

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTÓRIO HELENO MARIANI ROQUE

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA
MONITORAMENTO DE ÍNDICE DE
VEGETAÇÃO (NDVI) EM ÁREAS DE
PASTAGEM**

Porto Alegre
2024

VICTÓRIO HELENO MARIANI ROQUE

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA
MONITORAMENTO DE ÍNDICE DE
VEGETAÇÃO (NDVI) EM ÁREAS DE
PASTAGEM**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin

COORIENTADOR: Prof. Dr. Tiago Oliveira Weber

Porto Alegre
2024

VICTÓRIO HELENO MARIANI ROQUE

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA
MONITORAMENTO DE ÍNDICE DE
VEGETAÇÃO (NDVI) EM ÁREAS DE
PASTAGEM**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin, UFRGS
Doutor pela Institut National Polytechnique – Grenoble,
França

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Cláudio Machado Diniz, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Maurício Cagliari Tosin, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____
Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre, 15 de julho de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Altamiro Susin, que esteve presente durante todas as etapas, e cumpre com excelência sua função, sendo um grande motivador e transmitindo os ideais da pesquisa acadêmica.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Tiago Weber, por todos os ensinamentos, por estar sempre disposto a ajudar e por acreditar que poderíamos aprofundar a proposta inicial deste trabalho.

À minha namorada, Joelma, por me acompanhar nesta jornada, ser compreensiva em todos os momentos e ajudar diretamente no desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, em especial minha irmã Maria Othávia, minha mãe Sandra e minha avó Eny, por entenderem o quão importante era esta fase em minha vida, por serem compreensivas e por serem minha base em todas as circunstâncias.

Aos colegas do LaPSI pela convivência e troca de experiências.

Aos colegas e alunos do IFSul Câmpus Novo Hamburgo pelos ensinamentos durante este período de trabalho.

Ao GPESP, Prof. Dr. Denise Fontana, Lóren, Luciano, Fernanda, Lámon, Prof. Dr. Paulo Carvalho, e demais pesquisadores que sempre nos receberam muito bem para auxiliar com a área de aplicação deste trabalho e possibilitaram o uso de equipamentos.

Ao LIFEELAB e ao CeoMat, laboratórios que me receberam e auxiliaram no desenvolvimento de partes do trabalho.

Às empresas Falker e Austen, por nos atenderem e estarem dispostos a explicar sobre seus projetos e desafios ao trabalhar com NDVI.

Ao CNPq pela provisão da bolsa de mestrado.

RESUMO

A medição da massa verde é realizada a partir de amostras de vegetação, sendo empregada para monitorar o desenvolvimento de culturas no setor agropecuário. Uma das técnicas, frequentemente utilizadas neste setor, é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que se baseia na refletância da vegetação para diferentes comprimentos de onda de luz. Neste trabalho, foi desenvolvido um protótipo de um medidor de NDVI para mapear o estado das pastagens para pecuária bovina a campo, uma atividade econômica muito relevante para o Brasil, que tem o segundo maior rebanho do mundo. Esta dissertação apresenta os princípios de funcionamento, os sensores, o modo de operação e detalhes construtivos do protótipo. Para validação preliminar, foram realizadas medições em campo, comparando-as com os valores apresentados pelo equipamento comercial *Greenseeker*, com correlação de *Pearson* de 0,97. As medições de NDVI são georreferenciadas, permitindo a geração de um mapa da cultura. Também foi realizada a fusão de dados com o mapa de satélite (SatVeg). Foram utilizados os algoritmos K-NN e *Kriging*. O controle do equipamento é feito por um microcontrolador ESP32, que gera os sinais de acionamento dos LEDs e faz a aquisição dos valores de radiação (captados por fotodiodos), do acelerômetro e da posição fornecida pelo GPS, armazenados na memória. Detalha-se o *firmware* de controle e gerenciamento de dados, descreve-se a placa de circuito impresso, a alimentação elétrica, a montagem e os detalhes construtivos. O texto finaliza com as propostas de continuidade do projeto e inclusão de novas funcionalidades.

Palavras-chave: Acelerômetro, agropecuário, GPS, instrumentação optoeletrônica, K-NN, *Kriging*, NDVI.

ABSTRACT

The measurement of green mass is carried out from vegetation samples and is used to monitor crop development in the agricultural sector. One of the techniques frequently used in this sector is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which is based on the reflectance of vegetation at different wavelengths of light. In this work, a prototype of an NDVI meter was developed to map the condition of pastures for cattle farming in the field, an economically significant activity for Brazil, which has the second largest cattle herd in the world. This dissertation presents the operating principles, sensors, mode of operation, and construction details of prototype. For preliminary validation, field measurements were carried out and compared with the values presented by the commercial equipment Greenseeker, with *Pearson* correlation of 0.97. The NDVI measurements are georeferenced, allowing for the generation of a crop map. Data fusion with the satellite map (SatVeg) was also performed. K-NN and Kriging algorithms were used. The equipment is controlled by an ESP32 microcontroller, which generates the activation signals for the LEDs and acquires the radiation values (captured by photodiodes), the accelerometer, and the position provided by the GPS, stored in memory. The control and data management firmware, the printed circuit board, power supply, assembly, and construction details are described in detail. The text concludes with proposals for the continuation of the project and the inclusion of new functionalities.

Keywords: Accelerometer, GPS, K-NN, *Kriging*, livestock, NDVI, optoelectronic instrumentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Ilustração dos fenômenos de absorção e reflexão de energia durante o sensoriamento remoto.	18
Figura 2 –	Curva de fator de refletância típica de uma folha verde.	18
Figura 3 –	Exemplo de coleira para análise do comportamento animal.	21
Figura 4 –	Esquema de instrumentação ótica.	24
Figura 5 –	Medidor NDVI bidirecional portátil.	25
Figura 6 –	Estrutura do aparato designado como CGMD.	32
Figura 7 –	Esquemático da metodologia.	39
Figura 8 –	Diagrama de blocos do processo.	40
Figura 9 –	Representação do posicionamento do dispositivo embarcado.	42
Figura 10 –	Exemplo de mapa usando a biblioteca <i>Folium</i>	43
Figura 11 –	Dispositivo <i>Greenseeker</i>	44
Figura 12 –	Exemplo de visualização da ferramenta SatVeg.	45
Figura 13 –	Campo nativo da Estação Experimental Agronômica (EEA).	46
Figura 14 –	Diagrama do algoritmo para aquisição de dados.	47
Figura 15 –	Diagrama de integração do protótipo medidor de NDVI ao projeto.	48
Figura 16 –	Placa criada para interconectar os periféricos ao microcontrolador e o <i>Greenseeker</i>	51
Figura 17 –	Placa de circuito impresso para o microcontrolador.	52
Figura 18 –	Placa para processamento das informações recebidas.	53
Figura 19 –	Diagrama do algoritmo usado.	55
Figura 20 –	Método de medida com altura controlada manualmente. a) à esquerda <i>Greenseeker</i> ; b) à direita Protótipo.	58
Figura 21 –	Diagrama do protótipo medidor de NDVI.	60
Figura 22 –	Circuito emissor para os LEDs vermelhos.	62
Figura 23 –	Análise espectral do LED vermelho. a) à esquerda obtida pelo espectrômetro; b) à direita obtida do <i>datasheet</i>	63
Figura 24 –	Circuito equivalente do fotodiodo.	65
Figura 25 –	Circuito de transimpedância conectado ao circuito equivalente do fotodiodo.	66
Figura 26 –	Resultado da simulação em <i>software</i> LTspice, em vermelho: sinal refletido e lido pelo receptor ótico; em preto: sinal constante relativo a irradiância do sol; em azul: saída do circuito de transimpedância.	67
Figura 27 –	Representação dos circuitos de dois filtros passivos e somador.	69
Figura 28 –	Resultado da simulação em <i>software</i> LTspice para análise do diagrama de Bode de um dos circuitos filtro passivo passa-altas acoplado ao somador.	70

Figura 29 –	Resultado da simulação em <i>software</i> LTspice, em azul: sinal refletido e detectado pelos fotodiodos; em preto: sinal do filtro passivo passa-altas e do circuito somador.	70
Figura 30 –	Filtro ativo projetado.	71
Figura 31 –	Resultado da simulação em <i>software</i> LTspice, em preto: sinal refletido de 335 nA; em azul: sinal do filtro ativo.	72
Figura 32 –	Resultado da simulação em <i>software</i> LTspice, em preto: sinal refletido de 100,5 nA; em azul: sinal do filtro ativo.	72
Figura 33 –	Circuito projetado para o detector de pico com <i>reset</i>	74
Figura 34 –	Resultado da simulação em <i>software</i> LTspice, em azul: sinal de saída do filtro ativo passa-altas; em preto: sinal obtido na saída do detector de pico.	74
Figura 35 –	Todos os blocos montados em placas de ensaio.	75
Figura 36 –	<i>Layout</i> da placa de circuito impresso para medição de NDVI. Parte inferior da placa.	79
Figura 37 –	<i>Layout</i> da parte superior da placa de circuito impresso para o filtro ativo passa-altas de terceira ordem e detector de pico.	80
Figura 38 –	Empacotamento físico do protótipo. a) à esquerda vista inferior (voltada para o mensurando); b) à direita vista lateral.	81
Figura 39 –	Circuito de alimentação para o microcontrolador, para o circuito emissor e para o circuito receptor de luz.	81
Figura 40 –	Exemplos de amostras não vegetativas. a) à esquerda NaCl; b) à direita Calcário.	82
Figura 41 –	Duas amostras coletadas com o protótipo. a) à esquerda NDVI de 0,349792; b) à direita NDVI de 0,440833.	85
Figura 42 –	Amostras obtidas para posterior construção da curva de calibração.	85
Figura 43 –	Curva de calibração considerando todas as amostras.	86
Figura 44 –	Curva de calibração desconsiderando dados.	87
Figura 45 –	Gráfico de linhas relacionando o comportamento dos instrumentos, antes do ajuste através da equação de calibração, de medida para diferentes alturas e espécies de gramíneas.	88
Figura 46 –	Mapa elaborado com dados coletados através do uso da biblioteca <i>Folium</i>	90
Figura 47 –	Mapa com valores NDVI, obtidas através das ferramentas SatVeg e <i>Greenseeker</i> , em vermelho coordenadas recebidas via GPS NEO-6M	91
Figura 48 –	Mapa com interpolações de valores NDVI, obtidas através das ferramentas SatVeg e <i>Greenseeker</i>	92
Figura 49 –	Mapa criado com dados adquiridos pelo protótipo construído sem as correções atribuídas aos valores de NDVI.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Aspectos construtivos comparados entre referências.	26
Tabela 2 –	Características dos LEDs.	63
Tabela 3 –	Tabela de valores de tensão obtidos de teste em bancada medindo os 128 pulsos através do detector de pico e ADC do microcontrolador para diferentes combinações de distância a dois planos de cores diferentes e para os dois comprimentos de onda definidos.	76
Tabela 4 –	Tabela de dados para calibração.	83
Tabela 5 –	Estatísticas dos dados comparando-as entre <i>Greenseeker</i> e dados corrigidos do protótipo.	87
Tabela 6 –	Análise de Variância para o <i>Greenseeker</i>	89
Tabela 7 –	Análise de Variância para o Protótipo.	89

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analogue-Digital Converter</i>
AmpOp	Amplificador Operacional
AlGaAs	<i>Aluminium Gallium Arsenide</i>
Ath	<i>Threshold Acceleration</i>
BARSS	<i>Based bidirectional active remote-sensing system</i>
CGMD	<i>Crop Monitoring and Diagnosis</i>
CI	Circuito Integrado
CV	Coeficiente de Variação
DC	<i>Direct Current</i>
DoE	<i>Design of Experimental</i>
DP	Desvio Padrão
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GMD	Ganho Médio Diário
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IE	Índice de Eficiência
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LDW	<i>Leaf Dry Weight</i>
LNA	<i>Leaf Nitrogen Accumulation</i>
LNC	<i>Leaf Nitrogen Concentration</i>
LaPSI	Laboratório de Processamento de Sinais e Imagens
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
NIR	<i>Near-Infrared</i>
ND	<i>Neutral Density</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>

NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NaCl	Cloreto de Sódio
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PIC	<i>Programmable Interface Controller</i>
PRI	<i>Photochemical Reflectance Index</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RTC	<i>Real-Time Clock</i>
RVI	<i>Relative Vigor Index</i>
SMV	<i>Sum Magnitude Vectors</i>
Tth	<i>Threshold Time</i>
UV	Ultravioleta
VI	<i>Vegetation Index</i>
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ	Somatório
$\alpha\beta\pi\omega$	Fator de inconstância do resultado
ρ_{NIR}	Refletância do espectro infravermelho
ρ_{Red}	Refletância do espectro vermelho
l_v	Luminosidade
l_e	Intensidade Radiante
$V(\Lambda)$	Fator de sensibilidade espectral
K_m	Fator de conversão
V_{RC}	Tensão no resistor de coletor
I_B	Corrente de base
I_C	Corrente de coletor
R_C	Resistor de coletor
C_D	Capacitância do fotodiodo
R_D	Resistência do fotodiodo
β	Ganho direto de corrente
μC	Microcontrolador

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Avaliação da cobertura vegetal	16
1.2	Monitoramento de animais e pastagens	17
1.2.1	Absorção de radiação pela vegetação	17
1.2.2	Técnicas de manejo de bovinos	19
1.2.3	Aquisição de dados para monitoramento de animais e pastagens	20
1.3	Objetivos	22
1.3.1	Objetivos específicos	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Conceitos Fundamentais de Instrumentação Optoeletrônica	23
2.2	Trabalhos Relacionados	25
2.2.1	Medidores de NDVI passivos	26
2.2.2	Medidores de NDVI ativos	29
2.2.3	Acelerômetros para detecção de inclinação e angulação	33
2.2.4	GPS para georreferenciamento e mapeamento de dados	34
2.2.5	Redes sem fio aplicadas ao estudo do comportamento animal e pastagens	35
2.3	Fusão e interpolação de dados	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	Medida de NDVI	41
3.2	Mapa de NDVI fornecido por satélite	45
3.3	Área experimental	46
3.4	Arquitetura do protótipo	47
3.4.1	Utilização do módulo GPS NEO-6M para obter coordenadas geográficas e horário	48
3.4.2	Aquisição de medidas de orientação	49
3.4.3	Uso do <i>Greenseeker</i>	50
3.4.4	Placa de circuito impresso	51
3.5	Criação do mapa	53
3.6	Montagem do mapa de fusão de dados	54
3.7	Análise de variância	56
4	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO MEDIDOR DE NDVI	59
4.1	Prototipação do circuito emissor ótico	61
4.2	Prototipação do circuito receptor ótico	65
4.2.1	Condicionamento de sinais	66

4.3	Sistema de controle	77
4.4	Protótipo	78
4.5	Procedimento de testes e análises comparativas	82
4.5.1	Aquisição de dados para ajuste da curva de calibração	82
5	RESULTADOS	84
5.1	Comparação das medições realizadas com o protótipo e com o <i>Greenseeker</i>	84
5.2	Mapeamento do NDVI	89
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	94
6.1	Medida de NDVI	94
6.2	Geração do mapa NDVI da área	95
6.3	Trabalhos futuros	95
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A DADOS COLETADOS EM EXPERIMENTOS DE CAMPO E PSEUDOCÓDIGO	101
A.1	Coleta de dados para o procedimento experimental proposto	101
A.2	Coleta de dados georrefenciados	103
A.3	Pseudocódigo para geração dos mapas de dados interpolados	104

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que o Brasil possui o segundo maior rebanho bovino do mundo com mais de 200 milhões de animais, correspondendo a mais de 20% do rebanho mundial. O país possui uma vantagem para a produção agropecuária, sua ampla extensão territorial, incluindo extensas pastagens nativas e cultivadas focadas na criação de bovinos. Esses elementos convergem para conferir ao Brasil um expressivo protagonismo no cenário internacional, destacando-se pelo elevado índice de participação no mercado global através de exportações de carne e animais vivos (USDA, 2024). A produtividade do rebanho, entretanto, pode ser significativamente aumentada pela aplicação de tecnologias. Atualmente, grande parte dos produtores seguem padrões de manejo tradicionais, nos quais as decisões são tomadas com base na intuição e avaliações subjetivas dos cenários. Esta subjetividade da tomada de decisão na pecuária eleva os riscos econômicos enfrentados pelos pecuaristas, os quais muitas vezes produzem menos do que o esperado, provocando uma redução dos lucros.

Esta redução da produtividade está atrelada à vulnerabilidade às condições adversas nos ramos políticos, econômicos, climáticos, ambientais e do comércio global. Neste contexto, destaca-se a importância da utilização de avanços tecnológicos, novas técnicas e melhorias na gestão de propriedades, visto que a produção de gado no Brasil ocorre principalmente em áreas de pastagens e formada por pequenos produtores (ALMADANI; WEEKS; DEBLITZ, 2021).

Neste trabalho, busca-se compreender a área de aplicação, que abrange a interação dos animais com o ambiente em que estão inseridos. Para isso, este capítulo é dividido em Seção 1.1, onde são apresentadas as possibilidades de melhoria no setor agropecuário e o conceito que relaciona o índice de vegetação a ser analisado. A Seção 1.2 aborda o uso da técnica de radiação eletromagnética para monitoramento da vegetação, algumas técnicas de manejo de bovinos e a apresentação de ferramentas utilizadas para coleta de dados. Na Seção 1.3, são expostos os principais objetivos a serem alcançados ao longo deste trabalho.

1.1 Avaliação da cobertura vegetal

DA ROSA *et al.* (2022) destaca a baixa produtividade do rebanho brasileiro, observando que muitos produtores fazem uso inadequado das pastagens, resultando em superlotação. Segundo os autores, 80% das propriedades têm um Índice de Eficiência (IE) considerado baixo ou médio, cerca de 30% não fazem qualquer gestão da oferta de pastagens, enquanto 60% adotam práticas empíricas para o controle da altura das pastagens. Essas conclusões provêm de um estudo com 35 rebanhos que utilizam diversas tecnologias alimentares, situados no Rio Grande do Sul. Os dados coletados no estudo de DA ROSA *et al.* (2022) foram obtidos por meio de questionários *online*, entrevistas detalhadas e avaliação do manejo de bezerros. Isso exemplifica uma análise conduzida em um único estado do Brasil, ilustrando que há espaço para melhorias e que a gestão da alimentação dos animais é crucial para alcançar maiores níveis de produtividade, além do foco na genética dos animais e outras considerações.

A criação de gado pode ocorrer em confinamentos ou em ambiente natural com campos de pastagens nativas, ou plantadas. O objeto deste estudo é a pecuária de criação a pasto, o qual se deseja criar um mapa com valores de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para áreas de pastagem. O NDVI foi desenvolvido na década de 1970, coincidindo com o lançamento do satélite LANDSat, destinado a monitorar a vegetação e as condições climáticas. Inicialmente, foram utilizados dados das Bandas 5 e 7, as quais capturam a radiação refletida da superfície terrestre em comprimentos de onda multiespectrais. Observaram-se mudanças significativas na refletância total, fenômeno anual que ocorria entre 30 de agosto e 16 de dezembro, atribuídas à redução do ângulo solar.

Esta redução no ângulo solar é decorrente das variações na posição da Terra em sua órbita ao redor do Sol, resultando em mudanças sazonais na incidência da luz solar em determinadas regiões. Durante essa transição sazonal, os raios solares atingem a superfície terrestre sob um ângulo mais agudo, o que pode influenciar a refletância total da vegetação e, por conseguinte, os dados capturados pelo satélite LANDSat. Essas variações sazonais indicaram a necessidade de normalizar os dados, um processo essencial para corrigir as flutuações relacionadas às mudanças sazonais no ângulo solar. Esta normalização garante a consistência nas observações ao longo do tempo, proporcionando uma análise mais precisa e confiável das condições vegetativas e climáticas monitoradas (ROUSE JR *et al.*, 1973). Atualmente, o índice de vegetação por diferença normalizada é dado pela Equação 1, que é calculada mediante dados de refletância de espectros de radiação eletromagnética na faixa do infravermelho próximo e na faixa do vermelho, expressos como *Near-Infrared* (NIR) e *Red* (Vermelho), ambos sinais refletidos e representados como ρ (refletância de luz).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}} \quad (1)$$

Além da técnica de medição de NDVI via imagens de satélite, muitos autores se dedicaram a medir o NDVI através de instrumentos que possibilitassem uma melhor resolução espacial e temporal, como os instrumentos portáteis (YAO *et al.*, 2020) e o processamento de imagens capturadas por câmeras espectrais embarcadas em Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) (ATKINSON AMORIM *et al.*, 2022), ou fixos, utilizados para monitoramento constante.

Diferentes algoritmos são utilizados para estimar valores avaliados em estudos de campo. O algoritmo de regressão linear de mínimos quadrados, *Kriging*, é um exemplo de ferramenta computacional consolidada para estimar dados relacionados a apenas um atributo contínuo (GOOVAERTS, 1997). O mesmo autor escreve sobre o modelo *Kriging* e suas variantes, sendo *Ordinary Kriging* uma delas. Ao mensurar uma grandeza em que o número de amostras não engloba toda uma área geográfica, busca-se por estimar os valores baseando-se nas medidas adquiridas e leva-se em conta a variação local da média da vizinhança, isso é possível com *Ordinary Kriging*.

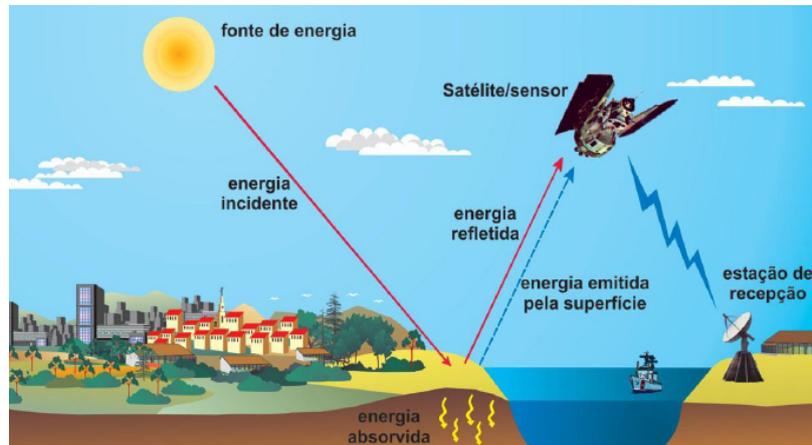
1.2 Monitoramento de animais e pastagens

1.2.1 Absorção de radiação pela vegetação

O processo de sensoriamento remoto da vegetação ocorre pelas propriedades que as plantas possuem de absorção de radiação de luz. PONZONI; SHIMABUKURO; KUPPLICH (2015) argumentam sobre a fotossíntese que ocorre pela absorção de radiação eletromagnética, e que isto acontece na região do espectro visível (400 nm a 720 nm). As folhas são as partes da planta que possuem a capacidade de interagir com a radiação. Logo, é relevante compreender que a folha é o meio pelo qual a radiação é recebida, e dependendo do comprimento de onda dessa radiação e outros fatores relacionados à fisiologia da planta, haverá influência sob fenômenos de reflexão, absorção e transmissão de radiação eletromagnética.

Os mesmos autores (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPPLICH, 2015) mencionam que a faixa espectral do infravermelho próximo (720 nm a 1.100 nm) não é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes da vegetação. Também é perceptível que quanto maior a quantidade de água na estrutura foliar maior será a reflexão. O comportamento espectral da vegetação depende de fatores químicos e estruturais. O sensor ótico que capta a radiação refletida e a intensidade efetivamente medida depende do ângulo sólido do sensor, que forma um cone imaginário de um diâmetro específico. A Figura 1 é um exemplo de como ocorre a medição da energia refletida, que depende da energia incidente na superfície de análise, e cada superfície reflete em intensidades diferentes.

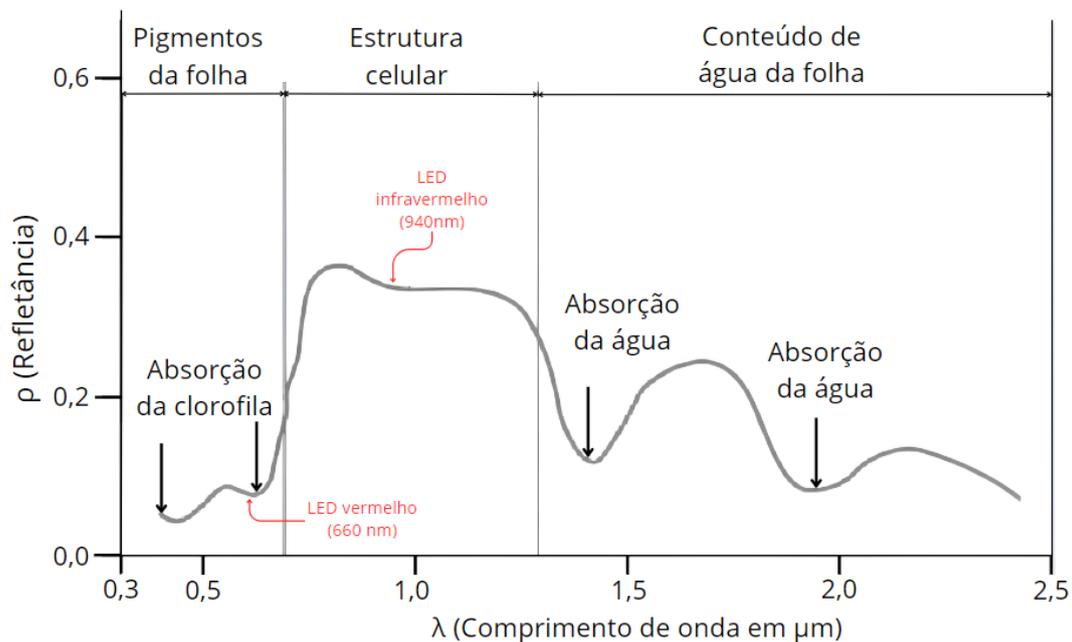
Figura 1 – Ilustração dos fenômenos de absorção e reflexão de energia durante o sensoriamento remoto.



Fonte: FLORENZANO (2007).

Cada região espectral é constituída por diferentes estruturas. No visível, e mais especificamente no vermelho, ocorre a absorção da radiação pela clorofila. Na região do NIR ocorre pequena absorção da radiação e a reflexão é praticamente constante. A Figura 2 exibe a refletância da radiação eletromagnética para cada faixa de espectro. Na figura são exibidos os picos de emissão de luz dos LEDs utilizados na configuração do protótipo proposto neste trabalho (660 nm e 940 nm).

Figura 2 – Curva de fator de refletância típica de uma folha verde.



Fonte: Adaptada de PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH (2015).

1.2.2 Técnicas de manejo de bovinos

Além de entender o comportamento da vegetação, é importante verificar as técnicas utilizadas para manejo de bovinos. O sistema de rodízio de pastagem é uma metodologia que vem sendo implementada para a intensificação da produção. A técnica consiste em dividir o tempo de pastejo em dois ciclos; o de ocupação, em que o gado fica sobre a área por um período e se alimenta dos recursos disponíveis; e o de descanso, em que a área fica livre e não recebe carga animal, para possibilitar o melhor rebrote das folhas das gramíneas.

Uma das medidas mais importantes para o manejo de bovinos no sistema de rodízio de pastagem é considerar a altura da gramínea nos instantes de entrada e saída do lote de animais. Durante a saída é importante que a pastagem não esteja muito baixa para ter um bom tempo de recuperação. Considera-se que a luminosidade nas folhas deve ser em torno de 95% e apenas o restante deve atingir o solo, ou seja, a cobertura do solo deve se manter com boa quantidade de folhas da vegetação. Para a medição de altura do pasto, utilizando régua, vários pontos na área de medição devem ser avaliados, com periodicidade de quinze dias, em consonância com GENRO; SILVEIRA (2018).

A técnica de medição analisada é manual e pode ser mensurada até mesmo com uma simples régua, porém uma das técnicas para medição de massa seca de forragens disponíveis para os animais foi elucidada por SCHAEFER; LAMB (2016), que utilizavam NDVI e *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e conseguiam prever, com boa correlação, o Ganho Médio Diário (GMD) de massa de bovinos baseado nos dados coletados pelos sensores que funcionavam através da leitura da refletância nas bandas do infravermelho próximo e vermelho. Salienta-se que atualmente o NDVI pode ser medido por instrumentos portáteis e até por VANTs. A métrica de NDVI pode assumir valores no intervalo de -1 a 1, no qual valores negativos caracterizam superfícies não vegetativas e valores positivos indicam o índice de vegetação, e quanto maior o valor de NDVI, maior a quantidade de massa verde disponível no ponto medido (WU *et al.*, 2014).

O setor pecuário sofre com poucas melhorias nas técnicas de trabalho, principalmente entre pequenos e médios estabelecimentos agropecuários, visto que possuem pouca estrutura para gerir o negócio. Mesmo que o produtor cuide do rebanho sozinho, como acontece em muitos casos, ainda precisa atentar-se aos indicadores para atingir melhores resultados, tais como: a quantidade de capim, água e sais ingeridos pelos bovinos, somando quantidades de nutrientes diferentes; o deslocamento do gado na área de campo; e a relação de pasto ingerido pelo peso adquirido.

Esses são exemplos de dados difíceis de mensurar para a maioria dos produtores e, mesmo para aqueles mais atentos e disciplinados ao controle de gastos, não há como obter com exatidão sem dispositivos capazes de realizar determinadas medições. Sendo assim, propõe-se a implementação da medida de NDVI para auxiliar a tomada de decisão para o sistema pecuário, e entende-se que realizar o mapeamento com pontos referentes

ao valor medido permite estimar a biomassa disponível, e melhorar consequentemente o manejo de animais.

1.2.3 Aquisição de dados para monitoramento de animais e pastagens

Adquirir aspectos da pastagem é uma forma que agrega à capacidade de gestão do agronegócio, e caracteriza ferramentas passíveis de atingir bons resultados. Porém, o comportamento dos bovinos é também de extrema relevância para o estudo, e diferentes trabalhos envolvem o uso de instrumentos capazes de identificar comportamentos do animal, se o bovino está ruminando, dormindo, pastando, no estro, entre outras respostas. Alguns trabalhos são apresentados na Seção 2.2. No geral, para aquisição de dados de comportamento de bovinos, são utilizados acelerômetros embarcados em coleiras próprias para serem fixadas no pescoço dos animais. Estes dispositivos embarcados conseguem gerar uma quantidade de dados que possibilitam o uso de ferramentas de aprendizagem de máquina, e além dos acelerômetros, é relevante extrair dados de sensores de temperatura, magnetômetros, giroscópios, identificação do animal, entre outros.

Diversas são as variáveis que afetam a qualidade de gestão de desenvolvimento de bovinos, e a interação entre pastejo e ciclo de crescimento de bovinos é um aspecto considerado de extrema importância. CARVALHO *et al.* (2016) apontam sobre interação planta-animal, estudando os momentos ideais de entrada e saída dos animais nas áreas de pastejo. Sendo o momento ideal dado pela quantidade de biomassa disponível. Os resultados de CARVALHO *et al.* (2016) são significativos a qualquer tipo de pasto ou de animal em pastejo, e extrai-se que a aquisição de dados para estudos desta interação é fundamental para boas práticas de manejo, e fica explícita a necessidade de identificar a quantidade de biomassa disponível.

Dentre os principais tipos de sensores mencionados e utilizados em pesquisas que envolvem sistemas embarcados está o *Global Positioning System* (GPS). Dispositivos GPS desempenham um papel crucial em diversas áreas, desde a análise forense até a saúde e o transporte (KANANI; PADOLE, 2020). Com o módulo NEO-6M, que opera por meio do protocolo *National Marine Electronics Association* (NMEA) é possível receber dados de latitude, longitude, data, hora e entre outros, com uma frequência de 1 Hz. O uso de *Internet of Things* (IoT) potencializa a busca por soluções de baixo custo que atendam as necessidades de precisão de receptores GPS. A comparação com dispositivos comerciais revelou resultados surpreendentes, destacando a viabilidade e precisão do NEO-6M em comparação com dispositivos com preços mais altos. Essa constatação reforça a importância de explorar e entender as capacidades desses dispositivos em diversas aplicações (GARCIA-HUERTA *et al.*, 2019).

O acelerômetro ADXL335 representa uma peça fundamental na pesquisa conduzida, na interpretação de dados dinâmicos e conversão de movimentos mecânicos em sinais elétricos. Este dispositivo sensorial triaxial oferece uma precisão excepcional na medida

de acelerações lineares em três eixos distintos. A utilização deste acelerômetro revela-se essencial, não apenas na captura de dados inerentes aos fenômenos em análise, como o desalinhamento não intencional do equipamento de medição, mas também na garantia da confiabilidade e integridade dos resultados obtidos ao longo deste trabalho. Este módulo acelerômetro é comumente utilizado e é de baixo custo sem deixar a desejar no desempenho final, como aponta BHATTACHARYA *et al.* (2012).

Todos os sensores aqui apresentados são comumente utilizados em sistemas embarcados. O sistema patenteado por MÜLLER; MENEGASSI (20/03/2018) é um caso em que o comportamento dos bovinos é estudado e permite a integração de dispositivos sensores e utilização de aprendizado de máquina para extração de características motoras e de reprodução. A Figura 3 exibe um exemplo de como são fixados os diferentes tipos de dispositivos em uma coleira de bovinos.

Figura 3 – Exemplo de coleira para análise do comportamento animal.



Fonte: DUTTA *et al.* (2015).

