

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS - MG  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA – BCT  
CAMPUS AVANÇADO DE POÇOS DE CALDAS

**GUILHERME FELIPE XAVIER**

**SENSORIAMENTO E AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
EM CULTIVOS EM SUBSTRATO**

POÇOS DE CALDAS - MG  
2023

**GUILHERME FELIPE XAVIER**

**SENSORIAMENTO E AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
EM CULTIVOS EM SUBSTRATO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfnas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

**Orientador :** Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano

## RESUMO

A necessidade de se desenvolver sistemas de cultivo de alimentos que utilizem racional e eficientemente os recursos hídricos é de extrema importância. Não somente, técnicas que permitam melhor uso do tempo e mão de obra também se fazem importantes. Nesse contexto, o presente trabalho tem a finalidade de propor um arranjo automatizado de irrigação, utilizando a plataforma Arduino e componentes eletrônicos de baixo custo comercialmente disponíveis. Ademais, faz-se a comparação entre os métodos de irrigação automatizado e manual, de modo a traçar o perfil de desenvolvimento de cultivares de alface mimosa *Lactuca sativa* bem como seu consumo hídrico. Para este objetivo, realizou-se a calibração de dois sensores de umidade do solo distintos - um capacitivo e outro resistivo - , de modo a determinar o desempenho de cada um e selecionar o dispositivo que melhor se encaixa no escopo deste trabalho. Além disso, fez-se a calibração da bomba de água utilizada, de modo a determinar o tempo de operação mais adequado para satisfazer as condições de umidade do substrato utilizado. O protótipo também foi construído com elementos de interface homem máquina - display lcd - e sensores de chuva, temperatura e umidade do ar. Por fim, no decorrer de três semanas fez-se a análise do desempenho de 4 amostras de cultivares, sendo duas delas submetidas à irrigação automatizada e as demais submetidas à irrigação manual. A taxa de crescimento e aspectos visuais foram adotados como parâmetros de comparação. Foi observado que a distribuição balanceada e em menores quantidades de água se provaram mais eficazes no desenvolvimento de amostras de alface com melhor qualidade, quando comparado ao fornecimento hídrico em função da demanda do substrato.

Palavras - Chave : Irrigação automatizada; arduino; calibração ; consumo hídrico.

## ABSTRACT

The need to develop food cultivation systems that rationally and efficiently use water resources is extremely important. Not only, techniques that allow better use of time and labor are also important. In this context, the present work aims to propose an automated irrigation system, using the Arduino platform and commercially available low-cost electronic components. Furthermore, a comparison is made between automated and manual irrigation methods, in order to trace the development profile of *Lactuca sativa* mimosa lettuce cultivars as well as their water consumption. For this purpose, two different soil moisture sensors were calibrated - one capacitive and the other resistive - in order to determine the performance of each and select the device that best fits the scope of this work. In addition, the water pump used was also calibrated in order to determine the most adequate operating time to satisfy the humidity conditions of the substrate used. The prototype was also built with man-machine interface elements - lcd display - and rain, temperature and air humidity sensors. Finally, over three weeks, the performance of 4 samples of cultivars was analyzed, two of which were submitted to automated irrigation and the remaining other submitted to manual irrigation. The growth rate and visual aspects were adopted as comparison parameters. It was observed that the balanced distribution of smaller amounts of water proved to be more effective in the development of lettuce samples with better quality when compared to the water supply in function of the substrate demand.

Keywords: Automated irrigation; arduino; calibration; water consumption.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Irrigação superficial por inundação (à direita) e por sulcos (à esquerda).	14
Figura 2 - Princípio de atuação da irrigação subsuperficial.	15
Figura 3 - Irrigação por aspersão.	16
Figura 4 - Irrigação localizada.	18
Figura 5 - Custo de implantação de sistemas de irrigação por hectare.	20
Figura 6 - Vida útil e custo percentual de manutenção de sistemas de irrigação.	21
Figura 7 - Pré seleção técnica de sistemas de irrigação por tipo de cultivar.	21
Figura 8 - Pré seleção de sistemas de irrigação por fonte de água disponível.	22
Figura 9 - Esquema de um tensiômetro simples.	26
Figura 10 - Sensor de umidade do solo capacitivo v1.2.	28
Figura 11 - Sensor de umidade do solo resistivo.	29
Figura 12 - Sensor DHT11 e pinagem.	30
Figura 13 - Módulo sensor de chuva.	31
Figura 14 - Micro bomba de água submersível.	31
Figura 15 - Display LCD I2C.	32
Figura 16 - Módulo relé 2 canais 5V.	33
Figura 17 - Microcontrolador Arduino UNO R3.	34
Figura 18 - Diagrama de conexões para o sensor de umidade do solo capacitivo.	36
Figura 19 - Fluxograma de programação para o sensor de umidade do solo capacitivo.	37
Figura 20 - Diagrama de conexões para o sensor de umidade do solo resistivo.	40
Figura 21 - Diagrama de conexões para a mini bomba 5V submersível.	42
Figura 22 - Fluxograma de programação para a mini bomba de água .	43
Figura 23 - Diagrama de conexões para o sensor de chuva.	44
Figura 24 - Fluxograma de programação para o sensor de chuva.	45
Figura 25 - Diagrama de conexões para o sensor de temperatura e umidade DHT11.	46
Figura 26 - Fluxograma de programação para o sensor de temperatura	

e umidade DHT11.	47
Figura 27 - Diagrama de conexões para o protótipo.	50
Figura 28 - Fluxograma de programação para o protótipo.	52
Figura 29 - Substrato encharcado com 140 mL de água.	57
Figura 30 - Curva de calibração do sensor de umidade do solo capacitivo.	58
Figura 31 - Curva de calibração do sensor de umidade do solo capacitivo linearizada.	60
Figura 32 - Curva de calibração do sensor de umidade do solo resistivo.	65
Figura 33 - Curva de calibração da mini bomba de água.	68
Figura 34 - Probabilidade percentual de ocorrência para $\chi^2_{\text{red}}$ .	70
Figura 35 - Visão geral do protótipo.	73
Figura 36 - Visão frontal do protótipo.	73
Figura 37 - Cultivares antes do plantio em substrato.	75
Figura 38 - Perfil de desenvolvimento dos cultivares : Altura.	76
Figura 39 - Perfil de desenvolvimento dos cultivares : Número de folhas.	77
Figura 40 - Desenvolvimento dos cultivares no sistema automatizado (esquerda) e manual (direita).	79
Figura 41 - <i>Tip burn</i> , amostra 4.	79
Figura 42 - Perfil de consumo hídrico por sistema de irrigação adotado.	80
Figura 43 - Desenvolvimento dos cultivares no sistema automatizado (esquerda) e manual (direita).	81
Figura 44 - Cultivares após retirada do substrato e subsequente lavagem.	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cotação dos elementos construtivos do protótipo	48
Tabela 2 - Calibração do Sensor de Umidade do Solo.	55
Tabela 3 - Relação Massa/Volume/Umidade.	56
Tabela 4 - Dados para a linearização.	58
Tabela 5 - Teste do qui-quadrado.	61
Tabela 6 - Calibração do sensor resistivo.	63
Tabela 7 - Relação Massa/Volume/Umidade.	63
Tabela 8 - Volume bombeado em função do tempo.	67
Tabela 9 - Teste do qui-quadrado.	69
Tabela 10 - Respostas do sensor de chuva sob diferentes condições de teste.	71
Tabela 11 - Dimensões dos cultivares antes do plantio.	75
Tabela 12 - Qualidade dos modelos de Tendência: Altura.	77
Tabela 13 - Qualidade dos modelos de Tendência: Número de Folhas.	78
Tabela 14 - Dimensões dos cultivares no término do ciclo de cultivo.	82

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1. OBJETIVO GERAL	11
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3. JUSTIFICATIVA	11
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
2.1. CONDIÇÕES ÓTIMAS PARA CULTIVO	12
2.2. SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	13
2.2.1. Irrigação Superficial	14
2.2.2. Irrigação subsuperficial	15
2.2.3. Irrigação por aspersão	16
2.2.4. Irrigação localizada	17
2.2.5. Visão geral, Custos e Critérios de escolha	19
2.3. ACOMPANHAMENTO DO CICLO DE CULTIVO	23
2.4. MEDIÇÃO DE UMIDADE DO SOLO	23
2.4.1. Método gravimétrico	24
2.4.2. Método das pesagens	25
2.4.3. Método tensiométrico	25
2.4.4. Método da resistência elétrica	27
2.4.5. Método da capacitância elétrica	27
2.5. SENSOR DE UMIDADE DO SOLO CAPACITIVO V1.2	27
2.6. SENSOR DE UMIDADE DO SOLO RESISTIVO	28
2.7. SENSOR DE TEMPERATURA DHT11	29
2.8. SENSOR DE CHUVA	30
2.9. MICRO BOMBA DE ÁGUA SUBMERSÍVEL	31
2.10. DISPLAY LCD I2C	32
2.11. MÓDULO RELÉ 2 CANAIS	33

2.12. MICROCONTROLADOR ARDUINO UNO	34
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
3.1. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO CAPACITIVO	35
3.2. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO RESISTIVO	40
3.3. MONTAGEM DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO	41
3.4. CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DA BOMBA DE ÁGUA	42
3.5. SENSOR DE CHUVA	44
3.6. SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE DHT11	45
3.7. MATERIAIS UTILIZADOS	47
3.8. MONTAGEM DO PROTÓTIPO	49
3.9. MONITORAMENTO DO CICLO DE CULTIVO	53
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>54</b>
4.1. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO CAPACITIVO	54
4.2. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO RESISTIVO	62
4.3. CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DA BOMBA DE ÁGUA	66
4.4. DESEMPENHO DO SENSOR DE CHUVA	70
4.5. DESEMPENHO DO PROTÓTIPO	72
4.6. ACOMPANHAMENTO DO CICLO DE CULTIVO	74
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>83</b>
<b>6. TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>85</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>86</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Considerando o cenário atual percebe-se que a produção agrícola tradicional vem sendo cada vez mais ameaçada pelas condições climáticas e disponibilidade de recursos indispensáveis para esta atividade. Engloba-se neste conjunto de recursos água para fertirrigação, espaço físico cultivável, mão de obra e capital (KOZAI, 2018).

Não somente, as condições climáticas variáveis e estado do solo cultivável após subsequentes ciclos de cultivo contribuem negativamente para uma produção robusta de alimentos agrícolas majoritariamente compostos por água, como as hortaliças e folhosos. Dessa forma, faz-se necessário a adoção de novas tecnologias e métodos de cultivo que reduzam o consumo de recursos limitados e ampliem, simultaneamente, o rendimento deste cultivo (THIESEN, 2020).

Nesse contexto, dispositivos eletrônicos e softwares *open-source*, como Arduino, contribuem imensamente para o desenvolvimento de tecnologias de automação e controle de sistemas. Não somente, a comunidade em nível mundial da Arduino permite o compartilhamento e acesso à informação referente ao software e boas práticas de programação, facilitando assim a obtenção de recursos físicos e digitais no decorrer de projetos.

Adotando algumas premissas básicas da chamada Agricultura de Precisão - *Precision Agriculture* - como o posicionamento geográfico (GPS), aquisição de informação, suporte de decisões e tratamento de variáveis, serão utilizados na metodologia deste trabalho as duas últimas ferramentas descritas. Com isso, um sistema que incorpora estes conceitos deveria, em tese, aumentar a produção do cultivo e reduzir o tempo de trabalho através do sensoriamento eficiente e da tomada de decisão por ferramentas digitais (PEDERSEN; LIND, 2017).

Assim sendo, no decorrer deste trabalho foram exploradas as ferramentas da plataforma Arduino em conjunto com dispositivos eletrônicos - sensores e atuadores - comercialmente disponíveis e de fácil acesso para a medição em tempo real das principais variáveis que limitam a qualidade do ciclo de cultivo, bem como o acionamento remoto de atuadores quando as condições físicas do substrato ficarem numa faixa abaixo do ideal - a partir dos dados de calibração dos dispositivo.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um protótipo de módulo de cultivo em substrato que permita a avaliação das condições físicas - temperatura e umidade -, bem como o controle de atuadores de maneira remota e autônoma a partir da calibração experimental de sensores eletrônicos comercialmente disponíveis.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Implementar um sistema de sensoriamento de temperatura e umidade do ambiente de cultivo;
- b) Implementar um sistema de sensoriamento da umidade do substrato;
- c) Comparar o desempenho de sensores comercialmente disponíveis a partir da calibração destes;
- d) Implementar um sistema de bombeamento de água de irrigação sob demanda;
- e) Implementar um sistema de monitoramento de chuva;
- f) Comparar a qualidade do produto final obtido através do método automatizado e através do método tradicional;

### 1.3. JUSTIFICATIVA

Devido à limitação de recursos, nos anos seguintes a produção agrícola de alimentos deverá passar por uma reforma de modo a atender a demanda global por alimentos. Assim sendo, o aumento dos rendimentos dos ciclos de cultivo deverá ocorrer em função de melhoras na qualidade tecnológica e metodológica, sendo apenas 10% desse aumento produtivo referente à extensão do espaço físico cultivável (KOZAI; NIU, 2020).

Assim sendo, a necessidade de preservar e diminuir o uso de recursos naturais limitados é de extrema importância para o suprimento global de alimentos. Através de ferramentas eletrônicas de baixo custo e fácil acesso, é possível então realizar a tomada de dados do ambiente de cultivo e realizar tomadas de decisão - controle de atuadores eletrônicos

- com base na demanda da espécie cultivada, diferentemente dos métodos tradicionais que pré estabelecem situações para atuação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CONDIÇÕES ÓTIMAS PARA CULTIVO

De acordo com o Manual de boas práticas agrícolas na produção de alface (MALDONADE *et al.*,2014), é de extrema importância a análise do solo/substrato na qual as cultivares serão produzidas. Assim sendo, deve-se observar se o substrato é livre de contaminantes químicos e biológicos. Além disso, quando considera-se o plantio em ambiente amplo e natural é preciso analisar a vizinhança do perímetro, sendo os principais tópicos de análise a presença de fontes potencialmente poluidoras - tanto do solo quanto das fontes hídricas próximas -, com ênfase na presença de criações de animais. Outros índices de viabilidade do solo são a presença de metais pesados, potencial hidrogeniônico e a concentração de micro e macronutrientes essenciais ao crescimento da planta (MALDONADE *et al.*,2014).

Ainda, deve-se analisar a qualidade da água de irrigação, tendo como parâmetros sua disponibilidade, salinidade, temperatura e pH. A técnica de irrigação também deve ser levada em consideração, visando a capacidade de adaptação da espécie e a eficiência do manejo da irrigação (MATOS,2011). A temperatura da água de irrigação, bem como do ambiente utilizado para a cultura, deve ficar entre 18 e 25°C segundo Kozai (2018). Entretanto, Freitas Junior (2018) indica que a temperatura ideal deve ser de 25 a 28°C. O controle da temperatura é fator importante porque permite que os cultivares absorvam água em quantidade superior aos nutrientes (FREITAS JUNIOR,2018).

Outro fator que influencia na qualidade do produto final é a concentração de CO<sub>2</sub> no meio e sua distribuição através da circulação do ar. Kozai(2018) indica que a concentração mínima, quando sob ótimas condições de circulação, deve ficar entre 500 e 2000 ppm. Para demais condições, é preferível adotar concentrações maiores de CO<sub>2</sub>. Entretanto, nota-se que os estudos de Kozai são referentes ao cultivo em ambientes controlados, como *greenhouses*.

Dessa forma, para o cultivo em ambiente aberto pode-se descartar o controle de CO<sub>2</sub> salvo quando a qualidade do ar seja muito prejudicial.

## 2.2. SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Segundo Testezlaf (2017), entende-se por irrigação as técnicas, formas e/ou meios utilizados para a aplicação de água, de maneira artificial, às plantas, de modo a satisfazer as necessidades da cultura e otimizar sua produtividade. Assim sendo, esta definição não exclui nem tampouco delimita as técnicas utilizadas para tal fim. Para que a otimização do uso dos recursos hídricos, bem como maiores produções de cultivares seja alcançada, é preciso levar em consideração a técnica de irrigação a ser utilizada e a disponibilidade de recursos para fazê-la.

Em outras palavras, é preciso considerar a quantidade de água a ser aplicada à cultura e também a maneira como vai ser aplicada, de modo a satisfazer as necessidades inerentes da planta. Como critério de determinação do melhor método de irrigação, pode-se considerar a capacidade de retenção de água do recipiente ou solo no qual se dá o ciclo de cultivo. Com isso, pode-se estimar uma quantidade padrão de água a ser disponibilizada num determinado intervalo de tempo, evitando o estresse hídrico do substrato e o desperdício de recursos hídricos (TESTEZLAF, 2017).

Para as hortaliças, é preciso identificar as características da espécie cultivada, tais como sua densidade e sistema de plantio típicos, demanda hídrica, altura média da planta e dimensão radicular da mesma (MAROUELLI; SILVA, 2011). Ainda, aspectos fitossanitários relacionados à ocorrência de pragas e disseminação de doenças nas plantas devem ser analisados, uma vez que determinados métodos de irrigação permitem maior disseminação fúngica e bactericida, bem como diminui a efetividade dos aditivos agrícolas.

Por fim, tem-se no mercado quatro classes de métodos e técnicas de irrigação, sendo elas constituídas por suas variações. São elas : irrigação superficial; irrigação subsuperficial; irrigação por aspersão e irrigação localizada.

### 2.2.1. Irrigação Superficial

A irrigação superficial pode ser aplicada através de sulcos, faixas e/ou inundações. É também conhecida por irrigação por gravidade, uma vez que a partir da aplicação de água na superfície do solo, no decorrer do tempo esta se movimenta e se infiltra no solo (TESTEZLAF, 2017). Ainda, pode-se caracterizar os métodos de irrigação superficial como sendo parciais ou totais. Quando aplicada em sulcos e faixas é chamada parcial e se infiltra através dos mesmos. Quando a água é aplicada por toda a superfície a ser irrigada, delimitada por diques e represas - irrigação por inundação - é chamada de irrigação superficial total. Neste último caso, a água é acumulada consideravelmente na superfície e é infiltrada à medida que a saturação do solo vai diminuindo. A figura 1 apresenta exemplos de irrigação por inundação e por sulcos.



Figura 1 - Irrigação superficial por inundação (à direita) e por sulcos (à esquerda).

Fonte: TESTEZLAF (2017), pg.26.

O custo da implantação de sistemas superficiais é geralmente reduzido; entretanto, é extremamente dependente do tipo de solo. Para minimizar os custos de implantação, é ideal que o terreno utilizado apresente superfície plana e baixas taxas de infiltração. Assim sendo, o custo pode aumentar consideravelmente caso seja necessário a normalização do campo de cultivo (MAROUELLI; SILVA, 2011).

Por fim, segundo Thiessen (2020) este sistema é pouco eficiente, uma vez que demanda grandes volumes de água devido à infiltrações profundas, além de provocar precoces salinização e erosão do local de cultivo.

### 2.2.2. Irrigação subsuperficial

Os métodos de irrigação subsuperficial baseiam-se na aplicação de água abaixo da superfície do solo. Por efeito de capilaridade, a água se locomove até a área radicular dos cultivares, resultando numa absorção hídrica baseada na necessidade da cultura (TESTEZLAF, 2017). Usualmente, os métodos subsuperficiais requerem baixo investimento inicial e pouca mão de obra. Entretanto, a normalização do terreno deve ser considerada, sendo preferível aplicação sobre áreas planas. Além disso, é recomendável a utilização de camadas de solo permeáveis sobrepostas à camadas impermeáveis, segundo Marouelli e Silva (2011).

Segundo Testezlaf (2017) pode-se aplicar diversas tecnologias para alcançar a irrigação subsuperficial. Dentre estas tecnologias, a implantação de gotejadores enterrados no solo - considerando uma profundidade que permita à zona radicular dos cultivares absorverem capilarmente essa água - , bem como o controle da elevação de lençóis freáticos estão dentre as técnicas mais utilizadas. A figura 2 apresenta o princípio de atuação da irrigação subsuperficial.

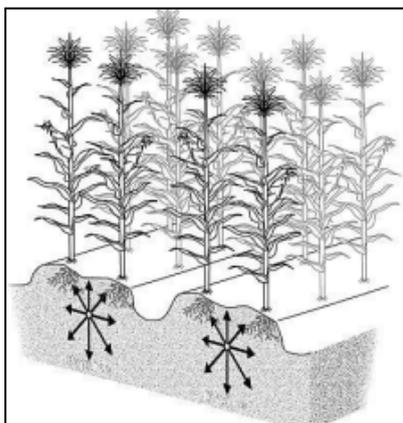


Figura 2 - Princípio de atuação da irrigação subsuperficial.

Fonte: TESTEZLAF (2017), pg.117.

Dentre as vantagens destes métodos vale ressaltar que a aplicação de agrotóxicos e adubos na parte superior das plantas - como folhagem e caules - não é lavada e eliminada dos cultivares. Além disso, o estresse hídrico provocado pelo excesso de água de irrigação é bem menor se comparado ao método de irrigação superficial.

### 2.2.3. Irrigação por aspersão

A irrigação por aspersão baseia-se na pulverização de água canalizada em pequenas gotículas, se assemelhando à chuva. A depender do tipo de cultura, é preferível o controle do tamanho das gotículas, de modo a facilitar sua penetração no solo e evitar acúmulo nas folhagens ( figura 3 ).

