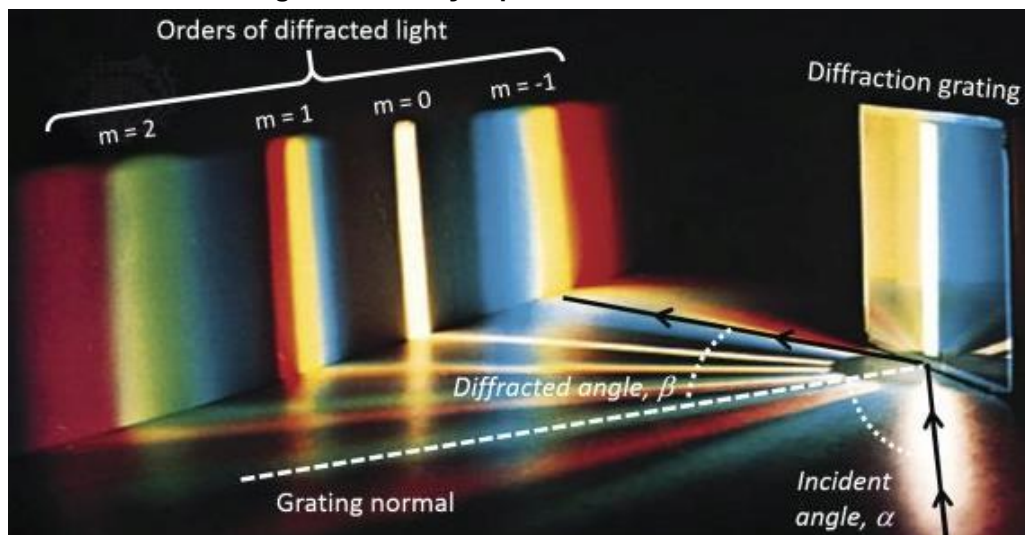
Na Figura 9, os raios passam por uma fenda, incidem em espelho concavo para serem colimados, atingem a rede de difração e são difratados em diferentes ângulos. A radiação difratada incide novamente em um espelho concavo que focaliza os comprimentos de onda iguais em um único ponto.

Para que haja interferência completamente construtiva (HARRIS, 2012), a distância percorrida pela radiação deve ser um múltiplo inteiro do comprimento de onda como mostrado na equação 3.

$$m\lambda = dG(\sin \alpha + \sin b) \quad (3)$$

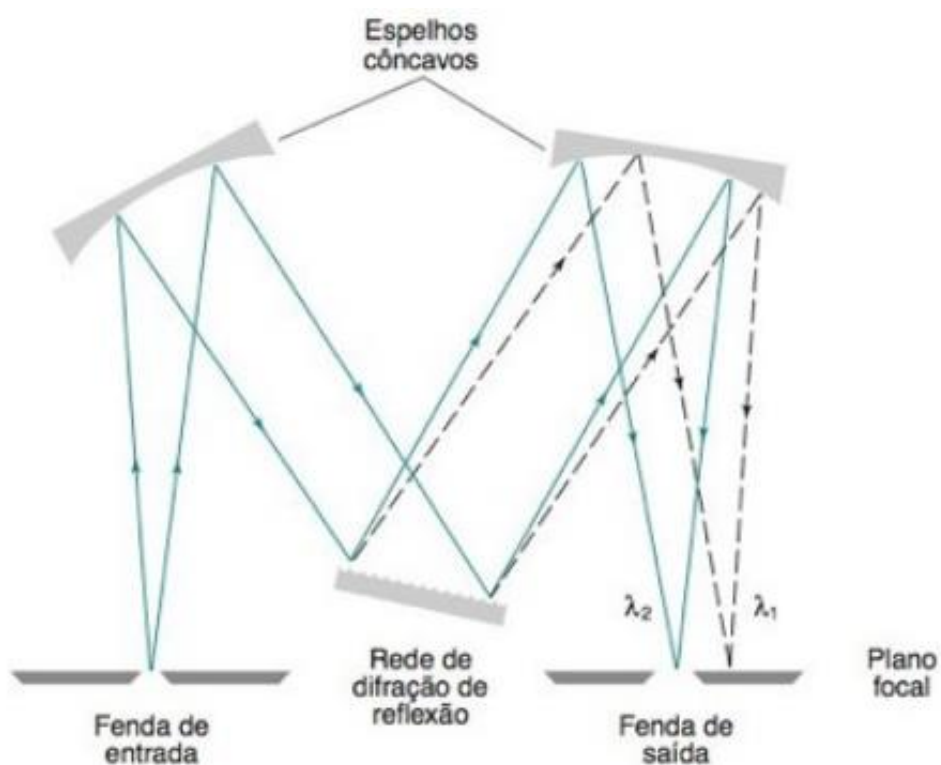
Onde m é um múltiplo inteiro, dG o espaçamento entre as ranhuras, α ângulo de incidência e β o ângulo de difração.

Figura 8 - Refração para diferentes ordens.



Fonte: (NEWPORT).

Figura 9 - Grade de difração.



Fonte: (HARRIS, 2012).

3 PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

3.1 Planejamento

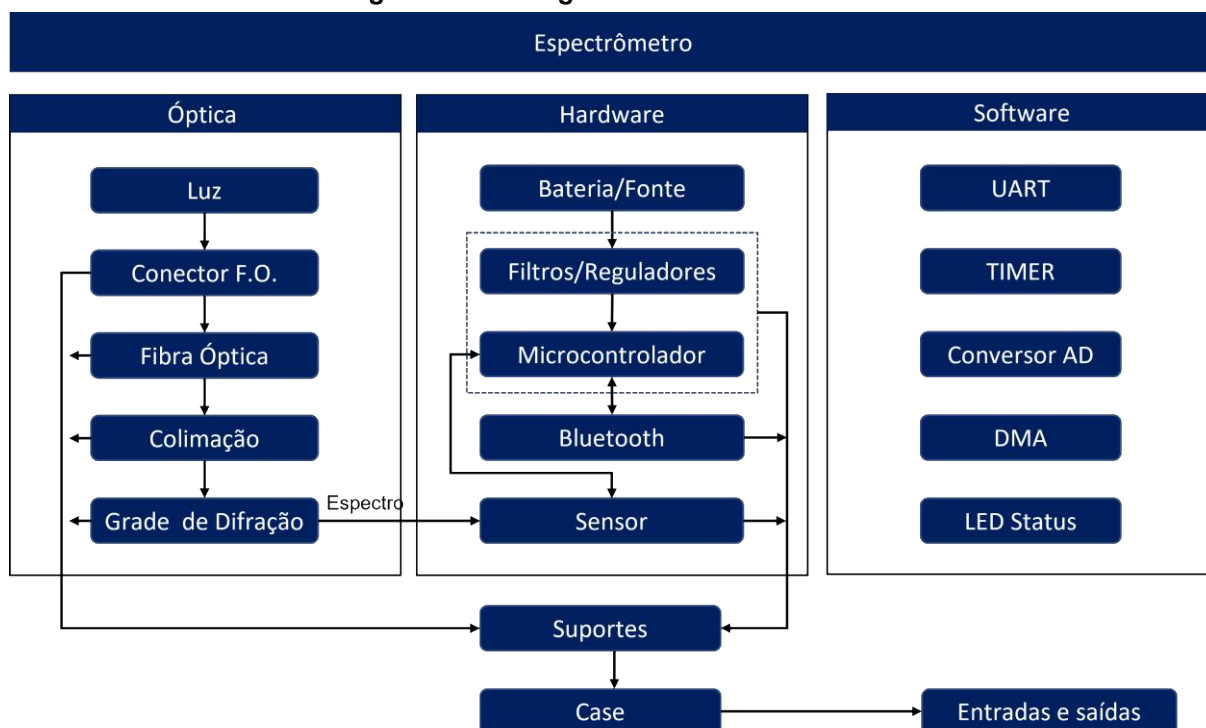
Para iniciar a construção do espectrômetro, o primeiro passo foi determinar as principais áreas do projeto e separá-las de forma a priorizar um desenvolvimento linear e organizado. Nesse caso, o projeto teve 4 áreas, sendo elas: desenvolvimento do *hardware*, *software*, os suportes dos componentes ópticos e o procedimento de montagem.

Essa ordem foi estabelecida pela necessidade priorizada de realizar a leitura do sensor CCD escolhido, exigindo a elaboração do *hardware* e do *software* em primeira instância. Após o funcionamento do sensor, será estabelecido onde ficará cada componente ótico dentro da caixa e como fixá-los. Com os principais passos estabelecidos, a Figura 10 representa o fluxograma com as competências de cada área do projeto.

3.2 Materiais utilizados

Esse projeto foi elaborado nas instalações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Medianeira, dentro do Laboratório de Automação e Desenvolvimento do departamento de Engenharia Elétrica. Nesse contexto, o aparelho foi pensando para utilizar o máximo de componentes em estoque no laboratório, minimizando os custos de construção do aparelho. Entretanto, alguns materiais foram comprados e seguiram a mesma linha de especificações dos demais componentes. Os materiais utilizados estão listados na Tabela 1 com uma indicação em asterisco para os componentes comprados.

Figura 10 - Fluxograma de funcionamento.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 1 - Lista de materiais.

Item	Modelo	Preço
*Sensor CCD	TSL1401CL - AMS Sensor	R\$ 60,00
Grade de difração	33025FL01-290R - Newport	--
*Fibra óptica	1068000064 - Molex	R\$ 200,00
Microcontrolador	STM32F103C8T6	R\$ 50,00
Bluetooth	ESP32	RS 40,00
Caixa	PF24-6-17D - Takachi	--
*Bateria	12V (3x18650) - JGP	R\$ 100,00
*Carregador	12V	
*Conectores KK	KK, BNC, J4	R\$ 20,00
Cabos	Flat	R\$ 5,00
LED (diodo emissor de luz)	3mm (R, G e B)	R\$ 5,00
Parafuso e porca	3mm	R\$ 40,00
*Placa de controle	Projeto próprio - JLCPCB	R\$ 80,00

Fonte: Autoria própria.