O trabalho a ser apresentado neste texto engloba experimentos para a construção do dispositivo capaz de mensurar o NDVI da pastagem. O processo construtivo é baseado em referências apresentadas no Capítulo 2, na qual são utilizados princípios de instrumentação optoeletrônica para a recepção do sinal refletido. Durante o estudo é definida a utilização de um medidor de NDVI ativo, em que o circuito eletrônico do emissor também é projetado, e após simulações e testes de bancada, é implementado o protótipo em circuito impresso. Vislumbra-se a possibilidade de acoplar à coleiras de bovinos em campo para o acompanhamento da evolução da pastagem.

A coleta de dados de NDVI tem como intuito realizar o mapeamento e torná-las informações de fácil acesso e de relevante importância para o manejo da pecuária por parte das pessoas que a integram. Para isso, são utilizados algoritmos capazes de apresentar as informações desejadas, como *K-Nearest Neighbors* (K-NN) e *Kriging* para gerar o “mapa de calor” que representa a estimativa de valores de NDVI baseada nos pontos mensurados e expandido para a área em questão. Por fim, ainda é utilizada a biblioteca *Folium*

para imprimir os pontos com as informações coletadas, permitindo fácil acesso para verificação de datas, localizações geográficas e o valor de NDVI, especificamente. Neste trabalho, tanto a fusão de dados quanto a interpolação serão utilizados para combinar as informações do dispositivo local com os dados obtidos por satélite.

Ao apresentar a contextualização da área de aplicação deste trabalho e principais dispositivos selecionados para possibilitar esta implementação, deseja-se obter resultados conforme os objetivos planejados na Seção 1.3.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a geração de mapas da cobertura vegetal de uma área, com os valores de NDVI obtidos pela fusão de dados de satélite SatVeg e medidas georreferenciadas feitas em campo, com instrumento portátil comercial e com o instrumento desenvolvido e implementado neste trabalho. A aplicação alvo é o apoio à gestão do pastoreio pelo monitoramento do estado de gramíneas em áreas de pastagens. Para a concretização deste objetivo são listados objetivos específicos, discretizados na Subseção 1.3.1.

1.3.1 Objetivos específicos

- Estudar os sensores utilizados e as técnicas de medida de NDVI, especialmente em pastagens, definir a arquitetura do sistema microcontrolado para aquisição e armazenamento dos dados e para o gerenciamento dos periféricos;
- Projetar e construir um protótipo contendo o microcontrolador, o módulo analógico, o GPS, o acelerômetro e o módulo de alimentação;
- Desenvolver o *firmware* de controle do módulo de aquisição de dados e de comunicação com o GPS, com o acelerômetro e com o computador hospedeiro;
- Desenvolver um programa de geração do mapa de NDVI, fazendo a fusão dos dados georreferenciados adquiridos com dados de satélite.

O trabalho está dividido em capítulos que representam a sua estrutura, contando com revisão bibliográfica, na qual são apresentadas abordagens de trabalhos utilizados como fonte de pesquisa para dar seguimento a este projeto. No capítulo metodologia experimental, são apresentadas seções que separam a constituição da base do trabalho, desde dispositivos eletrônicos utilizados e a forma com que estes são significantes para o desenvolvimento, e o projeto experimental que engloba o desenvolvimento via eletrônica analógica para efetivar o dispositivo medidor de NDVI. Como resultados são apresentados os mapas obtidos através de coletas, com dispositivo comercial e com o protótipo construído, e também constam comparações de resultados obtidos pelo protótipo, originados do projeto experimental implementado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, as análises detalhadas e completas sobre o tema central desta pesquisa são apresentadas, para contextualizar e resumir as contribuições acadêmicas atuais que fornecem *insights* e perspectivas essenciais para a compreensão do problema estudado. Este capítulo está dividido em seções que tratam sobre conceitos fundamentais e trabalhos relacionados. A Seção 2.1 aborda sobre princípios de instrumentação optoeletrônica essenciais para o entendimento do trabalho proposto. Ao acrescentar a Seção 2.2, busca-se destacar as principais teorias, metodologias e resultados experimentais sobre mapeamento de índices de vegetação, com o intuito de servir como premissa e balizadora para questões de projeto estabelecidas durante o trabalho. Os trabalhos relacionados abordam diferentes aplicações para os módulos a serem usados neste trabalho. Utiliza-se neste trabalho o módulo acelerômetro para medir a orientação da placa de circuito impresso, e nos trabalhos relacionados busca-se entender o funcionamento, mesmo que em aplicações diferentes, utilizando conceitos de aceleração para medir orientação. A Seção 2.3 é destinada a abordar trabalhos que usem os algoritmos K-NN e *Kriging* para fusão e interpolação de dados.

2.1 Conceitos Fundamentais de Instrumentação Optoeletrônica

Sabe-se que para extrair a medida de NDVI é fundamental o conhecimento prévio de radiação eletromagnética. A frequência e o comprimento de onda da radiação eletromagnética são funções da velocidade da luz, como indica a Equação 2.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

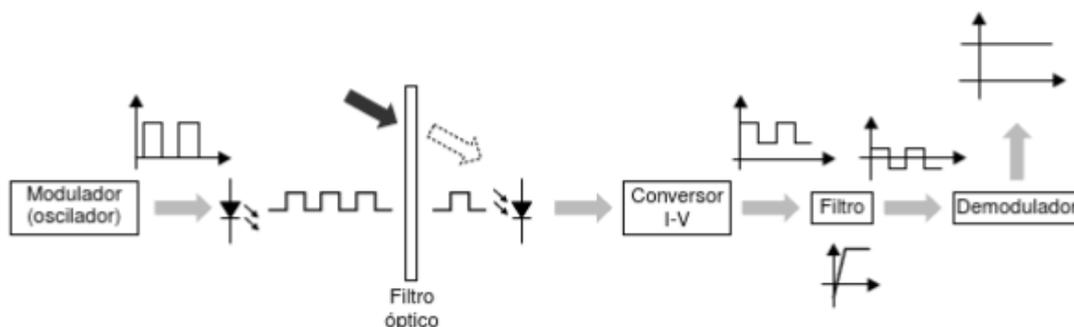
Na qual:

- λ é o comprimento de onda electromagnética,
- c é a velocidade da luz no vácuo, e
- f é frequência da onda em Hz.

O espectro eletromagnético na faixa de interesse (do Vermelho ao Infravermelho Próximo) possui diferentes resultantes da interação com objetos. Sabe-se que o NDVI baseia-se nas respostas espectrais refletidas de duas bandas de ondas diferentes, uma no vermelho (600 nm a 700 nm) e outra no NIR (700 nm a 1,100 nm). Quanto mais cobertura vegetal tiver a área de medição do índice, menor é a refletância de luz vermelha e maior a refletância no infravermelho próximo, portanto, altos valores de NDVI. A vegetação esparsa reflete mais luz visível e menos luz infravermelha próxima. Valores de NDVI próximos de zero e valores negativos indicam características não vegetativas, como superfícies áridas (rocha e solo), água, neve, gelo e nuvens (WU *et al.*, 2014).

A instrumentação ótica ocorre pela caracterização do sinal emitido, visando encontrar maneiras de receber o sinal adequadamente. BALBINOT; BRUSAMARELLO (2000) descrevem o esquema da Figura 4, sendo adequado ao princípio de funcionamento de instrumentos medidores de NDVI. Os medidores de NDVI consistem da alteração da propriedade intensidade, e mede-se a intensidade de feixes refletidos pela vegetação nos espectros vermelho e infravermelho próximo. A grande vantagem de usar a intensidade, deve-se a resposta direta que os detectores óticos, como os fotodiodos, respondem a essas variações.

Figura 4 – Esquema de instrumentação ótica.



Fonte: BALBINOT; BRUSAMARELLO (2000).

Percebe-se que na Figura 4 tem-se o dispositivo emissor de ondas eletromagnéticas alimentado com um sinal de frequência e forma conhecidas, e ainda antes do fotoreceptor há um filtro ótico, geralmente adequado para filtrar comprimentos de onda específicos. A partir do dispositivo receptor, são usados dispositivos eletrônicos para condicionamento do sinal, de forma que na saída seja mensurado como um valor de amplitude referente à intensidade da onda eletromagnética mensurada. Na Seção 2.2 são apresentadas algumas implementações do esquema de instrumentação ótica, sendo que a principal divisão ocorre pela diferenciação entre dispositivos ativos e passivos, também é perceptível diferenças entre projetos dos circuitos emissores e de condicionamento de sinais. Alguns autores utilizam filtros óticos em seus projetos. Na mesma seção, são apresentados alguns trabalhos que utilizam dispositivos relevantes para esta pesquisa, como acelerômetros, re-

ceptores de GPS e estudos sobre sensoriamento remoto, com o intuito de embarcar o dispositivo final.

2.2 Trabalhos Relacionados

Os instrumentos medidores de NDVI podem ser ativos ou passivos e a grande diferença entre eles está na fonte emissora, em que os passivos dependem da irradiância solar, que é a quantidade de radiação solar por unidade de área. Os estudos conduzidos por ERDLE; MISTELE; SCHMIDHALTER (2011) abordam a comparação entre sensores espectrais ativos e passivos para analisar parâmetros da biomassa, sendo que eles utilizam um sensor passivo bidirecional e três sensores ativos. Os mesmos autores concluem que o sensor bidirecional, comum em práticas agrícolas, produz resultados consideráveis para extrair informações desejáveis, como a massa verde produzida ao longo do tempo. Os autores ressaltam que algumas vantagens, como a flexibilidade em relação a diferentes condições de iluminação, ambientais e horários do dia, favorecem os dispositivos ativos. Ao longo deste capítulo, dispositivos medidores de NDVI são apresentados e detalhados. Um exemplo de sensor bidirecional pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Medidor NDVI bidirecional portátil.



Fonte: NI *et al.* (2018).

Dentre os trabalhos relacionados também é possível subdividir os medidores de NDVI em ativos e passivos, os quais são estudados para definir o melhor caso para aplicação neste estudo. Dispositivos ativos são tratados como os medidores de NDVI que necessitam de uma fonte de luz para provocar a reflexão da luz, os dispositivos passivos dependem da irradiância do sol. As Subseções 2.2.1 e 2.2.2 referem-se às pesquisas envolvendo medidores passivos e ativos, respectivamente. As principais características dos dispositivos são extraídas e exibidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Aspectos construtivos comparados entre referências.

Documento	λ LED V (nm)	λ LED IR (nm)	μ C	Fotodetector	IVs
YAO <i>et al.</i> (2020)	730	810	ATmega32	MID-A841	NDVI, RVI, LAI, LDW, LNA e LNC
KITIĆ <i>et al.</i> (2019)	465, 535 e 630	850	-	BPX61	27 índices
PANDOLFO (2017)	550	950	PIC16F1807	BPW34	NDVI
VAILANT (2017)	630	800	Arduino nano	TSL2561	NDVI
FILHO (2019)	660	850	PIC18F452	LEDs e TSL	NDVI
MIYAZAKI (1998)	660	-	-	LEDs	-
JO <i>et al.</i> (2015)	635	825	-	LEDs	NDVI
GARRITY (2010)	532 e 568	676 e 800	-	S2386-18K	NDVI e PRI
LIU <i>et al.</i> (2022)	710	870	MSP430G2553	OPT101	NDVI e NDRE
<i>Greenseeker</i>	650	770	-	-	NDVI

2.2.1 Medidores de NDVI passivos

Os estudos com objetivos de melhorar índices de produtividade na área da agropecuária são constantes e diversas ideias são implementadas e validadas. Para possibilitar cálculos de índices de vegetação, e que os mesmos sejam úteis para estimar aspectos da cultura analisada, é importante que as medições sejam confiáveis, e sabe-se que existem diferentes formas de mensurar o NDVI. O instrumento desenvolvido por VAILANT (2017) tem como fotoreceptor o módulo TSL2561, o qual consegue detectar espectros do infravermelho próximo e do visível. Este módulo é passivo e necessita da luz solar para gerar a luz refletida das plantas. Além disso, o autor recorre ao uso de um sensor de temperatura e um módulo GPS. As curvas de calibração são geradas através da comparação com o equipamento comercial *Greenseeker*, para obter nível de significância de 5%. Os dados são armazenados em cartão de memória microSD.

O equipamento visa permitir a aferição dos dados de qualquer tipo de vegetação para diagnosticar doenças e controlar a dosagem de água. O microcontrolador utilizado é o Arduino Nano. O arquivo gravado recebe o nome da data do evento AAAA-MM-DD no formato ASCII(TXT), e neste são salvos a latitude, a longitude, a data e a hora, as variáveis ambientais, a temperatura do objeto e do ar, a luminosidade e o NDVI. As leituras de NDVI ocorrem na faixa de 500 nm a 1.100 nm.

O módulo TSL2561 é passivo, e necessita da radiação solar para obter a refletância das plantas. Quando a incidência solar varia para valores maiores são apresentados problemas, e o TSL é mais sensível ao captar o infravermelho e o vermelho completo. O autor observa uma maior flutuação nas medições quando a distância entre os dispositivos e o objeto medido varia.

O instrumento desenvolvido por (LIU *et al.*, 2022) tem como diferencial o ganho ajustável para conversão fotoelétrica e a capacidade de medição em diferentes intensidades de luz. O circuito de ganho automático possibilita 255 combinações de amplificação. Por ser um medidor passivo bidirecional, o dispositivo se assemelha ao projeto da Figura 5,

com o adicional projetado para compor a estrutura mecânica e ajustar o ângulo no qual o sensor recebe a luz do sol. O fotodiodo do projeto é o OPT101 no modo fotocondutivo, justificando-se o tipo de conexão para agregar melhor linearidade, de forma que ao aumentar a intensidade de luz captada se alcance um valor de corrente proporcional. O autor também usa filtros óticos para diferenciar os dois comprimentos de onda usados para calcular os índices de vegetação. A grande diferença é que o OPT101 é composto de um circuito de transimpedância, podendo agregar potenciais vantagens, tanto construtivas quanto operacionais.

O experimento de RYU *et al.* (2010) mostra que os LEDs têm relação linear com um espectrômetro hiperspectral de $R^2 > 0,94$ e $R^2 > 0,99$ para o vermelho e infravermelho próximo, respectivamente. A refletância da irradiação solar nas porções visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético está correlacionada com o estado de vegetação. Segundo os autores, espectrômetros de curta largura de banda possuem fotodiodos que requerem filtros para medir espectros de comprimento de onda específicos, e LEDs são alternativas para usar bandas estreitas e seletivas sem usar filtros. Os LEDs funcionam quando a luz de uma determinada largura de banda incide na junção, pares de elétrons-lacunas são gerados e uma fotocorrente produzida.

O estudo também visa responder à questão sobre o impacto do ângulo solar na refletância e, conseqüentemente, no NDVI. Quando polarizados de forma reversa, os LEDs geram uma corrente na faixa de miliamperes proporcional à luz incidente, utilizando, neste caso, o Amplificador Operacional (AmpOp) LTC1050 configurado como amplificador inversor e os LEDs de comprimentos de onda 660 nm e 880 nm (Fairchild F5E1 de AlGaAs e Lumex SMF-HM1530XD-509).

A estrutura é composta por suportes confeccionados em alumínio para acomodar quatro LEDs em cada um destes suportes, dois vermelhos e dois infravermelhos, e cada estrutura forma um ângulo de 180° com a outra. O experimento é conduzido com uma lâmpada de filamento de tungstênio e um material refletivo de madeira. A luz fica a 40 cm dos sensores e se afasta 40 passos de 2,54 cm. Apresentam também a comparação de resultados normalizados e saídas em mV e a partir deste teste é extraída a relação linear de 0,94 e 0,99. Utilizando um espectrômetro manual comercial são criadas as curvas de calibração e o sensor LED é corrigido em 1,33 na banda de espectro vermelho e 1,68 na banda NIR.

MIYAZAKI (1998) também mostram que um LED pode funcionar como um fotodetector para seleção do comprimento de onda. Os autores investigam características estacionárias e temporais de dois LEDs, vermelho e azul, em 380 nm e 450 nm. Para os autores, uma das motivações é que fotodiodos de estado sólido não são espectralmente seletivos, ao invés disso eles detectam uma ampla gama de frequências de luz, variando do infravermelho ao ultravioleta (UV). O mérito do LED como fotodetector é o baixo custo e resposta de passagem de banda estreita que elimina a necessidade de filtros óticos.

A metodologia experimental envolve a utilização de um tubo de latão para evitar interferência de rádio frequência. É usado um circuito de transimpedância para medir a saída do fotodetector. A relação entre a intensidade de luz incidente e a corrente de saída do LED é examinada por atenuações sucessivas à luz incidente com uma combinação de filtros *Neutral Density* (ND) para os níveis de intensidade apropriados.

Os LEDs por si só também funcionam como receptores de luz quando polarizados reversamente, e FILHO (2019) propôs a criação de um dispositivo capaz de medir o NDVI utilizando LEDs polarizados em modo fotocondutor e o módulo TSL2561 como sensor de luminosidade digital. Para o autor existem três formas de mensurar o NDVI, por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), via imagens de satélites ou com sensores próximo às pastagens. Este dispositivo portátil visa contemplar medidas próximas ao solo e que sejam enviadas para o *datacenter* do projeto.

Para o processo de calibração do dispositivo, são utilizados água, NaCl, grama sem restrição hídrica e palha. O autor considera que por meio do NDVI é possível fazer diferentes tipos de análises nas mais diversas escalas de uma determinada região ou plantação, tornando este índice um bom estimador das condições biofísicas da vegetação. O diagrama elétrico deste circuito proposto é composto de LEDs utilizados como receptores de luz e nos comprimentos de onda especificados (660 nm e 850 nm), o uso de PIC como microcontrolador e o sensor TSL2561. Para armazenamento dos dados é usado o microSD *Open logger Sparkfun* e os controles temporais através do RTC Tiny. Percebe-se que duas diferentes técnicas de mensurar o NDVI são comparadas e que a resposta do instrumento usando apenas LEDs permite obter melhor resultado, neste caso. Além disso, o autor divide o projeto em três fases, desde a seletividade de comprimento de onda dos LEDs, teste de resposta dos sensores LED em condições de campo e a terceira com medições de NDVI.

Também são analisados outros resultados de instrumentos que usam LEDs como fotoreceptores, e de acordo com JO *et al.* (2015), LEDs são sensores ópticamente seletivos que são mais sensíveis à mesma banda de comprimento de onda que eles emitem. Logo, podem ser usados como potenciais filtros para extrair apenas luzes em um determinado comprimento de onda. O autor usa duas bandas de 635 nm e 825 nm para avaliar a capacidade de monitorar o crescimento de arroz em casca. O dispositivo desenvolvido consiste em sensores LEDs, amplificadores de sinal e *datalogger*. A calibração ocorre utilizando um dispositivo multiespectral *Cropscan*, e a medição de NDVI através do dispositivo desenvolvido apresenta boa correlação com os dados do *Cropscan*, justificando a possibilidade de utilizar esse para analisar o crescimento da cultura de arroz. Neste caso o equipamento é para uso portátil, contrário ao que as referências até aqui apresentam e o nome dado é *LED-Based Bidirectional Active Remote-Sensing System* (LED-BARSS).

O produto consiste em dois LEDs de diferentes bandas, um no vermelho e o outro no infravermelho, e mostram espectros de emissão de pico em 655 nm e 880 nm e de

absorção em 635 nm e 825 nm, resultados consistentes com o equipamento comercial. Para efetivar o produto se fez necessário um conversor de corrente para tensão e amplificar o sinal do mesmo, e isso é realizado através do AmpOp TL082 e a saída de tensão pode ser amplificada para ganho de até 200 vezes.

O equipamento desenvolvido por JO *et al.* (2015) contém quatro LEDs de cada lado, onde a parte superior mede a radiação solar e a parte inferior mede a refletância. O material Teflon é utilizado como difusor na parte de cima do bastão para melhorar a resposta do cosseno à irradiância. A preocupação com a parte de baixo do bastão está relacionada a dispersão. Inicialmente os valores de tensão são medidos e salvos no *datalogger*. O teste de profundidade adequada para o sensor é investigada usando medidas estatísticas de correlação para o intervalo de 2 cm a 9 cm, em que assumiram a profundidade adequada entre 7,5 cm e 9 cm. Para a correção do ângulo do sol é necessário usar data, tempo, latitude e longitude.

A avaliação de desempenho ocorre sempre em alturas de 245 cm no topo dos alvos para detectar uma distância de 1 m de círculo de diâmetro de cada alvo, visto que os LEDs da parte de baixo do bastão têm o *Field of View* (FOV) definido como 22° e ficam a 7,5 cm para dentro do cilindro para evitar dispersão.

Nesta subseção foi possível contextualizar diferentes trabalhos e técnicas construtivas de dispositivos medidores de NDVI passivos. Entende-se que o termo passivo é designado aos instrumentos que dependem de uma fonte emissora de luz externa, neste caso a irradiância solar. Na Subseção 2.2.2 são apresentados trabalhos que projetam medidores com fonte emissora de luz própria, designados por diferentes autores como dispositivos ativos.

2.2.2 Medidores de NDVI ativos

Os autores GARRITY (2010) utilizam quatro bandas de espectro para filtrar o fotodiodo e medir radiações de cima e baixo em NDVI e em *Photochemical Reflectance Index* (PRI). Um dos QuadPad é usado para medir a radiação solar e o outro para medir a irradiância. O fotodiodo usado tem faixa espectral de 320 nm a 1,100 nm e o pico de sensibilidade ocorre em 960 nm. Três motivos são fundamentais para a escolha deste fotodiodo por parte dos autores: abrange todos os comprimentos de onda de interesse; não perde a sensibilidade na temperatura e a resposta é linear. Devido à faixa de resposta espectral muito ampla, filtros óticos são utilizados para filtrar a radiação que atinge cada sensor. O sistema de registro (*datalogger*) opera na faixa de medidas entre 4 mA a 20 mA. Também utilizam para o condicionamento dos sinais o AmpOp AD8668.

KITIĆ *et al.* (2019) mostram que o conteúdo de clorofila e o estado do tecido esponjoso das folhas são bons indicadores da saúde fisiológica das plantas. Neste artigo os autores propõem um instrumento portátil ativo e multiespectral para medição precisa do estresse da planta. O equipamento é designado como *plant-o-meter*, e a chave do projeto

é usar uma fonte multiespectral que ilumina sequencialmente a planta em radiação com quatro comprimentos de onda diferentes.

Cada medição compreende 128 pulsos de excitação para cada comprimento de onda, e o sinal refletido é calculado como uma média do trem de pulso refletido. O cálculo dos *27 Vegetations Index* (VIs) são executados em computação na nuvem. Os quatro comprimentos de onda analisados são 850 nm, 630 nm, 535 nm e 435 nm. A fonte luminosa é desenvolvida com quatro LEDs montados em um *chip* de tecnologia *Surface-Mount Technology* (SMT). Para estreitar o feixe, um único colimador de vidro é posicionado fisicamente ao redor da fonte de luz.

Para superar a interferência solar, a fonte de luz é excitada com sinais pulsados, em que consome 700 mA/dado. Como detector de luz é utilizado o fotodiodo BPX61 com suporte eletrônico para filtrar e amplificar o sinal causando imunidade a luz ambiente maior que 10.000 lx. O difusor é impresso em 3D.

O trabalho de PANDOLFO (2017) tem como intuito a medição de NDVI com espectros de onda visível de 648 nm e infravermelho próximo de 880 nm, ele utiliza um amplificador de transimpedância na primeira etapa de condicionamento para converter o sinal de corrente elétrica em tensão. O modo de operação do fotodiodo é o fotocondutivo, que tem como vantagem a velocidade de resposta indicada para aplicações de alta frequência. O autor utiliza fontes de corrente para acionar o circuito de emissão composto de LEDs infravermelhos e vermelhos. Na recepção são definidos quatro fotodiodos com circuitos de transimpedância, circuito somador e circuito detector de pico. Por fim, para o processamento das informações é usado o microcontrolador PIC16F1807 e as respostas são exibidas no *display* LCD.

O mesmo trabalho analisa a não linearidade da resposta do fotodiodo BPW34. Para a escolha dos dispositivos emissores são considerados o pequeno ângulo de emissão (3° e 4°) para minimizar a influência da altura e uma alta intensidade luminosa para poder medir com maiores distâncias. O acionamento dos LEDs é feito usando sinal sinusoidal e com frequência de 340 Hz, geradas através do conversor analógico digital (ADC) do microcontrolador. Dez LEDs de cada comprimento de onda são acionados, sendo cada cinco LEDs conectados em série a uma fonte de corrente controlada por tensão.

Quatro fotodiodos são conectados ao circuito somador sendo submetidos às mesmas condições de resposta em frequência. O somador empregado possui ganhos DC e de altas frequências tendendo a zero, e isso elimina o ganho causado pela intensidade luminosa solar. Após somar os resultados dos quatro fotodiodos é necessário elevar a tensão elétrica do sinal de modo a adequar os limites de excursão. Também emprega-se a limitação de banda para evitar a propagação de ruídos, atenuando ainda mais as componentes de alta frequência. Por fim, um circuito detector de pico é utilizado para armazenar apenas o valor máximo da senoide detectada e reduzir a taxa de aquisição imposta ao microcontrolador.

Outro trabalho é desenvolvido por YAO *et al.* (2020), que criam o equipamento portátil denominado *crop monitoring and diagnosis* (CGMD). Os autores desenvolvem o aparato para monitorar culturas em linhas. Para eliminar a interferência da iluminância do ambiente é utilizada uma fonte de ondas quadradas em frequência pré-definida. E em conjunto um filtro passa-altas para extrair as características de refletância. Os índices calculados e extraídos são NDVI, RVI, LAI, LDW, LNA e LNC, obtidos em tempo real. As culturas analisadas são arroz e trigo e um dos equipamentos utilizados para comparação é da *Malvern Panalytical*®.

Os dados processados resultam em recomendações de fertilizantes. Um dispositivo comercial usual na área agrônômica para mensurar o NDVI é o *Greenseeker*. O *Greenseeker* é considerado eficaz em produzir bons resultados, embora seja caro e faltem alguns parâmetros agrônômicos. Outro dispositivo mencionado é o *Crop Circle acs-470 Spectrometer*, que pode medir três bandas distintas. O período de modulação é de 50 ms. Diferentes níveis de nitrogênio provocam alterações na reflectância espectral da cultura em diversas bandas específicas. A faixa entre 760 nm a 1.210 nm está fortemente correlacionada com a quantidade de fertilizantes aplicados. Considerando as faixas sensíveis aos três parâmetros agrônômicos de interesse, os autores optaram pelos comprimentos de onda de 730 nm e 810 nm para o emissor.

A operação e controle do aparato é rápida, em torno de 1 s a 2 s. A fonte emissora consiste em um LED e um colimador. A irradiância da luz solar no solo ao meio-dia de um dia claro é tomada como referência. Considerando a baixa frequência de mudança de luz solar, a tecnologia de modulação espectral é usada para distinguir o sinal de luz.

Um filme difusor é usado para garantir uniformidade e a estabilidade da forma do ponto de luz emergente e um colimador ótico para manter a irradiância uniforme em todo o local. O ângulo médio de valor de saída do LED é de 10° e a potência de radiação de 45 mW. Como a cultura a ser medida é em linha, os autores se preocupam em projetar o caminho de luz para evitar interferências de refletâncias da camada entre as linhas vazias. Eles se baseiam em experimentos para definir o diâmetro de abrangência do instrumento, em que o dossel da cultura varia entre 11 cm a 31 cm de altura. Quando a cultura fica mais volumosa é possível que o solo não interfira nas medidas. Os autores determinam que a fonte de luz deve atingir a cultura com a mesma intensidade de 1 W m^{-2} , para a medida de irradiância do sol. Sendo assim, com as dimensões da elipse e o cálculo da intensidade com LED de 45 mW, a intensidade ficou em $0,478 \text{ W m}^{-2}$, sendo necessário usar 2 LEDs dispostos em posições cruzadas.

O fotodiodo detector usado tem como resposta espectral $0,18 \text{ A W}^{-1}$ e para verificar o tamanho e a uniformidade do feixe de luz refletida é usada uma câmera multispectral. A função da lente no fotodetector é coletar difusamente a luz refletida e obtida após a luz emitida, e para isso são usadas lentes Fresnel. Estas lentes conseguem convergir para o foco da lente e concentrar o espectro refletido no centro, ou seja, ampliam a imagem.

Essas têm uma estrutura de anel concêntrica, cada anel mantém as características da curvatura da lente original e o foco permanece inalterado. Logo, o fotodiodo é colocado no plano focal da lente. O foco do comprimento é determinado para ser de 15 mm pelo tamanho do fotodiodo, pois seu tamanho é 30 mm e a espessura da lente de 2 mm. O *software Tracepro®* é utilizado para realizar a modelagem da lente *Fresnel*. Uma fonte de luz paralela é configurada no *software*, que ilumina verticalmente a lente *Fresnel*. O resultado do rastreamento de raios é analisado, onde os feixes paralelos passam pela lente *Fresnel* e são focados em um ponto a 15 mm da lente. Os resultados do rastreamento de raios são utilizados para verificar se a lente *Fresnel* atende aos requisitos de *design*, garantindo que o desempenho de focalização permaneça inalterado.

Para criar a onda pulsada é utilizado o microcontrolador *ATMega32* e um módulo de corrente controlada e constante, sendo que a resolução do microcontrolador é de 0,001. O microprocessador é usado para calcular o NDVI. O condicionamento dos sinais é feito em etapas de conversão do fotodetector para sinal elétrico, filtragem, modelagem e amplificação.

O *software* destes autores consiste em três partes, inicialização, interface I/O e programa de aplicação. O módulo de aplicação é usado para coletar informações, calcular a refletância e acoplar o índice de vegetação com a cultura. Três funções do aparato são: medir, monitorar e diagnosticar. Na função de medição, o sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) é gerado pelo microcontrolador e enviado ao comutador analógico. A interface permite que o usuário insira valores da quantidade de nitrogênio absorvido por 100 kg de grãos, e o valor do *Ratio Vegetation Index* (RVI). O diagnóstico é exibido na tela. Na análise da influência da luz ambiente em diferentes horários, o desvio padrão (DP) máximo é de 0,027 e o coeficiente de variação (CV) máximo é de 9,03% para o NDVI. Para o RVI, o DP é 0,126, e o CV é 6,04%. Os CVs calculados indicam que as medições foram consistentes e confiáveis, mesmo na presença de luz ambiente. Valores baixos de DP sugerem que o instrumento é consistente e confiável em suas medições de NDVI. O aparato construído pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura do aparato designado como CGMD.



Fonte: YAO *et al.* (2020).

Outro dispositivo ativo, usado para identificar adulteração na composição de leite mis-

turado com água, usa espectroscopia NIR para observar a absorção da radiação eletromagnética na região espectral de amostras do produto. É composto de três comprimentos de onda distintos originados por um LED para cada espectro e o fotodiodo PT511 com largura de banda de 900 nm a 1.650 nm, programados através do microcontrolador. Embora com aplicação distinta, utiliza-se este artigo para estudar o condicionamento de sinais para extração das medidas de interesse. O funcionamento também se baseia no chaveamento no qual o microcontrolador origina onda quadrada para cada LED, individualmente (MOREIRA *et al.*, 2016). Os autores enfrentaram desafios na amplificação do sinal devido à baixa corrente produzida pelo circuito, o que o torna suscetível a ruídos.

Para a pesquisa de instrumentos óticos ativos destaca-se a necessidade de analisar aspectos de condicionamento de sinal originado pelo circuito de transimpedância, consolidado para converter a corrente gerada pelos fotodiodos em tensão. Alguns trabalhos são relevantes para este aspecto como (ROCHMANTO *et al.*, 2017), (CARTER; MANCINI, 2017), (MOGHIMI, 2013), (BURR-BROWN, 2000), (CANO; BUONASERA; PEZZOTTI, 2014), (JIMÉNEZ-MÁRQUEZ *et al.*, 2013), (GRAEME, 1995) e (HUANG *et al.*, 2019), os quais tratam principalmente de estudos para evitar correntes de fuga, para adicionar o maior ganho possível no primeiro estágio do circuito de condicionamento de sinais, para evitar ruídos em demais estágios, para considerações AC relacionadas ao capacitor e ao resistor do circuito de transimpedância, entre outros. No geral, os trabalhos que usam fotodiodos seguem os sete passos genéricos: descrever o sinal a ser medido; selecionar o sensor e descrever a saída; determinar o máximo ganho que pode ser atingido; identificar um amplificador ideal para a pré-amplificação, projetar o sensor e o bloco de ganho do pré-amplificador e executar simulações.

2.2.3 Acelerômetros para detecção de inclinação e angulação

Considerando o uso de acelerômetros, o artigo de FAKHRULDDIN; GHARGHAN (2019) trata sobre a identificação de quedas de pessoas. Para certas idades e condições de saúde, a queda dessas pode ser fatal ao permanecer por tempo indeterminado sem assistência. Para monitorar tais condições adversas são propostas as implementações de sensores integrados ao microcontrolador ATmega328P presente na placa da Arduino Pro Mini, com componentes eletrônicos acelerômetros, sensores de batimentos cardíacos, módulo GSM para enviar mensagens e módulo GPS para identificar as coordenadas do paciente.