Dentre as tecnologias e tipos de irrigação por aspersão, pode-se classificar o método em mecanizado ou convencional. O primeiro tipo engloba as técnicas de pivô central; aspersão autopropelida e deslocamento linear. O segundo engloba instrumentos portáteis; semi portáteis e fixos (MAROUELLI; SILVA, 2011).



Figura 3 - Irrigação por aspersão.  
Fonte: TESTEZLAF (2017), pg.45.

Os métodos de aspersão dependem fortemente das condições climáticas, como velocidade do vento e baixa umidade relativa do ar, bem como temperatura. Esses fatores

influenciam na uniformidade de distribuição das gotículas de água, nas perdas por evaporação da água e obstrução, por cultivares de folhagens amplas ou altura elevada, da penetração da água nos solos e raízes (TESTEZLAF, 2017).

Ademais, os custos com equipamentos é relativamente alto e depende de mão de obra constante. A qualidade da distribuição das gotículas está diretamente ligada ao desempenho e eficiência dos equipamentos utilizados, sendo estes afetados pela intempéries das condições climáticas e da qualidade da água utilizada.

Dentre as vantagens da irrigação por aspersão pode-se incluir a mobilidade que certos instrumentos possuem, permitindo a aplicação de água em locais diversos conforme necessidade da cultura. Além disso, possui um maior alcance na distribuição da água de irrigação. Entretanto, alguns aspectos fitossanitários devem ser considerados. A pressão com a qual a água é expelida dos equipamentos, bem como sua intensidade, podem causar a lavagem de agrotóxicos das superfícies foliares das plantas, favorecendo a ocorrência de doenças, *tip burns* e proliferação fúngica (MAROUELLI; SILVA, 2011). A depender da cultura, a erosão precoce do solo também deve ser considerada.

#### 2.2.4. Irrigação localizada

A irrigação localizada consiste na aplicação de água numa área muito próxima da base da planta, sem molhar totalmente a superfície do solo. É característica deste tipo de irrigação a disponibilidade de água em pequenos volumes mas em alta frequência, evitando o estresse hídrico e otimizando o uso da água, segundo Testezlaf (2017).

Os principais métodos de irrigação localizada consiste no uso de gotejadores ou microaspersores ( figura 4 ). O primeiro método utiliza de canalizações com pressões na faixa de 50-200 kPa, com vazões variando entre 0,5 a 12 L.h<sup>-1</sup>. Já o segundo método utiliza pressões maiores - 100 a 300 kPa -, bem como uma vazão maior de água de irrigação - 30 a 200 L.h<sup>-1</sup> (TESTEZLAF, 2017).



Figura 4 - Irrigação localizada.  
Fonte: TESTEZLAF (2017), pg. 83.

O custo inicial para a implantação de sistemas de irrigação localizados é alto se comparado aos demais métodos. Entretanto, as perdas por evaporação ou infiltração profunda são praticamente desprezíveis. Além disso, o método permite a utilização da quimigação. Isto é, aplicação de produtos químicos como fertilizantes e inseticidas diretamente na corrente de água, mantendo sempre estes químicos em estado de alta diluição e evitando a salinização do solo de cultivo (MAROUELLI; SILVA, 2011).

Dentre as desvantagens dos sistemas de irrigação localizados pode-se citar a inconveniência das linhas de distribuição quando surge a necessidade de capina/limpeza do campo de cultivo. Além disso, a manutenção dos equipamentos requer mão de obra especializada, o que aumenta o custo da operação. A distribuição uniforme de água também é comprometida devido à presença de declividade do terreno, uma vez que pode haver variações na vazão da canalização. Por fim, a fonte de água de irrigação deve ser protegida de modo a evitar transporte de pequenos pedriscos nas tubulações, resultando em entupimento ou mesmo perda de uma parte do sistema de distribuição.

### 2.2.5. Visão geral, Custos e Critérios de escolha

Em síntese, a determinação do melhor sistema de irrigação depende, sumariamente, do tipo de cultivar produzido. De acordo com Marouelli e Silva (2011), deve-se considerar os aspectos fitossanitários da cultura, sua necessidade hídrica e o impacto econômico no projeto como um todo.

Para hortaliças folhosas, a irrigação superficial por sulcos é relativamente adequada, caso a densidade de plantio da cultura seja alta. Caso o espaçamento entre as plantas seja reduzido, é recomendável sistemas de aspersão e/ou gotejamento. Para o caso da alface em estado de cultivo de baixa densidade e alto espaçamento entre cultivares é recomendado o uso de técnicas que permitam irrigação continuada em alta frequência, como gotejamento ou microaspersão (MAROUELLI; SILVA, 2011).

Considerando os aspectos econômicos do projeto, deve-se levar em consideração o tipo de terreno no qual se dará o cultivo e a necessidade ou falta desta de normalização do solo. Em conjunto com os gastos referentes à manutenção - preventiva e corretiva - dos equipamentos e maquinários, a mão de obra utilizada também consiste num fator que determina a escolha do sistema de irrigação mais adequado. Em termos financeiros, a figura 5 mostra os custos de um projeto básico de irrigação nos padrões das diversas técnicas descritas, todas em função da área de cultivo.

Método	Sistema	Eficiência (%)	Custo inicial <sup>a</sup> (R\$/ha)	Energia <sup>b</sup> (kWh/mm/ha)	Mão-de-obra <sup>c</sup> (h/ha/irrig.)
Superficial	Sulco	40 - 70	1.500-4.000	0,3 - 3,0	1,0 - 5,0
	Corrugação	40 - 70	1.200-3.000	0,3 - 3,0	1,0 - 3,0
	Faixa	50 - 75	1.500-4.000	0,3 - 3,0	0,5 - 2,5
	Inundação <sup>d</sup>	50 - 70	1.500-3.500	0,3 - 3,0	0,7-3,0
Subsuperficial	Lençol freático fixo	40 - 70	1.200 - 3.000	0,0 - 0,5	0,5 - 2,0
	Lençol freático variável	40 - 70	1.500 - 3.500	0,0 - 0,5	0,7 - 4,0
Aspersão	Convencional portátil	60 - 75	2.000 - 4.500	3,0 - 6,0	1,5 - 3,5
	Convencional semiportátil	60 - 75	3.000-5.500	3,0 - 6,0	0,7 - 2,5
	Convencional fixo	70 - 80	7.000-15.000	3,0 - 6,0	0,2 - 0,5
	Autopropelido	60 - 70	4.000 - 6.000	6,0 - 9,0	0,5 - 1,0
	Pivô central	75 - 90	4.500 - 9.000 <sup>e</sup>	2,0 - 6,0	0,1 - 0,7
	Deslocamento linear	75 - 90	5.000 - 10.000 <sup>e</sup>	2,0 - 6,0	0,3 - 1,0
Localizado	Gotejamento	80 - 95	7.000 - 18.000 <sup>f</sup>	1,0 - 4,0	0,2-1,0
	Microaspersão	80 - 90	5.000 - 15.000	1,5 - 4,0	0,1 - 0,5

<sup>a</sup>Valores referentes à 2009/2010. Depende do nível de automação, tipo de hortaliça, qualidade de equipamento, tamanho da área, dentre outros. Inclui-se os custos de bombeamento/condução de água, adequação/sistematização do terreno e/ou aquisição/instalação do sistema.  
<sup>b</sup> Estimado para uma altura de recalque entre 0-50 m, exceto para irrigação subsuperficial (0-10 m). Dividir kWh/mm/ha por 3,2 para estimar litros de diesel/mm/ha.  
<sup>c</sup> Depende do nível de automação do sistema, eficiência gerencial, tamanho de setores, dentre outros fatores.  
<sup>d</sup> Inundação temporária em pequenos tabuleiros ou bacias.  
<sup>e</sup> Para pivôs com áreas inferiores a cinco hectares o custo pode superar R\$15.000/ha.  
<sup>f</sup> Para pequenas áreas de estufa este valor pode superar R\$30.000/ha.

Figura 5 - Custo de implantação de sistemas de irrigação por hectare.

Fonte: Marouelli e Silva (2011).

Como pode ser observado, quanto maior o grau técnico do método maior o custo inicial. Os métodos de irrigação localizada apresentam o maior custo inicial por hectare cultivado. Isso pode ser explicado pelo fato desta técnica empregar tecnologia e mão de obra especializada, bem como apresenta maior eficiência e economia de recursos hídricos, o que resulta num produto final de melhor qualidade.

A figura 6 apresenta o percentual aproximado, referente ao investimento inicial, de custos com manutenção anual do projeto, bem como sua vida útil aproximada.

Sistemas e componentes	Vida útil (anos)*	Manutenção (% do custo inicial)
<b>Sistemas por aspersão</b>		
Convencional portátil	10 – 15	2,0 – 5,0
Convencional semiportátil	10 – 18	1,5 – 4,0
Convencional fixo	15 – 25	1,0 – 3,0
Autopropelido	8 – 12	5,0 - 7,0
Pivô central	12 – 18	4,0 - 6,0
Deslocamento linear	12 – 18	5,0 - 7,0
<b>Sistemas localizados</b>		
Gotejamento	10 – 15	2,0 - 6,0
Microaspersão	10 – 15	1,0 - 4,0

Figura 6 - Vida útil e custo percentual de manutenção de sistemas de irrigação.

Fonte: Marouelli e Silva (2011).

Ademais, apresentados os métodos de irrigação disponíveis no mercado, pode-se estabelecer procedimentos para a escolha do melhor sistema de irrigação, dados as condições do ambiente e espécie dos cultivares. Marouelli e Silva (2011) apresentam uma tabela para pré seleção de um sistema de irrigação com base na espécie das culturas :

Fatores a serem considerados	Superficial			Aspersão					Localizado		
	Sulco	Faixa	Inundação*	Subsuperficial	Desloc. lateral	Pivô central	Autopropelido	Conv. portátil	Conv. fixo	Microaspersão	Gotejamento
Hortaliça											
Alho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Batata	0	0	-	0	+	+	0	0	+	0	0
Batata-doce	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Berinjela	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Brássicas	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Cebola	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0
Cenoura	0	-	-	-	+	+	0	0	+	0	0
Ervilha/lentilha	-	-	-	0	0	0	0	-	0	0	-
Feijão-de-vagem	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	+
Folhosas	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Melancia	+	-	-	0	0	0	0	-	0	0	+
Melão	+	-	-	0	0	0	0	-	0	-	+
Milho-doce	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
Pimentão	+	-	-	0	-	-	-	-	-	0	+
Sementes: cenoura, cebola etc.	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	+
Tomate para mesa	+	-	-	0	-	-	-	-	-	0	+
Tomate para processamento	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 7 - Pré seleção técnica de sistemas de irrigação por tipo de cultivar.

Legenda: (0) indica que o fator não têm influência na escolha do sistema de irrigação

(+) indica preferência por determinado sistema de irrigação comparado aos demais

(-) indica preferência por sistemas de irrigação alternativos

Fonte: Marouelli e Silva (2011).

Pode-se observar na figura 7 que, para a cultura de folhosas, apenas os métodos de irrigação por faixas e por inundação são explicitamente negativos ao desempenho do cultivo, ao passo que os demais métodos não possuem influência considerável na determinação do sistema de irrigação.

Por fim, a figura 8 apresenta critérios para as condições de distribuição de água, conforme se segue :

Fatores a serem considerados	Superficial			Aspersão					Localizado		
	Sulco	Faixa	Inundação*	Subsuperficial	Desloc. lateral	Pivô central	Auto-propelido	Conv. portátil	Conv. fixo	Microaspersão	Geotejamento
Fonte de água											
Subterrânea	-	-	-	-	0	0	0	0	0	+	+
Fornecimento sob demanda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fornecimento períodos fixos	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Fornecimento contínuo	-	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+
Taxa e período variável	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Muito sedimento	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
Muita matéria orgânica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
Muito salina	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0
Água servida (poluída)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Vazão grande	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0
Vazão pequena	-	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+

Figura 8 - Pré seleção de sistemas de irrigação por fonte de água disponível.

Legenda: (0) indica que o fator não têm influência na escolha do sistema de irrigação

(+) indica preferência por determinado sistema de irrigação comparado aos demais

(-) indica preferência por sistemas de irrigação alternativos

Fonte : Marouelli e Silva (2011).

Como pode ser observado, para um fornecimento de água de irrigação sob demanda todos os sistemas descritos apresentam o mesmo grau de importância na determinação do sistema de irrigação.

### 2.3. ACOMPANHAMENTO DO CICLO DE CULTIVO

A alface *Lactuca sativa* é uma das folhosas mais consumidas no Brasil em virtude de seu rápido ciclo de desenvolvimento e facilidade de manejo (SOUZA *et al.*, 2020). A cultura da alface mimosa deve ser realizada de modo a manter uma saturação na base - umidade do solo/substrato - numa faixa de 80 a 90%, embora os cuidados para que o solo não fique encharcado deva ser considerado. A espécie, de origem asiática, é caracterizada pelo alto teor de água em sua composição - 95% - , além de possuir capacidade de crescimento na faixa dos 60 centímetros (SILVA,2017).

Tendo em vista essas características preliminares da espécie cultivada, pode-se admitir, segundo Silva (2017), que as características principais a serem observadas no decorrer do ciclo de crescimento da alface são : diâmetro das plantas; altura das plantas (folhas e caule) e número de folhas das mesmas.

Por sua vez, Souza et al (2020) utilizou, em adição aos parâmetros escolhidos por Silva (2017), o peso total das plantas, caracterizado pela soma das massas das folhas, caule e raiz da planta; peso comercial, caracterizado pelas massas das folhas aptas ao consumo, apenas; número de folhas aptas ao consumo e tamanho da raiz.

Ainda, a ocorrência de queimaduras nas pontas das folhas - *tip burns* - , causadas pela deficiência de cálcio, condições de temperatura e umidade do ar e intensidade luminosa também deve consistir num parâmetro comparativo viável ao estudo do ciclo de cultivo (KOZAI,2018). Por fim, o consumo hídrico das cultivares também deve ser levado em consideração, bem como a frequência com a qual o controle de pragas, insetos e doenças foi necessário para o bom desempenho do cultivo.

### 2.4. MEDIÇÃO DE UMIDADE DO SOLO

A medição do teor de umidade do solo leva em consideração os aspectos práticos e econômicos, sendo estes de extrema importância na escolha do método utilizado. Alguns critérios como precisão, tempo de resposta e custo de operação são determinantes para o método (OLIVEIRA, 2018).

Os métodos de determinação de umidade em solos podem ser classificados como diretos e indiretos. O primeiro engloba técnicas de coleta direta de material e posterior análise para determinar a quantidade de água presente na amostra coletada. Um dos métodos diretos e mais utilizados é a gravimetria. Os métodos indiretos relacionam fenômenos físicos que variam de acordo com a característica do meio - resistência elétrica, capacitância e pressão - com a quantidade de água presente no meio (MENDES, 2006).

Os métodos diretos requerem maior tempo de experimentação, ao passo que os métodos indiretos permitem medições *in situ*. Em contrapartida, os métodos indiretos apresentam maior variância nas medidas, o que resulta na frequente construção de perfis de calibração, determinadas também pelas características do solo e variações do ambiente (DAMACENO, 2010).

#### 2.4.1. Método gravimétrico

Classificado como um método direto destrutivo, consiste na coleta da amostra de solo a uma determinada profundidade, seguida de acomodação em recipiente vedado de modo a evitar perda por evapotranspiração até a realização de testes laboratoriais. A amostra coletada e acondicionada é pesada e transportada para uma estufa aquecida para secagem (OLIVEIRA, 2018). Segundo Mendes (2006), o ideal é que a amostra seja seca em estufa à 105°C por no mínimo 24 horas. Após a secagem, o material é novamente pesado, e o teor de umidade é dado em função da diferença das massas úmida e seca dividida pela massa inicial.

Apesar de ser um método bastante preciso, demanda considerável quantidade de tempo e energia, sendo contraindicado quando se necessita de medições rápidas. Além disso, por ser um método destrutivo, não permite a análise do solo num mesmo ponto (OLIVEIRA, 2018). Dessa forma, terrenos com grande heterogeneidade de solo não podem ter seu teor de umidade determinado uniformemente.

### 2.4.2. Método das pesagens

Consiste na construção de um padrão de testes baseado na saturação de uma amostra de solo seco com água. Segundo Mendes (2006), toma-se um balão volumétrico de 500 mL com água até a metade, seguido da adição de 100g de solo seco em estufa a 105°C. O recipiente é homogeneizado e completado com água. O frasco é então pesado em balança analítica, sendo essa massa - denominada  $m_1$  - o padrão para o solo em teste.

Analogamente, toma-se uma amostra do solo em estudo e faz-se o mesmo procedimento, contudo sem secar a amostra em estufa. O frasco é novamente pesado - a massa é determinada como  $m_2$  - e relacionado com a umidade através da seguinte equação :

$$I. \quad U = \frac{(m_1 - m_2) \cdot \rho_r}{\rho_r - 1}$$

Onde  $\rho_r$  é o peso específico do solo.

Ainda, pode-se expressar a umidade em percentual através da equação :

$$II. \quad U (\%) = \frac{100 \cdot U}{100 - U}$$

### 2.4.3. Método tensiométrico

O tensiômetro é construído a partir de uma cápsula porosa situada na extremidade inferior de um tubo plástico ou metálico. Possui também um medidor de vácuo ou manômetro em seu corpo tubular. A cápsula é permeável à água e aos solutos diluídos no solo, de modo que o manômetro possa indicar o nível de pressão exercida por esses (AZEVEDO; SILVA, 1999). O esquema de um tensiômetro simples é apresentado na figura 9.

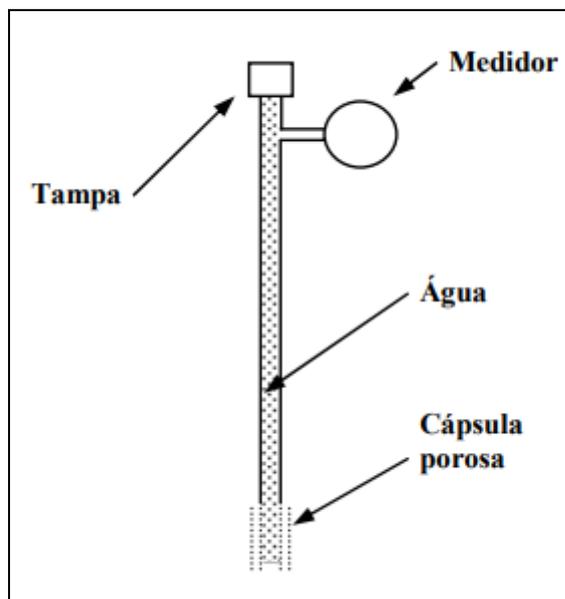


Figura 9 - Esquema de um tensiômetro simples.  
Fonte: MENDES (2006), pg. 9.

A leitura do tensiômetro é realizada após este estar completamente cheio de água e em solo saturado. Neste ponto, nenhuma água passará pela cápsula porosa e o vácuo será equivalente a zero. Segundo Azevedo e Silva (1999), ao passo que o solo seca, a água passa do tensiômetro para o solo. Com a subsequente irrigação do solo, a água é transportada via membrana do solo para o corpo tubular do tensiômetro, tendo a pressão exercida por esse fenômeno de transporte sempre indicada no manômetro do instrumento. Azevedo e Silva também indicam que a leitura do tensiômetro pode ser interpretada como a energia de retenção de água do solo.

Todavia, é necessário considerar que este instrumento possui uma faixa limitada de operação. O ponto crítico de operação depende das condições do ambiente e da condição na qual a água, sob influência do vácuo, pode provocar cavitação. Além disso, a leitura analógica do manômetro pode se traduzir em baixa resolução de leitura e baixa frequência de sinais (COELHO, 2003).

#### 2.4.4. Método da resistência elétrica

A medição da umidade do solo a partir da variação da resistência elétrica deste é obtida a partir da inserção de dois eletrodos recobertos de material poroso no solo de testes (COELHO, 2003). Com a passagem de corrente elétrica pelos eletrodos, mede-se a resistência do solo à esta corrente a partir da Lei de Ohm e de uma ponte de Wheatstone. Segundo Oliveira (2018), a resistência é inversamente proporcional à quantidade de água presente no solo. Isto é, quanto maior o teor de umidade de uma amostra, menor será a resistência medida pelo sensor.

#### 2.4.5. Método da capacitância elétrica

Segundo Mendes (2006), este método indireto mede a variação da capacitância elétrica em função da variação da permissividade de um material poroso situado entre placas paralelas de um capacitor.

Analogamente ao tensiômetro, o sensor tipo capacitivo tem sua permissividade aumentada quanto maior for a presença de água no meio de testes, portanto aumentando também sua capacitância. Em contrapartida, quanto menor o teor de umidade no solo, menor a permissividade, logo há locomoção da água no interior das placas paralelas para o solo, diminuindo portanto a capacitância.

### 2.5. SENSOR DE UMIDADE DO SOLO CAPACITIVO V1.2

O sensor de umidade do solo v1.2 utiliza o princípio da variação da capacitância em virtude da permissividade do meio, conforme descrito na seção 2.4.5. O sensor possui dimensões de 22 mm x 102 mm x 7 mm. Este sensor possui maior resistência à corrosão, o que resulta em maior tempo de vida útil. A figura 10 apresenta um modelo de sensor de umidade do solo capacitivo.