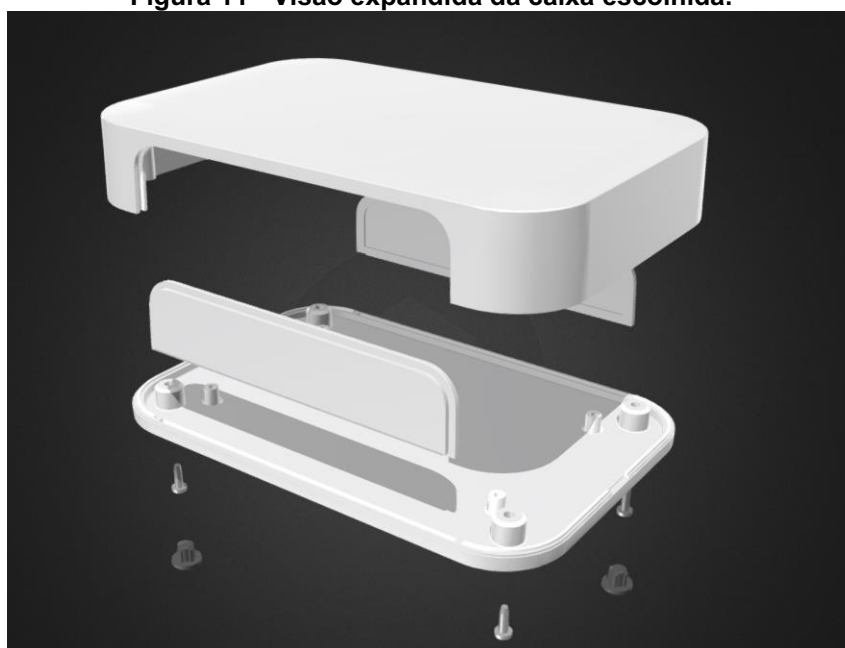
Além desses materiais, foram utilizados componentes como resistores, capacitores, reguladores de tensão, entre outros para a confecção da placa de controle. E para a confecção dos suportes, foi seguido uma linha de dois tipos de materiais: resina de impressão *standard CREALITY* para peças mais complexas, e acrílico para peças menos complexas.

3.3 Caixa

O modelo de caixa escolhido foi a PF24-6-17D da fabricante TAKACHI. Esse modelo é construído em ABS cinza escuro e conta com proteção IP40. As paredes da caixa são espessas o suficiente para que não haja passagem de luz e suas dimensões são 24x6x17cm. Além do mais, ela conta com duas abas laterais removíveis, o que garante uma facilidade no recorte da caixa e na montagem dos conectores.

A série de gabinetes plásticos de mesa da fabricante já possuem pontos de fixação para placa PCB (placa de circuito impresso). Dessa forma os demais componentes do aparelho foram projetados e montados para que encaixassem com os pontos de fixação da case.

Figura 11 - Visão expandida da caixa escolhida.



Fonte: (SKETCHFAB).

3.4 Hardware

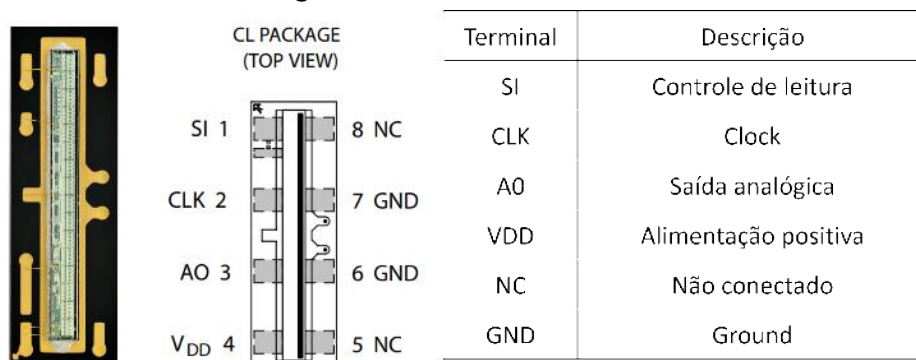
3.4.1 Sensor CCD

O sensor escolhido para realizar a leitura do espectro foi o TSL1401CL da fabricante AMS Sensor. Esse sensor possui circuitos de fotodiodo, amplificadores de carga, retenção de dados de pixel e controle de tempo de integração simultânea para

os 128 pixels associados. Possui 5 terminais: dois para alimentação, dois para controle interno e um para saída de dados, conforme indica a Figura 12.

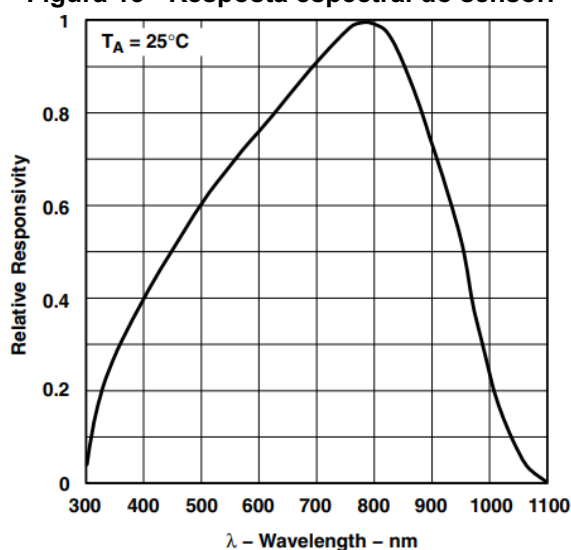
Outra informação importante é a banda de leitura do sensor. No caso do TSL1401CL essa faixa está entre 400 e 1000nm, como mostra a Figura 13.

Figura 12 - Sensor TSL1401CL



Fonte: (AMS, 2016).

Figura 13 - Resposta espectral do sensor.



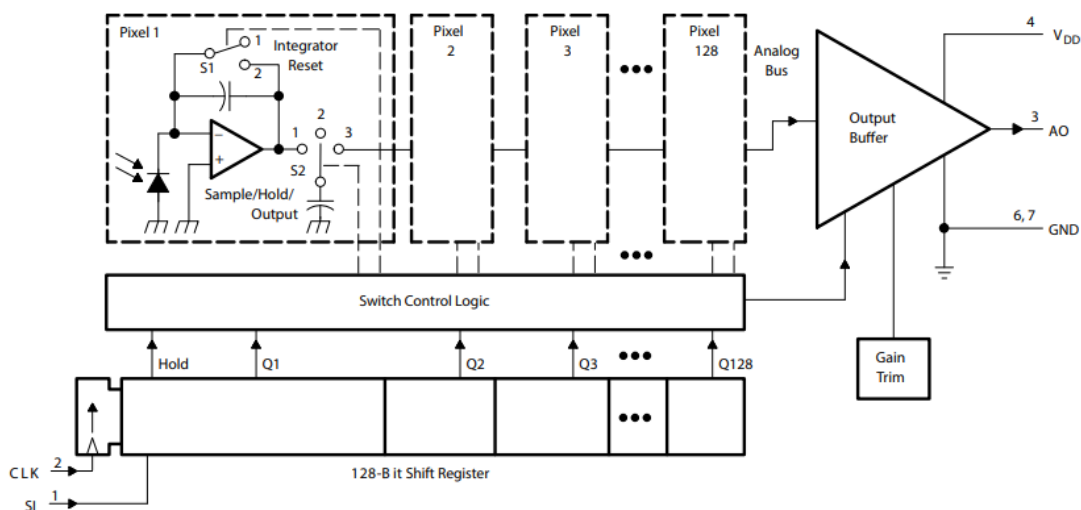
Fonte: (AMS, 2016).

3.4.1.1 Funcionamento interno

O circuito interno do sensor está exemplificado no diagrama da Figura 14. Nele é possível observar que a luz é convertida em tensão pelo fotodiodo, então tem seu valor integrado por um amplificador operacional quando as chaves S1 e S2 estão em 1. Após o tempo de integração, a chave S2 passa para posição 2, atribuindo o valor de tensão integrado pelo amplificador para um capacitor ligado ao GND (*ground*),

de forma que o valor de tensão é analogicamente armazenado. Por último a chave S2 é seccionada para a posição 3, onde encaminha o valor de tensão armazenado no capacitor para o buffer de saída amplificador. A chave S1 passa para 2 e reseta o valor de tensão em cima do integrador.

Figura 14 - Diagrama de funcionamento interno do sensor TSL1401CL.



Fonte: AMS (2016).

Para o controle das chaves internas, cada pixel é acoplado a um registrador único de 128 bits que é controlado por dois sinais: CLK e SI. O sinal CLK do sensor pode variar entre 5 kHz e 8000 kHz. Esse ajuste na frequência do clock permite controlar o tempo de exposição dos fotodiodos a luz. Para casos em que a luz tenha baixa intensidade, a frequência recomendada será mais próxima da 5 kHz. Já para casos com alta intensidade de luz, a frequência deve ser ajustada para que não haja saturação no sensor.

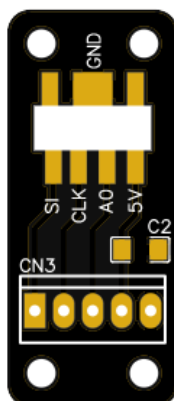
O sinal SI indica para o sensor o momento de iniciar uma nova leitura. Deve subir no instante em que o *clock* estiver em nível lógico zero e não demorar mais do que duas bordas ascendentes do *clock* para descer. Também é responsável por iniciar e finalizar a integração, que é iniciada a partir do décimo oitavo pulso de *clock* após a descida do SI, e se estende até a próxima borda de subida SI já iniciando a nova leitura.