O foco da busca por este artigo está nos sensores acelerômetros e GPS. O sensor ADXL345 é usado para mensurar parâmetros como *Sum Magnitude Vectors SMV*, *threshold Acceleration (Ath)*, *threshold Time (Tth)* e contadores de atividade e inatividade. SMV representa a raiz quadrada dos três parâmetros de aceleração (A_x , A_y , A_z), e usam esta equação para representar com a sensibilidade em todas as direções, pois não é possível prever para qual lado é a queda. Quando o corpo cai, o SMV cai a zero e uma verificação da atividade do corpo é realizada, se a inatividade persistir por mais de 20

segundos o algoritmo decide por enviar uma mensagem por SMS com informações do paciente e a localização geográfica. Para este presente trabalho busca-se a utilização do acelerômetro para a detecção de ângulo, para calcular a inclinação dada pelas mudanças angulares dos eixos X e Y.

2.2.4 GPS para georreferenciamento e mapeamento de dados

O uso de GPS é fundamental para realização do mapeamento de dados NDVI, e GARCIA-HUERTA *et al.* (2019) usam o módulo GPS de baixo custo u-blox NEO-6M equipado com uma antena de 25 mm x 25 mm e o receptor GNSS comercial Garmin Trex 10 (compatível com GPS e GLONASS). Finalmente, as coordenadas georreferenciadas são obtidas por um receptor Trimble DGPS profissional.

O experimento conta com um trajeto pré-definido para que pedestres possam percorrer com os dois dispositivos, o módulo NEO-6M e o comercial, para manter distâncias uniformes em relação ao solo e mantendo-os em área livre de cobertura que interrompesse a recepção de sinais. A distância total percorrida é de 1.989 m, com tempo total de 25,2 minutos e representando 1.509 amostras.

O autor consegue apresentar uma exatidão superior para o NEO-6M ao comparar com dispositivos comerciais, com valor de erro médio de 1,28 m e desvio padrão de 0,90 m, enquanto o eTrex10 apresenta erro médio de 1,39 m e desvio padrão de 1,16 m.

Este módulo GPS recebe as mensagens no formato *National Marine Electronics Association* (NMEA) e alguns autores utilizam a biblioteca TinyGPS++ para Arduino, o que é o caso de KANANI; PADOLE (2020), que extrai das mensagens as informações de GPGGA (*Global Positioning System Fix Data*) e GPRMC (*Global Positioning Recommended Minimum Specific GPS/Transit data*), as duas sentenças NMEA mais importantes. O autor apresenta as linhas de código usadas para programar em linguagem C pela plataforma da Arduino IDE, e também usa a API do Google Maps para buscar as coordenadas na nuvem *ThingSpeak*, de forma que a localização apareça no mapa com um marcador vermelho. Como considerações finais, concluem que o módulo NEO-6M possui boa exatidão e a taxa de atualização também é razoável para atualizar os locais em mudança.

ISLAM *et al.* (2020) propõem um vidro inteligente baseado em microprocessador que pode fornecer as informações necessárias para pessoas com deficiência visual. O sistema usa algoritmos de aprendizado de máquina para detectar objetos e reconhecer familiares da pessoa cega. As instruções de áudio são enviadas aos ouvidos da pessoa com deficiência visual por meio de fones de ouvido. O sistema proposto se baseia no *Raspberry Pi 3* Modelo B, na câmera Pi e no módulo GPS NEO-6M. O artigo apresenta os resultados de vários experimentos realizados para testar a precisão do sistema. O sistema reconheceu com sucesso a pessoa na frente do vidro com uma precisão de 98,89%. O algoritmo também detectou barreiras e notificou a pessoa cega. O sistema conseguiu

detectar objetos diante da pessoa cega com distâncias entre 2 cm a 400 cm. No geral, o artigo apresenta uma solução inovadora para ajudar pessoas com deficiência visual a obter independência e liberdade em ambientes internos e externos. O sistema proposto é preciso e confiável e tem o potencial de melhorar a qualidade de vida de pessoas com deficiência visual.

Já o estudo de SHI *et al.* (2017) fornece informações sobre a estrutura de arquivos e técnicas de recuperação de dados para dispositivos GPS, que podem ser úteis em uma investigação forense. Como o módulo NEO-6M também fornece dados através do protocolo NMEA o objetivo é entender como extrair as informações necessárias e os principais métodos utilizados. O artigo propõe um novo algoritmo para recuperar registros da NMEA e reconstruir trajetórias de GPS sem depender dos metadados do sistema. O algoritmo usa a técnica de escultura de arquivos para identificar todos os blocos de dados pertencentes aos registros do NMEA e um discriminador para mesclar os blocos de dados em novos registros. O artigo fornece uma explicação detalhada do algoritmo proposto e demonstra sua eficácia por meio de experimentos.

No geral, o artigo apresenta uma contribuição valiosa para o campo da análise forense de GPS, fornecendo uma nova abordagem para recuperar registros do NMEA e reconstruir trajetórias de GPS. O algoritmo proposto foi projetado para funcionar mesmo quando os metadados do sistema não estão disponíveis. O artigo também fornece informações sobre as características e a estrutura intrínseca dos dados de trajetória nos registros do NMEA, que podem ser úteis em outras investigações relacionadas ao GPS. No entanto, no artigo não são apresentadas mais informações sobre as limitações do algoritmo proposto e as áreas potenciais para pesquisas futuras.

2.2.5 Redes sem fio aplicadas ao estudo do comportamento animal e pastagens

O monitoramento remoto possibilita auxiliar na gestão dos animais e também no impacto que eles causam à vegetação. HANDCOCK *et al.* (2009) focam no uso de *Wireless Sensor Networks* (WSN) e apresentam desafios e oportunidades para monitorar o comportamento animal e sua interação com o meio ambiente. O uso excessivo das áreas de pastagens por parte dos bovinos é maléfico ao ambiente e o sobrepasto pode reduzir a diversidade das plantas e cobertura do solo, com riscos de erosão. Conseguir identificar a condição do pasto é um pré-requisito para implementar estratégias adequadas de manejo animal. Imagens multiespectrais de satélite fornecem apenas uma medição indireta das características físicas, e suas utilidades são realizadas através da interpretação e calibração dos dados da imagem.

Os autores HANDCOCK *et al.* (2009) concentram-se em sensoriamento remoto de pastagens, porque em campos há uma heterogeneidade muito grande com várias espécies de gramíneas e solos descobertos. Os resultados demonstram que o GPS precisa coletar uma localização a cada 10 s para prever a seleção de manchas de 10 m² com pelo menos

90 % de precisão. Quando o animal se move lentamente ou em linha reta, o intervalo de amostragem pode aumentar.

Os autores usam os dados de GPS da coleira e sobrepõem os dados de NDVI oriundos de satélites, no qual puderam concluir que os animais evitaram lugares com NDVI mais baixo, e uma avaliação visual confirmou que havia menos pastagem disponível. Os autores mencionam um problema quanto a associação de diferentes sensores com a gama de escalas espaciais e temporais. Enquanto a localização do animal pode se alterar em pequenos intervalos de tempo, o sensoriamento remoto da vegetação, usando sensores aéreos ou espaciais, pode fornecer dados variando de horas a meses, dependendo do sistema, voo ou tempo de órbita e problemas com custo, mão-de-obra ou cobertura de nuvens. Logo, o tempo de imagens remotas pode não corresponder ao comportamento animal em momentos críticos e isso torna problemático o manejo urgente e controle de carga animal em áreas de forragens.

Mesmo as plataformas que oferecem dados mais frequentes possuem restrições, pois geralmente possuem menos bandas espectrais. Isso limita a informação que pode ser extraída das imagens.

Dentre os trabalhos desenvolvidos para monitorar o comportamento de animais, destaca-se um estudo que utiliza redes de sensores sem fio para monitorar o comportamento de bovinos. Um dos dispositivos que compõe o sistema é o colar utilizado no animal integrado com sensores do tipo acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. O objetivo principal é identificar momentos de reprodução, e através do *hardware* e de algoritmos de aprendizagem supervisionada são definidos os dados relevantes para a utilização e identificação automática do ato de monta do bovino macho. Além disso, o autor usa sensores para medir a temperatura e um dispositivo intravaginal dos bovinos, e por fim, a comunicação entre o concentrador de dados e o sistema computacional para detecção de eventos ocorre utilizando a tecnologia *Long Range* (LoRa) (VALADÃO, 2021).

2.3 Fusão e interpolação de dados

Diferentes frentes de pesquisas utilizam fusão de dados como uma ferramenta para unir diversas fontes de aquisição de informações. Em alguns casos a quantidade de dados obtida através de sensoriamento remoto não é suficiente para encontrar respostas desejadas, e VEMURI *et al.* (2021) abordam sobre o uso de fusão de dados para melhorar a classificação e identificação de dados obtidos de sensores remotos. A fusão de dados de sensores multi temporais e multi sensores é explorada como uma área de pesquisa em constante evolução, com desafios a serem superados para melhorar a precisão e a eficiência das técnicas de sensoriamento remoto baseadas em aprendizado profundo.

Diferentes técnicas de fusão de dados podem ser usadas, STATECZNY; BODUS-OLKOWSKA (2015) mostram três técnicas para a modelagem de ambientes subaquáti-

cos: fusão de imagens, fusão de recursos e fusão de informações. O método de fusão de recursos combina resultados processados por diferentes sensores hidrográficos, a fusão de imagens utiliza três tipos de imagens hidrográficas e a fusão de informações é usada para criar uma nova informação, o qual é um processo multinível que combina dados de diferentes classificações. Os autores consideram as técnicas de fusão de dados para resumir informações úteis e apoiar a tomada de decisões.

A interpolação de dados é uma técnica usada para estimar valores desconhecidos no intervalo de um conjunto de dados conhecido. Esta técnica é especialmente útil em áreas onde a coleta de dados pode ser menos concentrada, e é bastante utilizada em aplicações de agricultura de precisão e geociências. O modelo de regressão *Kriging* é amplamente utilizado para dados espaciais, também para a interpolação, e abrange diferentes técnicas, como a *Ordinary Kriging*. O trabalho de SUN; MINASNY; MCBRATNEY (2012) usa *Kriging* para analisar e prever propriedades do solo em locais não observados e para usar ferramentas matemáticas e estatísticas para comparar resultados. Os autores desenvolveram um algoritmo de busca de vizinhança local e compararam os resultados de suavidade dos mapas variando o número de vizinhos para valores de pH do solo. A conclusão é que a ferramenta desenvolvida auxilia eficientemente nas variâncias e relações variáveis.

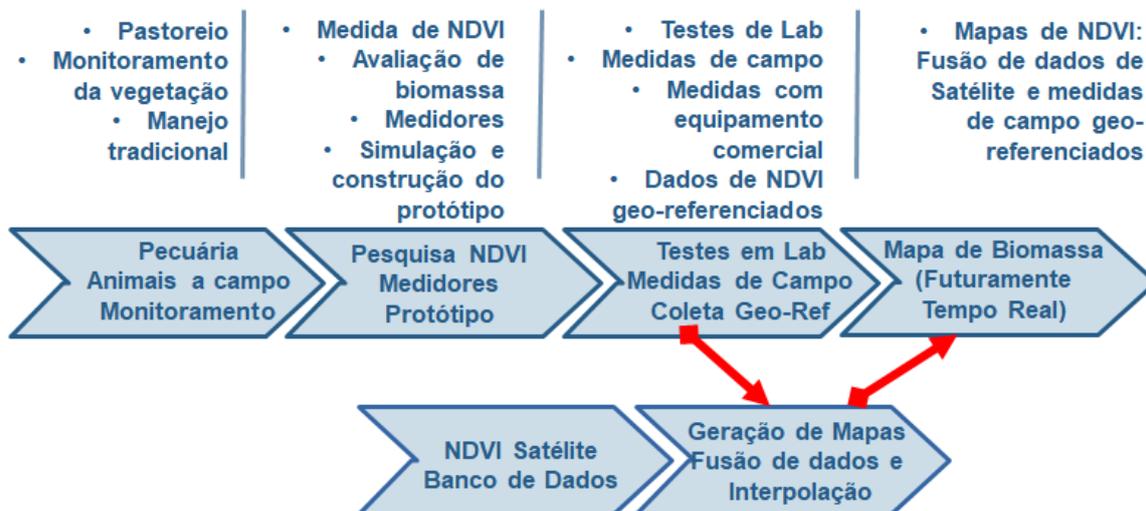
De acordo com GOOVAERTS (1997), o algoritmo de regressão linear de mínimos quadrados (*Kriging*) é essencial para estimar valores de atributos em locais não amostrados. Assim, o presente trabalho utiliza este algoritmo com a técnica *Ordinary Kriging*, que trabalha com flutuações locais da média, limitando o domínio estacionário do padrão de inserção à vizinhança local.

3 METODOLOGIA

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema portátil georreferenciado para medir o NDVI, e os dados são integrados às medições provenientes de imagens de satélite. Neste capítulo são descritas, detalhadamente, todas as etapas de projeto e desenvolvimento do sistema proposto, do qual os resultados são expostos no Capítulo 5 deste trabalho. Na Seção 2.2 direcionou-se a busca por trabalhos relacionados que fizessem o uso de dispositivos específicos, como o acelerômetro ADXL335, o GPS NEO-6M, o uso de medidores de NDVI e o microcontrolador ESP32, os quais são utilizados neste presente trabalho. Define-se a necessidade de utilizar o acelerômetro para realizar o cálculo de orientação da placa eletrônica final, a qual se deseja que esteja direcionada para o objeto a ser mensurado. Além disso, conforme analisado na Seção 2.2.5, a análise do comportamento dos bovinos pode ser extraída através deste dispositivo, e projeta-se como uma proposta futura de implementação que agregará ao estudo da interação dos animais com a área de pastagem. O GPS serve para a recepção dos dados relevantes para realizar o georreferenciamento das medidas de NDVI. O microcontrolador ESP32 é escolhido pela capacidade de processamento oferecida e agregando possibilidades de implementações de novas funcionalidades.

A Figura 7 exhibe os passos desenvolvidos durante a efetivação deste trabalho. Inicia-se pelo estudo da área de aplicação, suas limitações e possibilidades de melhorias das técnicas de manejo dos bovinos e das pastagens. Dentre as técnicas utilizadas entre diferentes frentes de pesquisa está o NDVI, que passa a ser objeto de estudo para avaliação de biomassa e construção do protótipo proposto neste trabalho. Para a criação do protótipo são realizados diferentes testes, até que a construção dos mapas fosse possível. Como área de aplicação define-se a zootecnia e a agronomia, e para adentrar ao assunto e verificar as necessidades reais, diferentes experimentos de medição de NDVI foram acompanhados na Estação Experimental Agronômica da UFRGS.

Figura 7 – Esquemático da metodologia.

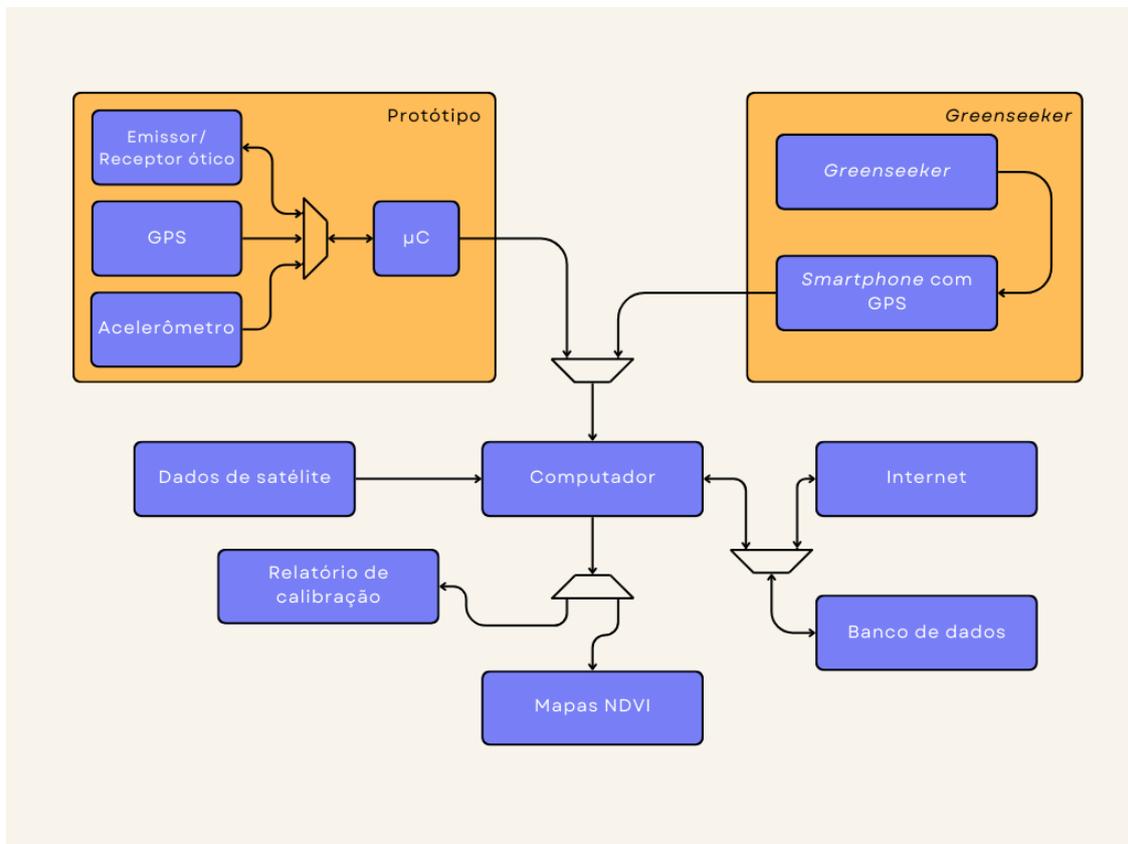


Fonte: Criado pelo autor.

O objetivo principal trata sobre a criação de mapas de NDVI com coleta de informações locais, remotamente e vislumbra-se efetivar esta coleta via dispositivo embarcado em bovino. Para isso, o trabalho contempla a utilização de medidor NDVI, seja comercial ou protótipo, para a construção final do mapa. Os demais blocos que contemplam o trabalho são utilizados para condicionar as informações relevantes e salvá-las para posterior processamento. Existem dois blocos que possibilitam as medições de NDVI, o bloco indicado como protótipo e o bloco indicado como *Greenseeker*, e ambos abordam formas de extração de dados de NDVI, dividindo o trabalho entre um dispositivo comercial e um protótipo, permitindo a comparação entre ambos. A divisão está representada na Figura 8, na qual os dois blocos na cor laranja indicam os dispositivos utilizados neste trabalho. Os dados extraídos pelos dispositivos (protótipo ou *Greenseeker*) são processados para a construção dos mapas, como pode ser visto através do diagrama de blocos simplificado.

Primeiramente, o *Greenseeker* é utilizado como medidor NDVI, que possibilita os primeiros testes em campo, coleta de dados e teste da integração GPS e acelerômetro, assim como a comparação de dados do módulo GPS com as coordenadas recebidas pelo *smartphone*. Todas as informações coletadas através do *Greenseeker* são utilizadas para construir mapas que sejam relevantes para a cultura, e essas são oriundas de arquivo do tipo CSV extraído da memória *flash* do microcontrolador e usado externamente em no algoritmo de criação dos mapas, ou seja, o mapeamento não é realizado através do microcontrolador. É importante notar que o *Greenseeker* não se comunica diretamente com o microcontrolador, mas os dados podem ser extraídos em formato CSV, assim como os dados do protótipo. Com o arquivo CSV, as informações são processadas para a geração de mapas.

Figura 8 – Diagrama de blocos do processo.



Fonte: Criado pelo autor.

O diagrama simplificado apresenta três blocos principais para a aquisição de informações. O primeiro bloco refere-se ao ADXL335, um acelerômetro, e seu uso é justificado pela necessidade de que a medição de NDVI seja direcionada ao objeto a ser mensurado, exigindo que o instrumento esteja apontado para o solo. Portanto, este instrumento é utilizado para medir a orientação nos planos X e Y, evitando a gravação de dados quando o dispositivo está mal posicionado. O GPS é utilizado para obter informações de tempo e coordenadas geográficas, usadas para georreferenciar as medições de NDVI e manter um histórico para estudos futuros e tomada de decisões na pecuária.

Após os blocos medidores de NDVI, representados em cor laranja, há o computador. O computador é utilizado como hospedeiro, em que os dados de horário e NDVI georreferenciado são usados para realizar a interpolação e fusão de dados com informações obtidas de imagens de satélite. A metodologia ainda contempla a etapa de calibração, em que os dois dispositivos medidores de NDVI são comparados. Por fim, são criados os mapas.

Este capítulo está subdividido em seções que explicam cada etapa de pesquisa e desenvolvimento do projeto. Na Seção 3.1 é apresentada a proposta de prototipação, o medidor comercial e exemplo de mapeamento com a biblioteca estudada. Na Seção 3.2 é apresentada a ferramenta de obtenção de dados NDVI por imagens de satélite. A Seção 3.3 é

destinada a mostrar a área experimental utilizada para trabalhos de campo. Na Seção 3.4 é desenvolvida a arquitetura do protótipo, com estudos dos periféricos e algoritmos para controle dos mesmos. Como visto, a criação do mapa final é realizada independentemente do sistema microcontrolado ou da forma de aquisição de dados NDVI, e pode ser vista na Seção 3.5. Já a Seção 3.6 consagra a etapa de fusão de dados captados pelo sistema proposto e por imagens de satélite usando algoritmos de regressão.

3.1 Medida de NDVI

Neste trabalho, as medidas de NDVI com sistemas portáteis são realizadas das duas seguintes formas: através de um dispositivo comercial consolidado para este tipo de medida e através do protótipo proposto e desenvolvido, apresentado no Capítulo 4. O medidor comercial *Greenseeker* possui mostrador de valores e a capacidade de comunicação via *Bluetooth*. Este medidor comercial também precisa ser acionado através de um botão por meio do operador. Trata-se de um equipamento portátil que satisfaz as necessidades de coleta do índice desejado.

Uma parte deste estudo é conduzida com um dispositivo comercial, com o qual é possível criar os mapas almejados. No entanto, o objetivo final de integração e incorporação requer a construção do protótipo destacado no Capítulo 4. Presume-se que as medições de NDVI sejam derivadas tanto do dispositivo comercial quanto do protótipo, para diferentes segmentos propostos neste trabalho. Contudo, para as medições com o dispositivo comercial, não há comunicação com o microcontrolador. O microcontrolador é utilizado para adquirir as coordenadas geográficas, e na fase de testes de campo para a integração entre o acelerômetro e o GPS.

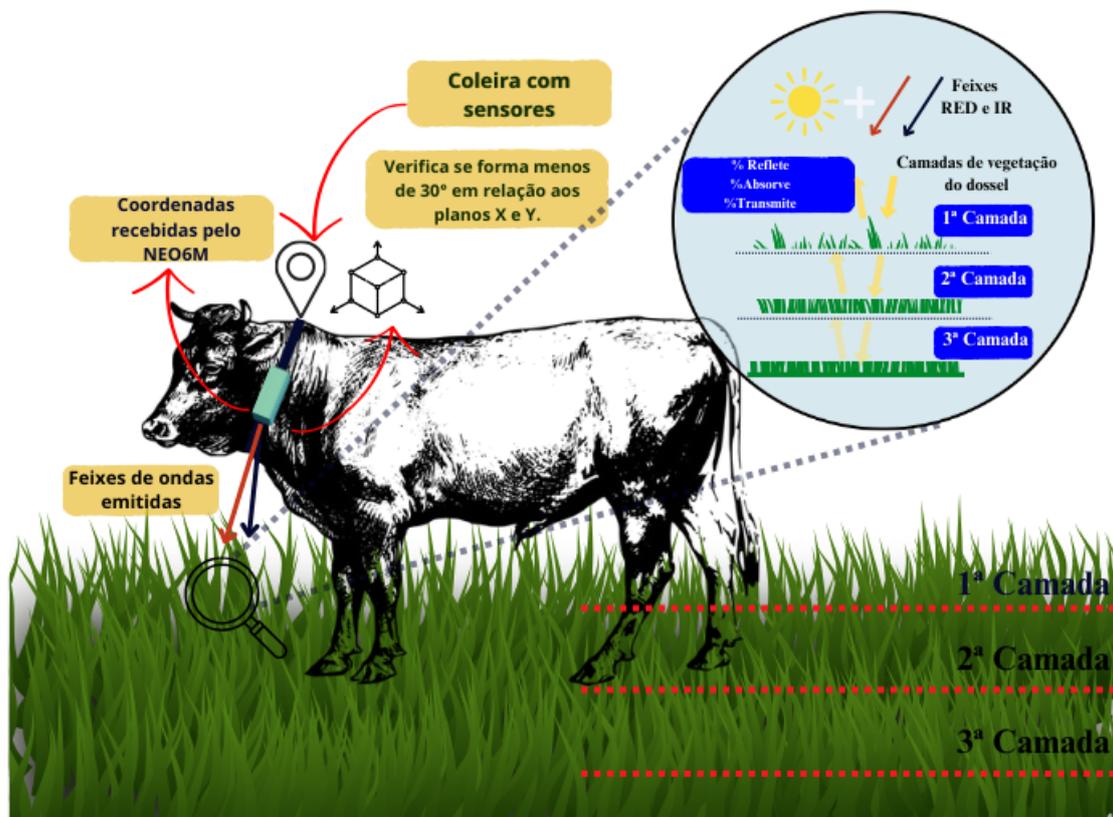
O projeto do protótipo é desenvolvido através do estudo de instrumentação optoeletrônica, em que são pesquisados conceitos e utilizações práticas dos mais variados tipos disponíveis no mercado. Sendo assim, busca-se conhecer as necessidades da área de estudo junto aos departamentos de agronomia e zootecnia da UFRGS, em que são verificados os medidores de NDVI utilizados por ambos. Na agronomia, os medidores NDVI passivos são suficientes para a abordagem e interpretação de ciclos das culturas desenvolvidas. Na zootecnia, o uso do medidor ativo é dado para medições do comportamento de fatores controláveis, como o corte de gramíneas, a umidade, fertilizantes, entre outros. Esta etapa de pesquisa é considerada relevante para entendimento das diferenças entre dispositivos passivos e ativos, não apenas tecnicamente, mas na análise de resultados e necessidades da área de aplicação.

Após a definição do tipo de medidor a ser desenvolvido, o foco do estudo passa a ser o desenvolvimento aplicando eletrônica analógica. Com disponibilidade de acesso ao dispositivo comercial *Greenseeker*, este passa a ser referência para os resultados construtivos. A prototipação envolve etapas de caracterização de LEDs, identificação de componentes

que contemplem as faixas de espectro a serem medidas, o processamento de sinais, testes em blocos, simulações e ajustes e *layout* em circuito impresso. Por fim, os resultados adquiridos através do protótipo devem ser comparados ao dispositivo comercial em coletas de campo.

Esta etapa do trabalho dar-se-á pela integração dos dispositivos capazes de receber as coordenadas geográficas e as medidas de NDVI. Além disso, deseja-se incorporar estes dispositivos em uma coleira para bovinos, em que seja possível extrair os valores de medida e associá-los às coordenadas geográficas e horário de coleta. Neste primeiro instante os dados devem ser salvos na memória *flash* do microcontrolador ESP32 no formato *Comma Separated Values* (CSV) e na sequência deve ser criado o mapeamento das coordenadas e seus respectivos valores de NDVI. Percebe-se que a utilização da memória interna do módulo microcontrolador é de relevante importância, e para a utilização prevista considera-se satisfatória e suficiente, sendo que a capacidade de armazenamento é de 4.194.304 *Bytes* (4 MB). O exemplo de disposição do colar a ser embarcado ao pescoço do animal pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Representação do posicionamento do dispositivo embarcado.



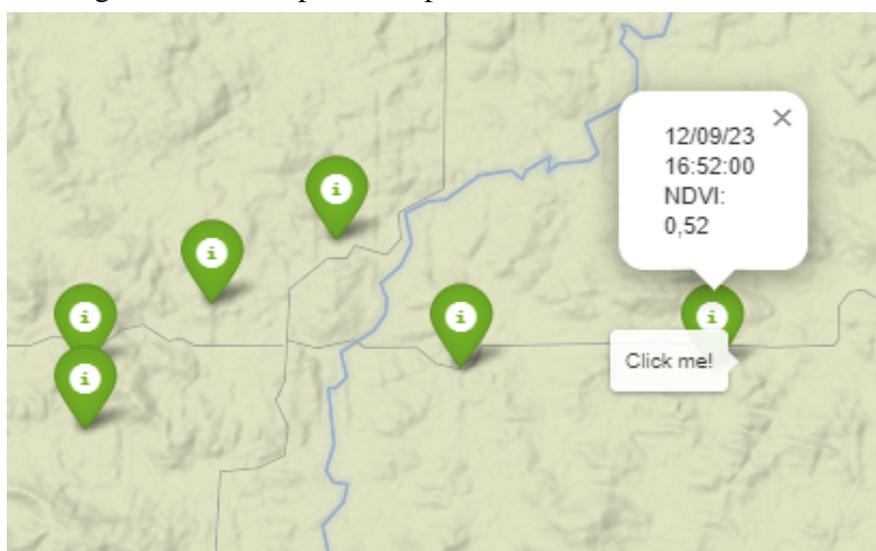
Fonte: Criado pelo autor.

Embora neste trabalho o dispositivo não seja embarcado à coleira do bovino, as características são elaboradas para poderem satisfazer tais necessidades. Percebe-se haver uma variação da altura em que as medidas de NDVI serão realizadas, e essa depende do posi-

cionamento do animal, seja quando o bovino estiver pastando, caminhando, ruminando, deitado, entre outros. Isso deve ser considerado ao gravar o valor mensurado, visto que não está prevista a medida de altura do dispositivo em relação ao solo. O projeto prevê a eliminação de dados discrepantes que venham indicar altura que gere dados errôneos. Acredita-se não ser necessário considerar uma altura muito distante da gramínea, visto que em raros momentos a região do pescoço estará em uma altura acima da condição normal do animal (um exemplo deste momento excepcional seria o período de monta destes animais). Estas análises são relevantes porque os dispositivos emissor e receptor de ondas eletromagnéticas apresentam variações na intensidade de espectros mensurados e, quando há uma distância muito próxima, ocorre a saturação do circuito de condicionamento de sinais, todavia quanto maior a distância, menor a capacidade de captação do sinal, devido à dispersão dos sinais espectrais. Sendo assim, propõe-se neste trabalho o estudo da influência da altura à medida de NDVI.

O uso do acelerômetro neste projeto é designado pela necessidade de reconhecer e condicionar a mensuração do NDVI, de forma que o dispositivo esteja paralelo ao plano XY e extraia informações da pastagem. O uso do módulo GPS permite que as medidas de NDVI sejam associadas às coordenadas geográficas, permitindo que as mesmas sejam mapeadas e sejam criados históricos baseados nas datas de coletas. Por fim, todos os dados podem ser facilmente identificados através da biblioteca *Folium* em linguagem *Python 3*, na qual é exibida como o exemplo da Figura 10, em que se pode atribuir aos pontos coletados informações relevantes ao produtor e de fácil acesso ao mesmo. No decorrer do texto são apresentadas outras funções possíveis de ser implementadas com esta biblioteca.

Figura 10 – Exemplo de mapa usando a biblioteca *Folium*.



Fonte: Criado pelo autor.

Com a biblioteca *Folium* é possível construir mapas com valores de coordenadas ge-

ográficas como entrada, e associá-las às informações desejadas. A mesma biblioteca permite a utilização de diferentes tipos de fundo, mapas com representação do relevo, da vegetação, e entre outros. Para o exemplo da Figura 10, foram passadas informações de data, hora e NDVI para cada uma das coordenadas geográficas. Mapas como este são propostos e podem ser construídos com os dispositivos utilizados neste projeto para extração das informações.

Para o desenvolvimento do projeto é previsto o uso do dispositivo *Greenseeker* acionado com intervalo de tempo pré-estabelecido e conectado via *bluetooth* com um *smartphone* para receber os dados de NDVI e as coordenadas geográficas dos pontos de coleta. Além disso, opta-se por utilizar um acelerômetro para verificar a orientação do dispositivo *Greenseeker* (exibido na Figura 11), que deve estar direcionado para o solo com o intuito de eliminar dados errôneos causados por possíveis desajustes oriundos do movimento do bovino, simulando a ideia principal de que o dispositivo estaria preso junto ao corpo do animal. Também seria viável a escolha de giroscópio, mas projeta-se como trabalho futuro o uso de acelerômetros para extrair o comportamento dos animais, quando embarcado a uma coleira de bovinos.

Figura 11 – Dispositivo *Greenseeker*.



Fonte: Criado pelo autor.

