

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANGELO FELIPE DAL MAGRO

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA EM FOLHAS DE
PLANTAS A PARTIR DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTROFOTÔMETRO NA
FAIXA DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO**

PATO BRANCO

2023

ANGELO FELIPE DAL MAGRO

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA EM FOLHAS DE
PLANTAS A PARTIR DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTROFOTÔMETRO NA
FAIXA DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO**

**Evaluation of chlorophyll concentration in plant leaves using a prototype
spectrophotometer in the near infrared range**

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

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Alfredo Guarneri

Coorientador: Prof. Dr. Diogo Ribeiro Vargas

PATO BRANCO

2023



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

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANGELO FELIPE DAL MAGRO

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA EM FOLHAS DE
PLANTAS A PARTIR DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTROFOTÔMETRO NA
FAIXA DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO**

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

Data de aprovação: 05/12/2023

Giovanni Alfredo Guarneri
Orientador, Professor Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Diogo Ribeiro Vargas
Professor Doutor
Universidade Federal de Santa Maria

Gustavo Weber Denardin
Professor Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fábio Luiz Bertotti
Professor Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio ao longo da graduação, em especial ao meu pai Ivair Dal Magro, a minha madrasta Diane R. de Mello, a minha irmã Giovana Dal Magro e a Dielly M. Comelli Alves pelo convívio incentivador ao longo desta jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Giovanni Alfredo Guarneri e ao meu coorientador Prof. Dr. Diogo Ribeiro Vargas pelos valiosos conselhos e ajuda frente aos obstáculos enfrentados ao longo deste trabalho.

A Central de análises - UTFPR/PB pelo auxílio nas análises a partir dos equipamentos comerciais e ao Laboratório de horticultura do DAGRO -UTFPR/PB, especialmente ao Prof. Dr. Idemir Citadin pelo empréstimo do analisador de teor de clorofila.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, especialmente aos professores do curso de Engenharia Elétrica, aos quais sou grato pelos ensinamentos e apoio.

RESUMO

A aplicação de análises não destrutivas é crescente nos setores industriais e de pesquisa, tendo o espectrofotômetro como um dos principais instrumentos desses ensaios. Este trabalho dedicou-se a analisar o teor de clorofila em folhas de plantas a partir da espectrofotometria na região do infravermelho próximo e ao desenvolvimento de um protótipo de espectrofotômetro com o objetivo de realizar essas análises. O protótipo, embora menos robusto e complexo que os espectrofotômetros comerciais, apresentou um baixo custo de desenvolvimento. Os resultados das análises apresentam os índices de clorofila calculados para o protótipo projetado para um número de onze amostras de folhas, e a comparação frente ao índice encontrado pelo equipamento comercial com um erro máximo de 18,88% para o conjunto de amostras analisadas.

Palavras-chave: espectrofotometria; infravermelho próximo; índice de clorofila; protótipo.

ABSTRACT

The application of non-destructive analyzes is growing in the industrial and research sectors, with the spectrophotometer as one of the main instruments for these tests. This job dedicate yourself to analyzing the chlorophyll content in plant leaves using spectrophotometry in near infrared region and the development of a spectrophotometer prototype for the purpose of carrying out these analyses. The equipment developed, although less robust and complex than commercial spectrophotometers, presented a low development cost mind. Chlorophyll index analyzes were carried out using the developed prototype with comparative tests against commercial equipment. The results of the analyzes present the chlorophyll indices calculated for the prototype developed for a number of eleven leaf samples, and the comparison to the index found by the equipment commercial with a maximum error of 18.88% for the set of samples tested.

Keywords: spetrophotometry; near-infrared; chlorophyll index; prototype.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escala espectro com as subdivisões do Infravermelho	14
Figura 2 – Espectrofotômetro Infravermelho Próximo, do inglês <i>Near-Infrared</i> (NIR) de Refletância	19
Figura 3 – Espectrofotômetro NIR de Transmitância	19
Figura 4 – Espectros de absorção de alguns dos pigmentos fotossintetizantes . .	21
Figura 5 – Espectros de absorção para clorofilas A (curva amarela) e B (curva azul)	22
Figura 6 – Diagrama de subsistemas do dispositivo	24
Figura 7 – Responsividade Espectral do AS7263	26
Figura 8 – Diagrama de Blocos AS7263	26
Figura 9 – Diagrama de blocos interno	27
Figura 10 – Dispositivos mestre e escravos em barramento I2C	28
Figura 11 – Subsistemas no módulo do sensor AS7263	34
Figura 12 – Diagrama e representação de conexão	34
Figura 13 – Projeto 3D em <i>Fusion 360</i>	35
Figura 14 – Processo de fatiamento de estrutura 3D	36
Figura 15 – Processo de impressão 3D	36
Figura 16 – Estrutura Pronta	37
Figura 17 – Amostras utilizadas 1 a 6	40
Figura 18 – Amostras utilizadas 7 a 11	41
Figura 19 – Análise da amostra 8 em dispositivo CFL1030	41
Figura 20 – Análise da amostra 8 em dispositivo desenvolvido	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado da Análise em CFL1030	43
Tabela 2 – Resultados leitura pré-amostra 1	44
Tabela 3 – Resultados leitura para a amostra 1	44
Tabela 4 – Resultados leitura para amostras e pré-amostras em cada canal de leitura	45
Tabela 5 – Transmitância percentual para cada faixa	45
Tabela 6 – Relação entre ICF equivalente (Eq. 4) e ICF medido - Análise 1	46
Tabela 7 – Relação entre ICF equivalente (Eq. 5) e ICF medido - Análise 2	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Regiões do infravermelho	15
Quadro 2 – Filtros Sensor AS7263	25
Quadro 3 – Classificação máxima absoluta e condições gerais de operação	27
Quadro 4 – Registradores do Sensor AS7263	29
Quadro 5 – Características de <i>hardware</i> ESP8266	32
Quadro 6 – Identificação das Amostras	40

LISTAGEM DE CÓDIGOS FONTE

Listagem 1 – Pseudocódigo de Escrita I2C no AS7263	30
Listagem 2 – Pseudocódigo de Leitura Circuito Inter-Integrado, do Inglês <i>Inter-Integrated Circuit (I2C)</i> no AS7263	31
Listagem 3 – Definições iniciais de compatibilidade	38
Listagem 4 – Definições dos modos de conversão e ganhos do sensor	38
Listagem 5 – Leitura e armazenamento dos dados	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ADC	Conversor Analógico para Digital, do inglês <i>Analog to Digital Converter</i>
CCI	Índice de Conteúdo de Clorofila, do inglês <i>Chlorophyll Content Index</i>
CPU	Unidade Central de Processamento, do inglês <i>Central Processing Unity</i>
FIR	Infravermelho Distante, do inglês <i>Far-Infrared</i>
FWHM	Meia Largura Total, do inglês <i>Full-Width Half-Max</i>
GPIO	Portas de Entrada/Saída de Uso Geral, do inglês <i>General Purpose Input/Output</i>
I2C	Circuito Inter-Integrado, do Inglês <i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICF	Índice de Clorofila Falker
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês <i>Integrated Development Environment</i>
IT	Integração Temporal
LED	Diodo Emissor de Luz, do inglês <i>Light-Emitting Diode</i>
MIR	Infravermelho Médio, do inglês <i>Medium-Infrared</i>
NIR	Infravermelho Próximo, do inglês <i>Near-Infrared</i>
SCL	Relógio Serial, do Inglês <i>Serial Clock</i>
SDA	Dados Seriais, do Inglês <i>Serial Data</i>
SPAD	Desenvolvimento de Análise de Plantas de Solo, do inglês <i>Soil Plant Analysis Development</i>
UART	Recepção e Transmissão Assíncrona Universal, do inglês <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UV	Ultra Violeta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Fundamentos do infravermelho próximo	14
3.2	Instrumentação do infravermelho próximo	15
3.2.1	Fonte de radiação infravermelha	16
3.2.2	Seleção de comprimento de onda	16
3.2.3	Amostrador	17
3.2.4	Detector	17
3.2.5	Sistema ótico	17
3.2.6	Gerenciamento eletrônico	18
3.2.7	Espectrofotômetros comerciais	18
3.3	Aplicações para espectrofotometria NIR	20
3.4	Análise de clorofila a partir do espectro	21
3.4.1	Aspectos físico-químicos da clorofila	21
3.4.2	Métodos de análise de concentração de clorofila	22
3.4.3	Equipamentos comerciais	23
3.5	Considerações finais	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.1.1	Sensor multiespectral	25
4.1.2	Controlador	30
4.1.3	Elemento estrutural do protótipo	32
4.1.4	Amostrador	32
4.2	Desenvolvimento do protótipo	33
4.2.1	Sistemas emissor, amostrador e detector	33
4.2.2	Desenvolvimento do <i>software</i>	36
4.3	Análise do teor de clorofila em folhas de plantas	39

4.4	Considerações finais	42
5	RESULTADOS	43
5.1	Considerações finais	47
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A espectrofotometria, bem como outros métodos analíticos não destrutivos, são importantes técnicas que vem impactando positivamente os setores de pesquisa e indústria, com aplicações que vão desde os ramos agrário, química e alimentício. Essa técnica permite a análise da absorção ou reflexão da matéria em distintos comprimentos de onda, apresentando informações relevantes sobre as propriedades dos materiais (OLIVEIRA, 2011).

Ao longo do presente trabalho é proposta a análise do teor de clorofila em folhas de plantas através da espectrofotometria na região do NIR, e o desenvolvimento de um protótipo de espectrofotômetro para realizar tais análises.

Os equipamentos de espectrofotometria são ferramentas que complexas e com uma ampla gama de aplicações, cujas características agregam um custo elevado de aquisição, podendo ser um motivo impediante em algumas áreas. Azevedo, Sousa e Castro (2019) afirmam que os custos elevados não tornam plausíveis a aquisição desses equipamentos para as áreas de educação básica, por exemplo. Outro ponto limitante de alguns desses equipamentos é a baixa portabilidade, restringindo algumas aplicações (PEREIRA; HIRASHIMA; OLIVEIRA, 2021).

No desenvolvimento desse dispositivo foram utilizados distintos componentes eletrônicos como microcontrolador, sensores, atuadores e sistemas de comunicação. Uma vez que o equipamento necessita do controle das interações e armazenamento das respostas das análises, implementou-se de um *software* embarcado no dispositivo, a fim de atender essas funções.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o teor de clorofila em folhas de plantas através da espectrofotometria com o desenvolvimento de um protótipo de espectrofotômetro atuante na faixa do infravermelho próximo.

2.2 Objetivos específicos

- i. Desenvolver um *hardware* que integre os sistemas emissor de ondas eletromagnéticas, amostrador de matéria e detector de ondas eletromagnéticas.
- ii. Projetar e fabricar o elemento estrutural que acomode os subsistemas do equipamento de forma integrada.
- iii. Elaborar um *software* que realize o controle do sistema eletrônico, bem como de obtenção dos dados do dispositivo.
- iv. Analisar o índice de clorofila em amostras de folhas a partir do protótipo de espectrofotômetro desenvolvido em comparação com equipamento comercial.

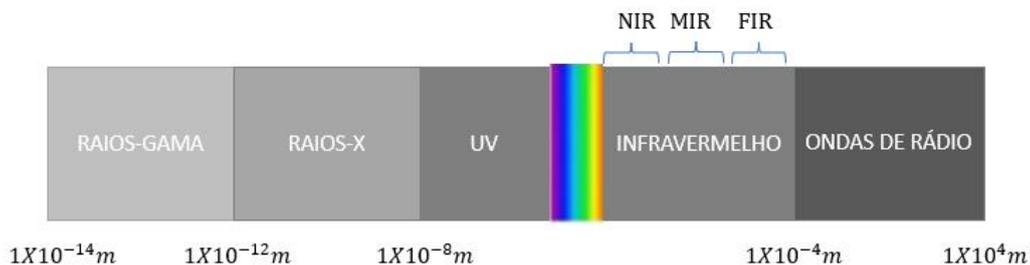
3 REFERENCIAL TEÓRICO

A espectrofotometria no infravermelho próximo (NIR) é uma técnica amplamente difundida em análises de diversas áreas, como a química, farmácia, agricultura, indústria alimentícia e ambiental. O desenvolvimento dos sistemas capazes de realizar tais análises é um desafio impulsionado pelos avanços tecnológicos. O objetivo deste capítulo é apresentar os fundamentos físico-químicos da faixa espectral chamada de infravermelho próximo, abordando os princípios da interação com a matéria e as técnicas analíticas utilizadas. Será abordada também a instrumentação para essas análises, incluindo as principais características construtivas dos espectrofotômetros, bem como seus principais subsistemas e componentes. Além disso, serão discutidas as aplicações de tais técnicas em diferentes áreas de pesquisa, evidenciando a importância desse método como ferramenta analítica. O embasamento teórico fornecido neste referencial é fundamental para compreender as bases científicas e técnicas que orientam o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Fundamentos do infravermelho próximo

A faixa do espectro luminoso chamada de NIR, é a região do espectro eletromagnético que se estende desde os 780 nm até 2.500 nm , conforme apresentado na Figura 1 e no Quadro 1 (SILVA, 2006). Ainda, o infravermelho tem outras duas faixas de divisão, Infravermelho Médio, do inglês *Medium-Infrared* (MIR) (entre 2.500 nm e 50.000 nm) e Infravermelho Distante, do inglês *Far-Infrared* (FIR) (entre 50.0000 nm e $1.000.000\text{ nm}$) (SKOOG *et al.*, 2006).

Figura 1 – Escala espectro com as subdivisões do Infravermelho



Fonte: Autoria própria (2023).

A banda de comprimento de onda do infravermelho é importante na análise de amostras devido às suas propriedades físicas e químicas. A absorção e a transmissão são duas das

Quadro 1 – Regiões do infravermelho

Região	Número de onda (cm ⁻¹)	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)
NIR	12800 - 4000	780-2500	380-120
MIR	4000 - 200	2500-50000	120-6
FIR	200 - 10	50000-1000000	6-0,3

Fonte: Adaptado de Skoog *et al.* (2006).

principais características utilizadas nas análises de espectrofotometria, uma vez que, o NIR interage com a matéria por meio dos fenômenos da absorção e transmissão da radiação nessa faixa. Componentes químicos distintos possuem diferentes níveis de absorção de energia na região espectral NIR, gerando padrões de absorção característicos para alguns elementos. Da mesma forma o fenômeno da transmissão de radiação NIR apresenta padrões distintos para diferentes substâncias. O espectro de absorção NIR costuma conter uma grande quantidade de informações, devido a sobreposição de bandas de absorção que correspondem a compostos distintos, revelando informações quantitativas e qualitativas da composição das amostras (BURNS *et al.*, 2008).