Figura 10 - Sensor de umidade do solo capacitivo v1.2.  
Fonte: Arducore, 2023.

O dispositivo funciona com uma tensão de 3,3 a 5V, sendo os três pinos de conexão referentes ao VCC - referente à cor vermelha - , GND - cor preta - e Sinal analógico - cor amarela.

## 2.6. SENSOR DE UMIDADE DO SOLO RESISTIVO

O sensor de umidade do solo resistivo consiste em dois eletrodos porosos que variam em resistência de acordo com a quantidade de água presente no solo. A tensão de operação deste dispositivo é de 3,3 a 5V. A figura 11 apresenta um sensor de umidade do solo resistivo.

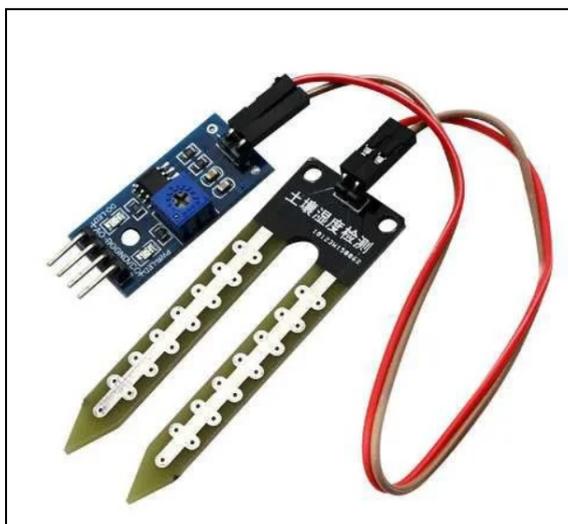


Figura 11 - Sensor de umidade do solo resistivo.

Fonte: Eletrogate, 2023.

O dispositivo possui 4 pinos, sendo dois deles destinados à alimentação - VCC e terra -, um para saída digital e outro para saída analógica - D0 e A0, respectivamente.

## 2.7. SENSOR DE TEMPERATURA DHT11

O sensor de temperatura e umidade do ar DHT11 é um dispositivo de baixo custo cuja parte sensora responsável pela aferição da umidade é capacitivo e o sensor de temperatura um termistor NTC. Este dispositivo pode transmitir dados na forma digital através de cabos com até 20 metros de comprimento (ELETROGATE, 2019). Ademais, a exposição às intempéries do ambiente pode afetar o desempenho do dispositivo.

Segundo o fabricante, o sensor possui uma faixa de medição de umidade relativa de 20 a 80%, com precisão e resolução de 5% da medida. A faixa de operação para temperatura é de 0 a 50°C, com precisão e resolução de 2°C. Ainda, o dispositivo possui um tempo mínimo de resposta de 2 segundos. A alimentação do sensor pode ser com tensões de entrada de 3,3 ou 5V. O dispositivo conta com 4 pinos de conexão, sendo eles VCC, DATA, NC e GND.

Os pinos VCC e GND são referentes à alimentação do dispositivo. O pino DATA é utilizado para a transmissão dos dados na forma digital e o pino NC não é usado para conexões. A figura 12 apresenta um sensor DHT11 e sua pinagem.

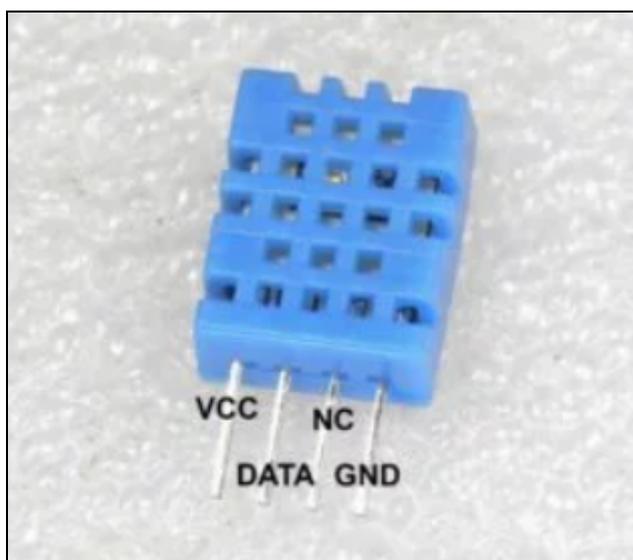


Figura 12 - Sensor DHT11 e pinagem.

Fonte: Eletrogate, 2019.

## 2.8. SENSOR DE CHUVA

O sensor de chuva consiste em uma placa sensora com dimensões de 2,1 cm por 1,4 cm que responde ao estímulo de água e/ou neve com estados de energia *high* ou *low*. Sua tensão de operação varia entre 3,3 e 5V, com a presença de um potenciômetro para ajuste de sensibilidade. Os sinais podem ser transmitidos na forma analógica ou digital. O dispositivo possui 4 pinos : VCC, GND, A0 e D0. A figura 13 apresenta um módulo sensor de chuva.

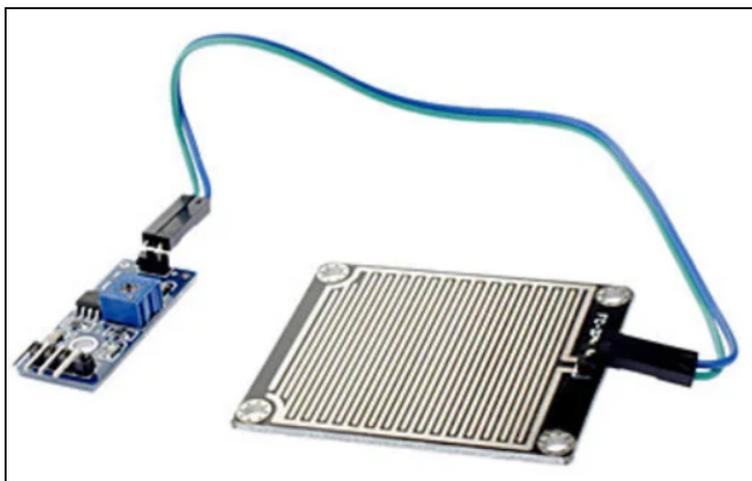


Figura 13 - Módulo sensor de chuva.  
Fonte: Eletrogate, 2023.

## 2.9. MICRO BOMBA DE ÁGUA SUBMERSÍVEL

A micro bomba de água submersível possui 44 mm de altura e saída de água com 4,5 mm de diâmetro interno. Funciona com tensões de entrada variando entre 2,5 a 6V. A elevação de operação varia entre 40 a 110 cm de altura. Possui dois fios para conexões, sendo o fio vermelho destinado à alimentação DC e o fio preto destinado ao aterramento. A figura 14 apresenta um modelo de micro bomba de água submersível.

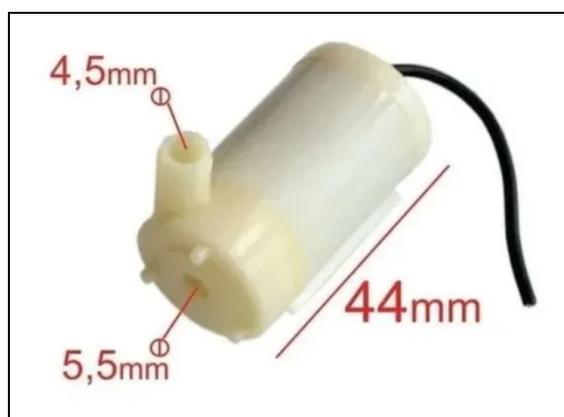


Figura 14 - Micro bomba de água submersível.  
Fonte: Arducore, 2023.

## 2.10. DISPLAY LCD I2C

O Display lcd com módulo I2C é uma ferramenta importante na criação de projetos com interface homem-máquina. Usualmente, os display disponíveis comercialmente possuem 16 pinos para conexões, o que diminui a liberdade de conexões com outros elementos numa placa microcontroladora como o Arduino. Dessa forma, o módulo I2C reduz a quantidade desses pinos para 4. Assim sendo, é possível a criação de projetos com muito mais elementos e com a visualização dos dados em tempo real. A figura 15 mostra um modelo típico de display I2C.



Figura 15 - Display LCD I2C.  
Fonte: Eletrogate (2023).

O dispositivo funciona com uma tensão de operação de 5 volts, possuindo uma interface com 16 colunas e 2 linhas. Os 4 pinos para conexões são, respectivamente:

- GND - alimentação (terra) ;
- VCC - fonte de alimentação 3,3V ou 5V ;
- SDA - *serial data* ;
- SCA - *serial clock* .

## 2.11. MÓDULO RELÉ 2 CANAIS

Este módulo permite, a partir de saídas digitais, controlar elementos com voltagens maiores e motores AC/DC. A carga nominal que o módulo suporta pode ser 250V, 125V ou 30V, com uma corrente máxima de 10A. A figura 16 mostra um exemplo típico de um módulo relé com 2 canais.

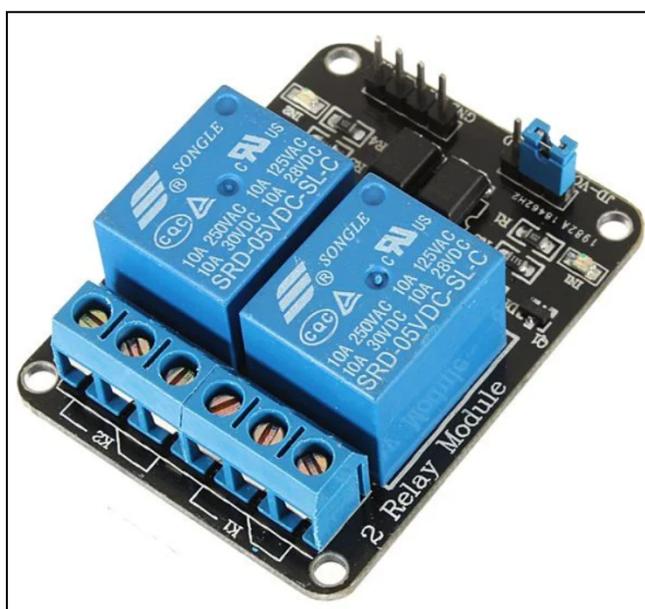


Figura 16 - Módulo relé 2 canais 5V.  
Fonte: Eletrogate (2023).

O dispositivo possui uma tensão de operação de 5V. As tensões de sinal dos canais IN1 e IN2 também são de 5V. Cada relé possui 3 terminais, sendo eles os contatos normalmente aberto - NA -, normalmente fechado - NF - e comum.

## 2.12. MICROCONTROLADOR ARDUINO UNO

A placa microcontroladora Arduino Uno possui 14 pinos digitais com as funções de entrada e saída - *input* e *output* -, sendo que seis desses pinos podem ser usados como PWM - *pulse width modulation*. A placa pode ser alimentada por uma tensão (recomendada) de 7 a 12V, embora uma tensão de entrada de 5V também seja adequada.

O dispositivo opera com uma tensão fixa de 5 ou 3,3V, possuindo pinos específicos para cada uma dessas tensões. Ainda, possui 6 pinos analógicos, capazes de ler um sinal analógico e convertê-lo em sinal digital (FREITAS JUNIOR, 2018). A figura 17 mostra um modelo de placa Arduino Uno.

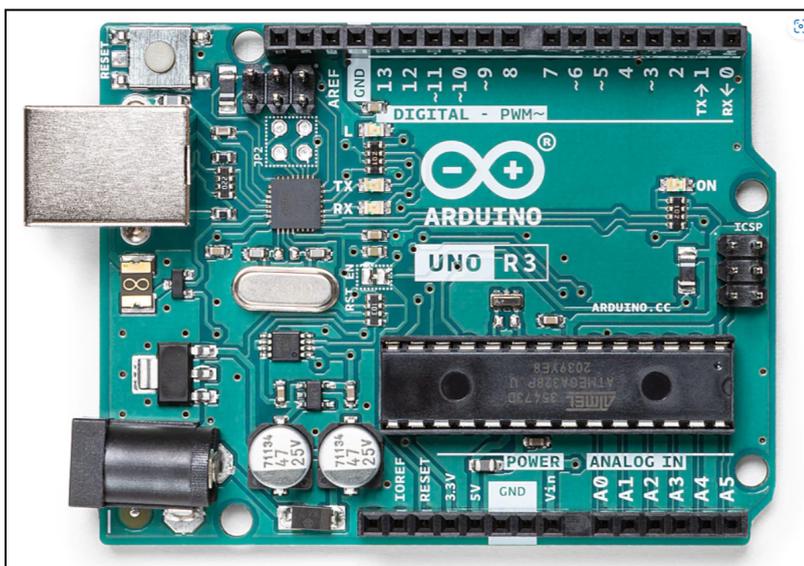


Figura 17 - Microcontrolador Arduino UNO R3.  
Fonte: Arduino, 2023.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO CAPACITIVO

Para a calibração do sensor de umidade do solo capacitivo v1.2 realizou-se a secagem do substrato utilizado em forno elétrico convencional a 200°C por 40 minutos. Após a retirada do material do forno e consequente resfriamento deste, fez-se a homogeneização do substrato seco com o auxílio de uma espátula.

Em seguida, pesou-se aproximadamente 350 g do substrato seco em um recipiente plástico transparente. Estimou-se o percentual de umidade no substrato através da correlação proposta por Santos *et al.* (2021) :

$$(1) U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100$$

Dessa forma, assumiu-se que após secagem o percentual de umidade na amostra de substrato era equivalente a zero.

Para a construção da curva de calibração do sensor utilizou-se o microcontrolador Arduino, conforme diagrama apresentado na figura 18.

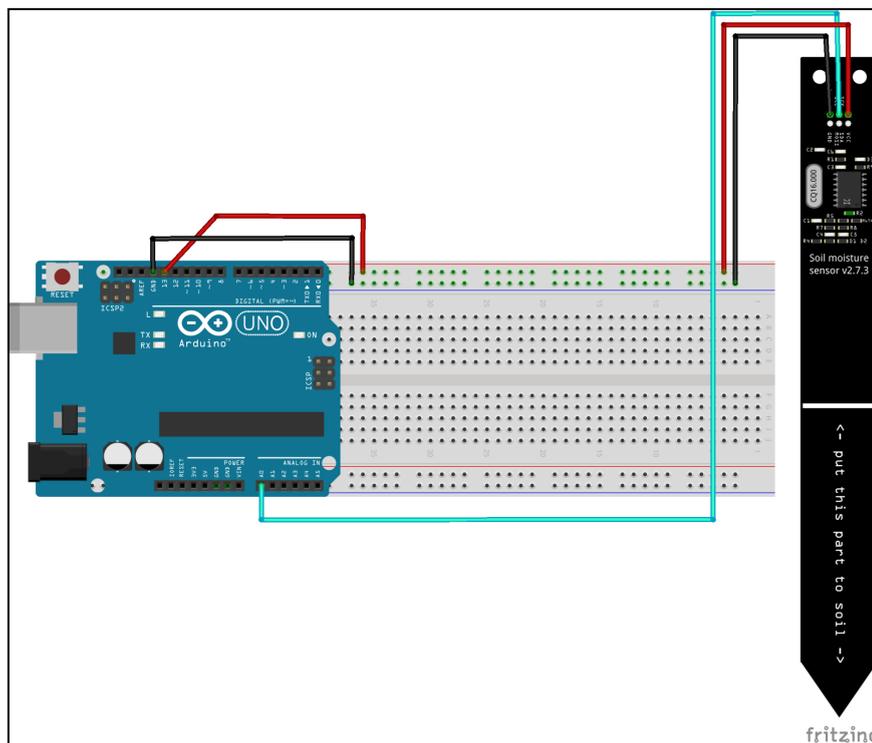


Figura 18 - Diagrama de conexões para o sensor de umidade do solo capacitivo.  
Fonte: Autor.

Além disso, segundo os estudos de Kaptein e Titshall (2019), o uso de instrumentos sensores que utilizam a conversão de voltagem em outro tipo de sinal (e.g. resistência elétrica e capacitância) recorrem a um erro considerável. A depender da sensibilidade e tempo de acomodação do instrumento, a excitação elétrica deste pode provocar eletrólise localizada da água em contato direto com o sensor. Assim sendo, pode haver ocorrência de micro bolhas de vapor e gás que resultam numa variação da capacitância e/ou resistência elétrica esperada.

Portanto, como estratégia de ativação do sensor de umidade do solo capacitivo, optou-se por manter a fonte de tensão desligada até a medição. Isto é, manteve-se o sensor desligado num intervalo de 20 segundos, seguido pelo respectivo acionamento deste com um tempo de acomodação de 5 segundos para a então tomada de medição. Esperou-se três ciclos de acionamento/desligamento para então se admitir uma leitura constante. O fluxograma da programação utilizada para a calibração do sensor de umidade do solo capacitivo pode ser observado na figura 19.

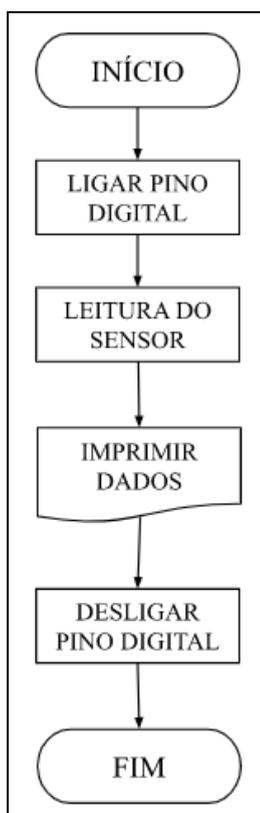


Figura 19 - Fluxograma de programação para o sensor de umidade do solo capacitivo.

Fonte: Autor.

Para a medição da umidade do solo, inseriu-se o dispositivo medidor a 8 centímetros de profundidade de substrato, conforme dimensões do sensor e do recipiente utilizado para testes. O primeiro ponto amostral foi realizado com o substrato seco. Os demais pontos foram realizados adicionando volumes conhecidos de água com o auxílio de uma seringa, seguido das respectivas pesagens das massas úmidas. Usou-se variação de 5 mililitros de água até a faixa de 20 mL, passando então para adições de 10 mililitros - até a faixa dos 100 mL - e 20 mililitros - até 200 mL. Por fim, adicionou-se 50 mL de água com o auxílio de uma caneca - béquero - plástico graduado. Nota-se que, a cada nova adição de água esperou-se cerca de 2 minutos para acomodação do substrato.

A medição das massas seca e úmidas foram realizadas em balança digital com resolução de 2 gramas. De acordo com a Equação (1), pode-se omitir a incerteza referente aos instrumentos utilizados para a adição de água, uma vez que usou-se as massas para estimar a umidade do solo. O cálculo das incertezas referentes à estimativa da umidade foram obtidas

através das correlações propostas por Taylor (2012). Inicialmente, obteve-se a incerteza para a subtração da massa seca da massa úmida. Em seguida, calculou-se a incerteza da umidade estimada, sendo este resultado da soma dos erros fracionários da subtração e da massa seca individual. As equações (2) e (3) demonstram essas correlações.

$$(2) \delta_1 = \sqrt{\delta_u^2 + \delta_s^2}$$

$$(3) \frac{\delta_u}{|U|} = \frac{\delta_1}{|M_u - M_s|} + \frac{\delta_s}{|M_s|}$$

Os subscritos  $u$  e  $s$  indicam, respectivamente, os estados úmido e seco.

Para o tratamento gráfico estatístico dos dados, optou-se por uma transformação de modelos, como proposto por Chapra (2011). Testes preliminares demonstraram que o comportamento do sensor apresentou-se na forma exponencial, portanto, o modelo linearizado foi plotado utilizando o logaritmo natural dos valores de umidade no eixo  $y$  e pelos valores, em bytes, da leitura do sensor no eixo  $x$ . Em outras palavras, o comportamento do sensor é descrito como uma função exponencial do tipo  $y = \alpha \cdot x^\beta$ , e o comportamento linearizado é descrito na forma  $\ln(y) = \ln(\alpha) + \beta \cdot x$ .

Ademais, para a determinação da melhor função para os dados experimentais, optou-se pelo ajuste por mínimos quadrados - aplicado ao comportamento linearizado - dos pontos amostrais. Para tal, utilizou-se as correlações propostas por Chapra (2011) e Vuolo (1996) para a determinação estatística dos parâmetros  $a$  e  $b$  da reta ajustada  $y = ax + b$ . Essas correlações são dadas como se segue:

$$(4) a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - \sum x \sum x}$$

$$(5) b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - \sum x \sum x}$$

Originalmente, nas equações propostas leva-se em consideração as incertezas das medições, denotadas por  $\Sigma \sigma_i$ , localizado no denominador de cada somatório apresentado nas

equações (4) e (5). Entretanto, ao substituir este termo pelo número de pontos amostrais,  $n$ , pode-se omitir esses termos sem prejuízo nos resultados.