Isso indica que o processo de integração do sensor é realizado durante a leitura anterior, necessitando rodar dois ciclos de leituras para se obter um dado validado.

3.4.1.2 Placa do sensor

Para uma melhor fixação do sensor, foi projetado uma placa com encaixe para o sensor junto a um conector kk (2,54mm) de 5 vias que permite a conexão do sensor com a placa de controle, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Placa de fixação do sensor.



Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Placa de controle

Para facilitar montagem do aparelho, foi projetada uma placa com toda a eletrônica embarcada. Suas funções são:

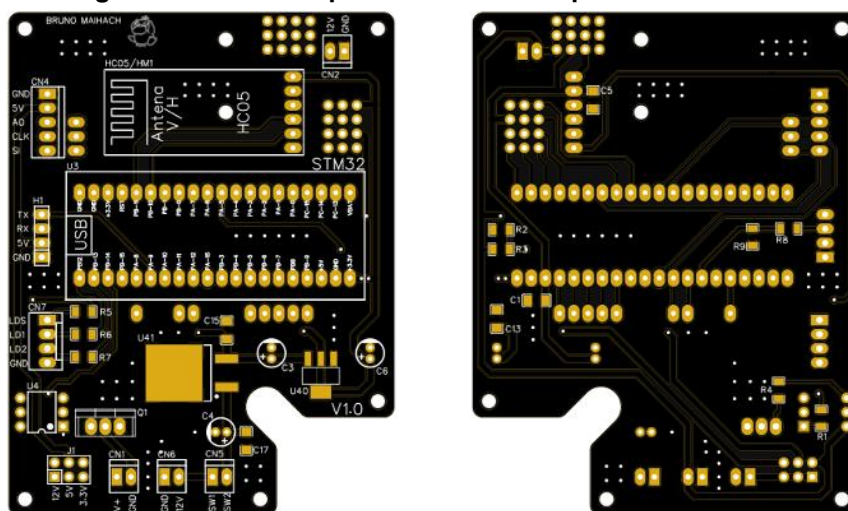
- Fornecer alimentação para os demais componentes;
- Conectar a bateria à alimentação da placa;
- Regular a tensão para os demais componentes;
- Filtrar possíveis ruídos;
- Acoplar o microcontrolador;
- Acoplar o Bluetooth;
- Permitir a leitura de tensão da bateria;
- Conexão com o sensor;
- Conexão com os LEDs de status;

A placa, mostrada na Figura 16 e Figura 17, foi projetada no EasyEDA (EASYEDA, c2022), um *software* de PCB *online* e gratuito. Foi pensada para ser uma

placa flexível e permitir alterações no projeto, pois conta com terminais a mais permitindo ligar um novo componente ou até mesmo soldá-lo na placa. Dessa mesma forma, também foram deixados na placa terminais de acesso a pinos digitais e analógicos do microcontrolador.

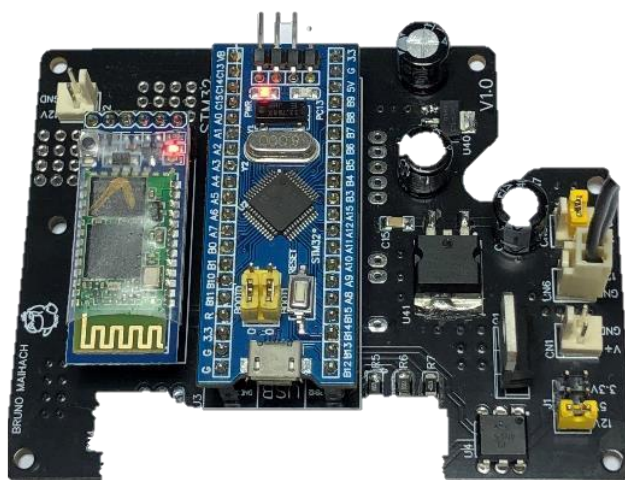
Em busca de um melhor acabamento, as placas foram encaminhadas para a confecção numa empresa internacional especializada nessa área, a JLCPCB (JLCPCB, c2022). A placa foi pedida em mascarado preto, evitando o máximo de reflexão dentro da caixa. Após sua chegada, foram soldados os componentes eletrônicos e o resultado está na figura abaixo.

Figura 16 – Visão superior e inferior da placa de controle.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Placa de controle com os componentes soldados.

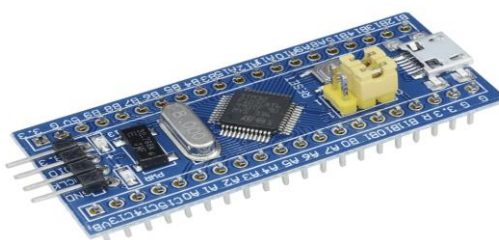


Fonte: Autoria própria.

3.4.3 Microcontrolador

Para realizar as rotinas do aparelho, foi escolhido o microcontrolador STM32F103C8T6, embarcado na placa Blue Pill, tendo como principal tarefa realizar a leitura do sensor. Os motivos da escolha desse microcontrolador foram a resolução do módulo ADC (conversor analógico digital) de 12 bits, controlador DMA, e a frequência de trabalhado de 72MHz.

Figura 18 - Placa Blue Pill STM32F103C8T6.



Fonte: (EMBARCADOS, 2019).

Dessa forma, a resolução do módulo ADC garante leituras que variam de 0 a 4095, o que significa uma resolução de aproximadamente 0,8mV/unidade. Já o controlador DMA proporciona transferência de dados diretamente do periférico ADC para a memória, tornando a rotina de leitura do sensor mais rápida.

A Tabela 2 mostra a relação de terminais utilizados para cada função, totalizando 6 saídas digitais, 2 entradas digitais e 2 entradas analógicas.

Tabela 2 - Relação de terminais por funções.

Função	Terminais
Sensor	2 x saídas digitais
	1 x entrada analógica
Comunicação	2 x saídas digitais
	2 x entradas digitais
LEDs	2 x saídas digitais
Bateria	1 x entrada analógica

Fonte: Autoria própria.

3.4.4 Comunicação bluetooth

Inicialmente, o escopo do projeto incluiu o HC-05 como módulo de comunicação Bluetooth. Após alguns testes de comunicação com o computador foi observado dificuldades de conexão desse módulo com o Bluetooth dos computadores, o que levou a troca do módulo.

Dessa forma, foi escolhido o módulo ESP32 para servir de comunicação sem fio. Sua função é receber dados via UART (Transmissor/receptor assíncrono universal) do microcontrolador e transmitir pelo Bluetooth. O nome do dispositivo foi estabelecido como “ESPECTRO”, e os parâmetro para a comunicação são:

- Baud Rate: 115200 Bits/s;
- Word Length: 8 Bits;
- Stop Bit: 1;
- Paridade: None;

3.4.5 Alimentação

O aparelho conta com uma entrada de alimentação em 12V DC. Essa entrada é utilizada para alimentar a placa de controle e recarregar a bateria do aparelho. O conector utilizado para a entrada de energia é do modelo Jack P4.

Já a bateria é um *pack* de 3 células 18650 de 3,7V 2200mAh ligadas em séries. Foram montadas pela empresa JGP no qual associou as baterias uma placa de carregamento BMS de modelo não especificado, conforme mostrado na Figura 19.

Cada célula pode variar de 3V a 4,2V, isso corresponde que a bateria está em carga máxima quando sua tensão está em 12,6V, e estará descarregada quando a tensão descer até 9V. Como a entrada do aparelho é para 12V, isso significa que a tensão máxima da bateria não passará desse limite. E para não ficar totalmente descarregada o limite mínimo foi estabelecido em 10V. Abaixo desse valor o microcontrolador bloqueia a operação até o aparelho ser conectado a energia externa.

Figura 19 - Pack de baterias 18650 com placa BMS.



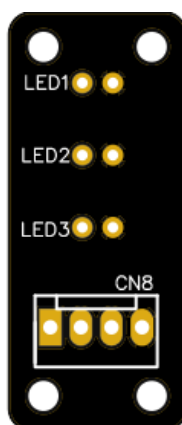
Fonte: (JGP).

3.4.6 LEDs de *status*

Com a finalidade de indicar ao usuário informações básicas sobre o funcionamento do aparelho, foi projetado uma placa com 3 LEDs indicadores, como mostra a Figura 20. Dois deles sendo controlado pelo STM, e outro pelo módulo Bluetooth.

- LED azul: Quando aceso, indica uma conexão ativa entre o aparelho e outro dispositivo.
- LED vermelho: Acende quando a bateria está abaixo de 10V indicando bateria baixa.
- LED verde: Indica que o aparelho está ligado e pronto para funcionar.

Figura 20 - Placa dos LEDs de status.



Fonte: Autoria própria.

A PCB dos LEDs possui conexão com a placa principal através de conector KK (2,54mm) e cabo flat.

3.5 Software

Para o desenvolvimento da programação, foi utilizado a plataforma da própria fabricante do microcontrolador, o STM32CubeIDE.

Ao iniciar o aparelho, a programação faz a leitura de tensão da bateria e caso esteja inferior a 10V, acende o LED vermelho indicando bateria baixa e fica no aguardo do usuário iniciar o carregamento. Caso a bateria esteja dentro da tensão de operação o aparelho acende a luz verde, indicando que os parâmetros para sua inicialização estão operando normalmente, e fica no aguardo de um comando.

3.5.1 Comandos

Para realizar a rotinas, foram estabelecidos comandos que ao chegarem pela serial do Bluetooth faz com que o microcontrolador realize tarefas específicas e retorne a resposta daquela tarefa. Esses comandos foram padronizados em letras maiúsculas começando pelo “A” e seguindo a ordem alfabética. Abaixo estão listados os comandos.