Uma característica marcante do NIR é a sensibilidade a ligações químicas fundamentais, como as ligações C-H, N-H e O-H. Ligações essas que são normalmente encontradas em compostos orgânicos, fazendo do espectro NIR um importante instrumento em análises aplicadas a áreas como as indústrias farmacêuticas, química e alimentícia, por exemplo. Essas análises costumam usar a característica de absorção de energia do NIR para determinar a presença e até mesmo a concentração desses grupos funcionais (BURNS; CIURCZAK, 2001).

A característica do NIR que o torna tão importante em estudos de matéria, segundo Burns *et al.* (2008), possivelmente seja a de penetração moderada, na qual esse pode passar por materiais líquidos e sólidos preservando a integridade dos compostos, caracterizando-o como uma análise não destrutiva. Além disso, não tem a necessidade de nenhuma preparação extensa para as amostras.

3.2 Instrumentação do infravermelho próximo

A instrumentação NIR é constituída de uma série de componentes que são associados a fim de realizar análises nessa faixa do espectro, todavia, as diferentes combinações de subconjuntos que formam distintos equipamentos denominados espectrômetros NIR, ou, espectrofotômetro NIR. Os espectrofotômetros NIR têm como componentes principais uma fonte de radiação, um filtro ou monocromador, amostrador, sistema ótico, detector e o controlador. A seguir são detalhadas as características para cada um dos subsistemas de um espectrofotômetro (PAVIA *et al.*, 2010).

3.2.1 Fonte de radiação infravermelha

A fonte de radiação ou fonte luminosa é o subconjunto do espectrofotômetro NIR responsável por emitir a radiação na faixa do infravermelho próximo. Dentre as principais soluções empregadas nessa aplicação estão o laser de diodo, lâmpada halógena de tungstênio e Diodo Emissor de Luz, do inglês *Light-Emitting Diode* (LED). A fonte luminosa pode ser definida de acordo com a banda espectral desejada e da especificidade da aplicação do equipamento (OSBORNE, 2000).

3.2.2 Seleção de comprimento de onda

Tanto o filtro quanto o monocromador têm a função de realizar a seleção de uma ou mais faixas de comprimento específica do espectro NIR, eliminando faixas indesejadas e melhorando a precisão das análises. O monocromador é o dispositivo que gera o fenômeno da dispersão da luz em diferentes comprimentos de onda, possibilitando a seleção de faixas. Dispositivos equipados com monocromadores são instrumentos mais versáteis que permitem uma ampla gama de aplicações em distintos intervalos. Outro tipo de monocromador é o dispersivo chamado de *Acousto-Optically Tunable Filter* (AOTF). Um AOTF é composto de um cristal de TeO₂ (dióxido de telúrio), que quando recebe um feixe de luz incidente se comporta como uma grade de difração longitudinal com periodicidade igual ao comprimento de onda da luz que atravessa o cristal. As principais vantagens desse modelo de monocromador são a simplicidade construtiva, sendo um dispositivo estático (não necessita de partes móveis como o monocromador clássico) e a estabilidade no comprimento de onda. Enquanto o filtro tem sua aplicação ligada principalmente em espectrofotômetros mais simples, esses dispositivos costumam possuir um número limitado de filtros de interferência, aproximadamente de seis a vinte filtros, que representam as faixas de absorção mais utilizadas. Por exemplo, em faixas que representam grupos proteicos, umidades e óleo. Sendo assim os dispositivos a base de filtro são projetados para análises rotineiras tendo uma gama limitada de aplicações (OSBORNE, 2000).

Outra solução empregada na seleção da faixa espectral é o uso de uma matriz de LEDs. Segundo Osborne (2000), os LEDs do equipamento funcionam como fonte de luz e ao mesmo tempo como sistema de seleção de comprimento de onda. Os instrumentos a base de matriz de LEDs normalmente abrangem uma faixa que vai de 400 a 1700 nm. Eles possuem a vantagem de realizarem medições mais rápidas, característica valiosa em análises em que há grande quantidades de amostras e que o objeto da análise é um composto bem definido, por exemplo, análises de solo.

3.2.3 Amostrador

O amostrador do espectrofotômetro é responsável por receber e adequar a amostra para a análise, sendo crucial o papel do amostrador na geração de resultados precisos e confiáveis (BURNS; CIURCZAK, 2001). Diferentes tipos de amostradores são utilizados em equipamentos de espectrofotometria, apontados como os principais o de célula de quartzo e o de placa de vidro. As células de quartzo são amostradores amplamente utilizados nas análises espectrofotométricas. Essas peças são fabricadas a partir de quartzo com alto grau de pureza, que tem a característica de ser transparente na faixa do infravermelho próximo. Outra importante característica desses amostradores é que eles podem se diferenciar por distintos caminhos óticos, cada tipo construtivo com um objetivo de atender a aplicações específicas definidas pelas características das amostras.

3.2.4 Detector

O subconjunto responsável por converter a radiação NIR refletida ou transmitida por uma amostra em sinal mensurável é chamado de dispositivo detector (PAVIA *et al.*, 2010). Os detectores mais utilizados na instrumentação NIR por meio de espectrofotometria são os de silício, sendo eles do tipo fotomultiplicadores, fotodiodos e matrizes de fotodiodos. Esses dispositivos têm sensibilidade na faixa do infravermelho próximo e tem a capacidade de medir a intensidade da radiação em distintos comprimentos de onda.

Os fotomultiplicadores são sensores eletrônicos que tem a capacidade de amplificar sinais luminosos para, em seguida, converter em sinais elétricos. São mais sensíveis que os fotodiodos e apresentam uma melhor resolução do espectro infravermelho, além de ter grande utilidade em aplicações cuja necessidade é medir sinais de baixa intensidade. Já os fotodiodos são compostos essencialmente de semicondutores que são capazes de converter a radiação luminosa em corrente elétrica. As vantagens que justificam a frequente aplicação desses dispositivos são principalmente relacionadas ao baixo custo e a característica de uma boa resposta nas faixas de comprimento de onda do infravermelho próximo (BURNS *et al.*, 2008).

3.2.5 Sistema ótico

Os sistemas óticos em espectrofotômetro NIR têm função imprescindível na coleta e direcionamento da radiação infravermelha da fonte de luz do equipamento em direção da amostra e em direção do detector. Os principais dispositivos utilizados como sistemas óticos dos espectrofotômetros são os espelhos, lentes, fibras óticas e guias de onda (BURNS *et al.*, 2008).

Os espelhos são dispositivos que têm seu uso bastante difundido nos sistemas óticos de espectrofotômetros NIR. Eles são utilizados para direcionar os feixes de radiação tanto da fonte de luz até o amostrador, quanto no sentido inverso (PAVIA *et al.*, 2010).

Outro elemento utilizado nos sistemas óticos são as lentes. Elas têm a função de coletar e focalizar os feixes de luz do espectro desejado, direcionando até o dispositivo amostrador e o detector. Dois tipos de lentes são tipicamente utilizadas nessa aplicação. As divergentes são utilizadas com a intenção de espalhar a luz para determinadas aplicações, já as lentes convergentes têm a função de focalizar a radiação proveniente da fonte luminosa em direção do amostrador para coletar o sinal transmitido ou refletido (BURNS *et al.*, 2008).

Todos esses sistemas óticos apresentados têm por característica principal direcionar a radiação do espectro infravermelho próximo para o amostrador e para o detector. Essa aplicação é utilizada nas duas principais maneiras de analisar os compostos, sendo elas a partir da transmitância e da reflectância.

3.2.6 Gerenciamento eletrônico

O gerenciamento de todos os subsistemas citados anteriormente é realizado por meio de um sistema eletrônico composto de uma variedade de circuitos e interfaces, cada qual com suas funções específicas. Dentre os principais sistemas eletrônicos usados no controle dos espectrofotômetros estão o amplificador, conversores analógico-digitais, controladores digitais e a interface com o usuário (SOUZA, 2014). Os principais aspectos desses circuitos são detalhados a seguir.

Os circuitos amplificadores têm a função primária de amplificar os sinais elétricos provenientes do detector do espectrofotômetro NIR (BURNS *et al.*, 2008). Os amplificadores garantem um aumento no ganho do sinal de baixa amplitude do fotodiodo adequando para os circuitos de aquisição e processamento de sinal (MALVINO; BATES, 2016).

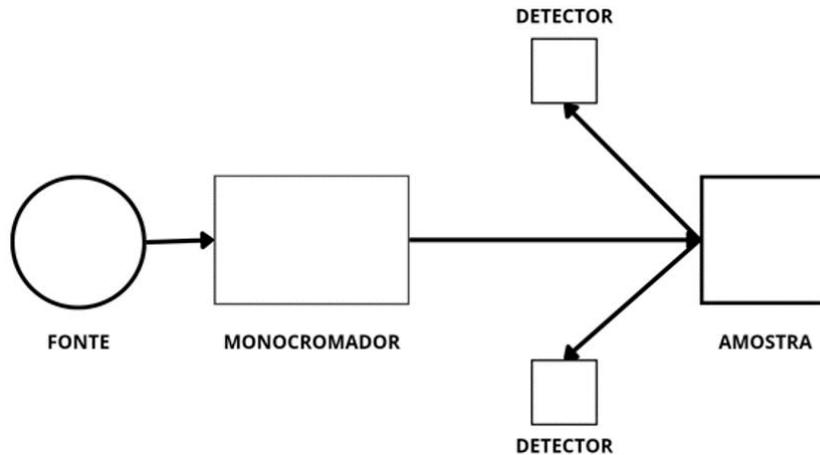
Uma vez que o sinal do detector é amplificado, outro circuito é fundamental para o funcionamento do espectrofotômetro NIR, o Conversor Analógico para Digital, do inglês *Analog to Digital Converter* (ADC). Esse circuito é responsável por converter os sinais amplificados que são sinais analógicos em sinais digitais, que serão mais facilmente processados e armazenados. Uma vez que o espectrofotômetro opera um número significativo de dados, esse processo é muito importante para o funcionamento pleno do equipamento (SOUZA, 2014).

3.2.7 Espectrofotômetros comerciais

Espectrofotômetros comerciais são instrumentos que vêm se difundindo em diversas áreas como pesquisas científicas e aplicações industriais. Esses instrumentos foram comercialmente convencionados em dois grupos, os espectrofotômetros de reflectância e os de trans-

mitância. Equipamentos projetados para medir a quantidade de radiação infravermelha refletida por uma amostra em diferentes comprimentos de onda dessa banda espectral são os chamados espectrofotômetros de refletância. Os aspectos construtivos se diferem basicamente em como os subsistemas fonte de radiação, seletor de espectro, amostrador e detector estão dispostos no espectrofotômetro. A Figura 2 apresenta a disposição básica em um espectrofotômetro NIR de refletância (BURNS; CIURCZAK, 2001).

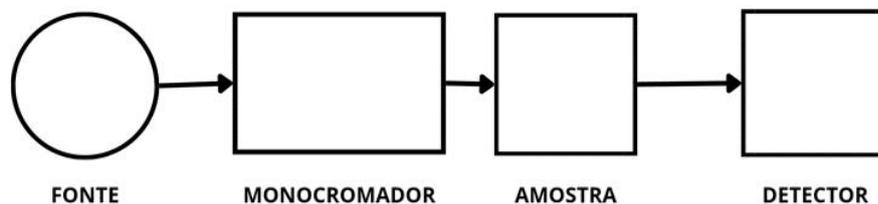
Figura 2 – Espectrofotômetro NIR de Refletância



Fonte: Adaptado de Burns e Ciurczak (2001).

Por outro lado, existem equipamentos projetados para medir a quantidade de radiação que é transmitida por uma amostra na faixa NIR. Esses equipamentos são chamados espectrofotômetros NIR de transmitância. As principais aplicações desses equipamentos estão ligadas à análise de materiais líquidos, gasosos ou transparentes, são amplamente empregados nas indústrias bioquímicas, farmacêuticas e ambiental. O esquema construtivo de um espectrofotômetro de transmitância é apresentado na Figura 3 (BURNS; CIURCZAK, 2001).

Figura 3 – Espectrofotômetro NIR de Transmitância



Fonte: Adaptado de Burns e Ciurczak (2001).

3.3 Aplicações para espectrofotometria NIR

Os princípios da técnica analítica do NIR foram expostos e disseminados no meio acadêmico após a divulgação dos trabalhos desenvolvidos por Karl Norris nos Estados Unidos (BENGERA; NORRIS, 1968; HART; NORRIS, 1965). Na atualidade o NIR é utilizado em diversas áreas, englobando a indústria alimentícia, farmacêutica, química, têxtil, combustíveis, papéis e materiais, sendo que a área de sua maior aplicação e relevância é a agricultura (TIBOLA *et al.*, 2018).

Ao empregar a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) na quantificação dos níveis de argila e matéria orgânica do solo, Santos, Perreira e Korndorfer (2010) também conseguiram identificar valores comparáveis aos obtidos por meio dos métodos químicos convencionais de análise. Além disso, obtiveram sucesso na determinação de nitrogênio e silício em tecidos foliares de cana-de-açúcar. Assim, esses autores afirmam que o uso de NIR em laboratórios de solos e de plantas tem grande aplicabilidade, uma vez que apresenta maior eficiência na execução dessas análises, quando comparado aos métodos químicos.

Marchao, Becquer e Brunet (2011) constataram que é viável utilizar espectroscopia NIR para analisar os teores totais de carbono e nitrogênio do solo. Tais autores acrescentam ainda que esse é um meio de trazer benefícios aos trabalhos realizados em laboratórios de análises de solo. Corroborando com esse resultado, Felix *et al.* (2016), por meio do uso do NIR, encontraram resultados satisfatórios de carbono orgânico, carbono total e nitrogênio total do solo.

É possível ainda usar o NIR como ferramenta para avaliar o comportamento espectral de solos, individualizando classes e diferenciando-os como jovens ou altamente intemperizados, a partir de resultados semelhantes aos atingidos por métodos convencionais (RIZZO; DEMATTE; LACERDA, 2015).