Por fim, aplica-se o teste do qui-quadrado e qui-quadrado reduzido para a determinação da qualidade do ajuste realizado. A equação que governa a determinação do qui-quadrado é dada por Vuolo (1996) :

$$(6) \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2}$$

O termo  $\sigma_i^2$  é obtido pela relação proposta por Taylor (2012), conforme se segue :

$$(7) \sigma_i^2 = (y_i - \bar{y})^2$$

Por fim, a determinação do qui-quadrado reduzido é realizado conforme proposto por Taylor (2012), considerando o número de graus de liberdade do modelo e o qui-quadrado previamente calculado. As equações descritas por Taylor são demonstradas como se segue :

$$(8) v = n - p$$

$$(9) \chi_{red}^2 = \frac{\chi^2}{v}$$

Na equação (8), tem-se  $v$  representando a quantidade de graus de liberdade,  $n$  representando a quantidade de pontos amostrais e  $p$  representando a quantidade de parâmetros ajustados. Uma vez que tem-se ajuste para uma reta, a quantidade de parâmetros ajustados será 2 para todo ajuste linear na forma  $y = ax + b$ .

### 3.2. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO RESISTIVO

Para a calibração de sensor de umidade do solo resistivo, seguiu-se o mesmo procedimento experimental utilizado na calibração do sensor capacitivo. O diagrama das conexões com o microcontrolador pode ser observado na figura 20.

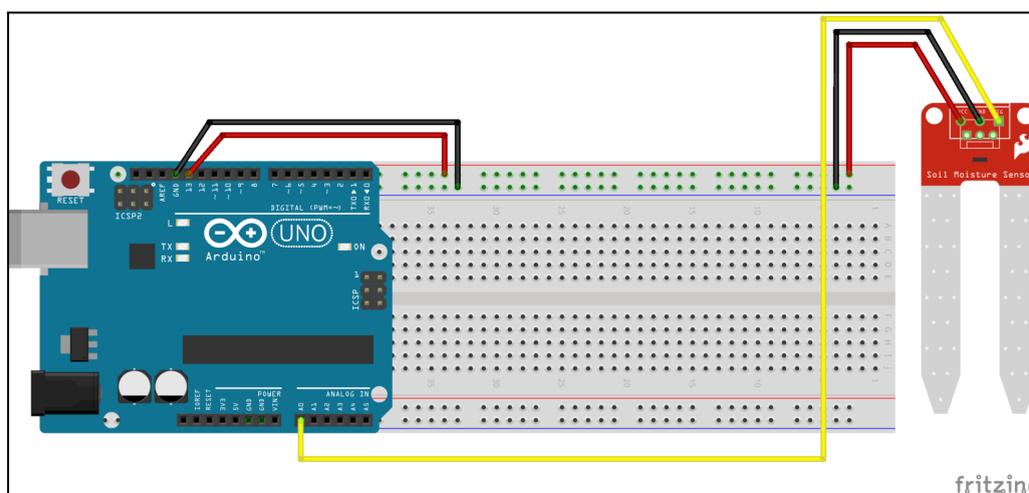


Figura 20 - Diagrama de conexões para o sensor de umidade do solo resistivo.  
Fonte: Autor.

Foi utilizada a mesma estratégia para ativação do sensor, bem como o mesmo tempo de acomodação do substrato e ciclo de tomada de dados. A fim de se comparar o desempenho dos sensores de umidade do solo, utilizou-se os mesmos recipientes e variações de água nos testes protocolados, conforme descrito na seção anterior. O fluxograma apresentado na figura 15, para o sensor capacitivo, mostra a mesma programação utilizada na calibração do sensor resistivo.

Após a tomada de pontos amostrais seguindo a mesma metodologia utilizada na calibração do sensor capacitivo, parte-se para o ajuste linear dos dados. Entretanto, testes preliminares indicaram uma não uniformidade na leitura do sensor resistivo utilizado, tornando desvantajoso a linearização da curva obtida. Dessa forma, optou-se pela inserção de uma simples linha de tendência - por parte do próprio software de planilha eletrônica

utilizado. Para verificar a qualidade da curva ajustada aos pontos, utilizou-se o teste do  $R^2$  - também do próprio software de planilha eletrônica.

### 3.3. MONTAGEM DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Para a calibragem da bomba d'água utilizada, utilizou-se um balde com capacidade nominal para 12 litros com graduação na parte exterior como reservatório de água. A bomba foi instalada e fixada na lateral do balde, a uma distância de 5 centímetros do fundo.

Para a irrigação, considerando a capacidade de bombeamento e altura de sucção da bomba, optou-se por utilizar mangueiras de micro tubos com diâmetro interior de 4mm. Conectou-se num comprimento de 1,5 metros de tubulação 4 bicos gotejadores ajustáveis, distantes entre si por 8 centímetros. Nota-se que, para fins comparativos, destinou-se 2 bicos gotejadores para cada cultivar analisado.

Conectou-se a extremidade sem bicos gotejadores da tubulação na saída da bomba, seguido do preenchimento do reservatório até a marca de 9 litros. O recipiente coletor - béquer plástico graduado, utilizado na medida do volume de água em função do tempo de acionamento da bomba - foi posicionado numa caixa com 1,2 metros de altura acima da base do reservatório. Posicionou-se os bicos gotejadores, abertos em seus limites, de modo que despejava água somente no interior do recipiente coletor.

A visão geral das conexões com o microcontrolador pode ser observada na figura 21.

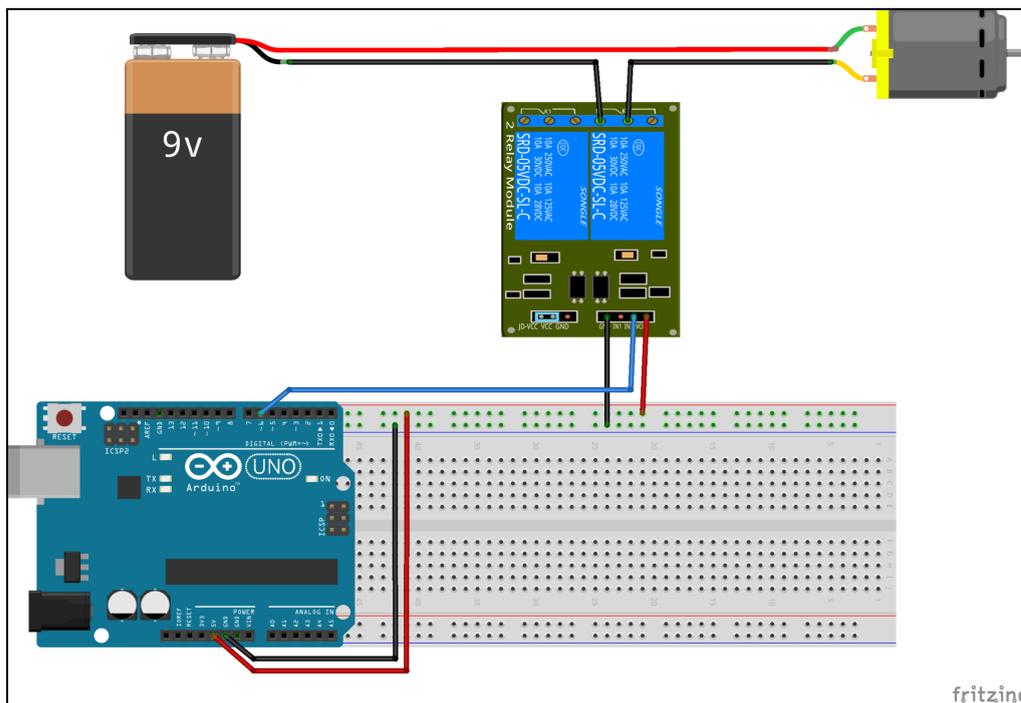


Figura 21 - Diagrama de conexões para a mini bomba 5V submersível.  
Fonte: Autor.

### 3.4. CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DA BOMBA DE ÁGUA

Para a construção da curva da bomba - volume em função do tempo -, programou-se o microcontrolador para ativar a bomba em tempos conhecidos de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 segundos, cada qual seguido pelo desligamento da bomba por 20 segundos. De modo a se obter medidas mais uniformes a medição dos volumes coletados foi realizada em triplicata para cada tempo de ativação. O fluxograma da programação pode ser observado na figura 22.

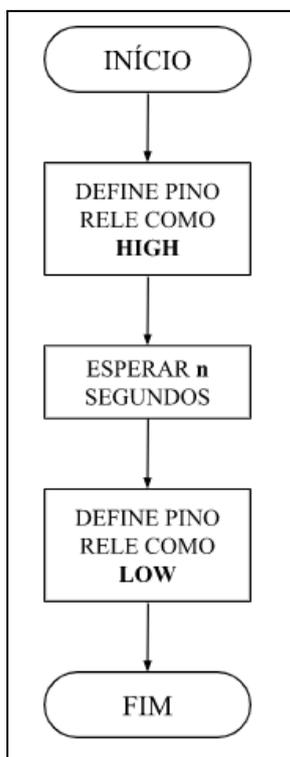


Figura 22 - Fluxograma de programação para a mini bomba de água .  
Fonte: Autor.

Em posse dos valores de volume e tempo de ativação da bomba, parte-se para o ajuste do modelo que descreve este comportamento, de modo a determinar posteriormente o tempo de ativação ótimo para o desempenho do ciclo de cultivo. Novamente, optou-se pelo ajuste por mínimos quadrados, regido pelas equações (4) e (5) - aplicadas aos pontos obtidos, sem transformações matemáticas. Para determinar a qualidade do modelo linearizado, aplicou-se os testes do qui-quadrado e qui-quadrado reduzido, conforme as equações de (6) a (9).

Nota-se que as medidas com incertezas razoáveis são referentes ao volume de água. Portanto, considerou-se apenas as incertezas do recipiente coletor graduado, com resolução de 5 mL.

### 3.5. SENSOR DE CHUVA

Para a calibração do sensor de chuva, optou-se pela mesma estratégia de acionamento utilizada para o sensor de umidade de solo capacitivo. Isto é, a fonte de tensão foi mantida desligada por 20 segundos, seguido de seu acionamento. Considerou-se um tempo equivalente a 5 segundos para acomodação da placa sensora, para a então tomada de dados.

O pino referente à tomada de dados do sensor foi conectado à porta digital 8 da placa Arduino. A programação do microcontrolador foi desenvolvida de maneira a indicar estado baixo na porta digital quando a presença de água for detectada. A visão geral das conexões pode ser observada na figura 23.

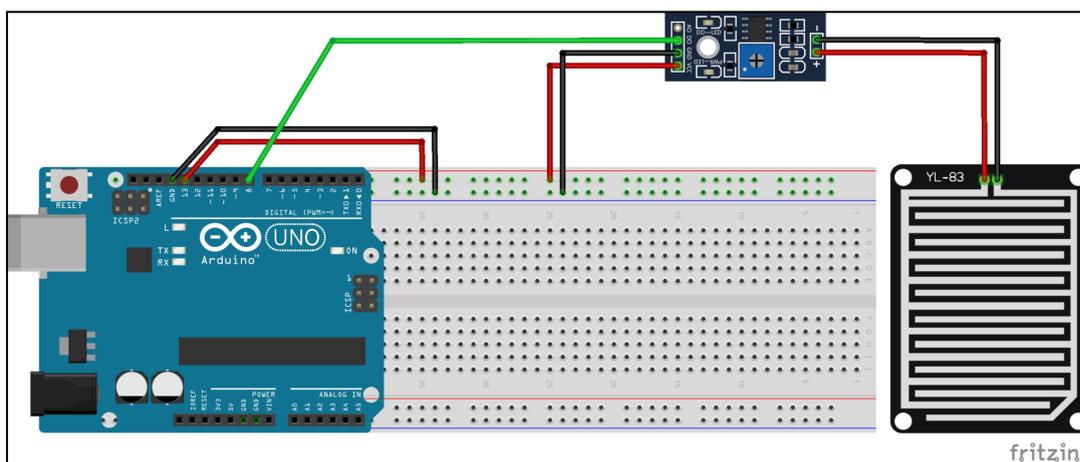


Figura 23 - Diagrama de conexões para o sensor de chuva.  
Fonte: Autor.

Para a realização dos testes, fixou-se a placa sensora de modo a nivelar sua superfície, com uma inclinação  $20^\circ$  para que a água captada escoasse livremente depois de determinado tempo. Após a montagem prática, utilizou-se de uma seringa com 10 mL de água para testar a assertividade do sensor. Assim sendo, o volume da seringa foi distribuído por sobre a placa de maneira aleatória. Tentou-se manter a superfície da placa coberta por água constante no decorrer de 20 testes intercalando adição de água e superfície seca, anotando se o sensor exibia o comportamento esperado.

Como critério de assertividade, adotou-se a simples média de acertos do sensor em relação ao número de testes conduzidos. Assim sendo, tomou-se a assertividade para a condição chuvosa como a divisão do número de acertos pelos 10 testes com água conduzidos.

O mesmo procedimento foi realizado para os testes sem água. Por fim, calculou-se a assertividade geral do sensor por meio da quantidade de acertos intercalados pelo total de 20 testes conduzidos. O fluxograma da programação pode ser observado na figura 24.

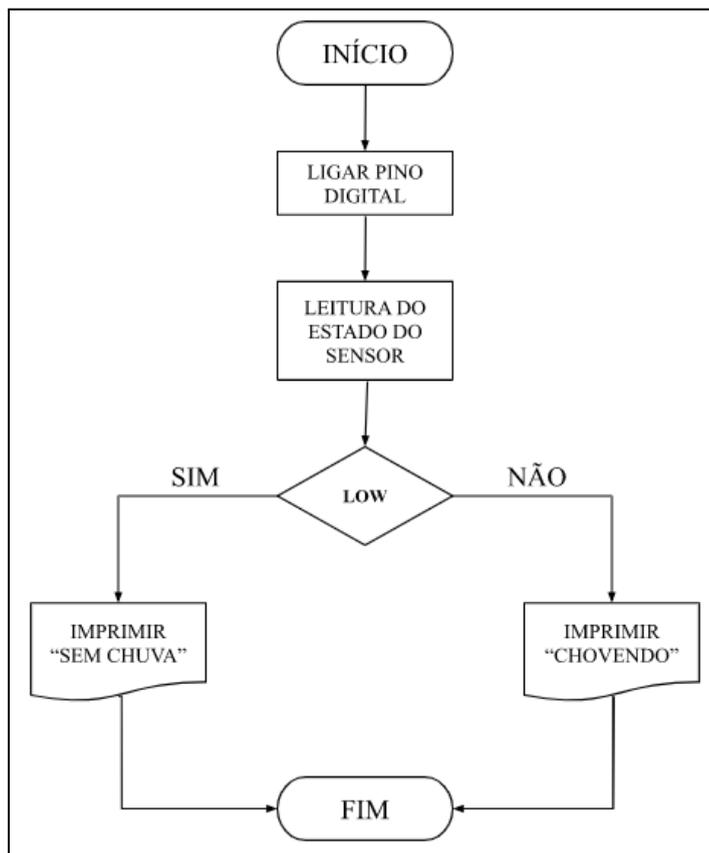


Figura 24 - Fluxograma de programação para o sensor de chuva.  
Fonte: Autor.

### 3.6. SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE DHT11

Uma vez que o sensor tem caráter comparativo apenas, não foi realizado nenhum protocolo formal de testes. A visão geral das conexões do sensor podem ser observados na figura 25.

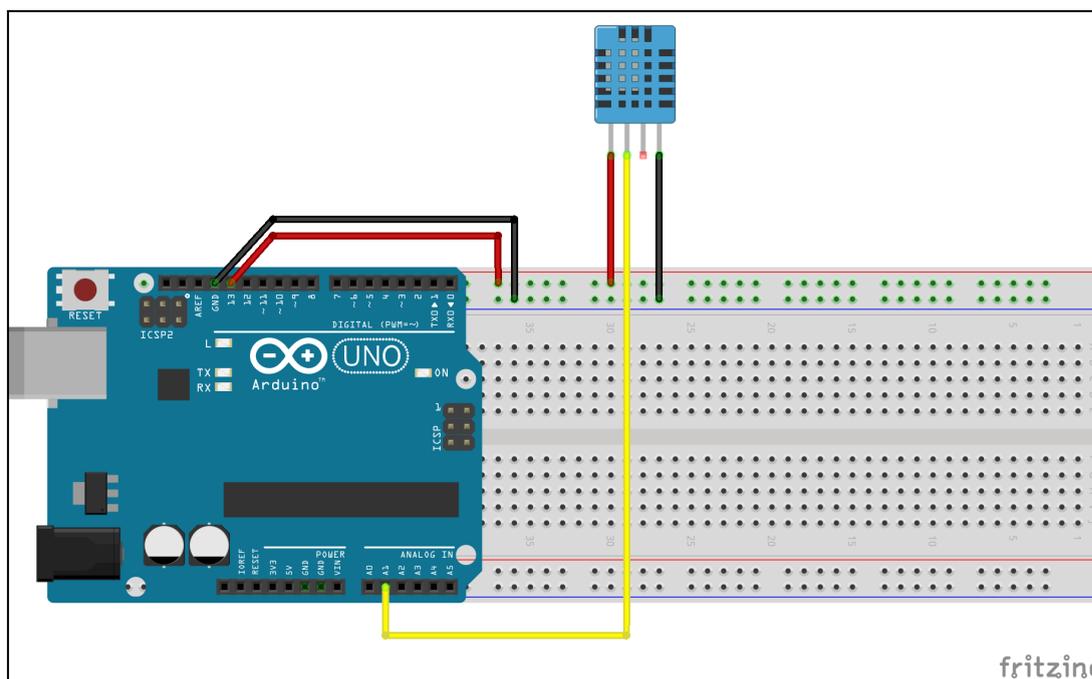


Figura 25 - Diagrama de conexões para o sensor de temperatura e umidade DHT11.  
Fonte: Autor.

O sensor de temperatura e umidade DHT11 foi programado de maneira a ser ativado em intervalos de 20 segundos, com tempo de acomodação de 5 segundos, conforme os demais acessórios utilizados.

A parte sensora do instrumento foi mantida a uma altura de 50 centímetros da base do campo de cultivo - jardineira plástica com 12 cm de altura. O instrumento foi mantido fora do alcance de grandes volumes de água, mantendo-se sempre seco.

O fluxograma da programação pode ser observado conforme a figura 26.

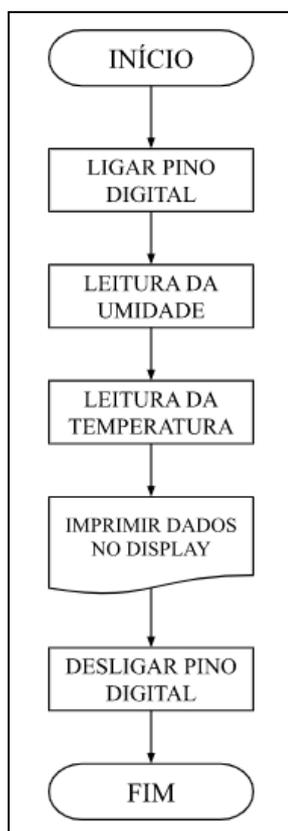


Figura 26 - Fluxograma de programação para o sensor de temperatura de umidade DHT11.  
Fonte: Autor.

### 3.7. MATERIAIS UTILIZADOS

Considerando o escopo do projeto, fez-se uma análise do custo final do sistema de automação da irrigação das amostras. Para tal, elencou-se os principais materiais utilizados - baseados na revisão bibliográfica - e fez-se a média dos 3 melhores preços cotados, com base no dia de cotação. Dessa forma, tabelou-se os valores referentes aos componentes e realizou-se o somatório dos custos totais. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos a partir das cotações realizadas no dia 30 de janeiro de 2023.

Tabela 1 - Cotação dos elementos construtivos do protótipo.

COMPONENTE	ENDEREÇO DE COTAÇÃO	COTAÇÃO UNITÁRIA (R\$)	COTAÇÃO MÉDIA (R\$)
<b>Sensor de Umidade do Solo Resistivo</b>	ELETROGATE	R\$ 11,90	<b>R\$ 12,87</b>
	ARDUCORE	R\$ 16,90	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 9,81	
<b>Sensor de Umidade do Solo Capacitivo</b>	ELETROGATE	R\$ 16,90	<b>R\$ 14,60</b>
	ARDUCORE	R\$ 13,50	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 13,41	
<b>Sensor de Temperatura e Umidade DHT11</b>	ELETROGATE	R\$ 14,90	<b>R\$ 13,89</b>
	FLIPEFLOP	R\$ 14,90	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 11,88	
<b>Módulo Sensor de Chuva</b>	ELETROGATE	R\$ 10,90	<b>R\$ 11,32</b>
	ARDUCORE	R\$ 11,80	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 11,25	
<b>Micro Bomba de Água Submersível</b>	ROBOCORE	R\$ 15,90	<b>R\$ 15,37</b>
	ARDUCORE	R\$ 14,99	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 15,21	
<b>Display LCD I2C</b>	ELETROGATE	R\$ 44,90	<b>R\$ 36,90</b>
	ARDUCORE	R\$ 37,90	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 27,90	
<b>Módulo Relé 2 Canais</b>	ELETROGATE	R\$ 16,90	<b>R\$ 16,17</b>
	FLIPEFLOP	R\$ 19,90	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 11,70	
<b>Placa Arduino Uno R3</b>	ELETROGATE	R\$ 119,90	<b>R\$ 107,53</b>
	ARDUCORE	R\$ 119,90	
	BAÚ DA ELETRÔNICA	R\$ 82,80	
<b>Mangueira de Irrigação Tipo Microtubo ( 10 m)</b>	BIOSEMENTES	R\$ 13,23	<b>R\$ 13,87</b>
	DOUTOR IRRIGAÇÃO	R\$ 16,14	
	RAMOS HIDROPÔNICOS	R\$ 12,23	
<b>Bico Gotejador Ajustável ( 4 Un)</b>	BIOSEMENTES	R\$ 0,59	<b>R\$ 2,60</b>
	DOUTOR IRRIGAÇÃO	R\$ 0,56	
	HORTA VIVA SEMENTES	R\$ 0,80	
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 245,12</b>

Fonte: Autor.