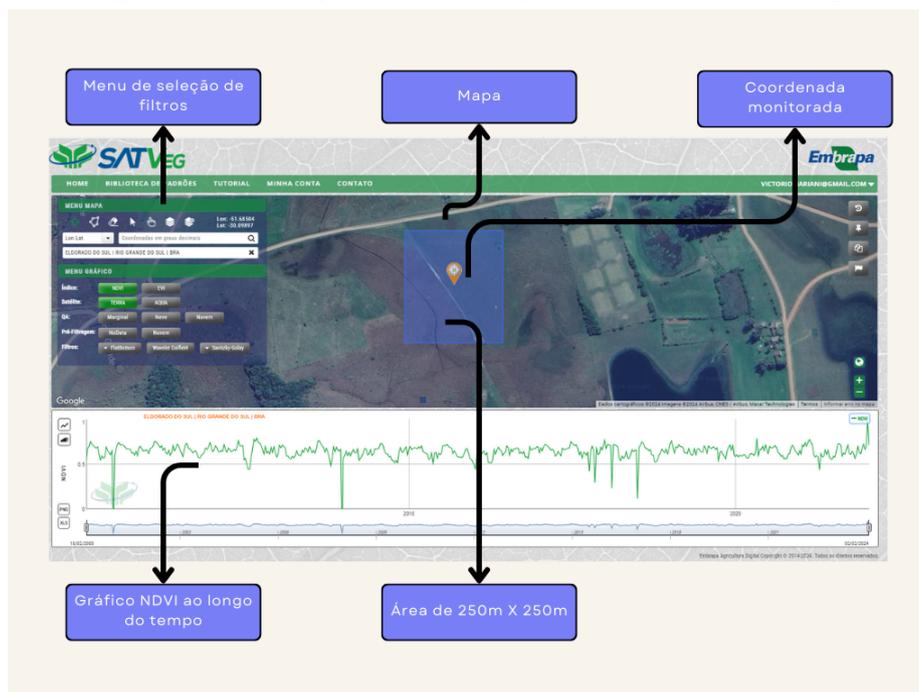
O *Greenseeker* é um analisador de culturas que mede o vigor da planta através da luz detectada, exibindo o NDVI na tela LCD. O equipamento emite luz com espectro em dois comprimentos de onda, vermelho (660 nm) e infravermelho próximo (780 nm), com largura de banda de 25 nm. Por ser um dispositivo ativo pode compensar variações de luminosidade ambiente, e isto oferece uma vantagem em relação aos sensores passivos.

Com os índices coletados e georreferenciados, é possível criar os mapas como mostrado na Figura 10. Além disso, é proposto o uso de algoritmos de aprendizagem de máquina, como o K-NN e o *Kriging* para criação do mapa de calor que representa uma interpolação de valores de NDVI para uma área maior considerando pontos coletados na vizinhança. No decorrer deste capítulo seguem sendo apresentadas seções que correspondem a metodologia utilizada para cada um dos procedimentos adotados para obtenção do objetivo principal.

3.2 Mapa de NDVI fornecido por satélite

O objetivo do trabalho é mensurar o NDVI em uma área de campo com gramíneas destinadas ao pastejo de bovinos, sendo essas cultivadas ou nativas. Os pontos de medição são aleatórios, visto que não é possível escolher por onde o gado se movimenta, e no final os resultados serão interpolados e comparados com medições realizadas via imagens de satélite através da ferramenta SatVeg da Embrapa, que oferece a possibilidade de imprimir o NDVI de determinadas áreas com resolução espacial de 250 m. Uma típica resposta extraída desta ferramenta pode ser vista na Figura 12, na qual ao selecionar uma coordenada geográfica é dado o valor de NDVI estimado para a área de resolução espacial do satélite, e o gráfico abaixo permite a visualização do histórico de valores com periodicidade de 16 dias.

Figura 12 – Exemplo de visualização da ferramenta SatVeg.



Fonte: Adaptado de Embrapa Agricultura ©.

São utilizados dados desta ferramenta para a interpolação através de algoritmos de

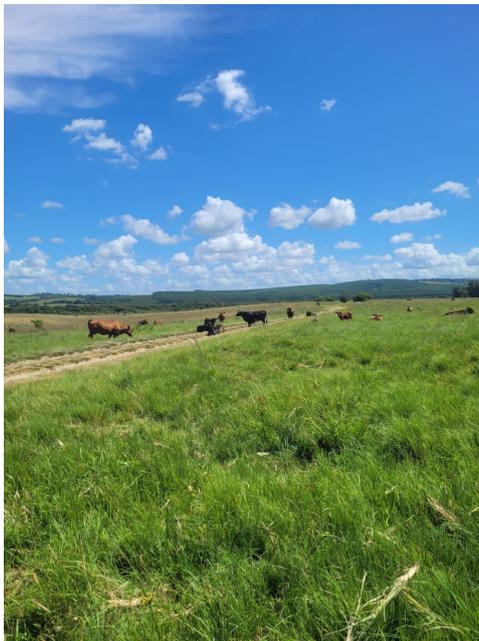
regressão. Para isso, são verificados os *pixels* que correspondem à área experimental e o respectivo valor de NDVI que esteja relacionado ao dia de coleta. Neste trabalho, os dados de imagens de satélite são usados para realizar a fusão com os valores de NDVI oriundos dos equipamentos portáteis. Todas as análises são realizadas em campo destinado à produção agropecuária, apresentado na Seção 3.3.

3.3 Área experimental

A aquisição de dados ocorre na Estação Experimental Agronômica (EEA) da UFRGS em Eldorado do Sul - RS, em áreas destinadas à pesquisa, sendo gerenciadas pelo Grupo de Pesquisa em Ecologia do Pastejo (GPEP) do curso de zootecnia da UFRGS. O GPEP já realiza pesquisas associadas ao manejo de bovinos que se dão através de coletas e estudos do comportamento em pastagens cultivadas, na qual utilizam o *Greenseeker*, além de imagens de satélite para mensurar o NDVI.

A Figura 13 exibe o tipo de vegetação de campo nativo em que foram extraídas amostras de dados de NDVI.

Figura 13 – Campo nativo da Estação Experimental Agronômica (EEA).



Fonte: Criado pelo autor.

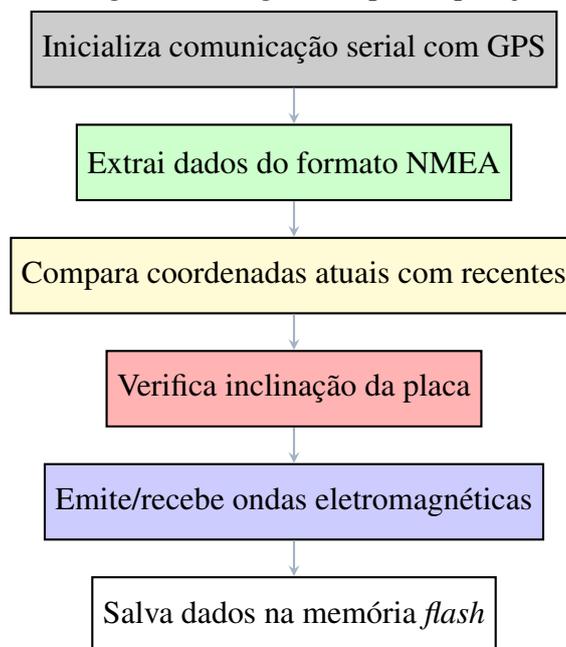
Nesta imagem é possível verificar a variedade de gramíneas que compõem uma área de campo nativo. A quantidade de animais sobre a vegetação é fator determinante para o tempo de consumo e, conseqüentemente, a altura da forragem. Mesmo uma área com maior cobertura de vegetação pode apresentar NDVI baixo, pois a taxa de massa verde disponível pode ser baixa, tendo em vista que algumas dessas plantas são sazonais e, quando encerram o ciclo, perdem características nutricionais, e deixam de ser palatáveis

aos bovinos.

3.4 Arquitetura do protótipo

O protótipo é um instrumento inteligente com sensores de luminosidade, posição (GPS) e orientação (acelerômetro). Efetiva-se o projeto construtivo do protótipo para mensuração do NDVI e posteriormente os dados devem ser adquiridos pelo microcontrolador, em que a aquisição é condicionada por alguns fatores como o ângulo de inclinação do dispositivo, as últimas coordenadas recebidas, periodicidade da aquisição e o salvamento das informações. Sendo assim, as informações das próximas subseções remetem ao estudo e aplicações de técnicas para a aquisição dos dados. O diagrama de blocos da Figura 14 exibe a ordem de processamento do algoritmo desenvolvido.

Figura 14 – Diagrama do algoritmo para aquisição de dados.



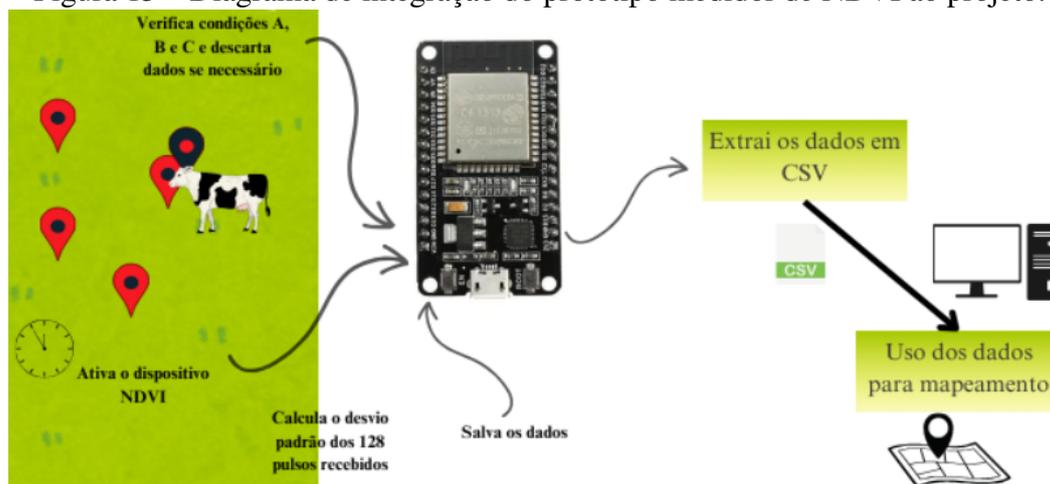
Fonte: Criado pelo autor.

É possível perceber como são importantes os módulos acelerômetro, GPS e o equipamento *Greenseeker* para a elaboração deste trabalho, e a metodologia de utilização de ambos é apresentada nas Subseções seguintes 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.

Parte do trabalho é contemplada com o uso do dispositivo comercial *Greenseeker*, o qual possibilita alcançar o objetivo geral que é o mapeamento do índice de vegetação. Entretanto, para agregar ao projeto construtivo capaz de ser embarcado, propõe-se a construção do protótipo, conforme exibido no Capítulo 4 e a integração do mesmo ao microcontrolador é tratada nesta seção. A Figura 15 mostra a interação do protótipo com os módulos usados como condicionantes que extraem informações relevantes para a produção. A condição A é verificar se a distância entre o ponto geográfico atual está a uma

distância superior a 5 m dos últimos quatro pontos mensurados. A condição B refere-se a inclinação do dispositivo verificada através do acelerômetro, com limiar ajustado para 30°. A condição C é dada pela validação das medidas de NDVI realizadas. Caso todas as condições sejam satisfeitas, os dados extraídos são salvos na memória *flash* do microcontrolador e podem ser facilmente extraídos para a elaboração dos mapas.

Figura 15 – Diagrama de integração do protótipo medidor de NDVI ao projeto.



Fonte: Criado pelo autor.

Conforme pode ser visto, ao considerar o equipamento embarcado na coleira da vaca, as medidas podem ser programadas para ocorrerem em intervalos de tempo conforme a necessidade imposta pelo usuário. As coordenadas são recebidas, calcula-se a distância entre os últimos pontos mensurados, e cria-se a condição para evitar o armazenamento de medidas repetidas. A inclinação da placa também é verificada, e caso as condições sejam satisfeitas, o protótipo medidor de NDVI é acionado, emitindo 128 pulsos que caracterizam uma onda quadrada de 1 kHz para cada um dos comprimentos de onda. O cálculo do NDVI é dado pela média dos valores, conforme projetado, e assim são salvas as informações na memória *flash* do microcontrolador.

3.4.1 Utilização do módulo GPS NEO-6M para obter coordenadas geográficas e horário

O módulo GPS NEO-6M é um receptor GPS popular que pode ser usado para obter a localização geográfica e outras informações relacionadas. Neste trabalho, o módulo GPS é usado para obter as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e o horário.

A biblioteca *SoftwareSerial* é usada para se comunicar com o módulo GPS via *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) em uma taxa de transmissão de 9600 *baud*. O módulo GPS envia dados no formato NMEA, o qual é uma especificação de formato de mensagem para dados de navegação. Além disso, é necessário converter as coordenadas geográficas no formato graus, minutos e décimos de minuto (DDM) para

o formato decimal (DD), através de função, criada neste trabalho, e salvar a latitude e longitude neste último formato. Também, é criada uma função para ler e processar as mensagens NMEA recebidas do módulo GPS. A função procura mensagens NMEA da estrutura GPGGA, que contém informações sobre a latitude, longitude e horário. Quando uma mensagem GPGGA válida é detectada, a função extrai a latitude e longitude e as converte para o formato decimal. Em seguida, as coordenadas geográficas e o horário são salvos em um arquivo no sistema de arquivos *Serial Peripheral Interface Flash File System* (SPIFFS) do dispositivo.

A função criada para salvar os dados também implementa um processo de verificação, no qual verifica se as coordenadas diferem das últimas 4 coordenadas recebidas antes de salvá-las no arquivo. O cálculo para verificação de diferença é dado pelo cálculo de distância entre a coordenada atual e as anteriores, e se a distância for menor que 5 metros, considera-se serem coordenadas semelhantes e a atual é desconsiderada, não salvando os dados coletados, assim economiza-se energia ao não acionar o medidor de NDVI. Isso é feito para evitar armazenar, desnecessariamente, coordenadas semelhantes.

3.4.2 Aquisição de medidas de orientação

Continua-se o estudo dos dispositivos exibidos na Figura 8, com ênfase ao acelerômetro e como é utilizado neste projeto. O acelerômetro é um dispositivo crucial em muitas aplicações que requerem a medição de aceleração em dispositivos eletrônicos, como exemplificadas no Capítulo 2. É um dispositivo eletrônico que mede a aceleração linear em seus três eixos x , y e z , os sinais de aceleração são convertidos em sinais elétricos proporcionais à força aplicada.

O uso do ADXL335 mede a aceleração nos três eixos com sensibilidade suficiente para a premissa a ser suprida neste experimento. Nesta aplicação, se deseja que o instrumento se mantenha posicionado e direcionado para o solo. O princípio de operação baseia-se na detecção da variação de velocidade linear aplicada ao acelerômetro, que pode medir a aceleração em unidades de g , onde $1 g$ é igual a $9,8 \text{ m s}^{-2}$. Os sinais elétricos produzidos podem ser lidos por um microcontrolador, que processa essas informações para determinar a orientação e o movimento da placa em que o acelerômetro está instalado. Para isso, é criado o código em linguagem C para ajustar a força gravitacional conforme a angulação desejada. Os limiares definidos neste projeto são 30° em relação a ambos os eixos, x e y .

A configuração inicial envolve a conexão física do acelerômetro ao microcontrolador, bem como a definição dos pinos de entrada apropriados. Neste projeto, o acelerômetro está conectado ao ESP32 nos quais os pinos de saída X, Y e Z são conectados aos pinos GPIO do microcontrolador. No código, o procedimento ocorre pela conversão dos sinais analógicos gerados pelo dispositivo em valores digitais utilizando os ADCs presentes no microcontrolador, no qual os valores analógicos são lidos e convertidos em unidades de

aceleração gravitacional (g).

Uma vez adquiridos os valores de aceleração nos eixos X, Y e Z, é possível interpretar esses dados para obter informações sobre a orientação e movimento do dispositivo. Através desses valores são apresentados os cálculos de ângulos de *pitch* e *roll* realizados através das Equações 3 e 4.

Para o ângulo de inclinação em relação ao eixo X (*pitch*):

$$pitch = \arctan(z_g, x_g) \cdot \frac{180}{\pi} + 180 \quad (3)$$

Para o ângulo de inclinação em relação ao eixo Y (*roll*):

$$roll = \arctan(y_g, x_g) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

Na qual:

- x_g é a aceleração no eixo X,
- y_g é a aceleração no eixo Y, e
- z_g é a aceleração no eixo Z.

Essas equações utilizam a função arco tangente (\arctan) para garantir que os ângulos sejam calculados em todo o intervalo de 360 graus, usando a Equação 5.

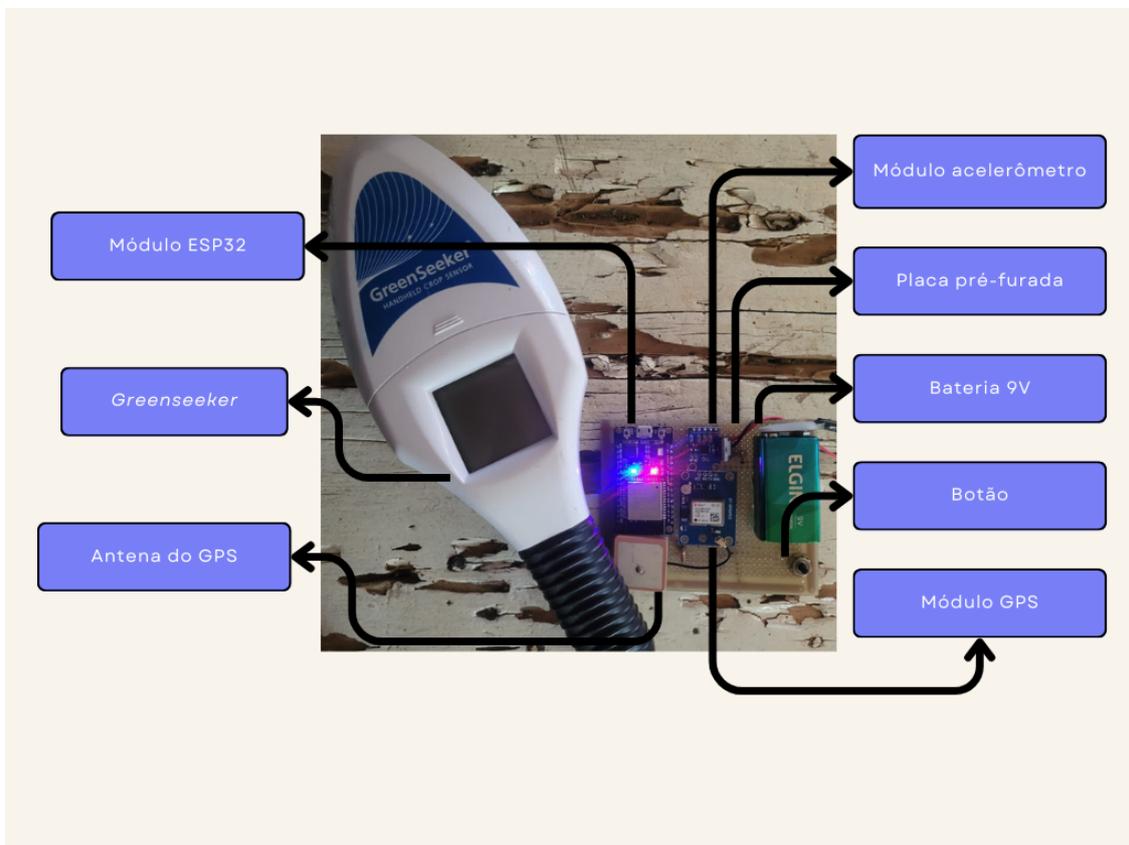
$$\theta = \arctan\left(\frac{y_g}{z_g}\right) \quad (5)$$

Na qual θ é o ângulo de inclinação. Essa equação é derivada da geometria básica e assume que a placa está em queda livre, o que significa que a única força atuando sobre ela é a força gravitacional. Para obter uma medição mais precisa do ângulo de inclinação, o código utiliza uma janela de tolerância de ± 5 graus em torno do valor ideal de 30 graus no eixo y. Se o valor medido estiver dentro dessa janela, o código assume que a placa está paralela ao plano XY e prossegue com as outras operações. Caso contrário, o código assume que a placa não está paralela ao plano XY e não executa as outras operações.

3.4.3 Uso do *Greenseeker*

Como visto no início da Seção, o *Greenseeker* é um equipamento portátil e não é conectado ao microcontrolador, mas neste projeto também é utilizado como meio de apresentar resultados diretamente relacionados ao objetivo principal. Com isso, a proposta de utilização desse, é coletar valores de NDVI em 50 pontos diferentes e com intervalos de 1 min. A coleta de dados é executada de forma aleatória sob a área de pastagem de campo nativo e as respostas enviadas via *Bluetooth* e salvas correlacionadas à coordenada geográfica recebida pelo *smartphone*. Logo, as primeiras medições são realizadas com a integração dos módulos e microcontrolador e o *Greenseeker*, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Placa criada para interconectar os periféricos ao microcontrolador e o *Greenseeker*.



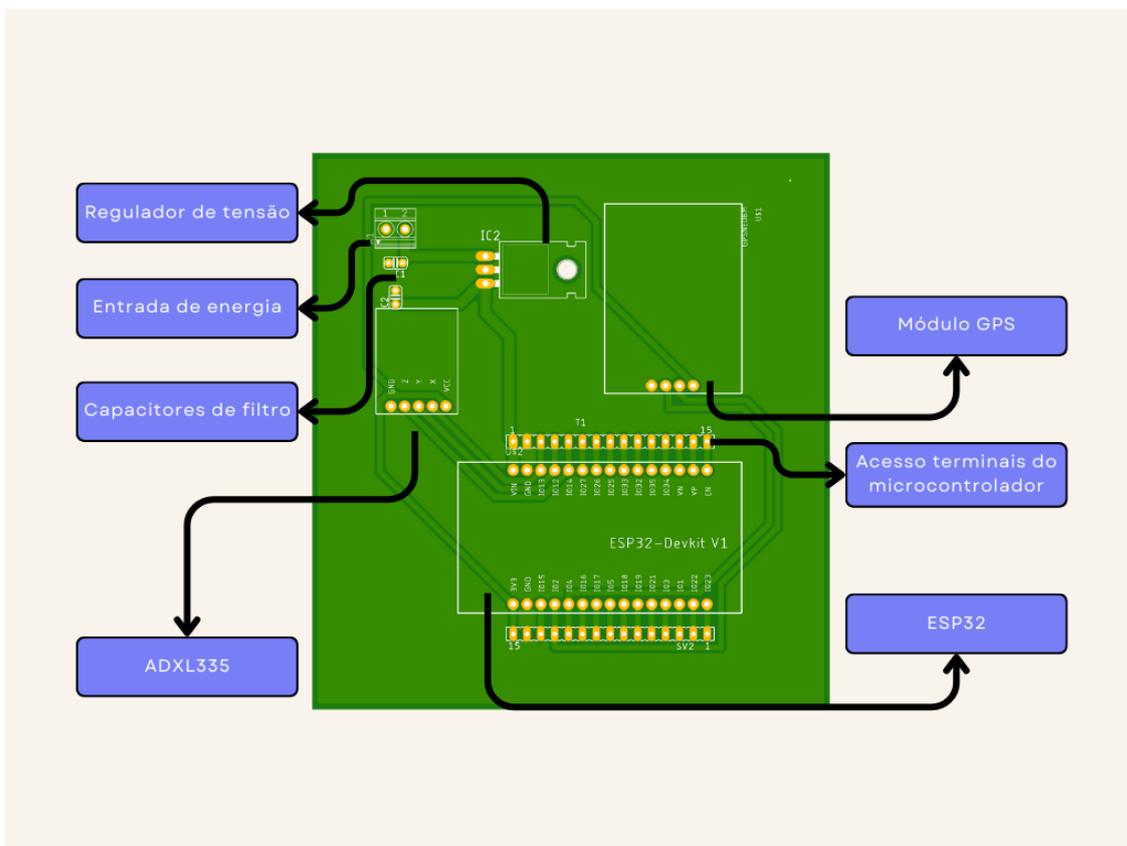
Fonte: Criada pelo autor.

Percebe-se que a montagem da placa é provisória e ocorre através de uma matriz de contatos perfurada. O gatilho para processar as informações e salvar a coordenada geográfica recebida é efetivado através da instalação de um botão, servindo como condicionante para acionamento do circuito. Tanto o gatilho do *Greenseeker* quanto o botão são acionados no mesmo ponto geográfico, e assim as informações podem ser utilizadas para a elaboração dos mapas, bastando apenas extraí-las da memória do microcontrolador.

3.4.4 Placa de circuito impresso

A integração de todos os sensores ao microcontrolador é concretizada através do projeto de circuito impresso em que são designados pinos sobressalentes para conexões futuras ao microcontrolador, como o medidor NDVI que é projetado usando três pinos do microcontrolador, dois para o chaveamento dos transistores e um para ler e converter o sinal de tensão mensurado pelo dispositivo receptor. A placa em sua versão final pode ser vista na Figura 17. Considerando que a tensão de alimentação para o circuito emissor e para o circuito receptor é projetada para o uso de baterias de 9V, faz-se o uso de um regulador de tensão para manter a tensão necessária para o funcionamento do microcontrolador e módulos sensores adicionais.

Figura 17 – Placa de circuito impresso para o microcontrolador.



Fonte: Criada pelo autor.

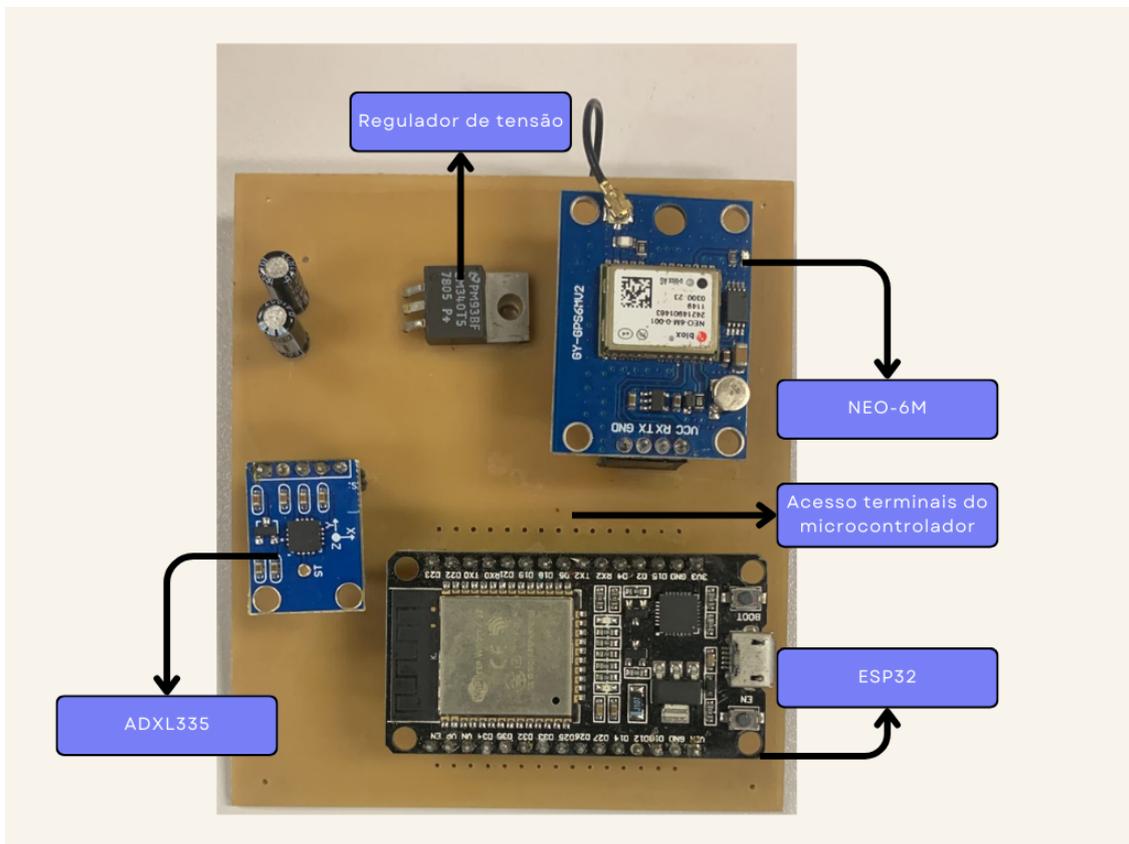
O circuito controlado pela ESP32 tem como intuito analisar condições periodicamente, armazenando dados relevantes para a tomada de decisão de produtores agropecuários. Para isso, a periodicidade é definida previamente e sempre que o monitoramento for acionado o dispositivo deixa a economia de energia e inicializa a comunicação serial com o módulo GPS e extrai os dados no formato NMEA. Este formato é convertido e as informações são comparadas com coordenadas geográficas já armazenadas anteriormente. O objetivo de comparar as cinco últimas coordenadas geográficas com a atual é desprezar ou não a medida, pois caso a vaca não tenha se movido durante o intervalo de tempo, não é necessário executar as medições e conseqüentemente economiza energia e não armazena dados repetidos.

Também é verificada a inclinação da placa de circuito impresso, pois a mesma mantém a orientação do dispositivo medidor NDVI, e caso este esteja com uma inclinação maior que 30° , as medidas também não são extraídas, visto que não condizem com NDVI da gramínea e é necessário reajustar a posição do dispositivo. Caso todas as condições anteriores sejam satisfeitas, o dispositivo gera 128 períodos na frequência de 1 kHz para os LEDs vermelhos e mede a amplitude refletida da mesma, posteriormente o processo é repetido para os LEDs infravermelhos. O processamento dos dados coletados é executado pelo cálculo do NDVI e por fim são salvos os dados de GPS, tempo e NDVI na memória

flash.

A elaboração da placa de circuito impresso resultante pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 – Placa para processamento das informações recebidas.



Fonte: Criada pelo autor.

Percebe-se na imagem o uso de um regulador de tensão para manter a tensão de saída constante em 5 V, tensão de alimentação do microcontrolador. A alimentação dos periféricos é realizada através da saída da placa ESP32, na qual é dada em 3,3 V. Os capacitores eletrolíticos são utilizados como prevenção contra oscilações de tensão. Também, percebe-se utilizar barramentos livres para conexões futuras ao microcontrolador, visando o uso do protótipo construído.

3.5 Criação do mapa

A metodologia utilizada para gerar mapas de NDVI é dada por etapas de leitura dos dados da planilha, criação do mapa, definição de escala de cores, adição de marcadores, adição de retângulos que representam a resolução de imagens de satélite e o salvamento do mapa. Todas as etapas são realizadas através de algoritmo em linguagem *Python 3* utilizando as bibliotecas disponíveis.

Os dados são lidos a partir de arquivos CSV utilizando a biblioteca *pandas*. O mapa é criado utilizando a biblioteca *Folium*. É utilizada uma função desta biblioteca para

definir a localização inicial do mapa, o nível de *zoom* inicial e o tipo de mapa a ser utilizado. A escala de cores para NDVI é definida utilizando a biblioteca *Matplotlib*. Marcadores são adicionados ao mapa para representar os pontos de dados, as coordenadas geográficas lidas do arquivo CSV. Retângulos são adicionados ao mapa para representar as áreas de interesse, os quais representam a resolução das imagens de satélite. Por fim, o mapa é salvo como um arquivo HTML, possibilitando interação para navegar em busca de informações coletadas e salvas no arquivo.

3.6 Montagem do mapa de fusão de dados

Para o desenvolvimento de análises dos resultados obtidos através de mensurações de NDVI são usadas várias bibliotecas em *Python 3*. As etapas podem ser vistas na Figura 19, na qual inicialmente o algoritmo importa as bibliotecas necessárias e inicializa os dados para coordenadas geográficas, valores de NDVI mensurados manualmente e valores de NDVI derivados de satélite. Os dados são então lidos de um arquivo CSV contendo informações como GPS, NDVI local e NDVI derivado de imagens de satélite. Utilizando a biblioteca *utm*, as coordenadas de latitude e longitude são convertidas em coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM) para análise espacial. O algoritmo emprega tanto a interpolação *kriging* quanto a regressão K-NN utilizando os vizinhos mais próximos para o cálculo de estimativa espacial de valores de NDVI.

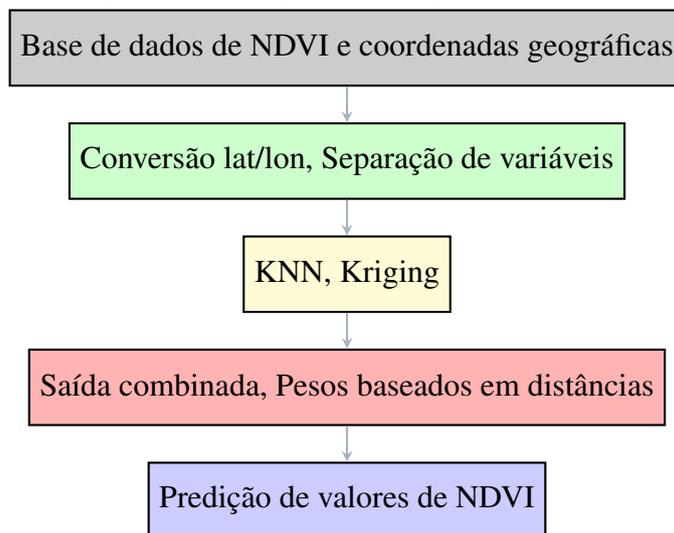
O modelo de *kriging* é treinado usando a função *Ordinary Kriging* da biblioteca *pykrige* e o modelo de variograma gaussiano. O variograma gaussiano é escolhido devido à sua capacidade de modelar suavemente a variabilidade espacial em dados contínuos, como os valores de NDVI (GOOVAERTS, 1997). Esse modelo é especialmente útil quando se espera que as mudanças espaciais ocorram de maneira gradual e não abrupta, o que é consistente com a natureza dos dados de vegetação. Enquanto a regressão dos vizinhos mais próximos é implementada usando a biblioteca *scikit-learn*.

O algoritmo K-NN é simples e eficaz na captura de padrões locais nos dados. Ao considerar os pontos de amostra mais próximos para a estimativa, o K-NN pode complementar a abordagem *Kriging*, fornecendo uma estimativa mais robusta onde a densidade de pontos de amostra é alta. Os pesos para a fusão de dados são calculados com base na distância dos pontos de amostra e na predição do modelo *Kriging*. A escolha de pesos é baseada na ideia de que a confiança na predição *Kriging* deve diminuir à medida que a distância dos pontos de amostra aumenta, enquanto a confiança nos valores de NDVI obtidos via satélite deve permanecer constante devido à sua abrangência espacial.