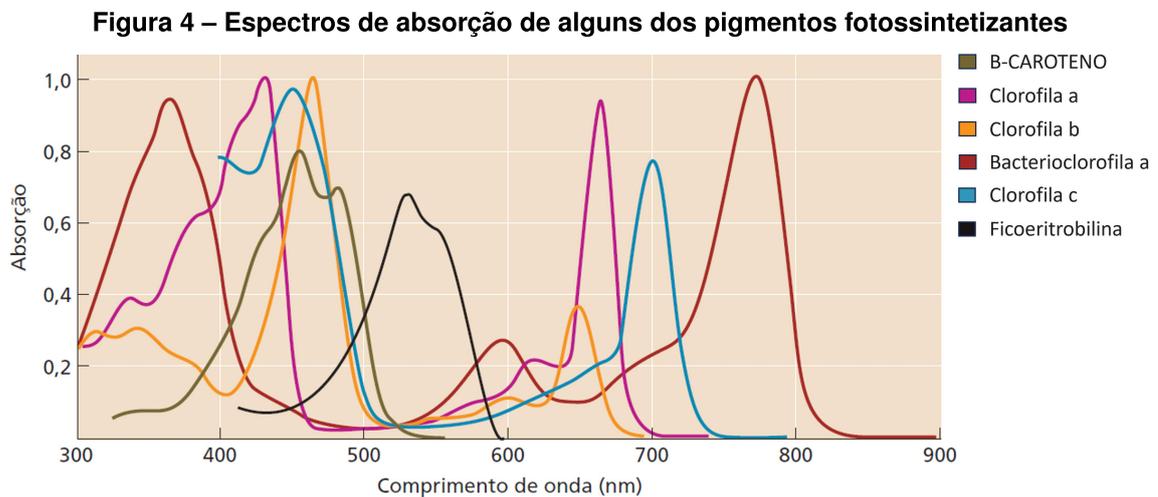
Ferraresi *et al.* (2012) afirma que a aplicação do NIR para determinar classes de solo traz vantagens se comparado ao uso do método convencional, sendo elas a rapidez, o preparo de amostras reduzido, a possibilidade de automação do processo e maior efetividade já que permite analisar um maior número de amostras por dia.

Bedin *et al.* (2021) avaliou com o NIR a cama de aviário a fim de fomentar o uso desse adubo orgânico com dimensionamento correto. A análise pelo NIR conseguiu gerar bons modelos de quantificação de nitrogênio e carbono, e distinguir a presença de altas e baixas concentrações de fósforo e potássio. Dessa maneira, os autores afirmam que esse método pode ser viável ambientalmente e economicamente quando aplicado na caracterização de amostras de cama de aviário.

3.4 Análise de clorofila a partir do espectro

3.4.1 Aspectos físico-químicos da clorofila

A clorofila é um dos principais fatores influentes no crescimento e adaptabilidade a diversos ambientes para as plantas (ENGEL; POGGIANI, 1991). Essa substância, que é encontrada nas folhas, constitui parte fundamental do processo energético de fotossíntese das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2017). Os diferentes tipos de clorofila diferem tanto na quantidade presente nas plantas, quanto na reação frente ao espectro eletromagnético. A Figura 4 apresenta os níveis de absorção de diferentes pigmentos fotossintetizantes, dentre eles algumas clorofilas. São identificados 10 tipos de clorofila, dentre essas, apenas dois tipos são encontradas em quantidades significativas, são elas a clorofila A e a clorofila B (SOAREZ, 2006).



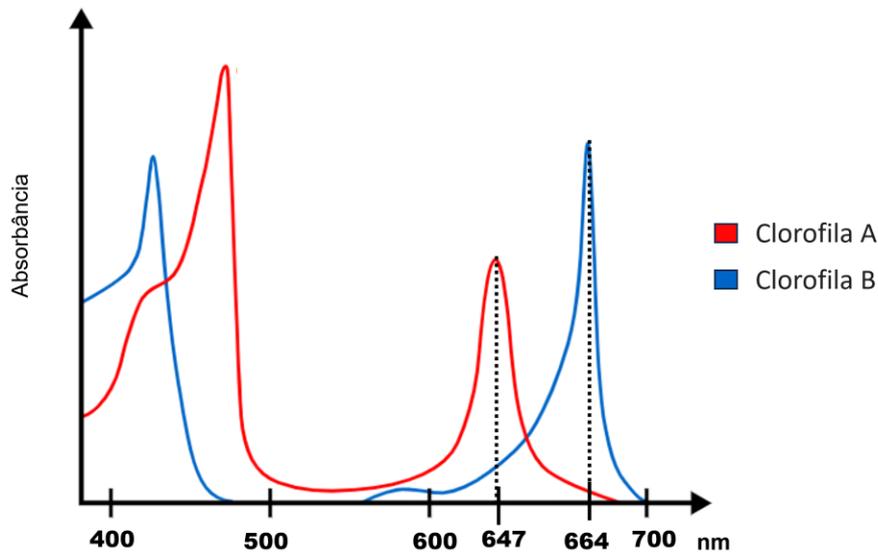
Fonte: Taiz e Zeiger (2017).

O espectro de absorção fornece informações sobre a quantidade de energia luminosa absorvida por uma molécula em função do comprimento de onda do espectro. A clorofila, assim como outras substâncias são capazes de absorver em faixas específicas do espectro eletromagnético emitido pelo sol, sendo assim ela absorve luz, principalmente nas faixas vermelha e azul do espectro visível, e por não absorver na faixa verde do espectro visível, adquire coloração verde (TAIZ; ZEIGER, 2017).

O espectro de absorção para a clorofila A apresenta maior absorção entre 400 e 450 *nm*. Já a clorofila B apresenta pico de absorção na faixa entre 450 e 480 *nm* (GROSS, 2012). A Figura 5 apresenta os espectros de absorção das clorofilas A e B.

Além das duas faixas principais citadas anteriormente em que as clorofilas A e B possuem alta taxa de absorção, existem ainda duas faixas em que elas apresentam outro pico (menor) de absorção, sendo aproximadamente em 647 *nm* para a clorofila B e 664 *nm* para a clorofila A (BORRMANN, 2009).

Figura 5 – Espectros de absorção para clorofilas A (curva amarela) e B (curva azul)



Fonte: Adaptado de Borrmann (2009).

3.4.2 Métodos de análise de concentração de clorofila

Os métodos para análise de concentração de clorofila em uma amostra podem ser realizados por meio de métodos destrutivos (inutilizam a amostra) e métodos não destrutivos (conservam a amostra). A vantagem dos métodos destrutivos é principalmente a precisão de seus resultados. No entanto, são análises que demandam um tempo maior e implicam em um custo elevado (JESUS; MARENCO, 2008). Já os métodos não destrutivos, como a espectrofotometria das folhas por exemplo, tornam o processo mais ágil, menos custoso e conservando as amostras e plantas. Esse processo porém, apresenta seu resultado em forma de índice relativo de clorofila, também chamado de Índice de Conteúdo de Clorofila, do inglês *Chlorophyll Content Index* (CCI) (RICHARDSON; DUIGAN; BERLYN, 2002).

O CCI, que determina a quantidade relativa de clorofila presente na amostra, utiliza valores de absorbância e transmitância através da amostra. A Equação 1 descreve a equação geral para o cálculo do CCI (DANH *et al.*, 2021),

$$CCI = \frac{\%T(\lambda_n)}{\%T_{\lambda_n \text{ absorvido}}}, \quad (1)$$

em que $\%T(\lambda_n)$ é a transmitância percentual para o comprimento de onda n , $\%T_{\lambda_n \text{ absorvido}}$ é a transmitância percentual para o comprimento de onda absorvido e $\lambda_n \text{ absorvido}$ é o comprimento de onda.

3.4.3 Equipamentos comerciais

Os dois principais equipamentos comerciais encontrados que realizam análises não destrutivas apresentam suas respostas de forma adimensional. Utilizando o chamado de índice de clorofila.

O equipamento ClorofiLOG CFL1030, da fabricante brasileira Falker, utiliza a resposta chamada Índice de Clorofila Falker (ICF). Esse equipamento é um medidor óptico eletrônico que utiliza a interação da luz com a clorofila presente nas folhas a fim de analisar a quantidade de clorofila. Utilizando três faixas do espectro, ele busca quantificar a presença da clorofila tipo A e tipo B (FALKER, 2018). O ClorofiLog realiza varredura nas faixas de 635 nm e 660 nm próximos aos picos de absorção das clorofilas A e B, e a faixa 880 nm para a não absorção (JUNIOR *et al.*, 2012)

Outro equipamento utilizado em análises não destrutivas do teor de clorofila é o equipamento SPAD-502 da empresa japonesa Minolta. Esse dispositivo utiliza a análise em apenas duas faixas do espectro, tendo maior influência da clorofila tipo A em suas leitura (MINOLTA, 2013). Relacionando as transmissões de luz em 650 nm , em que ocorre a absorção pela clorofila A, e o comprimento de 940 nm no qual a molécula não absorve. O dispositivo apresenta sua resposta em índice Desenvolvimento de Análise de Plantas de Solo, do inglês *Soil Plant Analysis Development* (SPAD), que também é adimensional e proporcional a quantidade de clorofila presente na folha (GIL *et al.*, 2002).

3.5 Considerações finais

A técnica da espectrofotometria é um importante método não destrutivo para análises qualitativas e quantitativas em variadas aplicações industriais e agrárias, tendo como uma importante utilização a análise do teor de clorofila. A realização desses ensaios exige um espectrofotômetro adequado a leitura das faixas de transmitância para esse composto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os detalhes dos componentes utilizados no projeto, bem como os métodos adotados no seu desenvolvimento e na validação do instrumento. Por meio dessa seção, busca-se fornecer uma visão abrangente sobre as etapas e recursos envolvidos no desenvolvimento do espectrofotômetro NIR.

Inicialmente, são descritos os subsistemas essenciais do espectrofotômetro NIR, tais como a fonte de luz, amostrador, detector e sistema de controle. São apresentadas as características técnicas de cada componente, bem como as justificativas para a escolha deles. Além disso, os fornecedores são mencionados, com o intuito de garantir a rastreabilidade e a disponibilidade desses recursos.

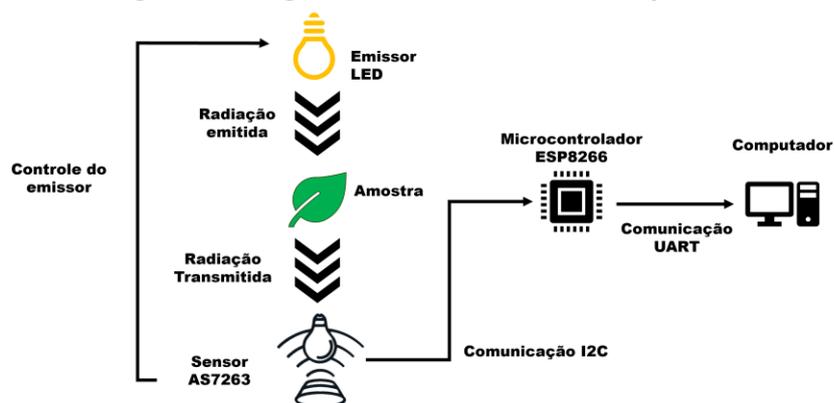
Na sequência, é detalhada a metodologia empregada na construção do protótipo de espectrofotômetro NIR. São descritos os caminhos utilizados para a montagem do protótipo, abordando os procedimentos utilizados na integração dos componentes bem como sua disposição física no equipamento. São apresentadas ferramentas específicas empregadas durante o processo de construção. O *software* embarcado, tem seu desenvolvimento explanado, desde a programação em microcontrolador até a implementação das funcionalidades do instrumento.

Por fim, são discutidas as etapas de validação do instrumento, bem como os experimentos realizados para avaliar sua precisão e desempenho. Outro ponto a ser abordado são os métodos implementados a fim de comparar as medições obtidas com referências conhecidas.

4.1 Materiais

O espectrofotômetro NIR desenvolvido possui como subsistemas implementados a fonte de radiação, o amostrador, o sistema detector e o sistema de controle.

Figura 6 – Diagrama de subsistemas do dispositivo



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos do dispositivo desenvolvido, desde o elemento LED emissor que representa a fonte de radiação que é emitida através da amostra. Esta

radiação é mensurada no elemento detector representado pelo sensor AS7263, que controla o emissor e transmite os dados de leitura ao controlador (ESP8266) via comunicação I2C. O controlador realiza todo o gerenciamento dos disparos de leitura e da obtenção de dados, enviando-os até o computador para análise através do protocolo de comunicação chamado de Recepção e Transmissão Assíncrona Universal, do inglês *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART). Esses subsistemas bem como suas especificações técnicas serão abordados na sequência.

4.1.1 Sensor multiespectral

O elemento considerado central no desenvolvimento desse projeto é o módulo AS7263, que é um sensor multiespectral de seis canais para detecção na faixa espectral do infravermelho próximo. Esse sensor ótico é desenvolvido pela empresa alemã ams-OSRAM. Ele possui seis filtros óticos independentes cuja resposta espectral é contida nos comprimentos de onda NIR, sendo que os comprimentos de onda dos seis canais compreendem, respectivamente, os valores apresentados no Quadro 2 e Figura 7. Cada canal tem um valor de Meia Largura Total, do inglês *Full-Width Half-Max* (FWHM) que é o valor da largura banda a meia altura da onda de 20 nm. O *chip* integra filtros Gaussianos de padrão silício e tem como característica construtiva a de filtro de interferência nano-ótica depositada, garantindo confiabilidade ao componente (AMS, 2021).