### 3.8. MONTAGEM DO PROTÓTIPO

O protótipo foi montado sobre uma caixa de madeira com altura de 44 cm, com base de dimensões 75 cm de largura e 50 cm de espessura, localizado em espaço coberto e com disponibilidade natural de luz solar. O microtubo com bicos gotejadores foi instalado e fixado na lateral da jardineira, sendo destinados para cada um dos dois cultivares plantados um par de bicos, abertos em seus limites. As mudas de alface mimosa plantadas ficaram distantes 14 cm entre si a partir do centro da jardineira, com o sensor de umidade do solo instalado exatamente no meio destas, submerso 5 cm no substrato.

O reservatório de água foi instalado na lateral da caixa, com um volume inicial de 9 litros de água. Os sensores de chuva e temperatura e umidade foram instalados com o auxílio de fita isolante e suportes de madeira a uma distância de 50 cm da base da jardineira. O sensor de chuva foi fixado de maneira a ficar inclinado em cerca de 20°, embora sua utilização seja somente ilustrativa. O display lcd foi mantido na superfície da caixa, de modo a facilitar a visualização dos dados pelo usuário.

As ligações elétricas dos sensores e atuadores no microcontrolador foram realizadas com o auxílio de jumpers e garras *jacarezinho*, sendo devidamente isoladas quando necessário. O diagrama das conexões elétricas com a placa Arduino pode ser observado na figura 27.

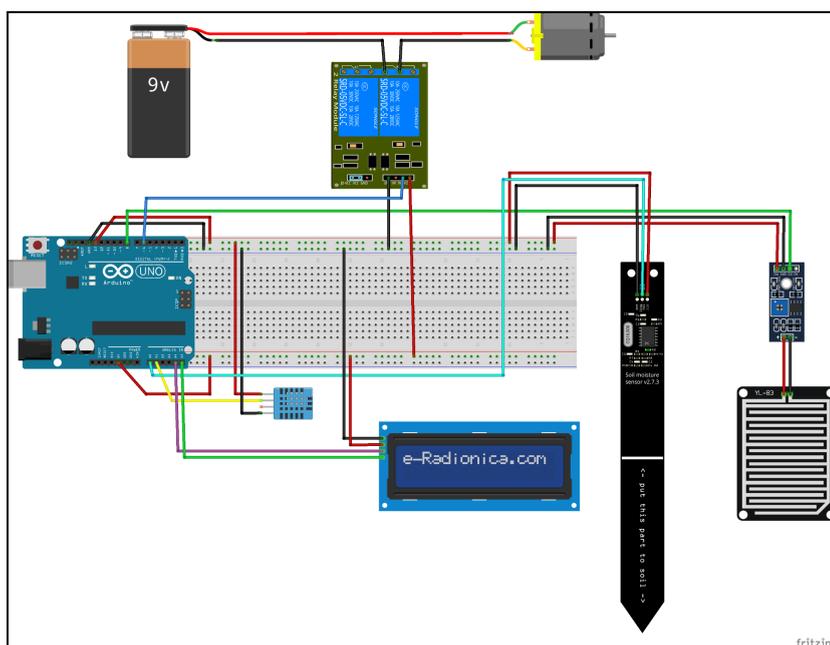


Figura 27- Diagrama de conexões para o protótipo.  
Fonte: Autor.

A placa controladora e a fiação foram mantidas na superfície da caixa. Para testar a assertividade do protótipo foram realizados 5 testes com a ativação simultânea de todos os acessórios.

Em resumo, o algoritmo programado segue as seguintes etapas: a primeira é a inicialização do pino digital utilizado para fornecer a fonte de tensão para os componentes eletrônicos; em seguida, defini-se o estado do pino digital no qual o relé está conectado como de baixa energia - isto é, não há corrente/tensão neste determinado pino; em seguida, com os componentes já energizados e operantes, faz-se a leitura da temperatura e da umidade do ar, seguido da leitura da placa sensor de chuva. Neste ponto, tem-se a necessidade de uma tomada de decisão por parte do microcontrolador que vai determinar a ativação ou não do atuador - bomba de água. Assim sendo, conforme calibração do sensor de chuva, a placa deve apresentar sinal de energia alto caso seja detectada a presença de chuva e sinal de energia baixa caso contrário.

Dessa forma, caso seja detectada a presença de chuva, o microcontrolador deve imprimir na tela do display utilizado os dados de temperatura e umidade previamente lidos. Deve-se esperar um intervalo de 5 segundos para que o usuário visualize essas informações e

em seguida substitui-se essa mensagem pelo respectivo estado de chuva e diretrizes a serem seguidas: “CHOVENDO, NÃO IRRIGAR” . Logo após essa mensagem, o ciclo do algoritmo é completado e o pino digital que fornece as tensões de operação é novamente desligado.

Do mesmo modo, caso não seja detectada a presença de chuva, o display deve mostrar os dados de temperatura e umidade do ambiente, seguido da mensagem: “SEM CHUVA, CHECAR SOLO”. Para esta situação é necessário a correta atuação do sensor de umidade do solo utilizado - tipo capacitivo. Tem-se novamente nova estrutura de tomada de decisão, tomando o ponto crítico da leitura do sensor capacitivo, que define a umidade do solo à qual requer irrigação - 260 bytes. Assim sendo, se o sensor capacitivo identificar uma leitura maior ou igual do que 260 bytes, deve-se entender que o substrato não está suficientemente úmido para satisfazer a necessidade hídrica dos cultivares. Segue-se então a rotina de inicialização do atuador e subsequente irrigação. Para tal, define-se o pino digital no qual está conectado o relé com um estado de energia alto - *HIGH* - por um intervalo de tempo de 20 segundos. Nesse intervalo, o display apresenta a mensagem “UMIDADE BAIXA, BOMBA LIGADA”. Após o tempo de 20 segundos, o pino digital do relé é novamente definido com um estado de energia baixo (desativado), e a bomba é desligada. O display mostra então a mensagem de que a umidade está, agora, alta, e que a irrigação foi realizada com sucesso.

Analogamente, caso o sensor de umidade do solo indique uma leitura inferior a 260 bytes, deve-se entender que a umidade do substrato está adequada às necessidades hídricas dos cultivares selecionados. Dessa forma, inicialmente imprime-se na tela do display os dados de temperatura e umidade do ambiente, seguido da mensagem : “UMIDADE ALTA, NÃO IRRIGAR”. A figura 28 mostra a estrutura do algoritmo descrito em forma de fluxograma.

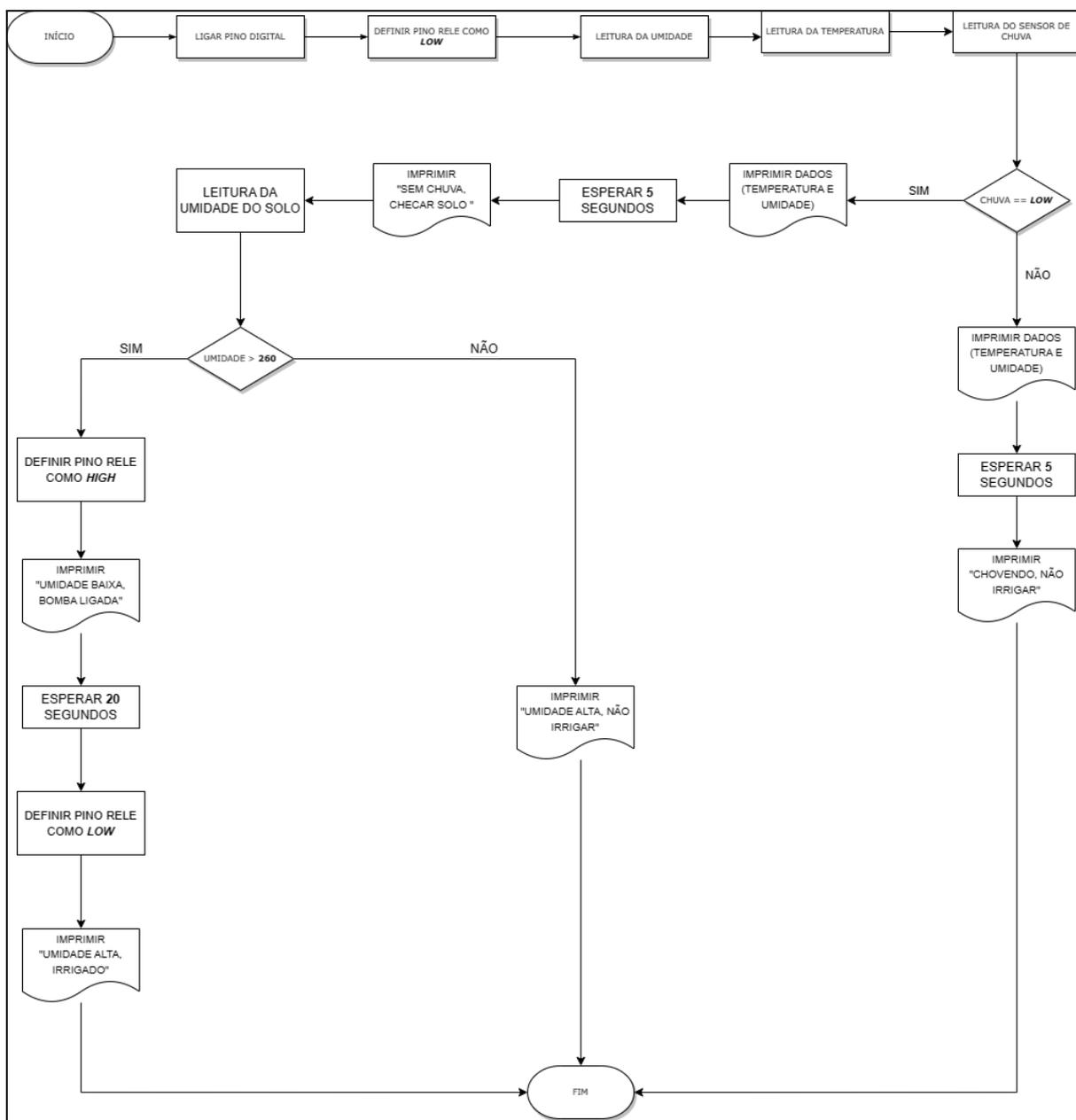


Figura 28 - Fluxograma de programação para o protótipo.  
Fonte: Autor.

A mesma estratégia de acionamento dos acessórios individuais foi adotada, embora com ciclos de funcionamento em intervalos de 1 hora. Como protocolo de testes, optou-se por enfatizar a assertividade do atuador - bomba d'água - e do sensor de umidade do solo. Assim sendo, tomou-se 1500g de substrato, seco em forno convencional por 40 minutos a 200° C, e adicionou-se à jardineira com os gotejadores fixados. O sensor de umidade do solo foi

instalado a uma profundidade de 5 cm, no centro da jardineira. Em seguida, energizou-se a placa Arduino e se iniciou os testes, verificando o funcionamento dos elementos utilizados.

Após os testes protocolados, substituiu-se o substrato dos testes por uma massa conhecida de substrato virgem, seguido do plantio dos cultivares e posicionamento dos sensores.

### 3.9. MONITORAMENTO DO CICLO DE CULTIVO

Adotou-se como critério de avaliação de desempenho do cultivo os índices propostos por Silva (2017) e Souza et al (2020) : peso total; número de folhas; número de folhas aptas para o consumo; altura da planta - caule e folhas - e tamanho das raízes.

Antes do plantio dos cultivares, realizou-se a lavagem das raízes das mudas de alface selecionadas em água. Com o auxílio de uma fita métrica milimetrada realizou-se a aferição da altura das plantas e do tamanho da raiz. Com o auxílio de uma balança digital com resolução de 2 gramas, mediu-se o peso total das plantas. O número de folhas também foi calculado antes do plantio.

Os índices peso total, peso comercial, número de folhas aptas ao consumo e tamanho das raízes deverão ser considerados apenas antes do plantio e após o período de análise de desempenho, pois são métodos relativamente destrutivos. Os demais índices devem ser aferidos em intervalos de tempo variando de 1 a 2 dias. A altura das cultivares foi medida a partir da extremidade inferior do caule até a ponta da folha mais longa da planta.

Os cultivares foram plantados numa jardineira simples com dimensões 30 cm x 12 cm x 11 cm. Para a montagem do sistema de drenagem da jardineira, foram realizados 10 furos aleatórios na base desta. Foi colocada uma camada de pedra brita, cuja massa foi previamente pesada. O substrato foi inserido em seguida até uma profundidade de 6cm. A massa de substrato adicionada também foi calculada, de maneira a estimar a melhor quantidade de água a ser adicionada a partir da calibração do sensor de umidade do solo e vazão da bomba.

O consumo hídrico também é um índice importante na avaliação de desempenho dos modelos de irrigação automatizado e manual. Para o primeiro, deve-se medir o nível de água do reservatório com frequência de 1 a 2 dias. Para o modelo manual, adotou-se 2 períodos de irrigação - um pela manhã e outro pela tarde - com um volume fixo de 250 mL de água para

cada irrigação - considerando a massa de substrato adicionada na jardineira. Ainda, a irrigação manual será realizada com intervalo de 1 dia.

Após um período de observação de 3 semanas - contado a partir do dia 02 de janeiro de 2023 - deve-se partir para a construção dos perfis de desenvolvimento dos cultivares, bem como o perfil de consumo hídrico dos métodos de irrigação manual e automatizado. Para tal, foi utilizado a construção gráfica a partir dos dados aferidos periodicamente, bem como a utilização de linhas de tendência - construídas a partir do próprio software de planilhas eletrônicas - para os dados de altura dos cultivares e desenvolvimento do número de folhas dos mesmos. Por fim, construiu-se o perfil de consumo hídrico para os métodos de irrigação adotados a partir da sobreposição gráfica dos respectivos consumos diários de água. A partir destes dados, determinou-se a média diária de consumo hídrico de cada sistema de irrigação.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO CAPACITIVO**

Após a obtenção dos dados correspondentes à leitura do sensor de umidade do solo capacitivo v1.2, partiu-se para a construção da curva de calibração deste. Para tal, adotou-se os valores estimados de umidade do solo, conforme a Equação (1), no eixo y. Analogamente, adotou-se a leitura observada pelo sensor no eixo x.

Os resultados da calibração do sensor podem ser observados na tabela 2. Ademais, utilizou-se os dados dos volumes de água adicionados em função da umidade observada. Esta correlação é útil na medida que permite determinar um volume mínimo de água a ser adicionado à cultura, a depender da massa de substrato empregada, para que determinado percentual de umidade seja atingido.

Tabela 2 - Calibração do Sensor de Umidade do Solo.

Umidade (%)	$\sigma_U$	Leitura (Bytes)
0,0	-	552
1,1	0,71	404
2,3	0,71	388
3,7	0,57	363
4,9	0,71	340
7,7	0,29	332
10,6	0,29	323
13,4	0,29	302
16,6	0,26	296
19,4	0,29	289
22,3	0,29	270
25,1	0,29	267
28,0	0,29	261
33,7	0,15	251
39,4	0,15	242
45,1	0,15	237
50,9	0,15	236
56,6	0,15	235
70,9	0,06	234

Fonte: Autor.

Como se pode observar na tabela 5, o sensor exibiu leituras na faixa de 560 e 230 bytes para diversos volumes de água adicionados. Entretanto, conforme proposto por Silva (2017), o solo não deve se apresentar encharcado em virtude do melhor desempenho do ciclo de cultivo. Assim sendo, estabeleceu-se uma relação entre a massa de substrato utilizada na calibração e o volume de água adicionado para a variação da umidade de modo a se estabelecer um ponto crítico no qual se deve realizar a irrigação. Essa relação é expressa na tabela 3.

Tabela 3 - Relação Massa/Volume/Umidade.

Massa $\pm$ 2g	V <sub>Água</sub> $\pm$ 1 mL	Leitura (Bytes)	Umidade (%)	$\sigma_U$
350	0 mL	552	0,0	-
354	5 mL	404	1,1	0,71
358	10 mL	388	2,3	0,71
363	15 mL	363	3,7	0,57
367	20 mL	340	4,9	0,71
377	30 mL	332	7,7	0,29
387	40 mL	323	10,6	0,29
397	50 mL	302	13,4	0,29
408	60 mL	296	16,6	0,26
418	70 mL	289	19,4	0,29
428	80 mL	270	22,3	0,29
438	90 mL	267	25,1	0,29
448	100 mL	261	28,0	0,29
468	120 mL	251	33,7	0,15
488	140 mL	242	39,4	0,15
508	160 mL	237	45,1	0,15
528	180 mL	236	50,9	0,15
548	200 mL	235	56,6	0,15
598	250 mL	234	70,9	0,06

Fonte: Autor.

Os testes protocolados com a adição de água demonstraram que, para uma massa seca inicial de 350 g o ponto crítico, no qual o substrato úmido começa a demonstrar sinais de encharque, é aquele no qual o volume de água adicionado é de 140 mL (figura 29).



Figura 29 - Substrato encharcado com 140 mL de água.

Fonte: Autor.

Ainda, foi observado que a partir deste ponto crítico a leitura do sensor passou a variar muito pouco em comparação com as leituras anteriores, sempre convergindo próximo a 230 bytes. Entretanto, nota-se que a correlação utilizada para a estimativa da umidade no solo só alcança um percentual próximo a 71%, bem distante do proposto por Silva (2017) - 80 a 90%.

Contudo, deve-se levar em consideração o tipo de substrato utilizado e sua retenção de líquido, indeterminada experimentalmente. Deve-se considerar também que os testes foram realizados num recipiente plástico sem sistema de drenagem da água adicionada. Assim sendo, é preferível que o sistema automatizado acione a irrigação em diversos períodos ao longo do dia, de forma a sustentar a necessidade de água dos cultivares e evitar o estresse hídrico do meio.

Após a tabulação dos dados, partiu-se para a determinação gráfica do comportamento do sensor de umidade do solo capacitivo. Conforme mencionado na seção 3, testes preliminares indicaram um comportamento exponencial do sensor, o que pode ser comprovado pela seguinte figura :

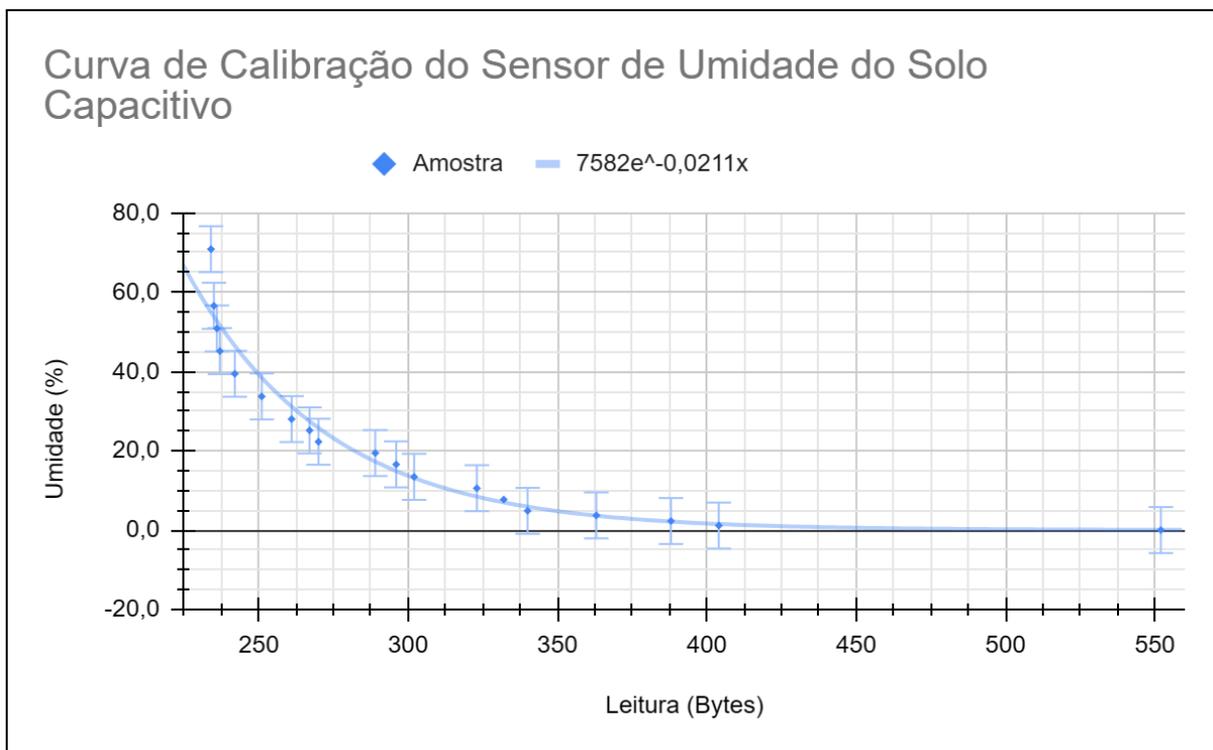


Figura 30 - Curva de calibração do sensor de umidade do solo capacitivo.