Tabela 3 - Lista de comandos implementados.

Comando	Função
A	Realiza leitura do sensor e retorna os dados
B	Configura a frequência de leitura em 5 kHz
C	Configura a frequência de leitura em 10 kHz
D	Configura a frequência de leitura em 20 kHz
E	Configura a frequência de leitura em 50 kHz
F	Aciona saída de energia
G	Desaciona saída de energia
H	Retorna o valor de tensão da bateria

Fonte: Autoria própria.

3.5.2 Procedimento de leitura do sensor

Ao receber o comando “A”, o programa principal chama a biblioteca responsável pela leitura do sensor, que inicia configurando o periférico *timer* para realizar o sinal de *clock* conforme a frequência pedida pelo usuário. Caso o usuário não tenha definido a frequência através dos comandos “B”, “C”, “D” e “E”, o programa assume a menor frequência de operação, sendo essa 5 kHz.

Após a configuração inicial, o sinal SI é disparado indicando ao sensor o início de uma nova leitura. Nesse instante, apenas são gerados os sinais de controle, e o sinal de saída do sensor é ignorado. Ao finalizar o primeiro ciclo, a frequência do sinal CLK é altera para 1 kHz, para que durante os pulsos do *clock* o microcontrolador tenha tempo suficiente para fazer a leitura analógica do sensor.

Para minimizar as flutuações comuns às leituras do sinal analógico, entre os pulsos do *clock* é realizado 100 leituras, na qual são direcionadas diretamente para a memória através do controlador DMA, dessa forma a velocidade de leitura de cada pixel aumenta, e em seguida é feito a média desses valores.

Após esse procedimento, o microcontrolador encaminha os dados coletados para o Bluetooth, que serão transmitidos ao dispositivo que solicitou a leitura em formato CSV (Valores Separados por Vírgula). Portanto, qualquer terminal que aceite receber dados por serial é capaz de realizar a aquisição dessas informações.

3.5.3 Saída de energia

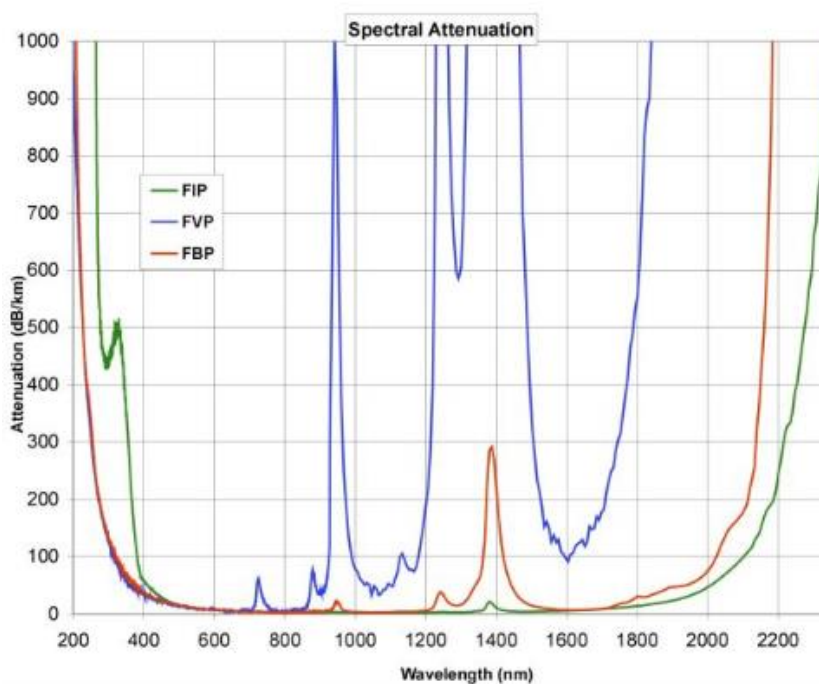
Essa opção foi acrescentada pensando numa futura atualização do aparelho. Ela permite realizar o controle de uma lâmpada externa para fazer as medidas claras e escuras sem que o usuário precise ligar ou desligar a lâmpada. Basta o programa mestre encaminhar “F” antes das medidas claras, e “G” antes das escuras para controlar a lâmpada.

3.6 Óptica

3.6.1 Fibra óptica

A fibra óptica escolhida para esse projeto é da série FIP da fabricante MOLEX. O núcleo das fibras dessa série é de sílica sintética fundida, material específico para aplicações no visível e no infravermelho até 2200nm. O diâmetro escolhido do núcleo foi de 0,6 mm chegando até 0,71 mm com a proteção de poliimida. A Figura 21 mostra, em verde, o espectro de atenuação da fibra escolhida em dB/Km.

Figura 21 - Atenuação da fibra óptica em dB/Km.



Fonte: (MOLEX).

Utilizando a Equação 4, é possível calcular a relação entre potência de saída e de entrada para fibra. Considerando uma atenuação máxima de 100dB/Km, o que corresponde a 0,1dB/m.

Aplicando propriedades logarítmicas e isolando o termo das potências da Equação 2, tem-se:

$$\left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right) = \log\left(-\frac{Atenuação(dB)}{10}\right) = 10^{-\frac{Atenuação(dB)}{10}} \quad (4)$$

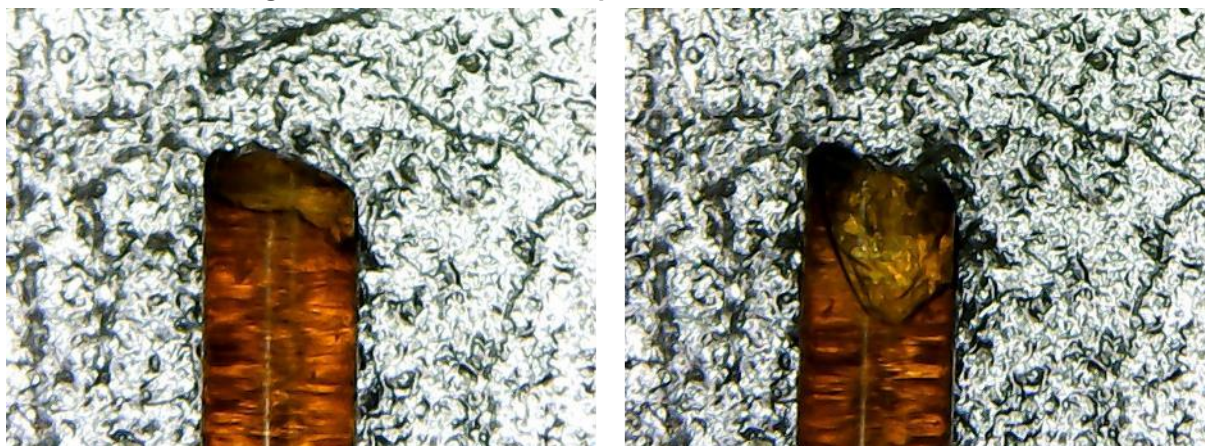
Substituindo $Atenuação (dB) = 0,1/m$.

$$\left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right) = 10^{-\frac{0,1}{10}} = \cong 0,997 \quad (5)$$

Conforme a Equação 5, a relação entre potência de saída e entrada é de 99,7% em um metro, isso corresponde uma atenuação de 0,3% por metro considerando uma atenuação de 100dB/Km, estando dentro de um percentual aceitável para o trabalho.

Outro detalhe a ser levado em consideração, é a fragilidade da fibra. Para evitar danos, ela foi revestida com duas camadas de material termo retrátil. Dessa forma foi garantido maior durabilidade e proteção contra luz externa. Em outras análises, também foi verificado que as pontas da fibra estavam danificadas, como mostra a Figura 22, exigindo reparo.

Figura 22 - Pontas da fibra óptica antes de serem clivadas.



Fonte: Autoria própria.

Após essa verificação a fibra teve suas pontas clivadas pelo clivador FC-41S corrigindo o problema, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Pontas da fibra óptica depois da clivagem.



Fonte: Autoria própria.

3.6.2 Grade de difração

A grade de difração usada nesse trabalho, como também já comentado anteriormente, será a 33025FL01-290R, mostrada na Figura 24, desenvolvida pela fabricante Richard Grating. Sua região de trabalho, mostrada na Figura 25, está entre 400 e 1100nm.

Figura 24 - Rede de difração 33025FL01-290R

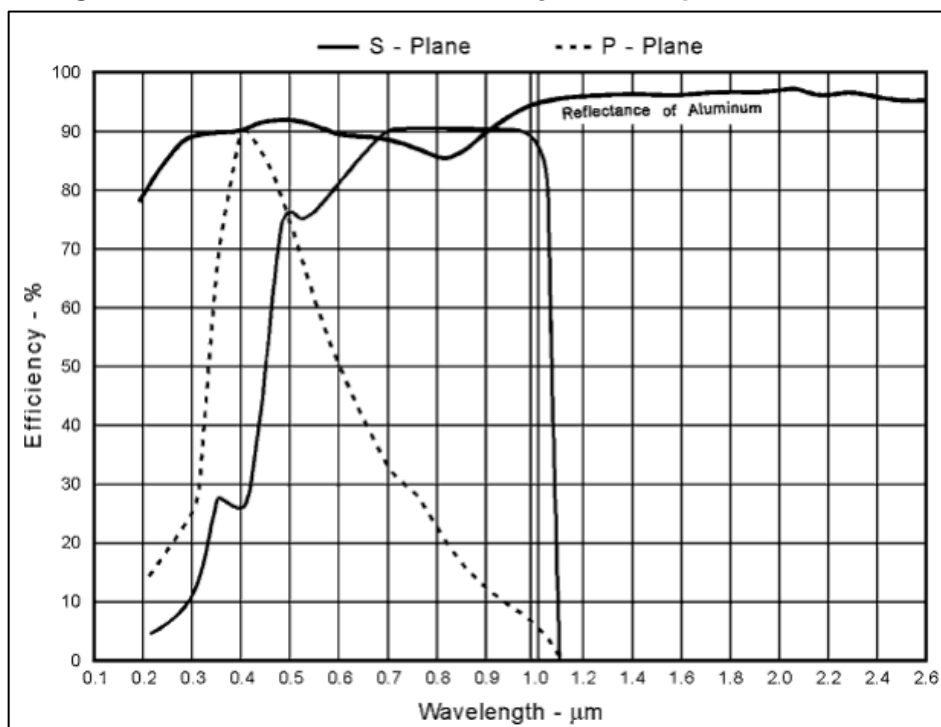


Fonte: (NEWPORT).