Quadro 2 – Filtros Sensor AS7263

Simbolo	Parâmetros	Comprimento (nm)
R	Canal R	610
S	Canal S	680
T	Canal T	730
U	Canal U	760
V	Canal V	810
W	Canal W	860

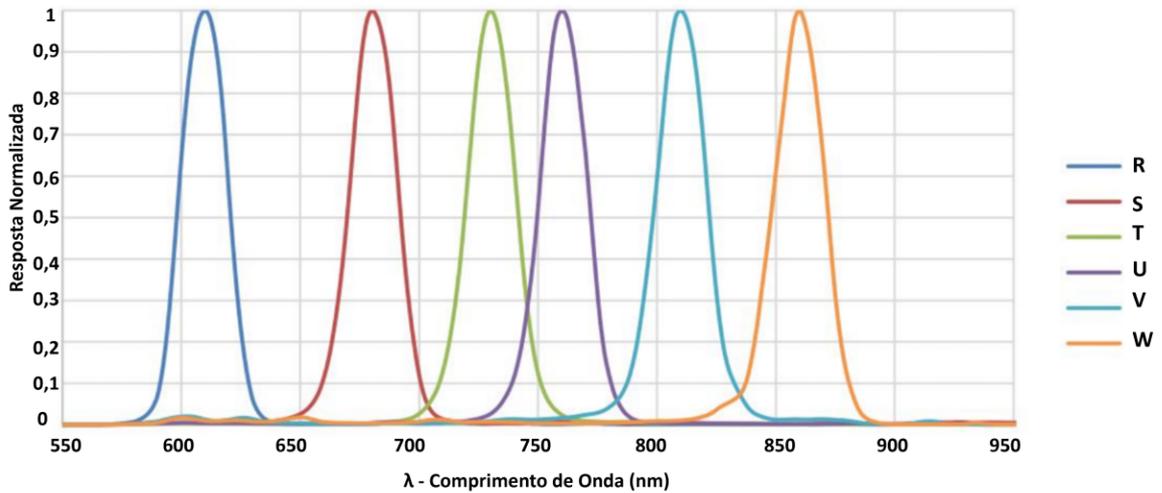
Fonte: Adaptado de AMS (2021).

Outra característica importante do dispositivo AS7263 é que possui um *driver* de LED integrado com corrente programável, possibilitando aplicações de obturação eletrônica. O controle e acesso aos dados pode ser implementado via comunicação I2C ou via UART serial. A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos do sensor, onde é possível identificar as principais conexões e subsistemas embarcados no chip.

A seguir são apresentadas as principais características construtivas do módulo AS7263, bem como os parâmetros estabelecidos pelo fabricante, sendo essas informações importantes na escolha deste elemento como parte do equipamento desenvolvido.

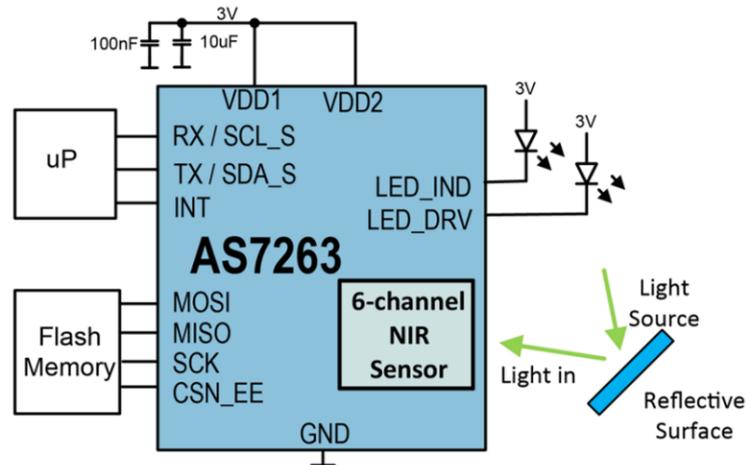
Os valores máximos admitidos foram considerados na implementação desse módulo ao equipamento. Os valores foram determinados pelo fabricante mediante ensaios e são apresen-

Figura 7 – Responsividade Espectral do AS7263



Fonte: Adaptado de AMS (2021).

Figura 8 – Diagrama de Blocos AS7263



Fonte: AMS (2021).

tados no Quadro 3. As recomendações ainda ressaltam que tensões além das classificadas como máximas absolutas podem causar danos permanentes ao equipamento e a exposição aos níveis máximos por longos períodos afeta diretamente a confiabilidade do sensor. Outro alerta é de que o dispositivo não deve ser exposto a radiação Ultra Violeta (UV) de alta energia.

O *Spectral ID* AS7263 tem como características construtivas, um filtro Gaussiano em cada um dos 6 canais que são espaçados com intervalos aproximados de 50 nm , divididos entre os canais R, S, T, U, V e W, já listados no Quadro 2. O Sensor possui conversores ADC com resolução de 16 bits , que integram as correntes dos fotodiodo que correspondem a cada um dos canais. Após a conclusão do ciclo de conversão, por padrão, os resultados são transferidos para os registradores de dados correspondentes. O processo utiliza transferências de *buffer* duplo, a fim de garantir a integridade dos dados.

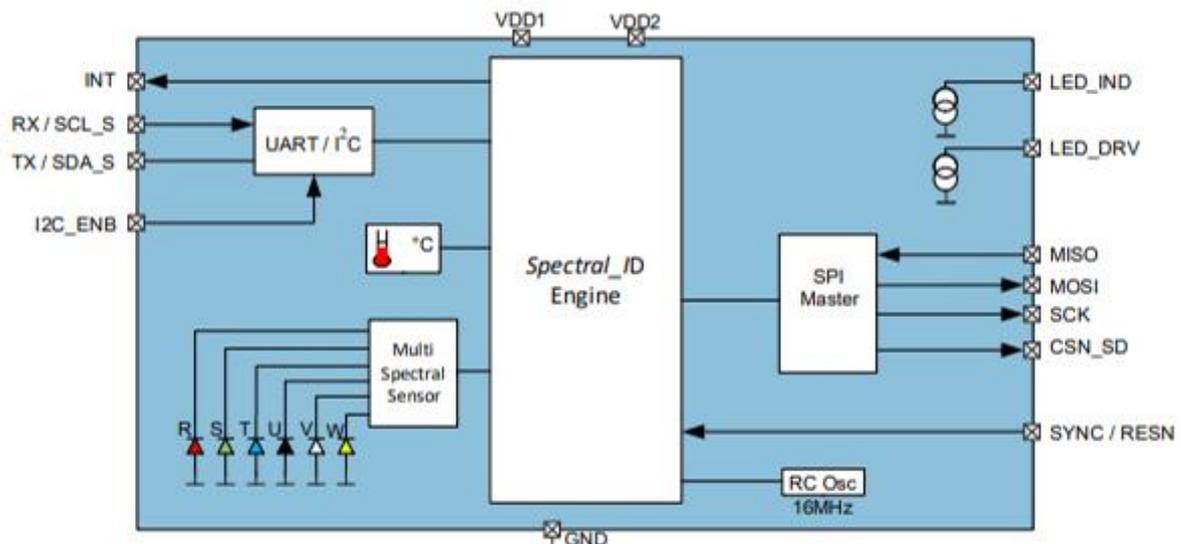
Quadro 3 – Classificação máxima absoluta e condições gerais de operação

Símbolo	Parâmetro	Condições	Min	Tip	Max	Unidade
V_{DD1}/V_{DD2}	Operação da fonte de tensão	Interface UART	2,97	3,3	3,6	V
V_{DD1}/V_{DD2}	Operação da fonte de tensão	Interface I2C	2,7	3,3	3,6	V
T_{amb}	Temperatura de operação		-40	25	85	°C
I_{vdd}	Corrente de operação				5	mA
$I_{standby}$	Corrente de <i>standby</i>			12		μA
f_{osc}	Frequência do oscilador interno RC		15,7	16	16,3	MHz
t_{jitter}	<i>Jitter</i> do <i>clock</i> interno	@25°C			1,2	ns
D_{temp}	Precisão da temperatura medição		-8,5		8,5	°C
I_{ind}	Corrente LED indicador		1	4	8	mA
I_{acc}	Precisão da corrente LED indicador		-10		10	%
V_{led}	Faixa de tensão do LED conectado	V_{ds}	0,3		V_{DD}	V
I_{LED1}	Corrente <i>driver</i> LED	12,5; 25; 50 ou 100	12,5		100	mA
I_{acc}	Precisão da corrente <i>driver</i> LED		-10		10	%
V_{led}	Faixa de tensão do <i>driver</i> LED	V_{ds}	0,3		V_{DD}	V

Fonte: Adaptado de AMS (2021).

Os filtros de interferência implementados permitem manter a estabilidade, mesmo em alta temperatura e eliminar os desvios ao longo da vida útil do equipamento. Outra característica importante para garantir precisão nas leituras dos filtros é o ângulo de incidência que deve se manter na faixa de -20° a $+20^\circ$, garantindo assim a precisão especificada. A Figura 9 apresenta o diagrama de blocos interno do sensor, apresentando os fotodiodos, sensor multiespectral, sensor de temperatura, interfaces de comunicação e os *drivers* de LED.

Figura 9 – Diagrama de blocos interno



Fonte: AMS (2021).

A conversão dos dados no AS7263 é implementada por meio de dois bancos de fotodiodos por dispositivo. O primeiro banco é responsável pelos dados dos fotodiodos S, T, U, V. Já o segundo banco é responsável pelos dados de R, T, U, W. A Conversão necessita de um tempo

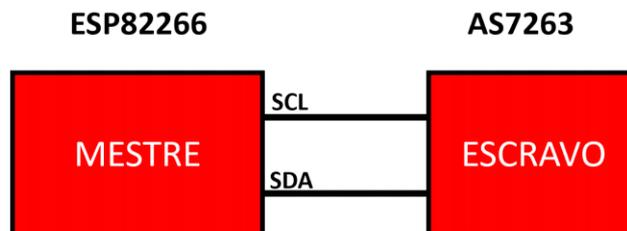
chamado de Integração Temporal (IT) em escala de milissegundos (*ms*), até sua conclusão. Se ambos os bancos necessitarem da conversão, o segundo banco exige IT adicional. Quanto aos valores de IT, para uma única conversão de banco é necessário $2,8\text{ ms}$, sendo assim, uma conversão completa envolvendo todos os elementos de filtro, o tempo total de conversão equivale a duas vezes o IT.

O módulo AS7263 possui ainda alguns sistemas secundários ampliam a gama de aplicações para esse dispositivo. Um oscilador RC de 16 MHz , fornecendo o *master clock* ao sistema, um sensor de temperatura do *chip*, LED indicador de operação e duas saídas de *driver* para LEDs. Esses sistemas são responsáveis pelo funcionamento pleno do dispositivo, assegurando leituras mais precisas e confiáveis.

A configuração do pino I2C_ENB permite realizar a interface e o controle do sensor AS7263 por meio de uma interface escrava compatível com comunicação por I2C, acessando um conjunto de registradores que fornecem controle do dispositivo e dados de saída. No AS7263, esses registradores são implementados como registradores em *software* e são apresentados no Quadro 4. As etapas necessárias para acessar os registros virtuais são explicadas em pseudocódigo para gravação pelo mestre I2C, apresentado na listagem 2. O pseudocódigo ilustra a técnica correta de consulta do registro de *status* do escravo I2C para garantir que o escravo esteja pronto para cada transação (AMS, 2021).

O I2C é um protocolo amplamente difundido entre vários setores de engenharia como *hardware* e *firmware*, sua aplicação é extensiva e em diferentes segmentos que vão desde pequenos projetos até projetos avançados como foguetes e satélites (CARVALHO, 2016). Sendo o protocolo mais empregado em sistemas de comunicação entre dispositivos (mestre e escravo) (INSTRUMENTS, 2015). A conexão entre um dispositivo mestre um escravo para o dispositivo desenvolvido é apresentado na Figura 10. A principal vantagem desse sistema de comunicação entre periféricos frente a outros sistemas, é a utilização de apenas dois cabos que saem do processador e se conectam a todos os periféricos do sistema.

Figura 10 – Dispositivos mestre e escravos em barramento I2C



Fonte: Adaptado de Instruments (2015).

O barramento I2C é uma interface bidirecional de comunicação que utiliza um controlador, que é chamado de mestre, para comunicar com outros dispositivos chamados de escravos. Um escravo não pode transmitir dados no I2C, a menos que ele tenha sido endereçado pelo mestre. Cada dispositivo no I2C possui um endereço de dispositivo específico para diferenciá-lo dos outros dispositivos que estão conectados ao mesmo barramento (INSTRUMENTS, 2015).

Fisicamente, a interface I2C é composta por dois cabos, chamados Dados Seriais, do Inglês *Serial Data* (SDA) e Relógio Serial, do Inglês *Serial Clock* (SCL). Tanto a linha SDA quanto a linha SCL devem ser conectadas ao VCC por meio de um resistor *pull-up*. O valor do resistor *pull-up* é determinado pela quantidade de capacitância presente nas linhas I2C. A transferência de dados somente pode ser iniciada quando o barramento estiver ocioso. A definição de barramento ocioso é quando ambas as linhas estão em sinal alto após uma condição de *stop* (INSTRUMENTS, 2015).

Os dados são transferidos entre os dispositivos escravos por meio de operações de leitura ou escrita nos registradores do dispositivo escravo. Os registradores são áreas de memória localizadas no dispositivo escravo, nas quais são armazenadas informações, como configurações ou dados amostrados para serem enviados ao mestre. O mestre deve escrever informações nos registradores para instruir o dispositivo escravo a realizar uma determinada tarefa (INSTRUMENTS, 2015).

O código da Listagem 1 apresenta os passos necessários para realizar a escrita de registros no AS7263. O pseudocódigo ilustra a técnica correta de consulta do registro de *status* do escravo I2C para garantir que o escravo esteja pronto para cada transação, já pseudocódigo com os passos necessários para a leitura dos registradores no AS7263, é apresentado na Listagem 2 (AMS, 2021).

Os registradores do AS7263 para comunicação I2C são apresentados no Quadro 4. Os dados de registro são expressos em formato hexadecimal ou, quando indicado, em ponto flutuante de *32 bits*. Esses parâmetros foram utilizados na configuração da comunicação entre o sensor e o controlador, bem como, nos processos de leitura e escrita de dados do dispositivo.

Quadro 4 – Registradores do Sensor AS7263

Endereço	Nome	Função
0x04	Control_Setup	RST-INT-GAIN-BANK-DATA_RDY-RSVD
0x05	INT_T	tempo de integração
0x06	Device_Temp	Temperatura do Dispositivo
0x07	LED_Control	Temperatura do Dispositivo
0x08	R_high	Byte Alto Canal R
0x09	R_low	Byte Baixo Canal R
0x0A	S_high	Byte Alto Canal S
0x0B	S_low	Byte Baixo Canal S
0x0C	T_high	Byte Alto Canal T
0x0D	T_low	Byte Baixo Canal T
0x0E	U_high	Byte Alto Canal U
0x0F	U_low	Byte Baixo Canal U
0x10	V_high	Byte Alto Canal V
0x11	V_low	Byte Baixo Canal V
0x12	W_high	Byte Alto Canal W
0x13	W_low	Byte Baixo Canal W

Fonte: Adaptado de AMS (2021).

