

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**COMPUTAÇÃO APLICADA**

**PLATAFORMA EMBARCADA PARA**  
**MONITORAMENTO FENOLÓGICO DA**  
**CULTURA DO MORANGUEIRO**

**Andreison de Castro**

Passo Fundo

2017

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA**

**PLATAFORMA EMBARCADA PARA  
MONITORAMENTO FENOLÓGICO  
DA CULTURA DO MORANGUEIRO**

**Andreison de Castro**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre em Computação  
Aplicada na Universidade de Passo Fundo.

**Orientador: Prof. Dr. Rafael Rieder**

**Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Schardong Spalding**

Passo Fundo

2017

CIP – Catalogação na Publicação

---

C355p Castro, Andreison de  
Plataforma embarcada para monitoramento fenológico  
da cultura do morangueiro / Andreison de Castro. – 2017.  
106 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Rieder.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Schardong  
Spalding.

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) –  
Universidade de Passo Fundo, 2017.

1. Computação. 2. Sistemas embarcados (Computadores).  
3. Morango - Fenologia vegetal. 4. Sensoriamento remoto.  
I. Rieder, Rafael, orientador. II. Spalding, Luiz Eduardo  
Schardong, coorientador. III. Título.

CDU: 004

---

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

**ATA DE DEFESA DO  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO ACADÊMICO**

**ANDREISON DE CASTRO**

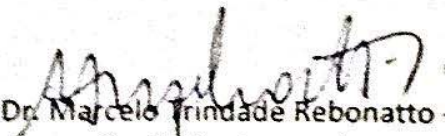
Ao um dia do mês de dezembro do ano de dois mil e dezessete, às 14 horas, realizou-se, no Instituto de Ciências Exatas e Geociências, prédio B5, da Universidade de Passo Fundo, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso "**Plataforma embarcada para monitoramento da cultura do morangueiro**", de autoria de Andreison de Castro, acadêmico do Curso de Mestrado em Computação Aplicada do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada - PPGCA/UPF. Segundo as informações prestadas pelo Conselho de Pós-Graduação e constantes nos arquivos da Secretaria do PPGCA, o aluno preencheu os requisitos necessários para submeter seu trabalho à avaliação. A banca examinadora foi composta pelos doutores Rafael Rieder, Luiz Eduardo Schardong Spalding, Marcelo Trindade Rebonatto e Eunice Oliveira Calvete. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a banca examinadora considerou o candidato APROVADO. Foi concedido o prazo de até quarenta e cinco (45) dias, conforme Regimento do PPGCA, para o acadêmico apresentar ao Conselho de Pós-Graduação o trabalho em sua redação definitiva, a fim de que sejam feitos os encaminhamentos necessários à emissão do Diploma de Mestre em Computação Aplicada. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da banca examinadora e pela Coordenação do PPGCA.



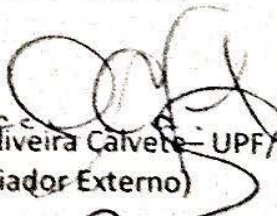
Prof. Dr. Rafael Rieder - UPF  
Presidente da Banca Examinadora  
(Orientador)



Prof. Dr. Luiz Eduardo Schardong Spalding - UPF  
(Coorientador)



Prof. Dr. Marcelo Trindade Rebonatto - UPF  
(Avaliador Interno)



Profa. Dra. Eunice Oliveira Calvete - UPF/PPGAgro  
(Avaliador Externo)



Prof. Dr. Rafael Rieder  
Coordenador do PPGCA



# PLATAFORMA EMBARCADA PARA MONITORAMENTO FENOLÓGICO DA CULTURA DO MORANGUEIRO

## RESUMO

A Agricultura é uma área que permite diferentes inovações tecnológicas, entre elas o uso de recursos de visão computacional em uma solução embarcada. Visando contribuir com técnicas de manejo fitossanitário e auxiliar pesquisadores com dados oriundos de sensores, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de visão embarcada para a cultura do morangueiro. A visão computacional permite aos pesquisadores a implementação de processos de fenotipagem de alta precisão. Dentro deste contexto, pode-se direcionar o uso de técnicas de manipulação de imagens para determinar a área foliar da cultura, bem como coletar dados de sensores meteorológicos. Para criar a solução, realizou-se uma integração entre plataforma embarcada, modelo Raspberry PI 3, e dispositivos periféricos de hardware para sensoriamento operacionais a partir de uma interface gráfica. Para validar o equipamento, utilizou-se uma estufa do setor de horticultura na Universidade de Passo Fundo. Como resultados, alcançou-se um sistema de custo acessível que possa ser utilizado na prática, tanto por pesquisadores como por produtores, permitindo um monitoramento efetivo da cultura. As coletas foram realizadas durante o período de 21 dias, e os dados obtidos foram analisados estatisticamente. Foi executada uma comparação entre o método manual de estimar área foliar da cultura Albion, por meio de equações de predição, e o método proposto por processamento de imagens, mostrando que dados medidos pela plataforma não ultrapassam 10% de variação. Pelo coeficiente de correlação linear de Pearson, foi possível verificar significância comportamental de maior impacto (0,96) entre área foliar e temperatura acumulada no período.

Palavras-Chave: Fragaria x ananassa Duch, Sistema Embarcado, Sensores, Visão Computacional.



# EMBEDDED SYSTEM FOR PHENOLOGICAL MONITORING OF STRAWBERRY STRAWBERRY CROP

## ABSTRACT

Agriculture is an area that allows for different technological innovations, like the use of computer vision in an embedded solution. In order to contribute with phytosanitary management techniques, and to assist researchers with data from sensors, this work presents the development of an embedded vision system for the strawberry crop. Computer vision allows researchers to implement high precision phenotyping processes. With this in mind, it is possible to use image manipulation techniques to determine a leaf area of the crop, as well as collect data from meteorological sensors. In order to create the solution, there was an integration between embedded platform, Raspberry PI 3, sensing peripherals and a software to operate the system from a graphical user interface. To validate the equipment, a greenhouse was used in the horticulture sector at the University of Passo Fundo. Results suggested our cost-effective system that could be used in practice by researchers and producers, allowing an effective monitoring of the crop. Data collections were performed during the 21 days, and the data obtained were statistically analyzed. A comparison was executed between the manual method of estimating leaf area of Albion culture, through prediction equations, and the proposed method of image processing, showing that data measured by the platform does not exceed 10 % variation. Pearson's correlation coefficient showed a strength significance (0,96) between leaf area and accumulated temperature during the period.

Keywords: *Fragaria x ananassa* Duch, Embedded System, Sensors, Computer Vision.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Estádios do morangueiro [11]. . . . .	21
Figura 2.	Planta adulta do morangueiro [11]. . . . .	22
Figura 3.	Efeito de três fenômenos. . . . .	26
Figura 4.	Estrutura de um modulo de célula. . . . .	26
Figura 5.	Funcionamento de célula de pixel (Adaptado de [34]). . . . .	27
Figura 6.	Processo de aquisição de uma imagem. . . . .	27
Figura 7.	Ilustração da estação desenvolvida. . . . .	28
Figura 8.	Ilustração da estação desenvolvida. . . . .	29
Figura 9.	Sistema de cores RGB [52]. . . . .	30
Figura 10.	Representação do cone tridimensional do modelo de cor HSV [56]. . . . .	30
Figura 11.	Teoria de conjuntos [27]. . . . .	31
Figura 12.	Degrau de uma borda. . . . .	32
Figura 13.	Efeito do filtro de dilatação. . . . .	32
Figura 14.	Efeito do filtro de Erosão. . . . .	33
Figura 15.	Resultado da interação entre filtros [60]. . . . .	33
Figura 16.	Quantização de cores. . . . .	34
Figura 17.	Uma imagem em escala de cinza com 6 níveis e seu histograma. . . . .	35
Figura 18.	Divisão de uma imagem com limiar igual a 3. . . . .	35
Figura 19.	Resultados dos cálculos para cada limiar. . . . .	36
Figura 20.	Resultado do Método de Otsu. . . . .	37
Figura 21.	Interatividade do método <i>K-means</i> [73]. . . . .	38
Figura 22.	Aplicação <i>K-means</i> em imagem. . . . .	38
Figura 23.	<i>Designer</i> de plataformas embarcadas. . . . .	40
Figura 24.	Curvas características de termistores NTC e PTC. . . . .	41
Figura 25.	Modelo de Tensiômetro. . . . .	42
Figura 26.	Espaço de cor visível no espectro de onda. . . . .	43
Figura 27.	Sensores de radiação. . . . .	44
Figura 28.	Cenário da comunicação IOT. . . . .	45
Figura 29.	Módulos de comunicação. . . . .	45
Figura 30.	Estágios de processamento do morango [7]. . . . .	47
Figura 31.	Divisão da região de interesse método ROI [7]. . . . .	47
Figura 32.	Extração computacional de histogramas orientados a gradientes [7]. . . . .	48

Figura 33.	Processo computacional de histogramas orientados a gradientes [7]. . . . .	48
Figura 34.	SVM aplicado a morangos [7]. . . . .	48
Figura 35.	SVM resultado [7]. . . . .	48
Figura 36.	Classificação de morangos. . . . .	49
Figura 37.	Representação método K-means [8]. . . . .	49
Figura 38.	Extração de características do morango [8]. . . . .	50
Figura 39.	Extração característica de formato do morango [8]. . . . .	50
Figura 40.	Extração por método similar de característica do morango [100]. . . . .	51
Figura 41.	Histograma de maturidade do morango 3 níveis [8]. . . . .	51
Figura 42.	Identificação do estado de classificação [9]. . . . .	53
Figura 43.	Resultados dos métodos utilizados (adaptado de [9]). . . . .	53
Figura 44.	Funcionamento do sistema movimentador das plantas (adaptado de [10]). . .	54
Figura 45.	Sistema implementado (adaptado de [10]). . . . .	54
Figura 46.	Resultado da captura de imagem pelo <i>Kinect da Microsoft</i> [10]. . . . .	55
Figura 47.	Hardware proposto para o sistema de visão embarcada. . . . .	57
Figura 48.	Componentes utilizados para desenvolver a plataforma. . . . .	58
Figura 49.	Calibração da câmera. . . . .	59
Figura 50.	Fluxograma de software. . . . .	60
Figura 51.	Raspberry Pi Modelo 3B (adaptado de [102]). . . . .	61
Figura 52.	Pacote de dados dos sensores da fabricante <i>Aosong</i> [103]. . . . .	61
Figura 53.	Informações esquemático da aquisição de radiação solar (PAR). . . . .	63
Figura 54.	Ilustração da estação desenvolvida. . . . .	63
Figura 55.	Circuito da estação do solo. . . . .	64
Figura 56.	Designer 3D da solução. . . . .	65
Figura 57.	Fluxograma do <i>Firmware</i> desenvolvido. . . . .	65
Figura 58.	NTC Utilizado. . . . .	66
Figura 59.	Código-fonte MATLAB. . . . .	66
Figura 60.	Curva Steinhart-Hart. . . . .	67
Figura 61.	Circuito Termistor. . . . .	67
Figura 62.	Correção polinomial de leitura ADC. . . . .	68
Figura 63.	Bloco sistemático condicionamento termistor. . . . .	69
Figura 64.	Sensor de pressão MPXV5100GP. . . . .	69
Figura 65.	Sinal do sensor de pressão MPXV5100GP. . . . .	70
Figura 66.	Características de sensibilidade espectral . . . . .	71

Figura 67.	Bloco interno câmera IMX219PQH5-C. . . . .	72
Figura 68.	Características físicas <i>Raspberry</i> e IMX219PQH5-C. . . . .	72
Figura 69.	Operação de uma rotina de captura. . . . .	73
Figura 70.	Fluxograma de captura. . . . .	74
Figura 71.	Etapas pré-processamento. . . . .	74
Figura 72.	Agrupamento de pixels. . . . .	75
Figura 73.	Projeção espacial dimensional. . . . .	75
Figura 74.	Imagens de calibração do sistema de visão computacional. . . . .	76
Figura 75.	Processo para obtenção da área foliar. . . . .	76
Figura 76.	Resultado quantificado da imagem: área total e área foliar. . . . .	77
Figura 77.	Repetição do processo no software ImageJ, para fins de comparação. . . . .	77
Figura 78.	Plataforma embarcada e caixa com sensores. . . . .	79
Figura 79.	Projeto executado. . . . .	80
Figura 80.	Localização do experimentos. . . . .	80
Figura 81.	Janela <i>Reviews graph</i> . . . . .	81
Figura 82.	Dados armazenados. . . . .	82
Figura 83.	Parâmetros de programação. . . . .	82
Figura 84.	Localização do experimentos. . . . .	83
Figura 85.	Equipamento instalado <i>in loco</i> . . . . .	84
Figura 86.	Método de medida. . . . .	88
Figura 87.	Procedimento de medição de folha. . . . .	89
Figura 88.	Banco de imagens capturadas. . . . .	90
Figura 89.	Erro por aplicação de fungicida e inseticida. . . . .	91
Figura 90.	Processo de recuperação. . . . .	91
Figura 91.	Refletância da lona e ajuste de limiar de verde. . . . .	91
Figura 92.	Emissão de folha. . . . .	92
Figura 93.	Equação de regressão linear. . . . .	95
Figura 94.	Tendência gráfica entre área foliar e temperatura acumulada. . . . .	95



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Resultados das operações. . . . .	36
Tabela 2.	Comparativos de plataformas para desenvolvimento de sistemas embarcados. . . . .	40
Tabela 3.	Resultados de testes efetuados pelo projeto (adaptado de [8]). . . . .	51
Tabela 4.	Resultados classificatórios de cor predominante e formatos (adaptado de [8]). . . . .	51
Tabela 5.	Resultados estatísticos da temperatura °C (TMP). . . . .	85
Tabela 6.	Soma térmica acumulada dado em (°C). . . . .	85
Tabela 7.	Resultados estatísticos da umidade relativa % (HMD). . . . .	86
Tabela 8.	Resultados estatísticos do ponto de orvalho °C (DEW). . . . .	86
Tabela 9.	Resultados estatísticos da radiação solar fotossintética $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{s}$ (PAR). . . . .	87
Tabela 10.	Leituras do Tensiômetro [115]. . . . .	87
Tabela 11.	Dados adquiridos da estação no solo. . . . .	88
Tabela 12.	Medidas iniciais e finais da análise em (cm). . . . .	88
Tabela 13.	Cálculo das medidas do dia 10/07 em ( $\text{cm}^2$ ). . . . .	90
Tabela 14.	Cálculo das medidas do dia 31/07 em ( $\text{cm}^2$ ). . . . .	90
Tabela 15.	Dados adquiridos de área foliar em ( $\text{cm}^2$ ). . . . .	92
Tabela 16.	Comparativo entre os métodos. . . . .	93
Tabela 17.	Correlação entre variáveis meteorológicas e área foliar. . . . .	94
Tabela 18.	Planilha de custos para o desenvolvimento do projeto. . . . .	96



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	FENOLOGIA DO MORANGUEIRO	21
2.2	VISÃO COMPUTACIONAL	24
2.2.1	<b>Aquisição</b>	25
2.2.2	<b>Processamento</b>	27
2.2.2.1	<i>Gamma Correction</i>	27
2.2.2.2	<i>Denoising</i>	28
2.2.2.3	<i>Color Spaces and Color Perception</i>	29
2.2.2.4	<i>Morphology Filters</i>	31
2.2.2.5	<i>Color Quantization</i>	33
2.2.2.6	<i>Background Subtraction</i>	34
2.2.3	<b>Análise Digital da Imagem</b>	37
2.3	SISTEMAS EMBARCADOS	39
2.3.1	<b>Plataformas de desenvolvimento</b>	39
2.4	TERMISTORES	41
2.5	TENSIÔMETRO	41
2.6	SENSORES HIGRÔMETROS DE AMBIENTE	42
2.7	SENSORES DE RADIAÇÃO SOLAR FOTOSSINTÉTICA	43
2.8	MICROCONTROLADORES	44
2.9	MÓDULOS DE COMUNICAÇÃO	44
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>47</b>
3.1	CONTAGEM DE FRUTOS	47
3.2	CLASSIFICAÇÃO DE FRUTOS	49
3.3	AVALIAÇÃO FOLIAR DO MORANGUEIRO	52
3.4	SISTEMA MÓVEL PARA MEDIR CRESCIMENTO DO MORANGUEIRO	53
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>57</b>
4.1	DISPOSITIVOS E FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO	57
4.2	ARQUITETURA DE SOFTWARE	58
4.3	PLATAFORMA EMBARCADA	59



4.4	ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO AMBIENTE .....	59
4.4.1	<b>Sensor de Umidade e Temperatura do Ar</b> .....	59
4.4.2	<b>Ponto de Orvalho</b> .....	61
4.4.3	<b>Sensor de Radiação Solar</b> .....	62
4.5	ESTAÇÃO DE CONTROLE NO SOLO .....	62
4.5.1	<b>Placa de controle</b> .....	63
4.5.2	<b>Sensor de Temperatura e Umidade no solo</b> .....	66
4.5.2.1	Sensor de temperatura do dossel .....	66
4.5.2.2	Sensor de umidade do solo .....	69
4.5.3	<b>Controle de irrigação</b> .....	70
4.6	AQUISIÇÃO DAS IMAGENS .....	71
4.7	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS .....	73
4.8	ÁREA DE TESTES E CALIBRAÇÕES .....	75
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>79</b>
5.1	ENGENHARIA ELÉTRICA .....	79
5.2	CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO .....	80
5.3	AGRONOMIA .....	83
5.4	DADOS ADQUIRIDOS .....	84
5.4.1	<b>Dados da estação do ambiente</b> .....	84
5.4.2	<b>Dados estação do solo</b> .....	84
5.4.3	<b>Dados da visão computacional</b> .....	85
5.5	BENEFÍCIOS E CUSTOS DA PLATAFORMA DESENVOLVIDA .....	95
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>97</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	98
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>99</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Antunes Reisser Junior [1], o Brasil é o terceiro maior produtor de frutas no mundo. Recentemente, uma das culturas que vem ganhando destaque no Brasil, com aumento de área de plantio, é a cultura do morangueiro. De acordo com a *Food and Agriculture Organization* (FAO) [2], o Brasil evidencia um aumento na sua produtividade ao longo do tempo - em especial, a partir dos anos 2000.

Por ser uma cultura de alta rentabilidade [3], o morangueiro tem incentivado pequenos e médios agricultores a investirem no plantio, produção e comercialização dessa fruta. De acordo com a FAO [2], agregado a isso está um cenário de elevação de consumo da fruta no mundo, no decorrer da última década no mundo, fomentando a exportação.

Ainda de acordo Antunes Reisser Junior [1], o resultado do aumento da produção provém da inserção de meios tecnológicos na produção visando lucratividade, conforme o relato:

O Brasil, nos últimos anos, está incorporando tecnologias que favorecem a produção de frutos de melhor qualidade e com possibilidades de exportação na contra estação do hemisfério norte (p. 1).

No entanto, sabe-se que a produção de morangos é uma atividade agrícola especializada, que exige dedicação, conhecimentos técnicos de alto nível e utilização de métodos modernos de manejo fitossanitário. Por ser uma planta sensível a mudanças climáticas e a doenças, existe também a necessidade de cuidados na aplicação e redução de químicos nas áreas de plantio. Esses fatores influenciam diretamente na qualidade dos frutos como, por exemplo, a firmeza da polpa, a resistência da epiderme, a coloração e o sabor. E eles também influenciam a aceitabilidade do consumidor, que busca produtos visualmente atrativos e com uso mínimo de agrotóxicos.

Conforme Bernardi *et al.* [4], o morangueiro é uma planta muito sensível às condições climáticas. Uma cultivar que produza bem numa determinada região poderá não se adaptar em outra, produzir menos ou ser mais atacada por pragas ou doenças. A época ótima de plantio é diferente para cada região e cultivar. Por isso, existem cultivares específicas para regiões quentes e outras para regiões frias.

Para evitar problemas, o monitoramento contínuo da planta é executado manualmente no campo, para coletar diferentes variáveis em diferentes períodos. Estes procedimentos utilizam, por exemplo, sensores de temperatura, de radiação solar, de umidade relativa, aliados à experiência humana na inspeção visual da cultura para obter parâmetros de crescimento, como determinar a área foliar.

Após a coleta de dados, informações específicas a cultura do morangueiro podem ser estimadas para prever condições futuras, com necessidade de um especialista, sem automação no processo. Temperatura de exposição, foto período, soma térmica diária, acúmulo de horas a frio, soma térmica acumulada, radiação solar global, radiação solar fotossinteticamente ativa, área foliar total, umidade

relativa do ar e solo e tempo de irrigação são alguns exemplos de dados que podem determinar o crescimento da cultura e sua provável rentabilidade.

A inclusão de uma tecnologia aplicada diretamente no cultivo do morangueiro pode contribuir para o aumento da produção, com maior controle sanitário e, conseqüentemente, maior qualidade e rentabilidade. Na agricultura de precisão, este tipo de abordagem favorece diretamente o potencial econômico da cultura, com benefícios diretos ao produtor e ao consumidor.

Baseado na impactação direta do ambiente na produção do morango, grandezas físicas como fotoperíodo, temperatura e umidade do ar se destacam como características primordiais para o manejo da cultura. Desta forma, identifica-se uma oportunidade para implementação de um dispositivo que forneça dados dessas grandezas a partir de sensores. Esse fato pode agregar um fortalecimento inovador nos estudos, com tendência de ganho genético e de produtividade.

O uso de tecnologias também permite a gestão da cultura, por intermédio de ferramentas que permitam o monitoramento contínuo da cultura, e contribuam para o manejo com menor impacto ambiental. Algumas aplicações dessa natureza se destacam, como o monitoramento meteorológico a fim de identificar impactos na produtividade, e a extração de características de imagens para acompanhamento dos estádios das plantas.

Nesse âmbito, pode-se criar um sistema embarcado com inserção de recursos visuais e sensoriais, específico para o monitoramento e o condicionamento de grandezas reais do morangueiro. Uma solução como essa poderá dar margem para a automação de processos agrônômicos, por meio do uso de pequenos computadores e dispositivos sensores conectados a estes, como câmeras e medidores de umidade de solo, temperatura e radiação.

O uso de sistemas eletrônicos embarcados com softwares dedicados permitem, em tempo real, supervisionar e comandar automaticamente máquinas e implementos, monitorar e adquirir informações por sensores, e realizar cálculos estatísticos preditivos. Pesquisadores e produtores podem ter, em tempo real, diversas informações meteorológicas e visuais de suas áreas de plantio, para uma tomada de decisão adequada e sensata.

Uma abordagem dessa natureza pode beneficiar, por exemplo, o acompanhamento fenológico da planta. Fora isso, pode ser um diferencial competitivo para a gestão da cultura, além de contribuir para a sanidade do morangueiro, o aumento da produtividade e a qualidade do fruto.

Pfost, Casady e Shannon [5] e Gemtos, Fountas e Aggelopoulou [6] demonstram que sistemas embarcados, baseados em módulos sensores e softwares operacionais programáveis, contribuem benéficamente para o manejo de culturas agrícolas e gerenciamento de produtividade. Estes equipamentos utilizam meios de aquisição e visualização de dados do mundo real, tanto da cultura, como do mercado de consumo, permitindo analisar a situação e decidir pela melhor estratégia.

Com relação ao uso da visão computacional, também existem trabalhos e aplicações que englobam eletrônica embarcada na Agricultura. Nota-se que as abordagens contribuem na extração de informações significativas a partir de imagens e vídeos, como classificação, contagem e avaliação foliar

de plantas; controle automático para dosagem de químicos; coleta automática de frutos; e verificação do grau de crescimento da cultura [7] [8] [9] [10].

No entanto, nota-se ainda a carência de sistemas embarcados que utilizam os dados meteorológicos e de visão computacional para acompanhamento fenológico da cultura do morango. Neste âmbito, verifica-se a possibilidade de oferecer uma solução com informações visuais e de sensoria-mento meteorológico para enriquecer o processo de monitoramento da cultura. Assim, pode-se ter informações por meio de um programa que permite alertar o produtor e ajudá-lo em ações de preven-ção e tratamento das plantas.

Neste âmbito, o desenvolvimento de um sistema embarcado, portátil, de custo acessível, pode ser uma alternativa interessante para auxiliar produtores no manejo da cultura do morangueiro, contribuindo para as tarefas agrícolas especializadas. Neste aspecto a questão de pesquisa é: "É possível montar uma plataforma embarcada e desenvolver softwares de aquisição de dados visuais e meteorológicos, visando auxiliar no monitoramento da cultura do morangueiro?" Para tanto, entre os possíveis benefícios, pode-se destacar o manejo fitossanitário preciso, a minimização dos efeitos dos pesticidas no meio ambiente, o acompanhamento fenológico, a análise constante de indicadores da cultura, e os aumentos na qualidade e na produtividade.

Este trabalho apresenta o projeto e o desenvolvimento de uma plataforma embarcada e do software para aquisição de dados visuais e meteorológicos, visando auxiliar no monitoramento da cultura do morangueiro. Para atingir esse objetivo, uma plataforma embarcada com câmera e sensores meteorológicos foi criada; sinais elétricos e analógicos foram condicionados; calibração da câmera e processamento de imagens, com extração de características, foram implementadas; e uma solução que integra hardware e software foi desenvolvida, instalada em uma estufa, e executada para realizar o monitoramento da cultura.

Nesse contexto, esse documento se encontra assim organizado: o Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica, importante para esse trabalho que congrega conceitos e técnicas de três áreas do conhecimento: Engenharia Elétrica, Ciência da Computação e Agronomia; o Capítulo 3 mos-tra trabalhos relacionados à temática da abordagem proposta; o Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos aplicação para concepção da plataforma embarcado, com a leitura e condicionamento dos sensores, bem como a arquitetura de software implementada; o Capítulo 5 mostra os resultados al-cançados, com discussões sobre os dados adquiridos e manipulados pela solução; por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta conceitos fundamentais e metodologias existentes já consagradas na literatura que associados permitem prospectar novas implementações tecnológicas. A união técnica visa selecionar conjecturas utilizadas para solucionar a problemática de pesquisa. Contudo, o conteúdo selecionado aborda princípios de cultivares do morangueiro, recursos computacionais visuais para análise, dispositivos potenciais para sistemas embarcados e componentes de hardware de controle e específicos para aquisição de grandezas reais.

### 2.1 FENOLOGIA DO MORANGUEIRO

O morangueiro é uma planta herbácea e rasteira cultivada anualmente devido as condições sanitárias e fisiológicas. A planta se desenvolve, entra em dormência e cresce vegetativamente até a reprodução. Nesse aspecto pode até apresentar nove estádios fenológicos em função da interação do local de plantio. A Figura 1 apresenta os estádios, onde inicialmente na Figura 1(a) trás o aparecimento do botão floral na roseta, Figura 1(b) apresenta o balão com surgimento das pétalas, Figura 1(c) surgimento das flores, Figura 1(d) secagem das pétalas até sua queda, Figura 1(e) a frutificação com desenvolvimento do receptáculo floral que originará o pseudofruto, Figura 1(f) etapa de crescimento do fruto, Figura 1(g) emissão dos aquênios e por fim Figura 1(h) fase de maturação até a Figura 1(i) fruto aparentemente maduro.

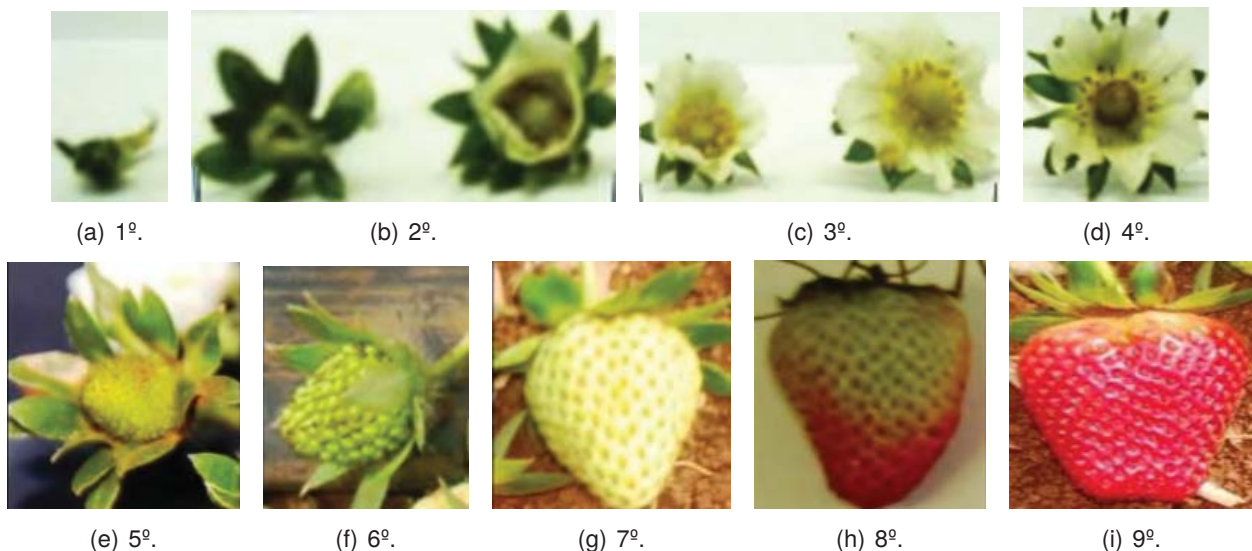


Figura 1. Estádios do morangueiro [11].

Na fase adulta a planta é constituída pelas seguintes partes ilustradas na Figura 2. As coroas crescem e, em cada uma surgem as folhas, inflorescências, estolhos e coroas ramificadas e também as raízes adventícias. Cada coroa é uma parte independente, e raramente cresce, mas possui um

numero de folhas em várias fases e agrupadas em espiral no centro do caule. As estipulas protegem a coroa por meio das folhas mais antigas até mortas, e a cima delas encontra-se as novas verdes brilhantes possuindo estipulas para sua proteção [11].

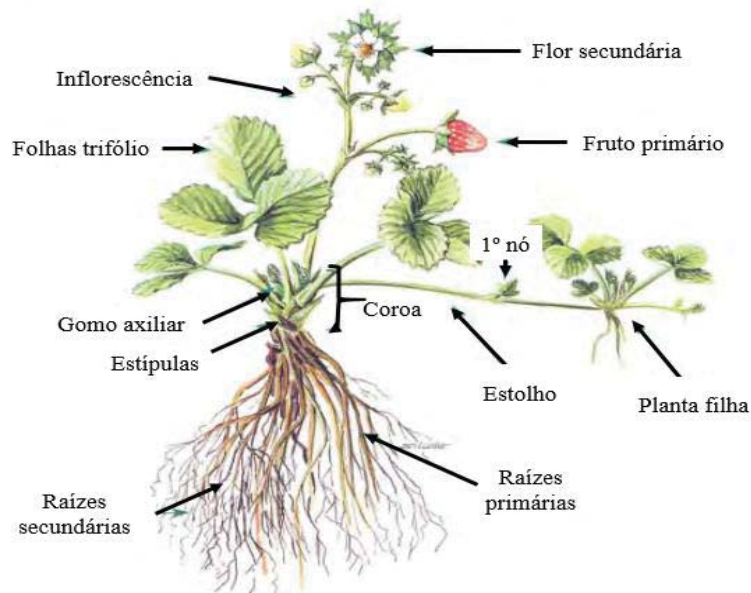


Figura 2. Planta adulta do morangueiro [11].

Para o ciclo vital da cultura do morangueiro, **temperatura** e **fotoperíodo** são os fatores mais relevantes, pois tratam da correlação comportamental fisiológica da planta. Essa interação influencia o desenvolvimento e determina características quanto a precocidade, a produtividade e a qualidade do fruto [12]. Pela definição de Sentelhas [13], o fotoperíodo se refere a duração do dia, desde o nascer até o pôr do sol.

A medida em que a temperatura e o fotoperíodo decrescem, a atividade fisiológica diminui, fazendo com que a planta entre em estado de dormência. As variações são fatores que estimulam a floração e a frutificação, classificando as plantas em cultivares de dias curtos, longos e neutros.

As cultivares de dias curtos são plantas que florescem em dias inferiores a 14 horas de luz. Em consequência disso, há uma certa redução de temperatura, em torno de 15°C, o que provoca um estado vegetativo como efeito, sem a emissão da floração. Já as mudas de dias longos são aquelas que diferenciam suas gemas e requerem menos horas de escuridão. Já as de dias neutros ao fotoperíodo são capazes de produzir frutos em pleno verão, em razão de reagir sexualmente tanto em dias curtos quanto longos [12].

Baseado no contexto das influências ambientais, é importante registrar informações meteorológicas pertinentes ao ambiente de plantio, para determinação da fenologia de floração e maturação. O objetivo é verificar a adaptabilidade da cultura no ambiente, registrando as informações como **soma térmica diária** a cada 30 minutos, armazenando a máxima e a mínima e, se possível, registrar a temperatura no dossel das plantas. Esses dados permitem estimar a capacidade de realizar as funções fisiológicas com êxito para tal cultura.



Citam-se outros parâmetros de suma importância para acompanhamento dos estádios de desenvolvimento da planta: o **acúmulo de horas a frio**, a **soma térmica acumulada**, o **filocrono** e a **radiação**.

O **acúmulo de horas a frio**, também conhecida por temperatura de base, é uma ocorrência imprescindível para o florescimento do morango. É uma variável que mede o tempo em que a planta ficou em exposição à temperaturas abaixo de 7,2°C.

A **soma térmica acumulada** que é o montante de aquisições no período de um dia, expressa em grau-dia. Ela é representada pela diferença entre o acúmulo da temperatura média diária e a temperatura base, influenciando diretamente na capacidade de desenvolvimento fisiológico. Um dos elementos meteorológicos mais impactantes no desenvolvimento de uma planta é a temperatura do ar, que pode ser quantificada pelo parâmetro da soma térmica acumulada. A quantidade de energia acumulada acima da temperatura-base pode causar efeitos metabólicos nos principais estádios de desenvolvimento, como subperíodos vegetais de cada espécie. Desse modo, medir temperaturas do ambiente de plantio pode pressupor o desenvolvimento do vegetal com relação ao acréscimo de temperatura, fato que também permite modelar e identificar qual a cultura mais favorável para se plantar em determinada região. Assim a soma térmica é um parâmetro de extrema importância para contribuição na agricultura em função dos riscos climáticos existentes [14].