Suas especificações segundo seu datasheet (NEWPORT) são:

- Tamanho: 12,5 x 12,5 x 6mm;
- Densidade de ranhuras: 1800 ranhuras/mm;
- Ângulo de chama/blaze: 26,7°;
- Eficiência máxima: 500nm;
- Material: Vidro e alumínio;

Figura 25 - Eficiência da rede com relação ao comprimento de onda.

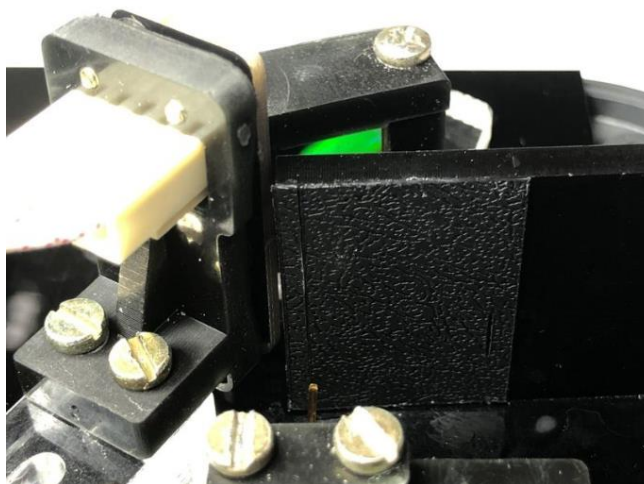


Fonte: (NEWPORT).

3.6.3 Fenda

Com a finalidade de limitar a área de incidência de luz na grade de difração, foi utilizado uma fenda entre a fibra e a grade de difração. A fenda foi construída com acrílico e dois recortes de folha de polipropileno, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Fenda.

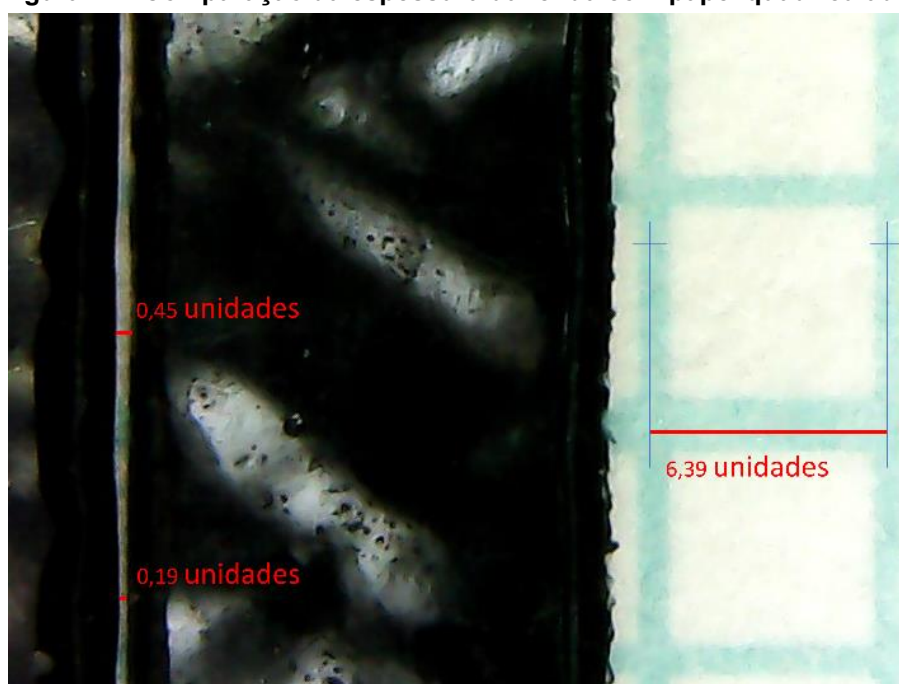


Fonte: Autoria própria.

Para determinar a espessura da fenda, foi utilizando um método de comparação com uma distância conhecida. Para isso foi retirado uma foto com microscópio da fenda junto ao papel quadriculado de 1mm.

Utilizando o *software* PowerPoint, foi inserido linhas na região de maior e menor espessura da fenda, e em uma das laterais do quadrado. O próprio *software* indicou o comprimento dessas linhas nas quais estão indicadas na Figura 27. Comparando essas medidas com a lateral do quadrado (1mm), a menor espessura da fenda corresponde a $23,73 \mu\text{m}$ e a maior $70,42 \mu\text{m}$.

Figura 27 - Comparação da espessura da fenda com papel quadriculado.



Fonte: Autoria própria.

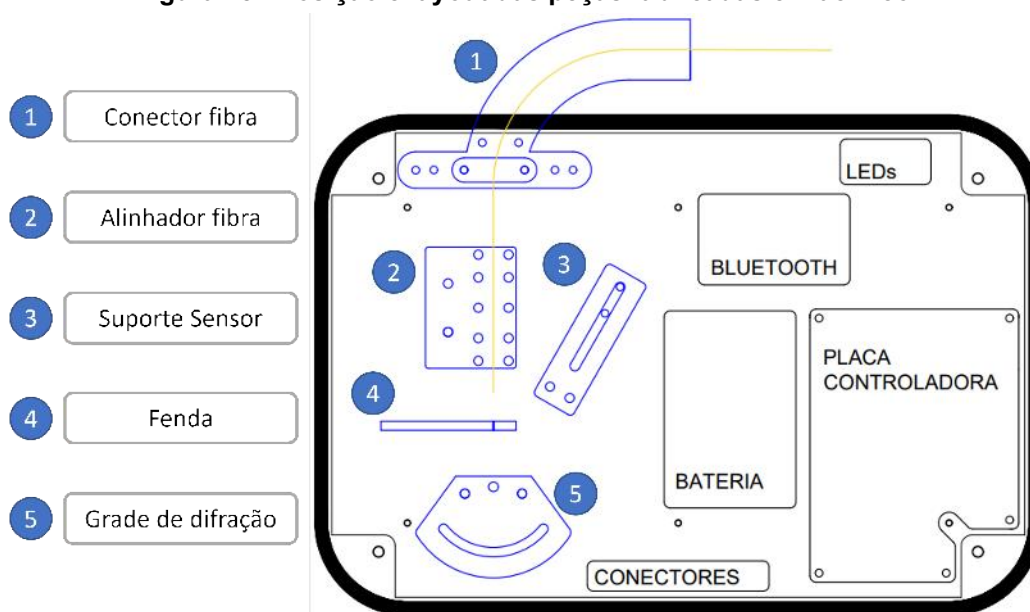
3.7 Suportes

Após a finalização do *hardware* e *software*, o próximo passo é estabelecer a disposição dos componentes dentro da caixa. Para isso foi utilizado o arquivo CAD da caixa na qual disponibiliza a área interna útil que possa ser usada. Todos os componentes serão montados sobre uma peça de acrílico preto, e após a finalização da montagem, essa peça será parafusada nos pontos de fixação da caixa.

Essa estratégia foi pensada para facilitar a montagem ao mesmo tempo que reduz os danos a estrutura da caixa durante o período de montagem e testes. Exceto para os conectores e LEDs, que ficarão fixados nas laterais e não na base.

Para a fixação dos componentes ópticos, foram desenvolvidos suportes em acrílico e resina de impressão 3D. As peças em acrílico estão fixadas na placa base permitindo regulagem de posição. E as peças impressas são travadas nas peças de acrílico e servem como suporte para os componentes. A Figura 28 destaca o layout interno da caixa, junto com a peça base, e a disposição dos componentes.

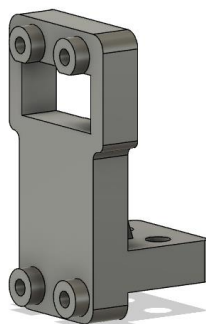
Figura 28 - Posição e layout das peças fabricadas em acrílico.



Fonte: Autoria própria.

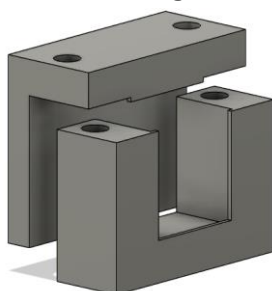
Em amarelo está o caminho percorrido pela fibra dentro da caixa e em azul as peças fabricadas em acrílico. Essas peças foram desenhadas no *software* AutoCAD utilizando a licença de estudante. Já as peças fabricadas em resina foram modeladas no *software* Fusion 360, também utilizando a licença de estudante. Foram confeccionadas em resina preta pela impressora Phothon S da fabricante Anycubic, e estão apresentadas nas Figura 29 até Figura 33.

Figura 29 - Encaixe do sensor.



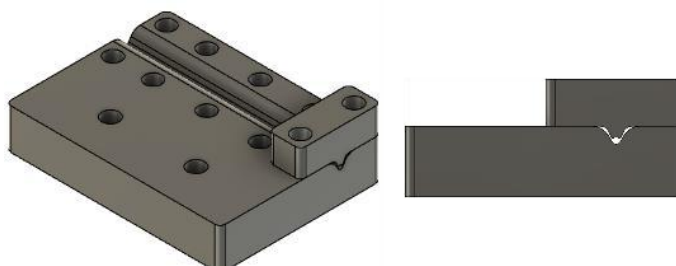
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Encaixe da grade de difração.