Listagem 1 – Pseudocódigo de Escrita I2C no AS7263

```

1  #define I2C_AS72XX_SLAVE_STATUS_REG0x00
2  #define I2C_AS72XX_SLAVE_WRITE_REG0x01
3  #define I2C_AS72XX_SLAVE_READ_REG0x02
4  #define I2C_AS72XX_SLAVE_TX_VALID0x02
5  #define I2C_AS72XX_SLAVE_RX_VALID0x01
6  void i2cm_AS72xx_write(uint8_t virtualReg , uint8_t d)
7  {
8  volatile uint8_tstatus;
9  while (1)
10 {
11 // Read slave I2C status to see if the write buffer is ready.
12 status = i2cm_read(I2C_AS72XX_SLAVE_STATUS_REG);
13 if ((status & I2C_AS72XX_SLAVE_TX_VALID) == 0)
14 // No inbound TX pending at slave. Okay to write now.
15 break ;
16 }
17 // Send the virtual register address.
18 i2cm_write(I2C_AS72XX_SLAVE_WRITE_REG, (virtualReg | 0x80)) ;
19 while (1)
20 {
21 // Read the slave I2C status to see if the write buffer is ready.
22 status = i2cm_read(I2C_AS72XX_SLAVE_STATUS_REG) ;
23 if ((status & I2C_AS72XX_SLAVE_TX_VALID) == 0)
24 // No inbound TX pending at slave. Okay to write data now.
25 break ;
26 }
27 // Send the data to complete the operation.
28 i2cm_write(I2C_AS72XX_SLAVE_WRITE_REG, d);
29 }

```

Fonte: Adaptado de AMS (2021).

4.1.2 Controlador

O controlador é o responsável por gerenciar o controlar todas as operações e funções do dispositivo, sendo constituído de um microcontrolador que atua comandando e coordenando as operações de emissão e leitura dos dados. Sua função é executar os algoritmos desenvolvidos a fim de controlar o sensor AS7263, gerenciando a emissão de radiação e processando os sinais capturados pelo detector. O controlador ainda é responsável por realizar a comunicação com o dispositivo de interface do usuário.

O microcontrolador escolhido para realizar o papel de controlador do sistema foi o ESP8266 da fabricante chinesa Espressif Systems®. O ESP8266 é um microcontrolador que é considerado completo. Ele integra interruptores de antena, amplificadores de potência de baixo ruído, filtros e módulos de gerenciamento de energia, entre outros. O tamanho desse *chipset* compacto minimiza os circuitos externos, tornando-o uma boa escolha na aplicação do pro-

Listagem 2 – Pseudocódigo de Leitura I2C no AS7263

```

1 uint8_t i2cm_AS72xx_read(uint8_t virtualReg)
2 {
3     volatile uint8_t status, d ;
4     while (1)
5     {
6         // Read slave I2C status to see if the read buffer is ready.
7         status = i2cm_read(I2C_AS72XX_SLAVE_STATUS_REG) ;
8         if ((status & I2C_AS72XX_SLAVE_TX_VALID) == 0)
9             // No inbound TX pending at slave. Okay to write now.
10            break ;
11    }
12    // Send the virtual register address.
13    i2cm_write(I2C_AS72XX_SLAVE_WRITE_REG, virtualReg) ;
14    while (1)
15    {
16        // Read the slave I2C status to see if our read data is available.
17        status = i2cm_read(I2C_AS72XX_SLAVE_STATUS_REG) ;
18        if ((status & I2C_AS72XX_SLAVE_RX_VALID) != 0)
19            // Read data is ready.
20            break ;
21    }
22    // Read the data to complete the operation.
23    d = i2cm_read(I2C_AS72XX_SLAVE_READ_REG) ;
24    return d ;
25 }

```

Fonte: Adaptado de AMS (2021).

jeto. As características de *hardware* são descritas no Quadro 5. A seguir são descritas algumas características desse dispositivo.

O Unidade Central de Processamento, do inglês *Central Processing Unity* (CPU) que integra o microcontrolador é o processador L106 RISC de 32 bits da fabricante Tensilica®, desenvolvido ára ter um baixo consumo de energia e pode funcionar com um *clock* de 160 *MHz*. A arquitetura do ESP8266 inclui dezessete Portas de Entrada/Saída de Uso Geral, do inglês *General Purpose Input/Output* (GPIO), que podem receber diversas atribuições por programação dos registradores. As portas podem ser configuradas com resistores de *pull-up* e *pull-down* interno, entradas (armazenamento em registradores de software), interrupções por gatilho de borda. Esses pinos podem ainda ser multiplexados com funções como I2C, I2S, UART, PWM e IR-RC (SYSTEMS, 2020).

A comunicação I2C desse microcontrolador pode ser configurada via programação de *software* e utilizada para conectar outros microcontroladores e periféricos como sensores. Os pinos de comunicação I2C são o pino 9 como o SCL e o pino 14 como o SDA do I2C. As funções de mestre e de escravo são suportadas pelo microcontrolador podendo ser programada no *software* com uma frequência máxima de *clock* de 100 *kHz* (SYSTEMS, 2020).

A opção de utilizar o microcontrolador ESP8266 como sistema de controle do espectrofotômetro NIR foi baseada principalmente na disponibilidade e familiaridade com o microcontrolador. Além disso as características como: comunicação I2C, o baixo custo desse dispositivo frente a dispositivos similares, sua capacidade de processamento e armazenamento que supriram a necessidade da aplicação aliado a um baixo consumo energético e a compatibilidade com diversos Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês *Integrated Development Environment* (IDE).

Quadro 5 – Características de *hardware* ESP8266

Itens	Parâmetros
CPU	Tensilica L106 com processador 32-bit
Interfaces 1	UART, SDIO, SPI, I2C, I2S, IR-RC
Interfaces 2	GPIO, ADC, PWM, LED, Botão
Tensão de Operação	2,5V - 3,6V
Corrente de Operação	valor médio: 80 mA
Temperatura de Operação	-40°C - 125°C
Encapsulamento	QFN32-pin (5mm x 5mm)

Fonte: Adaptado de Systems (2020).

4.1.3 Elemento estrutural do protótipo

A estrutura do equipamento é um ponto importante do projeto, uma vez que ela é responsável por unir os elementos do sistema de controle e o sensor, bem como posicionar o emissor de ondas, o amostrador e o detector. Como o projeto une distintos elementos para formar o instrumento espectrofotômetro NIR, a necessidade de uma personalização da estrutura foi necessária. Para tal, optou-se pela utilização do método de impressão 3D para a confecção da estrutura. A impressão 3D é um método construtivo que apresenta uma série de vantagens, como a flexibilidade e personalização no projeto estrutural, permitindo a adequação dos componentes, sem demandar de uma técnica trabalhosa de execução do projeto mecânico. Essa técnica permite uma rápida prototipagem estrutural, permitindo o teste de diversas iterações até que se chegue ao melhor *design*, como no caso do espectrofotômetro, adaptando o projeto aos melhores posicionamentos dos elementos no equipamento. Apesar das vantagens, devemos considerar que estruturas construídas em impressora 3D a possuem limitações relativas à resistência mecânica e a durabilidade dos materiais utilizados. Essas características foram avaliadas e não foram identificadas como problemáticas, uma vez que, o objetivo é de desenvolver um protótipo de espectrofotômetro.

4.1.4 Amostrador

O elemento amostrador é um componente que suporta e posiciona a amostra a ser analisada, esse elemento é crucial para a obtenção de resultados precisos e confiáveis na análise

espectrofotométrica. Geralmente o amostrador é constituído de um reservatório estilo cubeta, que permite a passagem da radiação até a amostra, permitindo assim a emissão desejada de radiação ao objeto e a leitura dos parâmetros. O amostrador varia seu tamanho, forma e constituição de acordo com os requisitos do projeto do espectrofotômetro e de acordo com a aplicação específica. Alguns espectrofotômetros possuem amostradores de cubeta única enquanto outros modelos possuem múltiplas cubetas, o que permite a análise múltipla de amostras. Na aplicação escolhida, o amostrador é caracterizado pela abertura entre o emissor e o sensor, no qual a folha é inserida e posicionada.

4.2 Desenvolvimento do protótipo

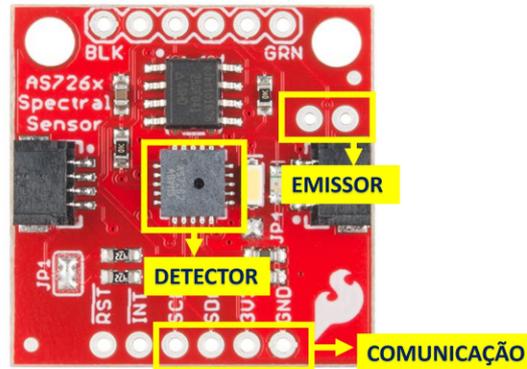
O protótipo de *hardware* para o espectrofotômetro NIR foi desenvolvido a fim de integrar todos os sistemas necessários para o pleno funcionamento do dispositivo, os sistemas que integram o *hardware* são o sistema emissor, amostrador, detector, sistema de controle, sistema de comunicação e estrutura do aparelho. Esses sistemas terão o seu projeto e desenvolvimento detalhados na sequência.

4.2.1 Sistemas emissor, amostrador e detector

O desenvolvimento do sistema emissor de espectro foi realizado integrando um LED da cor branca de alto brilho, integrado ao sistema de disparo embarcado do módulo AS7263 (conforme apresentado na Figura 11), desenvolvido pela empresa Sparkfun, sendo assim o controlador opera a emissão conforme comando registrado no *software*. O amostrador no sistema é representado pela fenda na qual se introduz a amostra para que ela seja atravessada pela luz do emissor e atinja o sensor com um ângulo próximo a 0° . Já o sistema detector é o conjunto de sensores óticos do AS7263 que recebe a radiação que atravessa a amostra e envia os dados das leituras até o sistema de controle.

O controle do sistema foi implementado através do microcontrolador ESP8266, no módulo de desenvolvimento nodeMCU da fabricante Lolin. Esse sistema é o responsável por se comunicar com o sensor AS7263 através do protocolo de comunicação I2C (conforme conexão apresentada na Figura 12), sendo que o microcontrolador é o mestre e o sensor é o escravo desse sistema. As interações do microcontrolador (sistema de controle) com o sensor AS7263 (sistema emissor e detector) são as responsáveis por configurar os diversos registradores e as diversas funções do dispositivo. No início de toda análise foram setadas variáveis iniciais do sistema como a inicialização dos sensores óticos, inicialização do LED emissor do módulo, tempo de integração das leituras e a calibração do sensor. As interações de controle para a leitura da análise também foram realizadas pelo controlador configurando o início do disparo do LED

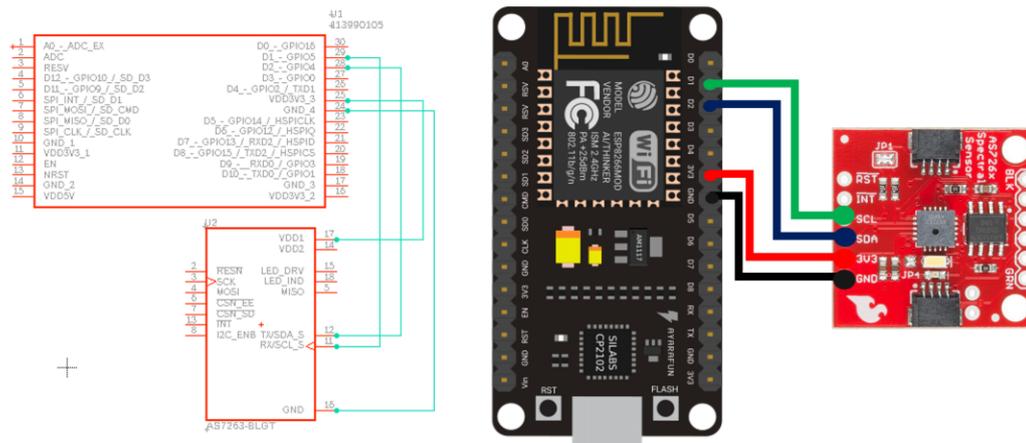
Figura 11 – Subsistemas no módulo do sensor AS7263



Fonte: Autoria própria (2023).

emissor, início das leituras e gravação dos dados nos registradores e, por fim, envio desses dados ao microcontrolador via I2C.

Figura 12 – Diagrama e representação de conexão



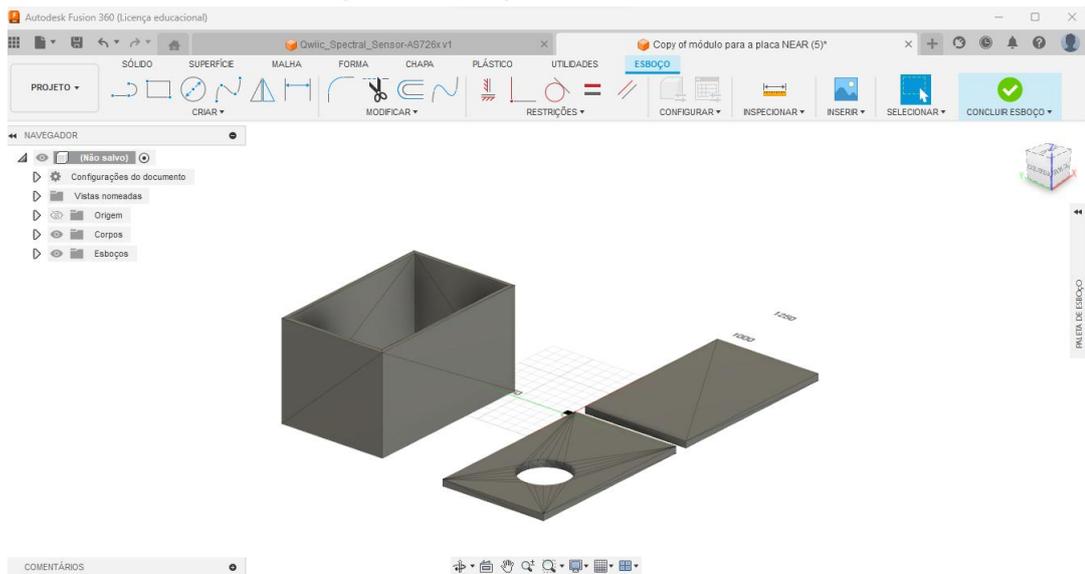
Fonte: Autoria própria (2023).

