



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MAIRA FARIAS DE ANDRADE LIRA

## **PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA INTELIGENTE AUTÔNOMO DE IRRIGAÇÃO**

Recife  
2020

MAIRA FARIAS DE ANDRADE LIRA

## **PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA INTELIGENTE AUTÔNOMO DE IRRIGAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jacobo.

**Coorientador:** Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva.

Recife

2020

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

L768p Lira, Maira Farias de Andrade.  
Prototipagem de um sistema inteligente autônomo de irrigação /  
Maira Farias de Andrade Lira – Recife, 2020.  
88 f.: figs.

Orientador: Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jacobo.  
Coorientador: Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva.  
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Universidade Federal de  
Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Mecânica, 2020.  
Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Arduino. 3. ATmega328P. 4. Evapo-  
transpiração. 5. Irrigação. I. Jacobo, Justo Emilio Alvarez (Orientador).  
II. França e Silva, Ênio Farias de (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2021-59

**MAIRA FARIAS DE ANDRADE LIRA**

**PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA INTELIGENTE AUTÔNOMO DE IRRIGAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 03 / 12 / 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácobo  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. João Paulo Cerquinho Cajueiro  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Manassés Mesquita da Silva  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus pais, avós e minha família pelo amor, incentivo para sempre a buscar mais conhecimento e todos os nossos momentos juntos. Espero um dia ser pelo menos um pouco do que vocês são e orgulhá-los, vocês sempre foram e serão meus primeiros modelos a serem seguidos.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Justo Emilio Alvarez Jácomo e Professor Doutor Ênio Farias de França e Silva por todo o suporte prestado em uma época tão difícil e com dificuldades que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu namorado, Elias Filho, por todos os nossos momentos juntos vividos com muito amor e parceria. Nunca esquecerei tudo que você fez por mim e por todos os momentos em que você foi meu porto seguro. Serei eternamente grata.

Às minhas amigas construídas ao longo do curso: Alesson Itallo, João Paulo Lages, Maria Luiza Moura, Matheus Marques e Vinícius Lopes nunca esquecerei dos momentos bons e apoio nos momentos mais difíceis.

Gostaria de fazer um agradecimento especial para a Universidade Federal de Pernambuco e todos os que contribuíram direta ou indiretamente com minha formação profissional.

Finalmente, ao meu irmão de quatro patas, Floquinho, por todo o amor incondicional, espero me tornar a pessoa que você pensa que eu sou.

*“You may live in the world as it is, but you can  
still work to create the world as it should be”  
Michelle Obama*

## RESUMO

A água é um recurso limitado e essencial, sendo 2/3 do consumo mundial de água destinados à irrigação. Esse alto consumo de água impulsiona o desenvolvimento de sistemas de manejo de água mais eficientes de forma a evitar desperdícios de água, mas sem afetar a saúde das culturas. Culturas como a floricultura de uma forma geral têm problemas especiais neste sentido pelo seu forte apelo estético. Em função disso, ao longo dos anos foram desenvolvidos estudos a respeito da evapotranspiração, para estimar a perda de água e quanto deve ser irrigado de forma a reduzir o desperdício de água. Recentemente, sistemas eletrônicos também têm sido utilizados com este mesmo fim. Assim, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema inteligente autônomo de irrigação utilizando o modelo de evapotranspiração proposto por Hargreaves-Samani utilizando um microcontrolador. Para isso foram utilizados uma placa Arduino UNO, sensores e atuadores, que monitoram o ambiente e disponibilizam água tomando como base o cálculo da evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultura da gérbera em pleno desenvolvimento. Foram realizados testes da capacidade para a modelagem matemática do sistema, monitoramento da temperatura, armazenamento de dados, intervalo de coleta de dados, calibração e funcionamento do sistema de fornecimento de água, calibração do higrômetro e teste do sistema como um todo. É viável desenvolver um sistema de baixo custo no porte de um vaso com erro máximo de 15% para volumes menores do que 200 ml, e menor do que 5% para volumes superiores a 200 ml. Este sistema pode ser facilmente escalável para outras situações como canteiros e casas de vegetação.

Palavras-chave: Arduino. ATmega328P. Evapotranspiração. Irrigação.

## ABSTRACT

Water is a limited and essential resource, and 2/3 of its worldwide use is in irrigation. This high water usage advances the development of higher efficiency water management systems to avoid water loss, but not affecting crop health. Crops as flowers in general present special problems in this regards due to their high aesthetics appeal. Due to this, research was done over the years on evapotranspiration, to estimate water loss to the atmosphere and how much must be supplied to reduce water loss. More recently, electronic systems have also been used to this same goal. So, this work aimed to develop an intelligent, autonomous irrigation using the Hargreaves-Samani evapotranspiration model and the ATmega328P microcontroller, using an Arduino UNO board, sensors and actuators. These components monitor the environment and supply water based on the reference evapotranspiration and the crop coefficient for fully developed gerbera. Tests were done for the mathematical modelling capability of the system, temperature monitoring, data storage, data collection interval, calibration and functioning of the water supply subsystem, hygrometer calibration and overall system test. It is possible to develop a low cost system on a one-vase scale with 15% maximum error for estimated volumes below 200 ml, and below 5% for volumes over 200 ml. This system can be easily scalable for other usages such as flower beds and greenhouses.