Uma função personalizada combina previsões de ambos os modelos com base em seus pesos respectivos calculados usando a distância entre os pontos. Finalmente, os valores de NDVI estimados são visualizados usando a biblioteca *matplotlib*, na qual uma grade de malha é criada para representar o domínio espacial, e os valores de NDVI previstos são

atribuídos a cada ponto da grade, resultando em um mapa de calor codificado por cores sobreposto com pontos de dispersão que representam os pontos de dados originais. Esta metodologia oferece uma abordagem abrangente para a análise e fusão de dados espaciais, facilitando a previsão e visualização precisa do NDVI em uma determinada área.

Figura 19 – Diagrama do algoritmo usado.



Fonte: Criado pelo autor.

Sendo assim, o K-NN é usado como interpolador, no qual o objetivo é estimar valores de NDVI em locais onde não há medições pontuais, com base nos valores dos pontos de dados vizinhos. O número de vizinhos definido como parâmetro é 3, ou seja, são considerados os 3 vizinhos mais próximos para estimar o valor de NDVI. Também é definido o parâmetro de peso, em que pontos com a menor distância entre si têm maior peso na estimativa do valor.

O processo de fusão de dados é usado para combinar valores de NDVI estimados usando *Ordinary Kriging* e valores constantes obtidos do satélite. Também são definidos parâmetros para o modelo de variograma, como “gaussian” e o número de *lags* usado no variograma é 10. A fusão é feita através de uma ponderação baseada na distância aos vizinhos no K-NN, na qual a Equação 6 é usada para calcular o peso relativo. Chega-se a esta equação após aplicar testes de números de vizinhos e analisar a suavidade dos mapas gerados.

$$\text{Peso relativo} = e^{0,005 \cdot \frac{\sum \text{distâncias}}{\text{n}^\circ \text{ de vizinhos}}} \quad (6)$$

As variáveis de pesos para o valor de satélite e o valor interpolado por *Ordinary Kriging* são definidos, e os pesos são normalizados para somarem 1. O valor final é uma média ponderada, explícita na Equação 7.

$$y = y_{\text{Ordinary Kriging}} \cdot w_{\text{Ordinary Kriging}} + y_{\text{sat}} \cdot w_{\text{sat}} \quad (7)$$

Na qual:

- $w_{\text{Ordinary Kriging}}$ é o peso do valor interpolado por *Ordinary Kriging*;
- w_{sat} é o peso do valor do satélite;

O Anexo A.3 exibe o pseudocódigo para a geração de mapas utilizando fusão e interpolação de dados. A escolha dessa equação e dos pesos visa alcançar um equilíbrio dinâmico entre os diferentes métodos de medição, permitindo que a fusão de dados seja adaptativa às condições locais. A combinação dos valores de *Kriging* e satélite proporciona uma estimativa mais robusta e confiável do NDVI, especialmente em áreas onde a coleta manual de dados é esparsa.

Considerando o uso do protótipo como medidor de NDVI, projetado no Capítulo 4, é realizado o estudo prévio para estabelecer uma análise experimental em campo utilizando o protótipo. Para isso, a Seção 3.7 trata sobre a metodologia utilizada para criar a análise de variância e verificar a influência de fatores controláveis às medidas.

3.7 Análise de variância

Esta parte do trabalho contempla a etapa de coleta de dados experimentais em campo, na qual se deseja averiguar se o efeito dos fatores controláveis e sua interação são significativos na resposta do instrumento. O dispositivo de referência para os testes é o *Greenseeker*, e selecionam-se dois fatores controláveis, tipo de vegetação e a distância em relação ao solo coberto com vegetação. Logo, o procedimento tem em vista analisar a significância com que a distância em relação ao mensurando e o tipo de cultura afetam os valores de NDVI medidos. O Anexo A.1 exibe os dados coletados em campo e relacionados com os fatores controláveis.

Uma análise experimental é composta por diferentes etapas, e uma das utilidades do projeto experimental é apresentá-la organizadamente. Aplica-se *Design of Experiments* (DoE) neste trabalho para avaliar e determinar relações entre dados de entrada e de saída designados neste, e para isso são identificadas as variáveis independentes que têm influência sobre a resposta NDVI, e determinar os níveis das variáveis, em que para cada variável independente selecionada, definem-se os diferentes níveis a serem investigados.

A coleta dos dados está planejada para ser executada aleatoriamente, visando obter amostras que representem todas as possíveis combinações dos níveis das variáveis independentes. Esta etapa do trabalho contemplará a análise estatística dos dados coletados usando técnicas apropriadas, como análise de variância (ANOVA). Essa análise permite identificar as relações entre as variáveis independentes e a resposta NDVI, e como base nas respostas obtidas, interpretá-las e concluir sobre a influência das variáveis independentes dos dados NDVI. É utilizada biblioteca *StatsModels* em *Python 3* para calcular as ANOVAs dos dois instrumentos, protótipo e *Greenseeker*.

O projeto experimental é efetuado pela aquisição de medidas para os fatores Cultura e Altura, distribuídos em Azevém e Nativo, e de 10 cm a 90 cm de altura. Porém, para ambos os instrumentos, medidas abaixo de 50 cm apresentaram falhas na medição, e a ANOVA é calculada para o fator controlável altura, com quatro níveis apenas.

Na etapa de análise descritiva são efetuados cálculos estatísticos básicos para entender a distribuição e as características dos dados, incluindo a média, mediana, desvio padrão, mínimo, máximo e quartis da variável de interesse. Essas análises estatísticas ajudam a explorar a qualidade dos dados espectrais de NDVI coletados, permitindo associá-las e estudá-las com base nas informações espectrais.

A verificação de efeitos para o fatorial completo proposto neste trabalho é dada pela Equação 8, composta pelo somatório da média global do experimento, um possível efeito dos fatores controláveis: altura; cultura vegetativa; da interação de ambos; e do erro aleatorizado.

$$Y_{ij} = \mu + \gamma_i + \alpha_j + \epsilon_{ij} \quad (8)$$

Com isso, a análise de variância tem como intuito verificar as hipóteses nula e alternativa (H_0 e H_1), de forma que a primeira pode ser rejeitada e, caso contrário, significa que as médias dos níveis em estudo são iguais entre si. Propõe-se a ANOVA separada para cada instrumento, tratando o instrumento como uma variável independente. Isso permite que se avalie diferenças significativas entre os dois instrumentos em termos de suas medições de NDVI. No entanto, esta abordagem não considerará a análise estatística da comparação direta dos dois instrumentos, mas será possível verificar a influência dos dois fatores controláveis para cada um dos instrumentos.

As coletas de dados são realizadas com o intuito de verificar as influências da altura em relação ao solo e da cultura mensurada. Os dados coletados estão divididos em duas tabelas que seguem, Tabela 8 e Tabela 9. As tabelas apresentam os valores de tensão medidos para ambos os espectros, vermelho e infravermelho próximo, assim como os valores de NDVI calculados pelo protótipo e indicados pelo *Greenseeker*. O método de coleta de dados acontece diretamente com uma régua apoiada no solo e posicionando o medidor na altura desejada. Repetiram-se os pontos de medição para ambas as culturas. A Figura 20 exhibe como foram posicionados os instrumentos.

Figura 20 – Método de medida com altura controlada manualmente. a) à esquerda *Greenseeker*; b) à direita Protótipo.



Fonte: Criado pelo autor.

Após a coleta de dados para calibração do instrumento tomando como referência o *Greenseeker*, finaliza-se o processo de aquisição de dados através da coleta aleatorizada dos valores de NDVI utilizando o protótipo na totalidade. Ou seja, o algoritmo é carregado no microcontrolador e faz-se uma varredura em áreas de campo para mensurar o NDVI pontualmente, adquirindo as coordenadas geográficas, o horário e o NDVI, com as condições atribuídas, como a verificação do plano de orientação. Com os dados adquiridos, propõe-se elaborar mapas interpolando dados de satélite. Os resultados de metodologias utilizadas nesta etapa são apresentados no Capítulo 5, o qual apresenta a etapa de comparação entre os instrumentos e os mapas criados.

A proposta deste trabalho é dada, basicamente, pela capacidade de mapear as medidas de NDVI e georreferenciá-las. Percebe-se, que a utilização de um dispositivo comercial satisfaz a necessidade de coletar os índices de vegetação, mas como o objetivo final é que o sistema seja embarcado a uma coleira de bovino, propõe-se a criação do protótipo medidor. Logo, o Capítulo 4 está direcionado para a instrumentação do protótipo que realiza a extração de medidas de NDVI. O procedimento desse acontece pelo estudo dos principais trabalhos e seus métodos construtivos, simulações computacionais de circuitos e subdivisões em blocos de etapas do condicionamento de sinais, montagem de circuitos eletrônicos em placas de ensaio para diferentes testes em bancada, concretização do projeto em placa de circuito impresso e testes comparativos.

4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO MEDIDOR DE NDVI

É sabido que a medição de NDVI através de dispositivos ativos é dividida em duas etapas, a emissão e a reflexão de espectros eletromagnéticos, conforme abordado na Seção 2.1. Algumas escolhas construtivas são adotadas e separadas em duas etapas, sendo o circuito emissor construído com base nas características apresentadas na Seção 4.1 e as do circuito receptor denotadas na Subseção 4.2. Ambos são projetados para serem implementados em uma mesma placa de circuito impresso e com barreira ótica entre esses.

O desenvolvimento do protótipo de medidor de NDVI permite que, ao longo deste trabalho, tenha-se controle sobre a medição e integração com periféricos de aquisição de dados. O *Greenseeker*, neste projeto, serve como um dispositivo capaz de efetivar o objetivo principal, sendo eficaz para cumprir o propósito de criação dos mapas, mas exige acionamento manual e deve estabelecer comunicação via *Bluetooth* com um *Smartphone*. Com isso, a prototipação é dada pela pesquisa de diversas bibliografias que usam instrumentos optoeletrônicos, permitindo o entendimento dos blocos de condicionamento de sinais necessários para alcançar medidas esperadas. Inclusa à fase de prototipação, o *Greenseeker* permite realizar os ajustes do protótipo, ao efetivar a curva de calibração.

O circuito emissor é comandado por uma porta de saída do microcontrolador ajustada para a frequência pré-definida de 1 kHz, e uma fonte de corrente controlada por corrente transistorizada é projetada para os circuitos que contêm os LEDs. O processo mais complexo envolve o condicionamento de sinal refletido, pois a amplitude deste sinal é baixa e se faz necessário diferentes testes para ajustar os parâmetros de projeto. Sendo assim, neste capítulo, são apresentadas técnicas usadas para alcançar resultados estudados, e esperados através de conclusões prévias de referências, de simulações, testes de bancada e testes em campo.

O processo de testes do circuito de condicionamento do sinal ocorre em blocos, sendo dividido em cinco principais blocos, de transimpedância, filtro passivo passa-altas, somador com ganho, filtro ativo passa-altas de terceira ordem e detector de pico com *reset*. O circuito de transimpedância é o circuito comumente utilizado para converter o sinal de corrente elétrica, gerada pelos fotodiodos, em tensão elétrica com aplicação de ganho do

sinal é então filtrado, removendo a característica constante do platô superior. Em seguida, os sinais de todos os 6 fotodiodos são combinados, e um ganho adicional é aplicado ao sinal, compensando uma parte da irradiância solar removida pelo filtro passa-altas passivo. O processo de condicionamento do sinal é completado com o uso de circuitos ativos para filtragem e detecção do pico de tensão, usado para calcular o NDVI com base nas leituras do ADC do microcontrolador. Os 128 valores de pico são armazenados, o desvio padrão é calculado para descartar leituras errôneas, e o valor médio é empregado no cálculo final.

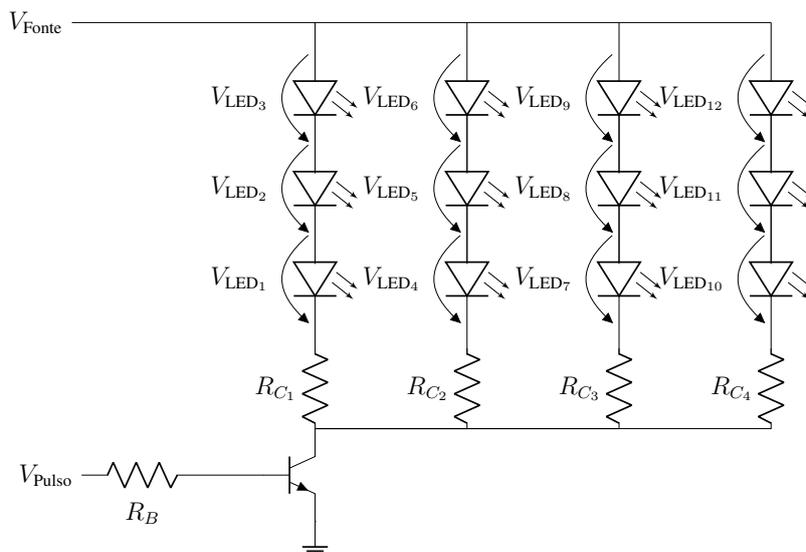
4.1 Prototipação do circuito emissor ótico

Para a definição de um circuito eletrônico capaz de emitir espectros eletromagnéticos com comprimentos de onda nas faixas de infravermelho próximo e vermelho são selecionados LEDs capazes de emitir com a potência necessária para atingir aspectos relevantes como uma maior altura entre o dispositivo e a vegetação. A incidência de luz é baseada na corrente elétrica que circula em cada LED. Dois circuitos separados são definidos para operarem com LEDs vermelhos e infravermelhos, respectivamente. São projetadas fontes de correntes transistorizadas e controladas por corrente na base dos respectivos para cada um dos grupos de LEDs, e os cálculos são apresentados na sequência deste texto.

Visto que a saída dos microcontroladores fornece corrente elétrica de saída em torno de 40 mA, como no ESP32, e para isso se deseja a utilização de transistores capazes de amplificar e alimentar o circuito emissor constantemente. Também, deseja-se uma tensão de alimentação mais elevada, e estes dois fatores justificam a utilização de transistores. Então, o circuito é projetado de maneira a não sobrecarregar o circuito de acionamento, com uma corrente de base do transistor adequada. Para isso, a fonte de corrente controlada por corrente é projetada nesta seção.

Existe a possibilidade de ligar os LEDs em paralelo ou em série, e assim como (PANDOLFO, 2017), neste trabalho é definido o circuito no qual os LEDs são conectados em série, de modo que todos os LEDs recebam a mesma corrente, importante para manter uma sensibilidade espectral consistente entre os LEDs. Isso é especialmente crítico quando se trabalha com bandas espectrais específicas, como vermelho e infravermelho próximo, e a ligação em série, com uma única resistência limitadora de corrente, ajuda a garantir essa consistência e evitar mais fontes de ruídos. Logo, a ligação em série minimiza variações de brilho entre os LEDs, proporcionando uma comparação mais precisa entre as refletâncias nas diferentes faixas espectrais. A representação do circuito emissor pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 – Circuito emissor para os LEDs vermelhos.



Fonte: Criado pelo autor.

Os dois LEDs disponíveis para o experimento são caracterizados pelas informações extraídas dos *datasheets* dos respectivos fabricantes, como é possível ver na Tabela 2. O componente L934SRD/E remete-se ao LED vermelho, o qual representa uma queda de tensão especificada, e parte-se desta característica para o projeto do circuito emissor.

O segundo componente dado pelo *part number* L34F3C é referente ao LED infravermelho, o qual a intensidade luminosa é informada em unidade diferente. Do estudo preliminar, sabe-se que o maior índice de reflexão de luz em áreas de vegetação é ocasionado pelo NIR, tornando este espectro fundamental para a análise do índice de vegetação.

Sabe-se que o ângulo de emissão de ambos os LEDs não é o ideal para o tipo de utilização, em que desde o receptor as ondas são dispersas e ao atingirem o objeto de medida, neste caso a gramínea, formará diferentes ângulos de reflexão, resultando em uma menor parcela de feixes recebidas no fotoreceptor.

As considerações adotadas para apresentar dados como a intensidade luminosa e a queda de tensão típica dos LEDs são a conversão da intensidade radiante para a intensidade luminosa e o teste de bancada, respectivamente. Logo, utilizando a equação apresentada em (SEMICONDUCTORS, 31 jul. 2012), e adaptada na Equação 9, é possível atingir o valor estimado para completar a tabela desejada.

$$l_v = l_e \cdot K_m \cdot V(\lambda) = 10 \text{ mW/sr} \cdot 683 \text{ lm/W} \cdot 0,061 = 416,83 \text{ mcd} \quad (9)$$

Sendo K_m o fator de conversão, l_e a intensidade radiante e $V(\lambda)$ o fator de sensibilidade espectral. Os valores finais são apresentados na Tabela 2.

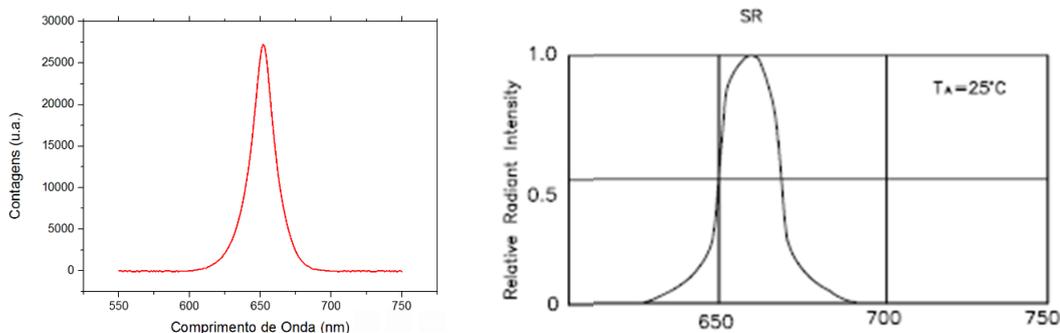
Tabela 2 – Características dos LEDs.

LED	Part number	lv (mcd)	Ângulo (°)	λ_{pico} (nm)	V_F (V)
Vermelho	L934SRD/E	250	60	660	1,85
Infravermelho	L34F3C	417	50	940	1,40

Com o propósito de confirmar a informação do *datasheet*, e garantir consequentemente a largura de banda do componente, a análise espectral dos LEDs é realizada através do espectrômetro, *Acton Spectra Pro2300*®, disponível no Centro de Espectroscopia Óptica de Materiais (CEOMat), laboratório da UFRGS. O equipamento consegue fazer medidas espectrais de fontes de luz e possui faixa espectral de 190 nm a 900 nm, sendo inviável a caracterização do LED infravermelho, embora tenha sido realizado o teste com o mesmo.

A Figura 23 exibe as curvas espectrais extraídas através do espectrômetro e do *datasheet*. Pode-se verificar que a caracterização mostra curva semelhante a do fabricante, com espectro de emissão centrado em 660 nm e largura de banda espectral considerada pequena. O teste aplicado ao LED infravermelho não apresentou resposta utilizando este espectrômetro, mesmo que a faixa espectral especificada seja de 50 nm. O pico espectral de comprimento de onda é em 940 nm, segundo o fabricante.

Figura 23 – Análise espectral do LED vermelho. a) à esquerda obtida pelo espectrômetro; b) à direita obtida do *datasheet*.



Fonte: Adaptada de (KINGBRIGHT, 2001).

Consideram-se os dados dos componentes para calcular a resistência do coletor.

- Tensão direta do LED: 1,85 V.
- Corrente típica de operação do LED: 20 mA.
- Corrente máxima de operação do LED: 50 mA.

Sabe-se que os LEDs suportam maior valor de corrente quando a mesma é pulsada (1,2 A para o LED infravermelho com 10 μ s de largura de pulso), e como o objetivo é

excitar os LEDs com ondas quadradas, possibilita-se atribuir um valor de corrente maior, projetado para uma corrente de 135 mA. Testes em bancada foram realizados para medir a queda de tensão em cima dos diodos vermelhos, sendo igual a 2,54 V. Logo, a queda total de tensão nos LEDs será aproximadamente $3 \cdot 2,54 \text{ V} = 7,66 \text{ V}$.

Para polarizar adequadamente a base do transistor BC337 utiliza-se o ganho direto de corrente (β) de 400 (valor intermediário), e o valor de corrente de base (I_B) pode ser obtido através da Equação 10.

$$I_{B\text{mínima}} = \frac{I_{C\text{total}} \cdot n^\circ \text{ de ramos}}{\beta}$$

$$I_{B\text{mínima}} = \frac{135 \times 10^{-3} \cdot 4}{400} \quad (10)$$

$$I_{B\text{mínima}} = 1,35 \times 10^{-3} \text{ A}$$

A corrente que circula no coletor depende da corrente em cada ramo, e como são quatro ramos com corrente de 135 mA, a corrente de coletor total é de 540 mA. Logo, define-se o resistor de base para o transistor operar como chave, e para garantir o melhor funcionamento do transistor o valor de corrente de base ainda é multiplicado por 10, e tem-se a corrente de base igual à 13,5 mA. A Equação 11 exhibe o cálculo para obter a resistência de base.

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{BSat}}$$

$$R_B = \frac{3,3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{13,5 \text{ mA}} \quad (11)$$

$$R_B = 192,59 \Omega$$

Sendo assim, com estes valores, pode-se montar o circuito com 3 LEDs em série e R_C de 10Ω . Sabe-se que as características exatas dos componentes que são diferentes entre os LEDs vermelhos e infravermelhos, e para garantir o funcionamento correto do circuito são considerados os mesmos cálculos para os LEDs infravermelhos, porém como a queda de tensão é menor nos LEDs infravermelhos é possível conectar 4 LEDs em série e fazer com que circule um valor de corrente alto. A corrente de coletor igual à 124 mA foi obtida utilizando um resistor de 27Ω . Para este valor de corrente a queda de tensão nesses é de 1,4 V. Utilizam-se as Equações 10 e 11 para calcular o resistor de base para o circuito com LEDs IR e obtém-se a resistência de base (R_B) igual a $151,6 \Omega$. Para ambos os casos é possível utilizar o valor comercial de 300Ω .

Tanto (PANDOLFO, 2017) quanto (YAO *et al.*, 2020) utilizam sinais de caráter sinusoidal e quadrado com frequências definidas para distinguir os sinais oriundos do emissor produzido de fontes externas como a irradiância solar, sendo que esta última se altera com baixa frequência. PANDOLFO (2017) usa a frequência de 340 Hz para realizar o chaveamento da fonte de corrente e (YAO *et al.*, 2020) usa a frequência de 1 kHz. Neste trabalho é definido o sinal de onda quadrada com 1 kHz a ser produzido no microcontrolador e

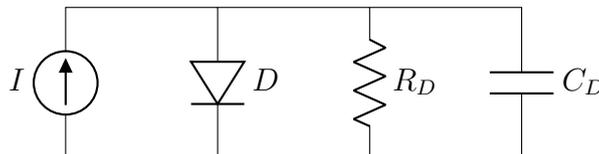
usando uma saída digital da ESP32, conectado ao circuito da Figura 22 e caracterizado como V_{pulso} . O ADC utilizado para gerar as tensões de controle possui resolução referente a 12 bits, em uma faixa de 0 V a 3,3 V.

O circuito emissor é projetado para compor a mesma placa do circuito receptor, sendo necessário projetar uma barreira ótica. As etapas de projeto do circuito analógico do circuito receptor de luz são apresentadas na Seção 4.2. Esta etapa contempla simulações e testes em laboratório para cada um dos blocos de condicionamento do sinal. Ainda na prototipação do circuito receptor, são definidos parâmetros de alimentação dos circuitos e empacotamento dos mesmos para testes preliminares em campo.

4.2 Prototipação do circuito receptor ótico

Percebe-se que dentre os dispositivos óticos disponíveis para mensurar as ondas eletromagnéticas perceptíveis, alguns autores usam LEDs polarizados inversamente como receptores e outros usam fotodiodos, nos quais estes últimos são compostos de uma junção PN que absorve fótons e geram elétrons e lacunas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2000). Para este trabalho é selecionado o fotodiodo BPW34 da marca OSRAM no qual as especificações são parametrizadas com tensão reversa. A Figura 24 exhibe o circuito elétrico do fotodiodo.

Figura 24 – Circuito equivalente do fotodiodo.



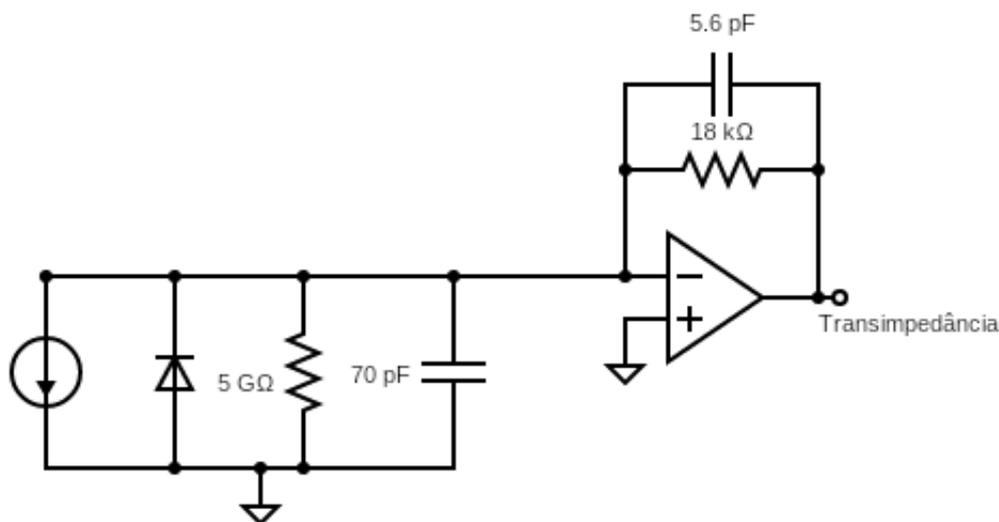
Fonte: Criado pelo autor.

Para este modelo elétrico do fotodiodo, segundo o *datasheet*, a capacitância do fotodiodo (C_D) é igual a 70 pF e a resistência do fotodiodo (R_D) é igual a 5 G Ω . O circuito é utilizado para realizar simulações no *software LTspice*, nas quais são utilizadas diferentes fontes de entrada para simular sinais paralelos ao do circuito emissor. A fonte de corrente representada no diagrama como I é usada para expressar o valor transformado e linearmente relacionado à intensidade de ondas recebida. Para fins de teste, é mensurada a corrente gerada pela fotodiodo em condições de intensidade de radiação solar e com os LEDs vermelhos acionados, considerando que esta é a condição em que se tem a corrente de pico. Sendo assim, o valor de corrente medida é de 430 μ A. Com isso, divide-se em subseções os blocos de condicionamento de sinais conforme apresentados na Figura 21, na qual a Subseção 4.2.1 apresenta etapas de projeto destes blocos. Na Seção 4.3 é apresentado o sistema de controle e na Seção 4.4 é apresentada a disposição final do protótipo, contendo etapa de *layout* e empacotamento.

4.2.1 Condicionamento de sinais

Para o processo de elaboração do circuito receptor também recorre-se à ferramenta da *Analog Devices*TM (DEVICES, s.d.) disponível para criação de circuitos de fotodiodos. A partir do modelo do fotodiodo especifica-se a tensão de pico desejada na saída do circuito para ajustar o circuito de transimpedância, e utilizando um circuito com AmpOp de um estágio, a ferramenta estima os componentes da malha de realimentação baseada no valor de pico especificado e na largura de pulso alvo. Com a tensão de pico determinada para 8 V (para não saturar o AmpOp) e a largura de pulso para 500 μ s, os valores de resistência e capacitância são respectivamente projetados para 18,7 k Ω e 330 pF. Logo, ajusta-se esses para valores comerciais de 18 k Ω e 5,6 pF e o circuito do receptor pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Circuito de transimpedância conectado ao circuito equivalente do fotodiodo.



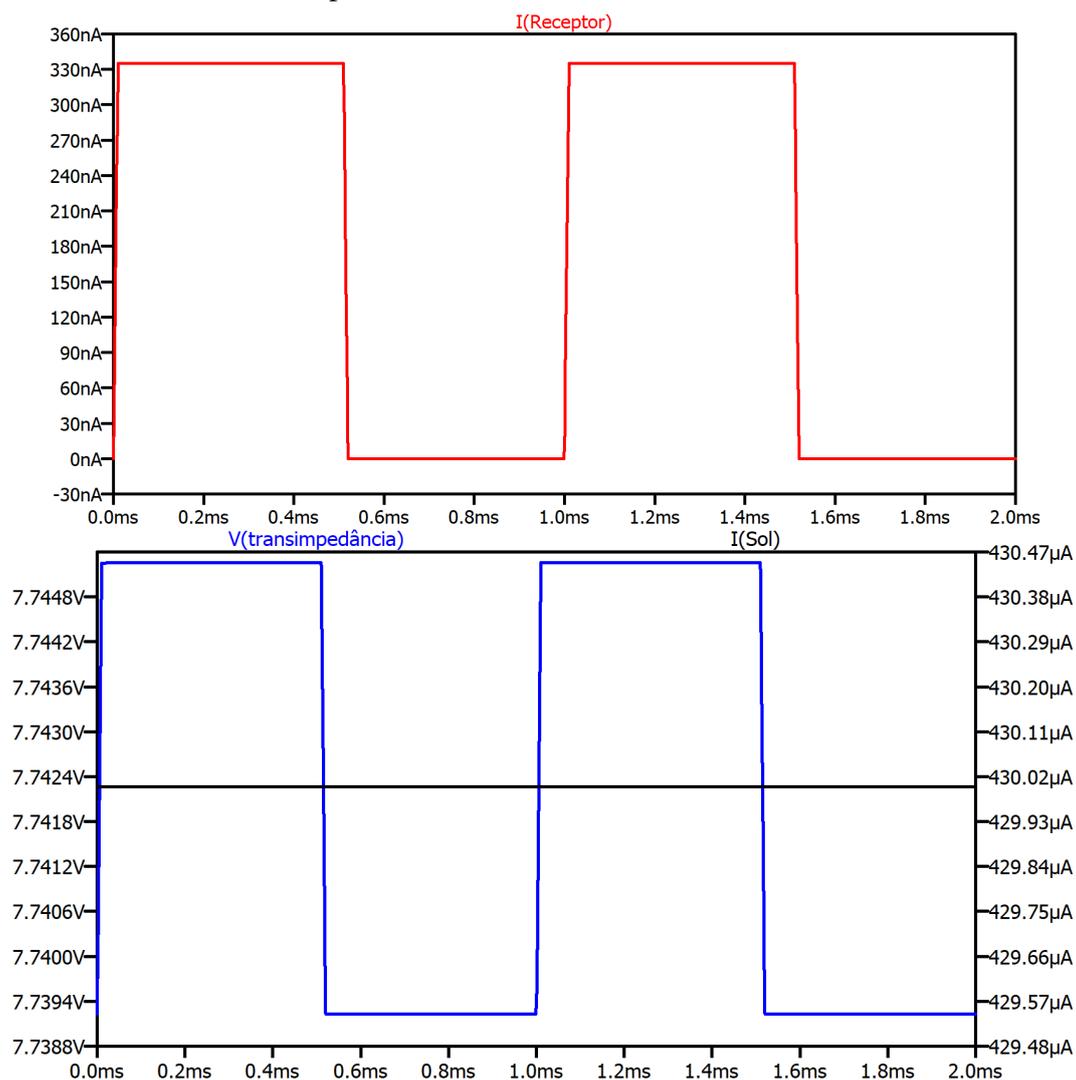
Fonte: Criado pelo autor.

Define-se a polarização do fotodiodo como reversa para fins de projeto, no qual o diodo está polarizado inversamente, com o catodo conectado ao aterramento virtual na entrada inversora do AmpOp e o anodo no terminal de referência. Logo, a tensão de saída do circuito será positiva e facilitará a leitura do sinal, e ao definir um circuito de único estágio elimina-se a possibilidade de escolher uma configuração inversora para o segundo estágio, além de que o fabricante do fotodiodo expõe parâmetros de teste com polarização reversa, justificando-se assim a escolha desta configuração. A escolha dos AmpOps é estabelecida visando componentes com alta impedância de entrada.

O projeto deste circuito é implementado pela definição do resistor e do capacitor conforme os critérios desejados de resposta. A tensão de pico desejada na saída do circuito

é oriunda da necessidade de mensuração através do ADC do microcontrolador, o qual se sabe o limiar de tensão do microcontrolador e com base neste é definido o valor de pico de tensão, assim como o sinal é originado com uma onda quadrada de largura de pulso conhecida, justificando-se assim a escolha do valor de capacitância para adequar à resposta, evitar *overshoot* e facilitar a reconstrução do sinal, na qual a medida de interesse está no valor de pico da onda quadrada. Vale salientar que OROZCO (2014) menciona que a excitação de LEDs com sinal senoidal exige um oscilador, e o sinal de ondas quadradas pode ser gerado diretamente no microcontrolador. Algumas simulações são realizadas para concretizar o circuito de transimpedância, como pode ser visto na Figura 26. Com o circuito projetado são realizadas simulações iniciais para verificar o comportamento diante de condições em que há um sinal em frequência conhecida e uma sinal constante.

Figura 26 – Resultado da simulação em *software* LTspice, em vermelho: sinal refletido e lido pelo receptor ótico; em preto: sinal constante relativo a irradiância do sol; em azul: saída do circuito de transimpedância.



Fonte: Criado pelo autor.