O controlador ainda é responsável pela interação do espectrofotômetro com o computador que realizava a gravação do *software* no microcontrolador e posteriormente realizava o controle das ações e transmissão de dados via comunicação UART.

O processo de impressão 3D consiste em depositar filamentos de material plástico camada sobre camada a fim de formar o objeto projetado. Alguns minutos após a finalização do processo de impressão o objeto já pode ser utilizado. Segundo Azevedo (2013), os custos de fabricação de uma estrutura impressa em 3D são reduzidos para a fabricação de protótipos quando comparado a métodos de fabricação tradicionais, uma vez que não exigem a criação de moldes ou usinagem de material, por exemplo. Esse método de fabricação começa a se tornar uma desvantagem quando a finalidade é fabricação em grande volume, nesse caso, a fabricação via extrusão plástica torna o custo final vantajoso.

O projeto desse espectrofotômetro levou em consideração as dimensões de todo o conjunto eletrônico, a abertura e posição do amostrador em relação ao sistema emissor e ao sistema detector alinhando os três subsistemas. O projeto da estrutura foi realizado no *software* Fusion 360®, da empresa Autodesk®, levando em conta todas as dimensões dos subconjuntos e o posicionamento deles. A Figura 13 apresenta o projeto estrutural 3D desenvolvido no *software* Fusion 360.

Figura 13 – Projeto 3D em *Fusion 360*



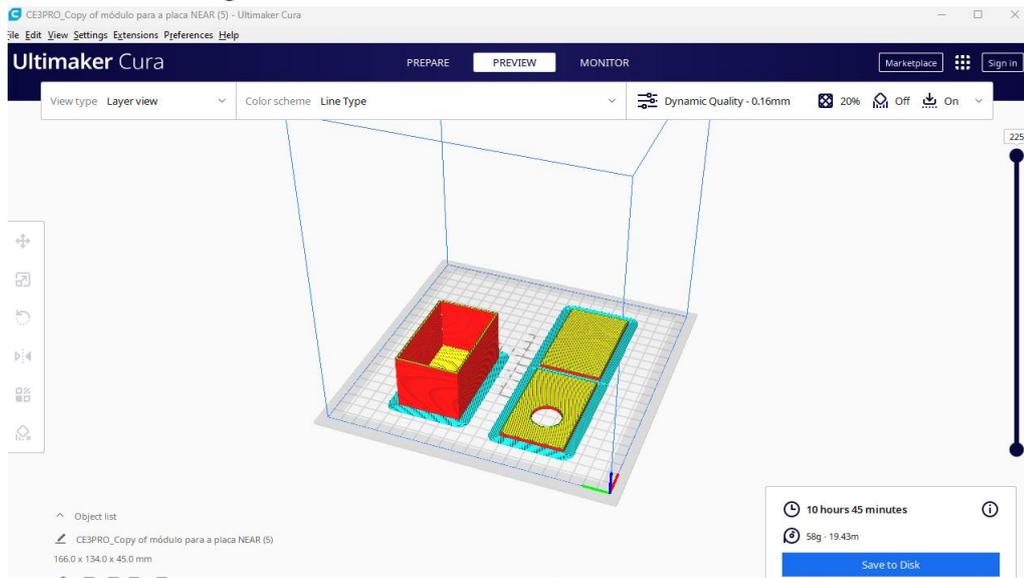
Fonte: Autoria própria (2023).

Após o projeto 3D ser desenvolvido, foi utilizado o programa *Ultimaker Cura* para fatiar o objeto em várias camadas (conforme Figura 14) e gerar as instruções de coordenadas para a impressora 3D. A impressão 3D da estrutura do protótipo de espectrofotômetro NIR foi fabricada em uma impressora de modelo *Ender 3* da marca *Creativity*®. A Figura 15 apresenta o processo de fabricação do protótipo projetado.

A estrutura do protótipo de espectrofotômetro NIR desenvolvido é apresentada na Figura 16 onde o elemento A representa o suporte inferior para o microcontrolador e sensor, o elemento B representa o suporte do emissor, o elemento C representa o suporte inferior com o *hardware* instalado e o elemento D representa o equipamento final montado.

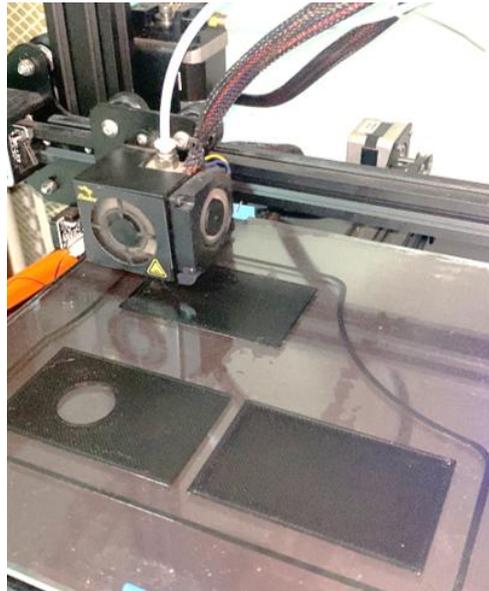
Sua estrutura é simples, apresenta um compartimento no qual o microcontrolador, a placa de conexão e o sensor AS7263 foram posicionados no fundo, direcionando os sistemas de emissão e detecção do sensor para o suporte do amostrador que foi posicionado na parte superior da estrutura. Na lateral da estrutura foi projetado uma abertura na qual o cabo de comunicação do dispositivo é conectado.

Figura 14 – Processo de fatiamento de estrutura 3D



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 15 – Processo de impressão 3D

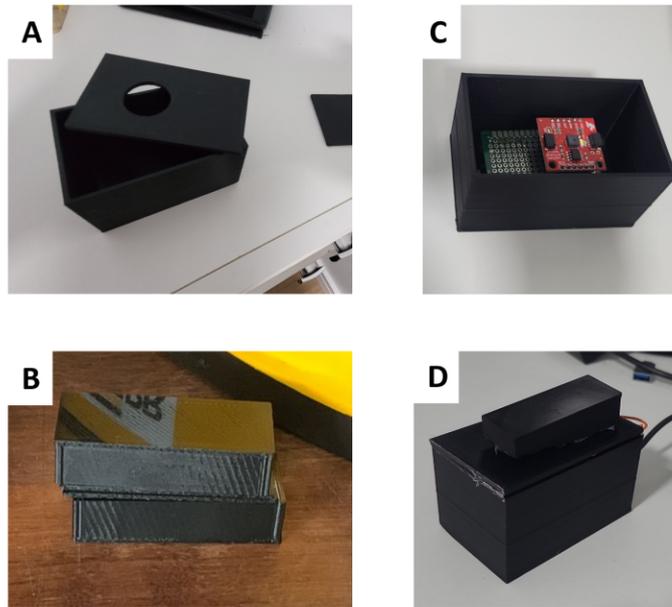


Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.2 Desenvolvimento do *software*

O *software* desenvolvido teve o objetivo de estabelecer as funções do espectrofotômetro para a realização das análises, comandando o sensor AS7263 (escravo) a partir do dispositivo ESP8266 (mestre) utilizando o protocolo de comunicação I2C. O desenvolvimento do código foi baseado nos pseudocódigos das Listagens 1 e 2 apresentados na seção sensor multiespectral e nos manuais AMS (2021) e Instruments (2015). A programação do dispositivo e gravação no microcontrolador foi realizada utilizando o programa Arduino IDE versão 2.1.0, utilizando o

Figura 16 – Estrutura Pronta



Fonte: Autoria própria (2023).

recurso de monitor serial do mesmo programa para obter as respostas do dispositivo em tempo real.

Este *software* pode ser dividido em duas estruturas. A primeira chamada de configuração do sensor, que se destina a definir e registrar todos os registradores do dispositivo escravo a fim de estabelecer um funcionamento correto de acordo com a aplicação proposta. A segunda estrutura do *software* é chamada de controle do sensor, e realiza todas as operações de controle que foram definidas e parametrizadas na primeira estrutura. A seguir as estruturas serão apresentadas e descritas.

O primeiro passo na configuração do sensor é o registro dos parâmetros desejados nos registradores, a fim de estabelecer a base para o controle do dispositivo e correto funcionamento. Os registradores do sensor AS7263 são responsáveis por configurar todos os estados de funcionamento, modos de conversão, ganhos de canais, limitadores de corrente, tempos de integração e demais configurações secundárias. O código foi subdividido em listagens parciais a fim de apresentar e definir a aplicação de cada trecho.

O código da Listagem 3 apresenta o trecho no qual são definidas as bibliotecas de compatibilização com a IDE e a biblioteca de compatibilização com a comunicação I2C. São ainda definidos os endereços virtuais para o sensor AS7263 e para alguns registradores de versão do *hardware* e *firmware* do sensor, tempo de integração e controle dos LEDs.

Em seguida foram configurados o endereçamento para alguns registradores como dados dos sensores de leitura, diferenciando os canais com endereços para os sensores tanto nos níveis altos, quanto nos níveis baixos, endereçamento dos dados de calibração dos canais do sensor. Foram definidos também o endereçamento para os registradores de *hardware* do

Listagem 3 – Definições iniciais de compatibilidade

```

1 #ifndef LIB_ADAFRUIT_AS276X
2 #define LIB_ADAFRUIT_AS276X
3 #if (ARDUINO >= 100)
4 #include "Arduino.h"
5 #else
6 #include "WProgram.h"
7 #endif
8 #include <Adafruit_I2CDevice.h>
9 #define AS7263_ADDRESS (0x49)
10 enum {
11     AS7263_HW_VERSION = 0x00,
12     AS7263_FW_VERSION = 0x02,
13     AS7263_CONTROL_SETUP = 0x04,
14     AS7263_INT_T = 0x05,
15     AS7263_DEVICE_TEMP = 0x06,
16     AS7263_LED_CONTROL = 0x07,

```

Fonte: Autoria própria (2023).

sensor, os endereços de leitura e escrita, *status* do registrador e comunicação, juntamente com o endereçamento definitivo dos canais para a leitura e calibrados.

Os endereços de algumas definições importantes de funcionamento da conversão do sensor são definidas no código da Listagem 4. Esses endereços destinam aos modos de conversão do sensor, modos de ganho para os canais, limitadores de corrente tanto para o LED indicador, quanto para o *driver* de LED e os endereços para o tempo de integração do sensor.

Listagem 4 – Definições dos modos de conversão e ganhos do sensor

```

1 enum conversion_types {
2     MODE_0 = 0b00,
3     MODE_1 = 0b01,
4     MODE_2 = 0b10,
5     ONE_SHOT = 0b11,
6 };
7 enum channel_gain {
8     GAIN_1X = 0b00,
9     GAIN_3X7 = 0b01,
10    GAIN_16X = 0b10,
11    GAIN_64X = 0b11,
12 };
13 enum ind_led_current_limits {
14    LIMIT_1MA = 0b00,
15    LIMIT_2MA = 0b01,
16    LIMIT_4MA = 0b10,
17    LIMIT_8MA = 0b11,
18 };

```

Fonte: Autoria própria (2023).

O trecho de código da Listagem 5 é responsável por habilitar e desabilitar o LED de leitura, realizar a leitura e assim que o tempo de integração finaliza e extrair as leituras do equipamento. Com comando de início o controlador extrai uma série de dez dados de leitura para cada um dos seis canais e uma série para temperatura. Os dados brutos da série capturada são exportados através da porta serial para análise futura.

Listagem 5 – Leitura e armazenamento dos dados

```

1  if (Serial.available() > 0) {
2    char c = Serial.read();
3    if (c == 'b') {
4      for (int i = 0; i < 10; i++) {
5        uint8_t temp = ams.readTemperature();
6        ams.drivOn();
7        ams.startMeasurement();
8        bool rdy = false;
9        while (!rdy){
10         delay(5);
11         rdy = ams.dataReady();
12       }
13       ams.drivOff();
14       ams.readRawValues(sensorValues);
15       R[i]=sensorValues[AS7263_R];
16       S[i]=sensorValues[AS7263_S];
17       T[i]=sensorValues[AS7263_T];
18       U[i]=sensorValues[AS7263_U];
19       V[i]=sensorValues[AS7263_V];
20       W[i]=sensorValues[AS7263_W];
21     }

```

Fonte: Autoria própria (2023).

4.3 Análise do teor de clorofila em folhas de plantas

A etapa de teste e validação de um protótipo de espectrofotômetro é um ponto imprescindível no desenvolvimento e análise dos pontos falhos, uma vez que reconhecidos nos testes, podem ser trabalhados nas iterações seguintes. Nesse projeto os testes e validação do equipamento espectrofotômetro NIR desenvolvido foram realizados por método comparativo, utilizando um dispositivo comercial que analisa clorofila em folhas de plantas.

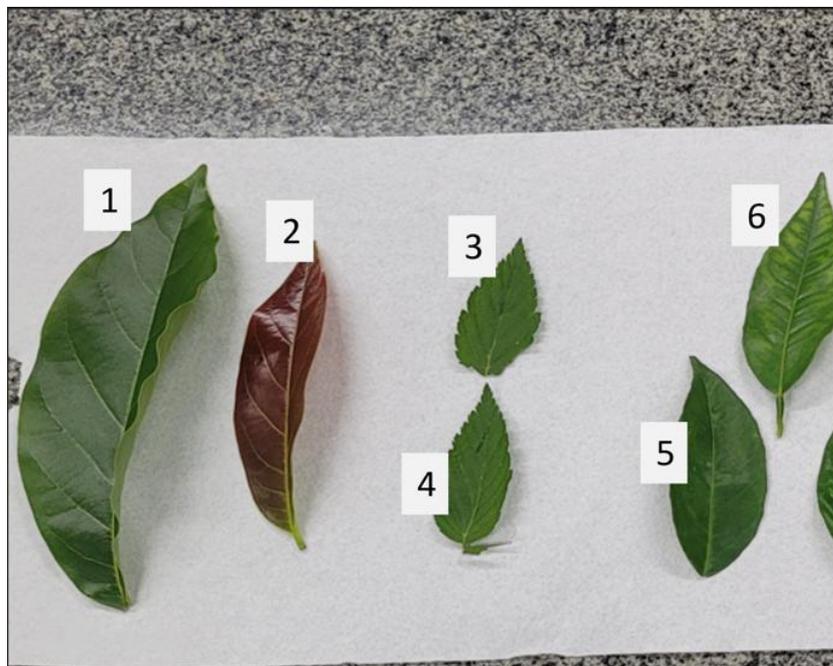
O equipamento utilizado a fim de estabelecer comparação nas análises foi o equipamento ClorofiLOG CFL1030, da fabricante brasileira Falker. O equipamento foi disponibilizado pelo Laboratório de horticultura do Departamento Acadêmico de Ciências Agrárias (DAGRO) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) câmpus Pato Branco.