Fonte: Autor.

Para o tratamento estatístico do gráfico e dos dados de origem, primeiramente fez-se uma transformação no modelo exponencial por um modelo logarítmico natural, de acordo com Chapra (2011). Assim sendo, o gráfico linearizado é dado pelos valores de  $\ln(U)$  e pela leitura, em bytes, do sensor. Ademais, para fins de tratamento estatístico, omitiu-se o primeiro ponto no qual a umidade foi considerada como zero. Os dados para a linearização podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 - Dados para a linearização.

<b>Ln (U)</b>	<b>Leitura (Bytes)</b>
0,1335	404
0,8267	388
1,3122	363
1,5805	340
2,0431	332

2,3582	323
2,5974	302
2,8077	296
2,9667	289
3,1039	270
3,2246	267
3,3322	261
3,5179	251
3,6745	242
3,8098	237
3,9290	236
4,0355	235
4,2607	234

Fonte: Autor.

Para verificar a verossimilhança dos dados de linearização, aplicou-se o ajuste por mínimos quadrados aos dados tabulados acima, conforme as equações (4) e (5). Dessa forma, obteve-se coeficientes angular e linear iguais a  $-0,02124$  e  $8,968$ . O gráfico linearizado foi plotado conforme os parâmetros da reta calculados.

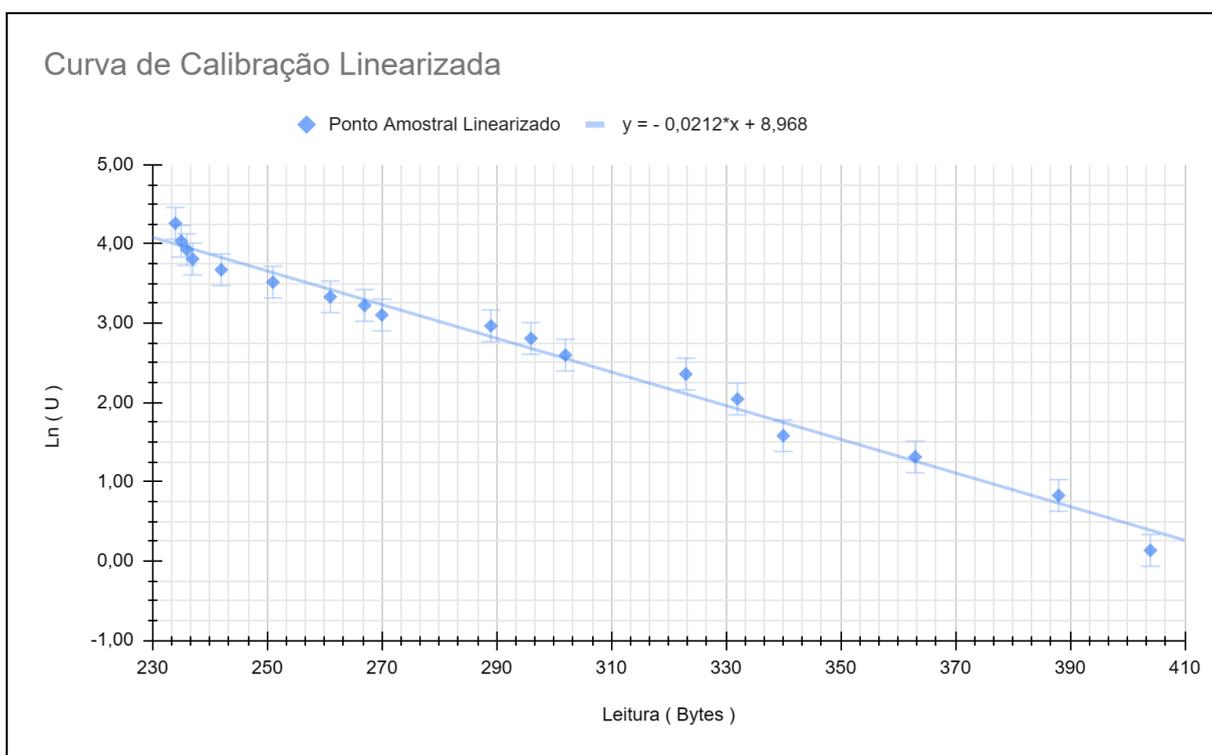


Figura 31 - Curva de calibração do sensor de umidade do solo capacitivo linearizada.  
Fonte: Autor.

Novamente, nota-se que os pontos amostrais passam a se distanciar em magnitudes cada vez menores após o ponto crítico adotado, indicando a convergência destes valores.

Em seguida, para verificar se o modelo ajustado apresentou qualidade satisfatória, aplicou-se os testes do qui-quadrado e qui-quadrado reduzido. Dessa forma, prosseguiu-se com o cálculo das incertezas de cada ponto amostral, conforme equação (7). Assim sendo, para um total de 18 pontos amostrais analisados, obteve-se um valor médio para  $\text{Ln}(U)$  equivalente a 3,0353.

Em seguida, calculou-se os valores da função ajustada para cada ponto amostral -  $f(x_i)$ . Os dados referentes à determinação das incertezas e dos valores da função ajustada podem ser observados na tabela 5.

Tabela 5 - Teste do qui-quadrado.

Ln (U)	Leitura (Bytes)	$\sigma_i^2$	f (x <sub>i</sub> )	$\chi_i^2$
0,1335	404	8,42052	0,4032	0,00864
0,8267	388	4,87821	0,7424	0,00146
1,3122	363	2,96928	1,2724	0,00053
1,5805	340	2,11672	1,7600	0,01523
2,0431	332	0,98460	1,9296	0,01308
2,3582	323	0,45859	2,1204	0,12326
2,5974	302	0,19181	2,5656	0,00527
2,8077	296	0,05183	2,6928	0,25462
2,9667	289	0,00471	2,8412	3,34920
3,1039	270	0,00471	3,2440	4,16809
3,2246	267	0,03581	3,3076	0,19251
3,3322	261	0,08813	3,4348	0,11944
3,5179	251	0,23288	3,6468	0,07132
3,6745	242	0,40851	3,8376	0,06513
3,8098	237	0,59983	3,9436	0,02983
3,9290	236	0,79866	3,9648	0,00160
4,0355	235	1,00032	3,9860	0,00245
4,2607	234	1,50141	4,0072	0,04279

Fonte: Autor.

Em posse dos valores individuais de cada ponto amostral para  $\chi^2$ , realizou-se o somatório desses valores para a determinação do  $\chi^2$  do modelo linearizado. Obteve-se para este valor 8,46445. Em seguida, admitindo que a quantidade de parâmetros ajustados foi igual a 2 - coeficientes angular e linear da reta ajustada - tem-se uma quantidade de graus de liberdade igual a 16. Por fim, a partir da equação (9), partiu-se para o cálculo do qui-quadrado reduzido.

Obteve-se, a partir do cálculo de  $\chi_{\text{red}}^2$ , um valor equivalente a 0,52903. Segundo Taylor (2012), os testes de qui-quadrado e qui-quadrado reduzido são utilizados para determinar a validade de um modelo e/ou o quanto ele está distante do esperado. Assim

sendo, é esperado uma certa probabilidade de ocorrência dos resultados obtidos em função do valor de  $\chi^2_{\text{red}}$  calculado e do número de graus de liberdade. Ainda de acordo com Taylor (2012), o valor mínimo de  $\chi^2_{\text{red}}$  que deve ser questionado depende do número de graus de liberdade e deve ter uma discordância significativa de 5%.

Assim sendo, para o valor obtido experimentalmente de  $\chi^2_{\text{red}} = 0,52903$ , tem-se uma probabilidade percentual de que o modelo linearizado é coerente com a distribuição esperada de é próximo de 93,31%. Esse percentual de verossimilhança foi calculado a partir de uma interpolação pelo método de Newton utilizando os dados do Apêndice D para probabilidades de  $\chi^2_{\text{red}}$  propostos por Taylor (2012).

Dessa forma, adotando os critérios de exclusão de hipóteses (TAYLOR, 2012) -  $\chi^2_{\text{red}}$  inferior a 1 e percentual de probabilidade superior a 5% - pode-se concluir que o ajuste foi adequado e descreveu com certeza superior a 90% o comportamento do sensor de umidade do solo capacitivo.

## 4.2. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO TIPO RESISTIVO

Após a obtenção dos dados correspondentes à leitura do sensor de umidade do solo capacitivo v1.2, partiu-se para a construção da curva de calibração deste. Para tal, adotou-se os valores estimados de umidade do solo, conforme a equação (1), no eixo y. Analogamente, adotou-se a leitura observada pelo sensor no eixo x. As incertezas na estimativa da umidade do solo foram determinadas pelas equações (2) e (3). Os dados para a construção da curva de calibração para o sensor resistivo podem ser observados na tabela 6.

Tabela 6 - Calibração do sensor resistivo.

Umidade (%)	Leitura
0,0	989
1,1	648
2,3	395
3,7	269
4,9	306
7,7	167
10,6	144
13,4	151
16,6	157
19,4	157
22,3	152
25,1	159
28,0	172
33,7	174
39,4	182
45,1	193
50,9	255
56,6	157
70,9	144

Fonte: Autor.

Uma análise superficial dos dados da tabela 9 mostram uma não uniformidade dos pontos amostrais conforme a água é adicionada. Dessa forma, uma relação entre a massa de substrato utilizada e o volume de água adicionado para a variação da umidade se faz necessária. Esses dados podem ser observados na tabela 6.

Tabela 7 - Relação Massa/Volume/Umidade.

Massa $\pm$ 2g	Volume de Água $\pm$ 1 mL	Umidade (%)	Leitura (Bytes)
350	0 mL	0,0	989
354	5 mL	1,1	648
358	10 mL	2,3	395
363	15 mL	3,7	269
367	20 mL	4,9	306

377	30 mL	7,7	167
387	40 mL	10,6	144
397	50 mL	13,4	151
408	60 mL	16,6	157
418	70 mL	19,4	157
428	80 mL	22,3	152
438	90 mL	25,1	159
448	100 mL	28,0	172
468	120 mL	33,7	174
488	140 mL	39,4	182
508	160 mL	45,1	193
528	180 mL	50,9	255
548	200 mL	56,6	157
598	250 mL	70,9	144

Fonte: Autor.

Em posse dos dados tabelados, partiu-se para a análise gráfica dos mesmos. O resultado pode ser observado na figura 32.

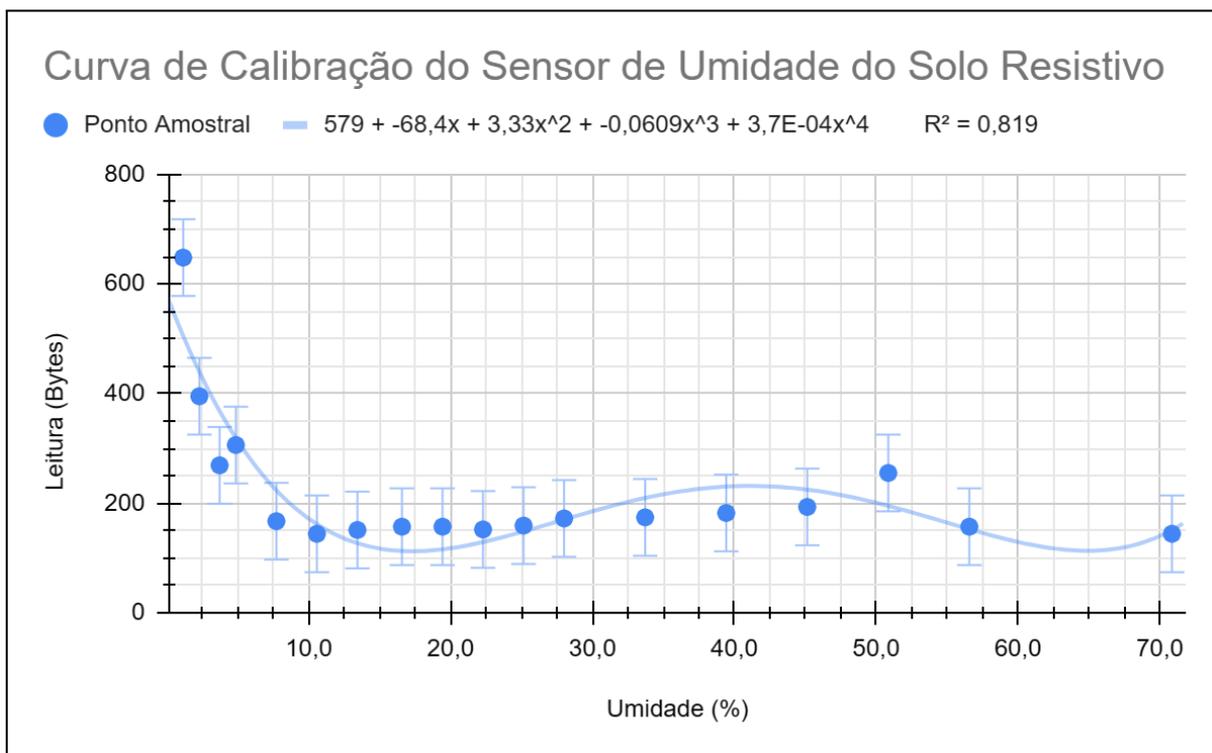


Figura 32 - Curva de calibração do sensor de umidade do solo resistivo.

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, o perfil que mais se ajustou aos pontos amostrais é um polinômio de grau 4. Entretanto, mesmo para este polinômio a qualidade do ajuste é na faixa de 82%, muito abaixo da qualidade encontrada para o sensor capacitivo. Mesmo considerando que os métodos para determinar a qualidade da curva aos pontos amostrais foram diferentes para os sensores capacitivo e resistivo, têm-se, aliado a esse parâmetro, a não uniformidade dos pontos.

Mesmo assim, pode-se determinar o ponto crítico para as medidas como sendo abaixo de uma leitura de 200 bytes. O estado de encharque do substrato ocorre na faixa de 140 mL de água adicionadas a 350 gramas de substrato. Entretanto, considerando o desempenho do sensor, este pode apresentar uma falsa leitura se utilizado no protótipo final.

Durante os testes de calibração, o sensor resistivo apresentou, no tempo de acomodação determinado, baixíssima resolução, o que foi corrigido pela tomada de dados após 5 leituras do sensor. Dessa forma, seria necessário um maior grau de sensibilidade deste sensor e a tomada de pelo menos 5 leituras para se assumir uma assertividade de 80%.

Em comparação com o desempenho do sensor de umidade do solo capacitivo no decorrer dos testes de calibração, nota-se diferentes faixas de medições para cada um dos sensores. O primeiro mostrou ser capaz de informar o estado de umidade do solo em três faixas distintas : a primeira consiste na indicação de um solo bastante úmido, convergindo para uma leitura entre 260 e 250 bytes; a segunda faixa de medição é para o solo com uma umidade média, cujo intervalo de medidas está entre 260 e 400 bytes; por fim, a última faixa de medição é para o solo extremamente seco, cuja leitura se apresenta acima de 400 bytes.

Não somente, o sensor de umidade resistivo apresenta apenas duas faixas de medições, ambas com baixa resolução. A primeira compreende umidades do solo abaixo de 10%, num intervalo de leitura de 200 a 650 bytes. A segunda faixa oscila entre valores de 100 e 200 bytes, sendo incapaz de apresentar de maneira clara qual a umidade do solo em função da leitura.

Dessa forma, pode-se dizer que a utilização do sensor de umidade do solo tipo resistivo não se adequa aos conceitos de agricultura de precisão, justamente pelo fato de sua baixa resolução quando a umidade é superior a 10%. Contudo, sua utilização para a determinação de condições críticas - teor de umidade abaixo de 10% -, bem como sua aplicação em sistemas menos precisos não é de todo inviável. Porém, nota-se evidente melhor desempenho do sensor capacitivo, e, tendo em vista o custo comercial e disponibilidade dos dois tipos de sensores, é pertinente adotar o sensor capacitivo como instrumento de melhor custo benefício.

#### 4.3. CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DA BOMBA DE ÁGUA

Para a determinação do comportamento da bomba de água utilizada no sistema de irrigação automatizado, primeiramente tabulou-se os volumes medidos referentes a cada tempo de ativação da bomba, todos em triplicata. Os dados podem ser observados na tabela 8.

Tabela 8 - Volume bombeado em função do tempo.

Tempo (s)	Volume $\pm$ 5 mL
5	20
5	25
5	20
10	55
10	60
10	55
15	115
15	115
15	110
20	160
20	160
20	155
25	200
25	200
25	180
30	220
30	220
30	225
35	260
35	250
35	260

Fonte: Autor.

Uma análise superficial permite dizer que, ao passar o tempo de ativação de 5 segundos para 10 segundos, a resolução da variação do volume é muito divergente se comparado aos demais intervalos. Dessa forma, parte-se para o ajuste linear do modelo pelo método dos mínimos quadrados.

Através das equações (4) e (5), obteve-se coeficientes angular e linear equivalentes a 7,96 e -13,33, respectivamente. O gráfico linearizado, com as respectivas barras de erros - equivalente à resolução do recipiente coletor - é apresentado como se segue :

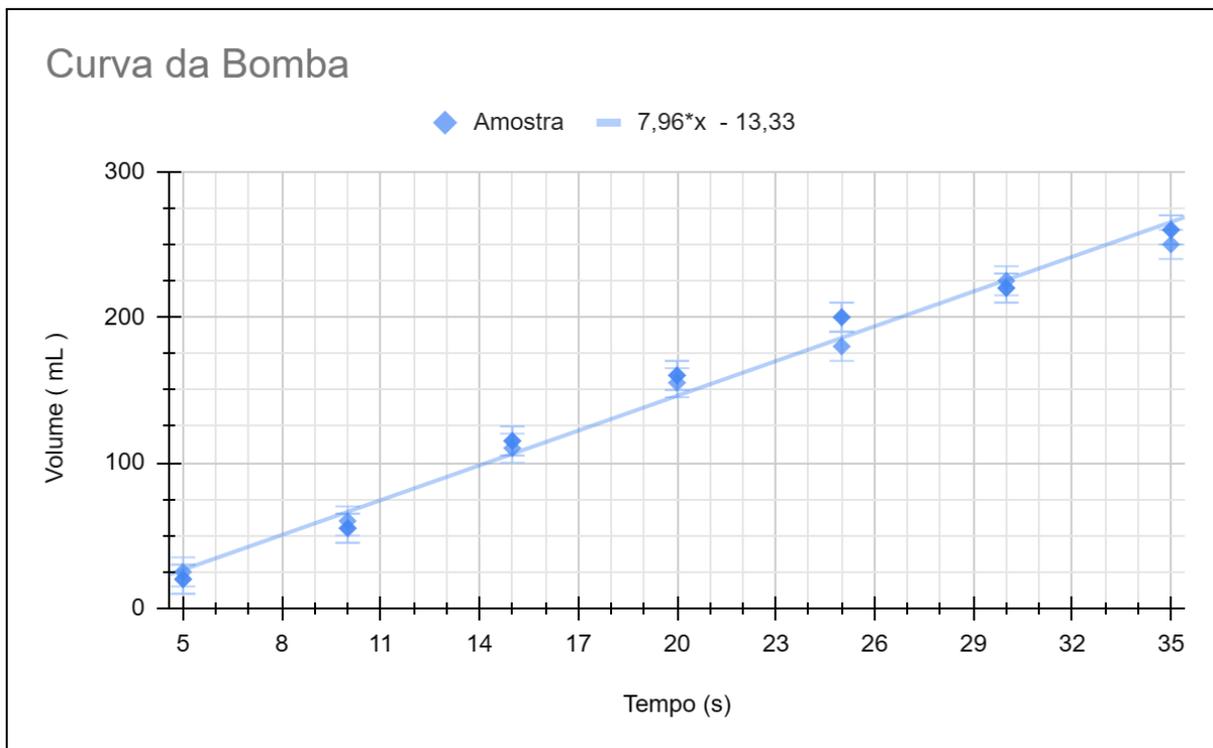


Figura 33 - Curva de calibração da mini bomba de água.

Fonte: Autor.

De modo a verificar a verossimilhança do ajuste, partiu-se para os testes de qui-quadrado e qui-quadrado reduzido. Assim, calculou-se um valor médio para os volumes medidos - a fim de se calcular  $\sigma_i^2$  - equivalente a *145,95 mL*, considerando 21 pontos amostrais. Em seguida, calculou-se  $\sigma_i^2$  para cada ponto, a partir da equação (7). Os valores de  $f(x_i)$  também foram computados para cada ponto amostral, seguido da determinação de  $\chi^2$  para cada ponto. Os dados foram organizados na tabela 9.

Tabela 9 - Teste do qui-quadrado.