Percebe-se que é considerado um sinal de baixa amplitude como o originado pela reflexão da luz, designado como “Receptor” na figura acima, com pico de 335 nA e o sinal de corrente constante mencionado, “Sol”. A saída do circuito de transimpedância é dada pelo sinal amplificado e com o deslocamento no eixo das ordenadas ocasionado pelo sinal constante, representado na imagem como a curva de cor azul, dada como sinal de tensão na saída do circuito de transimpedância. O limiar máximo deste sinal é definido para ser menor que a tensão de saturação do AmpOp, conforme projetado para a condição extrema, e o sinal de interesse é de baixíssima faixa de amplitude.

O sinal simulado para a recepção de luz possui ordem de grandeza muito menor que o sinal de saída do circuito de transimpedância. Porém, o sinal “Transimpedância” representa o sinal já amplificado e com o *offset* provocado pela irradiância do sol. Este sinal, representado em azul, possui um deslocamento de fase de aproximadamente 90°, ocasionado pela capacitância utilizada no circuito de transimpedância e pela capacitância parasita do fotodiodo.

Considera-se a necessidade de eliminar os sinais oriundos da irradiância solar e para isso utiliza-se a técnica abordada pelos principais trabalhos de dispositivos ativos apresentados na Seção 2, em que se deseja eliminar sinais de baixa frequência. Após o circuito de transimpedância está prevista a utilização de um filtro passivo passa-altas de primeira ordem com frequência de corte em 100 Hz, e faz-se o uso de um capacitor de 150 nF e resistor de 10 k Ω .

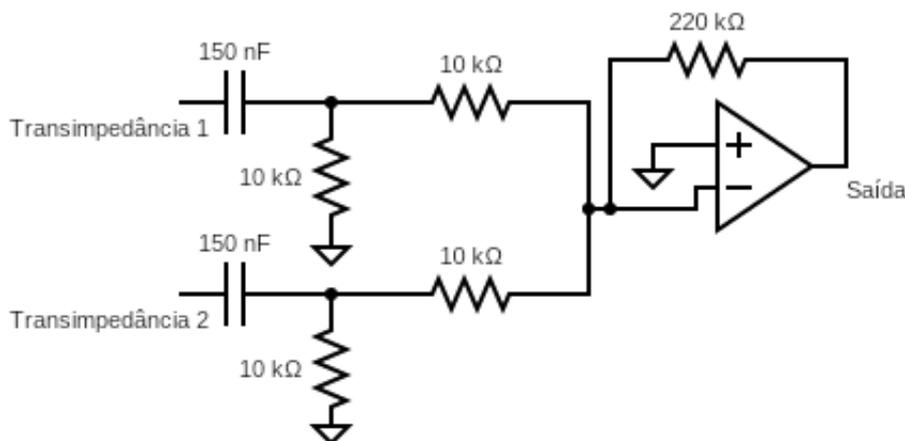
Admite-se a superfície de recepção de sinal do fotodiodo pequena e através de testes em bancada percebe-se que a refletância produz sinal de baixa intensidade. Os testes foram realizados com LEDs emitindo na frequência do projeto e fazendo com que os mesmos projetem a luz em um plano branco para refletir o espectro para o fotodiodo posicionado logo abaixo. O ganho projetado no circuito de transimpedância é projetado para evitar a saturação dos amplificadores operacionais e, ao mesmo tempo, produzir um sinal de amplitude maior ao distanciar o objeto branco usado no teste para refletância.

Considerou-se inicialmente o uso dos fotodiodos em paralelo, todos conectados à apenas um circuito de transimpedância, mas a resposta não foi adequada para o objetivo, e perceberam-se deformações nas ondas recebidas, provavelmente ocasionadas pela capacitância parasita do diodo. Sendo assim, adota-se a técnica usada por (PANDOLFO, 2017) e cada um dos fotodiodos é independentemente conectado a um circuito de transimpedância.

Após cada um dos circuitos de transimpedância estão conectados os filtros passivos para eliminar a componente originada pela refletância da irradiação solar. As respostas são somadas através de um circuito somador com ganho de 22 V V⁻¹. Este resistor utilizado no circuito somador, e possibilita aplicar um ganho de tensão ao sinal, é também uma fonte de ajustes para o circuito, visto que ao realizar testes finais podem ser necessários ajustes de ganho para adequação aos limiares da medida de interesse. O bloco dos

circuitos de filtro passivo e somador pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Representação dos circuitos de dois filtros passivos e somador.



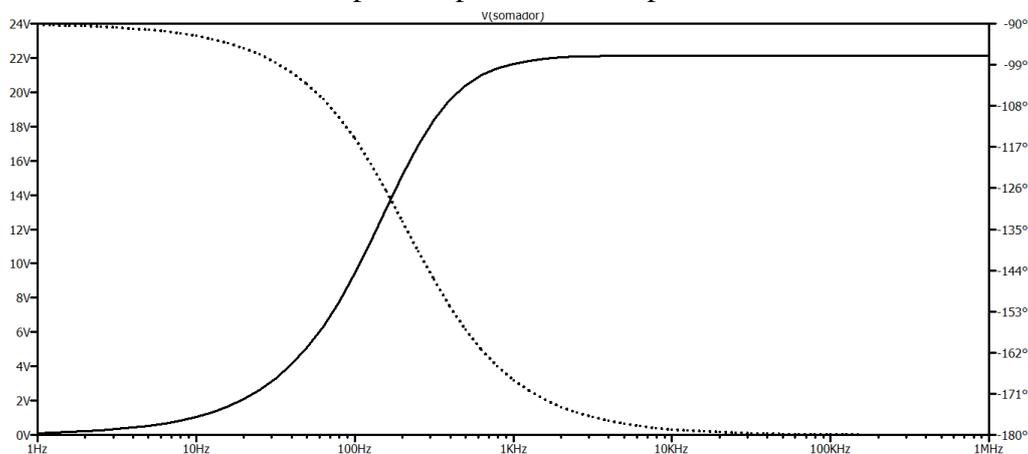
Fonte: Criado pelo autor.

Logo, é projetado o filtro ativo passa-altas com ganho de tensão que não sature os AmpOps e possibilite atingir a faixa de valores a serem medidos no ADC do microcontrolador (0,0 V a 3,3 V). Embora a Figura 27 mostre apenas dois filtros passivos que recebem sinais dos circuitos de transimpedância, os circuitos se repetem para os outros quatro fotodiodos e respectivos circuitos de transimpedância. O AmpOp utilizado para o circuito somador é o TL082.

Justifica-se o uso do filtro passivo passa-altas de primeira ordem por ser mais simples sua implementação e pela necessidade de replicá-lo 6 vezes, um para cada circuito de transimpedância. Passar o sinal, sem eliminar a componente constante, para o bloco somador diminuiria a margem de ganho a ser aplicado ao sinal, visto que facilmente ocasionaria a saturação dos CIs. Usar filtros ativos de ordem maior antes do somador aumentaria a quantidade de componentes eletrônicos, sendo que o ganho já foi adicionado no bloco somador subsequente. Dessa forma, a maior vantagem seria a baixa impedância de saída.

Porém, após a construção do protótipo, notou-se que o circuito do filtro passivo passa-altas de primeira ordem acoplado diretamente ao circuito somador, devido à ordem de grandeza das resistências dos circuitos dos filtros e do somador, ambas iguais a 10 kΩ. Com isso, averiguou-se como isso afeta o comportamento do circuito através do diagrama de Bode na Figura 28. Percebe-se que a frequência de corte ficou em 200 Hz, e a composição dos circuitos resultou em um filtro passa-altas de primeira ordem, conforme o objetivo inicial.

Figura 28 – Resultado da simulação em *software* LTspice para análise do diagrama de Bode de um dos circuitos filtro passivo passa-altas acoplado ao somador.

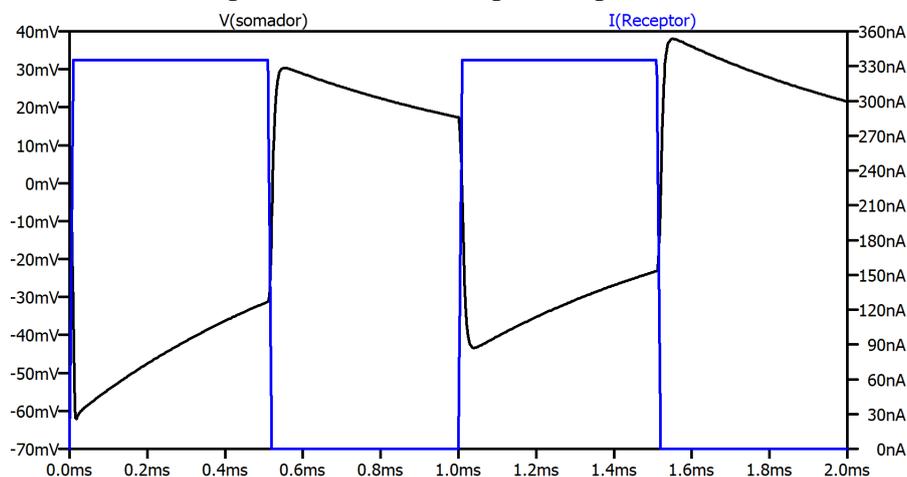


Fonte: Criado pelo autor.

Sendo assim, essa é uma limitação do projeto, e utilizar um filtro ativo de primeira ordem é uma solução para tornar os blocos independentes entre si. Percebe-se também uma perda do ganho projetado para 22 V V^{-1} e que o valor simulado indica máximo valor de $21,5 \text{ V V}^{-1}$ em 1 kHz. Todavia, o equívoco no projeto, idealizado para a frequência de corte em 100 Hz e obtido como frequência de corte 200 Hz, não causa problemas ao sinal principal, visto que a frequência fundamental é 1 kHz.

Durante a etapa de simulação é perceptível a diferença entre dois fotodiodos somados frente a seis fotodiodos, sendo que para o primeiro caso o pico de tensão medido é de 13 mV, e para o segundo caso, 38 mV. Estes valores podem ser vistos na Figura 29, no qual o sinal de saída do somador passa a ser centrado em zero, sem o *offset* gerado pelo sinal constante injetado como representação da irradiância do sol.

Figura 29 – Resultado da simulação em *software* LTspice, em azul: sinal refletido e detectado pelos fotodiodos; em preto: sinal do filtro passivo passa-altas e do circuito somador.

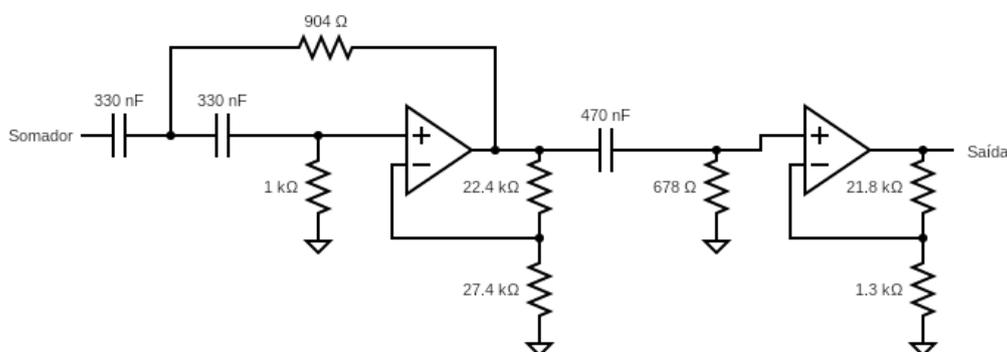


Fonte: Criado pelo autor.

Nota-se o comportamento da resposta gerada, no qual o pico do sinal de saída ocorre no instante da curva de descida da onda quadrada, e esta percepção é importante para aquisição da medida de interesse. Mesmo que o sinal esteja descaracterizado por sofrer a filtragem, o pico do sinal é proporcional ao valor de tensão do platô superior da corrente de entrada com forma de onda quadrada, e alternativas para mensuração deste são pesquisadas e implementadas no decorrer do projeto.

Uma dificuldade deste projeto está na relação de sinais desejáveis e sinais medidos. Como o fotodiodo capta amplo espectro de frequências mensuráveis, a irradiância do sol produz um sinal com três ordens de grandeza maior que o sinal refletido oriundo dos conjuntos de LEDs. Logo, após a filtragem e eliminação do sinal oriundo da luz ambiente, o sinal é fraco, na ordem de milivolts, justificando-se assim o ganho também projetado para o circuito de filtragem de 33 V V^{-1} . O filtro projetado para este caso é exibido na Figura 30.

Figura 30 – Filtro ativo projetado.

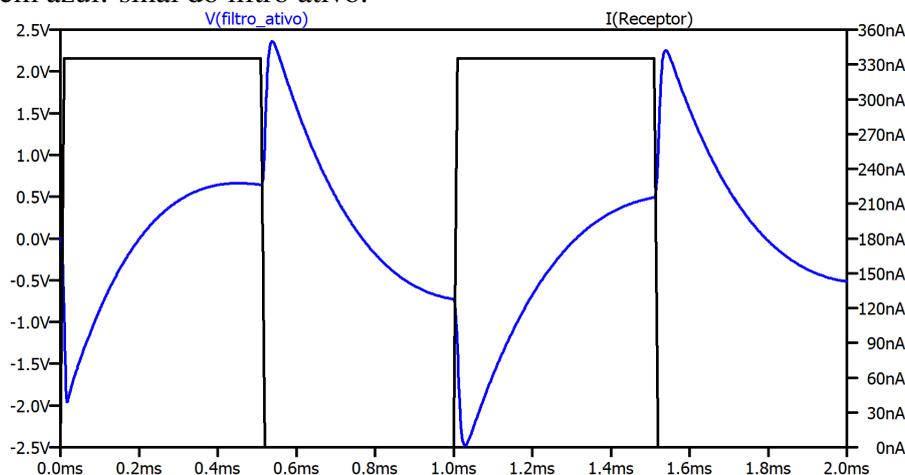


Fonte: Criado pelo autor.

O sinal de entrada deste bloco de filtragem é oriundo do circuito somador e apresenta possíveis ajustes futuros, através das resistências do circuito de ganho. O filtro passa-altas é de terceira ordem do tipo *Butterworth*, com frequência de corte (-3 dB em relação à amplitude na banda de passagem) de 500 Hz e a faixa de parada é definida em 50 Hz com atenuação de 40 dB (em relação a amplitude na banda de passagem).

Assim como nos circuitos anteriores, é simulado o sinal de saída gerado pelo filtro ativo, e na saída tem-se a onda quadrada descaracterizada e o sinal de interesse é o pico desta onda exposta na Figura 31.

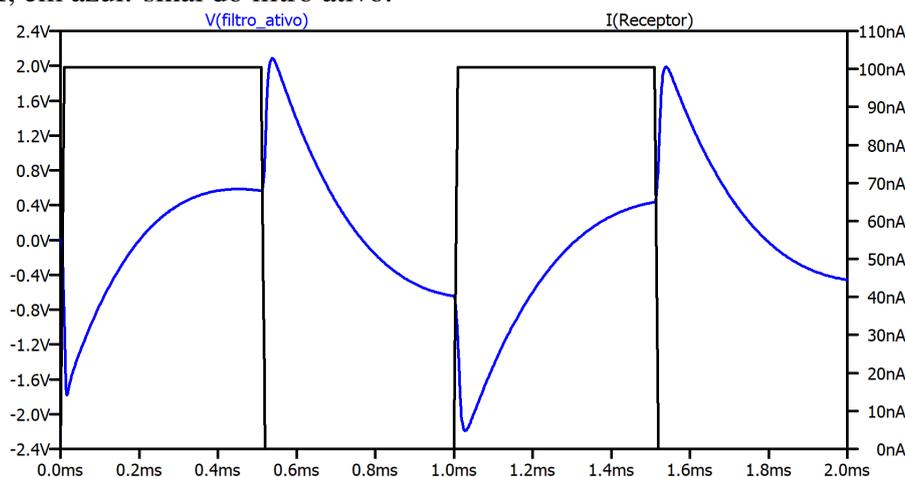
Figura 31 – Resultado da simulação em *software* LTspice, em preto: sinal refletido de 335 nA; em azul: sinal do filtro ativo.



Fonte: Criado pelo autor.

Percebe-se que o pico do sinal continua sendo exatamente no instante em que o sinal do emissor retoma ao nível lógico baixo, e esta característica é fundamental para a amostragem do sinal de saída. Também é possível verificar pela simulação apresentada na Figura 32 que para um sinal de onda quadrada com amplitude máxima de 100,5 nA (30 % do valor de corrente simulado na Figura 31) o sinal mantém a mesma característica e a amplitude de saída é proporcional, alcançando a mesma redução de tensão de pico na saída.

Figura 32 – Resultado da simulação em *software* LTspice, em preto: sinal refletido de 100,5 nA; em azul: sinal do filtro ativo.



Fonte: Criado pelo autor.

Destaca-se que a utilização da onda quadrada para excitar os LEDs ocorre unicamente devido à necessidade de operar com uma frequência específica que possa ser filtrada e distinguida dos sinais oriundos do sol. Portanto, o aspecto relevante do sinal na curva de resposta é o platô superior da onda quadrada, indicando a intensidade do espectro

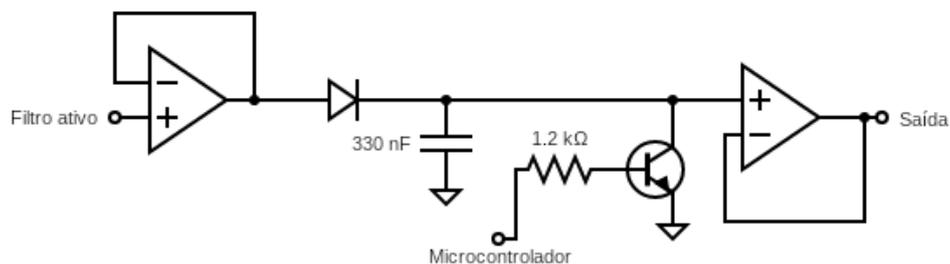
eletromagnético refletido e captado pelos fotodetectores. Após o primeiro estágio de condicionamento de sinal (transimpedância), a característica do sinal se manteve como uma onda quadrada, porém há um ganho de tensão adquirido ao converter o sinal de corrente, na mesma ordem do resistor utilizado. A intensidade da luz refletida é menor que a intensidade da luz emitida, devido a diferentes fatores vistos anteriormente. Após o circuito de transimpedância ainda há a componente constante oriunda da irradiância do sol. No entanto, ao ser processado pelos estágios de filtragem, a característica deste sinal original é alterado.

A mudança no sinal é devida ao fato de que o platô superior é um sinal contínuo, que ao passar por um filtro passa-altas sofre atenuação, explicando a redução do sinal observada na Figura 31. As transições abruptas da onda quadrada, por outro lado, atravessam o filtro passa-altas sem restrições. Portanto, o foco ainda recai sobre a parte superior plana da onda quadrada, representada somente pelo pico máximo do sinal após ser filtrada, e este valor é a medida de interesse para calcular o NDVI.

Dado que o pico do sinal ocorre muito rapidamente, é desafiador obter a tensão exata nesse momento específico por meio de técnicas de amostragem, pois isso reduziria a precisão da medição e afetaria o resultado desejado ao capturar o valor 1 ms antes ou depois, por exemplo. Assim, propõe-se criar um circuito detector de pico com um capacitor que atua como um filtro passa-baixas, preservando o valor máximo por um período predefinido e adequado para assegurar uma margem de segurança, permitindo a captura do valor desejado através do conversor ADC do microcontrolador.

Com isso, projeta-se o circuito para que o capacitor mantenha um sinal contínuo durante a constante de tempo projetada para manter constante o circuito por pelo menos metade do período do sinal. Para garantir que o sinal armazenado em um ciclo do sinal de entrada não permaneça armazenado após a leitura do sinal e começo do próximo, utiliza-se um circuito em paralelo para descarregar o capacitor através da conexão do nó de saída do capacitor até o terminal comum. O chaveamento deste circuito de *reset* é configurado através de um Transistor de Junção Bipolar (TJB), no qual é controlado por pulsos de tensão controlados através do microcontrolador e sincronizado com os sinais para emissão e recepção do espectro eletromagnético. O circuito visto nesta Figura 33 é um Detector de Pico, composto por um circuito de superdiodo, capacitor para armazenagem do valor de pico, circuito de *reset* e *buffer* de saída. Este circuito tem função similar a um *Sample and Hold*, no qual a entrada no modo *Hold* ocorre no momento do pico do sinal. A base do transistor NPN é controlada para descarregar o capacitor sempre antes de ocorrer outro nível alto do sinal de onda quadrada, criando um caminho para a energia armazenada no capacitor.

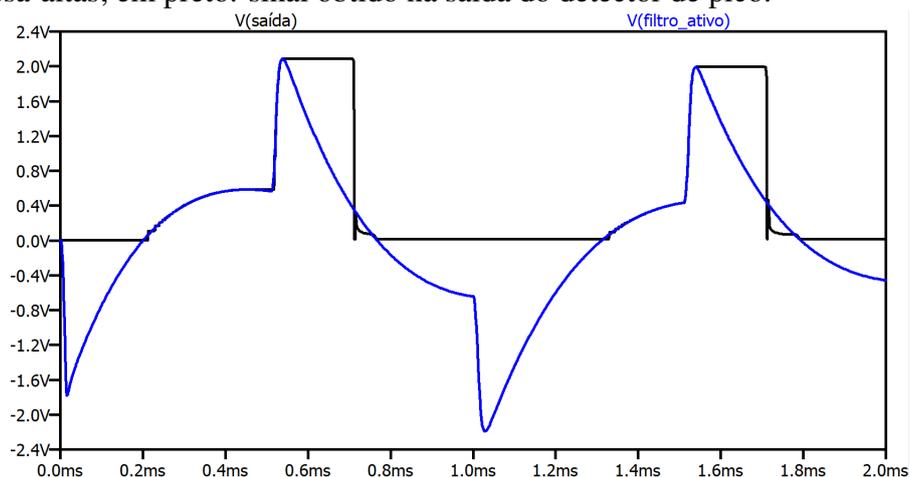
Figura 33 – Circuito projetado para o detector de pico com *reset*.



Fonte: Criado pelo autor.

A Figura 34 mostra o resultado da simulação do circuito com o detector de pico conectado à saída do filtro ativo, em que a amplitude do sinal anteriormente filtrado se estende pelo curto intervalo de tempo dado pela resistência do diodo e a capacitância conectada em paralelo à saída. O circuito funciona como um filtro passa-baixas e mantém o sinal contínuo para ser possível mensurar o valor de tensão. O sinal de *reset* é acionado através do microcontrolador ESP32, através de pulsos de tensão emitidos após o sinal de comando para nível baixo do controle dos LEDs. O transistor funcionando como chave se mantém conduzindo até um instante antes de acionar novamente o LED. O nível máximo do sinal se mantém por 300 μ s, até que o transistor seja acionado, tempo suficiente para medição do valor através do ADC do microcontrolador.

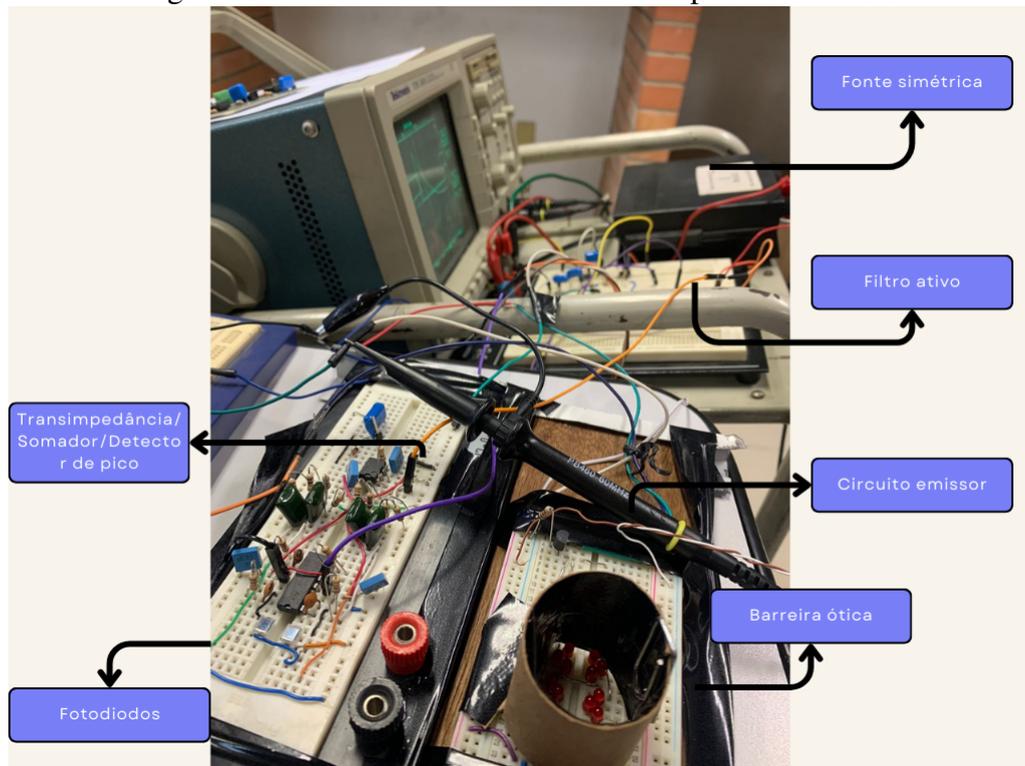
Figura 34 – Resultado da simulação em *software* LTspice, em azul: sinal de saída do filtro ativo passa-altas; em preto: sinal obtido na saída do detector de pico.



Fonte: Criado pelo autor.

Sabe-se da baixa intensidade do sinal óptico emitido, e diante da baixa resposta de reflexo esperada para mensurar, são projetados mais fotoreceptores, ou seja, aumento da área de recepção. Posteriormente, efetua-se testes em bancada, e a Figura 35 exhibe o circuito completo montado sobre placas de ensaio.

Figura 35 – Todos os blocos montados em placas de ensaio.



Fonte: Criado pelo autor.

As etapas de simulação são concomitantes ao processo de testes em bancada, no qual são realizados procedimentos em laboratório para mensurar os sinais de resposta para cada um dos LEDs excitados. Para isso, é utilizado um material de cor branco para refletir o sinal ótico emitido através do circuito de fonte de corrente controlada. Inicialmente, é realizado o teste para o circuito de transimpedância para ajustar o ganho desejável para o circuito com o intuito de melhor representar o sinal recebido pelo fotodiodo.

O ganho é dado pela resistência colocada no caminho de realimentação do AmpOp. O valor de resistência, e conseqüentemente de ganho de tensão, é obtido através de um teste para o mesmo fotodiodo colocado sob a irradiância solar às 15 h na localidade identificada sob coordenadas geográficas. A medição de corrente elétrica sob o circuito do fotodiodo foi medida através de um amperímetro atingindo o valor de 430 mA.

A etapa de testes em bancada contempla a discriminação dos blocos de circuito e estudo de sinais processados por cada um desses. O comando do circuito de emissão é realizado através do microcontrolador ESP32, no qual são definidas as portas e algoritmo de comando, possibilitando a emissão conhecida, tanto dos LEDs vermelhos, quanto infravermelhos. Durante os testes é implementado um código no qual o processo é comandado por um botão simples, e ao pressioná-lo ocorre a emissão do sinal e a medição do sinal refletido. São mensurados alguns valores para verificar o comportamento, e identificar possíveis falhas. Inicialmente são realizadas medidas com distâncias variando de 10 cm a 60 cm, nas quais são utilizados materiais para refletir branco e verde. Os valores de

tensão medidos podem ser analisados na Tabela 3. Para cada altura são monitorados os 128 valores de tensão para o LED vermelho e os 128 valores de tensão para o LED infravermelho, e calculados os valores médios e desvios padrão. Vale salientar que são desconsiderados fatores do ambiente que possam impactar nestes resultados, e o objetivo deste experimento é justamente testar a eficiência da captura do valor de tensão utilizando o circuito de detecção de pico e o sistema de controle do mesmo.

Tabela 3 – Tabela de valores de tensão obtidos de teste em bancada medindo os 128 pulsos através do detector de pico e ADC do microcontrolador para diferentes combinações de distância a dois planos de cores diferentes e para os dois comprimentos de onda definidos.

Cor	Distância	Vermelho		Infravermelho	
		Média [V]	Desvio padrão	Média [V]	Desvio padrão
Branco	10 cm	3,30	0,00	3,30	0,00
	20 cm	3,30	0,00	3,30	0,00
	30 cm	3,30	0,00	3,30	0,00
	40 cm	2,38	0,06	2,01	0,06
	50 cm	1,23	0,05	1,11	0,04
	60 cm	0,60	0,04	0,43	0,05
Verde	10 cm	3,30	0,00	3,30	0,00
	20 cm	3,30	0,00	3,30	0,00
	30 cm	1,89	0,06	3,30	0,00
	40 cm	0,93	0,07	2,31	0,05
	50 cm	0,49	0,05	0,87	0,04
	60 cm	0,41	0,06	0,59	0,05

Os baixos valores de desvio padrão indicam bons resultados nas medições das amplitudes das ondas quadradas. Utilizando a equação do NDVI, é possível obter valores negativos para materiais brancos e valores positivos para materiais verdes, indicando maior potência luminosa emitida pelos LEDs vermelhos. No entanto, os valores mostram uma diferença relativa nos resultados de NDVI entre diferentes alturas, sugerindo a possível influência de sinais luminosos de equipamentos próximos ao experimento, como monitores e LEDs de outros dispositivos. Portanto, os valores de NDVI são desconsiderados para este experimento, mas o algoritmo é funcional, produzindo os mesmos valores que os calculados manualmente a partir das 128 medições de cada onda refletida. Os objetos usados para refletir a luz são papel sulfite branco e tecido verde, ambos não são caracterizados e desconhece-se a porcentagem de refletância para os comprimentos de onda trabalhados, mas o objetivo é alcançar médias de tensão mais próximas entre si para o fundo branco.

Percebe-se que para as distâncias inferiores a 30 m se atinge a saturação de *AmpOps*,

mesma tensão de alimentação dos CIs. Porém, são distâncias mais próximas e em local de testes com objeto de reflexão plano. Espera-se que a taxa de luz refletida pelas gramíneas seja relativamente menor, assim como o objetivo é manter o equipamento a uma distância maior em relação ao mensurando, a 60 cm. Logo, para questões de projeto, dimensiona-se o circuito de condicionamento considerando as perdas por dispersão dos feixes de luz provocada pela vegetação.

Na Seção 4.4 são apresentados o circuito elétrico completo do protótipo projetado, *layout* do circuito impresso, montagem dos módulos, foto da montagem e o empacotamento físico de todos os blocos.

4.3 Sistema de controle

O sistema de controle centralizado pelo microcontrolador é dado pelo algoritmo discretizado na Figura 14, e nesta seção são evidenciadas as formas de controle.

Inicialmente, a função recebe como parâmetros de entrada os pinos de alimentação do LED, o pino de controle do *reset* e o pino de leitura do valor de tensão. A função coleta 128 medições do fotodiodo enquanto alterna o estado do LED e do transistor em períodos definidos. Após a coleta, a função calcula a média e o desvio padrão das tensões medidas, identifica e remove os valores acima do desvio padrão previamente estipulado, recalcula a média filtrada e finalmente converte essa média para uma tensão filtrada em Volts, retornada como resultado. A função é chamada duas vezes no *loop* principal, uma para o LED vermelho e outra para o LED infravermelho, e em seguida é realizado o cálculo do NDVI e impresso com outras informações desejadas, como hora e coordenadas.

A função que gera a onda quadrada e realiza a aquisição da medida de tensão possui três variáveis atribuídas, referentes ao pino que comanda o circuito de emissor: pino 19 para o LED vermelho, pino 23 para o LED infravermelho, pino 34 para aquisição de valores do detector de pico e pino 22 para comando do circuito de *reset*. O período do sinal é definido como 500 μ s, assim como o número de medições igual a 128. Utiliza-se um laço de repetição do tipo *for* que repete as seguintes ações para o número de medições declarado: estabelece nível alto na saída conectada ao controle dos LEDs; começa a contar o tempo e utiliza-se uma linha de comando do tipo *while* para esperar o final do período (500 μ s), quando o período é concluído, estabelece-se nível baixo no pino de comando dos LEDs, realiza-se a leitura do valor de tensão e armazena-a em um vetor, outra variável é usada para incrementar os valores medidos, espera-se mais 300 μ s e aciona-se o pino de comando do *reset*, ao final de 1 ms o pino do *reset* é estabelecido ao nível lógico baixo.

Após repetir essa operação 128 vezes, calcula-se a média dos valores de tensão medidos e somam-se os desvios da média para calcular o desvio padrão, os limites inferiores e superiores são calculados e considerados para filtrar os valores de tensão e eliminar medições fora dos limites, os *outliers*. Por fim, uma nova média é calculada e utilizada para

converter em valores de tensão, considerando-se o número de *bits* do conversor ADC.

No *loop* principal são verificadas algumas condições para efetivamente acionar o protótipo e executar as medidas de NDVI. Para casos experimentais também é prevista a inclusão do botão de acionamento do processo, se o botão é pressionado uma vez, todas as funções no laço principal acontecem, caso satisfaçam as condições pré-definidas. Após pressionar o botão são calculados os valores de *roll* e *pitch* e verifica-se a inclinação do equipamento, estando inclinado a menos de 30° as medidas de NDVI são realizadas, e por fim, é realizada a comunicação serial com o módulo GPS, e caso as coordenadas difiram das últimas quatro coordenadas salvas no arquivo TXT, a nova medida, a hora e as coordenadas são salvas na memória *flash*.