As análises comparativas foram realizadas utilizando onze amostras de folhas de vegetação, que foram analisadas no dispositivo CFL1030 e posteriormente analisadas no dispositivo desenvolvido. As amostras são identificadas no Quadro 6 e Figuras 17 e 18.

Quadro 6 – Identificação das Amostras

Amostra n°	Nome Comum	Nome Científico
1	Abacate	Persea americana
2	Abacate	Persea americana
3	Morango Silvestre	Fragaria vesca
4	Morango Silvestre	Fragaria vesca
5	Laranjeira	Citrus × sinensis
6	Laranjeira	Citrus × sinensis
7	Capuchinha	Tropaeolum majus
8	Capuchinha	Tropaeolum majus
9	Malvaisco	Malva viscosus
10	Malvaisco	Malva viscosus
11	Malvaisco	Malva viscosus

Fonte: Autoria própria (2023).

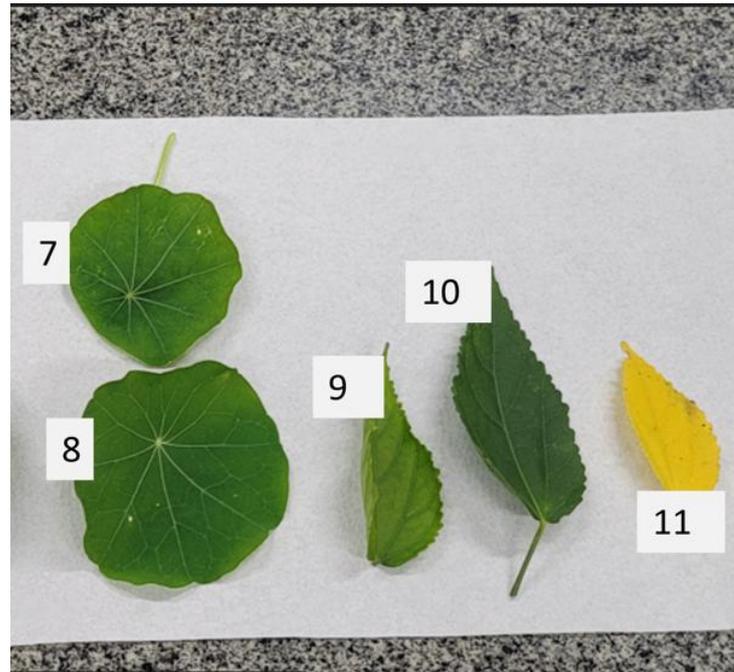
Figura 17 – Amostras utilizadas 1 a 6

Fonte: Autoria própria (2023).

Os testes foram realizados analisando as amostras uma a uma no equipamento CFL1030 (conforme Figura 19), as leituras do equipamento comercial foram registradas e serão apresentadas na Tabela 1 no Capítulo 5. Após cada leitura no equipamento CFL1030 a amostra era analisada no dispositivo desenvolvido nesse trabalho (conforme Figura 20), capturando primeiramente um conjunto de resultados com o dispositivo sem amostra e posteriormente um conjunto com a amostra. As leituras com o equipamento sem amostra, aqui chamadas de pré-amostra, são utilizadas no cálculo da transmitância percentual (% T) para cada comprimento de onda. A Equação 2 descreve o cálculo de % T para o espectrofotômetro,

$$\%T(\lambda_n) = \frac{\text{leitura sem amostra}(\lambda_n)}{\text{leitura com amostra}(\lambda_n)} \times 100, \quad (2)$$

Figura 18 – Amostras utilizadas 7 a 11



Fonte: Autoria própria (2023).

em que, $\%T(\lambda_n)$ é a transmitância percentual para o comprimento de onda n , *leitura sem amostra* é o valor da leitura total gerado no emissor para um comprimento de onda λ_n , *leitura com amostra* é o valor total da leitura com a amostra para um comprimento de onda λ_n .

Figura 19 – Análise da amostra 8 em dispositivo CFL1030



Fonte: Autoria própria (2023).

Com o objetivo de atenuar desvios de medição foi utilizada a média dos valores como valor final de leitura, tanto para as leituras sem amostra, quanto para os valores com amostra. Uma pequena variação é observada ao longo da série, essa variação pode ser influenciada pela variação de temperatura ambiente e por pequenas variações na alimentação do sensor.

Obtidos os valores de leitura de pré-amostra e amostra para cada uma das amostras de folha, foram calculados os valores de $\%T$ para cada faixa do espectro. Com os valores da transmitância percentual para cada canal foram calculados valores de CCI que descreve a

Figura 20 – Análise da amostra 8 em dispositivo desenvolvido



Fonte: Autoria própria (2023).

relação entre a transmissão capturada nas faixas em que a clorofila absorve e a transmissão em outra faixa em que a interação entre a radiação emitida e a clorofila é baixa. A Equação 1 descreve o cálculo do CCI através dos valores da transmitância percentual.

Uma vez que os espectro de absorbância da clorofilas A e B (apresentados na Figura 5) apresenta picos de absorção para clorofila B em torno de 648 nm e a clorofila A em torno de 664 nm , Considerando as faixas do espectro disponíveis para análise no dispositivo, foram utilizados os dois canais mais próximos dessa região (610 nm e 680 nm) para medir a absorção. Além desses dois, o canal em que a absorção é baixa (730 nm) foi utilizado para o cálculo do CCI.

Os CCI calculados para cada amostra representam uma escala de teor de clorofila, com isso, eles foram analisados frente aos resultados correspondentes em índice ICF. Utilizando o *software* Excel as amostras foram analisadas a partir de curvas de tendência, buscado assim encontrar a correlação entre os dois índices.

4.4 Considerações finais

O protótipo de espectrofotômetro desenvolvido para a região espectral do infravermelho próximo foi constituído a partir do sensor AS7263 em conjunto com o LED conectado a saída do *driver* desse sensor, concebendo assim os sistemas emissor e receptor do dispositivo. O sistema de controle foi elaborado a partir do microcontrolador ESP8266, que realiza o controle dos disparos do emissor, leitura e obtenção de dados do dispositivo. A análise do teor de clorofila foi realizada a partir do protótipo em teste comparativo com o equipamento comercial CFL1030, utilizando um conjunto de onze amostras de diferentes folhas de plantas. As saídas do protótipo são representadas na escala adimensional de índice de teor de clorofila do dispositivo.

5 RESULTADOS

Os resultados das análises no equipamento comercial e no espectrofotômetro desenvolvido são apresentados nesse capítulo, desde os dados das leituras, até os resultados finais para índice de clorofila calculados via resposta do espectrofotômetro.

São apresentadas na Tabela 1 os resultados obtidos no equipamento comercial Falker CFL1030. As amostras apresentaram valores de ICF que variam desde amostras que representam baixo teor de clorofila (por exemplo, amostra 12), até amostras que representam alto teor (por exemplo, amostra 5).

Tabela 1 – Resultado da Análise em CFL1030

Número da Amostra	Índice de Clorofila Falker (ICF)
1	40,7
2	19,1
3	40,5
4	40,2
5	68,5
6	53,0
7	37,9
8	40,7
9	33,8
10	51,4
11	8,7

Fonte: Autoria própria (2023).

As mesmas amostras de folhas foram analisadas no espectrofotômetro NIR desenvolvido nesse trabalho. Para cada uma das onze folhas foram capturados conjuntos de dez leituras para a pré-amostra que é a leitura sem a amostra no equipamento, essa leitura é utilizada para mensurar a intensidade de luz emitida pelo LED. Já com a amostra no amostrador, foram capturadas dez leituras para cada uma das amostras. As Tabelas 2 e 3 apresentam os conjuntos de leitura do espectrofotômetro NIR para a primeira amostra. Os demais conjuntos capturados não serão apresentados, apenas os valores finais de leitura. É possível notar um pequeno acréscimo em cada uma das leituras, acredito que se de a variação da temperatura, uma vez que tanto o LED emissor, quanto a alimentação do sistema podem sofrer interferência por temperatura.

Cada conjunto de captura de dados, resulta em um valor final de leitura para pré-amostra e amostra, esses valores apresentam a intensidade de radiação detectadas em cada um dos seis canais do equipamento. Os valores de leitura são resumidos na Tabela 4 e para cada um dos valores finais de leitura é apresentado entre parenteses o valor para o desvio padrão.

Após obtidos os valores de leitura para cada uma das pré-amostras e amostras, foram calculados a partir da Equação 2, o valor da transmitância percentual de cada uma das amostras de folhas. Os valores de transmitância apresentam a porcentagem da radiação emitida que foi transmitida através da amostra. A Tabela 5 apresenta os resultados da transmitância percentual

Tabela 2 – Resultados leitura pré-amostra 1

610nm	680nm	710nm	730nm	810nm	860nm
8145	592	397	237	429	147
8145	592	397	237	429	147
8168	594	398	238	431	148
8190	595	399	239	432	148
8212	597	400	239	433	149
8224	598	401	240	434	149
8236	599	402	240	435	149
8261	600	403	241	436	149
8271	602	404	241	437	150
8294	602	405	242	437	150

Fonte: Aatoria própria (2023).

Tabela 3 – Resultados leitura para a amostra 1

610nm	680nm	710nm	730nm	810nm	860nm
118	11	47	31	19	9
119	11	46	31	19	9
119	11	47	31	19	9
119	11	47	31	19	9
119	11	47	31	19	9
119	11	47	31	19	9
120	11	47	31	19	9
120	11	47	32	19	9
120	11	47	31	19	9
120	11	47	32	19	9

Fonte: Aatoria própria (2023).

para cada uma das faixas do equipamento e também uma sétima faixa de transmitância que combina os dois canais mais significativos para as clorofilas A e B (no caso, canais 610 nm e 680 nm), esse valor é chamado de $\%T_{abs}$.

O cálculo do índice de clorofila presente na amostra é calculado utilizando uma relação entre os valores de transmitância de faixas do espectro que são absorvidas pela clorofila e de faixas que não são. Para isso foram utilizados os valores combinados dos canais R (610 nm) e S (680 nm) e o canal T (730 nm). A Equação 3 apresenta o cálculo do CCI para o espectrofotômetro desenvolvido considerando a absorção pela clorofila A e B, assim como o dispositivo CFL1030. Esse índice para o espectrofotômetro será chamado de CCI_d .

$$CCI_d = \frac{\%T \text{ Canal } T}{\%T \text{ Canais } R + S} \quad (3)$$

em que, $\%T \text{ Canal } T$ é a transmitância para o canal em que a clorofila não é absorvida, $\%T \text{ Canais } R + S$ é a transmitância para os canais em que a clorofilas A e B são absorvidas.

A partir dos índices calculados para o dispositivo e os valores medidos no dispositivo comercial CFL1030, utilizando uma curva de tendência, obteve-se o polinômio de quarta ordem

Tabela 4 – Resultados leitura para amostras e pré-amostras em cada canal de leitura

Nome	610nm	680nm	710nm	730nm	810nm	860nm
Pré Amostra 1	8214,6 (52,34)	597,1 (3,75)	400,6 (2,88)	239,4 (1,71)	433,3 (3,02)	148,6 (1,07)
Amostra 1	119,3 (0,67)	11 (0)	46,9 (0,32)	31,2 (0,42)	19 (0)	9 (0)
Pré Amostra 2	8966,5 (6,38)	666,7 (0,48)	440,5 (0,53)	264,1 (0,32)	477,2 (0,63)	165 (0)
Amostra 2	676,3 (0,95)	56 (0)	82,7 (0,48)	47,9 (0,32)	48 (0)	18 (0)
Pré Amostra 3	7148,6 (312,8)	521,1 (140,25)	342,7 (78,61)	205,7 (47,86)	373,8 (98,25)	129 (33,47)
Amostra 3	40,9 (4,23)	4,5 (0,71)	22,6 (1,26)	20,1 (0,99)	16 (0,47)	11 (0)
Pré Amostra 4	8283,5 (431,67)	1137,7 (1,41)	394,2 (0,79)	237,1 (0,74)	429,7 (0,95)	148,9 (0,32)
Amostra 4	105 (0)	9 (0)	45,7 (0,48)	33,7 (0,48)	24,5 (0,71)	14,1 (0,57)
Pré Amostra 5	8026,6 (28,19)	594,7 (2,21)	393,1 (1,37)	236,2 (0,92)	397,4 (94,32)	147,8 (0,63)
Amostra 5	36,1 (0,32)	4 (0)	36,8 (0,42)	26,7 (0,48)	14,5 (0,53)	7 (0)
Pré Amostra 6	8322,1 (4,41)	616 (0)	408 (0)	245 (0)	443 (0)	153 (0)
Amostra 6	51 (0)	5 (0)	32 (0)	22 (0)	13 (0)	7 (0)
Pré Amostra 7	7654,7 (8,29)	853,5 (0,53)	373,1 (0,32)	224,1 (0,32)	407,6 (0,52)	142,7 (0,48)
Amostra 7	142,9 (0,32)	10 (0)	43,7 (0,48)	28,4 (0,7)	19,6 (0,7)	9,5 (0,71)
Pré Amostra 8	8066,8 (5,03)	588,6 (0,52)	393,7 (0,48)	245,1 (0,32)	434,1 (0,32)	150,1 (0,32)
Amostra 8	141,7 (0,48)	10,6 (1,26)	41,9 (0,88)	26 (0,94)	17,2 (0,79)	7,6 (0,52)
Pré Amostra 9	6894,6 (163,26)	499,7 (11,9)	334,1 (7,91)	208,5 (5,06)	369,3 (8,86)	118,2 (30,42)
Amostra 9	106 (1,63)	11,8 (0,42)	42,6 (0,52)	32 (0)	22 (0)	13 (0)
Pré Amostra 10	6728,5 (82,45)	486,2 (6,21)	326,3 (4,14)	203,8 (2,62)	360,2 (4,73)	124,9 (1,45)
Amostra 10	47 (0)	5 (0)	30,1 (0,32)	26 (0)	17 (0)	11 (0)
Pré Amostra 11	6335,7 (70,13)	423,3 (4,72)	305,9 (3,57)	189,5 (2,17)	334,2 (3,49)	112,2 (1,23)
Amostra 11	530,7 (1,49)	104,4 (0,52)	47 (0)	31 (0)	33,7 (0,48)	18 (0)

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 5 – Transmitância percentual para cada faixa

Amostra	%T (610nm)	%T(680nm)	%T(730nm)	%T(760nm)	%T(810nm)	%T(860nm)	%Tabs
1	1,452	1,842	11,707	13,033	4,385	6,057	3,295
2	7,543	8,400	18,760	18,106	10,059	10,909	15,943
3	0,572	0,864	6,595	9,772	4,280	8,527	1,436
4	1,268	0,791	11,593	14,213	5,702	9,469	2,059
5	0,450	0,673	9,361	11,304	3,649	4,736	1,122
6	0,613	0,812	7,843	8,980	2,935	4,575	1,425
7	1,867	1,172	11,713	12,673	4,809	6,657	3,038
8	1,757	1,801	10,643	10,608	3,962	5,063	3,557
9	1,537	2,361	12,751	15,348	5,957	10,998	3,899
10	0,699	1,028	9,225	12,758	4,720	8,807	1,727
11	8,376	24,663	15,364	16,359	10,084	16,043	33,040

Fonte: Autoria própria (2023).

que descreve a relação entre o CCI_d e o ICF equivalente (ICF_{eq}). Esse polinômio é apresentado na Equação 4,

$$ICF_{eq} = -0,0133.CCI_d^5 + 0,233.CCI_d^4 - 1,0809.CCI_d^3 - 0,829.CCI_d^2 + 19,246.CCI_d - 0,2701 \quad (4)$$

Os valores para o ICF equivalentes calculados são apresentados na Tabela 6, também são apresentados os valores de ICF medidos com o equipamento comercial. Essa tabela também apresenta o erro relativo entre o valor obtido no equipamento comercial o no equipamento desenvolvido nesse trabalho.