O **filocrono** é o registro de dados de temperaturas para estimar o número de folhas (NF) através de modelos matemáticos, definindo o intervalo de tempo entre o aparecimento de duas folhas sucessivas na coroa principal [15].

A **radiação** é a energia radiante do sol incidente sobre a terra, estabelecendo fatores determinantes sobre diversos processos físicos (aquecimento e evaporação); biofísicos (transpiração) e biológicos (fotossíntese) que afetam a evolução das plantas na agricultura [13]. Para Rosa *et al.* [16] a radiação solar em resposta a agricultura é considerada que:

O crescimento adequado das folhas resulta em incremento na área foliar, o que permite maior interceptação de radiação solar e em consequência maior atividade fotossintética e maior produtividade da cultura em diferentes épocas de plantio (p. 1).

A Agronomia faz uso de relações alométricas, que são estudos da evolução das plantas quanto ao crescimento e desenvolvimento vegetal até sua produção. É a compreensão de aspectos ecológicos e evolutivos entres as partes do organismo, ou seja, quanto de um órgão afeta o outro. Um exemplo é interceptação da radiação solar PAR pela folha a qual favorece ao incremento de biomassa. Por meio de equações de regressão linear, é possível estimar a fisiologia de crescimento e prever quantitativamente a produtividade de uma determinada planta, considerando a área de plantio [17].

De acordo com Rosa *et al.* [16], de toda energia fornecida pelo sol, apenas parte favorece o desenvolvimento na fotossíntese. A **radiação solar global** é todo espectro de onda oriundo da energia dissipada pelo sol sobre a terra. Ela emite uma gama de comprimentos de onda, mas apenas parte é proveitosa para a fotossíntese das plantas, faixa esta denominada de **radiação fotossinteticamente ativa** (*Photosynthetic Active Radiation*, PAR). Para tanto, o efeito da radiação solar incidente à superfície propicia maior **área foliar** no início da floração e também maior potencial produtivo.



A **Radiação PAR** se concentra no espectro compreendido entre 400 e 700 nm, faixa de comprimentos de onda úteis para fotossíntese, onde ocorre a interceptação da energia luminosa. Ela é convertida em energia química, pois excita as moléculas de clorofila das planta, possuindo grande importância no crescimento do vegetal. Aproximadamente 90% da energia PAR é absorvida pela anatomia da folha [18] [19].

As folhas do morangueiro são constituídas por três folíolos trifoliadas próximas da cor verde mate, tem formação que busca máxima exposição à luz, uma nova emissão foliar, para uma planta de crescimento ativo gira em torno de 8 a 12 dias, sendo fundamentalmente dependente da temperatura, cada folha vive por volta de três meses. Conforme Lawlor [20], o processo fotossintético é um fenômeno de superfície. A interceptação da energia solar pela folha da planta está diretamente relacionada com o tamanho da área exposta. Portanto, a mensuração da **área foliar** se faz importante, porque possibilita avaliar as condições fisiológicas das plantas. De acordo com Watson [21] o índice de área foliar (IAF) é a relação funcional existente entre a área foliar e o solo ocupado pela cultura, e pode ser usado como um parâmetro indicativo de produtividade perante a extensão ocupada.

Outra variável impactante no desenvolvimento da planta é o comportamento da **umidade relativa do ar** no local de plantio. O morangueiro é uma cultivar sensível a falta de água, pois no seu aspecto morfológico os folíolos possuem cerca de 300 à 400 estômatos/mm<sup>2</sup> que são responsáveis pela transpiração que pode alcançar até meio litro de água/dia-1 [22] [23]. Portanto, nesse aspecto, origina-se a necessidade de um **sistema de irrigação** quando condicionados a baixa umidade relativa e altas temperaturas [3].

## 2.2 VISÃO COMPUTACIONAL

Segundo Cubero *et al.* [24], a capacidade de visão artificial pode ir além das possibilidades de visão humana, pois limita-se a avaliar os processos em longo prazo e apreciar eventos que ocorrem fora do espectro visível humano.

Para Marengoni e Stringhini [25], Visão Computacional ou *Computer Vision* (VC) é:

Uma transformação de dados a partir de uma câmera fotográfica ou de vídeo qualquer, com finalidade de decisão ou de representação. Todas essas transformações são feitas para alcançar alguma meta particular. (p. 3).

Para Solem [26], a VC é a extração automatizada de informações a partir de imagens. Consiste na aquisição de dados contidos na imagem, para processamento e a análise do conjunto capturados, definindo características e similaridade para reconhecimento de elementos específicos a ser tratados.

Segundo Gonzalez [27], a VC procura emular a visão humana. Possui como entrada uma imagem e como saída uma interpretação da imagem como um todo (ou parcialmente). Essa característica diferencia um simples processamento de imagens, que é um processo onde a entrada do sistema é uma imagem e a saída é um conjunto de valores numéricos que podem ou não compor outra imagem. De todo modo, os processos de VC geralmente iniciam com o processamento de imagens.

A área de VC é responsável por estudar os problemas fundamentais relacionados à síntese de imagens, a partir de modelos matemáticos que descrevem os objetos presentes em uma cena. Para isso, métodos e técnicas computacionais são desenvolvidos com o objetivo de solucionar problemas associados à síntese realista e virtual de imagens. Nesse âmbito, recursos de Inteligência Artificial podem ser empregados com o intuito de emular a percepção humana.

O processamento digital de imagens aborda técnicas e algoritmos para manipulação e interpretação de imagens resultando em um conjunto de características descritivas relacionadas a imagem. Para tanto, recursos em software e ferramentas de tratamento são utilizadas para melhorar as imagens capturadas e atender às estéticas visuais como: restauração, modificações cromáticas, mudanças de forma e representação utilizando filtros, fractais e transformadas de Fourier. As informações presentes são condicionadas a análises de dados em modelagem computacional, proporcionando o uso de propriedades estatísticas e aplicação em diferentes áreas, tais como robótica, biologia, medicina e agricultura.

Gonzalez *et al.* [27] distingue a área de análise e processamento de imagem como:

Um campo de processamento digital refere-se à transformação de imagens por meio de um computador, e é composta por um número finito de elementos, e cada um dos quais tem uma determinada localização e valor. (p. 2).

Conforme Queiroz e Gomes [28], o processamento digital considera etapas de manipulação ou técnicas que se intercalam e interagem até a obtenção da informação contida, considerando a aquisição, o processamento e a análise da imagem.

### 2.2.1 Aquisição

Para produzir uma imagem, primeiramente, a cena deve ser iluminada. A principal fonte de luz é o sol que gera uma gama de ondas que se propagam no universo alcançando a terra, atingindo uma variedade de objetos. Sobre a superfícies destes, três fenômenos ondulatórios ocorrem [29][30]:

- refração: variação da velocidade de propagação de onda, que gera uma alteração no comprimento de onda, mas não na frequência, o que muda a direção da luz;
- difração: onda que interage com um obstáculo transmitindo parte da energia;
- Reflexão: fenômeno que intercepta um meio e retorna sem alteração na frequência nem na velocidade, desse modo o comprimento de onda incidente é refletido igualmente ao ambiente.

No ambiente, existe a filtração por absorção de um objeto, definindo então uma propriedade característica, a cor de um objeto [31][32]. A Figura 3 demonstra a radiação solar incidente, gerando fenômenos ondulatórios de projeção vetorial irradiados do objeto para o espaço. Por meio de um sensor câmera juntamente com filtros óticos, são capturados os comprimentos de onda que são refletidos, possibilitando a projeção e a digitalização de uma imagem.

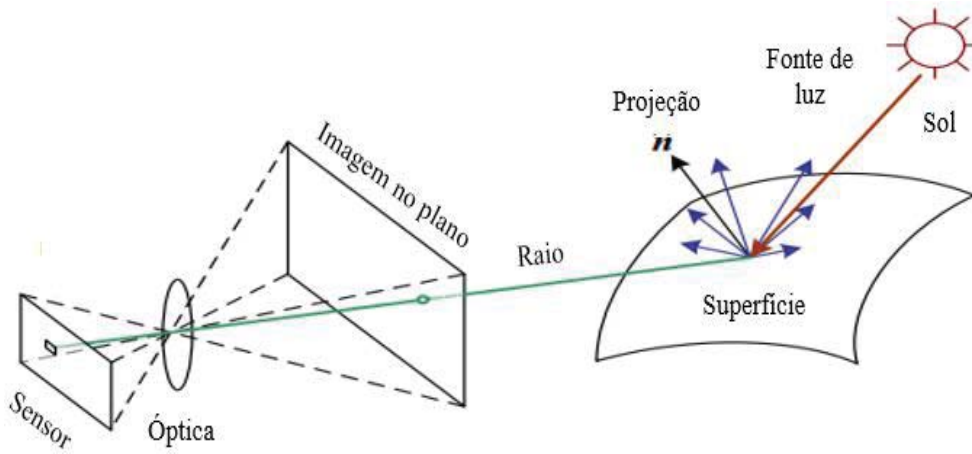


Figura 3. Recepção de comprimento de onda para projeção de imagem.

Os sensores de imagem (câmeras de captura) são projetados para atingir objetivos específicos, proporcionando diferentes níveis de sensibilidade e qualidade. A composição do material de cada elemento da célula do sensor (fotodiodo) é otimizada de modo que a fabricação de semicondutores seja a melhor resposta dinâmica para intensidade da luz e detecção de cor. Para aplicações de VC, a ótica do conjunto deve fornecer uma absorção adequada para cada pixel, para formar as imagens e obter os atributos de interesse. Nesse aspecto uma característica de interesse deve ser amostrada no maior número possível de resolução [33].

O componente chave da resolução da imagem é o tamanho do foto-diodo e da célula das câmeras. Se o tamanho da célula estiver abaixo do comprimento de onda da luz visível a ser capturada (como exemplo, luz azul a 400nm), esta não conseguirá absorver a energia e identificar o espectro, e respectivamente, a cor com exatidão [34]. A Figura 4 demonstra as características físicas que englobam as células.

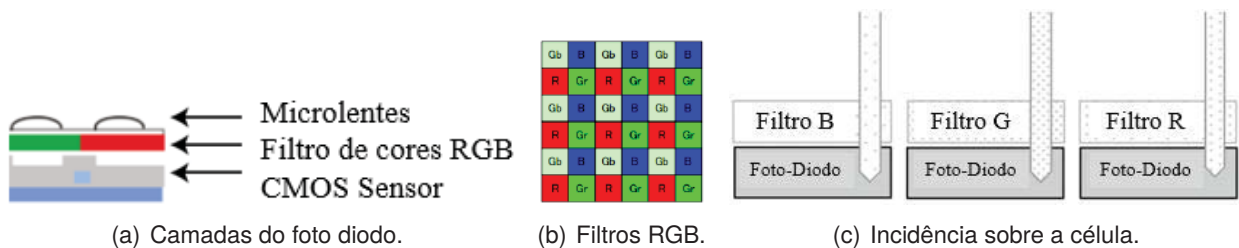


Figura 4. Estrutura de um modulo de célula.

A partir de uma matriz de pixel é possível quantificar cada feixe de luz incidente. O funcionamento do conjunto de pixels é ilustrado na Figura 5, onde a luz refletida da cena penetra através das lentes, direcionando-se aos diodos de aquisição, que absorvem os comprimentos de onda de cores RGB, e é convertido em bases binárias por um conversor analógico digital (ADC). A fidelidade da reconstrução da imagem é determinada pela quantidade de diodos ou pixels de recepção, formando assim a resolução na aquisição [34].

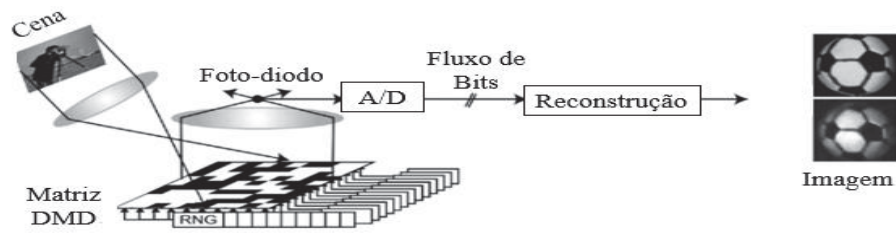


Figura 5. Funcionamento de célula de pixel (Adaptado de [34]).  
Absorção e quantificação de uma projeção de imagem.

A conversão dos ADCs de cada pixel gera um valor numérico com uma quantidade de elementos dispostos sob duas dimensões, cujo representa geometricamente coordenadas dos eixos cartesianos em X e Y gerando um sistema matricial de informações numéricas [35] [36]. A Figura 6 ilustra a captura de uma imagem real de uma cena qualquer, utilizando uma câmera fotográfica, de modo que cada espaço na imagem é convertido numericamente representando as cores de um determinado ponto na tela.

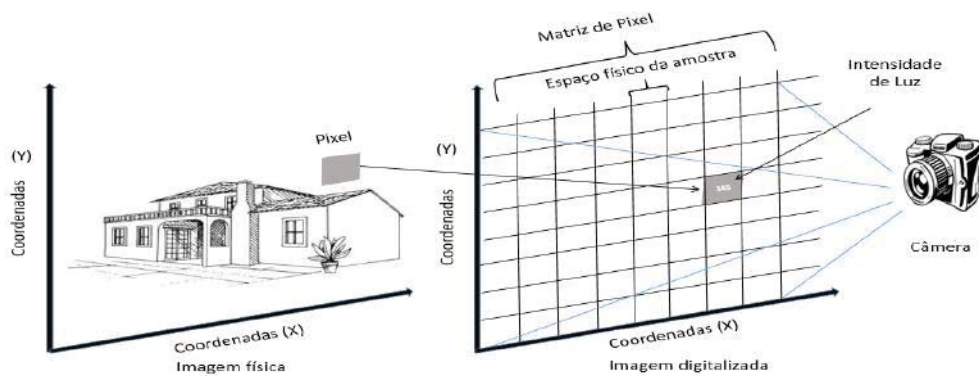


Figura 6. Processo de aquisição de uma imagem.

## 2.2.2 Processamento

Esta subseção apresenta alguns métodos frequentemente utilizados para pré-processamento, segmentação e pós-processamento de imagens, extraindo dados para posterior investigação e estudo.

### 2.2.2.1 Gamma Correction

A iluminação é fundamental para a imagem, pois afeta a luminância e a cromaticidade de uma cena. Em alguns casos, a iluminação é corrigida alterando a projeção da fonte de luz. Em outros casos, a imagem é pré-processada para corrigir o excesso de iluminação por intermédio de um controle de limiar de valoração de pixel. Os fatores de iluminação manipulados para correção são:

- **Diferença de iluminação:** uma imagem pode conter regiões claras e escuras. Assim, deve-se ajustar por meio de um recurso que é dependente de um certo gama alterando a intensidade do pixel;
- **Brilho:** varia de acordo com a luz, que pode afetar a detecção de características correspondentes do objetos na cena;
- **Contraste:** variação das intensidades em diferentes bandas;
- **Vignette:** a luz é distribuída de forma irregular, casado pela ineficiência da incidência de luz sobre a imagem.

Esses fatores são diferenciados para a percepção do olho humano em relação as câmeras, pois a duplicidade de fótons incidentes em um sensor causa uma refletância na imagem comportando-se de forma não linear para os tons, já que o olho humano reage linearmente a uma quantidade de luz [37].

Para controle da intensidade dos tons aplica-se *Gamma correction*, uma técnica que define a relação entre o valor numérico de um pixel e sua luminância real. Ajustar o brilho de uma imagem consiste em variar o valor numérico da intensidade de cada pixel, de modo aplicar uma normalização de médias. O filtro gama opera efetivamente em função exponencial alterando valores de cada pixels individualmente. A Figura 7 demonstra a variação do tom de um pixel dentro da escala de cor cinza, onde este no eixo (x) muda de 0 a 250, em função do gama aplicado na faixa de 0,2 a 1,8, e no centro onde gama é igual a 1 representa a tonalidade original do pixel [38] [39] [40].

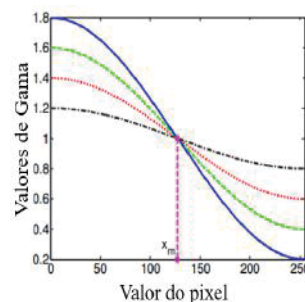


Figura 7. Correção de um valor de pixel pelo método de correção de gama (adaptado de *Reducing Illumination based on Nonlinear Gamma Correction*) [38].

#### 2.2.2.2 Denoising

A eliminação de ruídos (*Denoising*) é uma técnica que usa operações de médias não locais (*NI-means*). A filtragem requer uma média ponderada pela semelhança dos pixels na imagem, para então atribuir o valor de cor ao pixel alvo [41] [42]. O resultado é uma eficiência qualitativa superior em relação a algoritmos que trabalham com média local, o qual trabalha em volta do pixel central de

interesse. Através da média ponderada gaussiana, o modelo apresenta a remoção do ruído, preservando as arestas que são caracterizadas como descontinuidades nos valores. Em contrapartida o tempo de execução é uma desvantagem, pois exige elevado processamento, e como consequência das operações realizadas, aumenta a duração da execução em relação ao algoritmo de média local.

O algoritmo *Nl-means* consiste na condição de estacionário, onde primeiramente verifica a cada pixel a leitura para realizar a média ponderada de todos o valores aleatórios de entrada. Sob estas premissas, a cada pixel  $i$ , o algoritmo *NL-means* converge para a esperança condicional de  $i$  ser próximo a média ponderada, de modo que espera-se uma solução de minimização de ruído [43][44].

Teoricamente um filtro Gaussiano modifica a entrada por convolução, determinando médias para encontrar a semelhança, e atribuir ao pixel de interesse que está apresentando discrepância de intensidade ou ruído [45]. A Figura 8 ilustra um ruído gaussiano e também a correção de intensidades, aplicando o filtro de eliminação por médias ponderadas não local.

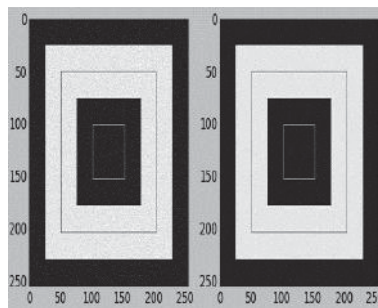


Figura 8. Aplicação do filtro de médias ponderada *Nl-means*.

### 2.2.2.3 Color Spaces and Color Perception

Espaço de cor é referenciado ao espaço ocupado dentro das bandas do espectro de onda, o qual representa a luz visível ou perceptível pelos olhos humanos. A luz incidente causa um efeito colorimétrico que é o fenômeno de cores primárias discretas aditivas RGB (vermelho, verde e azul), que interagem sobre seus comprimentos de onda formando novas pigmentações de cores denominadas subtrativas, algumas são absorvidas e outras refletidas. Isto caracteriza a cor específica do objeto [46] [47].

Em uma imagem digital, as cores podem ser tratadas como funções vetoriais arbitrárias ou coleções de bandas independentes do espectro. As ondas incidentes sobre lentes são condicionadas aos fenômenos ondulatórios pelos componentes construtivos tanto do sensor quanto da ótica, e como efeito colateral uma variação tonal, são aspectos altamente correlacionados ao processo de formação de imagem [48] [49] [50]. A Figura 9 demonstra a colorimetria do sistema de cores RGB e a diferença de caracterização de cor entre a visão humana e um filme [51].

Considerando uma iluminação elevada incidente a uma imagem, além de tornar a imagem mais brilhante, podem ocorrer efeitos colaterais indesejáveis. Para corrigir, é possível manipular as quantidades para alcançar os efeitos perceptivos desejados, fato que cabe ao processo de análise



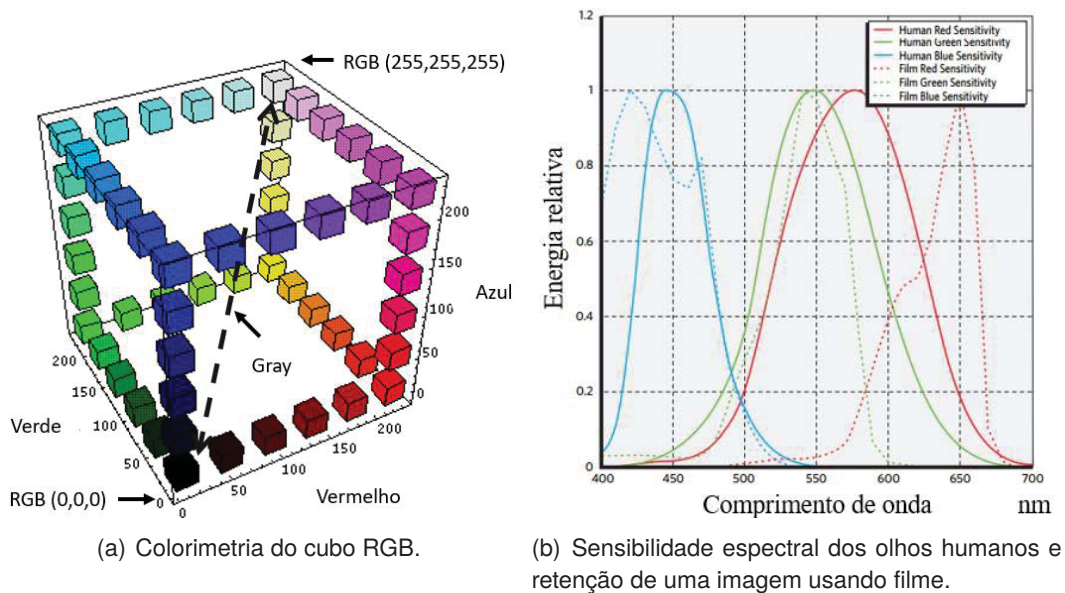


Figura 9. Sistema de cores RGB [52].

e conversão de cor, por intermédio de termos abstratos, como componentes de brilho, intensidade e saturação [53]. A manipulação cabe a conversão de formatos de cores. O HSV é considerado um modelo que facilita a caracterização visual através de métodos computacionais. A cor varia amplamente baseada no entorno ao qual as cores são vistas, de modo que o espectro e os ângulos do feixe de iluminação direta e/ou indireta alteram a percepção humana e também o reconhecimento da tonalidade e consequentemente a definição da cor sendo assim alterada. O espaço de cor é útil para diferentes tipos de processamento visando análise, um exemplo de espaço é HSV (*hue, saturation e value* ou matiz (espectro de cor), saturação (nível de cinza) e valor de brilho (intensidade de cor), respectivamente [54] [55]. A Figura 10 ilustra o espaço de cores HSV utilizado em projeção de imagem criado por Alvy Ray Smith.

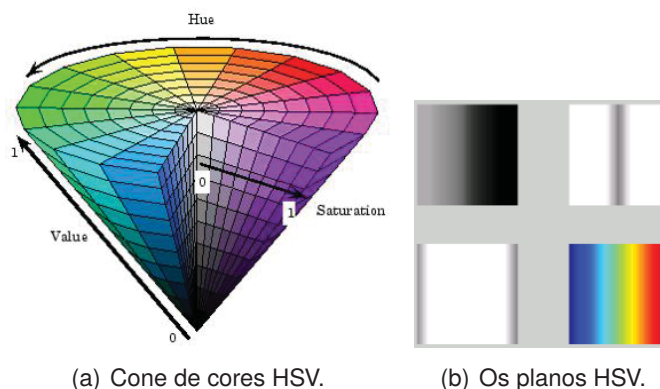


Figura 10. Representação do cone tridimensional do modelo de cor HSV [56].

A conversão para HSV é frequentemente usada por processos que exigem a seleção de cores. O objetivo é diferenciar os espaços colorimétricos para aplicações de VC. Sensores visuais como câmeras digitalizam a imagem possibilitando mapear os valores RGB em uma representação

tridimensional com técnicas computacionais que usam funções matemáticas de transformação para o modelo HSV, por meio das nas Equações 1, 2, 3 [57] [58].

$$H = \begin{cases} 60 * \frac{G-B}{Max-Min} + 0 & \text{if } Max = R \text{ and } G \geq B \\ 60 * \frac{G-B}{Max-Min} + 360 & \text{if } Max = R \text{ and } G < B \\ 60 * \frac{B-R}{Max-Min} + 120 & \text{if } Max = G \\ 60 * \frac{R-G}{Max-Min} + 240 & \text{if } Max = B \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \frac{Max - Min}{Max} \quad (2)$$

$$V = Max \quad (3)$$

Onde:

- $RGB$  = Componentes de cor vermelho, verde, azul.
- $Min$  e  $Max$  = Corresponde ao valor mínimo e máximo de  $R$ ,  $G$  e  $B$ .

#### 2.2.2.4 Morphology Filters

Os filtros morfológicos abordam meios não lineares para soluções de processamento de imagem, entre certas regiões e características adjacentes. É uma solução adequada para resolver problemas que envolvam aspectos geométricos, permitem quantitativamente destacar a estrutura dos objetos de uma imagem. Esses filtros usam uma metodologia chamada de Morfologia Matemática, que objetiva distinguir informações de forma significativa e de irrelevância que satisfaça as propriedades desejáveis por meio de conjuntos combinatórios [49] [39].

Na Figura 11 ilustra-se duas regiões da imagem denominados áreas (A) e (B), que representem pixels de duas magnitudes. Sequencialmente, pode-se ver duas áreas de interesse, a união, a intersecção, o complemento de (A), a diferença entre (A) e (B), a translação de (A) para o ponto (Z), e a reflexão dos elementos de (B) dado conjunto (A) e (B) ao ponto (Z). O efeito implica na discriminação característica de geometria integral e na topologia, reconhecendo as regiões e seu respectivo grupo de similaridade, respeitando as classes de pontos da hierarquia pertencente.

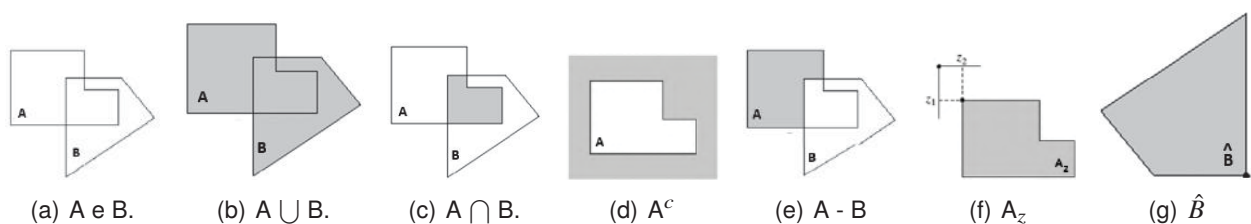


Figura 11. Teoria de conjuntos [27].



A similaridade encontrada por meio da matemáticas são invariantes por mudança. Na Figura 12 pode-se notar um degrau de valores em relação a dois pixel de magnitude diferente, e isso representa em uma imagem uma borda, caracterizando um objeto em uma imagem planar. A discrepância de valores em função da vizinhança acarretam defeitos nas formas estruturais dos dados contidos nas imagens. Assim, para reconstrução ou restauração com eliminação de peculiaridades relevantes são aplicadas algumas técnicas como dilatação, erosão, abertura e fechamento [59].

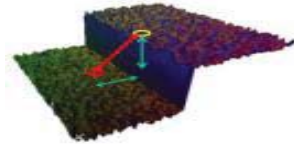


Figura 12. Degrau de uma borda [60].

O filtro de dilatação expande o tamanho do primeiro plano do objeto, ou das regiões avaliadas como (A) e (B). O processo de dilatação também suaviza os limites de objetos, eliminando fissuras, e também remove buracos nos objetos [60] [61]. A Figura 13 ilustra duas áreas, onde apresentam-se pequenos orifícios e a operação de dilatação que permite a reconstrução do objeto. Porém, nota-se que não foi possível preencher toda área aberta no seu interior, necessitando assim de uma redundância de operações, ou processos antecedentes. A dilatação é dada pela convolução de um ponto (Z), de modo que  $\hat{B}$  é transladado por (Z) sob a interseção (A) diferente de vazio, representado pela expressão matemática 4.

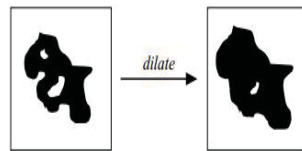


Figura 13. Filtro de dilatação [60].

$$A \oplus B = \{Z | (\hat{B})_Z \cap A \neq \emptyset\} \quad (4)$$

O filtro de erosão contrai o tamanho do primeiro plano representado como o objeto de uma imagem, e as regiões adjacentes são expandidas para o segundo plano igual ao fundo. A ação do operador de convolução da erosão é equivalente ao cálculo do mínimo local sobre a área [60] [61]. O processo de erosão suaviza os limites dos objetos, efeito que pode ser observado na Figura 14. A erosão é dada pela expressão matemática da Equação 5, onde o conjunto de todos os pontos (Z) tal que (B), transladado por (z), está incluso em (A).

$$A \ominus B = \{Z | (B)_Z \subseteq A\} \quad (5)$$

A Figura 15 demonstra a utilização dos dois filtros aplicados. Como resultado a dilatação tende a suavizar as concavidades, e a erosão a suavizar as rupturas.

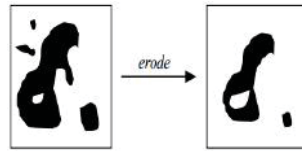


Figura 14. Efeito do filtro de Erosão. [60].



(a) Origem. (b) Erosão. (c) Dilatação.

Figura 15. Resultado da interação entre filtros [60].

A junção destes dois elementos filtrantes desenvolvem dois outros filtros: abertura e fechamento. A abertura permite separar regiões de pixel um do outro, em relação a sua classe de valores. Já o fechamento ocorre o contrário aumentando a conexão dos elementos. Um fato importante é que estes dois filtros preservam a área, o fechamento elimina os valores abertos solitários, que são mais baixos do que os seus vizinhos, e a abertura elimina os pontos de valores de pixel, que são superiores aos vizinhos [60][61].

#### 2.2.2.5 Color Quantization

A quantização de cores *Color Quantization* é o processo de redução da quantidade do número de cores distintas em uma imagem. Esse processo tem por objetivo preservar todas as informações quantitativas, mesmo reduzindo o número de cores em uma imagem. O método possibilita remover borrões e uma gama de diferentes degradações, geralmente causados por condições e efeitos de iluminação, como reflectância de cores e imperfeições por superexposição, saturação e desfocagem [39].

A técnica utiliza a conversão dos valores de pixel contínuos de uma certa região amostral, sendo registradas espacialmente e discretamente em um intervalo determinado. A operação altera os valores de pixel de acordo com os membros mais próximos respectivos, relevando a intensidade de coloração. Existem, basicamente, dois métodos de aplicação: a quantização uniforme e a quantização adaptativa.

A quantização uniforme consiste em dividir o espaço de cores em células uniformes bidimensionais ou planos de cores de tamanhos iguais, e mapear de modo que a distribuição seja concentrada próximo a origem, assim virilizar ao centro. Os resultados em geral causam perturbações na distribuição de cores na imagem, algumas células podem ficar vazias, e algumas regiões onde se tem gradientes suaves perdem coloração, pois são muitas cores similares que aparecem próximas.

A quantização adaptativa divide o espaço de cor em células com mesma variância, entre as cores originais de uma célula, e a nova cor representativa da nova célula. Esse fato permite um

equilíbrio simultâneo para a nova atribuição de valor, permitindo o uso de métodos como corte médio, distribuição de médias de cores, e mínima variância. Todos funcionam associando pixels a grupos com base na variância entre seus valores, fazem uso de técnicas como *K-means*, que trabalha com dados agrupados, e mapa auto organizável (Mapa de Kohonen), que é capaz de diminuir a dimensão de um grupo de dados [62][63].

A Figura 16 ilustra o diferencial decorrente dos dois métodos de quantização mencionados, uniforme e adaptativa, onde ambos processam quadros de coloração com determinados números de pixels.

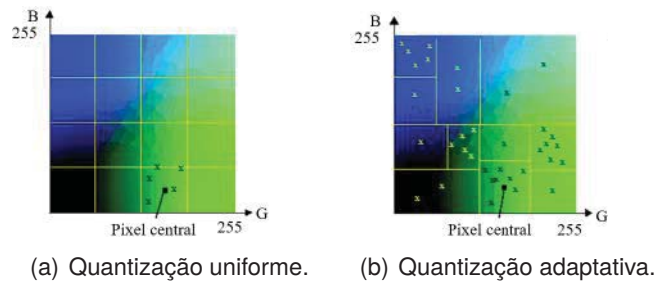


Figura 16. Quantização de cores.

Dependentemente do objetivo processual que envolve a imagem, é importante que a combinação de cores seja adequada e mantenha a informação contida em uma imagem. A redução excessiva de tons causa danos espaciais métricos, cujo as distâncias euclidiana acarretam a descaracterização de dimensão perspectiva. Já o aumento do número de cores interfere na complexidade da análise e diretamente na velocidade de processamento [64].

#### 2.2.2.6 Background Subtraction

A subtração de fundo da imagem *Background Subtraction* usa a adoção de um limiar que determina um plano pertencente. É uma abordagem amplamente utilizada para detectar objetos em movimento em vídeos de câmeras estáticas, pois ocorre a subtração do quadro atual conhecido como *frame* e o seguinte permitindo a detecção de um fluxo de movimento na imagem. Essa técnica aborda conjuntos de histogramas e operações matemáticas morfológicas de segmentação, onde um limite é adotado para um pixel qualquer, e esse valor determina um limiar de plano sobre duas máscaras planares. Ou seja, caso o valor for maior ele pertence ao primeiro plano, caso contrário, ao segundo plano. Os objetos se diferem de acordo com a variância das intensidades de pixel, permitindo então a formação das bordas, identificadas pelo gradiente de efeito gradual crescente. Geralmente o processo é executado com intensidades de níveis de cinza, mas há métodos para imagens coloridas. O objetivo principal é isolar uma região para extração de atributos, classificação e reconhecimento de objetos [49][65][66][67].

A técnica de *Otsu Thresholding*, por exemplo, faz a binarização de imagens, possibilitando a detecção dos planos, processo que acarreta em atualizar um pixel da imagem de acordo com o limiar

setado. A partir de uma varredura, os números distribuídos dos pixels são recalculados para definir o plano encontrado [68][69][70]. A Figura 17 mostra o funcionamento do algoritmo em uma imagem com dimensão de 6x6 pixels, e seu respectivo histograma.