Tempo (s)	Volume $\pm$ 5 mL	$\sigma_i^2$	$f(x_i)$	$\chi_i^2$
5	20	1,59E+04	26,49	0,0027
5	25	1,46E+04	26,49	0,0002
5	20	1,59E+04	26,49	0,0027
10	55	8,27E+03	66,31	0,0155
10	60	7,39E+03	66,31	0,0054
10	55	8,27E+03	66,31	0,0155
15	115	9,58E+02	106,13	0,0821
15	115	9,58E+02	106,13	0,0821
15	110	1,29E+03	106,13	0,0116
20	160	1,97E+02	145,95	1,0000
20	160	1,97E+02	145,95	1,0000
20	155	8,19E+01	145,95	1,0000
25	200	2,92E+03	185,77	0,0693
25	200	2,92E+03	185,77	0,0693
25	180	1,16E+03	185,77	0,0288
30	220	5,48E+03	225,60	0,0057
30	220	5,48E+03	225,60	0,0057
30	225	6,25E+03	225,60	0,0001
35	260	1,30E+04	265,42	0,0023
35	250	1,08E+04	265,42	0,0220
35	260	1,30E+04	265,42	0,0023

Fonte: Autor.

Para determinar se o modelo ajustado condiz com o esperado, calculou-se o somatório dos  $\chi_i^2$  individuais e obteve-se um valor de 3,4228 para o  $\chi^2$  do modelo linearizado. Para dois parâmetros ajustados - coeficientes angular e linear da reta - o número de graus de liberdade é 19. Aplicando a equação (9) ao valor calculado, obtém-se  $\chi_{\text{red}}^2$  igual a 0,180149.

De acordo com Taylor (2012), admite-se a hipótese do modelo caso o valor do qui-quadrado reduzido calculado for inferior a 1. Dessa forma, pode-se admitir que o modelo

linearizado descreve com segurança o perfil esperado. Entretanto, pode-se aplicar um novo critério de decisão para verificar a certeza com a qual este modelo descreve o fenômeno analisado. De acordo com os dados do Apêndice D (TAYLOR, 2012), tem-se uma probabilidade de 100% de que o comportamento descrito seja condizente com o esperado.

$d$	$\bar{\chi}_o^2$															
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	8,0	10,0	
1	100	48	32	22	16	11	8,3	6,1	4,6	3,4	2,5	1,9	1,4	0,5	0,2	
2	100	61	37	22	14	8,2	5,0	3,0	1,8	1,1	0,7	0,4	0,2			
3	100	68	39	21	11	5,8	2,9	1,5	0,7	0,4	0,2	0,1				
4	100	74	41	20	9,2	4,0	1,7	0,7	0,3	0,1	0,1					
5	100	78	42	19	7,5	2,9	1,0	0,4	0,1							
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
1	100	65	53	44	37	32	27	24	21	18	16	14	12	11	9,4	8,3
2	100	82	67	55	45	37	30	25	20	17	14	11	9,1	7,4	6,1	5,0
3	100	90	75	61	49	39	31	24	19	14	11	8,6	6,6	5,0	3,8	2,9
4	100	94	81	66	52	41	31	23	17	13	9,2	6,6	4,8	3,4	2,4	1,7
5	100	96	85	70	55	42	31	22	16	11	7,5	5,1	3,5	2,3	1,6	1,0
6	100	98	88	73	57	42	30	21	14	9,5	6,2	4,0	2,5	1,6	1,0	0,6
7	100	99	90	76	59	43	30	20	13	8,2	5,1	3,1	1,9	1,1	0,7	0,4
8	100	99	92	78	60	43	29	19	12	7,2	4,2	2,4	1,4	0,8	0,4	0,2
9	100	99	94	80	62	44	29	18	11	6,3	3,5	1,9	1,0	0,5	0,3	0,1
10	100	100	95	82	63	44	29	17	10	5,5	2,9	1,5	0,8	0,4	0,2	0,1
11	100	100	96	83	64	44	28	16	9,1	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,1	0,1
12	100	100	96	84	65	45	28	16	8,4	4,2	2,0	0,9	0,4	0,2	0,1	
13	100	100	97	86	66	45	27	15	7,7	3,7	1,7	0,7	0,3	0,1	0,1	
14	100	100	98	87	67	45	27	14	7,1	3,3	1,4	0,6	0,2	0,1		
15	100	100	98	88	68	45	26	14	6,5	2,9	1,2	0,5	0,2	0,1		
16	100	100	98	89	69	45	26	13	6,0	2,5	1,0	0,4	0,1			
17	100	100	99	90	70	45	25	12	5,5	2,2	0,8	0,3	0,1			
18	100	100	99	90	70	46	25	12	5,1	2,0	0,7	0,2	0,1			
19	100	100	99	91	71	46	25	11	4,7	1,7	0,6	0,2	0,1			
20	100	100	99	92	72	46	24	11	4,3	1,5	0,5	0,1				

Figura 34 - Probabilidade percentual de ocorrência para  $\chi_{red}^2$ .  
Fonte : TAYLOR (2012).

#### 4.4. DESEMPENHO DO SENSOR DE CHUVA

A partir da batelada de testes protocolados com o sensor de chuva, analisou-se a assertividade deste em descrever o estado da placa quando seco e quando molhado. Dessa

forma, iniciou-se o teste com a placa seca, anotando a resposta do sensor, e prosseguindo com a adição de água na superfície da placa sensora. Realizou-se estes testes intercalados por 20 vezes.

O microcontrolador foi instruído a exibir a mensagem “CHOVENDO” quando o estado da placa se apresentasse alto - *HIGH*. Analogamente, a mensagem “SEM CHUVA” seria exibida quando o estado da placa sensora se apresentasse como baixo - *LOW*. Dessa forma, anotou-se as respostas do sensor como *O* para uma resposta condizente ao estado da placa e *X* para uma resposta errada. Os dados podem ser observados na tabela 10.

Tabela 10 - Respostas do sensor de chuva sob diferentes condições de teste.

Teste	Estado da Placa	Resposta do Sensor	ASSERTIVIDADE
1	SECO	SEM CHUVA	O
2	MOLHADO	SEM CHUVA	X
3	SECO	SEM CHUVA	O
4	MOLHADO	CHOVENDO	O
5	SECO	CHOVENDO	X
6	MOLHADO	SEM CHUVA	X
7	SECO	SEM CHUVA	O
8	MOLHADO	CHOVENDO	O
9	SECO	SEM CHUVA	O
10	MOLHADO	CHOVENDO	O
11	SECO	SEM CHUVA	O
12	MOLHADO	CHOVENDO	O
13	SECO	CHOVENDO	X
14	MOLHADO	SEM CHUVA	X
15	SECO	SEM CHUVA	O
16	MOLHADO	CHOVENDO	O
17	SECO	CHOVENDO	X
18	MOLHADO	SEM CHUVA	X
19	SECO	SEM CHUVA	O
20	MOLHADO	CHOVENDO	O

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, o sensor apresentou um atraso na identificação do estado da placa, o que resultou em uma baixa assertividade total - 65% . Ainda, considerando apenas

as assertividades dos estados seco e molhado, a placa apresentou assertividades equivalentes a 70% e 60%, respectivamente.

Uma vez que o sistema de irrigação automatizado visa o uso eficaz de água para irrigação, bem como o controle dos atuadores que irão fazê-la, o critério de decisão - irrigar ou não irrigar - deve recair quase que totalmente no sensor de umidade do solo, considerando que a implantação do protótipo se dá em local não coberto.

Em outras palavras, o sensor de chuva não deve ser utilizado como único critério para tomada de decisão sobre os atuadores em sistemas de irrigação automatizados. Isto porque uma leitura errônea do estado da placa sensora pode resultar no acionamento da bomba de irrigação e aplicação de água em excesso na cultura, provocando o estresse hídrico do meio de cultivo.

#### 4.5. DESEMPENHO DO PROTÓTIPO

Após a montagem metodológica do protótipo, partiu-se para os testes protocolados conforme descrito na seção 3.7. Realizou-se 5 testes, com ciclos de acionamento de 1 hora, com o acionamento simultâneo de todos os elementos constituintes e em substrato seco. A visão geral do protótipo pode ser observada nas figuras 35 e 36.

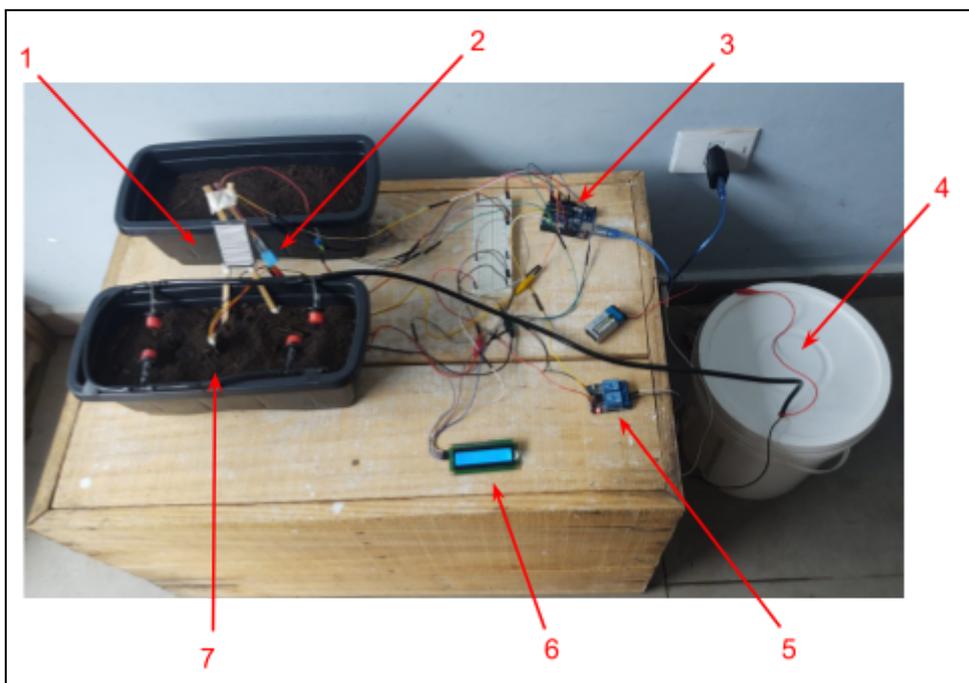


Figura 35 - Visão geral do protótipo.

Legenda: (1) Sensor de chuva; (2) Sensor DHT11 ; (3) Placa Arduino Uno ; (4) Reservatório de água ; (5) Módulo relé 2 canais ; (6) Display LCD I2C ; (7) Sensor de umidade do solo capacitivo.

Fonte: Autor.

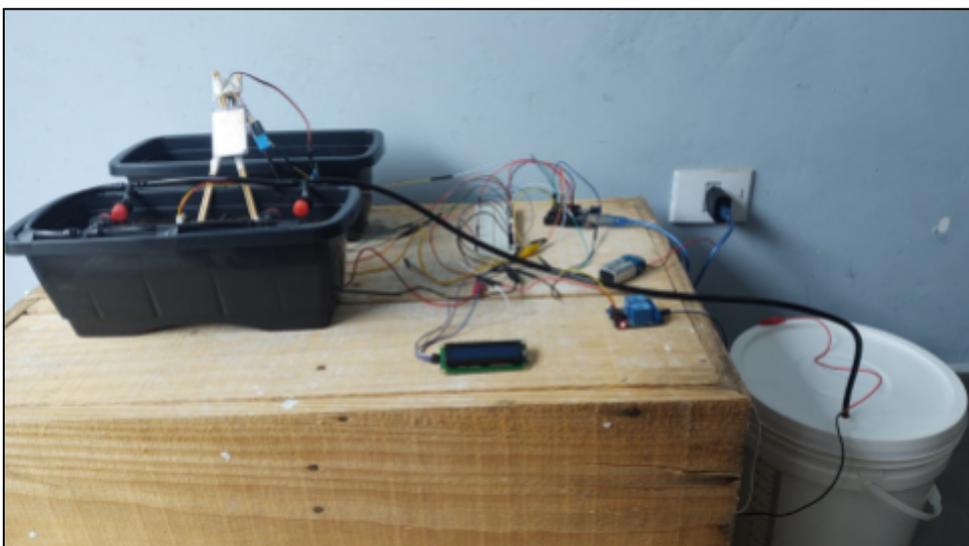


Figura 36 - Visão frontal do protótipo.

Fonte: Autor.

O acionamento do atuador - mini bomba de água - em função das condições de umidade do solo se provaram bastante eficazes, não ocorrendo nenhum erro sistemático no

todo. Conforme esperado, o protótipo acionou a bomba de água no início dos testes, uma vez que o substrato utilizado foi previamente seco. As condições de temperatura e umidade do ambiente, bem como o estado chuvoso foram corretamente mostrados no display lcd utilizado.

De acordo com os resultados obtidos nas calibrações dos sensores de umidade do solo, o sensor capacitivo apresentou melhor performance que o sensor resistivo. Não somente, o dispositivo capacitivo possui maior resistência à corrosão pelo meio, o que fez dele a escolha mais adequada para um projeto de médio a longo prazo como é o caso de controle de irrigação em ciclos de cultivo.

Devido ao sistema de drenagem montado no recipiente de cultivo, a água adicionada nos primeiros 3 acionamentos da bomba foram parcialmente escoadas. Nos dois acionamentos seguintes, a capacidade de retenção de água do substrato aumentou de modo que pouca ou nenhuma água de irrigação escoasse. Após os testes protocolados, partiu-se para o plantio dos cultivares em novo substrato, considerando o desempenho do protótipo aceitável.

#### 4.6. ACOMPANHAMENTO DO CICLO DE CULTIVO

Conforme descrito na seção 3.8, após a montagem e teste de desempenho do protótipo partiu-se para os testes com os cultivares. Para isso, foram selecionadas 4 mudas de alface mimosa - *Lactuca sativa*. Esta espécie foi selecionada em virtude de seu rápido ciclo de crescimento - 30 a 40 dias após o plantio. Além disso, sua fisiologia permite a tomada de medidas, como altura e número de folhas com relativa facilidade.

Após a seleção das mudas, estas tiveram suas raízes lavadas e medidas com auxílio de uma fita métrica milimetrada. A altura das plantas foi medida em seguida, com a mesma fita métrica. Por fim, determinou-se o número de folhas da planta e seu peso total. Com os dados coletados, seguiu-se o plantio dos cultivares. A figura 37 mostra o aspecto das mudas antes do plantio, e a tabela 11 apresenta os resultados das medidas realizadas.

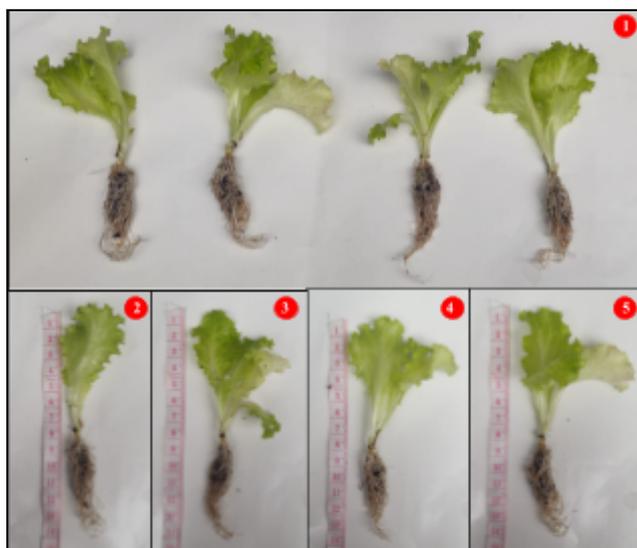


Figura 37 - Cultivares antes do plantio em substrato.  
 Legenda: (1) Amostras 1 a 4 - Direita para esquerda ; (2) Amostra 1 ;  
 (3) Amostra 2 ; (4) Amostra 3 ; (5) Amostra 4.  
 Fonte: Autor.

Tabela 11 - Dimensões dos cultivares antes do plantio.

Amostra	Peso total $\pm$ 1g	Nº de folhas	Altura $\pm$ 0,2 cm	Tamanho da Raíz $\pm$ 0,2cm
1	2	3	7,5	7,1
2	3	4	8,0	7,0
3	2	3	7,8	7,4
4	2	3	8,1	7,7

Fonte: Autor.

As amostras foram plantadas no dia 02/01/2023 e numeradas de 1 a 4. As amostra 1 e 2 ficaram sob influência do método de irrigação automatizado. As demais amostras foram irrigadas manualmente. O volume do reservatório de água, constituinte do sistema automatizado, foi aferido como 9 litros.

Após a ativação do sistema, notou-se que o sensor de umidade do solo capacitivo determinou a necessidade de irrigação logo no primeiro momento. As aferições automatizadas pelo microcontrolador foram realizadas em intervalos de 1 hora.

Em virtude da comparação entre os métodos manual e automatizado, realizou-se periodicamente a aferição das dimensões dos cultivares - altura da planta e número de folhas - , bem como controle hídrico para ambos os sistemas. A figura 38 mostra as curvas de desenvolvimento dos cultivares, relativas às suas alturas.

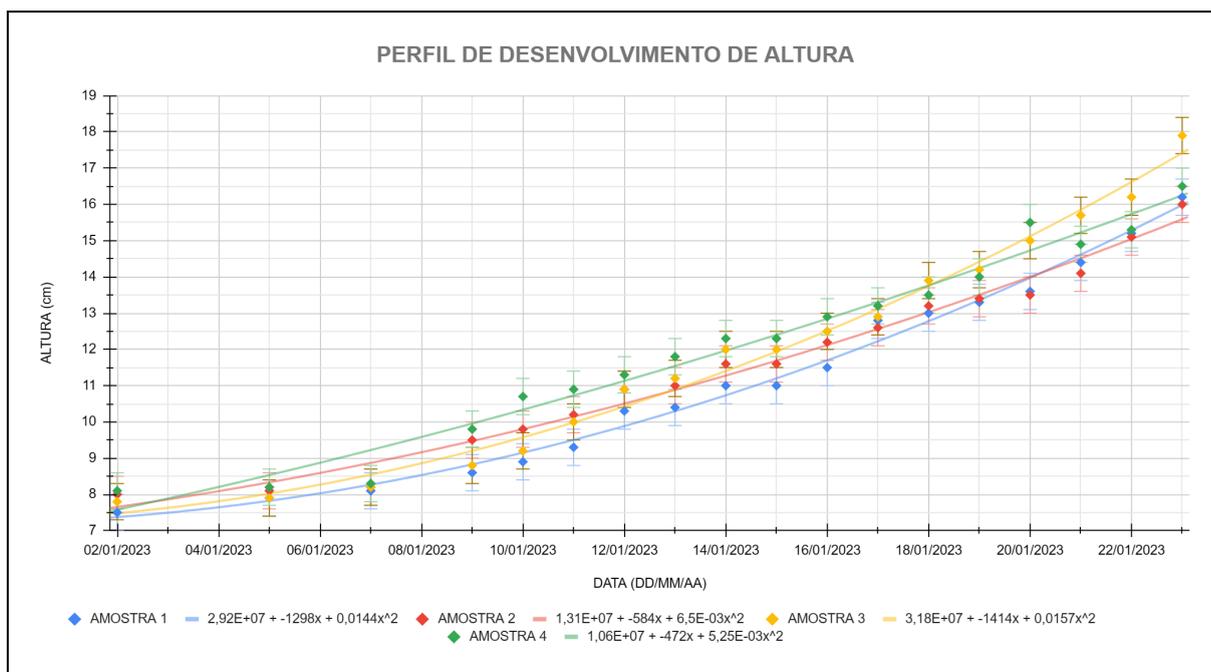


Figura 38 - Perfil de desenvolvimento dos cultivares : Altura.

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, as amostras 3 e 4 - cultivadas por irrigação manual conforme metodologia descrita na seção 3.8 - apresentaram maiores dimensões de folhagem e caule. Ademais, nota-se grande diferença entre a amostra 3 e todas as demais. Ademais, foram traçadas as linhas de tendência referentes ao comportamento da curva que descreve o crescimento das plantas. Dessa forma, é possível estimar a altura de uma amostra a partir de um determinado período de tempo. Ademais, a qualidade dos modelos de tendência, dados pelo  $R^2$  calculado pelo software de planilhas eletrônicas, se provou satisfatória. A tabela 12 mostra o valor de  $R^2$  para o perfil de cada amostra.

Tabela 12 - Qualidade dos modelos de Tendência: Altura

AMOSTRA	R <sup>2</sup>
1	0,990
2	0,984
3	0,989
4	0,975

Fonte: Autor.

Considerando que, no início da avaliação do ciclo de cultivo, as amostras apresentaram características e dimensões similares, o desenvolvimento superior da amostra 3 se deu de maneira lenta no início, mas bastante expressiva na reta final de avaliação. Ainda, pode-se dizer que as amostras 1, 2 e 4 apresentaram um resultado final bastante próximo umas das outras. Em seguida, fez-se a análise do desenvolvimento em relação a quantidade de folhas de cada amostra, conforme mostra a figura 39.