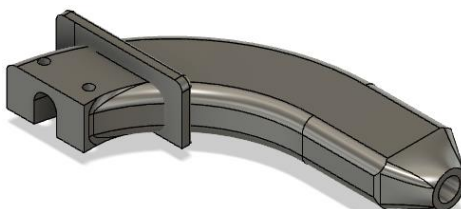
Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Alinhador da fibra óptica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 - Conector da fibra óptica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 - Ponta da fibra óptica.



Fonte: Autoria própria.

3.8 Montagem

Para realizar o encaixe dos conectores na caixa foi montado um sistema de gabarito para facilitar o referenciamento da peça na máquina de corte. Esse sistema é mostrado na Figura 34.

Com todas as peças impressas e cortadas, a montagem foi realizada iniciando pela parte óptica. Para encontrar a posição correta de cada componente, foram realizados testes com luz branca a fim de observar o espectro completo no sensor, mostrado na Figura 35.

Figura 34 - Gabarito para recorte das laterais da caixa.



Fonte: Autoria própria.

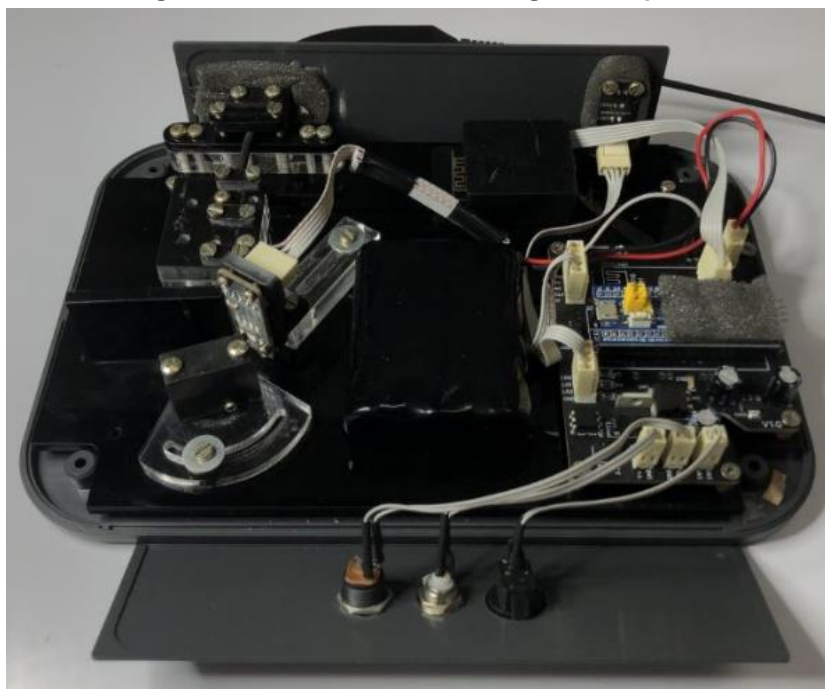
Figura 35 - Ajuste da posição dos componentes.



Fonte: Autoria própria.

Após a montagem de todas as peças conforme o *layout* planejado, os pontos de entrada de luz foram vedados por espuma antirruído, e os cabos foram conectados em seus respectivos componentes, de acordo com a Figura 36.

Figura 36 - Resultado da montagem completa.



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver um aparelho capaz de ler o espectro eletromagnético na região do visível, com uma resolução de pelo menos 2 nm. Também foi estabelecido um tamanho de caixa de (15x15x5) cm.

4.1 Estrutura física e usabilidade

Quanto ao tamanho do aparelho, foram analisadas diversas caixas no mercado, de tamanhos maiores e menores do que o esperado. Entretanto, durante o estudo da escolha das caixas foi observado a necessidade de optar pela viabilidade de custos, em relação ao tamanho. A caixa escolhida foi obtida como amostra grátis da fabricante TAKACHI, portanto não houve custos com essa aquisição.

O resultado após a finalização da montagem entrega um aparelho com *design* simplificado e elegante, com conectores e botão na parte traseira, leds e saída da fibra óptica na região frontal. Além do mais, também segue o caráter de ser portátil e de fácil utilização, por não precisar estar conectado a nenhum fio para funcionar. A Figura 37 e a Figura 38 demonstram o aparelho finalizado em visão frontal e traseira.

Figura 37 - Espectrômetro finalizado (visão frontal).



Fonte: Aatoria própria.

Figura 38 - Espectrômetro finalizado (visão traseira).



Fonte: Autoria própria.

Com todos os componentes óticos fixados, o aparelho possui um caráter robusto e não apresenta problemas em ser transportado.

O teste de bateria indicou um período de aproximadamente 10 horas de trabalho consecutivos. Tempo na qual a tensão da mesma oscilou de 11,9V para 10,03V.

4.2 Conversão pixel para comprimento de onda

Os dados lido pelo aparelho trazem uma relação de intensidade luminosa por *pixel*, enquanto o espectro eletromagnético relaciona a intensidade por comprimento de onda. Dessa forma, é necessário encontrar a relação entre essas duas variáveis.

A posição que cada comprimento de onda chega ao sensor é função da posição dos componentes da técnica junto ao ângulo de incidência de luz sobre os componentes. Isso implica saber a real posição dos componentes para realizar o cálculo e determinar a posição onde está cada comprimento de onda no sensor.

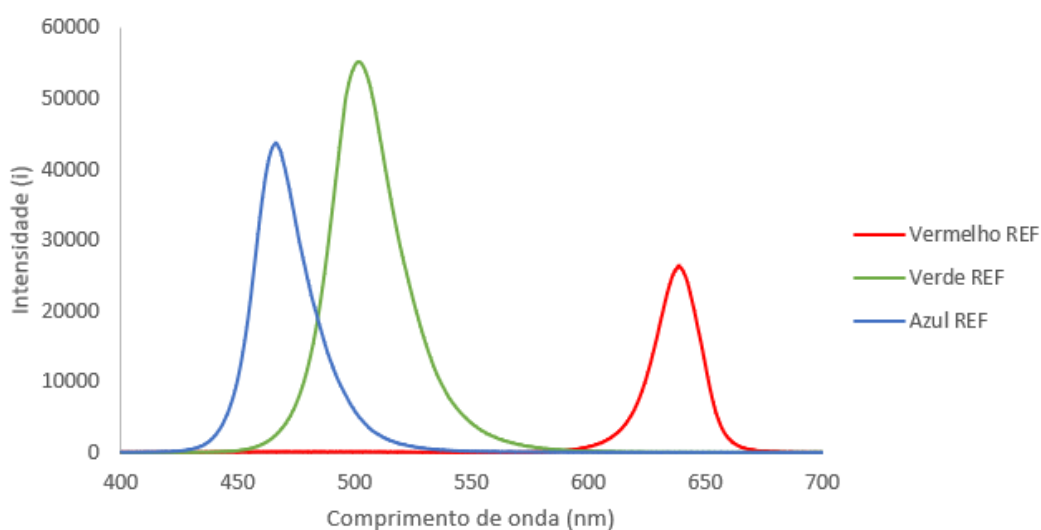
Uma forma alternativa para encontrar essa relação é ler uma luz com um espectro padrão e observar o mesmo padrão nos dados lido pelo sensor. Por exemplo: se o aparelho lê uma luz vermelha conhecida com pico máximo em 630nm, o *pixel* que tiver lido a maior intensidade de luz corresponde a 630nm. Fazendo esse mesmo procedimento para mais de um comprimento de onda é possível estabelecer uma curva que relaciona cada *pixel* com um comprimento de onda.

Para calibração do aparelho foram utilizados 3 LEDs de cores diferentes: vermelho, verde e azul. Cada LED teve o seu espectro lido pelo espectrômetro

comercial LSP-2, fabricado pela LASERline (LASERLINE, 2022), no qual foi obtido o comprimento de onda de maior intensidade. Esses dados foram obtidos como referência, e são mostrados na Figura 39. Posteriormente, o mesmo procedimento foi feito com o espectrômetro, apresentando resultado mostrado na Figura 40.

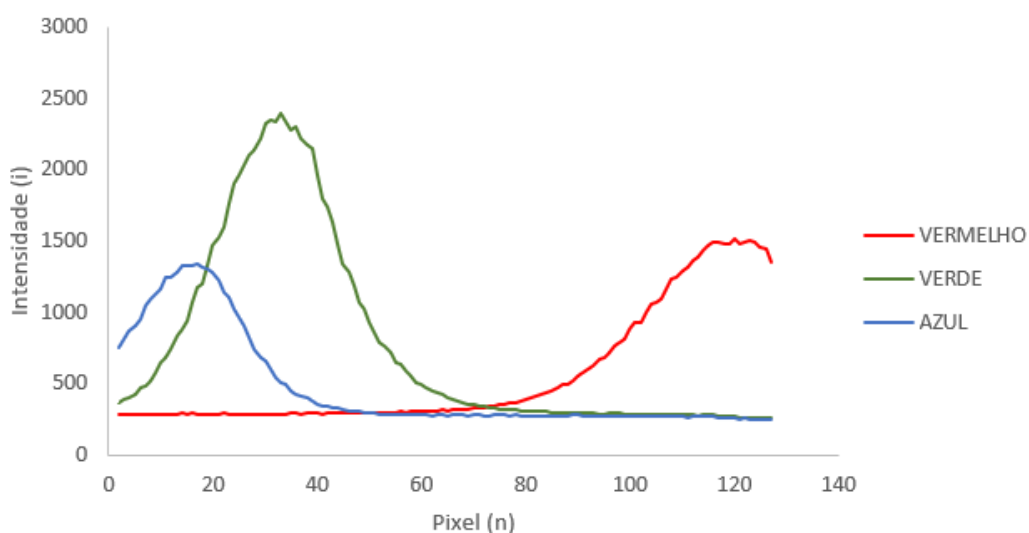
Com essas informações, é possível estabelecer uma relação entre comprimento de onda e pixel, conforme indica na Tabela 4.