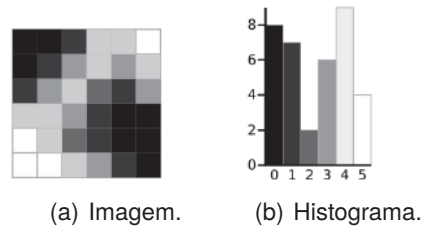


Figura 17. Uma imagem em escala de cinza com 6 níveis e seu histograma.

Para exemplificar matematicamente os planos considera-se um limiar igual à 3. De modo que a imagem da Figura 18 é dividida em duas regiões de tons, os três tons mais escuros na Figura 18(a) e mais claros Figura 18(b). As Equações 6, 7, 8 representam os cálculos do plano de fundo, e as Equações 9, 10, 11 o plano do objeto. Onde o termo *Weight*, *Mean* e *Variance*, significa respectivamente peso, média e variância [71] [72].

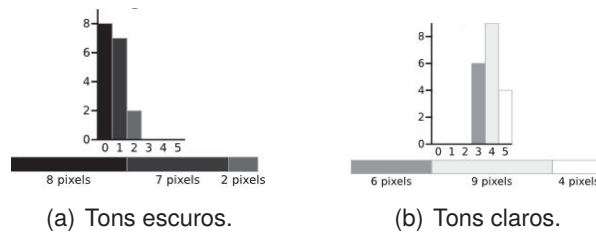


Figura 18. Divisão de uma imagem com limiar igual a 3.

$$\text{Weight } \omega_b = \frac{8+7+2}{36} = 0,4722 \quad (6)$$

$$\text{Mean } \mu_b = \frac{(0*8) + (1*7) + (2*2)}{17} = 0,6471 \quad (7)$$

$$\text{Variance } \sigma_b^2 = \frac{((0-0,6471)^2 * 8) + (1-0,6471)^2 * 7) + (2-0,6471)^2 * 2)}{17} = 0,4637 \quad (8)$$

$$\text{Weight } \omega_f = \frac{6+9+4}{36} = 0,5278 \quad (9)$$

$$\text{Mean } \mu_f = \frac{(3*6) + (4*9) + (5*4)}{19} = 3,8947 \quad (10)$$

$$\text{Variance } \sigma_f^2 = \frac{((3 - 3,8947)^2 * 6) + (4 - 3,8947)^2 * 9) + (5 - 3,8947)^2 * 4)}{19} = 0,5152 \quad (11)$$

Na sequência é calculado a variação interna da classe, que é simplesmente a soma das duas variâncias multiplicadas por seus pesos, de acordo com a Equação 12.

O valor encontrado é a soma das variâncias ponderadas para o valor limite igual a 3, esse cálculo é executado para todos os valores limites possíveis de 0 a 5. A Figura 19 ilustra os histogramas de cada situação, e a cada limite dado por T=0 até T=5 Figuras 19(a), 19(b), 19(c), 19(d), 19(e), 19(f). A Tabela 1 apresenta todos os valores encontrados.

$$\text{Class Variance } \sigma_c^2 = \omega b \sigma_b^2 + \omega f \sigma_f^2 = 0,4722 * 0,4627 + 0,5278 * 0,5152 = 0,4909 \quad (12)$$

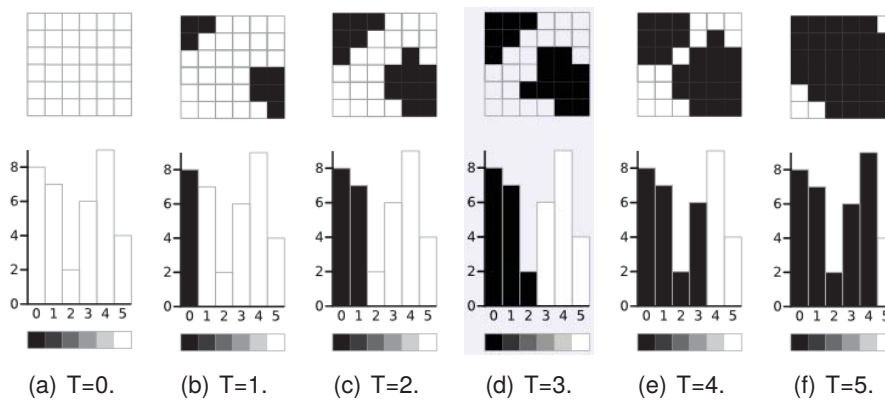


Figura 19. Resultados dos cálculos para cada limiar.

Tabela 1. Resultados das operações.

Limite	T=0	T=1	T=2	T=3	T=4	T=5
<b>Peso, segundo plano (<math>\omega b</math>)</b>	0	0.222	0.4167	0.4722	0.6389	0.8889
<b>Média, segundo plano (<math>\mu b</math>)</b>	0	0	0.4667	0.6471	1.2609	2.0313
<b>Variância, segundo plano (<math>\sigma_B^2</math>)</b>	0	0	0.2489	0.4637	1.4102	2.5303
<b>Peso, primeiro plano (<math>\omega f</math>)</b>	1	0.7778	0.5833	0.5278	0.3611	0.1111
<b>Média, primeiro plano (<math>\mu f</math>)</b>	2.3611	3.0357	3.7143	3.8947	4.3077	5.000
<b>Variância, primeiro plano (<math>\sigma_f^2</math>)</b>	3.1196	1.9639	0.7755	0.5152	0.2130	0

Conclui-se que todos os pixels com um nível inferior a 3 são de fundo, e todos aqueles com um nível igual ou superior a 3, são de primeiro plano. Para o limiar igual a 3, além de ser usado para o exemplo, também tem a menor soma de variâncias ponderadas. Portanto, este é o limite final selecionado. A Figura 20 é o resultado da seleção dos planos da Figura 20(a) e o plano encontrado de fundo Figura 20(b).

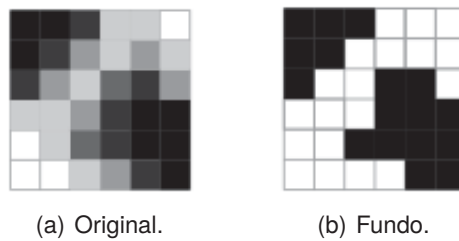


Figura 20. Resultado do Método de Otsu.

### 2.2.3 Análise Digital da Imagem

Para Szeliski [59], a análise digital é uma das tarefas visuais de maior desafio, pois possui um nível elevado de complexidade nos algoritmos executados. É responsável em realizar uma análise técnica para apresentação dos resultados o mais próximo possível da visão e da percepção humana. As operações empregadas possuem finalidade de substituir a análise visual dos dados, por técnicas quantitativas automáticas, que visam identificar regiões específicas contidas em uma cena. Esse processo é relacionado com funções de cognição associadas a visão humana, tornando sistematicamente difícil de se implementar sem considerar um percentual de perda ou não-deteção.

A extração de atributos, classificação e reconhecimento são etapas que utilizam métodos que obtêm informações numéricas de imagens. Toda cena possui alguma característica de semelhança seja ela por similaridade de classes ou por parâmetros de medidas. Esses dados possibilitam a quantificação e análise estatística que descrevem uma determinada cena. Um dos métodos mais conhecidos é o *K-Means clustering*.

Esse método constitui um aprendizado não supervisionado, que recorre ao agrupamento de vetores de atributos, em busca da similaridade entre os dados [73]. A distribuição dos dados discretos permite convergir para um mínimo local, buscando centrar as posições de maior aglomeração, como efeito é especialmente sensível às condições de partida iniciais [74].

A análise dos dados exploratórios visam identificar características que descrevem objetos, não ocorre por meio de rotulação, mas identifica instâncias colocadas dentro de uma partição [75]. O processo é realizado por métrica das distâncias quadráticas entre todos os pontos e os centros. O método descrito por Tou e Gonzalez [76] explica as etapas de funcionamento.

Primeiramente definir o número de grupos representado por  $K$  centroides  $z_1(1), z_2(1), \dots, z_K(1)$ . Em seguida a etapa  $k$ -iterativa que distribua as amostras  $x$  entre os centros  $K$  utilizando a condicional da Equação 13:

$$x \in C_j(k) \text{ if } \|x - z_j(k)\| < \|x - z_i(k)\| \quad (13)$$

Para todo  $i = 1, 2, \dots, K; i, j$  onde  $C_j(k)$  indica o conjunto de amostras cujo centro é  $z_j(k)$ .

Por meio da Equação 14, buscam-se os novos centros  $z_j(k+1), j = 1, 2, \dots, K$ , de modo que a soma do quadrado das distâncias de todos os pontos em  $C_j(k)$  gera um novo centro minimizado. Isso é a média da amostra de  $C_j(k)$ . Portanto, o novo centro é encontrado.

$$z_j(k+1) = \frac{1}{N_j} \sum_{(x \in C_j(k))} x, j = 1, 2, \dots, K. \quad (14)$$

Onde  $N_j$  é o número de amostras em  $C_j(k)$ .

Se  $z_j(k+1) = z_j(k)$  para  $j = 1, 2, \dots, K$ , então o algoritmo convergiu e o procedimento é finalizado. Caso contrario é necessário atribuir um novo numero de grupos  $k$ .

Para Rayet *al.* [77], a principal desvantagem do algoritmo *k-means* é que o número de grupos *cluster* centroides,  $K$ , deve ser fornecido como um parâmetro antecedente. Dessa forma é importante conhecer a área de aplicação para estimar densidade e probabilidade dos dados estatísticos.

A Figura 21 demonstra cada interação do método envolvendo as amostras mais próximas ao centro de semelhança. A Figura 21(a) ilustra os centros que são colocados aleatoriamente a cada ponto de dados, e é então atribuído ao seu centro os mais próximos. A Figura 21(b), a Figura 21(c) e a Figura 21(d) mostram os centros movidos para o centro dos seus pontos em diferentes momentos.

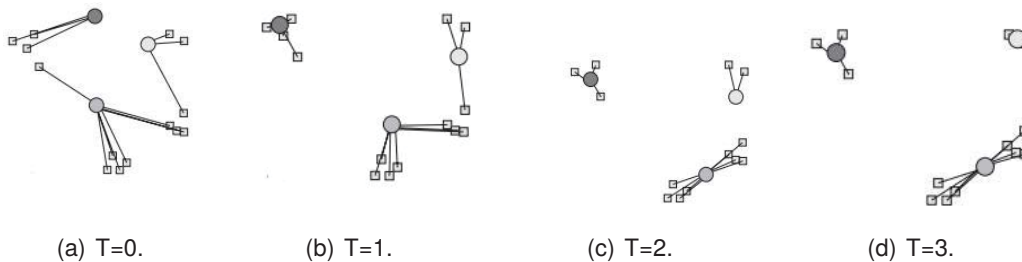


Figura 21. Interatividade do método *K-means* [73].

A Figura 22 mostra um exemplo prática da aplicação do método. A Figura 22(a) representa o modelo original em níveis de cinza, na sequência a Figura 22(b) considera duas centroides (ou dois agrupamentos), na Figura 22(c) são três, e por fim no formato de cores HSV Figura 22(d) com oito grupos de centroides dividindo em oito níveis de cores.

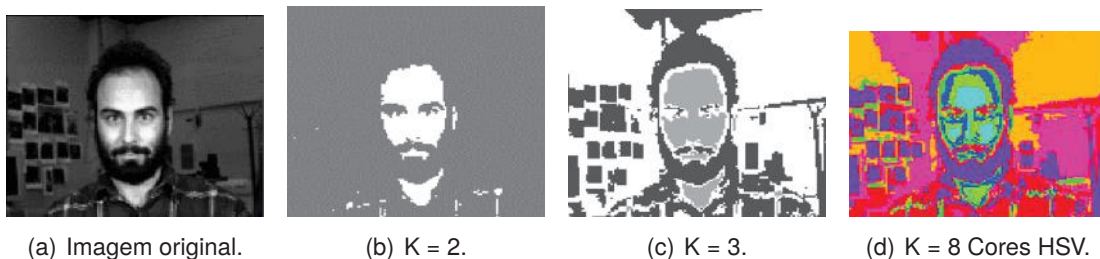


Figura 22. Aplicação K-means em imagem.

## 2.3 SISTEMAS EMBARCADOS

Sistemas embarcados são plataformas de computadores compactos que possuem funcionalidades semelhantes a computadores convencionais *Desktop*. Seu diferencial está na arquitetura do hardware, com recursos concentrados que visam a portabilidade. Dispositivos periféricos como memória, processador, chips de controle de áudio e de vídeo estão integrados ao microcontrolador, e são desenvolvidos para tarefas específicas. Essas soluções encapsuladas ou dedicadas possibilitam uma diversidade de aplicações tecnológicas incorporadas a todos equipamentos que necessitam de controle supervisorio para tomada de decisão [78].

Estas aplicações avançaram gradativamente em suas utilidades, de maneira a intervir no cotidiano, auxiliando e facilitando a vida das pessoas. O emprego de eletrônica embarcada está presente em ações como salvar vidas em aparelhos biomédicos; dar segurança em aviões e automóveis; unir pessoas pelas telecomunicações; oferecer entretenimento em TVs e *players* de mídia; criar casas automatizadas; controlar sistemas em redes elétricas; monitorar bélicos e reatores nucleares [79].

Levando em consideração as utilidades mencionadas, integrada à conectividade em embarcados, surgiu o termo Internet das Coisas ou *Internet of Things* (IoT). Esse conceito promove a conexão interativa por meio computacional de objetos e utensílios, fomentando a inovação técnica e a sustentabilidade [78] [79].

Para Vermesan e Friess [80] o termo "Internet das coisas" pode ser definido como:

Uma infraestrutura de rede global dinâmica com capacidades de auto configuração baseado em protocolos de comunicação padrão e interoperáveis, onde as "coisas" virtuais e físicas têm identidades, atributos físicos e personalidades virtuais, usa interfaces inteligentes e estão perfeitamente integrados na rede de informação. (p. 3).

### 2.3.1 Plataformas de desenvolvimento

São unidades que permitem a implementação de um sistema embarcado. Cada dispositivo possui um microcontrolador programável, que permite configurar periféricos de hardware via sistema operacional, adequando a plataforma conforme o objetivo de projeto a ser desenvolvido.

No mercado tecnológico existe uma variedade de produtos que atendem as possibilidades de embarcação. Vahid e Givargis [81] citam algumas características relevantes para plataformas de dispositivos embarcados: Processador com software operacional e um programa supervisorio; Portas digitais e analógicas; Espaço físico do dispositivo; Desempenho equilibrado de sistema e hardware; Baixo consumo de energia; Não necessitar ventilação forçada; Flexibilidade de sistemas operacionais; Facilidade de programação; Protótipo para desenvolvimento; Segurança e confiabilidade; Possibilidade de verificação e de correção das funcionalidades durante execução; Conectividade (prover de formas para comunicação); Modulares (permitir conexão com módulos sensoriais diversos).



A Figura 23 mostra o *designer* das plataformas embarcadas de alguns fabricantes, com objetivo de implementações de sistemas IoT. E a Tabela 2 apresenta os modelos e suas características de arquitetura comparando-os.

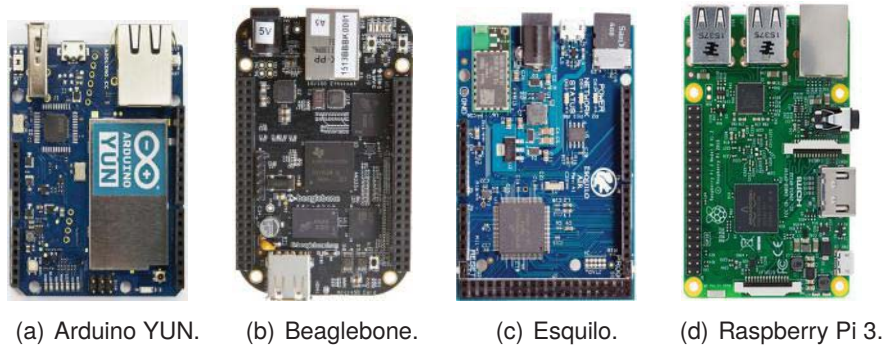


Figura 23. *Designer* de plataformas embarcadas.

Tabela 2. Comparativos de plataformas para desenvolvimento de sistemas embarcados.

Fabricante	Raspberry	Esquilo	Texas instruments	Genuino
Modelo	raspberry Pi 3	Esquilo AIR	Beaglebone black	Arduino Yún
Microcontrolador	QuadCortex A53	ARM Cortex M4F	ARM Cortex M8	ATmega 32U4
Ethernet port	✓	×	✓	✓
Bluetooth	✓	×	×	×
Wireless LAN	✓	✓	×	✓
Display	✓	✓	×	×
Câmera	✓	×	×	×
Vídeo	✓	×	×	×
HDMI	✓	×	✓	×
Áudio	✓	×	✓	×
SD Card	✓	✓	✓	✓
USB	✓	✓	✓	✓
GPIO	✓	✓	✓	✓
SPI	✓	✓	✓	✓
I2C	✓	✓	✓	✓
UART	✓	✓	✓	✓
Serial	✓	✓	✓	✓
AD Converter	×	✓	✓	✓
Timer	✓	✓	✓	✓
PWM	✓	✓	✓	✓
Buzzer	×	×	×	×
Nuvem	✓	✓	✓	✓
✓	<b>Incorporado a plataforma</b>			
×	<b>Não possui suporte na plataforma, podendo ser implantado por módulos e componentes específicos.</b>			

## 2.4 TERMISTORES

Termistores são componentes construídos com materiais semicondutores portadores de carga, tipicamente produzidos a partir de óxidos de metais de transição, como níquel, cobalto, cobre e titânio. Sua característica funcional é a sensibilidade de variação da resistência em relação a temperatura. Possui modelos com coeficiente de operação positivo ou negativo, denominados *Negative Temperature Coefficient* (NTC), onde a resistência diminui com o aumento da temperatura e *Positive Temperature Coefficient* (PTC), onde ocorre o oposto. A Figura 24 demonstra a diferença na característica de resposta entre os dois modelos [82] [83] [84].

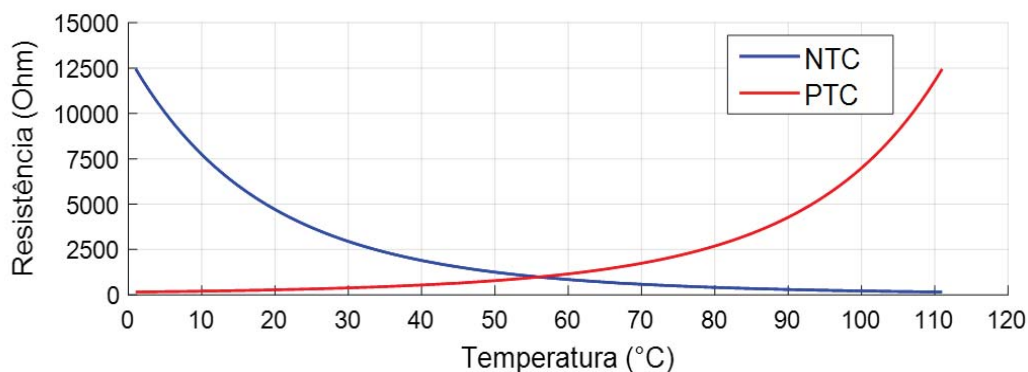


Figura 24. Curvas características de termistores NTC e PTC.

Uma das vantagens do uso destes tipos de sensores é o tempo de resposta em relação a mudança abrupta de temperatura, decorrente das propriedades físicas e dinâmicas dos componentes utilizados na fabricação. De acordo com a diversidade de modelos estruturais existentes, possibilita alcançar diversas escalas de operação. Além disso, é caracterizado um componente que responde rapidamente a variação de temperatura, leva apenas alguns segundos para transição entre um patamar a outro [85].

## 2.5 TENSÍÔMETRO

Um dos principais métodos de leitura de umidade no campo é o uso do tensiômetro. Esse equipamento tem por objetivo quantificar a tensão com que a água é absorvida/retida pelas partículas do solo, conhecido por potencial matricial [86].

A Figura 25 ilustra um modelo de tensiômetro para captação da umidade do solo, através do manômetro de vácuo, processo realizado manualmente através da visualização no ponteiro do equipamento por meio de um escalar [52].

Sua característica construtiva permite a variação do nível de água no tubo de policloreto de vinil (PVC), onde este está enterrado no solo, e a água transpassa entre a capsula cerâmica porosa do tubo para a terra, ou vice versa - gerando uma diferença de pressão internamente no tubo formando

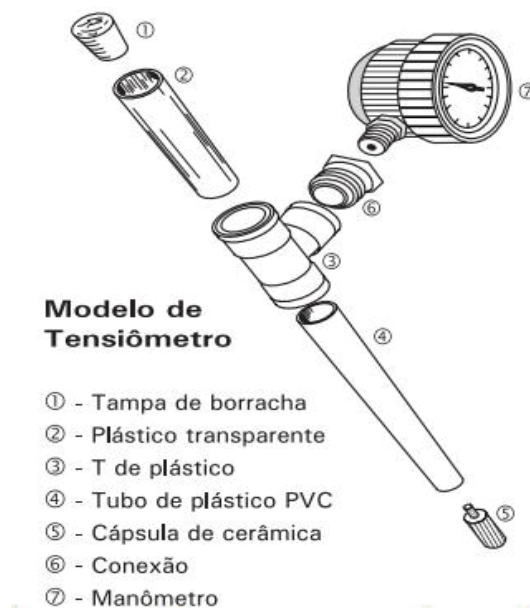


Figura 25. Modelo de Tensiômetro [52].

pressão positiva ou negativa. Ou seja, quando o teor de água do solo está alto, a pressão interna diminui, e conclui-se que o solo está úmido, e inversamente no caso que estiver seco [52].

A capacidade de retenção de água depende de diferentes tipos de solos, como argilosos e arenosos, o que impacta na absorção da capsula porosa. A capsula porosa é um dos principais componentes do tensiômetro, pois a porosidade ou capacidade de infiltração é determinante para tais tipos de solos. Sabe-se que o solo retém a água no seu espaço poroso com forças cujas intensidades aumentam conforme a quantidade de água que há nele. Essas forças agem na matriz do solo, que são denominadas de forças mátricas, distingue-se em forças capilares, responsáveis pela retenção da água nos microporos dos agregados e as forças de adsorção, responsáveis pela retenção da água nas superfícies das partículas do solo. Sem a quantificação da contribuição de cada um desses tipos de força que agem no solo, é praticamente impossível mensurar o potencial de energia em função da água, a qual impacta no desenvolvimento da planta. Mas é reconhecido que logo após a drenagem livre de um solo saturado, as forças capilares são dominantes, e que à medida que o solo seca, a adsorção vai adquirindo maior importância [87] [88] [89] [90].

## 2.6 SENSORES HIGRÔMETROS DE AMBIENTE

São módulos de umidade e temperatura do ar incorporados em uma mesma estrutura, com sinal de saída em formato digital de dados [91]. Possui um sensor capacitivo de umidade e dispositivos de medição de temperatura de alta precisão conectados a um microcontrolador de 8 bits de alto desempenho para resposta rápida. Possui forte capacidade quanto a interferências eletromagnéticas, e como característica crucial, tamanho pequeno, baixo consumo de energia, distância de transmissão de sinal via cabo de até 20 metros e baixo custo de mercado. Conta com uma calibração fortemente precisa da câmara de medição, e os coeficientes de calibração são armazenados no microcontrolador.

É demasiado a utilização em desumidificador, equipamentos de teste e inspeção, bens de consumo, automotivo, controle automático, eletrodomésticos, regulador de umidade, áreas biomédicas, estações meteorológicas e outras medidas de umidade e controle [92][93].

Os módulos mais comumente disponíveis são: fabricante *Aosong* modelos ( DHT22, AM2302, AM2302, AM2320 e AM2321); *Sensirion* (SHT71); *Measurement Specialties* (HTU21D); *Silicon Labs* (Si7021) e *Bosch Sensortec* (BME280).

## 2.7 SENSORES DE RADIAÇÃO SOLAR FOTOSSINTÉTICA

Radiação é uma forma de transferência de energia por meio da propagação de ondas eletromagnéticas, caracterizadas como componentes de ondas. São formados por partículas denominadas fótons, e certa quantidade de energia chama-se quantum, as quais transitam no espaço [37].

O sol é uma fonte de luz natural que emite radiação espectral de toda gama de raios existentes. A luz é dividida em três espaços de banda, sendo elas, a ultravioleta, o visível e o infravermelho. A Figura 26 demonstra as bandas espectrais, com destaque a região de espaço colorimétrico o qual grande quantidade de fótons é emitidas em diversas frequências, e se propagam interagindo com o ambiente causando alguns efeitos específicos de coloração [94].

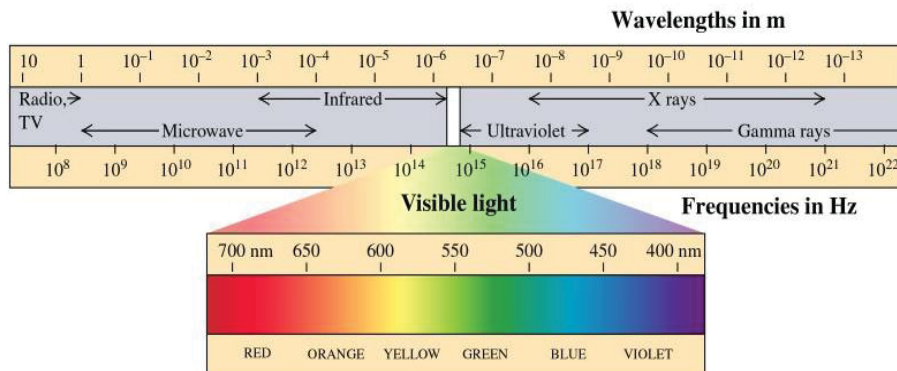


Figura 26. Espaço de cor visível no espectro de onda [18].

A irradiação do sol afeta diretamente processos físicos e biológicos terrestres, sendo primordial em efeitos meteorológicos e fundamental para fotossíntese, incluindo a produção vegetal. A energia solar é convertida em energia química na planta, nos cloroplastos que produzem um pigmento verde chamado clorofila. Este pigmento captura energia do sol nas regiões azul e vermelha do espectro eletromagnético na gama de comprimento de onda de 400 a 700nm [18].

Instrumentos como solarímetros, piranômetros, radiômetros e actinógrafos são capazes de quantificar a densidade dos fluxos de quantum. Geralmente usam tecnologias fotovoltaicas para gerar uma corrente elétrica de saída proporcional a radiação solar.

Para captura da radiação PAR, podem ser adquiridos componentes sensíveis a faixa do espectro. O Sensor S1336, por exemplo, é um fotodiodo da família de sensibilidade espectral da faixa de radiação ultravioleta (UV) no espectro de aquisição 320 a 1100nm, próximos a IR [95]. Para obje-

tivos de medição de radiação PAR, um filtro UV deve ser implantado sobre o feixe de aquisição para realização da leitura do espectro correspondente. A Figura 27 demonstra modelos de sensores de radiação para finalidade de aquisição de radiação solar.

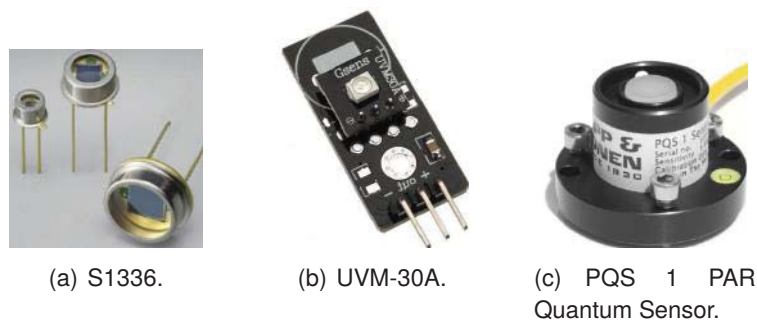


Figura 27. Sensores de radiação.

## 2.8 MICROCONTROLADORES

São componentes semicondutores inteligentes, que encapsulam outros componentes eletrônicos, como CPU (Unidade de Processamento Central) e memórias, como a PROM (*Programmable Read Only Memory*, memória programável de instruções somente para leitura) e a RAM (*Random Access Memory*, acessada aleatoriamente pelo programa principal). Permite acessos a registradores de controle para dispositivos periféricos externos, como entradas de sensores com comunicação SPI, I2C, RS232 e *ethernet* assim como botões e saídas para acionamentos automáticos. Também incorpora geradores de pulsos PWM (*Pulse Width Modulation*), utilizados para gerar sinais digitais modulados, bem como conversores analógicos digitais integrados.

O principal componente de um microcontrolador é um processador para as operações das instruções, com velocidade de processamento de acordo com a tecnologia empregada, geralmente definida pela arquitetura utilizada na fabricação, como exemplo a RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). Nesse contexto, destaca-se a arquitetura ARM-CORTEX com multi-core de CPUs para aplicações de alto desempenho, e em tempo real otimizado para processamento em sistemas embarcados.

## 2.9 MÓDULOS DE COMUNICAÇÃO

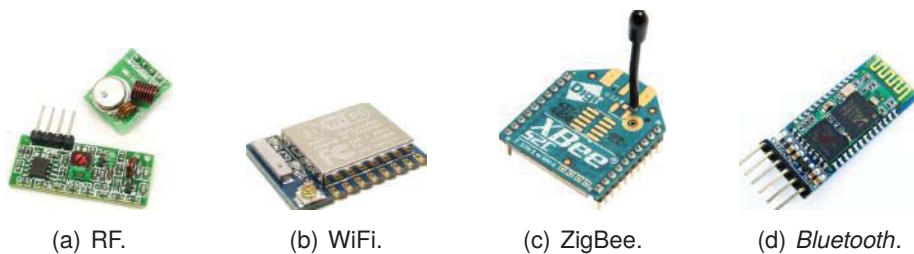
Visando conectividade entre equipamentos (IoT), existe uma variedade de dispositivos modulares que possibilitam interconectividade entre aparelhos eletrônicos, principalmente por meio de redes de computadores, conforme a Figura 28.

A interação das aplicações ilustradas é devido a dispositivos de conexão relacionados a algum tipo serviço específico, geralmente delimitados pelas distâncias e tráfego de dados, e também pelo grau de confiabilidade. Estes são caracterizados em diferentes categorias de redes, usam protocolos de transferência digital com pacotes de dados na transmissão.



Figura 28. Cenário da comunicação IoT [80].

A Figura 29 mostra alguns modelos comuns disponíveis no mercado, como um módulo RF Transmissor e Receptor em 433MHz, um módulo *wireless* ESP8266 ESP-12E padrão 802.11 b/g/n, um módulo ZigBee para redes M2M sem fio de baixo custo e de baixa potência, e um módulo *bluetooth* que possui alcance máximo de 10m [96][97][98][99].



(a) RF.

(b) WiFi.

(c) ZigBee.

(d) Bluetooth.

Figura 29. Módulos de comunicação.





### 3. TRABALHOS RELACIONADOS

As próximas subseções apresentam exemplos de abordagens que utilizam equipamentos embarcados para aquisição de informações em morangueiros, em específico para contagem e classificação de características dessas plantas.

#### 3.1 CONTAGEM DE FRUTOS

Xu *et al.* [7] aplicaram CV em uma solução para contagem de morangos. Os autores utilizaram o método de análises por histograma orientado a gradientes para reconhecer os frutos diante da câmera. Na Figura 30, observa-se os estágios do processamento realizado.

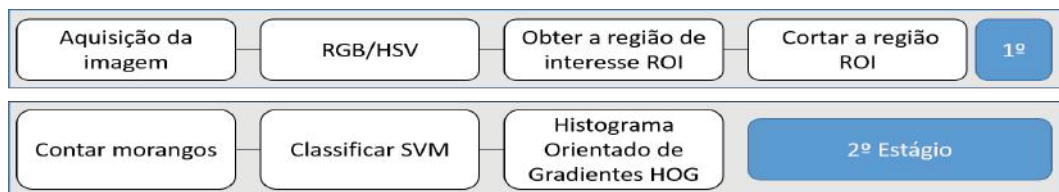


Figura 30. Estágios de processamento do morango [7].

As aquisições consideram a coleta de várias imagens, as quais sofrem transformações do sistema de cores RGB para o HSV. O sistema HSV auxilia nas descrições em termos de informação como matiz, claridade e saturação, muitas vezes mais relevantes e manipuláveis do que o RGB em softwares que trabalham com imagens. Levando isso em consideração, a abordagem dos autores define na imagem a região de interesse, e realiza a extração de características pelo método ROI. A Figura 31 mostra todo esse processo de regiões, orientado por gradiente.

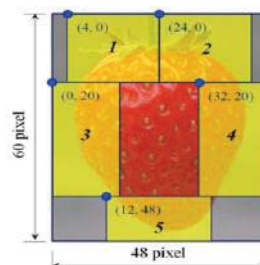


Figura 31. Divisão da região de interesse método ROI [7].

Posteriormente, a Figura 32 ilustra a divisão das células, pixels e bins, dentro de um bloco, calculando um histograma de instruções de gradiente HOG. A representação desses elementos é normalizada, internamente ao bloco extraído, que também descreve a forma e a direção angulares, de acordo com a orientação do gradiente.



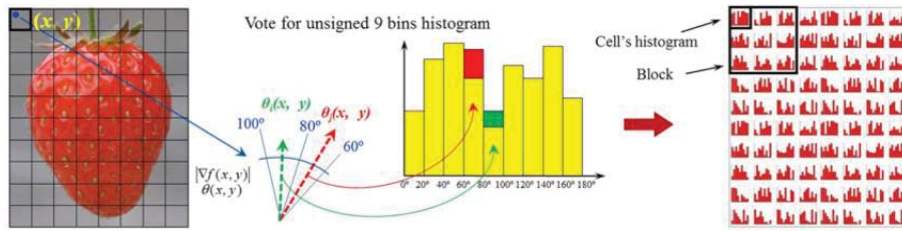


Figura 32. Extração computacional de histogramas orientados a gradientes [7].

O agrupamento de células, pixels ou bins em um bloco é a base para o agrupamento e a normalização dos histogramas, representando o vetor final que define o descritor, representado na Figura 33.