Para questões de projeto, considera-se que o botão possa ser substituído por um período pré-estabelecido, e que o laço principal possa ser repetido a cada intervalo de 1 h. O acesso aos dados deve ocorrer através da conexão via cabo serial com o microcontrolador para descarregar as informações através de uma função criada para transmitir os dados via porta serial. Com os dados adquiridos é possível utilizar as técnicas abordadas neste trabalho para criação dos mapas.

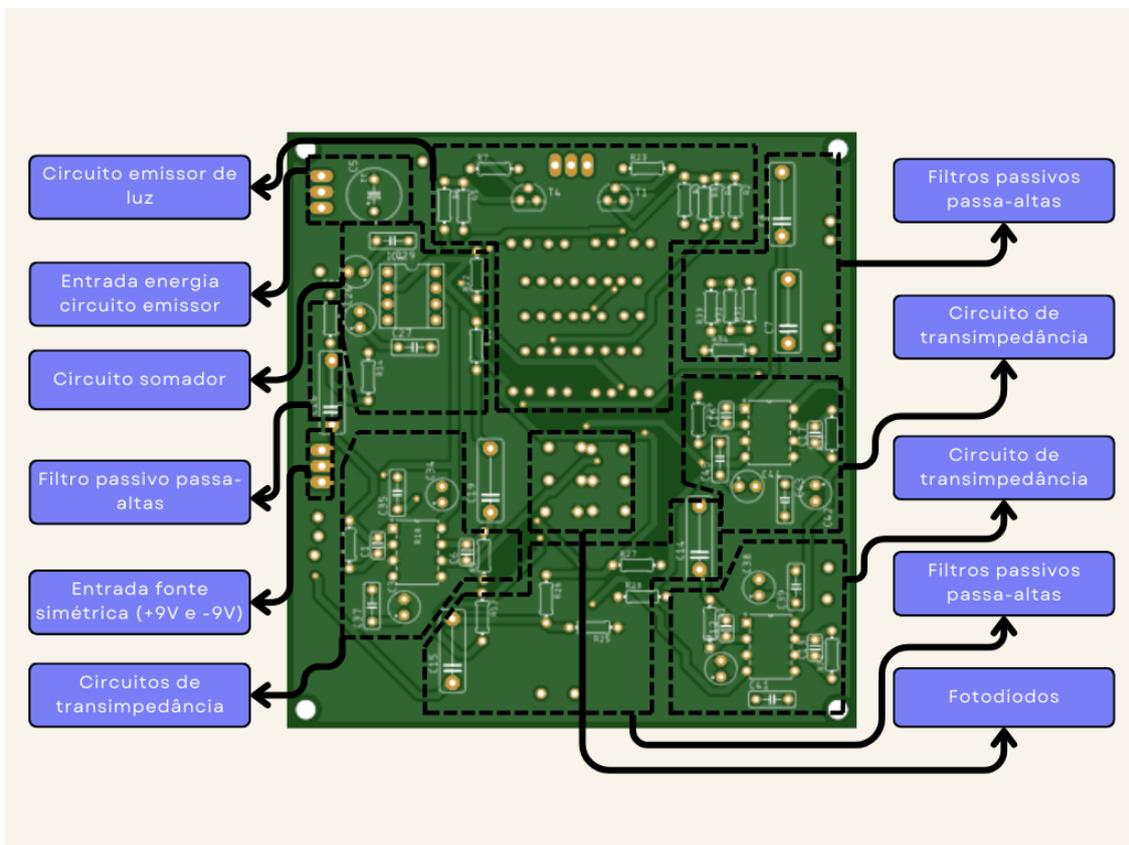
Após os testes do sistema de controle, e da placa, em sua primeira versão utilizando matriz perfurada, para comando de GPS e acelerômetro, chega-se ao ponto de efetivar o protótipo através de circuito impresso, melhorando a possibilidade de testes em campo. A Seção 4.4 mostra a fase de projeto do circuito impresso e empacotamento dos circuitos para melhor manuseio.

4.4 Protótipo

Após projetar o filtro e realizar o estudo, no qual há espaço para futuras modificações conforme a necessidade de ajustes para medições em diferentes alturas em relação ao mensurando, o próximo passo, com o projeto definido, é a prototipagem e criação do *Layout* em circuito impresso para permitir a integração do sistema.

O desenvolvimento do circuito impresso ocorre através do uso do *software* Eagle, utilizando uma versão gratuita, em que é limitado o tamanho da placa. Sendo assim, o projeto é dividido em duas placas, e a Figura 36 engloba os circuitos de emissão, recepção e condicionamento do sinal recebido até a parte do circuito somador. São utilizados terminais de conexão em partes do circuito para possibilitar a melhor identificação de possíveis falhas e efetivar os testes necessários em cada bloco de condicionamento.

Figura 36 – *Layout* da placa de circuito impresso para medição de NDVI. Parte inferior da placa.

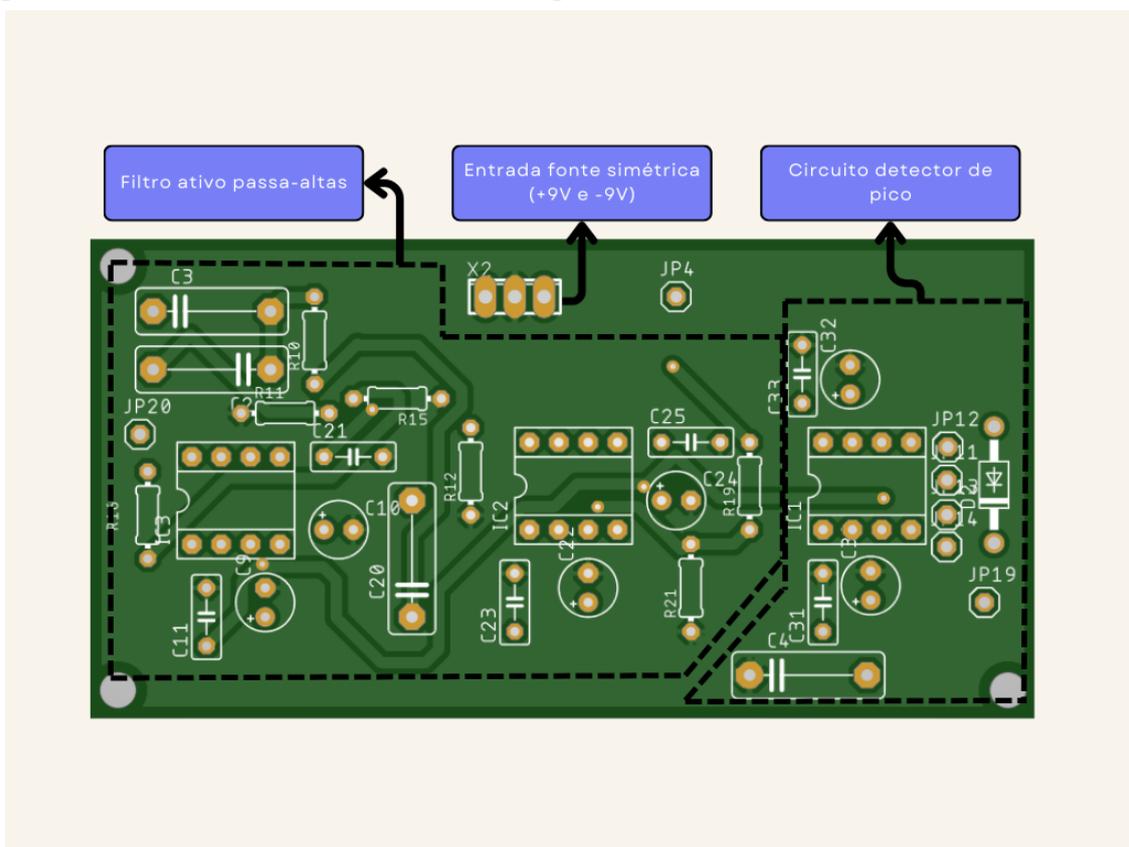


Fonte: Criado pelo autor.

Percebe-se que o projeto prevê a utilização de seis fotodiodos e que os ensaios em bancada já apresentavam bom resultado com quatro fotodiodos, mas considera-se que em condições de campo a dispersão da radiação dos LEDs pode diminuir o sinal recebido e por isso justifica-se a utilização de mais fotodiodos. Além dos circuitos de transimpedância, utiliza-se um filtro passa-altas passivo com frequência de corte em 100 Hz com o intuito de remover a irradiância do sol antes mesmo do bloco de filtro ativo. Após a filtragem inicial é utilizado o circuito somador inversor com ganho de 22 V V^{-1} , visto que ao eliminar o sinal recebido da irradiância do sol é possível amplificar o sinal de interesse sem saturar os *AmpOps*. Para todos os CIs são utilizados capacitores de desacoplamento, dois capacitores em paralelo para cada terminal de alimentação. A saída do circuito apresentado na Figura 36 é dada pelo terminal do circuito somador.

A Figura 37 é dada pela configuração do filtro ativo projetado na Figura 30, e justifica-se a criação deste por falta de espaço para criar todo o circuito na mesma placa de circuito impresso, visto que o *software* utilizado (*Eagle*) na versão livre possui limite de dimensões totais. Nesse circuito também está sendo implementado o circuito do detector de pico utilizando o circuito de superdiodo.

Figura 37 – *Layout* da parte superior da placa de circuito impresso para o filtro ativo passa-altas de terceira ordem e detector de pico.



Fonte: Criado pelo autor.

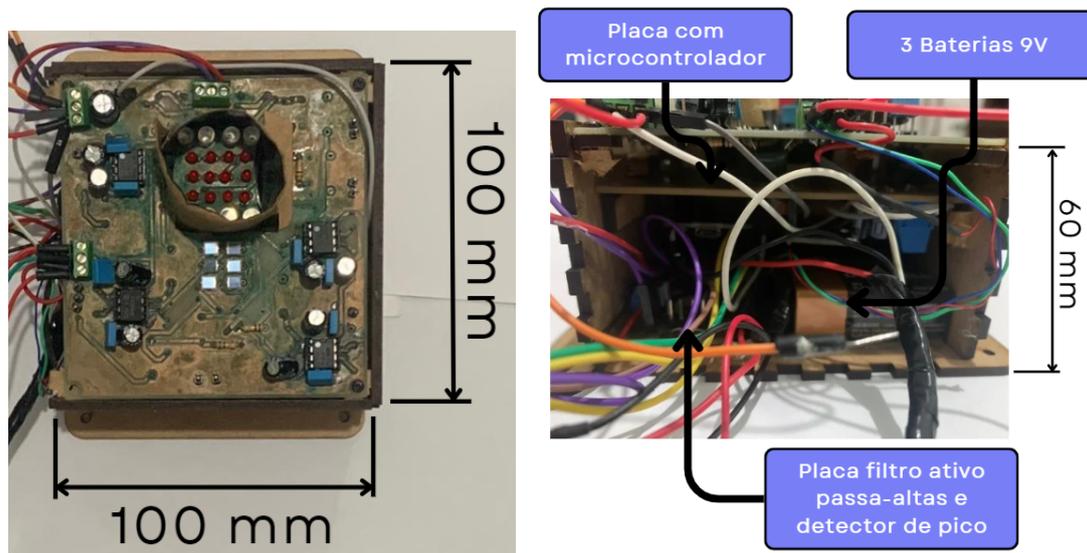
A saída do filtro ativo é caracterizada com ondas quadradas deformadas pela característica já apresentada, em que a medida de interesse está no pico da onda e para extrair esta informação ainda é necessário realizar uma etapa de condicionamento também comandada pelo microcontrolador, para ser possível mensurar um valor de tensão através da porta analógica. A aquisição dos dados de NDVI, GPS e acelerômetro são apresentadas na Seção 3.4, na qual são mencionadas as metodologias adotadas para representar o sinal de saída desejado.

Mesmo com o circuito detector de pico projetado nesta placa, precisa-se do circuito de *reset* que é implementado através do circuito adicional, assim como o *buffer*, projetado posteriormente. Todas as placas devem ser alocadas de maneira que tornem o protótipo portátil, e para isso utilizam-se ferramentas de corte laser para a confecção de uma caixa de material MDF, a qual possui dimensões de 100 mm x 100 mm x 60 mm. As fontes de tensão utilizadas são baterias de 9 V, sendo duas para a fonte simétrica, alimentando os circuitos com circuitos integrados e uma bateria de 9 V apenas para o circuito emissor.

A Figura 38 apresenta a montagem final do protótipo, em que uma das placas fica na parte externa da caixa para o circuito receptor conseguir receber a luz refletida sem demais obstáculos. A barreira ótica entre o circuito emissor e o receptor é improvisada com

material confeccionado de papel com densidade que permitisse a fixação e firmeza suficiente, e internamente utiliza-se uma camada de fita de cor preta para eliminar possíveis perdas óticas.

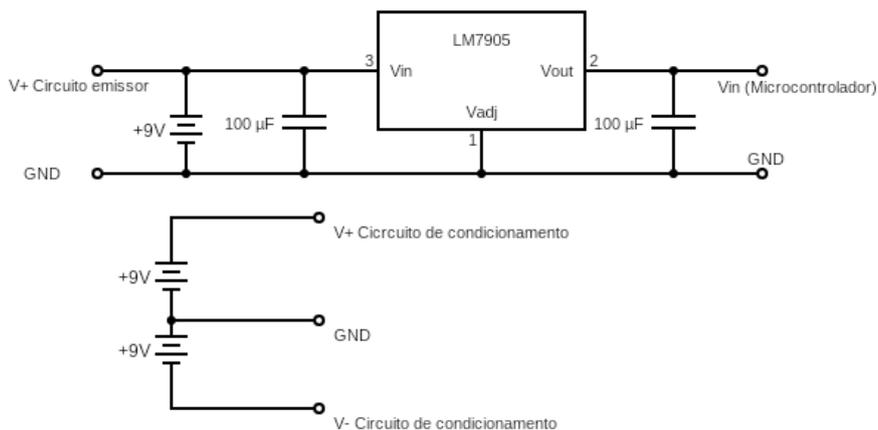
Figura 38 – Empacotamento físico do protótipo. a) à esquerda vista inferior (voltada para o mensurando); b) à direita vista lateral.



Fonte: Criado pelo autor.

Na imagem também é possível ver como estão alocadas as baterias de 9 V, e o circuito de alimentação para o protótipo pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 – Circuito de alimentação para o microcontrolador, para o circuito emissor e para o circuito receptor de luz.



Fonte: Criado pelo autor.

Portanto, são utilizadas três baterias de 9 V, sendo duas para formar uma fonte simétrica para o circuito de condicionamento de sinais do circuito receptor de luz, e uma

bateria para alimentar o circuito emissor e o microcontrolador. O microcontrolador possui um regulador de tensão interno, capaz de fornecer a tensão de 3,3 V, usada para alimentar os módulos GPS e acelerômetro. Com o protótipo funcional, objetiva-se compará-lo com o equipamento de referência e adquirir dados para análise de comportamento do mesmo. A Seção 4.5 mostra como são abordados os procedimentos de testes.

4.5 Procedimento de testes e análises comparativas

Nesta seção é proposta a coleta de dados utilizando o instrumento comercial e o protótipo, objetiva-se analisar o comportamento da resposta para diferentes amostras coletadas em ambiente não controlado, adotando-se como referência o *Greenseeker*. Para isso, são realizados dois experimentos, nos quais a metodologia para ajuste de curva de calibração é apresentada na Subseção 4.5.1 e o desenho experimental é proposto na Subseção 3.7.

4.5.1 Aquisição de dados para ajuste da curva de calibração

A Tabela 4 apresenta os dados obtidos durante medições com o dispositivo comercial *Greenseeker* e o protótipo proposto neste trabalho. Propõe-se a coleta de dados em triplicata para cada dispositivo medidor, ou seja, cada amostra é mensurada três vezes por cada dispositivo, e busca-se considerar diferentes tipos de vegetação e amostras para abranger a maior faixa possível de NDVI. A Figura 40 exemplifica os diferentes tipos de amostras mensuradas, sendo que para as amostras de NaCl, calcário e água são mensuradas pelo *Greenseeker* indicadas pelo NDVI de 0,00.

Figura 40 – Exemplos de amostras não vegetativas. a) à esquerda NaCl; b) à direita Calcário.



Fonte: Criado pelo autor.

Tabela 4 – Tabela de dados para calibração.

Amostra	Greenseeker			Protótipo		
	Greenseeker (1)	Greenseeker (2)	Greenseeker (3)	Protótipo (1)	Protótipo (2)	Protótipo (3)
NaCl	0,000000	0,000000	0,000000	0,369729	0,352256	0,354938
Água	0,000000	0,000000	0,000000	0,298497	0,311929	0,297986
Solo descoberto	0,160000	0,150000	0,150000	0,346800	0,350591	0,351985
Calcário	0,000000	0,000000	0,000000	0,331018	0,339307	0,340904
Vegetação	0,870000	0,870000	0,860000	0,417062	0,424931	0,430288
Vegetação	0,920000	0,910000	0,900000	0,452395	0,456603	0,461046
Vegetação	0,870000	0,890000	0,870000	0,439932	0,444380	0,446502
Vegetação	0,860000	0,850000	0,860000	0,448992	0,456563	0,460844
Vegetação	0,900000	0,910000	0,900000	0,465115	0,468280	0,469860
Vegetação	0,870000	0,890000	0,890000	0,462411	0,468206	0,471892
Vegetação	0,810000	0,810000	0,810000	0,430231	0,430505	0,430437
Vegetação	0,890000	0,900000	0,900000	0,463048	0,467582	0,471047
Vegetação	0,700000	0,690000	0,680000	0,411619	0,416954	0,418461
Vegetação	0,890000	0,880000	0,880000	0,433006	0,440296	0,440183
Vegetação	0,790000	0,750000	0,750000	0,415715	0,419303	0,423684
Vegetação	0,880000	0,890000	0,890000	0,465927	0,471220	0,474408
Vegetação	0,890000	0,880000	0,880000	0,433116	0,441765	0,447648
Vegetação	0,910000	0,910000	0,910000	0,469166	0,478389	0,481950
Vegetação	0,880000	0,870000	0,860000	0,457074	0,459753	0,461717
Vegetação	0,850000	0,860000	0,850000	0,428464	0,431952	0,435116
Vegetação	0,880000	0,880000	0,890000	0,446432	0,452735	0,457004
Vegetação	0,870000	0,860000	0,860000	0,427950	0,431365	0,434989
Vegetação	0,870000	0,890000	0,890000	0,432158	0,435694	0,439452
Vegetação	0,900000	0,900000	0,890000	0,437275	0,442377	0,442848
Vegetação	0,880000	0,880000	0,860000	0,431639	0,436532	0,435586
Vegetação	0,570000	0,560000	0,580000	0,394638	0,395614	0,399148
Vegetação	0,260000	0,250000	0,250000	0,366843	0,373675	0,377537
Água	0,000000	0,000000	0,000000	0,359802	0,361417	0,364193
Vegetação	0,900000	0,890000	0,890000	0,440043	0,444151	0,444988
Vegetação	0,560000	0,580000	0,560000	0,386808	0,392549	0,393642
Vegetação	0,680000	0,650000	0,680000	0,395326	0,401843	0,402894
Vegetação	0,860000	0,880000	0,860000	0,449590	0,453630	0,457606
Vegetação	0,770000	0,770000	0,750000	0,420706	0,423920	0,428840
Vegetação	0,360000	0,370000	0,370000	0,380183	0,384757	0,388369

Além das amostras exemplificadas, a tabela é composta de dados resultantes de medida da água (também mensurada com NDVI igual a 0,00, pelo *Greenseeker*), solo descoberto (média mensurada pelo *Greenseeker* igual a 0,15) e diferentes alturas da cultura de Azevém.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização do trabalho, em que foram coletados com o uso dos dispositivos mencionados no Capítulo 3. Os resultados são característicos de análises realizadas em laboratório e em campo. Busca-se construir mapas que mostrem o NDVI coletado pontualmente através de dispositivos de instrumentação optoeletrônica e a fusão de dados obtidos de imagens de satélite, com o uso de algoritmos de regressão.

Considera-se o Capítulo 4, que evidencia os métodos utilizados para a construção do protótipo, e a partir deste são geradas análises preliminares, como curva de calibração análise de incertezas de medição extraídas de coletas de campo, comparadas com o dispositivo comercial *Greenseeker*. Logo, este capítulo está dividido em duas seções, a Seção 5.1 trata de evidenciar resultados obtidos do uso do protótipo construído e a Seção 5.2 traz mapas criados com as ferramentas propostas.

5.1 Comparação das medições realizadas com o protótipo e com o *Greenseeker*

Com o protótipo construído e operando conforme a metodologia proposta, algumas análises são possíveis. A calibração de equipamentos é um passo crucial para garantir a precisão e a confiabilidade das medições. Neste trabalho, apresenta-se a curva de calibração de primeira ordem obtida a partir dos dados coletados utilizando os dispositivos *Greenseeker* e o protótipo. A Figura 41 mostra dois extremos mensurados com os instrumentos para abranger os limiares de medida de NDVI.

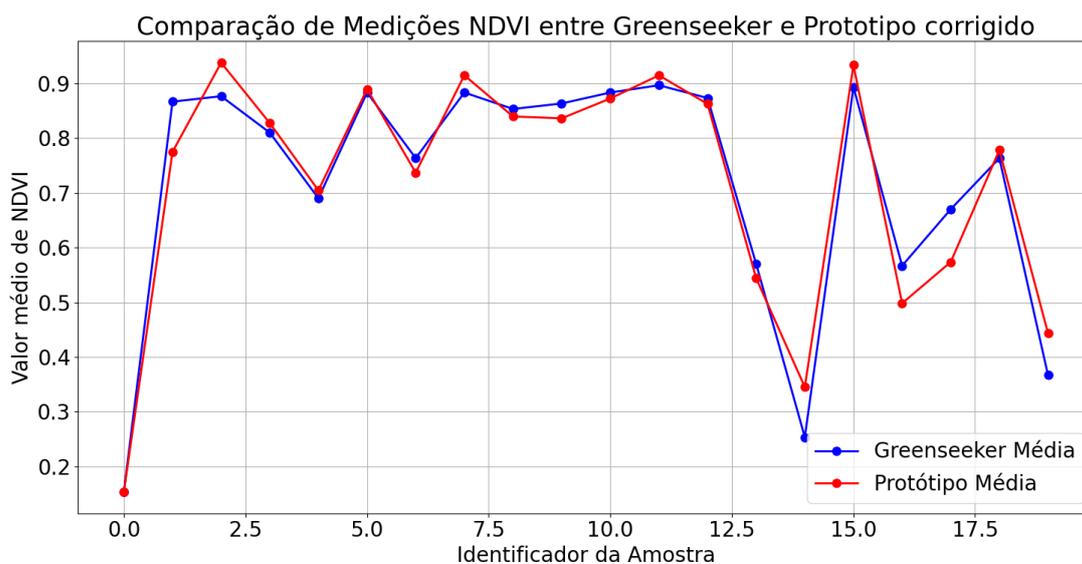
Figura 41 – Duas amostras coletadas com o protótipo. a) à esquerda NDVI de 0,349792; b) à direita NDVI de 0,440833.



Fonte: Criado pelo autor.

Os dados foram coletados em triplicata para cada equipamento, conforme demonstrado na Tabela 4. Os valores médios de cada conjunto de medições foram utilizados para construir a curva de calibração. A Figura 42 mostra os resultados tomados em 20 pontos diferentes, aos quais se buscaram vegetações que caracterizassem a maior faixa de medição, obtendo valores de NDVI entre 0,12 e 0,92, mensurados pelo equipamento de referência.

Figura 42 – Amostras obtidas para posterior construção da curva de calibração.



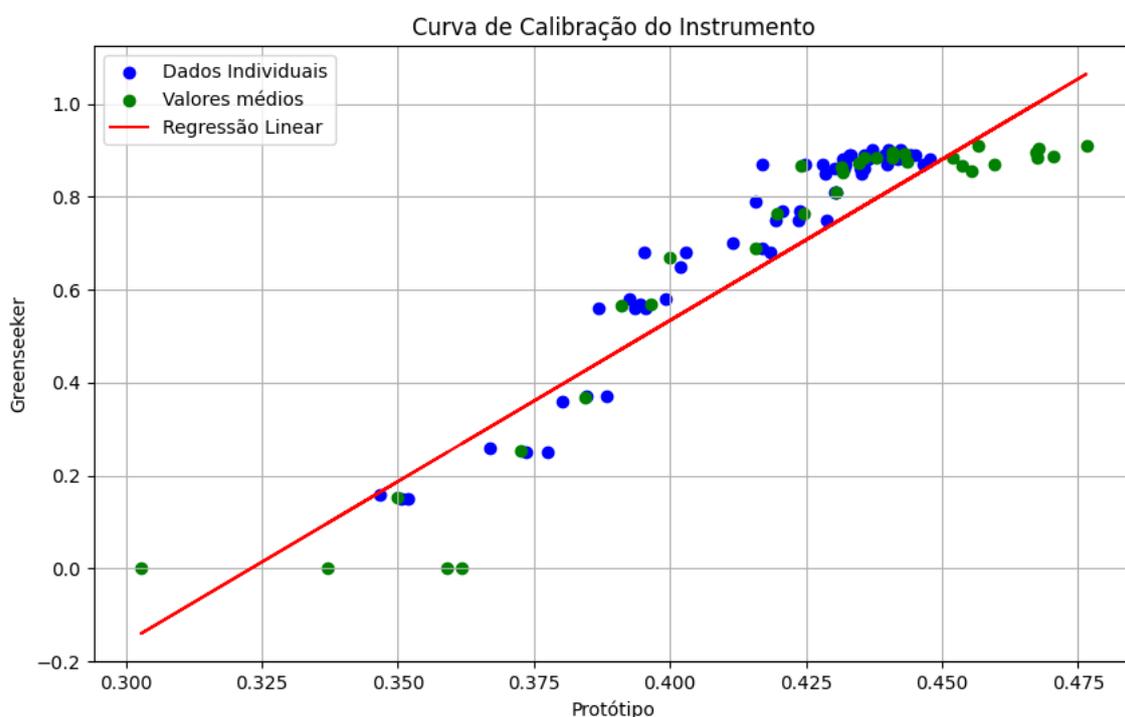
Fonte: Criado pelo autor.

Através da imagem acima é possível reparar no comportamento similar entre as medidas adquiridas pelo equipamento de referência e o protótipo, obtendo o valor de corre-

lação, indicado pelo coeficiente de *Pearson* entre os valores médios mensurados, muito forte (0,97), e a partir destas medidas é gerada a curva de calibração.

Para a construção da curva de calibração, ajustam-se equações de primeiro e segundo grau, e tem-se como resposta a regressão linear, visto que através de simulações, os erros médio quadrático e médio absoluto não alcançaram valores que justificassem o aumento do grau do polinômio. Conforme a metodologia proposta, são averiguadas diferentes amostras, como NaCl, calcário, vegetação e solo descoberto. A Figura 43 exibe os dados mensurados pelo protótipo correspondentes ao valor do instrumento de referência.

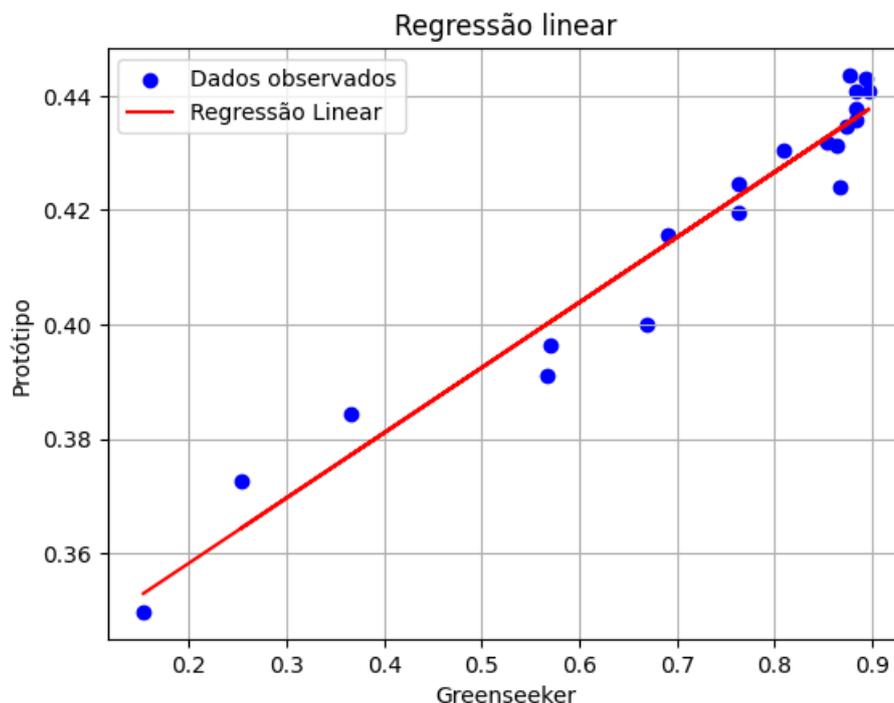
Figura 43 – Curva de calibração considerando todas as amostras.



A análise da curva de calibração indica uma tendência à correlação entre os valores medidos pelos dispositivos Greenseeker e protótipo. A equação da reta ajustada fornece uma boa representação dos dados, evidenciando a confiabilidade do modelo polinomial de primeiro grau para a calibração dos dispositivos. Porém, percebe-se que existem pontos coletados pelo protótipo que sobressaem os valores medidos pelo *Greenseeker*, assim como os valores mensurados como zero pelo dispositivo comercial, não estão diretamente correlacionados com as medidas do protótipo, e decide-se por não incluir estes dados para estimar os valores de NDVI e ajustar a saída do protótipo. Sendo assim, adota-se a reta exibida na Figura 44, excluindo dados dos dois limiares, sendo que as medidas iguais a 0,00, exibidas pelo do *Greenseeker*, visto que são amostras não vegetativas. O resultado esperado para regiões não vegetativas é de índice negativo, mas o *hardware* e *software* do instrumento comercial devem ser modificados para apenas medições vegetativas. Para

o limiar superior, percebe-se a saturação das medidas do protótipo, atingindo o valor máximo da escala do conversor A/D, de 3,3 V.

Figura 44 – Curva de calibração desconsiderando dados.



Fonte: Criado pelo autor.

Com isso, a equação de calibração fica corrigida e representada pela Equação 12.

$$y = 8,36166559318531 \cdot x - 2,7713355103784707 \quad (12)$$

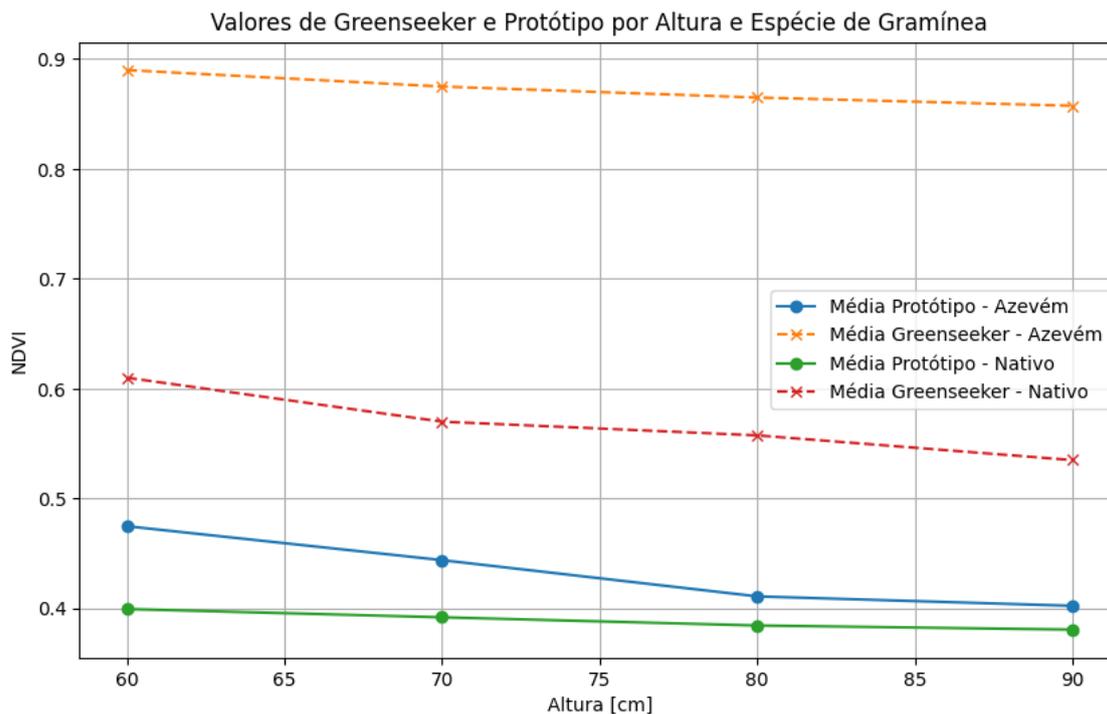
Os coeficientes obtidos demonstram a influência significativa do termo linear na calibração, permitindo correções para as medições realizadas pelo protótipo em relação ao padrão estabelecido pelo *Greenseeker*, equipamento de referência. O polinômio obtido da curva de calibração é usado no algoritmo para correção das medidas obtidas pelo protótipo, e assim possibilitar resultados mais próximos da realidade ao elaborar o mapeamento das medidas de NDVI. Percebe-se que o número de amostras coletadas é igual a 60 valores de NDVI para diferentes condições, e as informações estatísticas para estas medidas podem ser vistas na Tabela 5. Os dados do protótipo são corrigidos aplicando a equação de calibração.