Figura 39 - Espectro de três LEDs lidos pelo LSP-2 tomados como referência.



Fonte: Autoria própria.

Figura 40 - Espectro de três LEDs lidos pelo aparelho desenvolvido.



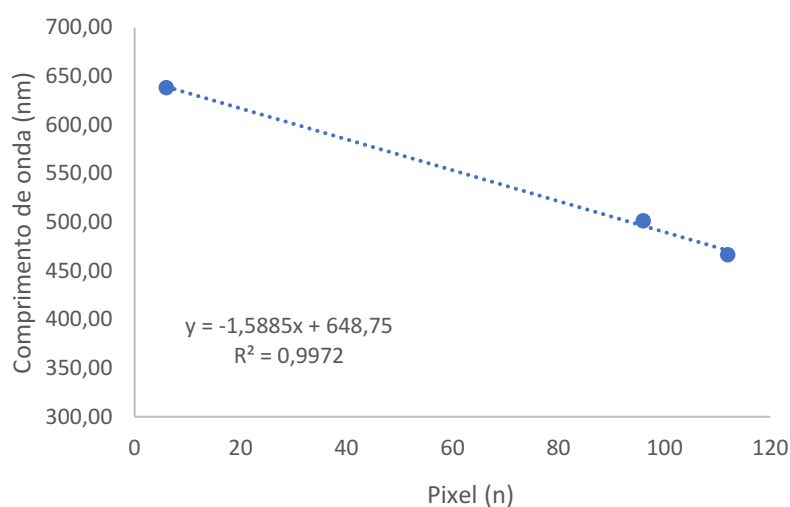
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Relação entre pixels de máxima intensidade e comprimento de onda.

LED	Pixel	Comprimento de onda (nm)
Vermelho	6	638,44
Verde	96	501,36
Azul	112	466,49

Fonte: Autoria própria.

Ao plotar esses dados é possível perceber uma tendência linear, conforme a Figura 41, evidenciando um comportamento linear do espectro ao longo do sensor CCD, e permitindo atribuir um comprimento de onda para cada pixel do sensor.

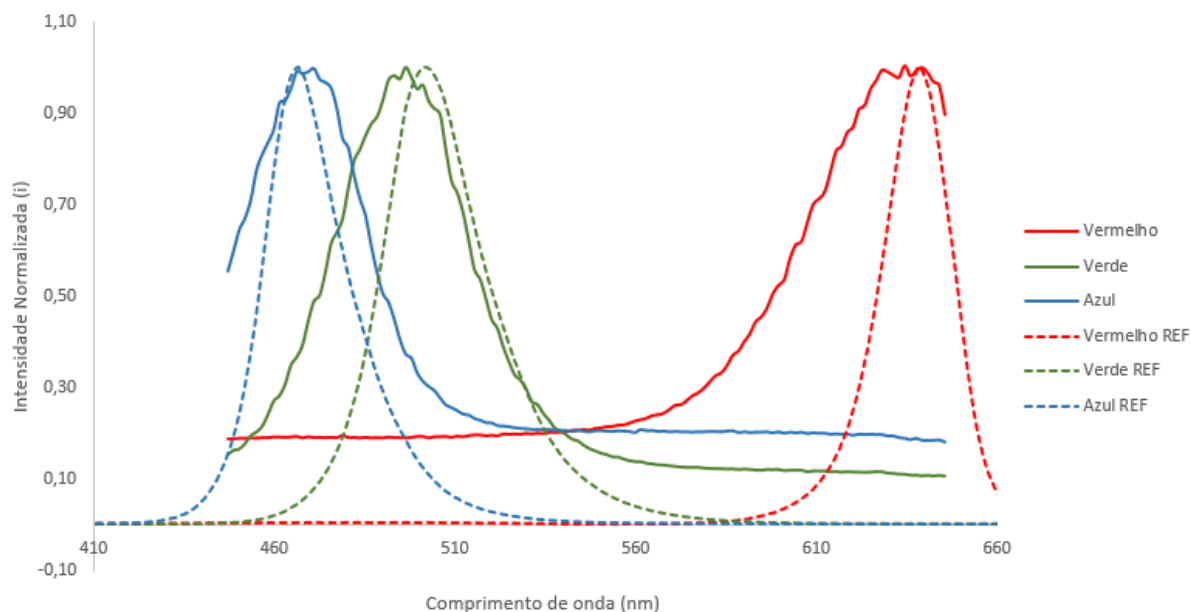
Figura 41 - Ajuste linear entre comprimento de onda e pixel.

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a equação, é possível perceber que o primeiro pixel corresponde ao comprimento de onda 648,75 nm (pixel 0), e o último a 447,01 nm (pixel 127). Dessa forma, é possível dizer que a disposição física interna dos componentes garante uma resolução de 1,59 nm por *pixel*, atingindo o objetivo buscado (2 nm/pixel)

A Figura 42 representa os dados obtidos pelos dois aparelhos, normalizados, e com o ajuste para comprimento de onda.

Figura 42 – Comparação entre os dados lidos pelos dois aparelhos após ajuste.

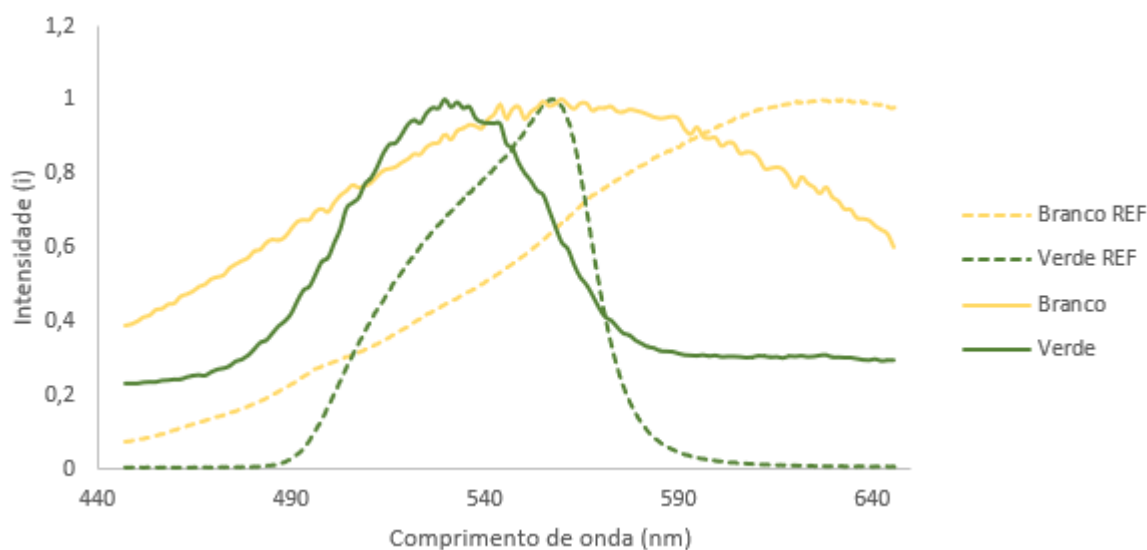


Fonte: Autoria própria.

4.3 Teste comparativo do espectro de um filtro

Para validar o funcionamento do aparelho, foi realizado um teste de comparação com o espectrômetro de referência lendo um sinal luminoso branco, e outro com a mesma fonte luminosa, mas com um filtro para luz verde na entrada da fibra óptica. Os dados desse teste foram normalizados a fim de comparar o comprimento de onda da máxima intensidade de onda entre os dois aparelhos. Os dados do espectrômetro comercial foram utilizados com referência, e receberam a *tag* “REF” na Figura 43.

Figura 43 - Leituras de comparação.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 43 é possível perceber que os pontos de máximo não estão alinhados, mesmo que o padrão de curva seja parecido. Os pontos de máximo estão listados na tabela abaixo.

Tabela 5 - Comprimentos de onda de máxima intensidade.

Sinal	λ de máxima intensidade (nm)
Branco REF	626,72
Verde REF	557,28
Branco	559,79
Verde	529,61

Fonte: Autoria própria.

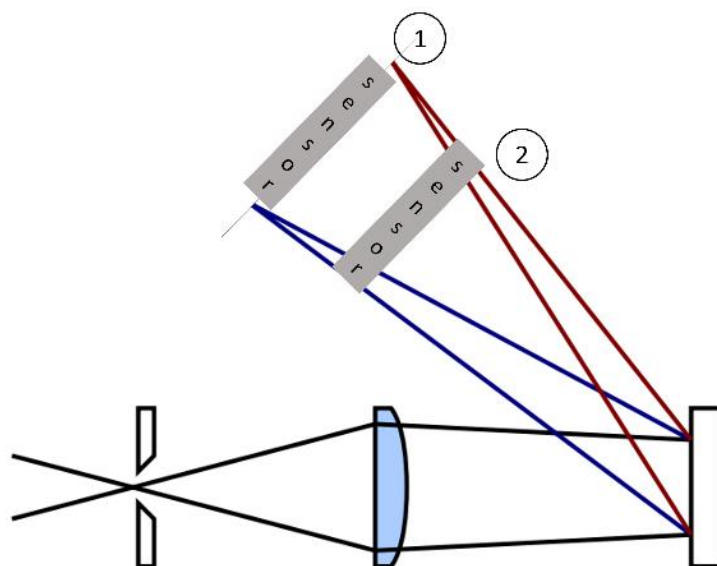
Essa diferença entre os máximos dos dois aparelhos pode ser explicada de diversas formas. A principal explicação está relacionada com a resposta intrínseca do sistema desenvolvido como por exemplo a grade de difração, que tem eficiência máxima em 500 nm, o que causa uma leitura de espectro com mais intensidade nessa região. Assim como a grade, os demais componentes também possuem respostas espectrais, deixando o resultado em função dessas respostas. O que explica a diferença de leitura entre os dois aparelhos.