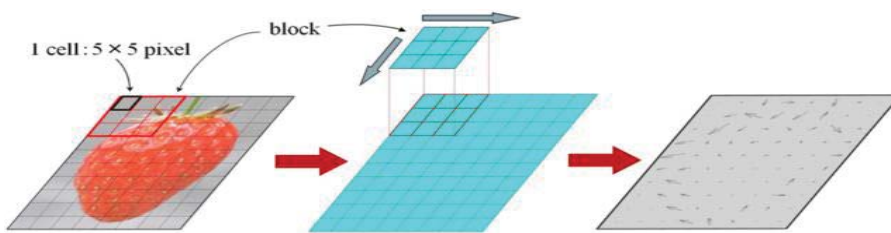


Figura 33. Processo computacional de histogramas orientados a gradientes [7].

Para classificar os morangos, aplicaram o classificador *Support Vector Machine* (SVM) cujo entrada é o vetor de atributos HOG. Desta forma, define-se as margens dos níveis de decisão classificando a imagem como morangos ou plano de fundo, visualizável na Figura 34.

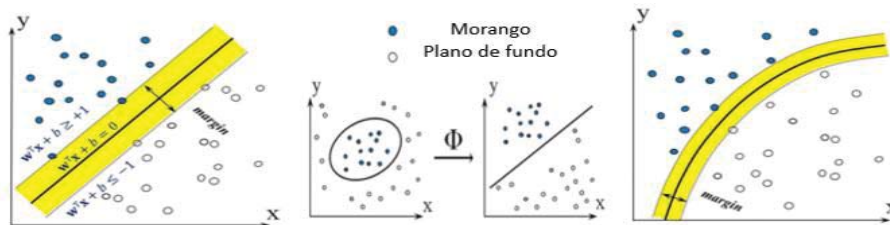


Figura 34. SVM aplicado a morangos [7].

Os autores concluem que aplicação do processo de contagem dos morangos foi satisfatório, com precisão de acerto de 98%, considerando erros ocasionados por sobreposição da fruta. A Figura 35 ilustra o processo de detecção e marcação dos morangos.

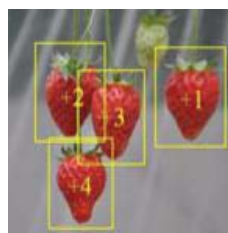


Figura 35. SVM resultado [7].

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DE FRUTOS

Liming e Yanchao [8] desenvolveram uma aplicação para classificação dos morangos através da CV. Diferentes algoritmos foram utilizados para obter características como formato, tamanho e cor. A base da solução adota o método K-MEANS, responsável por detectar o formato, histogramas para a cor dominante, e cálculo do maior diâmetro do fruto para estimativa de tamanho. A Figura 36 apresenta os estágios de processamento da imagem, referenciando o método K-MEANS.

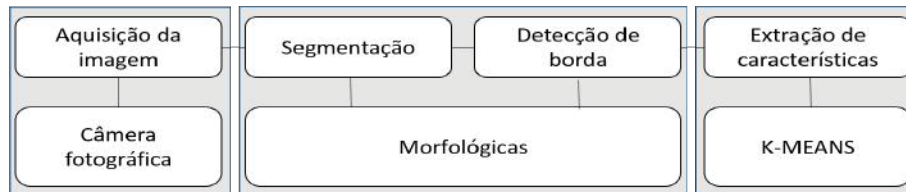
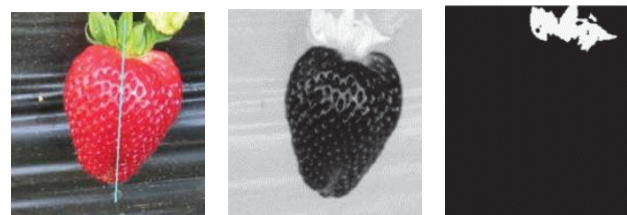


Figura 36. Classificação de morangos.

Para distinguir o tamanho da fruta com mais exatidão, a solução dos autores faz o processo de retirada do cálice do morango através da segmentação por seleção de um limiar, realizado por tons de cinza, conforme mostram a Figura 37.



(a) Imagem original. (b) Conversão para tons de cinza. (c) Extração do cálice.

Figura 37. Representação método K-means [8].

A Figura 38 demonstra o processo da extração de características do morango adotado pelos autores. A Figura 38(a) e a Figura 38(b) apresentam a segmentação, enquanto que a Figura 38(c) a detecção das bordas, e por fim subdivide-se a região de interesse em partes, destacando-a com linhas horizontais e verticais. Matematicamente, equaciona-se o espaço subdividido, com o intuito de verificar a excentricidade do morango por meio do traço de maior comprimento horizontal e vertical, definindo o ponto central (Figura 38(d), união entre as linhas L1 e V1).

Por intermédio do método K-Means foi possível encontrar o centro do morango, traçando as linhas de distâncias da imagem. Dessa forma, pode-se estimar e calcular o comprimento da linha maior vertical L1, sobre o número de pixels do traço, definindo a taxa de pixel/mm (Equação (15), onde  $nP$  corresponde ao número de pixel,  $cL$  o comprimento da linha, e  $t$  a respectiva taxa).

$$t = \frac{nP}{cL} \quad (15)$$

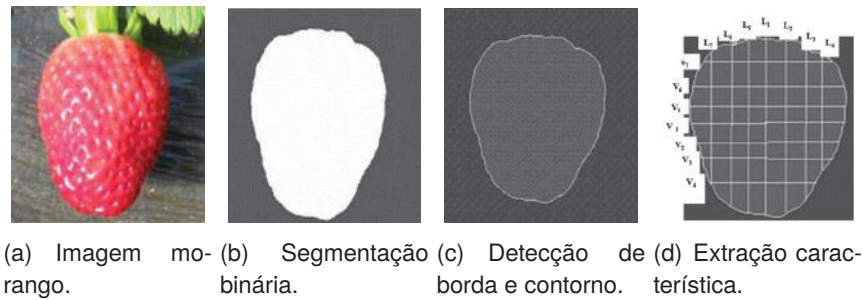


Figura 38. Extração de características do morango [8].

Desta forma, obteve-se o diâmetro do morango calculando o número de pixel sob a taxa, como pode ser observado na Equação (16), onde  $nP$  é o número de pixel,  $t$  a correspondente taxa, e  $d$  o diâmetro.

$$d = \frac{nP}{t} \quad (16)$$

Através do comprimento da linha traçada, é possível obter o tamanho da fruta e especificar as características de formato conforme mostra a sequência de passos da Figura 39.

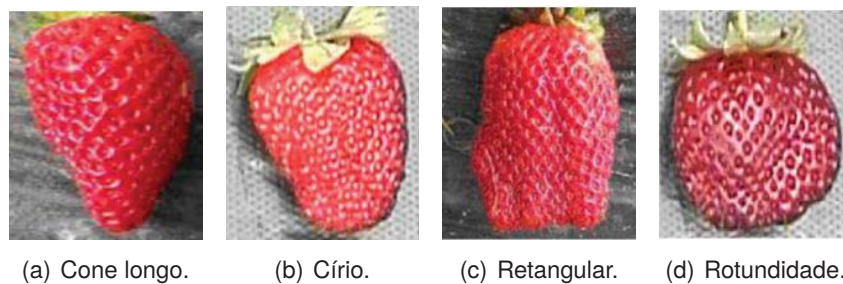


Figura 39. Extração característica de formato do morango [8].

Moreda *et al.* [100] implementaram um método semelhante para extração de características, dividindo-os em classes A, B e C, onde o algoritmo calcula a distância entre pontos  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , e a área aplicando uma taxa  $dx$ . A Figura 40 ilustra os modelos reconhecidos pelo projeto.

Para extrair o grau de maturidade do morango, Liming e Yanchao [8] atribuíram ao algoritmo a capacidade de captação da cor predominante, verificando os tons de cores repetidas com maior frequência dos pixels na imagem, e para tal finalidade, utilizou-se histograma em níveis de cinza. A Figura 41 apresenta os resultados, onde a interpretação consiste em três peculiaridades dentro dos níveis de cinza, definidos pelo autor em três faixas de maturidade  $C$ ,  $C_n$  e  $C_m$ .

Os resultados da implementação dos autores podem ser vistos na Tabela 3.

Para formato e maturidade estão demonstrados na Tabela 4 a seguir, onde foi efetuados alguns testes verificado de forma comparativa manual a resposta do sistema proposto computacional.

De acordo com os autores, os métodos aplicados foram satisfatórios, pois ressaltaram que as cores dominantes atenderam o objetivo. No entanto, seria de grande valia atribuir mais níveis de

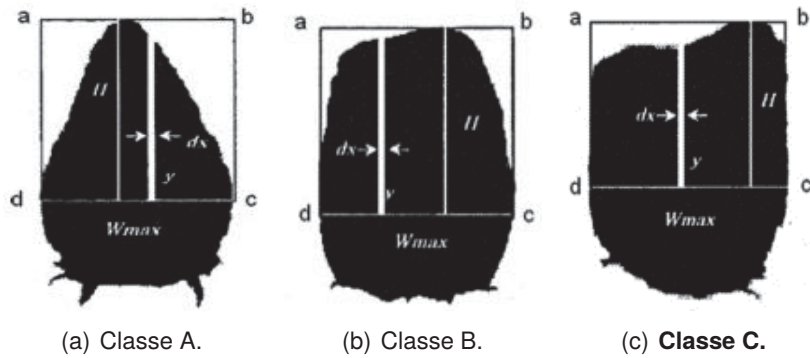


Figura 40. Extração por método similar de característica do morango [100].

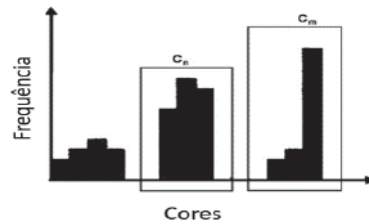


Figura 41. Histograma de maturidade do morango 3 níveis [8].

Tabela 3. Resultados de testes efetuados pelo projeto (adaptado de [8]).

Amostra	Diâmetro medido (mm)	Numero de pixel detectado	Diâmetro calculado (mm)	Erro (%)
1	35.1	200	34.5	1.8
2	34.7	198	34.1	1.6
3	29.6	169	29.1	1.6
4	33.3	185	31.9	4.3
5	47.5	263	45.3	4.4
6	39.4	220	37.3	3.6
7	53.2	299	51.6	3.1
8	41.9	231	39.8	4.8
9	43.3	243	41.9	3.2
10	54.9	310	53.5	2.8

Tabela 4. Resultados classificatórios de cor predominante e formatos (adaptado de [8]).

Amostra tons de vermelho	Maturidade visual	Maturidade automatico	Erro (%)	Formato	Amostrado no equipamento	Erro classificatório
Claro	16	14	2	Cone Longo	13	1
Intenso	17	20	3	Círio	19	2
Escuro	17	16	1	Retangular	36	3
<b>Média total de acerto (%)</b>		88.88		<b>Rotundidade</b>	12	1

classificação de maturidade. Já a escolha pelo algoritmo K-Means foi acertada, pois possui simplicidade de manipulação e o processo é muito eficiente para classificação de morangos, vinculados a cálculos matemáticos.

### 3.3 AVALIAÇÃO FOLIAR DO MORANGUEIRO

Para avaliar a área foliar Yeh *et al.* [9] desenvolveram um sistema de detecção da antracnose foliar aplicados a morangueiros, com objetivo de monitorar o impacto dessa doença na cultura.

Para tanto, os autores implementaram uma tecnologia de imagens espectral detectando e avaliando a área foliar utilizando recursos da biblioteca OpenCV. O sistema proposto utiliza comprimentos de onda significativos para o interesse, a fim de reduzir a dimensionalidade dos dados e melhorar a sua eficiência.

Diferentes comprimentos de onda foram avaliados nas imagens capturadas por câmera, como forma de procurar as regiões afetadas pela praga. Primeiramente, considerou-se faixas de 400-1000 nm - porém, com excesso de ruídos sobre as imagens. Após aferição do intervalo, estabeleceu-se a faixa 460-930 nm ideal para aplicação para calcular a reflectância de cada pixel da imagem.

A Figura 42 ilustra a avaliação foliar do morango a nível de infecção no decorrer de onze dias, podendo observar como o ataque se alastra com o tempo. A Figura 42(a) apresenta a imagem real com todo comprimento de onda visível, nas cores RGB, ao mesmo tempo nas Figuras 42(b) e 42(c), são obtidos dois e três estágios de infecção.

Os experimentos consideram o uso de três métodos: *Spectral Angle Mapper (SAM)*, *Stepwise Discriminant Analysis (SDA)* e *Correlation Measure (CM)*.

O método SAM determina o grau de similaridade entre curvas espectrais geradas por sensores com grande número de bandas. A classificação por ângulo espectral é realizada por um algoritmo que determina a similaridade espectral entre dois espectros calculando o ângulo entre eles. Desta forma são classificadas as amostras pela sua distância em relação a um espectro de referência [101].

O método SDA é um método estatístico que se baseia no princípio de análise multivariada. Ele tem por objetivo selecionar apenas variáveis significativas, maximizando a soma das variâncias entre classes e minimizando a soma de desvios.

Já o método CM consiste em verificar a correlação dos dados obtidos e selecionar os comprimentos de onda significativos, avaliando a precisão e a eficiência do sistema.

A Figura 43 demonstra a eficiência dos métodos utilizados para classificação, onde SDA supera os outros dois métodos para todos os experimentos, enquanto CM perde um pouco em desempenho. Conforme os autores, o estudo mostrou desempenho satisfatório nas faixas espectrais de 551, 706, 750 e 914 nm.

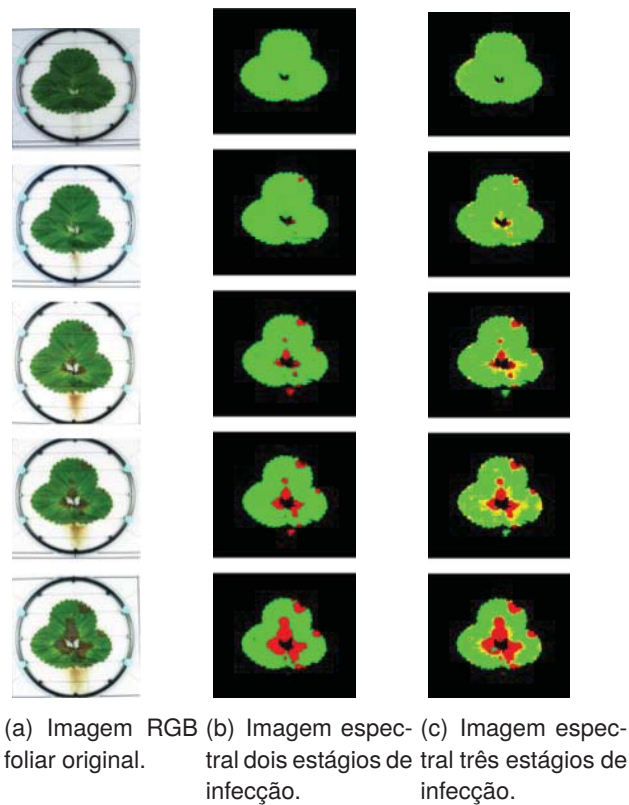


Figura 42. Identificação do estado de classificação [9].

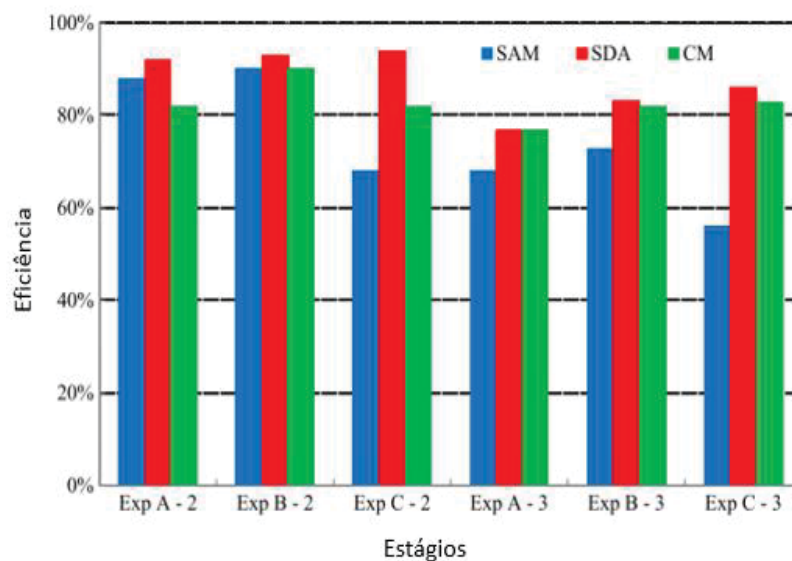


Figura 43. Resultados dos métodos utilizados (adaptado de [9]).

### 3.4 SISTEMA MÓVEL PARA MEDIR CRESCIMENTO DO MORANGUEIRO

Hayashi *et al.* [10] desenvolveram um sistema móvel circulante instalado sobre uma estufa para acompanhamento do crescimento do morangueiro. O protótipo propõe uma estimativa da altura, largura, área e também cor para detectar folha murcha utilizando o sensor *Kinect*.



O sistema é representado na Figura 44. A cultura é subdividida em partes, onde cada uma possui uma quantidade de plantas alocadas para monitoramento (Figura 44(a)). As partes são movimentadas por um motor que possui duas unidades de esteira para transporte longitudinais e laterais (Figura 44(b)). Essa movimentação se traduz em uma trajetória circular representado na ilustração da Figura 44(c).



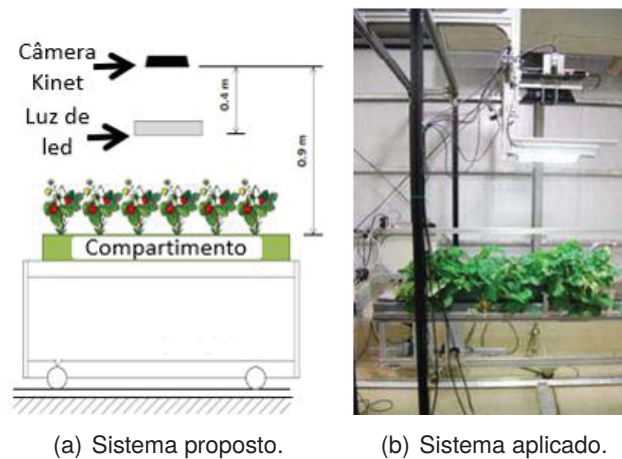
(a) Ilustração rotação das plantas dentro da estufa.

(b) Sistema montado na estufa.

(c) Ilustração do sistema movimentador.

Figura 44. Funcionamento do sistema movimentador das plantas (adaptado de [10]).

A Figura 45, além de capturar as imagens, também realiza a pulverização química de nutrientes através de um sistema de irrigação, ilustrado na Figura 45(a). Ele possui também um canhão de luz em Led sobre a amostra Figura 45(b).

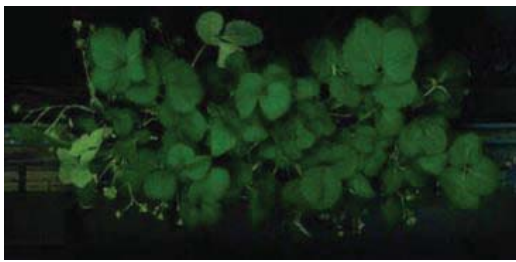


(a) Sistema proposto.

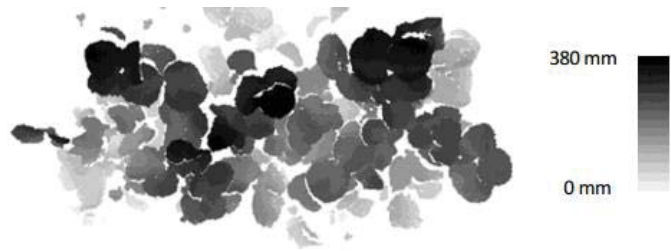
(b) Sistema aplicado.

Figura 45. Sistema implementado (adaptado de [10]).

Como as mudas são plantadas em uma área conhecida, pode-se efetuar um cálculo estimativo de crescimento da planta pela imagem capturada, empregando um índice de crescimento em fase produtiva e de dormência. Os autores mencionam que são necessárias mais análises e estudos para aumentar a confiabilidade da precisão associadas às variáveis de largura e altura. A Figura 46 ilustra o crescimento escalar da planta.



(a) Plantas de morango RGB.



(b) Imagem planta de morango processada estimado crescimento do morango em mm.

Figura 46. Resultado da captura de imagem pelo *Kinect da Microsoft* [10].





## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta todos os recursos utilizados para criar a plataforma proposta nesse trabalho: softwares de desenvolvimento integrado, componentes de hardwares e periféricos, bem como as técnicas e metodologias empregadas.

Inicialmente, o esboço da Figura 47 ilustra a ideia da plataforma implementada *in loco*, considerando que a estufa deve conter os pré-requisitos de uma arquitetura de interconexão para redes *Ethernet* ou *Wireless*. Ela também deve ter fonte de alimentação alternada de 110 ou 220 volts nas proximidades, e um suporte físico ao lado que permita a fixação de um braço articulado sobre a área de planta.

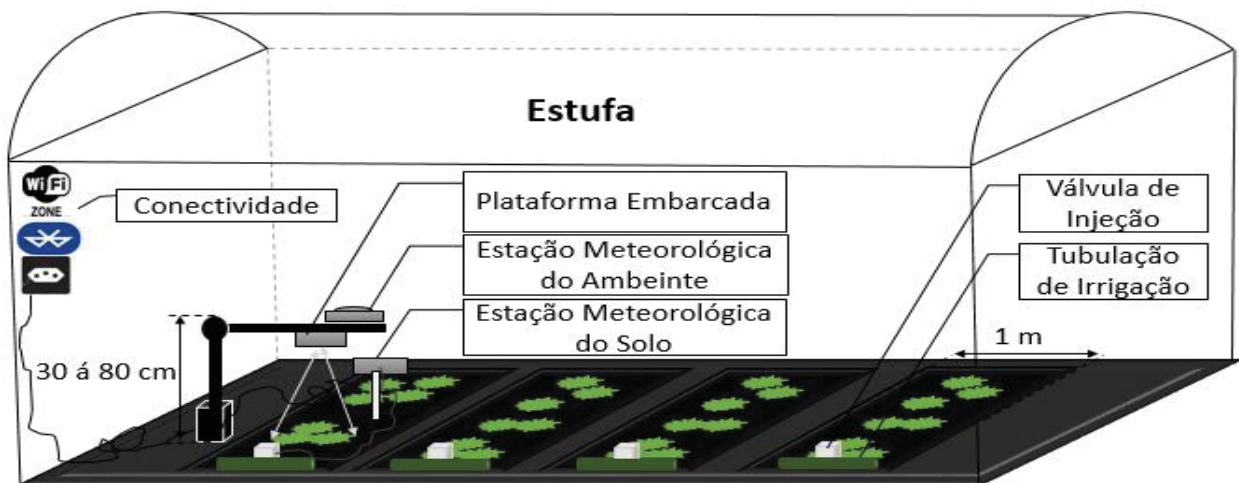


Figura 47. Hardware proposto para o sistema de visão embarcada.

Diante do exposto identificam-se dois módulos adjacentes a plataforma responsável pelo controle de todo o sistema. Estes módulos são denominados de estações meteorológicas, cujo o primeiro é designado para a aquisição da temperatura, umidade do ar e radiação solar. O seguinte realiza as leituras de temperatura do dossel e umidade do solo, e também permite o acionamento de um sistema de irrigação, constituído por bomba de água e/ou eletroválvula. A plataforma, além dos controles das estações, também realiza a captura de imagens com o intuito de mensurar a área foliar por meio de técnicas de visão computacional, estimando assim o desenvolvimento fenológico da planta.

Os dados capturados pela plataforma ficam disponíveis ao usuário em planilha eletrônica (denominada *database*) e via interface GUI (Interface Gráfica do Usuário), desenvolvida para finalidade operacional do sistema.

### 4.1 DISPOSITIVOS E FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO

A Figura 48 demonstra uma visão geral dos principais componentes utilizados, referenciado pela nomenclatura sobre o item. Para embarcar a solução proposta, optou-se pela plataforma Rasp-

berry PI 3 item (A) devido aos componentes de hardware que a compõe, como comunicação *Bluetooth* e *Wireless* já integrados a plataforma, e principalmente o diferencial que permite conexão dedicada para câmera com alta resolução. Utilizando o sistema operacional Raspbian Jessie GNU/Linux. Sobre este foram instalados os ambientes de desenvolvimento *Geany* (utilizado como editor e compilador de textos para linguagem de programação Python) e a *IDE Qt Creator* - ferramenta *Qt Designer* (para criar a aplicação de interface gráfica, representados pelos itens (D) vinculados a imagem do conjunto plataforma de controle. A solução também contempla os itens (C) e (B), respectivamente câmera para aplicação de visão computacional e fonte de alimentação para o sistema. O acesso a plataforma é via *Ethernet* ao usuário (S) através de um computador.

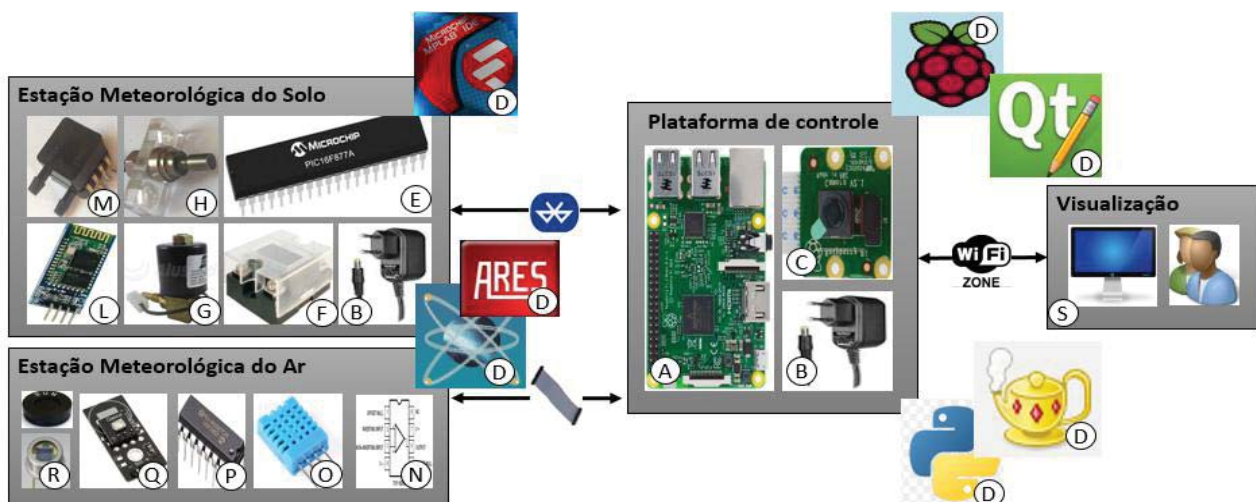


Figura 48. Componentes utilizados para desenvolver a plataforma.

Em relação ao uso de bibliotecas para os softwares, destacam-se recursos da *OpenCV* (<http://www.opencv.org>) para algoritmos de visão de computacional e de aprendizagem de máquina; da *QT4* para interconexão da linguagem *Python* com a GUI; da *Matplotlib*, para desenhos de gráficos 2D; e da *Openpyxl*, para ler e escrever arquivos de planilha eletrônica. Os programas seguiram a estrutura de subdivisão em classes e módulos, sendo que alguns algoritmos tiveram funcionalidades concorrentes em *multi-threading* com aplicação da tecnologia *HyperTreading*.

Para desenvolvimento das estações são utilizados componentes eletrônicos diversos, dentre estes vale citar: (M) sensor de pressão para implementação de uma tensiômetro; (H) termistor, para medir temperatura do dossel; (G) válvula de liberação de procedimento de irrigação; (F) relé de estado sólido para acionamento da válvula ou bomba de irrigação; (E) microcontrolador que incorpora um *firmware* desenvolvido utilizando a (IDE) MPLab (D), controlando a troca de informação recebida via módulo *bluetooth* (L) para conectividade da plataforma.

## 4.2 ARQUITETURA DE SOFTWARE

O software desenvolvido está estruturado de acordo com fluxogramas da Figura 50. Primeiramente o usuário entra com os dados de parametrização desejados na Figura 50(a). Dentro disso, a

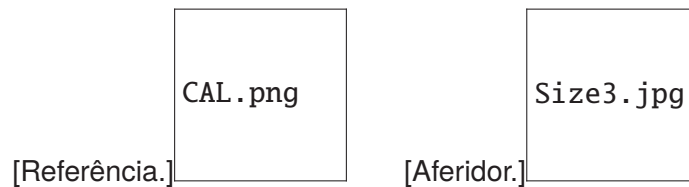


Figura 49. Calibração da câmera.

rotina da *thread* principal é iniciada, requisitando informações da tela. Como consequência, aciona-se um estado de *loop* comparando os parâmetros definidos pelo usuário, como ilustra a Figura 50(b). Durante o ciclo, a rotina secundária é chamada, derivando ao paralelismo de sub-rotinas que realizam determinadas tarefas até ao armazenamento dos dados coletados a um *database*, e também disponibilizados para apreciação na tela (Figura50(c)).

#### 4.3 PLATAFORMA EMBARCADA

Em relação a hardware, pode-se destacar o uso da placa Raspberry Pi 3. Ela é uma plataforma que fornece uma diversidade de recursos para comunicação já embutidos, diferencialmente dos modelos anteriores, Pi 2 e Pi 1. Essa versão contém: CPU 1.2GHz 64-bit quad-core ARMv8; Wireless LAN 802.11n; Bluetooth 4.1 baixo consumo; 1GB de memória RAM; 40 pinos de entrada e saída GPIO; Porta Ethernet; Plug jack de áudio e vídeo 3.5; Interface para câmera; Display interface (DSI); Interface para tela de toque; Slot para cartão micro SD.

Para uma aplicação específica, é importante tratar as possibilidades das posições de conectividade, tendo em vista um local que impossibilita acesso a recursos disponíveis. A Figura 51 ilustra a posição geométrica no *designer* da plataforma Raspberry Pi 3.

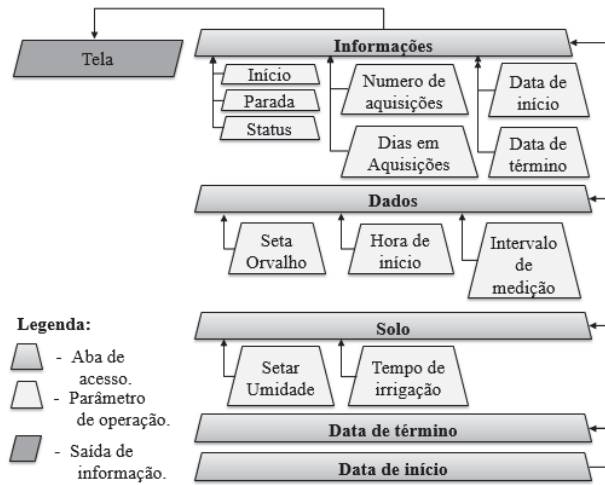
#### 4.4 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO AMBIENTE

A seguir são apresentados os componentes adotados para realizar as medições de Umidade e Temperatura do Ar, que deriva o cálculo do Ponto de Orvalho, e também inclui a Radiação Solar.

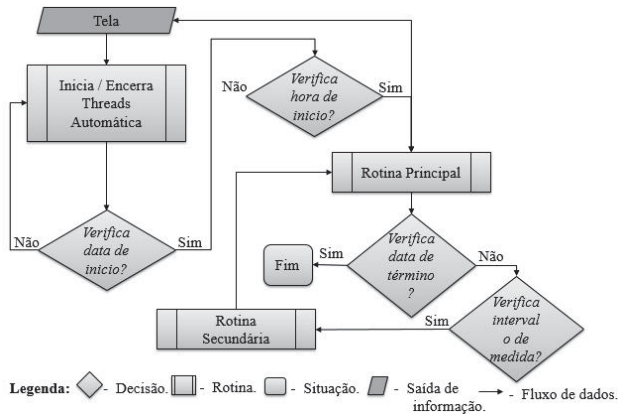
##### 4.4.1 Sensor de Umidade e Temperatura do Ar

Para obter temperatura e umidade relativa do ar, utilizou-se o sensor AM2302 da fabricante *Aosong*, que contém integrado um sensor de umidade e temperatura encapsulado. Estes se comunicam digitalmente com a *Raspberry* por meio de um terminal de entrada e saída de dados bidirecional, permitindo configuração com alta velocidade de transmissão, por volta de 4,3ms (mili-segundos) para transferir 40 bits de dados para o sensor.

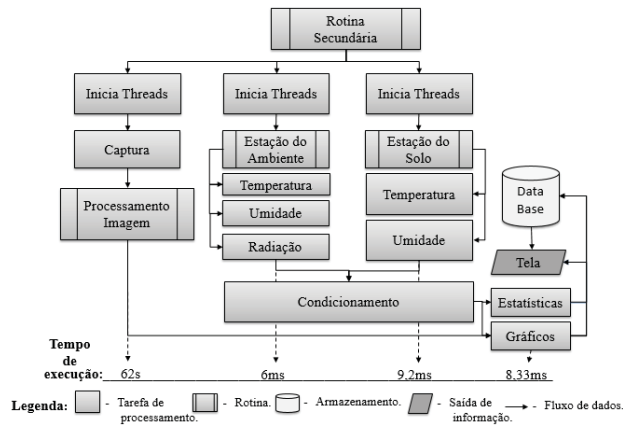
Com o objetivo de demonstrar as informações contidas neste pacote de dados, a Figura 52 mostra as conexões dos pinos de ligação, onde são conectados a alimentação de denominado (VCC)



(a) Entrada de dados de parametrização.



(b) Sistema automático de medida.



(c) Sistema em execução.