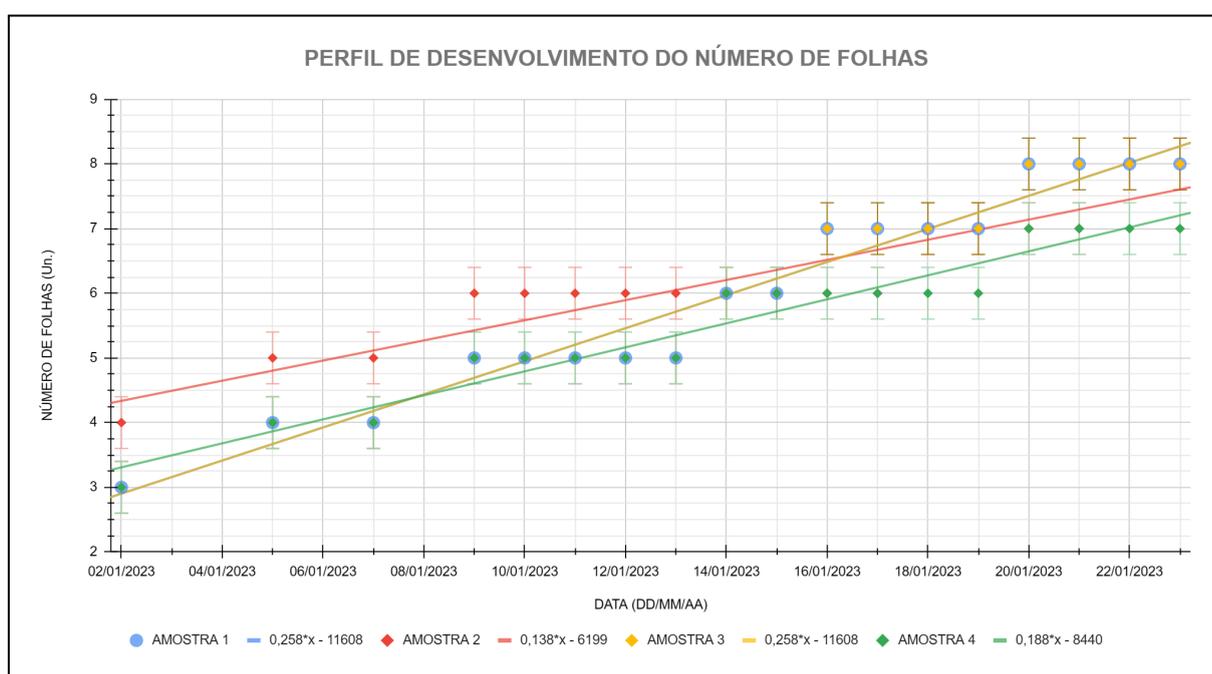


Figura 39 - Perfil de desenvolvimento dos cultivares : Número de folhas.

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, as amostras apresentaram um perfil de desenvolvimento foliar muito similar entre si. As divergências se dão em função apenas das características

iniciais de cada amostra - somente a amostra 2 apresentou um número de folhas superior no momento de plantio. Além disso, as amostras 1 e 3 apresentaram perfis idênticos de desenvolvimento de novas folhas. A amostra 2, apesar de possuir mais folhas no início da análise, não manteve essa característica no decorrer do ciclo, tendo sido observado decaimento da qualidade das folhas, mantendo estagnada sua quantidade de folhas. A tabela 13 apresenta a qualidade dos modelos de tendência para cada amostra em função do valor de  $R^2$  fornecido pelo software de planilhas eletrônicas.

Tabela 13 - Qualidade dos modelos de Tendência: Número de Folhas

AMOSTRA	$R^2$
1	0,956
2	0,869
3	0,956
4	0,942

Fonte: Autor.

Comparando com o desenvolvimento das alturas, nota-se que uma maior quantidade de folhas saudáveis não se traduz em melhor qualidade final. Entretanto, é necessário considerar as individualidades de cada amostra. A figura 40 mostra o desenvolvimento das amostras no referido intervalo de análise.



Figura 40 - Desenvolvimento dos cultivares no sistema automatizado (esquerda) e manual (direita).  
 Legenda: (1) Dia 02/01/2023 ; (2) Dia 10/01/2023 ; (3) 12/01/2023 .  
 Fonte: Autor.

O controle de pragas e análise do aspecto das amostras também foi realizado no determinado período. Nota-se que a amostra 2 e 4 apresentaram maior grau de *tip burn* (figura 30) - queimadura nas pontas das folhas. Isso pode ser explicado ou pela deficiência de minerais no substrato - especialmente cálcio - ou pela exposição das folhas à umidade. Uma vez que a análise química do substrato está fora do escopo deste trabalho, pode-se atribuir à umidade a causa das queimaduras.



Figura 41 - *Tip burn*, amostra 4.  
 Fonte: Autor.

Fez-se também, no referido período de análise, o controle hídrico dos sistemas de irrigação automatizado e manual. A figura 42 mostra o desenvolvimento do perfil de consumo hídrico para os sistemas manual e automatizado.

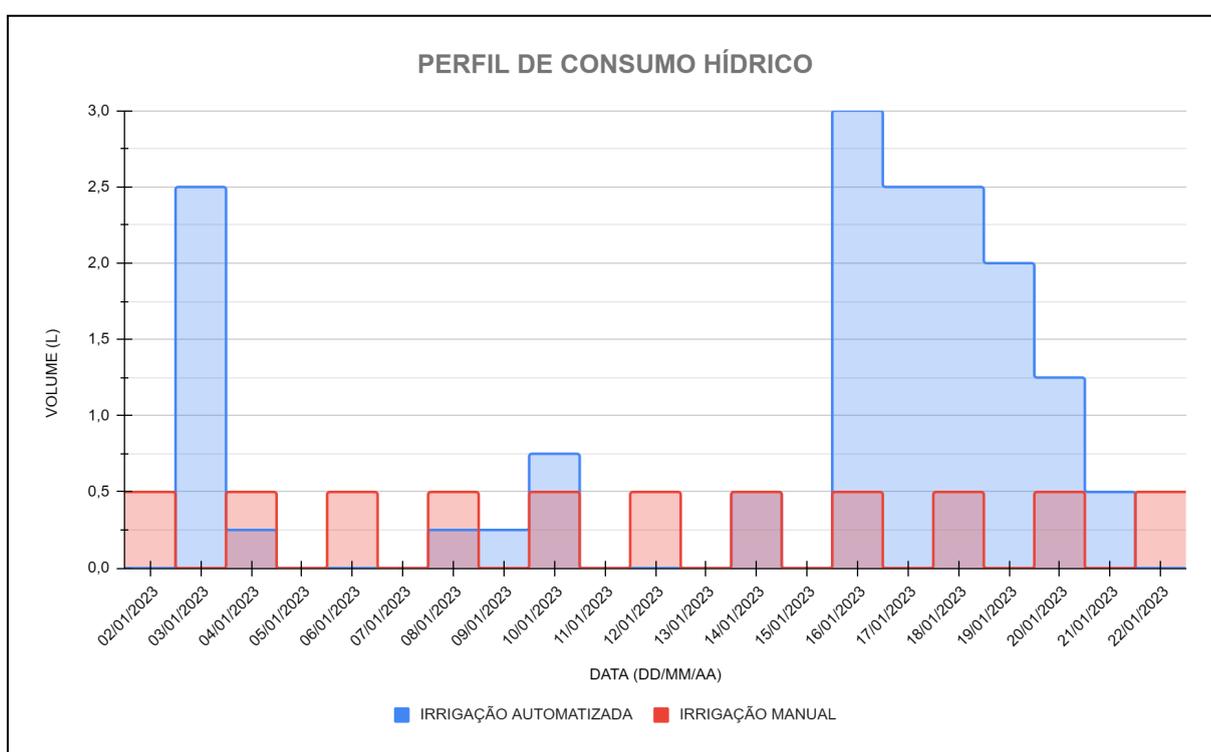


Figura 42 - Perfil de consumo hídrico por sistema de irrigação adotado.

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, nos primeiros 2 dias o sistema automatizado consumiu 2,5 litros de água de água, seguido de períodos intermitentes sem consumo algum de água. Em comparação, o sistema manual apresentou maior uniformidade no consumo hídrico. Novamente, a partir do dia 16/01/2023, o sistema automatizado interpretou a necessidade de irrigação com maior frequência, tendo um pico no consumo de água na mesma data. Em

termos finais, o consumo total de água para os sistemas automatizado e manual foram, respectivamente, 16,25 L e 5,5 L.

Considerando que um dos objetivos da automatização de sistemas de irrigação é a economia de água e seu uso racional, ao sobrepor os perfis de consumo hídrico de ambos os sistemas adotados neste projeto, é evidente que o cultivo de alface em função da demanda hídrica do solo consome muito mais água se comparado a uma distribuição fixa e uniforme de água de irrigação. Ademais, comparando com o desenvolvimento das amostras, nota-se que uma distribuição regular e uniforme de água resulta, em um intervalo maior de tempo de espera, em plantas com maiores dimensões e qualidade final.

Em suma, a partir dos perfis de desenvolvimento das amostras e do consumo de água, foi provado que a demanda de água do substrato não se traduz na mesma necessidade hídrica por parte dos cultivares. Ademais, o volume de água estipulado para a irrigação manual pode ter se provado mais eficaz do que o volume de água irrigado pelo tempo de ativação da bomba adotado. A figura 43 apresenta o aspecto das amostras nos últimos dias de avaliação.



Figura 43 - Desenvolvimento dos cultivares no sistema automatizado (esquerda) e manual (direita).  
Legenda: (1)(2) Dia 21/01/2023 ; (3)(4) Dia 23/01/2023 .  
Fonte: Autor.

Por fim, ao comparar uma distribuição uniforme e fixa de água de irrigação com a curva característica da bomba de água utilizada, poderia-se assumir um novo modelo de

automação. Isto é, sabendo que a distribuição de 500 mL de água em intervalos de 1 dia se provou mais adequado ao desenvolvimento das amostras de alface, poderia-se programar o microcontrolador para ativar a bomba num tempo pré determinado de modo a fornecer o mesmo volume de água utilizado na irrigação manual. Ademais, a utilidade do sensor de umidade do solo poderia ser mantida, variando somente o valor de tomada de decisão e o intervalo de tomada de dados - especialmente considerando as condições de temperatura do ambiente, de modo a evitar que o substrato fique muito seco quando em período de repouso.

Após a análise periódica da altura das plantas, número de folhas e consumo de água, partiu-se para os métodos de avaliação de desempenho destrutivos da amostra - tamanho das raízes, peso total e número de folhas aptas ao consumo. A tabela 14 mostra os dados das variáveis medidas.

Tabela 14- Dimensões dos cultivares no término do ciclo de cultivo.

<b>Amostra</b>	<b>Peso total ± 1g</b>	<b>Nº de folhas aptas ao consumo</b>	<b>Altura ± 0,2 cm</b>	<b>Tamanho da Raíz ± 0,2cm</b>
<b>1</b>	5	6	16,2	5,5
<b>2</b>	6	5	16,0	7,0
<b>3</b>	8	7	17,9	7,1
<b>4</b>	6	7	16,5	9,,7

Fonte: Autor.

Primeiramente, analisando o peso das amostras, notou-se diferença expressiva da amostra 3. Essa conclusão é coerente com o perfil de desenvolvimento desta amostra, tanto no número de folhas quanto na altura. As demais amostras obtiveram massas finais bastante próximas umas das outras, embora fosse de se esperar que a amostra 4 tivesse obtido resultados próximos daqueles da amostra 3, uma vez que foram submetidos aos mesmos tratamentos. Em seguida, analisando a qualidade das folhas, notou-se que as amostras irrigadas automaticamente apresentaram folhagem com queimaduras nas pontas, incluindo total queima de algumas delas - amostra 2. Dessa forma, notou-se que a amostra 4 apresentou todas as folhas com qualidade satisfatória, ao passo que a amostra 3 apresentou uma folha com queimadura nas pontas. As amostras 1 e 2 apresentaram duas folhas inválidas cada uma. A figura 44 apresenta as amostras após sua retirada do substrato e subsequente lavagem.



Figura 44 - Cultivares após retirada do substrato e subsequente lavagem.

Legenda: Amostras 1 a 4 - Esquerda para direita.

Fonte: Autor.

Por fim, a última variável - tamanho das raízes - provou ter sido inconclusiva. Notou-se diminuição expressiva no tamanho da raiz da amostra 1, sendo que as amostras 2 e 3 apresentaram dimensões bastante próximas das iniciais. Somente a amostra 4 apresentou comprimento radicular maior do que o inicial. Estes resultados podem ter ocorrido devido ao caráter destrutivo do método utilizado. Isto é, a retirada das amostras do substrato e a subsequente lavagem das raízes podem ter resultado na destruição fisiológica precoce das amostras. Não somente, o estudo do desenvolvimento radicular em função do tempo analisado está fora do escopo deste trabalho.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com a performance dos sensores de umidade do solo resistivo e capacitivo, notou-se um comportamento mais uniforme e previsível para o sensor capacitivo. Em comparação, o sensor resistivo apresentou lentidão na tomada de dados uniforme e próximos, em magnitude, uns dos outros. Aliado a isso, a qualidade dos perfis de ajuste aos dados amostrais se provou maior para o sensor capacitivo - acima de 90% - em comparação ao sensor resistivo - 82%. Dessa forma, aliado à sua inerente resistência à corrosão pelo meio, o

sensor capacitivo se provou ser a melhor escolha para a determinação da umidade do solo considerando a precisão necessária para projetos de agricultura de precisão. Entretanto, para projetos simples de uso cotidiano, como automação residencial de irrigação de plantas, pode-se utilizar o sensor resistivo sem prejuízo nos resultados, contanto que o tempo de ativação da bomba de irrigação seja calibrado em virtude da quantidade de água necessária para a planta. Ademais, a existência de 3 faixas distintas de medição para o sensor capacitivo permite melhor avaliação das necessidades hídricas do substrato, ao passo que o sensor resistivo possui baixa resolução quando a umidade supera 10%. Ademais, considerando o custo total do protótipo, nota-se diferença mínima entre o uso do sensor capacitivo em comparação ao sensor resistivo. Ao selecionar o primeiro, o custo médio do protótipo gira em torno de R\$232, ao passo que a seleção do sensor resistivo gera uma economia de apenas 2 reais (custo final de R\$230). Fica a critério do usuário, portanto, a escolha do dispositivo que melhor se adeque às condições de operação determinadas - precisão, previsibilidade do comportamento e resistência à corrosão pelo meio.

Através dos resultados obtidos através do acompanhamento dos cultivares no decorrer de três semanas, pôde ser verificado que a distribuição de água em intervalos de 1 dia, em dois momentos distintos, provou resultar em cultivares com maior tamanho foliar e menor ocorrência de queimaduras nas pontas das folhas. A quantidade de folhas saudáveis foi maior para as amostras submetidas à irrigação manual. Este fator pode ser explicado pela redução do estresse hídrico do substrato, considerando o consumo total de água no período de análise.

Não somente, o consumo hídrico se provou maior para o sistema automatizado, sendo distribuído de maneira aleatória no decorrer do período de análise. Em comparação, o sistema manual constituiu-se de uma distribuição uniforme e equilibrada de água no intervalo de análise, resultando ainda em menor consumo hídrico. No geral, o sistema de irrigação automatizado consumiu cerca de 3 vezes mais água do que o sistema de irrigação manual. No fim do intervalo de análise, ao se comparar os parâmetros de qualidade notou-se melhor desempenho nas amostras submetidas ao tratamento de irrigação manual. A altura das amostras 3 e 4 foram expressivamente maiores do que as demais, além de manterem a qualidade e aspecto saudável da folhagem no decorrer do ciclo. Não somente, a amostra 3 demonstrou o melhor resultado de todas as amostras, tendo expressiva diferença de peso e altura em relação às demais amostras.

Por fim, considerando a uniformidade de distribuição de água, bem como seu volume, pode-se concluir que a necessidade hídrica do substrato utilizado é diferente daquela dos cultivares. Dessa forma, pode-se entender que a distribuição de água, através da medição de

umidade do solo, não se provou uma metodologia que resulta em melhores resultados, primeiro pela distribuição atípica de água de irrigação e segundo pelo seu maior consumo hídrico. Considerando que o protótipo foi montado ao abrigo de chuva, pode-se abrir oportunidades para trabalhos futuros com a aplicação do protótipo sujeito às intempéries do clima. Não somente, as variáveis de umidade e temperatura do ar foram tratadas de maneira ilustrativa no presente trabalho. Dessa forma, o desenvolvimento de armazenagem de dados referentes às variáveis do ambiente - temperatura, umidade e chuva - pode consistir na base para novos resultados, talvez com maiores precisões.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos pela avaliação periódica manual das amostras de alface submetidas à irrigação manual e automatizada, sugere-se as seguintes implementações ao protótipo como trabalhos futuros:

- A. Implementar o conceito de *Internet of Things*, de modo a obter informações em tempo real, bem como o armazenamento e atualização dos perfis de desenvolvimento em função das variáveis medidas;
- B. Implementar um sistema de armazenagem de dados externo - *data logger* - de modo a salvar os dados das variáveis para posterior tratamento estatístico;
- C. Implementação do protótipo em maior escala, sujeito às intempéries do clima;
- D. Teste do protótipo com amostras de outras espécies, variando o ponto crítico de umidade do solo em função da condição de cultivo ótima para a espécie selecionada;
- E. Variação dos critérios de irrigação automatizada ( tempo de ativação da bomba de água e intervalo de tomada de dados);
- F. Análise de múltiplos ciclos de cultivo, de modo a obter maior precisão na construção dos perfis de desenvolvimento das amostras.

## 7. BIBLIOGRAFIA

AZEVEDO, J.A. de; SILVA, E.M. da. **Tensiômetro**: dispositivo prático para controle da irrigação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 33p. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 001).

CHAPRA, Steven C.. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011.

COELHO, Silvana de Lourdes. **DESENVOLVIMENTO DE UM TENSÍÔMETRO ELETRÔNICO PARA O MONITORAMENTO DO POTENCIAL DE ÁGUA NO SOLO**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Agronomia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

DAMACENO, João Marcos Ferreira. **SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO SOLO UTILIZANDO A ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA E TÉCNICAS DE ULTRASSOM**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FREITAS JUNIOR, Jose Roberto de. **AUTOMAÇÃO NA AGRICULTURA: UM ESTUDO DE CASO SOBRE CONTROLE DE FERTIRRIGAÇÃO EM ESTUFA HIDROPÔNICA**. 2018. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Ensinar Brasil - Faculdades Doctum da Caratinga, Caratinga, 2018.

HENZ, Gilmar Paulo; SUINAGA, Fábio. **Tipos de Alface Cultivados no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2009. 7 p.

KAPTEIN, Nkosinathi D; TITSHALL, Louis W. A simple calibration of Hobo 4 channel analogue dataloggers for use with Watermark 253–L soil water potential sensors. **Water Sa**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 160-164, 30 abr. 2019. Academy of Science of South Africa. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v45i2.01>.

KOZAI, Toyoki (ed.). Current Status of Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs) and Smart PFALs. In: KOZAI, Toyoki (ed.). **Smart Plant Factory: the next generation indoor vertical farms**. Kashiwa, Chiba, Japan: Springer, 2018. p. 3-13. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2>.

KOZAI, Toyoki; NIU, Genhua (ed.). Introduction. In: KOZAI, Toyoki; NIU, Genhua; TAKAGAKI, Michiko (ed.). **PLANT FACTORY: an indoor vertical farming system for efficient quality food production**. 2. ed. [S.I.]: Academic Press, 2020. Cap. 1. p. 3-6.

MALDONADE, I. R, *et al.* **Manual de boas práticas na produção de Alface**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2014. 44 p. (Documentos / Embrapa Hortaliças, ISSN 1677-2229; 141).

MARQUELLI, Walter A.; SILVA, Washington L. C.. **Seleção de Sistemas de Irrigação para Hortaliças**. 2. ed. Brasília, Df: Embrapa Hortaliças, 2011. 24 p.

MATOS, Francisco Antonio Cancio de. **Alface**: saiba como cultivar hortaliças para colher bons negócios. [S.I]: Sebrae, 2011. 32 p.

MENDES, Paulo Cesar de Souza. **CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE DO SOLO COM TERMO-RESISTOR A TEMPERATURA CONSTANTE**. 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

OLIVEIRA, Cássio Lopes de. **CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO DE BAIXO CUSTO**. 2018. 52 f. Monografia (Especialização) - Curso de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2018.

PEDERSEN, Soren Marcus; LIND, Kim Martin (ed.). Precision Agriculture - From Mapping to Site-Specific Application. In: PEDERSEN, Soren Marcus; LIND, Kim Martin (ed.). **Precision Agriculture : Technology and Economic Perspectives**. Frederiksberg, Denmark: Springer, 2017. Cap. 1. p. 1-20. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68715-5>.

SANTOS, Fernando Ferreira Lima dos, et al. CONFIDENCE ANALYSIS AND CALIBRATION OF A FC-28 SOIL MOISTURE SENSOR MOUNTED ON A MICROCONTROLLER PLATFORM. **Nativa**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 123-128, 25 fev. 2021. Nativa. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v9i1.9152>.

SILVA, André Raimundo da. **Crescimento e a produtividade da alface em função da reposição hídrica**. 2017. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal da Paraíba, Areia, Pb, 2017.

SOUZA, Sulma Vanessa *et al.* Análise do crescimento de alface sob diferentes sistemas de cultivo: pesquisa, formação e desenvolvimento. **Agricultura Familiar**. Belém, p. 107-120. jul-dez 2020.

TAYLOR, John R.. **Introdução à Análise de Erros**: o estudo de incertezas em medições físicas. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

TESTEZLAF, Roberto. **IRRIGAÇÃO**: métodos, sistemas e aplicações. Campinas: Unicamp, 2017. 215 p.

THIESEN, Eduardo. **SISTEMA AUTOMATIZADO PARA IRRIGAÇÃO EM HIDROPONIA COM TERRA**. 2020. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2020.

VUOLO, José Henrique. **Fundamentos da teoria de erros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.