Tabela 6 – Relação entre ICF equivalente (Eq. 4) e ICF medido - Análise 1

Amostra	CCId	ICF equivalente	ICF	Erro(%)
1	3,554	38,767	40,700	4,748
2	1,177	19,884	19,100	4,106
3	4,593	42,415	40,500	4,728
4	5,631	47,790	40,200	18,881
5	8,341	66,167	68,500	3,406
6	5,506	46,980	53,000	11,358
7	3,855	39,814	37,900	5,049
8	2,992	36,423	40,700	10,509
9	3,270	37,675	33,800	11,465
10	5,342	45,993	51,400	10,520
11	0,465	8,403	8,700	3,419

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados dos valores calculados para ICF equivalente quando comparados aos valores de ICF medidos no equipamento comercial, apresentaram um erro máximo de 18,881% (amostra 4) para esse conjunto de amostras. O erro apresentado entre os dois equipamentos se deve principalmente a diferença entre os comprimentos de onda utilizados na análise da absorção pelas clorofilas A e B, uma vez que o equipamento comercial CFL1030 realiza uma varredura utilizando as faixas 635 nm e 660 nm, já o equipamento desenvolvido no trabalho utiliza as faixas 610 nm e 680 nm como faixas de absorção. O canal que apresenta o maior erro também apresenta o maior desvio padrão na faixa de 610 nm.

A título de análise, uma segunda relação foi obtida, agora, retirando o menor valor de CCI que representa uma amostra com um teor baixo de clorofila e o maior valor que representa uma amostra com alto teor de clorofila. Novamente obtendo um polinômio, da Equação 5, que descreve a tendência da relação ICF equivalente e calculado a partir do CCId medido. A Tabela 7 apresenta os valores para a segunda relação de índices de clorofila,

$$ICF_{eq} = - 2,3532.CCI_d^4 + 34,269.CCI_d^3 - 175,64.CCI_d^2 + 370,52.CCI_d - 225,06 \quad (5)$$

Os resultados desta segunda análise com um número total de nove amostras apresentaram um valor máximo de erro de 11,602% para esse conjunto de amostras. Os erros foram reduzidos nessa segunda análise, uma vez que as amostras com valores muito altos e as com valores muito baixos de índice de clorofila foram eliminados da análise. Esse erro também foi apresentado na amostra que possui o maior desvio padrão entre o conjunto de leituras.

Tabela 7 – Relação entre ICF equivalente (Eq. 5) e ICF medido - Análise 2

Amostra	CCId	ICF equivalente	ICF	Erro
1	3,554	36,190	40,700	11,081
2	1,177	19,057	19,100	0,225
3	4,593	44,670	40,500	10,297
4	5,631	44,864	40,200	11,602
6	5,506	47,766	68,500	9,876
7	3,855	36,644	53,000	3,314
8	2,992	40,496	37,900	0,500
9	3,270	37,618	40,700	11,297
10	5,342	49,799	51,400	3,115

Fonte: Autoria própria (2023).

5.1 Considerações finais

Os resultados para a análise do teor de clorofila realizados comparando o protótipo desenvolvido e o equipamento comercial apresentaram uma pequena variação dentro do mesmo conjunto de leitura, gerando um desvio padrão para leitura média. Esse desvio pode ser explicado pela variação de temperatura ao longo das análises, que pode ter influencia direta no LED emissor.

A partir das leituras foram calculados para cada um dos canais de leitura os valores de transmitância percentual de cada amostra. A partir da análise dos valores de transmitância percentual, obteve-se um polinômio que correlaciona os índices do protótipo com o índice do equipamento comercial. A análise comparativa resultou em um erro máximo de 18,881% para a amostra 4, a mesma que apresentou o maior desvio padrão entre o conjunto de leituras.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo a análise do teor de clorofila em folhas de plantas a partir do método não destrutivo da espectrofotometria na região espectral do infravermelho próximo. Aliado a isso, foi desenvolvido um protótipo de um espectrofotômetro região NIR do espectro eletromagnético, mensurando a transmitância das amostras em seis canais do espectro, utilizando um sensor espectral de baixo custo.

As análises de absorção da radiação pela clorofila em folhas de plantas foram realizadas utilizando um equipamento comercial e relacionando-o com o índice de clorofila calculado pelo dispositivo projetado nesse trabalho. Os resultados da validação apresentaram um erro máximo de 18,881% para o conjunto de amostras analisado, tendo como principal fator impactante a diferença nas faixas de leitura realizadas por cada um dos dispositivos.

Uma melhor equivalência entre os dois dispositivos e a apresentação de valores que garantam uma precisão maior a estas leituras, podem ser obtidas através de um número maior de análises e pela comparação a métodos químicos analíticos.

O protótipo apresenta limitações quanto as análises que podem ser realizadas, uma vez que este possui um número limitado de faixas do espectro passíveis de leitura. Para a aplicação escolhida, o sensor espectral AS7263 não é o mais assertivo, tendo em vista que os canais de leitura não correspondem aos valores exatos para os picos de absorção dos elementos analisados. Este dispositivo foi utilizado ao longo do trabalho pela disponibilidade, porém, em pesquisas posteriores constata-se que outros sensores como o AS7265, por exemplo, apresentam canais de leituras mais adequados a esta aplicação.

Esse trabalho abordou uma única aplicação para o equipamento espectrofotômetro, porém, diversas outras aplicações de análises não destrutivas podem ser desenvolvidas com este dispositivo. O uso de técnicas de inteligência artificial frente a grandes volumes de dados e ajustes mecânicos e eletrônicos deste equipamento, também podem contribuir significativamente com a melhora das análises realizadas.

REFERÊNCIAS

- AMS. **AS7263 6-Ch NIR Spectral Sensing Engine**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://ams.com/as7263i>.
- AZEVEDO, A. L.; SOUSA, A. K.; CASTRO, T. J. Espectroscopia óptica de baixo custo: uma estratégia para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, 2019. ISSN 1806-9126.
- AZEVEDO, F. M. Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3d. São Carlos, 2013.
- BEDIN, F. C. B. *et al.* Nir associated to pls and svm for fast and non-destructive determination of c, n, p, and k contents in poultry litter. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, Elsevier B.V., v. 245, p. 118834, jan 2021. ISSN 13861425. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118834><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1386142520308131>.
- BEN-GERA, I.; NORRIS, K. H. Direct spectrophotometric determination of fat and moisture in meat products. **Journal of Food Science**, Wiley Online Library, v. 33, n. 1, p. 64–67, 1968.
- BORRMANN, D. Efeito do déficit hídrico em características químicas e bioquímicas da soja e na degradação da clorofila, com ênfase na formação de metabólitos incolores. Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, p. 102, 2009.
- BURNS, D. A.; CIURCZAK, E. W. **Handbook of Near-infrared Analysis**. 2nd ed., rev. and expanded. ed. M. Dekker, 2001. (Practical spectroscopy 27). ISBN 0824705343,9780824705343,9780585417875. Disponível em: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=aae4c9143033bb0cdae6ca7921015076>.
- BURNS, D. A. *et al.* **Handbook of Near-Infrared Analysis Third Edition 30 Pharmaceutical Applications of Near-Infrared Spectroscopy**. [S.l.: s.n.], 2008.
- CARVALHO, V. B. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL INSTITUTO DE INFORMÁTICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO**. 2016.
- DANH, L. V. Q. *et al.* A low-cost integrated nir spectrometer for chlorophyll content index measurement. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, 2021.
- ENGEL, V. L.; POGGIANI, F. Study of foliar chlorophyll concentration and its light absorption spectrum as related to shading at the juvenile phase of four native forest tree species. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, 1991.
- FALKER. **clorofiLOG CFL1030 Manual Medidor Eletrônico de Teor de Clorofila**. [S.l.], 2018. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjWoZaVq5uCAxUSqJUCHbJoBPIQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.falker.com.br%2Fdownload%3Fproduct%3Dcfl1030%26file%3DMAN_CFL1030_D.pdf&usq=AOvVaw26anwaeX9g5S_UFQV880vi&opi=89978449.
- FELIX, J. C. *et al.* Predição de fósforo, carbono e nitrogênio em solos de basalto, por meio de espectroscopia NIR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1405–1416, sep 2016. ISSN 0100-204X.

FERRARESI, T. M. *et al.* **ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO NA DETERMINAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 36. 1769-1777 p.

GIL, P. T. d. *et al.* Índice spad para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. **Horticultura Brasileira**, Associação Brasileira de Horticultura, v. 20, n. 4, p. 611–615, Dec 2002. ISSN 0102-0536. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362002000400020>.

GROSS, J. **Pigments in Vegetables: Chlorophylls and Carotenoids**. Springer US, 2012. ISBN 9781461520337. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=gBDaBwAAQBAJ>.

HART, J.; NORRIS, K. Direct spectrophotometric determination of moisture content of grain and seeds. *In*: WEXLER, A. (Ed.). **Humidity and moisture, principles and methods of measuring moisture in liquid and solids**. [s.n.], 1965. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TJURAQAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=related:CpCRQikejQQJ:scholar.google.com/&ots=-erMqO1LoP&sig=GbVQuPXUaGiEExaeGXHdJikZMHw>.

INSTRUMENTS, T. **SLVA704-Understanding the I2C Bus**. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>.

JESUS, S. V. de; MARENCO, R. A. O spad-502 como alternativa para a determinação dos teores de clorofila em espécies frutíferas. **Acta Amazonica**, 2008.

JUNIOR, E. B. *et al.* Um novo clorofilômetro para estimar os teores de clorofila em folhas do capim tifton 85. **Ciência Rural**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 42, n. 12, p. 2242–2245, Dec 2012. ISSN 0103-8478. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000109>.

MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica, Vol.2, 8 Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016. ISBN 9788580555936. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=BbA0DQAAQBAJ>.

MARCHAO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D. **Predição dos Teores de Carbono e Nitrogênio do Solo Utilizando Espectroscopia de Infravermelho Próximo** **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. [s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.cpac.embrapa.br>.

MINOLTA. **SPAD-502Plus Chlorophyll Meter**. [S.l.], 2013. Disponível em: https://sensing.konicaminolta.us/wp-content/uploads/spad-502plus_instruction_eng.pdf.

OLIVEIRA, M. C. P. P. de. Espectrofotometria no Infravermelho- por metodologia FTIR (Fourier Transform Infrared): Validação na análise do teor de ureia e de outros parâmetros de qualidade do leite. p. 70, 2011.

OSBORNE, B. G. **Near-Infrared Spectroscopy in Food Analysis**. [S.l.]: John Wiley and Sons, Ltd, 2000.

PAVIA, D. *et al.* **Introdução à espectroscopia**. [S.l.]: Cengage Learning, 2010. ISBN 9788522107087.

PEREIRA, A. R.; HIRASHIMA, S. Q. d. S.; OLIVEIRA, R. D. Utilizaçã do espectrômetro Alta II para obtenção da absortancia solar de superfícies opacas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 17, n. 46, p. 216, jan 2021. ISSN 1984-3526.

RICHARDSON, A. D.; DUIGAN, S. P.; BERLYN, G. P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. **New Phytologist**, v. 153, n. 1, p. 185–194, 2002. Disponível em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.0028-646X.2001.00289.x>.

RIZZO, R.; DEMATTE, J. A.; LACERDA, M. P. C. Espectros vis-nir do solo e fuzzy k-médias aplicados na delimitação de unidades de mapeamento de solos em topossequências. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Revista Brasileira de Ciencia do Solo, v. 39, p. 1533–1543, 11 2015. ISSN 18069657.

SANTOS, G. A.; PERREIRA, A. B.; KORNDORFER, G. H. uso do sistema de análises por infravermelho próximo (nir) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. 2010.

SILVA, P. R. V. Histórico da Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIR - Near Infrared) Angstrom. 2006.

SKOOG, D. *et al.* **Fundamentos de química analítica**. [S.l.]: Pioneira Thomson Learning, 2006. ISBN 9788522104369.

SOAREZ, R. R. d. S. **Estudo de propriedades da Clorofila a e da Feofitina a visando a Terapia Fotodinâmica**. 2006.

SOUZA, F. V. G. de. **Concepção de um Espectrofotômetro Portátil no Espectro Visível**. [S.l.: s.n.], 2014.

SYSTEMS, E. **ESP8266EX Technical Reference**. [S.l.], 2020. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 6ª ed.. ed. [S.l.]: ARTMED, 2017.

TIBOLA, C. S. *et al.* **Espectroscopia no Infravermelho Próximo para Avaliar Indicadores de Qualidade Tecnológica e Contaminantes em Grãos**. [S.l.: s.n.], 2018.