Figura 50. Fluxograma de software.

igual 3.3 volts e ao (GND) nível lógico 0 volts. O dado em si é interligado a porta 22 o qual há um resistor de *pull-up* mantendo-o em nível alto no pino, e também um capacitor de desacoplamento de 100 nano Faraday (nf) utilizado entre (VCC) e (GND). A porta ignora os dois primeiros pulsos de 80  $\mu$ s (micro-segundos) para cada referência e, assim, contabiliza os mais e os menos significantes (MSB)

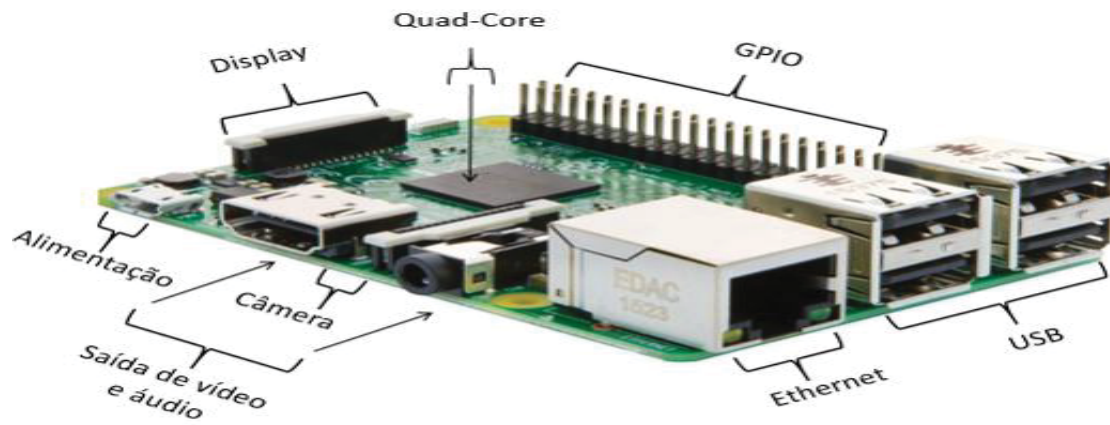


Figura 51. Raspberry Pi Modelo 3B (adaptado de [102]).

(LSB) da umidade e da temperatura. Após isso, vem um complemento de validação dos dados de 8 bits denominado *CheckSum* [103].

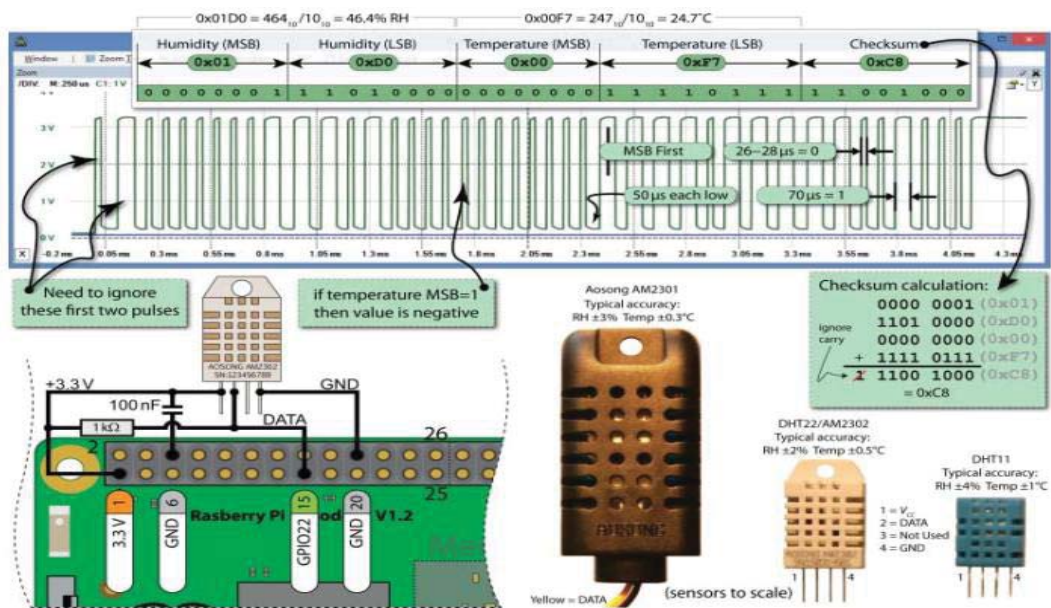


Figura 52. Pacote de dados dos sensores da fabricante *Aosong* [103].

#### 4.4.2 Ponto de Orvalho

A umidade relativa e a temperatura são indicadores amplamente utilizados para medir a quantidade de umidade no ar. O ponto de orvalho é um fenômeno natural, o qual o vapor de água presente no ar forma micro gotas pelo processo de condensação, acumulando sobre as superfícies. Esse efeito se dá pela variação de temperatura no processo de resfriamento em uma pressão atmosférica constante, ocorrendo saturação da umidade que passa para o estado líquido. Vegetais, folhas, frutos e flores sob as condições de orvalho estão propensas a processo infecciosos de doenças, como



fúngicas e bacterianas, e se apresenta como um fator de importância extrema na fitossanidade da planta [104] [105].

Dentro deste aspecto de relevância, e como já adquiridos a temperatura e umidade, é possível matematicamente pela Equação 17 estimar a temperatura de ponto de orvalho [106].

$$DEW = 243.04 * \left[ \frac{\left( \log * \frac{HMD}{100} \right) + \left( \frac{17.625 * TMP}{243.04 + TMP} \right)}{17.625 - \left( \log * \frac{HMD}{100} \right) - \left( \frac{17.625 * TMP}{243.04 + TMP} \right)} \right] \quad (17)$$

Onde: DEW é o ponto de orvalho, *HMD* é a umidade do ambiente, e *TMP* temperatura do ambiente.

#### 4.4.3 Sensor de Radiação Solar

Para a radiação solar, empregou-se o sensor foto diodo S1336 produzido pela companhia *Hamamatsu photo is our business*, a qual disponibiliza um material de consulta de dados pertinentes há uma diversidade de aplicações utilizando o componente. Com base nas instruções dispostas pela folha de dados a Figura 53 demonstra as principais características adotadas para projeto, onde um dos fatores fundamentais é a sensibilidade espectral da faixa de radiação.

Na Figura 53(a) observa-se que o sensor absorve e quantifica o sinal analógico de todo comprimento de onda da faixa de 190 à 1200nm (nano-metro), espectro de aquisição próximos a IR [95]. Entretanto, o objetivo é a medição de radiação fotossintética. Para isso um filtro UV foi implantado sobre o feixe de luz permitindo a absorção apenas do espectro correspondente de 400 a 700 nm. A magnitude do sinal incidente apresenta uma responsividade, cujo sinal óptico é convertido em uma corrente elétrica [107]. Essa corrente é submetida ao condicionamento por um componente operacional amplificador que permite a calibração de um limiar de ganho representado pela Figura 53(b), onde permite ajuste grosso e fino da magnitude do sinal [108].

Como já relatado, a *Raspberry* não possui conversores analógicos para digitais e, por isso, foi necessário um circuito integrado MCP3008 fabricado pela empresa *Microchip* para conversão do sinal. Esse componente possui um ADC de 10 bits, permitindo converter até 200000 amostras por segundo. A comunicação com a plataforma é por meio de conectividade SPI (*Serial Peripheral Interface*), tratando os dados através de comandos de sua biblioteca. A Figura 53(c) ilustra o layout desenvolvido para a implementação.

#### 4.5 ESTAÇÃO DE CONTROLE NO SOLO

A estação de controle no solo é responsável por realizar a aquisição das informações pertinentes as condições de temperatura do dossel e umidade no solo, e também o controle de gotejamento de irrigação por meio de uma válvula ou bomba. Como o proposto de projeto é a obtenção destes dados em diversas posições da estufa, então opta-se pela transmissão das informações por meio de

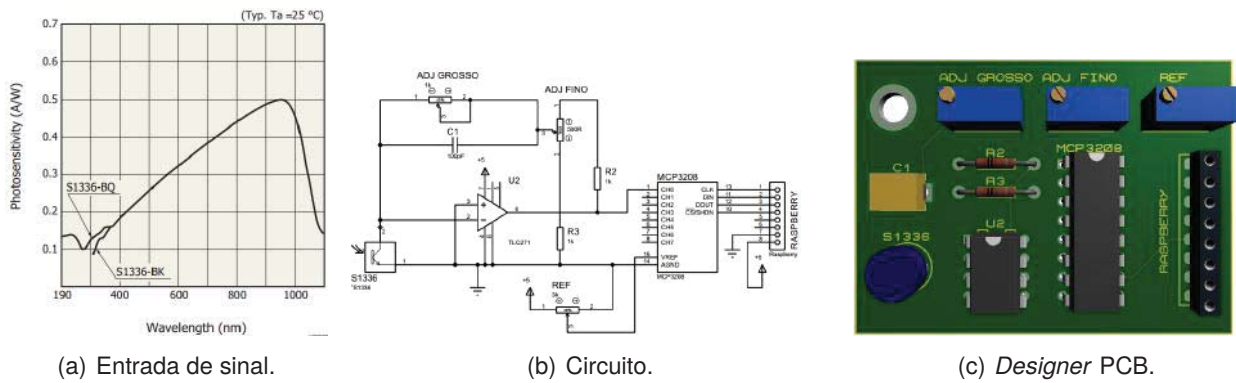


Figura 53. Informações esquemático da aquisição de radiação solar (PAR).

um módulo de comunicação. Para desenvolvimento da estação a ideia é demonstrada através da Figura 54 apresentando partes que compõem o sistema.

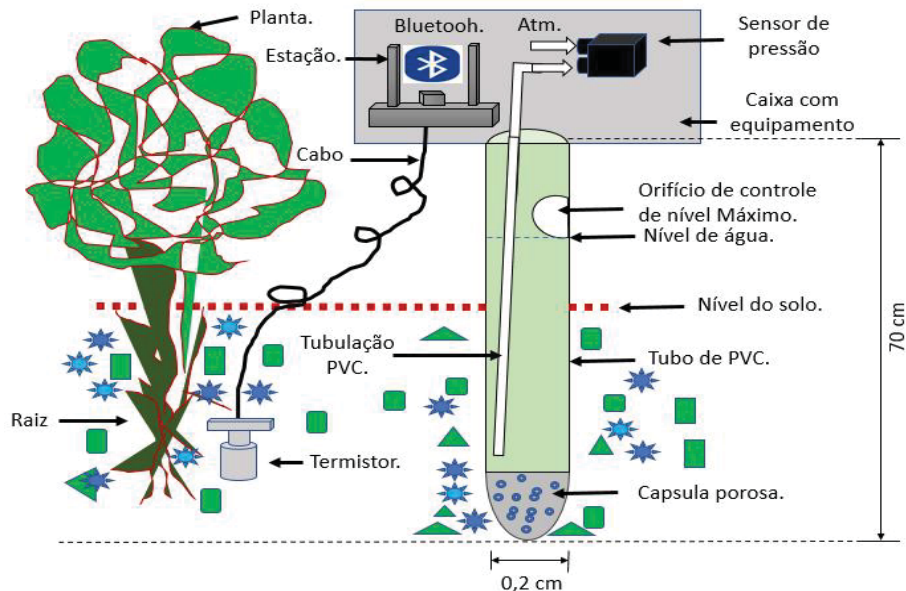


Figura 54. Ilustração da estação desenvolvida.

As seções seguintes detalham o desenvolvimento dos componentes utilizados na estação.

#### 4.5.1 Placa de controle

Para o desenvolvimento da estação, o sistema de aquisição no solo contempla os seguintes itens:

- Microcontrolador;
- Módulo de comunicação;
- Módulo de acionamento de bomba ou válvula;



- Módulo de conexão de sensores.

O microcontrolador adotado é o PIC16F877A desenvolvido na arquitetura RISC em 8 bits de instrução. Dentro das características, dois conversores analógicos digitais de 10 bit foram empregados. Eles possibilitam controle dos níveis de referência de entrada passíveis de ajuste fino de calibração, comunicação *UART TX/RX* para o módulo *bluetooth*, e portas de entrada e saída para acionamento e controle de periféricos, como relés para acionamento de válvula ou bomba para irrigação.

A Figura 55 mostra o esquemático eletrônico de hardware projetado utilizando o *software Protheus*, que permitiu a simulação conceitual tanto de comunicação através do módulo *bluetooth* via *desktop*, quanto de comando e controle das portas I/O com as determinadas funções programadas no *firmware*.

A Figura 56 apresenta o *Designer* das placas criado com o auxílio do software *ARES* complementar a interface do *Protheus*, onde a Figura 56(a) ilustra a placa principal de controle, e as Figuras 56(b) e 56(c), respectivamente, o sistema de irrigação por meio de um dispositivo de potência, e o módulo de sensores para ajustes referenciais de tensão na alimentação interna dos ADC's - responsáveis pelo condicionamento dos sinais oriundos dos sensores de temperatura do dossel, e potencial matricial do solo.

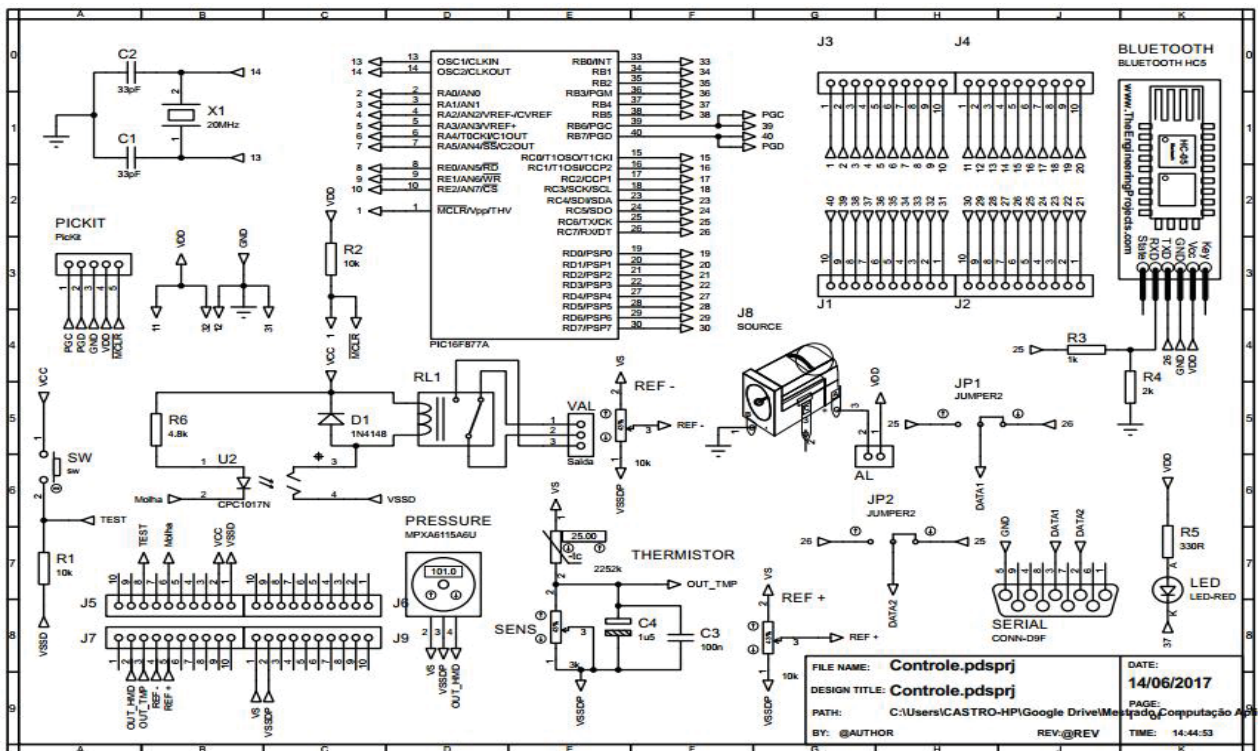


Figura 55. Circuito da estação do solo.

Para desenvolvimento do *firmware*, foi utilizado o ambiente online *MPLAB® Xpress Cloud-Based IDE - Microchip Technology Inc*, que contém recursos simplificados para programação de DSCs PIC® e dsPIC® de 8 bits e 16 bits por interface gráfica e mapa de pinos. Ele possui capacidade de armazenamento de projetos em nuvem contemplando repositório de código compartilhado. O hardware



(a) Placa de controle co- (b) Acionamento de irriga- (c) Interface para os Senso-  
municação . ção. ções.

Figura 56. Designer 3D da solução.

fez o uso da placa de prototipagem *PICkit 3 Programmer / Debugger* que aplica lógica de depuração no circuito incorporado a um chip com memória *Flash*, fornecendo um depurador ao programador de hardware.

O *firmware* segue o fluxograma da Figura 57, onde a rotina principal aguarda a interrupção da porta de comunicação serial, que se conectada ao módulo *bluetooth*. Caso algum dado seja recebido, processa-se a comparação das informações e, se satisfeitas, é executado a sub-rotina de execução de tarefa.

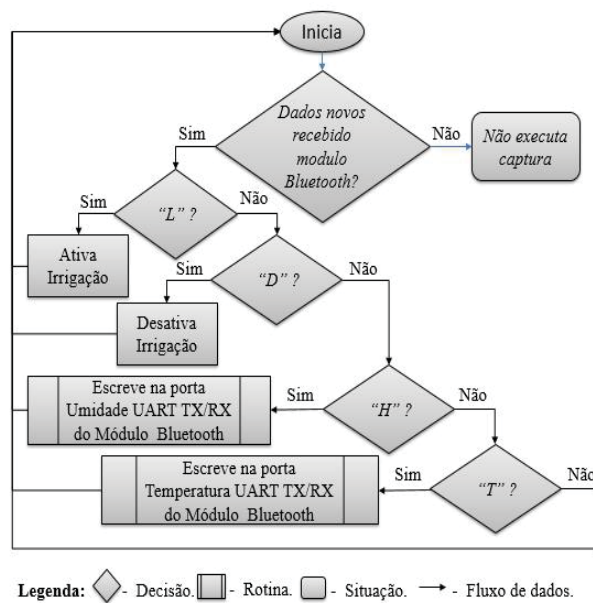


Figura 57. Fluxograma de *firmware* desenvolvido.

## 4.5.2 Sensor de Temperatura e Umidade no solo

### 4.5.2.1 Sensor de temperatura do dossel

O termistor adotado para o projeto é o NTC da Figura 58, modelo *Type 18*, fabricado pela empresa *MAMAC Systems*. A folha de dados do componente apresenta todas as temperaturas de atuação e conseqüentemente, sua resistência equivalente. O componente está dentro da escala operacional de interesse para o projeto de -10 a 100°C.



Figura 58. NTC Utilizado.

Para determinar os coeficientes foi implementado uma rotina de cálculo no software MATLAB versão R2015a, demonstrada na Figura 59. A função `thermistor`, linha 1, recebe os argumentos de Resistência (R), Temperatura (T) e grau polinomial da equação resultante da curva (n), limitado de 3 a 5 (linha 2). Na linha 3 são realizadas as operações de logaritmo de base 10 de cada resistência para determinar os coeficientes do termistor. Linhas 4 e 5 fazem a conversão de unidades de temperatura, enquanto que as linhas 6 e 7 mostram caracteres na tela referente aos valores dos coeficientes. A linha 8 calcula o polinômio característico da curva, e as linhas 9, 10 e 11 geram escalas do gráfico. A linha 12 faz uso da equação Steinhart-Hart, e as linhas 13, 14, 15 e 16 plotam o gráfico.

---

```

1. c = thermistorFit(R,T,n)
2.   if nargin<3, n=5; end
3.   A = [ones(size(R(:)))log(R(:))(log(R(:))).^3];
4.   TKinv = 1 ./ (T(:) + 273.15);
5.   c = A\TKinv;
6.   fprintf('Steinhart-Hart coefficients');
7.   fprintf('%17.9e',c);
8.   cp = polyfit(R,T,n);}
9.   Rfit = linspace(min(R),max(R));
10.  Rfit = linspace(min(R),max(R));
11.  Tfit = polyval(cp,Rfit);
12.  TfitSH = 1./(c(1)+c(2)*log(Rfit)+c(3)*(log(Rfit)).^3);
13.  plot(R/1000,T,'o',Rfit/1000,Tfit,'b-',Rfit/1000,TfitSH-273.15,'k--');
14.  grid on;
15.  xlabel('Resistancia(kΩ)');ylabel('Temperatura(°C)');
16.  legend('Dados',sprintf('Grau %d do Polinômio',n),'Steinhart-Hart');

```

---

Figura 59. Código-fonte MATLAB.

Como resultados do algoritmo implementado os coeficientes A, B e C encontrados da equação de *Steinhart-Hart* são,  $A = 1.471655613e-03$ ,  $B = 2.375832379e-04$  e  $C = 1.050917797e-07$ . Muitos autores desconsideram o coeficiente C, devido a irrelevância diferencial do parâmetro por ser um valor de dispensável grandeza.

A Figura 60 apresenta o gráfico gerado a partir da curva de operação do NTC. No caso de aplicação de funções polinomiais não é satisfeito o comportamento correto, dentro das características de curvaturas apresentadas. Já de acordo Hart sua equação de equivalência apresenta-se mais apropriada para obtenção dos dados de temperatura em relação a variação de resistência.

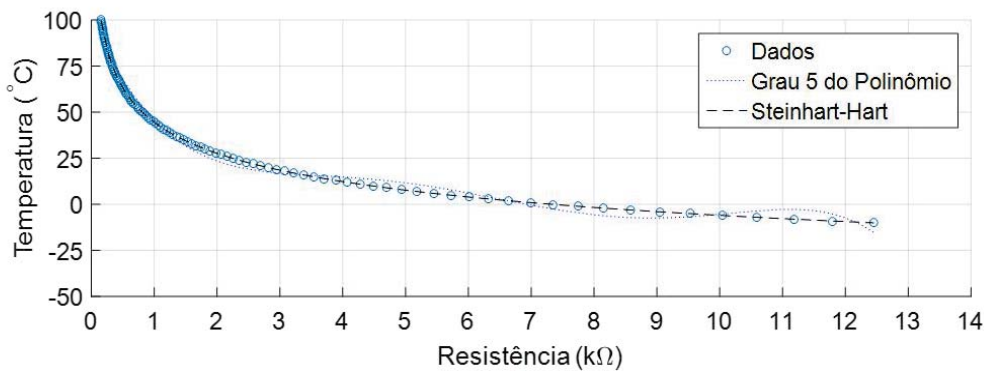


Figura 60. Curvas Steinhart-Hart em comparação com Funções Polinomiais.

A partir do estudo realizado para condicionamento do sinal, pode-se definir o método esquemático de ligação do componente termistor. O circuito adotado para condicionamento do sinal do termistor está apresentado na Figura 61, consideravelmente simples, pois não se faz necessário amplificadores operacionais de ajustes. Porém, pode-se realizar operações de calibrações por meio de software [109].

Nesse circuito, o potenciômetro SENS atua sobre o limiar de atuação do NTC, onde a cada incremento de temperatura sua resistência decrementa (alimentação de 5 volts VCC). Por meio do pino (OUT\_TMP) representa-se o canal de saída do sinal do termistor para entrada de conversão analógica digital do ADC do microcontrolador. Ele também possui alguns componentes para eliminação de ruídos causados por variações bruscas de potenciais internos e externos [110].

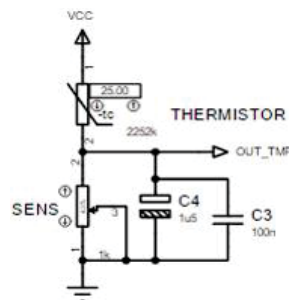


Figura 61. Circuito termistor.

A partir da interligação, é realizado o cálculo de configuração da resolução do ADC conforme a Equação 18:

$$V_{volts} = \frac{(VRef_{Max} - VRef_{Min}) * V_{adc}}{2^8} \quad (18)$$

Onde:

$V_{volts}$  = Valor lido em tensão do canal.

$VRef_{Max} - VRef_{Min}$  = Tensão de referência máxima e mínima.

$V_{adc}$  = Tensão de entrada do ADC conectado ao (OUT\_TMP).

Por meio do divisor de tensão na Equação 19, calcula-se a resistência equivalente através da tensão de entrada do canal:

$$RNTC = \frac{VRef_{Max} * R}{V_{volts}} - R \quad (19)$$

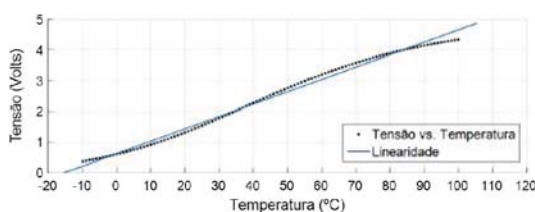
Onde:

$RNTC$  = Resistência calculada para equação de Steinhart-Hart.

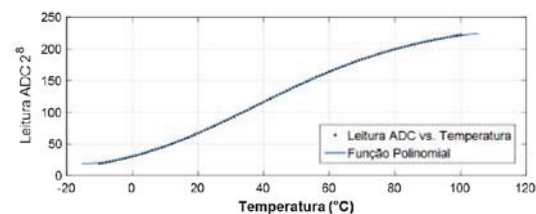
$R$  = Resistência do potenciômetro do divisor de tensão.

Considerando a resistência estimada para utilização na curva de Steinhart-Hart, e levando em conta todos os parâmetros referenciais do circuito, é possível realizar uma correlação específica de linearização, por meio de correção polinomial a partir do sinal de tensão na entrada do ADC. A Figura 62 demonstra a relação entre a entrada de tensão  $T$  no ADC com a temperatura, com a Figura 62(a) mostrando pequena curvatura que altera a precisão nos resultados. Para isso, aplica-se um polinômio de 4º ordem (Figura 62(b)) para aumentar a precisão dos dados lidos pela Equação 20.

$$Temperatura = 1.542e - 05 * T^3 + (-0.00525 * T^2) + 0.9649 * T - 25.51 \quad (20)$$



(a) Linearidade da curva.



(b) Curva polinomial.

Figura 62. Correção polinomial de leitura ADC.

O diagrama de blocos da Figura 63 ilustra o modelo sistemático de condicionamento do sinal do NTC. A partir da tabela da folha de dados do componente, gera-se pela Equação Steinhart-Hart os coeficientes para atribuição na equação de conversão resistência para temperatura. A resistência é determinada pelo algoritmo do microcontrolador, através de um divisor de tensão sobre o circuito termistor. O sinal provindo deste é aplicado ao canal ADC do microcontrolador para a operação de resolução, derivando a resistência equivalente denominada ( $RNTC$ ) de acordo com os limites referenciais  $Vref-$  e  $Vref+$ , e função polinomial.



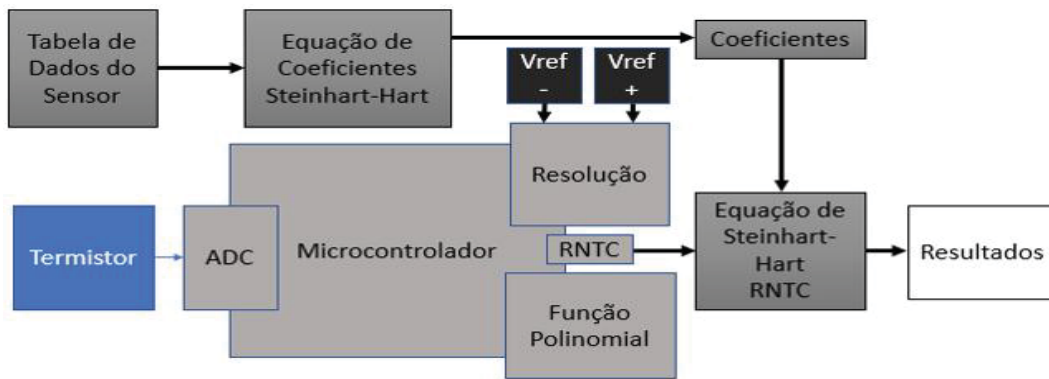


Figura 63. Bloco sistemático condicionamento termistor.

#### 4.5.2.2 Sensor de umidade do solo

De acordo com o estudo apresentado, que demonstra a implementação de um tensiômetro com o uso de um sensor de pressão, desenvolveu-se um equipamento capaz de adquirir a leitura de maneira digital. Para isso optou-se por usar o sensor de pressão MPXV5100GP fabricado pela empresa NXP *Freescale Semiconductor*. Construção em base de silício monolítico, é um medidor de tensão altamente sensível com avançadas tecnologias micromecânicas por metalização de película fina. Ele considera transformação bipolar para fornecer um sinal de saída analógico preciso de alto nível proporcional a pressão aplicada [111] [112].

A Figura 64 demonstra as características físicas e eletrônicas do sensor diferencial que separa duas pressões, P1 negativa e P2 positiva, sendo uma das conexões é designada para a pressão atmosférica. Entre as conexões existe uma película sensível representada pela Figura 65(a), formada por piezorresistores que geram um sinal analógico na saída do pino 4 ilustrado na Figura 64(b). A folha de dados do componente indica a conexão direta ao microcontroladores ou microprocessadores que possuem entradas de conversão de analógica para digital, com conexão direta no circuito. Por fim, o encapsulamento do componente é demonstrado na Figura 64(c) [113] [114].

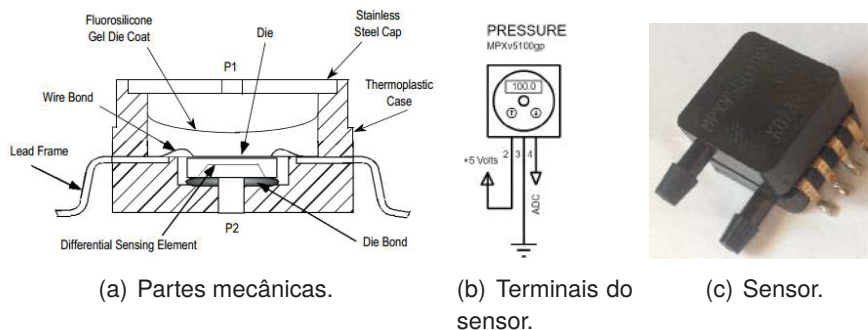


Figura 64. Sensor de pressão MPXV5100GP.

O conversor ADC do microcontrolador converte o sinal do sensor de pressão em uma escala de 0 a 256 ou ( $2^8$ ). Esse valor é convertido em tensão pois é através desta variável que será calcu-

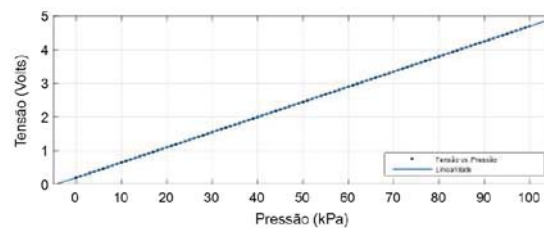
lada a pressão correspondente. Primeiramente, é necessário o cálculo de resolução  $R$  deste sinal, conforme a Equação 21.

$$R = \frac{(4,7 - 0,2)}{2^8 - 1} = 0,01843mV \quad (21)$$

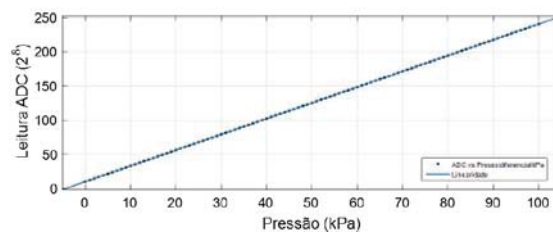
A partir disto, multiplica-se o valor digitalizado do ADC que varia de 0 até 256 pela resolução encontrada, obtendo a tensão do canal  $T_v$  conforme a Equação 22.

$$T_v = ADC * 0,01843 \quad (22)$$

Após obtida a tensão, utilizou-se a ferramenta *Curve Fitting Toolbox* do software *MATLAB MathWorks* para encontrar a Equação de resposta do sinal, conforme os parâmetros obtidos na folha de dados. Isso permitiu traçar os gráficos da Figura 65. A Figura 65(a) demonstra a resposta de pressão em função da tensão de entrada. Já a Figura 65(b) mostra o sinal convertido do ADC. Assim, obtém-se a pressão ( $P_r$ ) em função da tensão ( $T_v$ ) por meio da Equação 23. Cabe destacar que a região de atuação na ordem de 0 a 100 kPa, faixa de interesse para o projeto.



(a) Resposta de tensão para pressão.



(b) Resposta da conversão ADC para pressão.

Figura 65. Sinal do sensor de pressão MPXV5100GP.

$$P_r(kPa) = 0.045 * T_v + 0.2 \quad (23)$$

### 4.5.3 Controle de irrigação

O acionamento do sistema de irrigação por meio de bomba ou válvula de gotejamento é adotado por um componente eletrônico denominado relé de estado sólido. Este permite conexão direta a porta do microcontrolador devido as características construtivas internas. Trata-se de um dispositivo

diferente dos relés comuns que são compostos por partes móveis (parte mecânica dos contatos são movimentados por indução magnética através de um campo elétrico).

Os relés de estado sólido são particularmente construídos por componentes semicondutores de alta capacidade de corrente, acionados isoladamente por um feixe de luz que incide sobre um fotodiodo fazendo com que a junção do componente entre em estado de saturação e passa a conduzir corrente elétrica entre seus terminais de potência. Também é caracterizado como componente mais rápido em função dos relés eletromecânicos, em contrapartida a isolação dos contatos apresenta melhor desempenho.

O projeto fez uso do relé de estado sólido TSZC-40A fabricado pela Metaltex, onde é acionado dentro de um limiar de 4 a 32v (volts VDC). A corrente de carga máxima é de 42A (amperes em VCA), com suporte de fixação para dissipador de potência térmica.

#### 4.6 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

Para o projeto optou-se por um módulo de câmera de conexão direta por meio de soquete à *Raspberry Pi*. Este acopla a câmera digital de modelo *IMX219PQH5-C* fabricado pela empresa *Sony*. O chip trabalha com três fontes de alimentação 1.2, 1.8 e 2.8v, com baixo consumo de energia. A câmera oferece alta sensibilidade, filtros óticos e um obturador eletrônico interno, e também oferece uma gama de adaptadores para objetivas profissionais de fotografia.

Outras características da câmera escolhida: tecnologia CMOS-DMD; tamanho da image diagonal 4.60 mm (1/4.0); total de números de pixels: 3296 (Horizontal) × 2512 (Vertical) aproximado 8.28 M pixels; número efetivo de pixels: 3296 (Horizontal) × 2480 (Vertical) aproximado 8.17 M pixels; número ativo de pixels: 3280 (Horizontal) × 2464 (Vertical) aproximado 8.08 M pixels; tamanho do chip: 5.095 mm (Horizontal) × 4.930 mm (Vertical); tamanho da célula: 1.12  $\mu\text{m}$  (Horizontal) × 1.12  $\mu\text{m}$  (Vertical); conversor analógico digital de 10 bits; máximo 30 *frame/s*.