Tabela 5 – Estatísticas dos dados comparando-as entre *Greenseeker* e dados corrigidos do protótipo.

Variável	N	Média	EP Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Protótipo	60	0,719	0,028	0,021	0,047	0,128	0,558	0,812	0,873	0,971
<i>Greenseeker</i>	60	0,719	0,028	0,220	0,048	0,150	0,632	0,830	0,880	0,900

A Figura 45 é construída através dos dados apresentados nas tabelas 8 e Tabela 9, as quais possuem informações das alturas e do tipo de vegetação mensurada, conforme o desenho experimental planejado.

Figura 45 – Gráfico de linhas relacionando o comportamento dos instrumentos, antes do ajuste através da equação de calibração, de medida para diferentes alturas e espécies de gramíneas.



Fonte: Criado pelo autor.

Percebeu-se que o intervalo de operação do *Greenseeker* que apresentou melhor resposta ao variar a altura, foi entre 80 cm a 90 cm, visto que neste experimento o ideal é que os valores de NDVI sejam insensíveis à variação de altura. A variação do NDVI para diferentes culturas não é considerado um problema; contudo, o efeito combinado com a cultura é. Por outro lado, o protótipo apresentou uma maior variabilidade de respostas em função dos dois fatores controláveis, altura e cultura. Para ambas as espécies de pastagens diferentes resultados de NDVI foram mensurados, e percebe-se por análise visual que a melhor região de operação para o protótipo está na altura entre 80 cm a 90 cm, em relação ao solo, para ambas as vegetações. Isto condiz com a altura das vegetações, em que a nativa possui menos camadas de vegetação e a cultivada apresenta maior altura e volume de pastagem.

O resultado da aplicação do desenho experimental planejado para os dois fatores controláveis pode ser visto nas tabelas 6 e 7, nas quais se pode ver o resultado da análise de variância, e vale ressaltar que os dados adquiridos pelo *Greenseeker* não estão corrigidos através de equação de calibração, uma vez que, se está avaliando apenas o impacto dos

fatores à saída, e não a proximidade entre o valor do protótipo e do valor de referência.

Tabela 6 – Análise de Variância para o *Greenseeker*.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Fator F	PR(>F)
C(Cultura)	0,738	1	2.200,583	4,027e-25
C(Altura)	0,012	3	12,298	4,513e-05
C(Espécie):C(Altura)	0,001	3	1,850	1,649e-01
Residual	0,008	24		

Tabela 7 – Análise de Variância para o Protótipo.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Fator F	PR(>F)
C(Cultura)	0,015	1	306,643	3,569e-15
C(Altura)	0,010	3	68,252	6,809e-12
C(Espécie):C(Altura)	0,003	3	24,613	1,681e-07
Residual	0,001	24		

Para o *Greenseeker* e para o protótipo é possível verificar que o tipo de vegetação e a altura em relação ao solo provocam efeitos significantes sob a variável dependente NDVI, individualmente. Porém, para o *Greenseeker* não é possível afirmar que a interação desses fatores provoque efeitos às medidas. Todavia, estatisticamente, fica explícito que a interação dos fatores poderá afetar significativamente as medidas do protótipo.

5.2 Mapeamento do NDVI

A Figura 46 exibe o mapa criado através da biblioteca *Folium* na qual o código é usado para esboçar as coordenadas geográficas e em cada ponto pode-se verificar o horário da coleta e o valor de NDVI. Os retângulos representam a resolução espacial apresentada pela ferramenta SatVeg, assim como o *popup* que pode ser visto indicando o NDVI mensurado pela mesma. Percebe-se que os 50 pontos coletados aleatoriamente englobam apenas 3 partes dos quatro pontos de resolução disponibilizada por imagens de satélite.

Figura 46 – Mapa elaborado com dados coletados através do uso da biblioteca *Folium*.



Fonte: Criado pelo autor.

Nesta imagem existem apenas dados coletados através do dispositivo comercial, mas representa um dos objetivos específicos, sendo mapear valores de NDVI medidos em pontos aleatórios, obedecendo um intervalo de tempo pré-estabelecido e que esteja condicionado conforme as técnicas implementadas. Estes pontos são analisados como se fossem oriundos do equipamento embarcado e posicionado no pescoço de um bovino. Neste experimento foram também testados o GPS e o acelerômetro, com resultado de desvio padrão entre a distância captada pelo sensor GPS que compõe os *smartphone* e o módulo NEO-6M.

O mapa da Figura 47 é uma solução para indicar os pontos onde foram medidos os valores de NDVI, mostrando partes separadas conforme a resolução espacial da ferramenta SatVeg. Os quadrados 1, 2, 3 e 4 são as áreas extraídas da ferramenta SatVeg, com NDVI igual a 0,78, 0,78, 0,75 e 0,75, respectivamente. Pela imagem também é possível ver locais com mais água, próximos aos dados coletados. Esses 19 pontos vermelhos representam as coordenadas recebidas pelo GPS NEO-6M e transmitidas para a memória *flash* do microcontrolador ESP32. Esses são usados para comparar com o aplicativo de *smartphone* que se conecta ao *Greenseeker*.

Figura 47 – Mapa com valores NDVI, obtidas através das ferramentas SatVeg e *Greenseeker*, em vermelho coordenadas recebidas via GPS NEO-6M

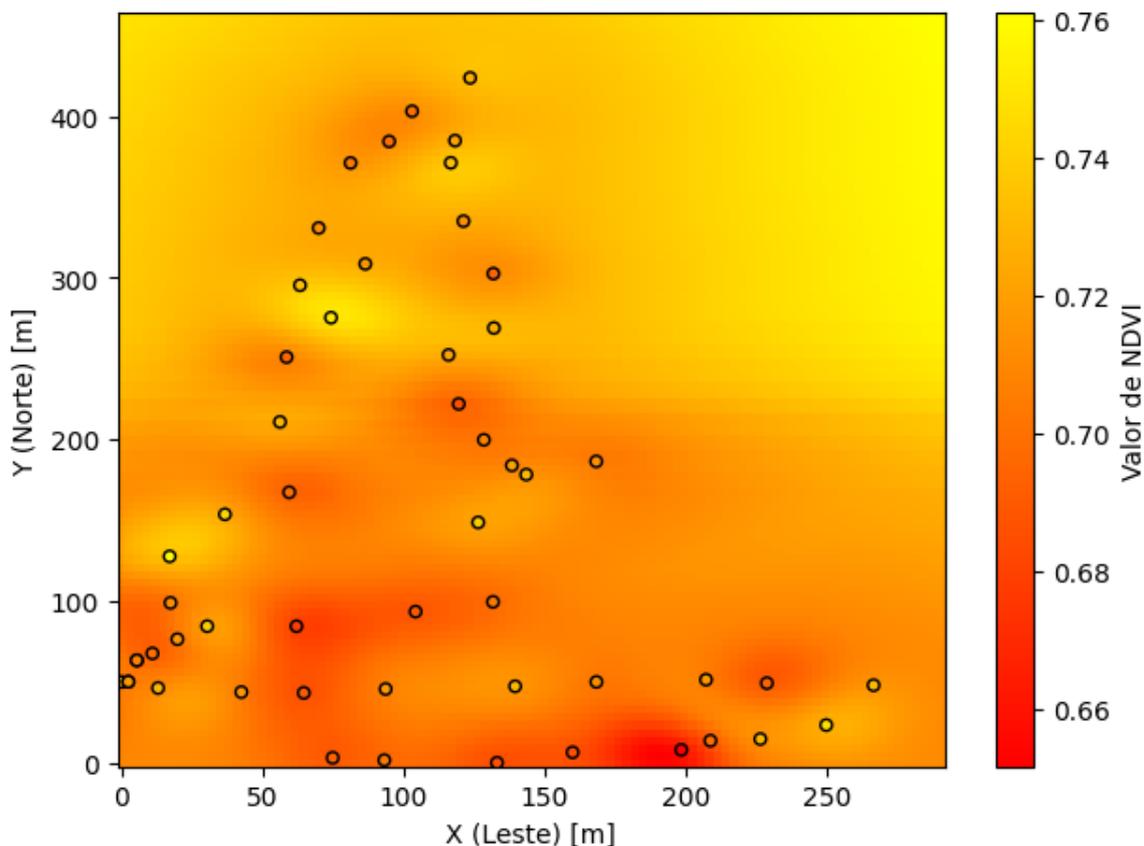


Fonte: Criado pelo autor.

Os resultados mostram um erro médio de 6,21 m e um desvio padrão (DP) de 5,18 m, indicando a discrepância entre as medições obtidas pelo GPS NEO-6M e pelo *smartphone*. Outra vantagem da biblioteca *Folium* é a capacidade de salvar o mapa em formato HTML, permitindo a navegação para visualização de informações e a inclusão dessas informações no *popup* criado. Com os dados coletados, foi possível empregar algoritmos de interpolação e fusão de dados para descrever melhor uma área total.

A avaliação final é realizada nos pontos de validação utilizando a técnica de *Kriging* comum. Todos os mapas de interpolação foram desenvolvidos utilizando técnicas de geostatística de interpolação através da biblioteca *Python 3, Pykrige*. A Figura 48 mostra a análise do mapa, onde a área em tons amarelos representa a maior correspondência com os valores de NDVI. Da mesma forma, as áreas em tons de vermelho indicam menores valores de NDVI.

Figura 48 – Mapa com interpolações de valores NDVI, obtidas através das ferramentas SatVeg e *Greenseeker*



Fonte: Criado pelo autor.

Pode-se observar que o modelo de regressão é adequado para representar pontos onde nenhum dado foi coletado, tomando como referência os valores de NDVI obtidos via satélite, verificando uma transição suave de cor e atingindo os valores nas extremidades onde não foram coletados pontos manualmente. Nota-se que o ajuste do peso atinge uma proporção condizente com os dados oriundos das duas fontes utilizadas.

Deve-se levar em consideração a escala temporal dos dados de satélite. Para o mapa elaborado acima, os pesos dos valores estimados não é calculado em função da diferença de dias entre as informações do satélite e das medidas locais. Logo, este é um fator que causa possível variação na resposta, ao utilizar dados de duas fontes distintas e coletados em dias distintos.

Através da mesma biblioteca *Folium*, o mapa dos dados coletados com o protótipo é elaborado. A Figura 49 mostra o mapa com os respectivos valores de NDVI e horário da aquisição para cada ponto. Embora os dados não estejam corrigidos, e que novas correções devem ser atribuídas ao instrumento protótipo, pode-se verificar a funcionalidade, em que se consegue extrair o horário, as coordenadas dos pontos medidos e o valor referente ao cálculo de NDVI.

Figura 49 – Mapa criado com dados adquiridos pelo protótipo construído sem as correções atribuídas aos valores de NDVI.



Fonte: Criado pelo autor.

No mapa acima são apresentados 206 pontos, e na área em questão não foi possível extrair o valor de NDVI via SatVeg com uma data aproximada, visto que o último valor de NDVI disponível via imagem de satélite correspondia ao dia 24 de maio de 2024, enquanto as coletas foram realizadas no dia 27 de junho de 2024. Os dados coletados nos pontos indicados na imagem, dos quais são exemplificados na Tabela 10, não se adequaram a curva de calibração, e acredita-se que houve mudanças estruturais não propositais no aparato. Todavia, como o objetivo principal de gerar os mapas com valores de NDVI, tanto com o protótipo quanto com o instrumento comercial, foi cumprido, encerra-se a coleta de dados verificando a necessidade de investigar o comportamento do protótipo diante de ambiente controlado e que possibilite o levantamento da curva de calibração que represente, com precisão adequada, o valor de NDVI.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação apresenta o trabalho realizado para a definição, projeto, implementação e teste de um medidor ativo portátil do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para operação manual em campo ou para embarcar em veículo, VANT ou animal. Além da eletrônica específica de análise espectral necessária, o instrumento possui sensores, como GPS e acelerômetro, que permitem estender suas funcionalidades para estudo do comportamento do animal e análise fina da cobertura vegetal. A motivação deste trabalho vem do interesse em melhorar a produtividade e o conforto animal, incorporando práticas sustentáveis, e não invasivas, na gestão conjunta de animais e pastagens na pecuária brasileira que maneja o segundo maior rebanho do mundo. As informações sobre a cobertura vegetal e comportamento animal são refinados, no sentido que a resolução espacial e temporal podem ser programadas conforme o tipo de operação desejado.

6.1 Medida de NDVI

A medição de NDVI é feita por um circuito eletrônico composto de LEDs, fotodiodos e filtros analógicos. Uma operação de medida comporta uma sequência de passos comandada por um microcontrolador. Um filtro analógico elimina a componente de radiação refletida pela vegetação devida à incidência da luz solar, considerando que a sua variação é de muito baixa frequência. O processo de medição consiste na geração de radiação pulsada provocada por um conjunto de LEDs. Esta variação é refletida pela vegetação e captada por fotodiodos, cujos sinais são amplificados, amostrados e convertidos para digital. O microcontrolador captura os dados e, se considerados consistentes, são guardados na memória. O microcontrolador gera dois trens de pulsos, um para acionamento de LEDs que emitem na faixa do vermelho e outro para acionamento dos LEDs que emitem na faixa do infravermelho próximo (NIR). O estado da vegetação é identificado pela refletância para os dois comprimentos de onda. Após a construção do protótipo, foram realizados testes experimentais comparando-os com o equipamento *Greenseeker*. Esses experimentos mostraram uma forte correlação entre ambos dispositivos e permitiram traçar a curva de calibração para o do protótipo. No entanto, novos testes revelaram que os

dados não se ajustavam à curva de calibração, e mais trabalhos devem ser executados para identificar possíveis variações construtivas não intencionais.

6.2 Geração do mapa NDVI da área

Os dados coletados pelos equipamentos portáteis são espacialmente aleatórios, principalmente se embarcados em um bovino. Por outro lado, tem-se acesso à informação do NDVI fornecida por satélite, com resolução espacial de 250 m e adquiridos a cada 16 dias. Neste trabalho, faz-se a fusão dos dados coletados em campo pelo instrumento em terra com as informações do satélite através de algoritmos de interpolação espacial.

6.3 Trabalhos futuros

O protótipo construído tem as funcionalidades necessárias para medida georreferenciada do NDVI. Vislumbra-se, entretanto, muitas melhorias e novas funcionalidades, com os dados disponíveis e também incorporação de novos sensores. Inicialmente, pretende-se realizar testes exaustivos de coleta de dados em campo e comparação com um equipamento calibrado quando disponível para uso continuado. Quando a operação for satisfatória pode-se realizar um processo de calibração em laboratório. Como funcionalidade adicional com os dados disponíveis pode-se realizar o mapeamento da atividade do bovino que porta o equipamento, inclusive seu percurso e horário dos deslocamentos, com o intuito de auxiliar o manejo. Em melhorias de *hardware* projeta-se a incorporação de câmera de vídeo para identificar a vegetação, determinar a orientação do equipamento e determinar a distância da vegetação. Outros sensores ainda podem ser agregados como de temperatura, de radiação solar, de umidade, e entre outros. Além disso, o GPS e o acelerômetro que atualmente são módulos separados, poderão ser substituídos por circuitos específicos montados na mesma placa de circuito impresso tornando o equipamento mais compacto. Dentre as características construtivas do medidor NDVI, busca-se por melhorias nos conceitos de instrumentação optoeletrônica, e deseja-se incrementar o sistema com filtros óticos e LEDs de menores ângulos e maior potência de emissão.

REFERÊNCIAS

ALMADANI, M. I.; WEEKS, P.; DEBLITZ, C. Introducing the world's first global producer price indices for beef cattle and sheep. **Animals**, v. 11, n. 8, p. 2314, 2021.

ATKINSON AMORIM, J. G. *et al.* Biomass estimation of spring wheat with machine learning methods using UAV-based multispectral imaging. **International Journal of Remote Sensing**, v. 43, n. 13, p. 4758–4773, 2022.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação E Fundamentos de Medidas. Volume 2**. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2000.

BHATTACHARYA, S. *et al.* Economic MEMS based 3-axis water proof accelerometer for dynamic geo-engineering applications. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 36, p. 111–118, 5 2012.

BURR-BROWN. **Designing photodiode amplifier circuits with OPA128**. Tucson, AZ: Texas Instruments, 2000. Disponível em: <<https://www.ti.com/>>. Acesso em: 08 nov. 2023.

CANO, J. B.; BUONASERA, K.; PEZZOTTI, G. Transduction methods used on biosensors: amperometry and fluorescence. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 72, p. 104–115, 2014.

CARTER, B.; MANCINI, R. **Op Amps for everyone**. 5rd. ed. Oxford: U.K.:Newnes, 2017.

CARVALHO, P. C. d. F. *et al.* Como a estrutura do pasto influencia o animal em pastejo? Exemplificando as interações planta-animal sob as bases e fundamentos do Pastoreio “Rotatínuo”. *In: VIII SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM*, 2016, Viçosa - MG. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2016. p. 309–333.

DA ROSA, Y. M. *et al.* Feed technologies and efficiency in cow-calf systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 51, 11 2022.

- DEVICES, A. **Photodiode Circuit Design Wizard**. Disponível em: <<https://tools.analog.com/en/photodiode/>>. Acesso em: 13 nov. 2023.
- DUTTA, R. *et al.* Dynamic cattle behavioural classification using supervised ensemble classifiers. **Computers and electronics in agriculture**, v. 111, p. 18–28, 2015.
- ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, v. 124, p. 74–84, 10 2011.
- FAKHRULDDIN, S. S.; GHARGHAN, S. K. An autonomous wireless health monitoring system based on heartbeat and accelerometer sensors. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, v. 8, 2019.
- FILHO, A. D. S. **Desempenho de um Sistema Embarcado para Medição de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada Utilizando LED ou TSL 2561**. 2019. 51 p. Tese (Doutorado em física ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2019.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- GARCIA-HUERTA, R. A. *et al.* Accuracy estimation of a low-cost GPS receiver using landmarks on aerial images. *In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2019. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2019. p. 9244–9247.
- GARRITY, S. R. A simple filtered photodiode instrument for continuous measurement of narrowband NDVI and PRI over vegetated canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 489–496, 2010.
- GENRO, T. C. M.; SILVEIRA, M. C. T. **Uso da altura para ajuste de carga em pastagens**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul - Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/>>. Acesso em: 14 ago. 2024.
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- GRAEME, J. **Photodiode amplifiers: op amp solutions**. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995.
- HANDCOCK, R. N. *et al.* Monitoring animal behaviour and environmental interactions using wireless sensor networks, GPS collars and satellite remote sensing. **Sensors**, v. 9, n. 05, p. 3586–3603, 2009.

- HUANG, L. *et al.* Development of a high-speed optical system for lightning flash observation. **Measurement**, v. 131, p. 85–91, 2019.
- ISLAM, M. T. *et al.* Design and implementation of smart guided glass for visually impaired people. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, v. 9, n. 4, 2020.
- JIMÉNEZ-MÁRQUEZ, F. *et al.* High-precision optoelectronic sensor device for monitoring fermentation kinetics and maceration of wine. **Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI**, v. 8763, p. 129–139, 2013.
- JO, S. *et al.* Development of a light-emitting-diode-based bidirectional active remote-sensing system for monitoring crop growth. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1424–1438, 2015.
- KANANI, P.; PADOLE, M. Real-time Location Tracker for Critical Health Patient using Arduino, GPS Neo6m and GSM Sim800L in Health Care. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND CONTROL SYSTEMS, ICICCS 2020, 2020. Proceedings [...]* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. p. 242–249.
- KINGBRIGHT, C. **LED Super Bright Red (GaAlAs)**. California: Kingbright Corporation, 2001. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com>>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- KITIĆ, G. *et al.* A new low-cost portable multispectral optical device for precise plant status assessment. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 300–308, 2019.
- LIU, N. *et al.* Development of a Crop Spectral Reflectance Sensor. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 2139, 2022.
- MIYAZAKI, E. Using a light-emitting diode as a high-speed, wavelength selective photodetector. **Review of scientific instruments**, v. 69, n. 11, p. 3751–3754, 1998.
- MOGHIMI, R. **Seven Steps To Successful Ultralow Light Signal Conversion**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<https://www.analog.com/>>. Acesso em: 08 nov. 2023.
- MOREIRA, M. *et al.* A low-cost NIR digital photometer based on ingaas sensors for the detection of milk adulterations with water. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 10, p. 3653–3663, 2016.
- MÜLLER, I.; MENEGASSI, S. R. O. **Sistema e método de monitoramento de comportamento e atividade reprodutiva de animais em rebanho**. BR 102018005455-4 A2, 01 out. 2019.

NI, J. *et al.* Development of an apparatus for crop-growth monitoring and diagnosis. **Sensors**, Switzerland, v. 18, 9 2018.

OROZCO, L. **Optimizing precision photodiode sensor circuit design**. Disponível em: <<https://www.analog.com/>>. Acesso em: 23 mar. 2024.

PANDOLFO, J. E. **Desenvolvimento de um protótipo para medição de Normalized Difference Vegetation Index**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2017.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

ROCHMANTO, R. A. *et al.* Non-invasive hemoglobin measurement for anemia diagnosis. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS (EECSI)*, 4., 2017, Indonésia. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.

ROUSE JR, J. W. *et al.* **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Texas: NASA, 1973. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022555>>. Acesso em: 19 out. 2023.

RYU, Y. *et al.* Testing the performance of a novel spectral reflectance sensor, built with light emitting diodes (LEDs), to monitor ecosystem metabolism, structure and function. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 12, p. 1597–1606, 2010.

SCHAEFER, M. T.; LAMB, D. W. A combination of plant NDVI and LiDAR measurements improve the estimation of pasture biomass in tall fescue (*Festuca arundinacea* var. Fletcher). **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 109, 2016.

SEMICONDUCTORS, V. **Measurement Techniques**. Pensilvânia: Vishay Intertechnology, 31 jul. 2012. 9 p. Disponível em: <<https://www.vishay.com/>>. Acesso em: 15 fev. 2024.

SHI, K. *et al.* A novel file carving algorithm for National Marine Electronics Association (NMEA) logs in GPS forensics. **Digital Investigation**, v. 23, p. 11–21, 2017.

STATECZNY, A.; BODUS-OLKOWSKA, I. Sensor data fusion techniques for environment modelling. *In: INTERNATIONAL RADAR SYMPOSIUM (IRS)*, 16., 2015. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2015. p. 1123–1128.

SUN, W.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. Analysis and prediction of soil properties using local regression-kriging. **Geoderma**, v. 171, p. 16–23, 2012.

USDA. **Production, Supply and Distribution**. Disponível em: <<https://www.usda.gov/>>. Acesso em: 18 Jul. 2024.

VAILANT, F. J. P. **Desenvolvimento de um instrumento portátil para obtenção do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) — Unidade Acadêmica Especial de Estudos Geográficos, UFG, Jataí, 2017.

VALADÃO, Y. d. N. **Sistema de monitoramento do comportamento de bovinos por meio de redes de sensores sem fio**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — PPGEE – UFRGS, Porto Alegre, 2021.

VEMURI, R. K. *et al.* Deep learning based remote sensing technique for environmental parameter retrieval and data fusion from physical models. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, n. 13, p. 1230, 2021.

WU, C.-D. *et al.* Linking Student Performance in Massachusetts Elementary Schools with the "Greenness" of School Surroundings Using Remote Sensing. **PloS one**, v. 9, p. e108548, 10 2014.

YAO, L. *et al.* Design and testing of an active light source apparatus for crop growth monitoring and diagnosis. **IEEE Access**, v. 8, p. 206474–206490, 2020.

APÊNDICE A DADOS COLETADOS EM EXPERIMENTOS DE CAMPO E PSEUDOCÓDIGO

O capítulo de anexos é destinado aos dados coletados durante experimentos de campo. Sendo a Seção A.1 referente aos dados adquiridos para analisar a resposta em função das variações de amostras. O Anexo A.2 mostra os dados extraídos através do protótipo, já georreferenciados.

A.1 Coleta de dados para o procedimento experimental proposto

Nas tabelas 8 e 9 estão os dados mensurados em campo conforme a metodologia proposta, medindo para diferentes alturas e vegetação, no qual a ordem foi previamente sorteada.

Tabela 8 – Tabela para procedimento experimental.

Altura	Cultura	Vermelho [V]	NIR [V]	NDVI - Protótipo	NDVI - Greenseeker
80 cm	Azevém	1,174350	2,721530	0,397132	0,88
40 cm	Nativo	1,256580	3,300000	0,448455	0,55
90 cm	Azevém	1,131190	2,622530	0,397297	0,88
50 cm	Nativo	1,188140	3,068750	0,441780	0,63
70 cm	Azevém	1,147360	2,940750	0,438684	0,85
50 cm	Nativo	1,184560	3,047830	0,440241	0,59
50 cm	Azevém	1,205820	3,300000	0,464772	erro
60 cm	Azevém	1,163430	3,213690	0,468404	0,88
40 cm	Azevém	1,283100	3,300000	0,440073	erro
60 cm	Nativo	1,138500	2,680790	0,403816	0,61
80 cm	Azevém	1,114650	2,711730	0,417387	0,86
60 cm	Azevém	1,158530	3,290060	0,479147	0,91
60 cm	Nativo	1,128230	2,694980	0,409800	0,56
90 cm	Azevém	1,089300	2,566550	0,404078	0,84
40 cm	Nativo	1,199830	3,300000	0,466722	0,64
80 cm	Nativo	1,087690	2,428960	0,381406	0,56
90 cm	Nativo	1,078480	2,361830	0,373033	0,53
80 cm	Nativo	1,083140	2,435230	0,384294	0,56
40 cm	Azevém	1,273120	3,300000	0,443216	erro
70 cm	Nativo	1,097540	2,530560	0,394978	0,59
90 cm	Nativo	1,076030	2,366850	0,374924	0,54
90 cm	Nativo	1,048660	2,363060	0,385260	0,54
90 cm	Nativo	1,037410	2,362320	0,389710	0,53

Tabela 9 – Continuação da tabela para procedimento experimental.

Altura	Cultura	Vermelho [V]	NIR [V]	NDVI - Protótipo	NDVI - Greenseeker
70 cm	Azevém	1,163820	3,012130	0,442608	0,89
90 cm	Azevém	1,127940	2,632840	0,400156	0,86
70 cm	Nativo	1,137410	2,562240	0,385126	0,58
80 cm	Azevém	1,134440	2,729930	0,412872	0,86
40 cm	Azevém	1,308530	3,300000	0,432127	erro
50 cm	Azevém	1,220360	3,300000	0,460061	0,9
40 cm	Nativo	1,282890	3,300000	0,440139	0,58
50 cm	Azevém	1,260670	3,300000	0,447156	erro
60 cm	Nativo	1,156890	2,594720	0,383257	0,64
70 cm	Nativo	1,166570	2,720830	0,399820	0,56
50 cm	Nativo	1,197950	3,088700	0,441079	0,64
80 cm	Azevém	1,138990	2,764970	0,416495	0,86
50 cm	Azevém	1,230090	3,300000	0,456925	erro
60 cm	Azevém	1,180050	3,300000	0,473198	0,88
70 cm	Nativo	1,130910	2,563810	0,387824	0,55
50 cm	Nativo	1,166500	2,899160	0,426169	0,54
40 cm	Nativo	1,211590	3,300000	0,462899	0,52
40 cm	Azevém	1,317230	3,300000	0,429428	erro
60 cm	Nativo	1,148270	2,685340	0,400946	0,63
70 cm	Azevém	1,140330	2,977900	0,446204	0,88
90 cm	Azevém	1,104370	2,626640	0,408005	0,85
70 cm	Azevém	1,131650	2,971240	0,448364	0,88
60 cm	Azevém	1,156400	3,279720	0,478643	0,89
80 cm	Nativo	1,099750	2,470870	0,384001	0,57
80 cm	Nativo	1,088910	2,470750	0,388194	0,54

A.2 Coleta de dados georrefeciados

A Tabela 10 representa parte dos valores mensurados durante a aquisição de dados usando o protótipo. Para cada ponto mensurado são extraídas as coordenadas geográficas, no formato decimal, o horário da coleta no fuso horário UTC + 0, os valores de tensão mensurados para cada tipo de resposta e o cálculo de NDVI sem correção.

Tabela 10 – Formato dos dados extraídos da memória do microcontrolador para gerar os mapas.

Horário	Latitude	Longitude	Vermelho [V]	Infravermelho [V]	NDVI
195009	-30,09650	-51,68999	1,02493	2,03842	0,33084
195014	-30,09649	-51,68994	0,99991	1,90795	0,31227
195120	-30,09673	-51,68996	1,09461	2,10728	0,31627
195309	-30,09671	-51,68998	1,06828	2,06957	0,3191
195312	-30,09670	-51,68999	1,04131	2,06484	0,32952
195315	-30,09669	-51,69000	1,06236	2,08645	0,32523
195317	-30,09668	-51,69000	1,07353	2,16213	0,33644
195323	-30,09667	-51,68995	1,01774	1,70405	0,25215
195344	-30,09660	-51,68988	1,01298	1,84414	0,29091
195349	-30,09657	-51,68987	1,05135	2,03251	0,31816
195352	-30,09655	-51,68986	1,02242	1,80012	0,27553
195354	-30,09653	-51,68986	1,01911	1,96965	0,31804
195400	-30,09650	-51,68983	1,0068	1,90699	0,30894
195403	-30,09650	-51,68984	0,98323	1,76195	0,28367
195406	-30,09650	-51,68987	1,0123	2,09969	0,34942
195410	-30,09650	-51,68990	1,02737	2,07639	0,33798
195416	-30,09653	-51,68993	1,02181	1,9043	0,30159
195419	-30,09652	-51,68996	1,00154	1,95514	0,32253
195422	-30,09653	-51,68996	0,99595	1,88353	0,30824
195424	-30,09653	-51,68998	1,0205	1,85631	0,29053
195427	-30,09653	-51,69001	0,99635	1,86054	0,30249
195431	-30,09655	-51,69001	1,00607	2,13374	0,35915
195434	-30,09655	-51,69003	0,97885	1,96496	0,33498
195439	-30,09655	-51,69008	1,02213	1,99455	0,32235

A.3 Pseudocódigo para geração dos mapas de dados interpolados

O pseudocódigo abaixo é referente ao processamento dos dados e geração dos mapas através de interpolação e fusão de dados. O algoritmo foi proposto e os resultados podem ser vistos através dos mapas gerados.

Algoritmo 1 Processamento de Dados e Geração de Mapas

```

1: Inicialização das listas de dados
2: Inicializar listas  $X$ ,  $Y$ ,  $Y_{sat}$ ,  $LATLON$ ,  $region\_init$ ,  $region\_final$ ,  $region\_ndvi$ 
3: Definição das regiões com suas coordenadas e valores de NDVI
4: for cada região de 0 a 3 do
5:     Adicionar coordenadas e NDVI para a região a  $region\_init$ ,  $region\_final$ ,  $region\_ndvi$ 
6: end for
7: Leitura dos dados do arquivo CSV
8: Abrir arquivo "título.csv"
9: for cada linha no arquivo CSV do
10:     Ler os dados da linha
11:     Converter latitude e longitude para coordenadas UTM
12:     Adicionar coordenadas UTM a  $X$ 
13:     Adicionar latitude e longitude a  $LATLON$ 
14:     Adicionar NDVI a  $Y$ 
15:     Adicionar valor de  $y_{sat}$  a  $Y_{sat}$ 
16: end for
17: Conversão de listas para arrays numpy
18: Converter  $X$ ,  $Y$  e  $Y_{sat}$  para arrays numpy
19: Calcular o deslocamento necessário para ajustar coordenadas  $X$ 
20: Ajustar coordenadas  $X$  com base no deslocamento calculado
21: Determinação dos limites para o plot
22: Calcular os valores mínimos e máximos de  $X$  e  $Y$ 
23: Ajustar os limites para incluir uma margem adicional
24: Definir o número de vizinhos para o KNN
25: Definir  $n\_neighbors$  como 3
26: Treinar modelo KNN com os dados  $X$  e  $Y$ 
27: Treinar modelo Kriging com os dados  $X$  e  $Y$ 
28: Definição da função para obter o valor de  $y_{sat}$  com base em coordenadas
29: function GET_Y_SAT( $xy$ )
30:     Retorna o valor de  $y_{sat}$  para a região correspondente
31: end function
32: Definição da função para estimar dados usando fusão de dados
33: function DATAFUSION_PREDICT( $xy$ )
34:     Calcula a estimativa usando Kriging
35:     Calcula a distância e os vizinhos mais próximos usando KNN
36:     Calcula o valor de  $y_{sat}$  considerando uma área ao redor do ponto
37:     Calcula pesos para fusão dos valores de Kriging e  $y_{sat}$ 
38:     Retorna o valor final estimado
39: end function
40: Geração dos dados para o plot
41: Definir  $step\_size\_x$  e  $step\_size\_y$  para a malha de pontos
42: Criar uma malha de pontos  $xx$  e  $yy$  usando  $numpy.meshgrid$ 
43: Inicializar matriz  $Z$  para armazenar os valores estimados
44: for cada ponto na malha do
45:     Calcular a estimativa usando  $datafusion\_predict$ 
46:     Armazenar os valores estimados na matriz  $Z$ 
47: end for
48: Geração dos mapas
49: Criar figura e subplots
50: Plotar os resultados da matriz  $Z$  usando  $pcolormesh$ 
51: Adicionar pontos de dados originais ao plot
52: Adicionar barra de cores e rótulos aos eixos
53: Mostrar o plot

```