Outra explicação está no erro associado a leitura. Como por exemplo a luz refletida pelo acrílico dentro do aparelho, impactando principalmente na leitura dos comprimentos de onda que estariam escuros. Percebe-se, por exemplo, que nos sinais lidos os valores não se aproximam de zero, indicando que alguma intensidade luminosa estava chegando aos *pixels* do sensor.

Outro fator importante é o posicionamento do sensor. A posição ideal de fixação do sensor é posição 1 (Figura 44), pois nela todos os comprimentos de onda refratados estão em foco. Entretanto, como o sensor CCD utilizado possui apenas 8mm aproximadamente entre o primeiro e último pixel, necessita estar próximo da grade de difração para não perder comprimentos de onda, como é o caso do sensor na posição 2.

Porém, nesses casos não há distância suficiente para que os raios de mesmo comprimento foquem na tela do sensor. Uma possível correção seria trocar o sensor para outro de maior tamanho, ou afastá-lo, estreitando a faixa espectral de leitura e aumentando a resolução.

Figura 44 - Posicionamento do sensor



Fonte: Autoria própria.

Outro fator contribuinte para esse erro é a colimação dos raios. A aproximação feita através de fenda para a colimação pode não ter sido suficientemente adequada para garantir que uma pequena área da grade fosse atingida pela luz, gerando refração de mesmos comprimentos de onda em lugares diferentes do sensor. A variação no tamanho da abertura, por exemplo, também pode desencadear erros na leitura.

A grade de difração é um dos componentes mais frágeis presentes no sistema, e devido à utilização em outros projetos a mesma já apresentava aspecto degradado, possibilitando também um espalhamento da luz incidente, de forma que provavelmente não havia uma separação espectral correta de toda a luz que incidia sobre ela.

5 CONCLUSÕES E MELHORIAS FUTURAS

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de um aparelho portátil capaz de ler espectro eletromagnético visível. Para cumprir esse objetivo, foi necessário utilizar a pesquisa exploratória para o auxílio na tomada de decisão, que envolveu áreas como: óptica, eletrônica, *software*, entre outras.

Toda essa pesquisa teve como resultado um aparelho com acabamento aprimorado, com componentes bem fixados e de fácil utilização, não exigindo a utilização de nenhum *software* especial para o seu uso, apenas aplicativos genéricos de terminal Bluetooth.

Os testes foram realizados através de comparação com um equipamento comercial, tido como referência. Primeiramente foi determinado o significado de cada *pixel* no espectro eletromagnético, de forma que o sistema montado apresentou resolução de 1,59 nm por *pixel*, na faixa entre 447 e 649nm.

Em testes posteriores foi verificado que o equipamento construído pode perfeitamente ser utilizado para visualização aproximada do comportamento espectral, necessitando de aprimoramento na parte óptica para melhorar a qualidade do sinal lido.

De forma geral é possível concluir que o aparelho é capaz de realizar leitura de espectro, mostrar o formato da onda em dispositivos como celulares e computadores através de comunicação sem fio, além de funcionar com alimentação própria por até cerca de 10 horas sem a necessidade de ligação na tomada.

Nos aprimoramentos necessários cita-se melhorias na parte ótica, como a utilização de uma CCD maior para que seu posicionamento seja feito a uma distância maior em relação à grade de difração, aquisição de uma nova grade de difração e melhorias no sistema de colimação e fenda.

Outra atualização interessante seria a implementação de um aplicativo para coletar os dados e geração de resultados em tempo real, com possibilidade de cálculo automático de transmitância e absorbância.

REFERÊNCIAS

- AMS. **Datasheet TSL1401CL**, 2016. Disponível em: <https://ams.com/documents/20143/36005/TSL1401CL_DS000136_3-00.pdf/8de4cae4-354c-c2c3-8db4-6a132f969a0a>. Acesso em: 02 Fevereiro 2022.
- ANTONIOLLI, E. A. **Construção de um espectrofotômetro digital de transmissão para atuar na região visível do espectro eletromagnético**. UTFPR. Medianeira. 2018.
- ATVARS, T. D. Z.; MARTELLI, C. Espectroscopia de luminescência. **Revista ChemKeys**, Campinas, v. 2, p. 1-9, 2018. Acesso em: 17 julho 2021.
- AVANTES. **Introduction to Fibre Optics**. Disponível em: <<https://www.avantes.com/support/theoretical-background/introduction-to-fiber-optics/>>. Acesso em: 31 Maio 2022.
- CLARO, P. R. Espectroscopia. **Revista de Ciência Elementar**, Porto, v. 5, n. 4, p. 16-19, Dezembro 2017. Acesso em: 15 Junho 2021.
- COSTA, A. M. Simulação de Dados para validação da metodologia de redução de espectros echelle aplicada ao espectrógrafo STELES, Rio de Janeiro, Outubro 2010. Disponível em: <http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/Machado-Instrum-Steles.2010_12_29_14_39_28.pdf>. Acesso em: 11 Agosto 2021.
- EASYEDA. **An Easier and Powerful Online PCB Design Tool**, c2022. Disponível em: <<https://easyeda.com/>>. Acesso em: 07 Março 2022.
- EMBARCADOS. **Convertendo o STM32 Blue Pill em uma Black Magic Probe**, 2019. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/convertendo-o-stm32-blue-pill-em-uma-black-magic-probe/>>. Acesso em: 24 Abril 2022.
- FERRARESI, T. M. et al. ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO NA DETERMINAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO. **R. Bras. Ci. Solo**, Santo Antônio de Goiás, 2012.
- GUARIEIRO, L. L. N. METODOLOGIA ANALÍTICA PARA QUANTIFICAR O TEOR DE BIODIESEL NA MISTURA BIODIESEL:DIESEL UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO. **Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 2, p. 421-426, Janeiro 2008. Acesso em: 2 Agosto 2021.
- HALLYDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: óptica e física moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- HARRIS, D. C. **Análise química quantitativa**. 8. ed. [S.l.]: Grupo GEN, 2012.
- JGP. **Bateria Li-ion 18650 12v 2200mah Sanyo Placa Bms Pcb**. Disponível em: <https://www.jgpassistencia.com.br/MLB-1681130168-bateria-li-ion-18650-12v-2200mah-sanyo-placa-bms-pcb-_JM>. Acesso em: 1 Maio 2022.
- JLPCB. **Welcome to JLPCB**, c2022. Disponível em: <<https://jlcpcb.com/aboutUs>>. Acesso em: 15 Março 2022.

LABNETWORK. **Os avanços da espectrometria de massas nos laboratórios clínicos**. Disponível em: <<https://www.labnetwork.com.br/especiais/os-avancos-da-espectrometria-de-massas-nos-laboratorios-clinicos/>>. Acesso em: 3 Maio 2021.

LASERLINE. **Espectrômetro LASERLine LSP-2**, 2022. Disponível em: <<https://www.laserline.com.br/produtos/cientifica/espectrometro>>. Acesso em: 20 maio 2022.

LEITE, D. D. O.; PRADO, R. J. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Cuiabá, v. 343, n. 2, p. 2504-2513, Junho 2012. Acesso em: 12 Agosto 2021.

MOLEX. **The Book on the technologies of Polymicro**, p. 16-28.

NEWPORT. **Diffraction Grating, Plane Ruled, 12,5 x 12,5 mm, 500 nm, 26,7° Blaze, 1800 Gr/mm**. Disponível em: <<https://www.newport.com/p/33025FL01-290R>>. Acesso em: 18 Agosto 2021.

SALICIO, C. U.; CASTRO, P. A. A. D. O Espectro eletromagnético e as interações de cada faixa espectral com a matéria. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1884377/mod_resource/content/0/%3D%3D%20SEMINARIO%2024ago16-TEXTO.pdf>. Acesso em: 9 Agosto 2021.

SILVA, A. M. D. **DIAGNÓSTICO DE LEUCEMIAS AGUDAS ATRAVÉS DA ESPECTROSCOPIA RAMAN E ANÁLISE DISCRIMINANTE PELOS MÍNIMOS QUADRADOS PARCIAIS**, São José dos Campos, Agosto 2018. Disponível em: <<https://portal.anhembí.br/wp-content/uploads/2019/03/TESE-Adriano-Moraes-da-Silva.pdf>>. Acesso em: 12 Agosto 2021.

SKETCHFAB. **Visão explodida - Série PF**. Disponível em: <<https://sketchfab.com/3d-models/exploded-view-pf-series-04683df8e5ff4914a315552be2cf3097>>. Acesso em: 25 Maio 2022.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, J. **Fundamentos de química analítica**. 8. ed. São Paulo: Thonson Learning, 2006. Acesso em: 21 maio 2021.

SOUZA, J. S. D.; CARDOZA, J. A. S. **Sensores de Imagem Digitais CCD E CMOS**, Janeiro 2009. Disponível em: <<https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/1667/2517>>. Acesso em: 30 Julho 2021.

TAVARES, K. M. et al. Espectroscopia no infravermelho médio e análise sensorial aplicada à detecção de adulteração de café torrado por adição de cascas de café. **Química Nova [online]**, v. 35, n. 6, p. 1164-1168, 2012. ISSN 1678-7064.

TRONCO, T. R. **Fundamentos de Comunicações Óptica**, n. 1, p. 12-25, 2007.