A Figura 66 demonstra o feixe de espectro de cores primárias como resposta a sensibilidade, tanto das lentes quanto foto-diodos receptores da câmera utilizada no projeto.

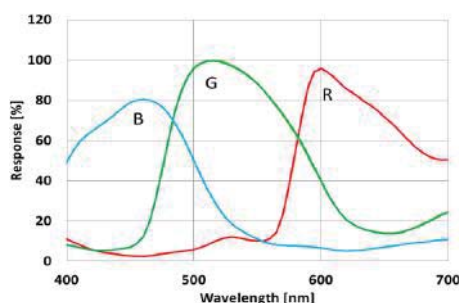


Figura 66. Características de sensibilidade espectral.

Na Figura 67 é possível visualizar um diagrama de blocos que constitui a câmera, e neste uma ênfase aos blocos de comunicação serial pinos SCL e SDA usados para controle por meio de palavras de informação em base binária. Observa-se também saídas para aplicações em terceira



dimensão pino GPO, e também *FSTROBE* para implementação em iluminação instantânea *flash*. Após processamento, a imagem também é repassada por meio de comunicação serial, pino CSI2.

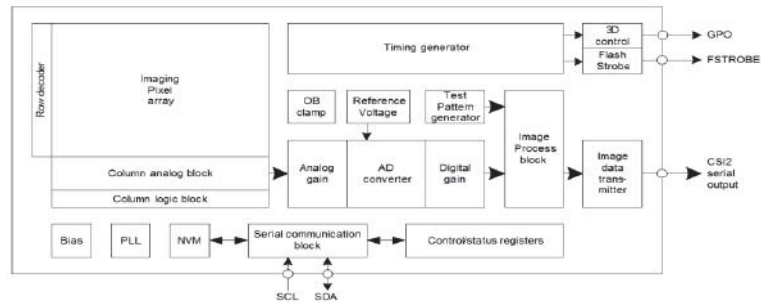
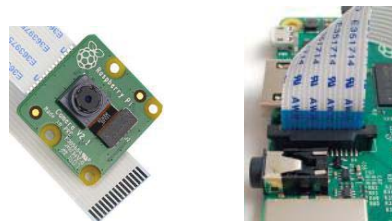


Figura 67. Bloco interno câmera IMX219QH5-C.

A Figura 68 mostra características como aspectos visuais demonstradas na Figura 68(a), soqueteada em uma placa de circuito impresso da *Raspberry*. Esta é conectada eletronicamente por meio de um cabo *FLAT* até o soquete sobre a placa da *Raspberry Pi III*, interfaceado por CSI-2, que fornece tráfego de 2Gbps de largura de banda, conexão apresentado na Figura 68(b).



(a) Aspecto visual (b) Conexão câmera módulo *Raspberry*. ao soquete CSI-2.

Figura 68. Características físicas *Raspberry* e IMX219QH5-C.

A partir da conexão à porta CSI-2, é importante apresentar uma visão geral de como a câmera funciona com a plataforma, bem como uma introdução à interface do software que faz uso da biblioteca "picamera" utilizada para captura de imagens. O diagrama da Figura 69 ilustra o módulo BCM2835.

Primeiramente, utiliza-se uma CPU ARM Cortex para execução de um sistema operacional Linux e uma GPU *VideoCore IV* com VCOS, com códigos *Kernel* de execução em VPU para processamento acelerado de imagens e vídeos. A estrutura também tem um sistema *VideoCore Host Interface (VCHI)* que permite a passagem de mensagens de comunicação entre CPU e GPU. Para isso, há um compartilhado de memórias RAM por definição, com 128MB de memória dedicadas a GPU.

O processo de aquisição da imagem provindo da câmera é dado em linhas de quadro, transmitidas pela interface CSI para a GPU, que recebe pelo componente *Unicam* e grava na memória RAM. Em seguida, o processador de sinal de imagem da GPU (ISP) executa várias etapas de pós-processamento como transposição, compensação de nível de preto, sombreamento de lente, balanço de branco, equilíbrio de cores, remoção de ruídos, ajuste de brilho, contraste e saturação, redimensionamento, entre outros.

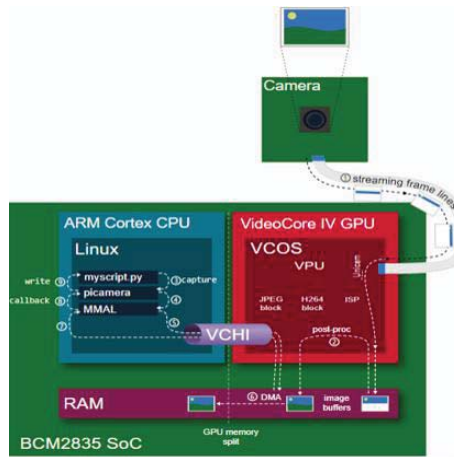


Figura 69. Operação de uma rotina de captura.

Para esse projeto, a Figura 70 representa o fluxograma da aquisição de imagem para extração de atributos. Inicia-se o processo de condição de nível de intensidade de radiação solar incidente sobre a cena, para verificar o ambiente mais propício em termos de claridade, para então realizar a captura da imagem.

A função principal do programa desenvolvido chama cronologicamente a verificação de radiação solar. Caso esteja inferior a anterior não será realizada uma nova aquisição, caso contrário a função radiação solar requisita a captura por meio da biblioteca *picamera* que, por definição, usa uma resolução fixa para a imagem de 1000x1000px, com resolução de saída de 96dpi (*Dots Per Inch*). O valor de 1000px é igual a 10,42 polegadas e, como 1 polegada é 25,4mm, temos 264mm que equivale a 26,46cm, sendo a área de cobertura de melhor quantificação com aproximadamente 700cm<sup>2</sup>.

O formato de saída adotado foi '.png' *Portable Network Graphics* ou rede de gráficos portáteis, que oferece recursos como: alta definição de cores reais empregando até 48 bits por pixel; transparência utilizando canal alfa, por meio de máscaras globais, manipulando pixel a pixel, através de correção gama alterando seus parâmetros de unidades de saída gráfica; alta compressão sem perda de qualidade; extração do fundo com fidelidade. Optou-se em salvar a imagem com a data de captura, para acompanhamento cronológico.

#### 4.7 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

A Figura 71 e a Figura 72 demonstram os resultados e testes de cada etapa do processamento. As técnicas citadas foram previamente apresentadas no Capítulo 2.

Inicialmente, na Figura 71(a), encontra-se a imagem adquirida através da câmera, antes de iniciar o pré-processamento com aplicação de um filtro de *Gamma Correction* (Figura 71(b)). Esse filtro realiza o ajuste de brilho e contraste, evitando altos diferenciais sensíveis a mudanças de tons. Esse passo ajusta a disparidade de claridade irradiada pelo sol sobre a planta.

Posteriormente, executa-se a supressão de ruído por *denoising* (Figura 71(c)) para, em caso de falha em algum pixel, estimar-se o tom do pixel original pela vizinhança. Na sequência, realiza-se

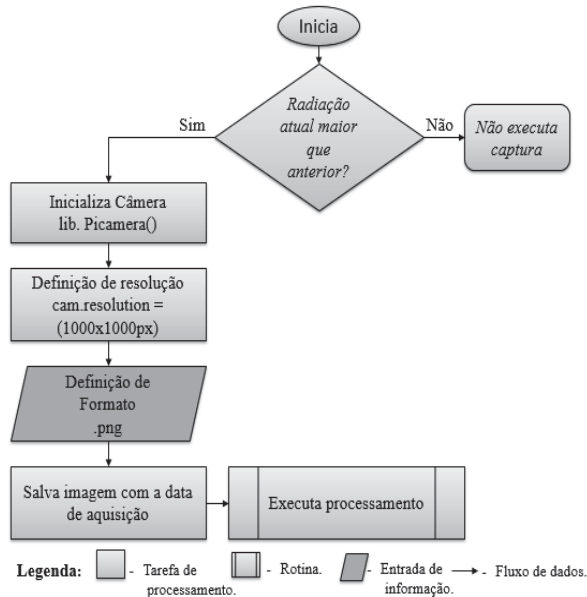


Figura 70. Fluxograma de captura.

a conversão para formato de cores HSV, mostrado pela Figura 71(d), para definir o nível de verde e obter a região de interesse (folhas), calculando-se a área presente. Aplicou-se um filtro de erosão *Morphological Transformations* (Figura 71(e)) para preencher as fronteiras de cada pixel, garantindo a formação do objeto. Após, executa-se um processo de *Color Quantization*, Figura 71(f), usando classificação de *K-Means Clustering* subsecção 2.2.3 na imagem para seleção de cores, de forma a otimizar a compressão computacional de dados.

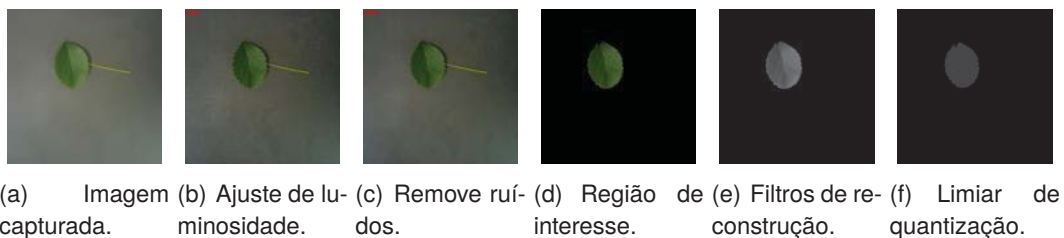


Figura 71. Etapas pré-processamento.

Em seguida, a imagem de fundo é subtraída a partir de um limiar de cor com o método *Otsu's Binarization*. Para a extração das características e estimativa da área foliar, aplica-se o método de agrupamento, com a finalidade de contabilizar o número de pixels dos dois tons de cores, normalizando os valores e demonstrando através do histograma.

O processo de quantificação dos atributos da imagem é ilustrado por meio da Figura 72, que representa a operação do algoritmo *K-means*. Ele realiza uma varredura de pixels encontrando a semelhança entre as classe pertencentes, e a cada reconhecimento é incrementado um valor. Após a obtenção dos dois valores numéricos, é realizado a operação de multiplicação por um fator que age em relação a distância da câmera ao objeto, assim possibilitando a mensuração das duas áreas de

interesse. Sabe-se que o número total de pixels da imagem de 1000x1000px sendo igual a 1.000.000 de pontos agrupados.

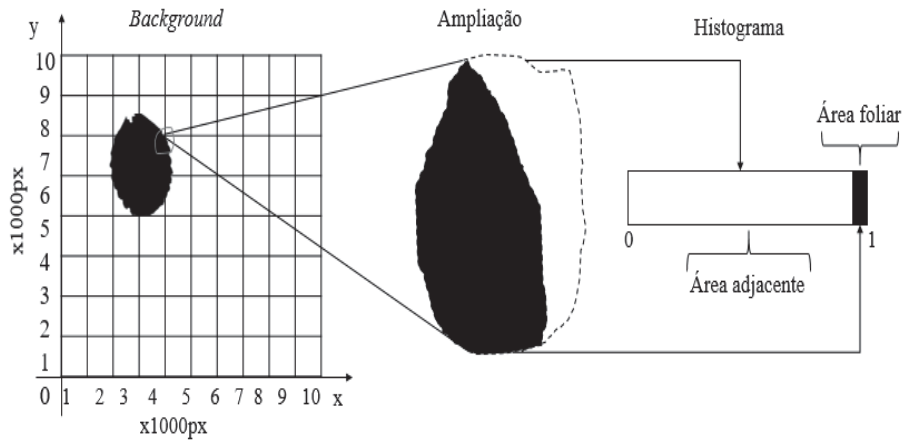
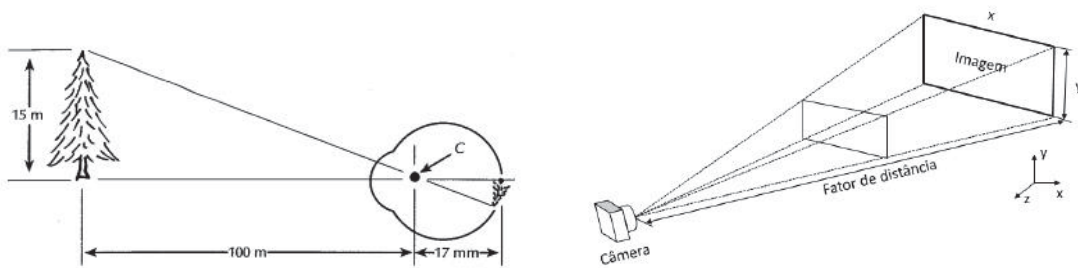


Figura 72. Agrupamento de pixels.

#### 4.8 ÁREA DE TESTES E CALIBRAÇÕES

A aquisição dos dados foi de propósito experimental realizado em ambiente de teste, cujo objetivo foi calibrar a câmera e sensores meteorológicos. Além disso, fez-se o acompanhamento das funcionalidades da plataforma até a gravação das informações coletadas.

Primeiramente foi necessário calibrar a área para mensurar, com base na projeção dimensional de um objeto (Figura 73). A Figura 73(a) ilustra a ideia, mostrando que quando um objeto é visualizado pelos olhos humanos pode-se estimar uma proporção dimensional em função da distância. Em uma câmera, cabe informar um fator que implica proporcionalmente na medida do objeto distante, ilustrado na Figura 73(b). A plataforma proposta foi montada a uma altura de 26cm entre o objeto e câmera. Em função deste raio, obtém-se um fator multiplicador que permite estimar a área do objeto de interesse.



(a) Projeção de um objeto por meio dos olhos humanos. (b) Projeção de um objeto por meio de uma câmera.

Figura 73. Projeção espacial dimensional.

A Figura 74 foi utilizada para calibração do sistema de visão computacional. A Figura 74(a) representa uma matriz com um quadrado de dimensão conhecida ( $10\text{mm}^2$ ) ao centro. Para aferir esse

procedimento, testou-se a concordância entre calibração e valores lidos através da imagem, e tamanho real, onde esse demonstrou satisfazer a razão proporcional estimada para o fator multiplicador. Pode-se visualizar na Figura 74(b) o resultado, que representa a aquisição de medidas de distâncias por metodologia das distâncias euclidianas entre os conjuntos de pontos médios, possibilitando assim também estimar a área de um objeto.

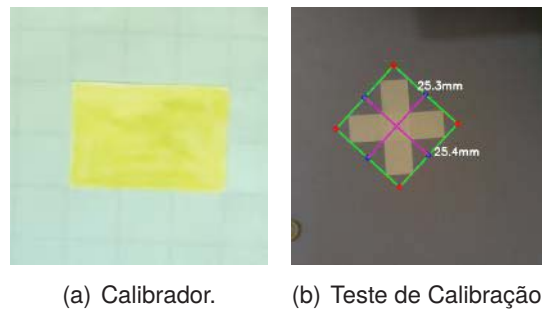


Figura 74. Imagens de calibração do sistema de visão computacional.

Após calibração, foram realizados alguns procedimentos experimentais quanto a quantificação de área foliar, executando automaticamente a sequência de processos representados na Figura 75, quais sejam: pré-processamento, com ajuste de gama e remoção de ruído (Figura 75(a) e Figura 75(b)); processamento, realçando a parte verde, as bordas e as regiões de interesse (Figura 75(c), Figura 75(d) e Figura 75(e)); e pós-processamento, segmentando a imagem (Figura 75(f)) para, enfim, classificar e mensurar os dados.

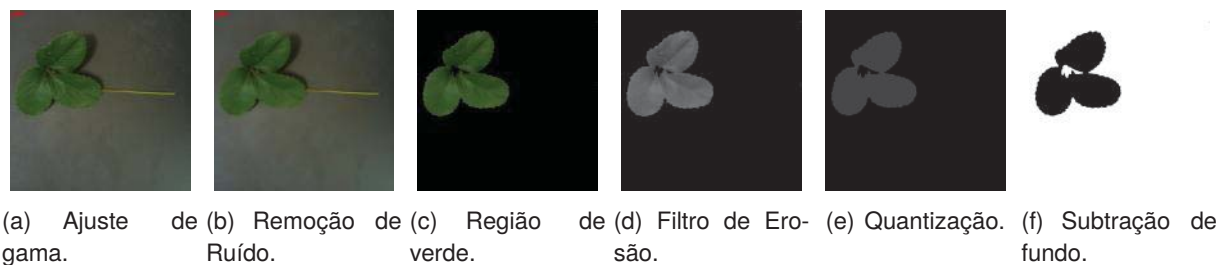


Figura 75. Processo para obtenção da área foliar.

A partir dos dados quantificados, gera-se um gráfico para apreciação do resultado, como mostra a Figura 76. Nela, exibe-se o espaço total de área divididos em área adicional e área foliar, em  $\text{mm}^2$ . Os valores numéricos da área foliar também são exibidos na janela da GUI.

Como validação preliminar de obtenção de área foliar, fez-se um comparativo entre o resultado alcançado pela plataforma embarcada, e a execução do mesmo procedimento por meio dos recursos do software ImageJ Figura 77. O resultado da área foliar no ImageJ foi de  $4748,513\text{mm}^2$ , e o da solução proposta foi de  $4747,8162\text{mm}^2$ . Para esse exemplo, nota-se uma diferença mínima entre as abordagens ( $0,6968\text{mm}^2$ ,  $a:b < 0,01$ ), o que transparece confiabilidade para a metodologia adotada e embarcada na plataforma.

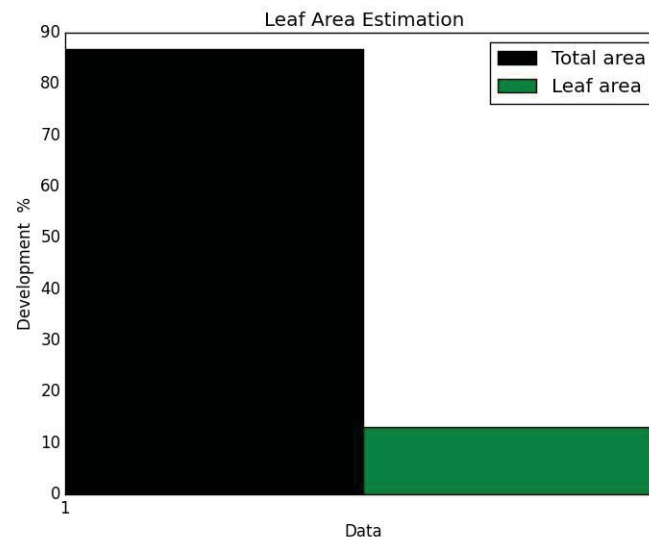


Figura 76. Resultado quantificado da imagem: área total e área foliar.

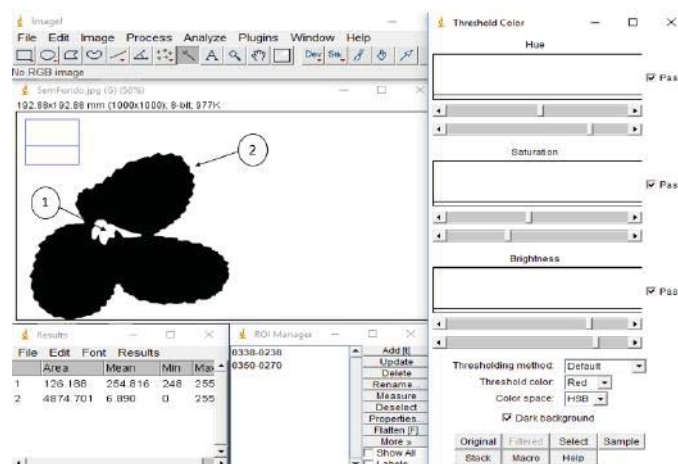


Figura 77. Repetição do processo no software ImageJ, para fins de comparação.

Baseado no ambiente controlado, subentendeu-se que o nível de complexidade pode ser minimizado quando comparado à aplicação real. Dos fatores impactantes mais relevantes, calculou-se umidade e temperatura. Por se tratar de um equipamento em estufa, projetou-se o módulo com vedação de umidade. Para temperatura, os componentes satisfizeram uma escala de necessidade, tornando-o adequado ao ambiente hostil e propício. Outro fator preponderante, relacionado à etapa de captura de imagem *in loco*, foi a refletância de verde no solo. Para correção dessa dificuldade prevista, necessariamente usou-se um material preto fosco sobre o solo, eliminando falsos verdes.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a conjectura do trabalho, a abordagem proposta engloba a aplicação de técnicas de três áreas do conhecimento para uma solução aplicada. Primeiramente, contempla-se a Agronomia com a fenologia de cultivares do morangueiro, por meio do monitoramento e das relações meteorológicas com o desenvolvimento da planta. Em seguida, a Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica oportuniza tecnologias que permitem a implementação de uma solução de hardware e software embarcado. Por fim, a Ciência da Computação, que oferece ferramentas para o desenvolvimento de aplicações e automação de processos, com resultados que auxiliam no controle da produção e na busca de rentabilidade na agricultura.

As seções seguintes expõem a união das três áreas mencionadas e a análise dos dados, de modo enfatizar os resultados para as soluções desenvolvidas de acordo com os materiais e métodos adotados para resolver a problemática.

### 5.1 ENGENHARIA ELÉTRICA

O projeto de Engenharia Elétrica contempla uma plataforma embarcada que inclui a câmera e estações do ambiente e solo.

Para demonstrar os itens moduláveis, a Figura 78 apresenta a plataforma com sua fonte de alimentação. Por meio de um *flat cabe*, realiza-se a alimentação de energia para a estação do ambiente. Na parte superior, destaca-se o sensor de radiação solar PAR. Internamente, existe o circuito eletrônico de condicionamento do sinal do sensor de umidade e temperatura, que permite matematicamente calcular o ponto de orvalho, em função da temperatura base.



Figura 78. Plataforma embarcada e caixa com sensores.

O módulo da estação do solo, representado na Figura 79, exibe-se as três etapas de montagem. Inicialmente, a Figura 79(a) apresenta o projeto confeccionado com o conjunto de componentes eletrônicos soldados na placa de circuito impresso (para testes operacionais). Em seguida, observa-se na Figura 79(b) o equipamento encapsulado para instalação em ambiente hostil (como uma estufa). Por fim, a Figura 79(c) apresenta o projeto finalizado do tensiômetro digital para aquisição dos dados via módulo *bluetooth*.



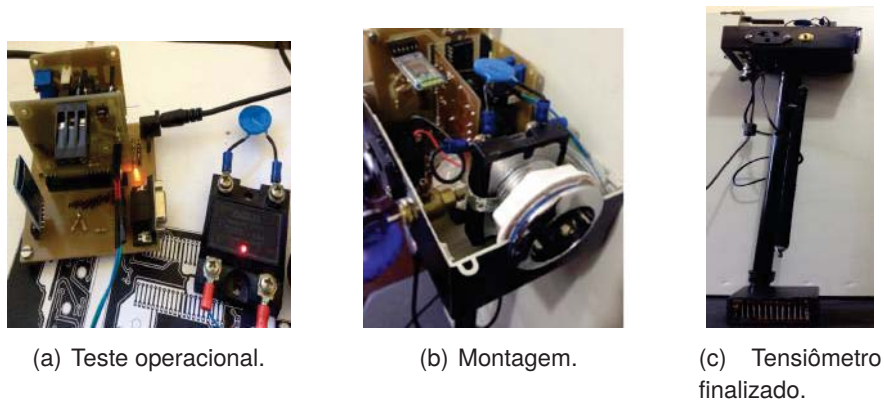


Figura 79. Projeto executado.

## 5.2 CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

A Figura 80 mostra a interface que o usuário pode controlar e visualizar os resultados do monitoramento da cultura, oriundos da plataforma embarcada. Os recursos permitem a seleção de visualização através das abas: *Graphs*, *Temperature TMP*, *Humidity HMD*, *Dew Point*, *Radiation PAR*, *Leaf Area* e *HMD Ground*. Os parâmetros apresentados na tela inicial são detalhados na sequência.

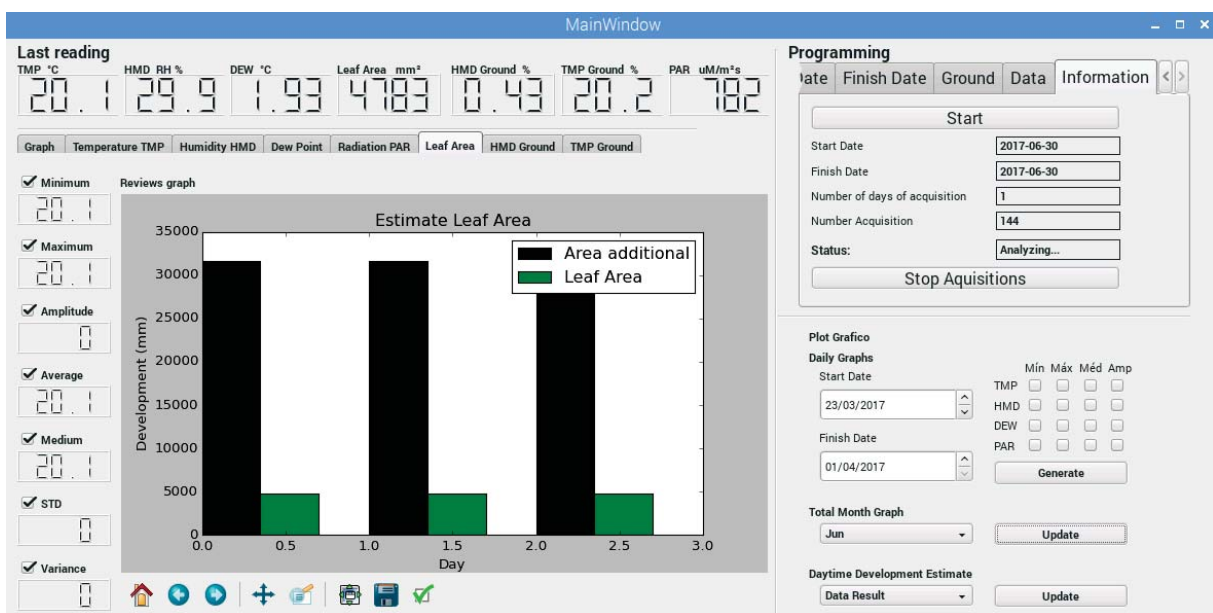


Figura 80. Tela principal de operação e visualização de dados.

A janela *Last Reading* disponibiliza as últimas leituras adquiridas, juntamente com dados estatísticos como *Minimum*; *Maximum*; *Amplitude*; *Average*; *Medium*; (*STD Desvio padrão*); *Variância* para cada informação desejada. Ele também apresenta os resultados em ambiente gráfico na janela *Reviews graph*. A Figura 81 mostra exemplos dos gráficos gerados com valores de (TMP) Temperatura (°C); (HMD) Umidade Relativa (RH%); (DEW) Ponto de orvalho (°C); *Leaf Área* Área Foliar (mm²); (HMD *Ground*) Umidade do Solo (RH%) e (PAR) Radiação fotossinteticamente ativa. Abaixo do ambi-

ente gráfico, há algumas ferramentas de manipulação, que permitem salvar, aplicar zoom, selecionar e ajustar eixos para redirecionar determinada região.

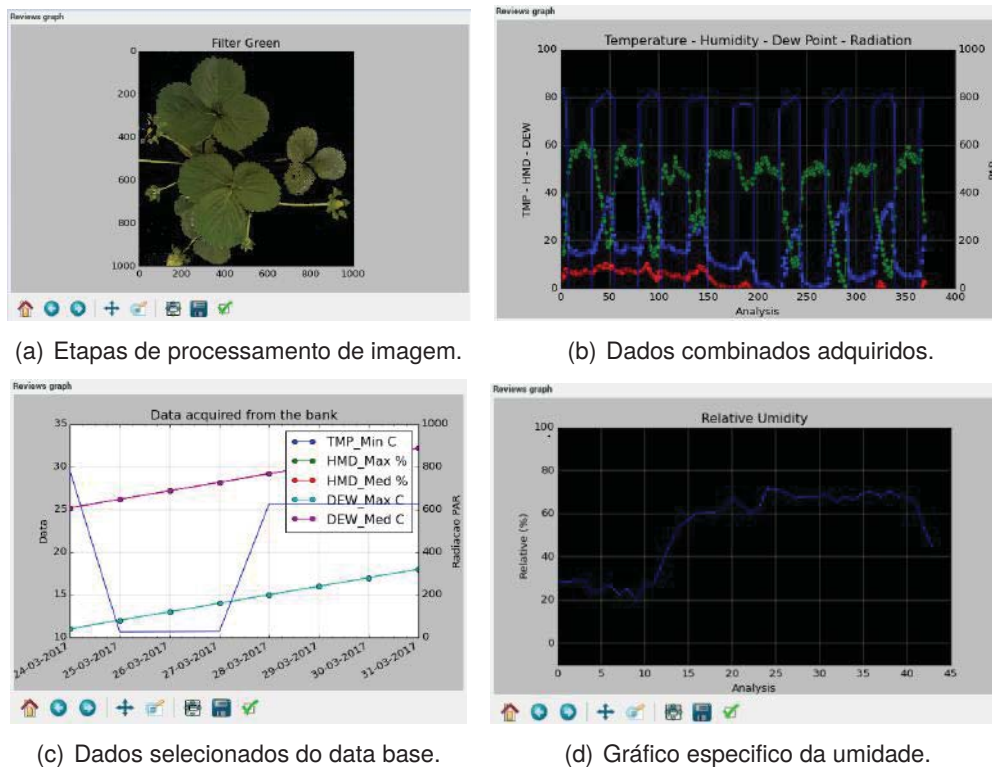
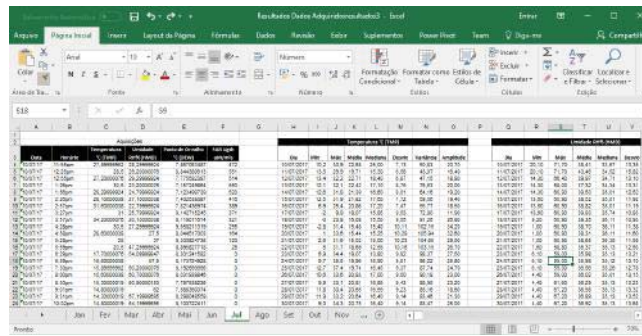


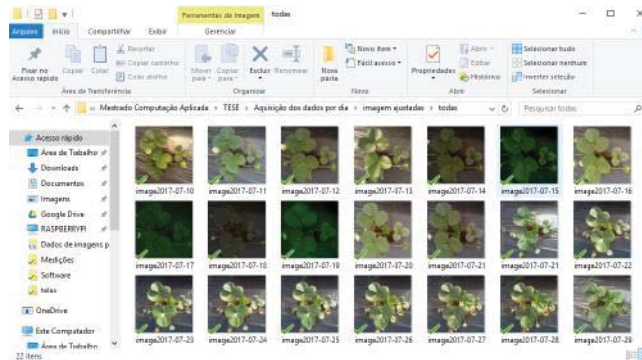
Figura 81. Janela *Reviews graph*.

O usuário pode filtrar os dados de acordo com o mês selecionado no recurso *Total Month Graph*, atualizando a interface a partir do botão *Update*. Essa funcionalidade executa a captura de todos os dados reais obtidos durante as análises. Já o recurso *Daily Graphs* mostra dados de médias diárias em um intervalo de datas, pesquisando no banco de dados de informações diárias. O gráfico pode ser gerado a partir do botão *Generate*. Vale ressaltar que todos os dados apresentados estão armazenados em arquivo no formato de planilha eletrônica, demonstrado na Figura 82, com os dados organizados de maneira tabular (Figura 82(a)). Já as imagens pós-captura são armazenadas de acordo com sua data em uma pasta local representado pela Figura 82(b).

Na parte superior direita da interface principal (Figura 81, observa-se a janela *Programming*, responsável em configurar as necessidades de aquisição do usuário, como os parâmetros de operação representados na Figura 83. As abas *Start Date* e *Finish Date* (Figura 83(a)) marcam o início e o término da análise. Na aba *Data* (Figura 83(b)) define-se o intervalo diário entre as aquisições (hora/minuto), onde também é possível atribuir parâmetro de base para a temperatura do ponto de orvalho (*Dew Point Control*). Na aba *Ground* seleciona-se o limite de umidade no solo e também o tempo ativo do sistema de irrigação (Figura 83(c)). Após inserção dos dados pode-se iniciar o processo (botão *Start* na aba *Information*, Figura 83(d)). Ela apresenta o intervalo de datas e o número de aquisições diárias e o total que serão computados.



(a) Dados em planilha.

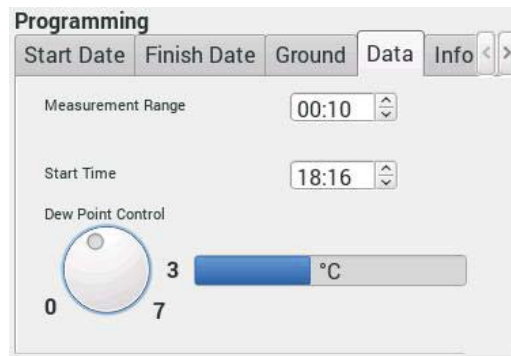


(b) Banco de imagens.

Figura 82. Dados armazenados.



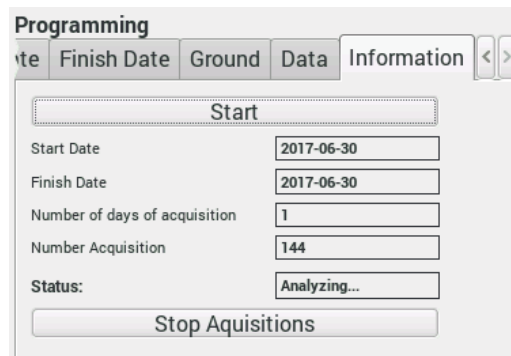
(a) Data de início e término.



(b) Parâmetros para análise.



(c) Parâmetros do solo.



(d) Informações de análise.

Figura 83. Parâmetros de programação.

### 5.3 AGRONOMIA

Ao finalizar a interface gráfica, a plataforma foi instalada em campo experimental no município de Passo Fundo, Rio Grande do Sul. A localização é sobre as coordenadas: latitude 28°13'48.4"Sul e longitude 52°23'03.4"Oeste, altitude média de 709 m. A Figura 84 representa o campus I da Universidade de Passo Fundo e o local de instalação é uma estufa do Setor de Horticultura para cultivo da planta do morangueiro. Alunos e professores da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAMV) disponibilizaram plantas da cultivar Albion para a coleta dos dados sob acompanhamento fenológico.

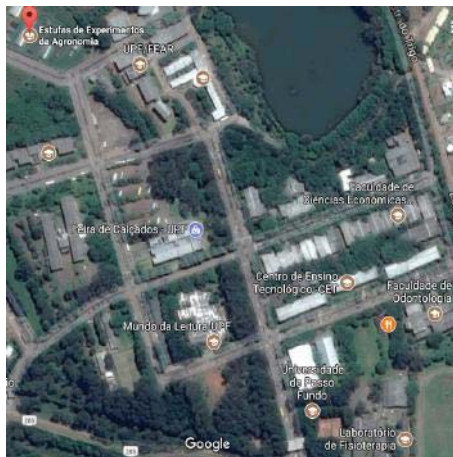


Figura 84. Localização do experimentos.

A Figura 85 demonstra a montagem da plataforma juntamente com as estações alocadas sobre a planta observada no período de 10 a 31 de julho de 2017.

Após instalação, observou-se algumas características do ambiente de instalação que podem propiciar danos e interferências nos resultados do sistema. A janela lateral da estufa (aproximadamente 50cm, fechada com tela em malha espaçada em 3cm) pode ser aberta e fechada por meio de um sistema mecânico, que propicia índices de alta umidade causando suor na superfície da lona. Esta partícula de água se desprende e cai podendo molhar a câmera e as estações. Outro fator nos dias chuvosos e ventosos é a entrada de água da chuva lateralmente movida pela força do vento. Diariamente, pássaros também acessam a estufa por meio de buracos na estrutura. Mas o fator com provável impacto nos resultados está associado a refletância da lona do solo sobre as raízes da cultura que, devido as características construtivas de alto brilho, gera complexidade direta no processamento da imagem.





Figura 85. Equipamento instalado *in loco*.

## 5.4 DADOS ADQUIRIDOS

### 5.4.1 Dados da estação do ambiente

A Tabela 5, a Tabela 6, a Tabela 7 e a Tabela 8 equivalem, respectivamente, a temperatura, a soma térmica, a umidade e o ponto de orvalho. Eles apresentam os valores adquiridos durante os dias de análise.

Analiticamente, nota-se que a média diária de temperatura foi estável no decorrer dos dias. Porém, de 17 a 21 de julho de 2017, houve uma diferença diária maior, onde registrou-se a mínima térmica de  $-3^{\circ}\text{C}$  internamente na estufa. Logo, os dados da soma térmica acumulada utilizaram como set-point de base a temperatura de zero graus, demonstrando decremento nos dias frios. Os registros de umidade apresentaram uma reprodutibilidade de resultados médios, apesar de alguns dias oscilarem de acordo com a mínima e a máxima registrados. O ponto de orvalho teve comportamento variável atingindo patamares negativos, o que não permitiu calcular o desvio dos valores.

Para os dados adquiridos da radiação solar fotossinteticamente ativa apresentados na Tabela 9, observa-se um declive nos dias correspondentes de frios, pois foi acompanhado de céu carregado de nuvens e chuvas constantes. Por conta disto, no dia 17, o desvio é o menor calculado.

### 5.4.2 Dados estação do solo

Baseado nos dados adquiridos pela estação meteorológica do solo apresentados na Tabela 11, fica evidente que o teor de água no solo (representado pelo potencial matricial, HMDs, em porcentagem) sugere máxima produtividade para a cultura [115]. A Tabela 10 mostra a interpretação dos resultados.

Já a temperatura do dossel segue um patamar relativo ao abafamento por meio da mulching de cobertura, o que representa uma média estável mesmo nos dias de maior variação da temperatura

Tabela 5. Resultados estatísticos da temperatura °C (TMP).

<b>Dia</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio</b>	<b>Variância</b>	<b>Amplitude</b>
10/07/2017	10,2	30,9	22,7	25,0	4,8	50,8	20,7
11/07/2017	13,5	29,9	19,7	15,3	4,4	43,0	16,4
12/07/2017	13,4	32,2	22,7	18,4	4,8	47,1	18,8
13/07/2017	12,1	32,1	22,4	17,1	4,7	76,6	20,0
14/07/2017	12,6	31,8	21,4	16,6	4,6	64,2	19,2
15/07/2017	12,5	31,9	21,8	17,6	4,7	59,6	19,4
16/07/2017	6,9	25,4	20,9	17,2	4,6	55,8	18,5
17/07/2017	-2,0	9,9	18,0	15,8	4,2	72,8	11,9
18/07/2017	-3,0	23,8	16,1	15,5	4,0	91,3	26,8
19/07/2017	-2,8	31,4	15,5	15,4	3,9	102,1	34,2
20/07/2017	1,0	33,6	15,4	15,2	3,9	105,9	32,6
21/07/2017	2,6	31,6	15,0	15,0	3,9	104,6	29,0
22/07/2017	5,0	31,7	18,7	12,5	4,3	103,1	26,7
23/07/2017	6,9	34,4	19,1	13,8	4,4	98,4	27,5
24/07/2017	9,7	35,5	19,9	16,9	4,5	96,2	25,8
25/07/2017	12,7	37,4	19,7	16,4	4,4	87,7	24,7
26/07/2017	10,6	33,6	20,8	17,0	4,5	90,2	23,0
27/07/2017	9,9	33,1	20,8	16,8	4,6	88,9	23,2
28/07/2017	11,8	30,4	20,6	16,5	4,5	85,2	18,6
29/07/2017	11,9	33,2	20,6	16,4	4,5	83,5	21,3
30/07/2017	9,3	34,3	20,7	16,4	4,5	83,5	25,0

Tabela 6. Soma térmica acumulada dado em (°C).

<b>Data</b>	<b>10/7</b>	<b>11/7</b>	<b>12/7</b>	<b>13/7</b>	<b>14/7</b>	<b>15/7</b>	<b>16/7</b>
<b>Diária</b>	13,8	24,0	15,7	15,0	17,7	16,8	10,2
<b>Acumulada</b>	13,8	37,8	53,5	68,5	86,2	103,0	113,2
<b>Data</b>	<b>17/7</b>	<b>18/7</b>	<b>19/7</b>	<b>20/7</b>	<b>21/7</b>	<b>22/7</b>	<b>23/7</b>
<b>Diária</b>	3,9	1,1	3,4	3,3	20,8	10,8	14,2
<b>Acumulada</b>	117,1	118,2	121,6	124,9	145,7	156,5	170,7
<b>Data</b>	<b>24/7</b>	<b>25/7</b>	<b>26/7</b>	<b>27/7</b>	<b>28/7</b>	<b>29/7</b>	<b>30/7</b>
<b>Diária</b>	16,9	27,8	13,0	14,2	14,4	14,5	35,5
<b>Acumulada</b>	187,6	215,4	228,4	242,6	257,0	271,0	307,0

registrada no ar diário. Para o desenvolvimento vegetativo, temperaturas ideais giram em torno de 17°C a 30°C, acima disso prejudica o sistema radical da raiz da planta.

#### 5.4.3 Dados da visão computacional

Existem diferentes métodos para estimar a área foliar, conforme citam Pereira e Machado [116]. Entre esses métodos, destacam-se os que não envolvem técnicas destrutivas e utilizam medidas lineares da folha.

Tabela 7. Resultados estatísticos da umidade relativa % (HMD).

<b>Dia</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio</b>	<b>Variância</b>	<b>Amplitude</b>
10/07/2017	29,1	71,7	38,4	33,7	6,2	178,2	42,6
11/07/2017	33,1	71,7	43,5	34,5	6,6	250,2	38,6
12/07/2017	26,7	66,4	40,0	34,7	6,3	171,6	39,7
13/07/2017	19,0	58,0	37,3	34,3	6,1	177,1	39,0
14/07/2017	28,9	60,9	39,5	35,0	6,3	156,8	32,0
15/07/2017	20,2	60,9	38,5	35,0	6,1	142,2	40,7
16/07/2017	34,5	60,9	38,8	35,0	6,2	125,3	26,4
17/07/2017	8,7	60,9	39,9	35,7	6,3	117,3	52,2
18/07/2017	9,2	60,9	39,3	36,1	6,3	119,5	51,7
19/07/2017	7,9	60,9	38,7	36,1	6,2	129,4	53,0
20/07/2017	11,8	60,9	38,3	36,1	6,2	134,5	49,1
21/07/2017	18,1	60,9	38,6	36,3	6,2	134,1	42,8
22/07/2017	18,8	58,9	35,4	35,1	5,9	167,1	40,0
23/07/2017	15,9	59,0	36,0	35,1	6,0	174,5	43,1
24/07/2017	17,7	59,0	36,0	35,1	6,0	171,5	41,3
25/07/2017	13,6	59,0	36,6	35,3	6,0	163,3	45,4
26/07/2017	18,8	59,0	36,0	35,0	6,0	172,9	40,2
27/07/2017	19,0	61,6	36,3	35,1	6,0	174,9	42,6
28/07/2017	19,9	67,2	36,6	35,1	6,0	177,4	47,3
29/07/2017	19,0	67,2	36,9	35,1	6,1	182,8	48,2
30/07/2017	17,2	67,2	36,9	35,1	6,1	187,1	50,0

Tabela 8. Resultados estatísticos do ponto de orvalho °C (DEW).

<b>Dia</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio</b>	<b>Variância</b>	<b>Amplitude</b>
10/07/2017	10,2	13,3	11,5	8,0	3,4	0,6	3,1
11/07/2017	11,3	15,0	12,3	8,5	3,5	0,9	3,7
12/07/2017	8,9	13,3	11,9	9,5	3,4	2,1	4,4
13/07/2017	5,6	11,0	10,8	6,8	3,3	1,0	5,4
14/07/2017	11,0	12,9	12,0	7,1	3,5	1,9	1,9
15/07/2017	6,7	11,9	10,3	7,0	3,2	1,9	5,2
16/07/2017	6,3	11,7	8,8	6,8	3,0	3,1	5,4
17/07/2017	-3,5	5,9	2,7	6,5	1,7	15,0	9,4
18/07/2017	-11,7	1,8	-4,7	5,3	-	39,4	13,5
19/07/2017	-8,0	0,9	-3,0	3,7	-	49,4	8,9
20/07/2017	-1,3	4,9	1,4	1,2	1,2	45,3	6,2
21/07/2017	0,4	6,8	3,3	0,6	1,8	43,4	6,4
22/07/2017	3,6	7,6	5,2	0,5	2,3	3,2	4,0
23/07/2017	3,9	8,9	7,0	1,3	2,6	5,7	5,0
24/07/2017	6,6	10,3	8,9	2,3	3,0	8,1	3,7
25/07/2017	4,3	12,6	9,6	2,7	3,1	9,0	8,3
26/07/2017	4,9	10,4	8,4	3,5	2,9	11,1	5,5
27/07/2017	4,7	10,4	8,5	4,1	2,9	10,3	5,7
28/07/2017	4,5	9,5	8,2	4,2	2,9	9,5	5,0
29/07/2017	4,5	10,3	9,7	4,5	3,1	9,3	5,8
30/07/2017	4,9	11,6	8,5	4,6	2,9	9,6	6,7



Tabela 9. Resultados estatísticos da radiação solar fotossintética  $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{s}$  (PAR).

<b>Dia</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio</b>	<b>Variância</b>	<b>Amplitude</b>
10/07/2017	25,0	551,0	359,0	389,0	18,9	29942,9	526,0
11/07/2017	9,0	454,0	225,4	243,0	15,1	18095,0	445,0
12/07/2017	6,0	564,0	293,2	287,0	17,1	38415,4	558,0
13/07/2017	12,0	554,0	292,5	297,0	17,1	37216,3	542,0
14/07/2017	10,0	554,0	303,0	326,0	17,4	34599,8	544,0
15/07/2017	7,0	565,0	299,4	299,0	17,4	34586,8	558,0
16/07/2017	5,0	468,0	210,7	181,0	14,5	24632,2	463,0
17/07/2017	13,0	347,0	165,5	171,0	12,9	8388,6	334,0
18/07/2017	2,0	572,0	312,0	323,0	17,7	36238,9	570,0
19/07/2017	10,0	578,0	303,6	307,0	17,4	23019,0	568,0
20/07/2017	11,0	584,0	307,2	306,0	17,5	39639,3	573,0
21/07/2017	8,9	583,0	309,2	304,0	17,6	33163,2	574,0
22/07/2017	13,0	593,0	336,5	366,0	18,3	32207,2	580,0
23/07/2017	8,0	598,0	306,2	335,0	17,5	34190,4	590,0
24/07/2017	12,0	577,0	372,1	423,5	19,3	31961,2	565,0
25/07/2017	20,0	591,0	362,9	379,5	19,0	34910,1	571,0
26/07/2017	14,0	588,0	303,5	348,0	17,4	34550,7	574,0
27/07/2017	12,0	598,0	324,5	356,0	18,0	29892,5	586,0
28/07/2017	8,0	589,0	297,6	334,0	17,2	35847,2	581,0
29/07/2017	16,0	592,0	313,9	324,0	17,7	32015,9	576,0
30/07/2017	8,0	587,0	312,9	322,5	17,7	32567,0	579,0

Tabela 10. Leituras do Tensiômetro [115].

<b>Leitura (Kpa)</b>	<b>Condição</b>	<b>Interpretação</b>
0	Saturado	Acumulação de água
		Nível freático raso.
		Tensiômetro com vazamento.
6 a 10	Capacidade de campo	Interrupção de irrigação.
		Evitar percolação de água e lixiviação de nutrientes.
20 à 40	Momento de aplicação	Irrigações dirigidas para produtividade máxima e culturas de maior valor econômico e solos arenosos.
		Valor usual para irrigação.
40 à 50		Aeração Assegurada. Solos de textura média.
50 à 60	Intervalo de irrigação	Início de irrigação em solo argiloso.
		Manutenção da umidade disponível.
70 à 80	Seco	Valor de início de deficit.
		Alguma umidade disponível.
		Risco de perda de produção.

Strik e Proctor [117] desenvolveram equações de regressão linear capazes de estimar a área foliar de plantas. Nesse aspecto, verifica-se que o produto do comprimento por largura é superior em

Tabela 11. Dados adquiridos da estação no solo.

<b>Data</b>	<b>10/7</b>	<b>11/7</b>	<b>12/7</b>	<b>13/7</b>	<b>14/7</b>	<b>15/7</b>	<b>16/7</b>
<b>HMDs (%)</b>	33,8	32,3	34,4	34,8	36,2	34,6	37,6
<b>TMPs (°C)</b>	24,2	23,1	24,2	25,1	25,0	25,3	24,3
<b>Data</b>	<b>17/7</b>	<b>18/7</b>	<b>19/7</b>	<b>20/7</b>	<b>21/7</b>	<b>22/7</b>	<b>23/7</b>
<b>HMDs (%)</b>	36,0	39,9	36,3	36,5	34,3	37,7	35,0
<b>TMPs (°C)</b>	21,2	20,5	20,7	21,6	19,9	22,6	23,4
<b>Data</b>	<b>24/7</b>	<b>25/7</b>	<b>26/7</b>	<b>27/7</b>	<b>28/7</b>	<b>29/7</b>	<b>30/7</b>
<b>HMDs (%)</b>	34,6	31,7	35,3	34,0	35,6	35,3	31,1
<b>TMPs (°C)</b>	24,3	23,0	25,1	25,1	25,0	25,1	25,1

função da capacidade de predição e precisão, quando comparado com a aquisição de apenas um parâmetro de comprimento ou largura [118].

O procedimento manual utilizado para aquisição das medidas foi por meio de régua escalonada em centímetros, como mostra a Figura 86. Mediu-se a maior distância de largura e comprimento de cada folíolo da planta. As medidas realizadas para esse trabalho estão apresentadas na Tabela 12.

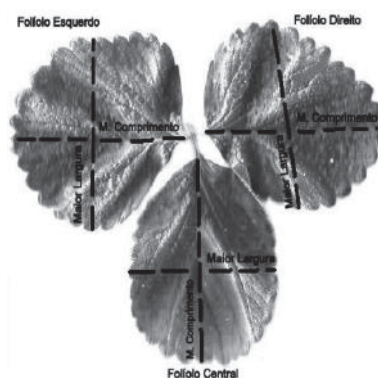


Figura 86. Método de medida.

Tabela 12. Medidas iniciais e finais da análise em (cm).

Folha	Inicial dia 10/07						Final dia 30/07					
	L	C	L	C	L	C	L	C	L	C	L	C
<b>A</b>	5	5,3	5,1	5,8	6,1	5,7	5	4,9	6,5	5,5	5	5
<b>B</b>	4,4	4,8	4,5	3,4	4,8	4,7	6	6	5,4	5,5	5,4	5,6
<b>C</b>	3,6	3,3	3,5	2,9	3,8	3,5	5,5	7	6	6,6	6	6,4
<b>D</b>	3,2	3,3	3,2	3,7	3,2	2,2	3	2,5	3	2,3	2	3
<b>E</b>	0	0	0	0	0	0	3,3	4,4	3,5	3	3	3,2
<b>F</b>	0	0	0	0	0	0	3,4	3	3	3,1	3	3
<b>G</b>	2,4	3,1					3,3	3,3				

**Legenda: (C = Comprimento) (L = Largura) (medidas em cm)**

Durante a coleta das medidas (Figura 87) realizou-se um procedimento de comparação de resultados entre o método manual e recursos do software *ImageJ*. Considerando a Figura 87(a) como exemplo, fez-se a captura da imagem no início e no fim da análise (para mesma cultura), registrando

uma régua escalonada próxima a planta. Esta permitiu quantificar e dimensionar distâncias e áreas de uma imagem.

A Figura 87(b) exibe a conversão de tons realizada como pré-processamento antes da segmentação da imagem. A partir disso, inseriu-se a distância conhecida por meio de dois pontos, inicial e final da reta, conforme a Figura 87(c). Nesse exemplo, obteve-se uma distância de 6cm, que foi o referencial definido na aba *set scale* do software embarcado proposto (Figura 87(d)).

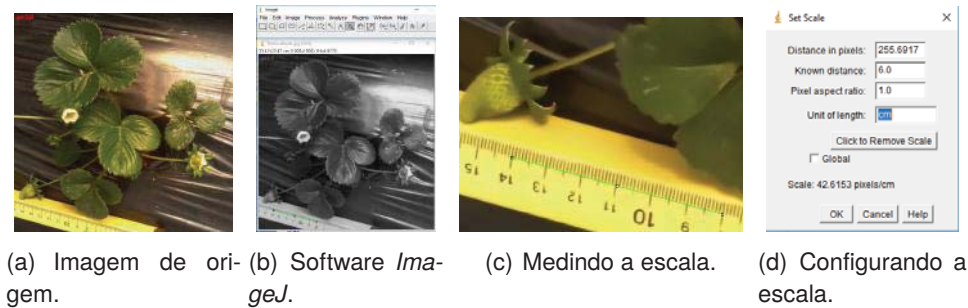


Figura 87. Procedimento de medição de folha.

Após coletar as medidas, realizou-se o cálculo para estimar área foliar por meio da Equação 24, da Equação 25 e da Equação 26. Nota-se que elas se diferem em relação às atribuições das variáveis de comprimento e largura. Os três métodos foram adotados com o intuito de comparar o diferencial entre eles, e os dados capturados pela plataforma embarcada juntamente com software *ImageJ*. Os resultados de cada Folha de A até G para cada folíolo 01, 02 e 03 é calculado pelos três métodos e apresentados nas Tabelas 13 e 14. Nota-se o diferencial de resultados entre eles.

$$A_f = \left(\frac{\pi}{4}\right) * \left(\frac{L+C}{2}\right)^2 \quad (24)$$

$$A_f = \left(\frac{\pi}{4}\right) * L^2 \quad (25)$$

$$A_f = \left(\frac{\pi}{4}\right) * C^2 \quad (26)$$

A Figura 88 apresenta todas as imagens capturadas do banco. Ela mostra algumas ocorrências de falhas durante a análise realizada. De acordo com as imagens denominadas E, F, H, I e J que apresentam imperfeições, percebeu-se que foram capturadas em horário de baixa luminosidade. Esse fato, relacionado aos limites de controle de radiação PAR, foi detectado e reajustado nas aquisições seguintes.

Além das falhas ocorridas pela baixa iluminação, deve-se citar também que o monitoramento indicou erros condicionados ao manejo da planta. A Figura 89 demonstra pigmentos brancos sobre a folha em função do processo de aplicação de fungicidas e inseticidas por equipamento pulverizador. A Figura 90 demonstra as etapas de eliminação de falhas aplicadas a partir da imagem de origem (A), onde procurou-se abstrair a região de verde em (B) e, após eliminar o ruído em (C), quantizou-se a

Tabela 13. Cálculo das medidas do dia 10/07 em (cm<sup>2</sup>).

Folha	Equação 1				Equação 2				Equação 3			
	Foliolo			cm <sup>2</sup>	Foliolo			cm <sup>2</sup>	Foliolo			cm <sup>2</sup>
A	20,8	23,7	27,7	72,2	19,6	20,4	30,0	70,0	22,1	27,2	25,5	74,8
B	16,6	12,2	17,7	46,6	15,2	15,9	18,1	49,2	18,1	9,1	17,3	44,5
C	9,6	7,9	10,6	28,1	10,2	9,4	11,3	30,9	9,0	6,6	9,9	25,5
D	8,3	9,3	5,7	23,4	8,0	8,0	8,0	24,1	8,5	10,7	3,8	23,1
E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
F	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G	5,9			5,9	4,5	0,0	0,0	4,5	7,5	0,0	0,0	7,5
<b>Total planta:</b>				<b>176,2</b>				<b>178,7</b>				<b>175,4</b>

Tabela 14. Cálculo das medidas do dia 31/07 em (cm<sup>2</sup>).

Folha	Equação 1				Equação 2				Equação 3			
	Foliolo			cm <sup>2</sup>	Foliolo			cm <sup>2</sup>	Foliolo			cm <sup>2</sup>
A	19,2	28,3	19,6	67,1	19,6	33,2	19,6	72,5	18,8	23,7	19,6	62,2
B	28,3	23,3	23,8	75,3	28,3	22,9	22,9	74,1	28,3	23,7	24,6	76,6
C	30,7	31,2	30,2	92,0	23,8	28,3	28,3	80,3	38,5	34,2	32,2	104,8
D	5,9	5,5	4,9	16,4	7,1	7,1	3,1	17,3	4,9	4,2	7,1	16,1
E	11,6	8,3	7,5	27,5	8,6	9,6	7,1	25,2	15,2	7,1	8,0	30,3
F	8,0	7,3	7,1	22,4	9,1	7,1	7,1	23,2	7,1	7,5	7,1	21,7
G	8,5			8,5	8,6	0,0	0,0	8,6	8,5	0,0	0,0	8,5
<b>Total planta:</b>				<b>309,2</b>				<b>301,1</b>				<b>320,3</b>

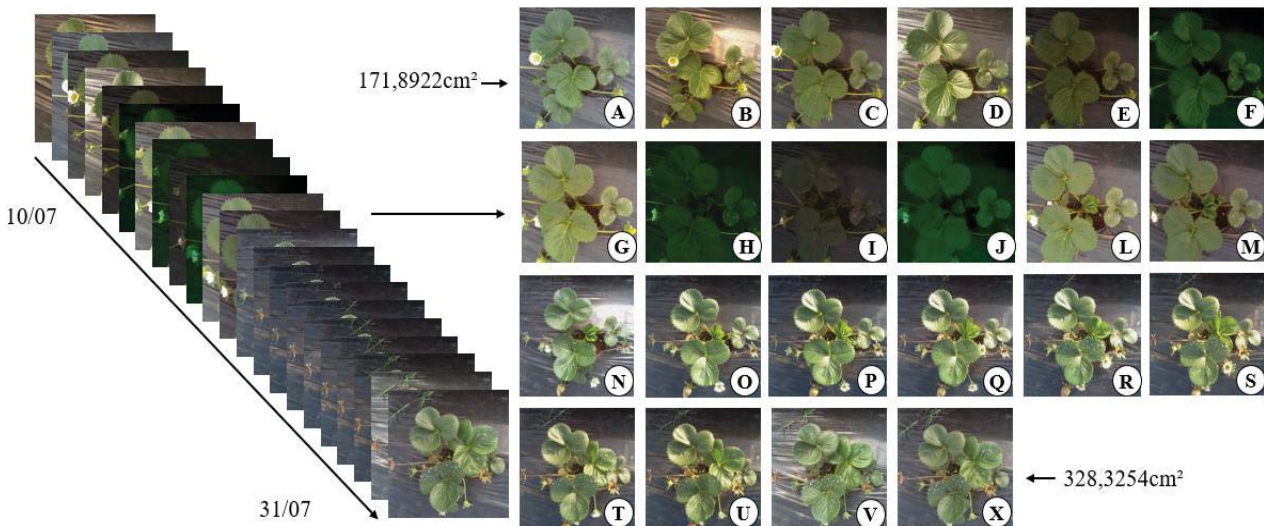


Figura 88. Banco de imagens capturadas.

imagem na tentativa de reconstrução dos espaços pela vizinhança da avaria. Como resultado final, obteve-se a imagem (E).

Outro problema encontrado durante o uso da solução proposta foi a refletância do mulching usado na cultura (propagação de luz). A luz solar incidente sobre as rugosidades da folha tem efeito

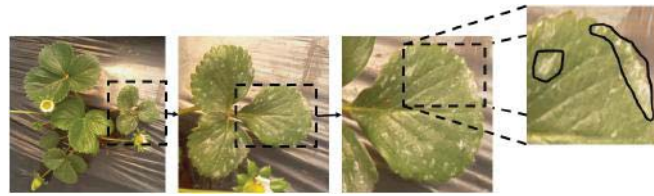


Figura 89. Erro por aplicação de fungicida e inseticida.

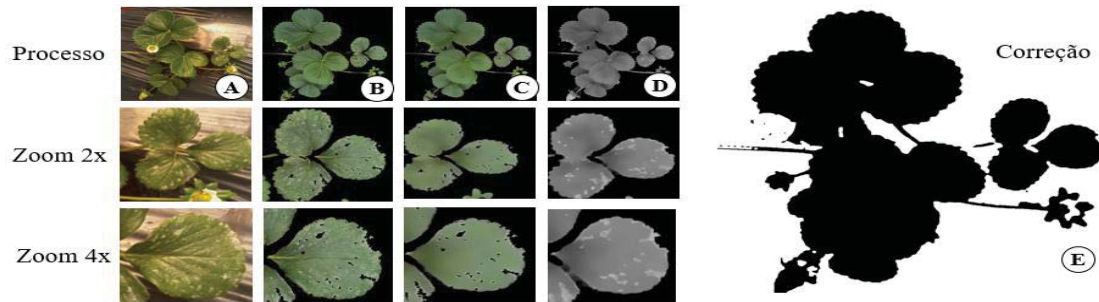


Figura 90. Processo de recuperação.

de reflexão difusa no espectro de cor verde, a qual corresponde a um feixe refletido de raios luminosos sobre a mulching imagem (B), como mostra a Figura 91.

Como o plástico tem propriedades construtivas de rejeição à absorção de luz, as regiões de preto tomam semelhanças esverdeadas, o que dificulta a fidelidade no processo de extração de pigmentos verdes somente da folha. Para correção desta influência, é necessário a alteração no canteiro de plantio, com a aplicação de um plástico ou material de propriedades foscas.

Para o caso em estudo, foram alterados parâmetros de limiares dos tons de verde realizando uma sequência de redundância de processos na Figura 91 (imagem (A)) até a compreensão desejada da região de interesse da imagem processada. As imagens (D) e (E) destacam no processo os danos causados pela pulverização antes da correção destas imperfeições. Em particular, a imagem (C) demonstra a invasão de plantas daninhas também sobre a área de medida que acabou contabilizado pelo equipamento.

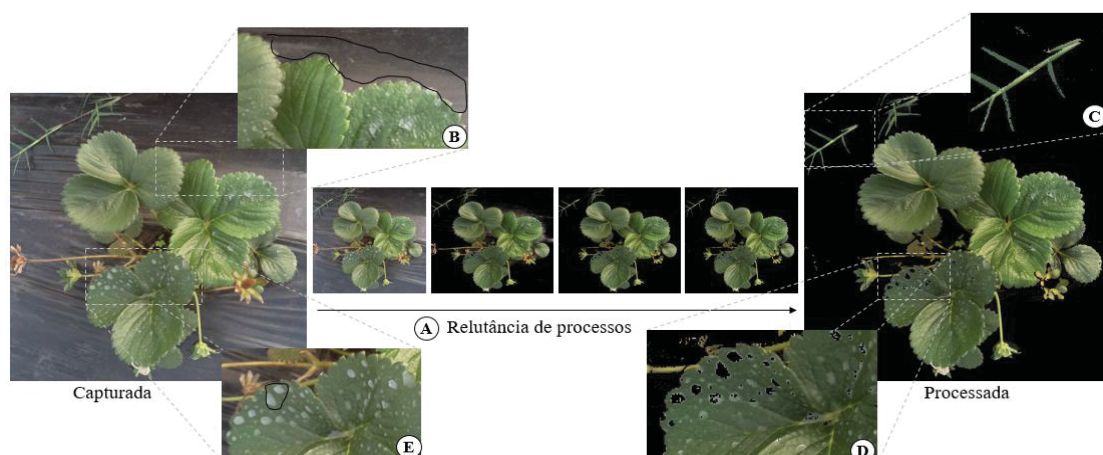


Figura 91. Refletância da lona e ajuste de limiar de verde.



Apesar dos erros relatados, os resultados encontrados diariamente para a extração dos atributos de área foliar foram satisfatórios. Eles são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Dados adquiridos de área foliar em (cm<sup>2</sup>).

<b>Data</b>	<b>10/7</b>	<b>11/7</b>	<b>12/7</b>	<b>13/7</b>	<b>14/7</b>	<b>15/7</b>	<b>16/7</b>
<b>Área</b>	171,9	180,5	181,3	184,2	187,7	188,5	189,9
<b>Data</b>	<b>17/7</b>	<b>18/7</b>	<b>19/7</b>	<b>20/7</b>	<b>21/7</b>	<b>22/7</b>	<b>23/7</b>
<b>Área</b>	191,2	192,9	193,3	195,3	206,5	224,4	246,5
<b>Data</b>	<b>24/7</b>	<b>25/7</b>	<b>26/7</b>	<b>27/7</b>	<b>28/7</b>	<b>29/7</b>	<b>30/7</b>
<b>Área</b>	266,1	270,4	285,0	289,1	305,5	318,9	328,3

De acordo com os resultados obtidos, pode-se estimar que a planta teve um percentual de crescimento aproximado de 52% entre o dia 10 e o dia 30, representado por um incremento foliar de 156,4cm<sup>2</sup> ao final do período. Decorrente deste ganho, houve a emissão de uma nova folha na coroa principal, apresentada na Figura 92. Os estádios de desenvolvimento cronológicos desta emissão podem ser visualizados na Figura 92(a), na Figura 92(b), na Figura 92(c) e na Figura 92(e).

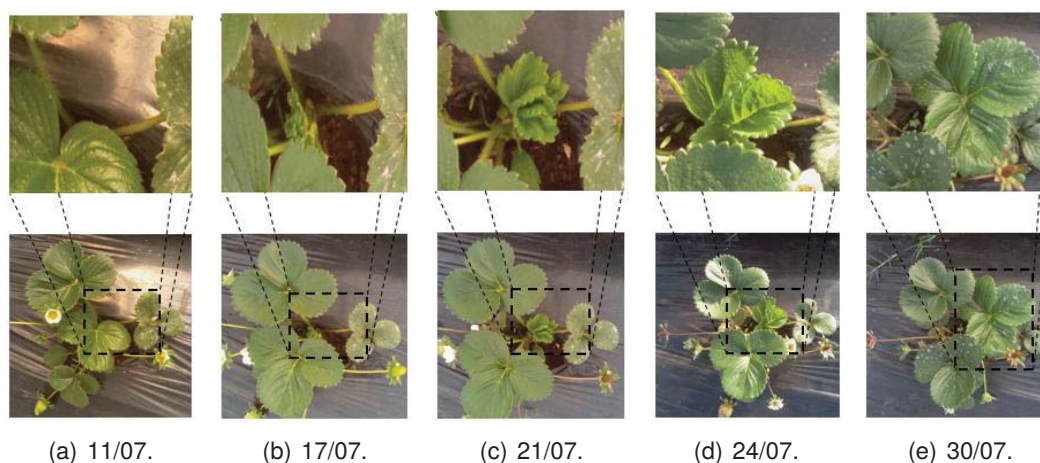


Figura 92. Emissão de folha.

De acordo com a expansão foliar registrada no período, coube analisar a capacidade de predição de cada método relatado. A Tabela 16 apresenta os dados diferenciais medidos e faz a comparação entres os métodos de equacionamento com medidas por meio de régua escalonada (método convencional), software ImageJ e plataforma embarcada proposta. O ImageJ é um programa de processamento de imagens, de domínio público, com funcionalidades em *multithread* que permite operações em paralelo. Ele tem a capacidade de calcular estatísticas de área e valor de pixel através de uma referência conhecida pelo usuário, em milímetros. A partir desta função é capaz de mensurar distâncias e ângulos, criar histogramas de densidade e gráficos de perfil de linha. Suporta funções de processamento de imagem padrão, como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de bordas e filtragem mediana, e transformações geométricas. Dentro disso, o ImageJ pode ser utilizado como referência para medida de área foliar na agricultura. Semelhante ao método manual usando régua escalonada, o uso do ImageJ, por ser software, pode ser considerado uma técnica destrutiva,

onde retira-se a folha da planta para digitalização. Em ambos os casos, existe risco de danificar a folha em função do manejo que exige delicadeza na manipulação de cada folíolo. Já utilizando a plataforma não há contato físico com a planta, resguardando a sua integridade, além de automatizar o processo.

Tabela 16. Comparativo entre os métodos.

Aquisição		Inicial dia 10/07			Final, dia 30/07		
Métodos	Cálculos	Equação (LC)	Equação (C)	Equação (L)	Equação (LC)	Equação (C)	Equação (L)
				176,2	175,4	178,7	309,3
Area em cm <sup>2</sup>	Software ImageJ		186,1			354,2	
	Plataforma Embarcada		171,9			328,3	
Variação	Plataforma / Cálculos	-2,4%	-2,0%	-3,8%	6,2%	9,0%	2,5%
	ImageJ / Cálculos	5,6%	6,1%	4,1%	14,5%	17,6%	10,6%
	ImageJ / Plataforma		8,3%			7,9%	

**Legenda: L = Largura C = Comprimento**

A partir dos resultados obtidos, o percentual demonstra o diferencial em razão de cada uma das técnicas analisadas. Em destaque, observa-se o melhor resultado (2%) para as aquisições iniciais, entre a plataforma e a equação, que utiliza apenas o parâmetro de comprimento para cálculo. Isto pode ser visto na coluna denominada por Equação (C) método manual, que não alcança 4% de diferença em relação a Equação (L). Outro ponto interessante na comparação entre plataforma e métodos manuais é destacado no uso das medidas de comprimento e largura, com uma diferença de 2,4% nas aquisições iniciais do dia 10 de julho. Nesse caso, os percentuais foram negativos, o que significa que a plataforma calculou medidas menores ao método manual comparado. Isto pode ser um indicativo de precisão, pois o método manual tende a ser exaustivo e suscetível a erros. Para os dados finais do dia 30 de julho, a plataforma alcançou 9% de diferencial pela Equação (C), que utiliza os dados apenas do comprimento da folha. Já o menor diferencial de 2,5% ficou por conta da Equação (L), que usa a largura para cálculo, e por intermédio da Equação (LC) com 6,2%. Todos os diferenciais foram positivos, o que indica que os valores obtidos pela plataforma foram superiores aos valores mensurados manualmente. Na comparação entre ImageJ e métodos manuais, para as aquisições iniciais dia 10 de julho, a menor relação diferencial foi de 4,1% pode ser vista na Equação (L), e a máxima na Equação (C), 6,1%. Utilizando comprimento e largura, apresenta-se uma medida de 5,6% na Equação (LC). Para os dados finais no dia 30 de julho a diferença foi mais elevada, com uso da medida de comprimento, Equação (C), alcançando 17,6%. Por outro lado, as diferenças foram menores para as medidas de largura, e combinadas – largura em comprimento, com valores de 10,6% e 14,5%, respectivamente para Equação (L) e Equação (LC). Todos os resultados destacados foram positivos e esperados, mostrando que o ImageJ também apresentou valores superiores aos medidos manualmente. A partir dos resultados diferenciais obtidos entre os métodos manuais e as



ferramentas computacionais (ImageJ e plataforma proposta), também se fez uma comparação entre ImageJ e plataforma para verificar o diferencial dos valores. Como resultado, foi possível identificar uma aproximação diferencial de 8% tanto no início das análises, quanto no fim, com valores de saída do ImageJ maiores que da plataforma. Um dos fatores diretos nos resultados pode ser a dificuldade de processar a imagem para segmentação no software ImageJ. Também vale salientar que todos os dados medidos pela plataforma não ultrapassam 10% de variação. Em relação ao uso do software ImageJ, o mesmo apresentou um diferencial de 15% de diferencial.

Para verificar o fator meteorológico que mais contribui no desenvolvimento da planta, adotou-se a análise estatística por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson. Ele apresenta a relação de intensidade da associação linear existente entre as variáveis, que pode ser quantificada em uma escala de -1 a 1. A Tabela 17 apresenta cada parâmetro adquirido automaticamente nas análises das estações meteorológicas do ambiente e solo, correlacionando-os com a área foliar. Como resultado, verificou-se variáveis positivamente correlacionadas em aproximadamente 0,96 com a temperatura acumulada no período como indício impactante no crescimento da folha.

Tabela 17. Correlação entre variáveis meteorológicas e área foliar.

Estação	Ambiente				Solo		
	TMP (°C)	HMD (%)	DEW (°C)	TMP Acumulado (°C)	PAR ( $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{s}$ )	TMP (°C)	HMD (%)
<b>Correlação</b>	0,14	-0,66	0,14	0,96	0,34	0,41	-0,33

Para o desenvolvimento de uma planta admite-se a relação com a temperatura, no século XVIII René-Antoine Ferchault de Réaumur fez essa descoberta. É possível caracterizar “temperatura” como duração da estação de crescimento ou tempo térmico. Fundamentalmente uma planta precisa armazenar uma certa quantidade de energia térmica para cada estágio de desenvolvimento, fazendo então que quando uma cultura recebe um total acumulado ela passar para outra etapa de crescimento e como consequência ocorre a nova emissão foliar adquirindo mais área de absorção de radiação solar, e passando cada fase fisiológica até a maturação do fruto. Por isso é essencial o acompanhamento térmico da planta permitindo reconhecer a possibilidade de crescimento vegetativo.

A Figura 93 demonstra a equação linear de regressão com coeficiente de determinação  $R^2 \cong 0,92$  entre área foliar e TMP acumulado. Nela, pode observar também o desvio residual ou erros de predição igual a RMSE de 14,62. Isso reforça a relação entre as variáveis, mostrando o modelo consegue explicar bem os valores observados.

Para demonstrar a tendência dos valores de aquisição entre as variáveis dependente (área foliar) e independente (temperatura média acumulada), a Figura 94 indica que no período de maior acréscimo de temperatura, houve um incremento de área foliar. Nos dias iniciais observados, existiu um grande diferencial nas amplitudes em decorrência das coletas de imagens não terem iniciado no dia de plantio.

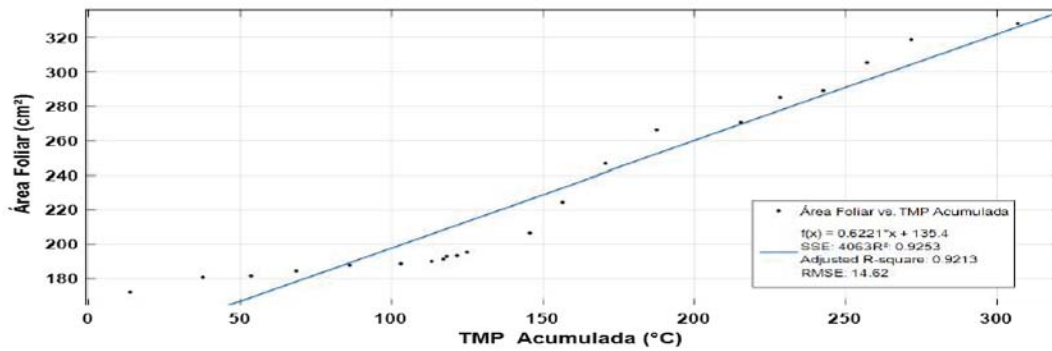


Figura 93. Equação de regressão linear.

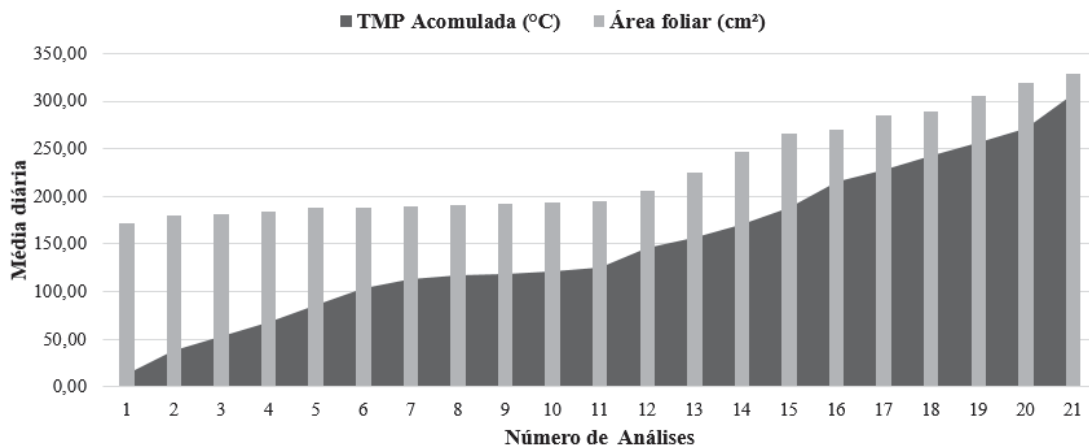


Figura 94. Tendência gráfica entre área foliar e temperatura acumulada.

## 5.5 BENEFÍCIOS E CUSTOS DA PLATAFORMA DESENVOLVIDA

A existência de um software para a cultura do morangueiro possibilita, por exemplo, organizar dados meteorológicos, automatizar cálculos sob grandes diferenciais, quantificar a dimensão de área foliar que recebe a radiação solar, e executar modelos de simulação para prever crescimento e produtividade. Ainda mais, em formato de plataforma, pode-se realizar medidas de variações climáticas ambientais diversas, integradas ao software, para o acompanhamento da cultura e auxílio a produtores e pesquisadores na tomada de decisão.

Diante do exposto, o processo exaustivo, manual e suscetível a erros de realizar capturas de áreas foliares por meio de régua escalonada e tabelas de referência pode ser evitado. Além disso, o software pode atuar como uma ferramenta de apoio valiosa ao especialista, em conjunto com a verificação visual e experiência acumulada no manejo da cultura. Por fim, a plataforma proposta também contribui ecologicamente para a redução de químicos e permite evolução para incorporar novos meios tecnológicos para a Agricultura.

Além disso o protótipo também permite a expansão para um número maior de sensores meteorológicos inclusive outros modelos de câmeras como *spectral NDVI*, as quais estão sendo utilizadas

para monitoramento por veículos aéreos Drones para inspeção e controle da vegetação na agricultura e na pecuária.

Para a construção comercial deste protótipo, estima-se um custo em torno R\$1.200,00, detalhado pela Tabela 18 (sem inclusão de lucros). Ela demonstra a relação orçamentária do investimento desse projeto. Cabe ressaltar que os custos estimados foram de responsabilidade do pesquisador.

Tabela 18. Planilha de custos para o desenvolvimento do projeto.

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor</b>
<b>1</b>	Sensor de pressão MPXV5100GP	1	R\$ 90,00
<b>2</b>	Filtro Ultra Violeta	1	R\$ 56,00
<b>3</b>	Sensor Radiação S1336 foto diodo	1	R\$ 47,00
<b>4</b>	Sensor NTC TYPE18	1	R\$ 33,00
<b>5</b>	Sensor umidade Temperatura do AR DHT22/SHT15	1	R\$ 9,00
<b>6</b>	Câmera RGB Rapberry Pi	1	R\$ 160,00
<b>7</b>	MCP3008 - 8-CHANNEL 10-BIT ADC	1	R\$ 42,00
<b>8</b>	Placa para PCB Designer (10x10cm)	1	R\$ 45,00
<b>9</b>	PIC 16F877A	1	R\$ 22,00
<b>10</b>	Componentes Diversos (Eletronicos, PVC, Haste)	-	R\$ 120,00
<b>11</b>	Módulo Bluetooth HC05	1	R\$ 25,00
<b>12</b>	Raspberry PI Model PI 3	1	R\$ 360,00
<b>13</b>	Cartão SD (Memória) 32G	1	R\$ 60,00
<b>14</b>	Case IP68 para confecção do Tensiômetro	1	R\$ 25,00
<b>15</b>	Fonte de alimentação AC/DC 5V	1	R\$ 80,00
<b>Total</b>			<b>R\$ 1.174,00</b>

## 6. CONCLUSÃO

Plataformas de visão computacional são fontes de informações amplamente necessárias para agricultura. Sistemas que possibilitam a coleta de informações na agricultura, como sensores meteorológicos e dados visuais trazem grande potencial benéfico, com a quantização dos dados no plantio, por meio de acompanhamento fenológico da planta, até a contribuição para a sanidade do morangueiro, e também o aumento da produção e a qualidade do fruto.

Pelos resultados alcançados, pode-se concluir que a solução embarcada proposta mostrou uma nova abordagem com potencial para fenotipagem de alta precisão para pesquisadores, bem como ferramenta usual à produtores.

O embasamento teórico e técnico foi fundamental para desenvolvimento da plataforma, dada ao conjunto de meios de processamento de imagem para a computação visual e de itens de hardwares empregados na implementação do projeto.

A pesquisa também oportunizou contato com projetos tecnológicos aplicados a cultura do morangueiro, visando identificar semelhanças e métodos já utilizados, e a comprovação da viabilidade da ferramenta no auxílio a pesquisadores e produtores. Dessa forma, pode-se estabelecer o sistema embarcado e o software desenvolvido como diferenciais da abordagem proposta - em especial, o uso de visão computacional para determinar a área foliar.

A união das áreas de Engenharia Elétrica, Ciência da Computação e Agronomia mostrou a viabilidade de integração de conhecimentos em uma plataforma embarcada útil. A solução sintetizou dados coletados na estufa, processou imagens e gerou dados estatísticos disponíveis para apreciação ou armazenamento para pessoas interessadas na cultura. Contudo, a ferramenta demanda aprendizado de operação para satisfazer os requisitos do usuário.

Em relação os resultados obtidos, as comparações entre os métodos aplicados, mesmo com erros condicionados pelas características da lona, quanto do manejo, ainda apresentam informações quantitativas e ricas para modelagem fisiológica da planta. Nesse aspecto, a plataforma acompanhou a evolução do cultivar e contribuiu com os profissionais da Agronomia, possibilitando fenotipagem de alta precisão e descoberta de novos conhecimentos.

A implementação dessa tecnologia também gerou um projeto potencialmente econômico, viabilizando qualquer investimento nesta linha. Além disso, a aplicação de recursos visuais deste trabalho rendeu uma publicação no SIBGRAPI, principal conferência da América Latina sobre processamento de imagens e visão computacional, promovida anualmente pela Sociedade Brasileira de Computação (SBC). Diante do interesse apresentado, também está em tramitação junto à UPF o registro de software da solução proposta.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Com a conjectura da indagação deste trabalho, aponta-se novos rumos para estudos e desenvolvimento, os quais:

- A exploração da plataforma em diversas culturas;
- Implementar um sistema mecânico de movimentação para coleta de varias culturas em sequencia;
- Identificar e fazer uso de novas tecnologias de processamento de imagem;
- Aprimorar estudos da fenologias para tomada de decisão automática no campo;
- Adicionar redes neurais ou algoritmos genéticos no levantamento de tendências de produtividade fundamentado no treinamentos da rede com as amostras e dados coletados;
- Introduzir algoritmos para detecção de pragas e capazes de verificar doenças foliares por pigmentação no inicio do ataque;
- Inserir gerador de relatório por meio da interface gráfica;
- Armazenar informações em Banco de dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANTUNES, L. E. C.; JUNIOR, C. R. Caracterização da produção de morangos no brasil.
- [2] FAOSTAT, F. *Agricultural Production strawberry. A Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2016. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/E>>.
- [3] RONQUE, E. *Cultura do morangueiro: revisão e prática*. Curitiba: EMATER/PR, 1998.
- [4] BERNARDI, J. et al. *Sistema de Produção de Morango para Mesa na Região da Serra Gaúcha e Encosta Superior do Nordeste*. Vacaria: Embrapa Uva e Vinho, 2005.
- [5] PFOST, D. L.; CASADY, W. W.; SHANNON, K. Precision agriculture: Global positioning system (gps). *Extension publications (MU)*, University of Missouri Office of Extension, 1998.
- [6] GEMTOS, T.; FOUNTAS, S.; AGGELOPOULOU, K. Precision agriculture applications in horticultural crops in greece and worldwide. In: HAICTA. *HAICTA*. Skiathos, Greece. p. 451–462.
- [7] XU, Y. et al. Two-stage approach for detecting slightly overlapping strawberries using hog descriptor. *Biosystems engineering*, Elsevier, v. 115, n. 2, p. 144–153, 2013.
- [8] LIMING, X.; YANCHAO, Z. Automated strawberry grading system based on image processing. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 71, p. S32–S39, 2010.
- [9] YEH, Y.-H. et al. Strawberry foliar anthracnose assessment by hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 122, p. 1–9, 2016.
- [10] HAYASHI, S. et al. Development of a movable bench system for strawberries and the potential for plant growth measurement. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 46, n. 18, p. 231–234, 2013.
- [11] PALHA, M. et al. Manual do morangueiro. *Edição PO AGRO DE&D*, n. 193, 2005.
- [12] OLIVEIRA, A. C. B. de; BONOW, S. Novos desafios para o melhoramento genético da cultura do morangueiro no brasil. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, v. 33, n. 268, p. 21–26, 2012.
- [13] SENTELAHS PAULO CESAR AND AULA, L. R. A. Radiação Solar Balanço de Energia LCE 306 – Meteorologia Agrícola. 2009.
- [14] TRENTIN, R. et al. Soma térmica de subperíodos do desenvolvimento da planta de melancia. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 38, n. 9, 2008.
- [15] WILHELM, W.; MCMASTER, G. S. Importance of the phyllochron in studying development and growth in grasses. *Crop Science*, Crop Science Society of America, v. 35, n. 1, p. 1–3, 1995.

- [16] ROSA, H. T. et al. Crescimento vegetativo e produtivo de duas cultivares de morango sob épocas de plantio em ambiente subtropical. *Revista Ciência Agronômica*, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, v. 44, n. 3, p. 604, 2013.
- [17] HANAUER, J. G. Crescimento, desenvolvimento e produtividade de cana-de-açúcar em cultivo de cana-planta e cana soca de um ano em santa maria, rs. *Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, RS, Brasil*, 2011.
- [18] TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre, BR: Universitat Jaume I, 2006. v. 10.
- [19] FRISINA, V.; ESCOBEDO, J.; GOMES, E. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (par) em estufa de polietileno. In: SCIELO BRASIL. *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*. Campinas-SP, Brasil, 2000.
- [20] LAWLOR, D. W. et al. *Photosynthesis: molecular, physiological and environmental processes*. Harlow, UK: Longman scientific & technical, 1993.
- [21] WATSON, D. J. The physiological basis of variation in yield. *Advances in agronomy*, Elsevier, v. 4, p. 101–145, 1952.
- [22] BRANZANTI, E. C.; JOSÉ, A.; ECHEVARRÍA, P. H. *La fresa*. Ciudad de Mexico: Mundi-prensa, 1989.
- [23] ANDRIOLO, J. L. et al. Concentração da solução nutritiva no crescimento da planta, na produtividade e na qualidade de frutas do morangueiro. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 39, n. 3, p. 684–690, 2009.
- [24] CUBERO, S. et al. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, Springer, v. 4, n. 4, p. 487–504, 2011.
- [25] MARENGONI, M.; STRINGHINI, S. Tutorial: Introdução à visão computacional usando opencv. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, v. 16, n. 1, p. 125–160, 2009.
- [26] SOLEM, J. E. *Programming Computer Vision with Python: Tools and algorithms for analyzing images*. Gravenstein Highway North Sebastopol, EUA: "O'Reilly Media, Inc.", 2012.
- [27] GONZALEZ, R. C. et al. *Digital Image Processing Library of Congress Cataloging-in-Publication Data on File*. Nova Jersey, EUA: Prentice Hall, 2002.
- [28] QUEIROZ, J. E. R. de; GOMES, H. M. Introdução ao processamento digital de imagens. *RITA*, v. 13, n. 2, p. 11–42, 2006.
- [29] HEWITT, P. G.; LIRA, J. A. F. *Física conceptual*. Boston, USA: Addison Wesley, 1999. v. 6.
- [30] IMENTO, L. D. E. E. M.; DA, O. E. L. *Termodinâmica*. 2004.



- [31] MORAES, E. d.; FIORIO, P. R. Fundamentos de sensoriamento remoto. *São José dos Campos: INPE*, 2002.
- [32] MENESES, P. Fundamentos de sensoriamento remoto. *Universidade de Brasília. Brasília-DF: Departamento de Geociências. Brasília. Texto Universitário*, 2004.
- [33] SCURI, A. E. Fundamentos da imagem digital. *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, 1999.
- [34] HORNBECK, L. J. et al. Digital light processing for high-brightness, high-resolution applications. In: *Proc. SPIE*. Dallas-TX, USA: Texas Instruments Incorporated, 1997. v. 3013, p. 27–40.
- [35] RENKER, D.; LORENZ, E. Advances in solid state photon detectors. *Journal of Instrumentation*, IOP Publishing, v. 4, n. 04, p. P04004, 2009.
- [36] FOSSUM, E. R. Cmos image sensors: Electronic camera-on-a-chip. *IEEE transactions on electron devices*, IEEE, v. 44, n. 10, p. 1689–1698, 1997.
- [37] KAUFMAN, L. *Sight and mind: An introduction to visual perception*. United Kingdom, UK: Oxford U. Press, 1974.
- [38] SHI, Y.; YANG, J.; WU, R. Reducing illumination based on nonlinear gamma correction. In: IEEE. *Image Processing, 2007. ICIP 2007. IEEE International Conference on*. San Antonio-TX, USA, 2007. v. 1, p. 1–529.
- [39] BOVIK, A. C. *Handbook of image and video processing*. San Diego, California, USA: Academic press, 2010.
- [40] POYNTON, C. A. *A technical introduction to digital video*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [41] BUADES, A.; COLL, B.; MOREL, J.-M. A non-local algorithm for image denoising. In: IEEE. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*. San Diego, USA, 2005. v. 2, p. 60–65.
- [42] PORTILLA, J. et al. Image denoising using scale mixtures of gaussians in the wavelet domain. *IEEE Transactions on Image processing*, IEEE, v. 12, n. 11, p. 1338–1351, 2003.
- [43] RUDIN, L. I.; OSHER, S.; FATEMI, E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Elsevier, v. 60, n. 1-4, p. 259–268, 1992.
- [44] TAKEDA, H.; FARSIU, S.; MILANFAR, P. Kernel regression for image processing and reconstruction. *IEEE Transactions on image processing*, IEEE, v. 16, n. 2, p. 349–366, 2007.
- [45] BOVIK, A. C. *The essential guide to video processing*. San Diego, California, USA: Academic Press, 2009.

- [46] YAJI, H.; STIMPSON, B. Conversion between colour spaces. *Master of Science Thesis, Glasgow, United Kingdom, University of Strathclyde, 2005.*
- [47] FORD, A.; ROBERTS, A. Colour space conversions. *Westminster University, London, v. 1998, p. 1–31, 1998.*
- [48] PASCALE, D. A review of rgb color spaces... from xyy to r'g'b'. *Babel Color, 2003.*
- [49] GONZALEZ, R. C. Richard e. woods. *Digital image processing*, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, Nova Jersey, EUA, v. 2, 2002.
- [50] GONZALEZ, R.; RICHARD, E. C., and Woods, R., E., 2002. *Digital image processing*. Nova Jersey, EUA: Prentice Hall, 2002.
- [51] REINHARD, E. et al. Color transfer between images. *IEEE Computer graphics and applications*, IEEE, v. 21, n. 5, p. 34–41, 2001.
- [52] AZEVEDO, J. d. et al. Aspectos sobre o manejo da irrigação por aspersão para o cerrado. *Planaltina: Embrapa-CPAC, 1983.*
- [53] HEARN, D.; BAKER, M. P. *Computer graphics prentice hall international. 1986.*
- [54] LIN, C.; SU, C.-H. Using hvs color space and neural network for face detection with various illuminations. In: WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACADEMY AND SOCIETY (WSEAS). *Proceedings of the 2007 annual Conference on International Conference on Computer Engineering and Applications*. Gold Coast, Australia, 2007. p. 480–485.
- [55] SMITH, J. R.; CHANG, S.-F. Single color extraction and image query. In: IEEE. *Image processing, 1995. Proceedings., International conference on*. Washington, USA, 1995. v. 3, p. 528–531.
- [56] TABAKOV, S. D. Introduction to vision, colour models and image compression. *MEDICAL PHYSICS INTERNATIONAL*, v. 1, n. 1, p. 50, 2013.
- [57] KERR, D. A. The hsv and hsl color models and the infamous hexcones. *72 nd Special*, v. 3, n. 1, 2008.
- [58] OLIVEIRA, V.; CONCI, A. Skin detection using hsv color space. In: H. Pedrini, & J. Marques de Carvalho, *Workshops of Sibgrapi*. Rio de Janeiro Niteroi - Brasil: Sibgrapi, 2009. p. 1–2.
- [59] SZELISKI, R. *Computer vision: algorithms and applications*. Ithaca, NY: Springer Science & Business Media, 2010.
- [60] BRADSKI, G.; KAEHLER, A. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472.: "O'Reilly Media, Inc.", 2008.
- [61] BRADSKI, G.; KAEHLER, A. *Learning opencv [m]*. Yu Shiqi, Liu Ruizhen. Beijing: Tsinghua University, 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472., v. 10, 2009.

- [62] OZTURK, C.; HANCER, E.; KARABOGA, D. Color image quantization: a short review and an application with artificial bee colony algorithm. *Informatica*, Vilnius University Institute of Mathematics and Informatics, v. 25, n. 3, p. 485–503, 2014.
- [63] PUJOL, A.; CHEN, L. Color quantization for image processing using self information. In: IEEE. *Information, Communications & Signal Processing, 2007 6th International Conference on*. Singapore, 2007. p. 1–5.
- [64] BRAQUELAIRE, J.-P.; BRUN, L. Comparison and optimization of methods of color image quantization. *IEEE transactions on image processing*, IEEE, v. 6, n. 7, p. 1048–1052, 1997.
- [65] SIMARD, P. Y. et al. A foreground-background separation algorithm for image compression. In: IEEE. *Data Compression Conference, 2004. Proceedings. DCC 2004*. Snowbird, UT, USA, 2004. p. 498–507.
- [66] THAKORE, D. G. Evaluation enhancement development and implementation of content based image retrieval algorithms. Gujarat, 2011.
- [67] MADDALENA, L.; PETROSINO, A. Multivalued background/foreground separation for moving object detection. *Fuzzy Logic and Applications*, Springer, p. 263–270, 2009.
- [68] GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing. Ed III*. New Jersey: Pearson Education Asia, 2007.
- [69] KANG, W.-X.; YANG, Q.-Q.; LIANG, R.-P. The comparative research on image segmentation algorithms. In: IEEE. *Education Technology and Computer Science, 2009. ETCS'09. First International Workshop on*. Wuhan, Hubei, China, 2009. v. 2, p. 703–707.
- [70] BAGGIO, D. L. *OpenCV 3.0 Computer Vision with Java*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd, 2015.
- [71] SAHOO, P. K.; SOLTANI, S.; WONG, A. K. A survey of thresholding techniques. *Computer vision, graphics, and image processing*, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 233–260, 1988.
- [72] KAPUR, J. N.; SAHOO, P. K.; WONG, A. K. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer vision, graphics, and image processing*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 273–285, 1985.
- [73] BRADSKI, G.; KAEHLER, A. *O'Reilly learning OpenCV*. 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472.: Editora: O'Reilly Media, Inc, 2008.
- [74] BRADLEY, P. S.; FAYYAD, U. M. Refining initial points for k-means clustering. In: *ICML*. Redmond, WA: Editora: Microsoft Research, 1998. v. 98, p. 91–99.
- [75] WAGSTAFF, K. et al. Constrained k-means clustering with background knowledge. In: *ICML*. Ithaca, NY 14853 USA: DaimlerChrysler Research and Technology Center, 2001. v. 1, p. 577–584.

- [76] TOU, J. T.; GONZALEZ, R. C. Pattern recognition principles. Nova Jersey, EUA, 1974.
- [77] RAY, S.; TURI, R. H. Determination of number of clusters in k-means clustering and application in colour image segmentation. In: CALCUTTA, INDIA. *Proceedings of the 4th international conference on advances in pattern recognition and digital techniques*. Monash University, Wellington Road, Clayton, Victoria, 3168, Australia, 1999. p. 137–143.
- [78] NORRIS, D. *The Internet of Things: Do-It-Yourself at Home Projects for Arduino, Raspberry Pi and BeagleBone Black*. New York, NY: Tab Electronics, 2015.
- [79] VALVANO, J. *Embedded microcomputer systems: real time interfacing*. Stanford, CA 94305, EUA: Cengage Learning, 2011.
- [80] VERMESAN, O.; FRIESS, P. *Internet of things-from research and innovation to market deployment*. Forest Hills, NY: River Publishers Aalborg, 2014. v. 29.
- [81] VAHID, F.; GIVARGIS, T. *Embedded system design: A unified hardware/software approach*. Department of Computer Science and Engineering University of California, University of California, 1999.
- [82] GHOSH, A. K. *Introduction to measurements and instrumentation*. New Delhy: PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- [83] MAZDA, F. F. *Electronics engineer's reference book*. Boston Cummings Park, Woburn, Mass: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [84] TURNER, L. W. *Electronics engineer's reference book*. Boston Cummings Park, Woburn, Mass: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [85] SCHNUBEL, M. *Today's Technician: Automotive Heating & Air Conditioning Classroom Manual and Shop Manual*. Clifton Park, NY: Nelson Education, 2016.
- [86] CAMARGO, Â. P. de; GROHMANN, F.; CAMARGO, M. B. P. de. Tensiômetro simples de leitura direta. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 17, n. 12, p. 1763–1772, 1982.
- [87] LIBARDI, P. L. *Dinâmica da Água no Solo Vol. 61*. São Paulo-SP, Brasil: Edusp, 2005.
- [88] RICHARDS, L. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*, LWW, v. 68, n. 1, p. 95, 1949.
- [89] KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. *Elements of soil physics*. Amsterdam, Netherland: Elsevier, 1983. v. 13.
- [90] HAINES, W. B. Studies in the physical properties of soil. v. the hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith. *The Journal of Agricultural Science*, Cambridge Univ Press, v. 20, n. 01, p. 97–116, 1930.

- [91] OKABE, A. M. D. S. et al. Monitoramento da temperatura e umidade relativa em um ambiente para secagem de madeira. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2015.
- [92] ROCKLAND, L. B. Saturated salt solutions for static control of relative humidity between 5° and 40° c. *Analytical Chemistry*, ACS Publications, v. 32, n. 10, p. 1375–1376, 1960.
- [93] CREAHAN, J. Controlling relative humidity with saturated calcium nitrate solutions. *Newsletter (Western Association for Art Conservation)*, v. 13, n. 1, p. 17–18, 1991.
- [94] ALVES, M. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologías de aplicação. *Viçosa, Brasil: Editora UFV*, 2004.
- [95] PAES, T. F. et al. Sistemas de caracterização elétrica e ótica de detectores fotovoltaicos para radiômetros. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES, 2012.
- [96] DECUIR, J. et al. Bluetooth 4.0: low energy. *Cambridge, UK: Cambridge Silicon Radio SR plc*, v. 16, 2010.
- [97] CHEN, S.; YAO, J.; WU, Y. Analysis of the power consumption for wireless sensor network node based on zigbee. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 29, p. 1994–1998, 2012.
- [98] HABBAL, M. Bluetooth low energy—assessment within a competing wireless world. In: *Proc. of Wireless Congress 2012-Systems & Applications*. Fraunhoferstr Planegg, Germany: Atlantik Elektronik, 2012.
- [99] CHOUDHURY, S. et al. Zigbee and bluetooth network based sensory data acquisition system. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 48, p. 367–372, 2015.
- [100] MOREDA, G. et al. Shape determination of horticultural produce using two-dimensional computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, Elsevier, v. 108, n. 2, p. 245–261, 2012.
- [101] VALÉRIO, A. de M.; KAMPEL, M.; STECH, J. L. Aplicação da técnica sam (spectral angle mapper) para dados hiperespectrais do corpo de água do reservatório de manso, mt.
- [102] RICHARDSON, M.; WALLACE, S. *Getting Started with Raspberry Pi*. Gravenstein Hwy N, Sebastopol, CA 95472, EUA: "O'Reilly Media, Inc.", 2012.
- [103] MOLLOY, D. *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*. Crosspoint Blvd, Indianapolis, IN 46256, EUA: John Wiley & Sons, 2016.
- [104] ALDUCHOV, O. A.; ESKRIDGE, R. E. Improved magnus form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, v. 35, n. 4, p. 601–609, 1996.
- [105] MAGNUS, G. Versuche über die spannkkräfte des wasserdampfs. *Annalen der Physik*, Wiley Online Library, v. 137, n. 2, p. 225–247, 1844.

- [106] AUGUST, E. Ueber die berechnung der expansivkraft des wasserdunstes. *Annalen der Physik*, Wiley Online Library, v. 89, n. 5, p. 122–137, 1828.
- [107] BUSCH, K. W.; BUSCH, M. A. *Multielement detection systems for spectrochemical analysis*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1990.
- [108] WEBSTER, J. G.; EREN, H. *Measurement, instrumentation, and sensors handbook: spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement*. New York, NY: CRC press, 2014. v. 1.
- [109] TOOLEY, M. *Circuitos Eletrônicos*. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2007.
- [110] SINCLAIR, I. *Sensors and transducers*. United Kingdom, UK: Newnes, 2000.
- [111] BOLTON, W. *Instrumentation and control systems*. The Boulevard Langford Lane Kidlington Oxford OX5 1GB, UK: Newnes, 2015.
- [112] FRADEN, J. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. San Diego California, USA: AAPT, 1998.
- [113] TANDESKE, D. *Pressure sensors: selection and application*. New York, NY: CRC Press, 1990.
- [114] RIGELSFORD, J. Pressure sensors: Selection and application. *Sensor Review*, Emerald Group Publishing, Limited, v. 22, n. 3, p. 265, 2002.
- [115] JAMES, L. G. et al. *Principles of farm irrigation systems design*. Chichester, UK: John Wiley and Sons Limited, 1988.
- [116] PEREIRA, A.; MACHADO, E. *Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais*. [S.l.]: IAC, 1987.
- [117] STRIK, B. C.; PROCTOR, J. T. Estimating the area of trifoliate and unequaly imparipinnate leaves of strawberry. *HortScience*, v. 20, n. 6, p. 1072–1074, 1985.
- [118] QUEIROZ-VOLTAN, R. B. et al. Caracterização botânica de cultivares de morangueiro. *Bragantia*, v. 55, n. 1, p. 29–44, 1996.