**Keywords:** Arduino. ATmega328P. Evapotranspiration. Irrigation.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Retirada de água no mundo entre 1961 - 2014.....                                                                     | 18 |
| Figura 2 - Porcentagem de área ocupada por cultivos irrigados vs. cultivos em<br>sequeiro .....                                 | 18 |
| Figura 3 - Necessidade de água ao longo da vida da planta.....                                                                  | 22 |
| Figura 4 - Curva de Kc.....                                                                                                     | 23 |
| Figura 5 - Diagrama de blocos de sistema de irrigação proposto por McCarthy<br><i>et al.</i> ....                               | 26 |
| Figura 6 - Esquema de Impressora 3D FDM .....                                                                                   | 29 |
| Figura 7 - Formas de preenchimento na Ultimaker .....                                                                           | 30 |
| Figura 8 - Arduino UNO .....                                                                                                    | 33 |
| Figura 9 - Dados climáticos diários do mês de janeiro de 2019 .....                                                             | 35 |
| Figura 10 - Diagrama de blocos de sistema de irrigação desenvolvido.....                                                        | 36 |
| Figura 11 - Fluxo de sinais do protótipo eletrônico .....                                                                       | 38 |
| Figura 12 - Diagrama referente a coleta de dados de temperatura do ambiente .....                                               | 40 |
| Figura 13 - Diagramas referentes ao fornecimento de água: (a) fluxo constante;<br>(b) fluxo variável .....                      | 40 |
| Figura 14 - Arduino UNO .....                                                                                                   | 42 |
| Figura 15 - Sensor DHT22.....                                                                                                   | 43 |
| Figura 16 - Módulo Cartão Micro SD .....                                                                                        | 43 |
| Figura 17 - Módulo RTC DS3231 .....                                                                                             | 44 |
| Figura 18 - Válvula de vazão solenoide 12VDC .....                                                                              | 44 |
| Figura 19 - Módulo Relé 5V 1 Canal .....                                                                                        | 45 |
| Figura 20 - Sensor de Fluxo de Água Saier SEM-HZ21WA .....                                                                      | 45 |
| Figura 21 - Sensor de Umidade do Solo YL-69.....                                                                                | 46 |
| Figura 22 - Representação do circuito eletrônico do protótipo .....                                                             | 47 |
| Figura 23 - Esquema de lógica do código utilizado para controle e atuação da irrigação ..                                       | 48 |
| Figura 24 - Comportamento da ETo calculada ao longo do ano de 2019 na cidade<br>do Recife pelo método de Hargreaves-Samani..... | 56 |
| Figura 25 - ETo calculado pelo Arduino vs. pelo Excel.....                                                                      | 57 |
| Figura 26 - Leitura do sensor DHT22 em um teste de 12h com período de 20s .....                                                 | 59 |
| Figura 27 - Curva de Fator de Correção para a posição horizontal do sistema.....                                                | 61 |
| Figura 28 - Curva de Fator de Correção para a posição vertical do sistema.....                                                  | 62 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 29 - Desvio entre o valor calculado pelo Arduino e fornecido pelo sistema de acordo com o volume estipulado ..... | 63 |
| Figura 30 - Desvio entre o valor calculado pelo Arduino e volume estipulado de acordo com o volume estipulado .....      | 64 |
| Figura 31 - Desvio entre o valor fornecido pelo sistema e estipulado de acordo com o volume estipulado .....             | 65 |
| Figura 32 - Gotejador com vazão ajustável .....                                                                          | 66 |
| Figura 33 - Vaso com substrato irrigado subsuperficialmente até a saturação .....                                        | 67 |
| Figura 34 - Resultado do teste de umidade inicial do substrato .....                                                     | 68 |
| Figura 35 - Curvas de calibração do sensor YL-69 .....                                                                   | 69 |
| Figura 36 - Saturação das duas gérberas utilizadas para os testes .....                                                  | 70 |
| Figura 37 - Disposição geral do sistema de irrigação .....                                                               | 71 |
| Figura 38 - Disposição do sistema de irrigação .....                                                                     | 71 |
| Figura 39 - Temperaturas obtidas pelo sensor DHT22 durante o teste .....                                                 | 72 |
| Figura 40 - Umidade relativa do solo medida pelo sensor YL-69 .....                                                      | 73 |
| Figura 41 - Higrômetro após os testes.....                                                                               | 73 |
| Figura 42 - Modelo 3D em vista isométrica .....                                                                          | 76 |
| Figura 43 - Vista superior do modelo 3D .....                                                                            | 77 |
| Figura 44 - Reservatório de água com gotejador .....                                                                     | 77 |
| Figura 45 - Protótipo final impresso .....                                                                               | 78 |
| Figura 46 - Protótipo montado .....                                                                                      | 78 |

## SUMÁRIO

|              |                                                                        |           |
|--------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                | <b>12</b> |
| 1.1          | CONTEXTUALIZAÇÃO .....                                                 | 12        |
| 1.2          | DELIMITAÇÕES DO PROBLEMA .....                                         | 13        |
| 1.3          | OBJETIVOS .....                                                        | 13        |
| <b>1.3.1</b> | <b>Objetivo geral .....</b>                                            | <b>13</b> |
| <b>1.3.2</b> | <b>Objetivos Específicos .....</b>                                     | <b>13</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                      | <b>15</b> |
| <b>3</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                     | <b>17</b> |
| 3.1          | USO DA ÁGUA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS .....     | 17        |
| 3.2          | FENÔMENO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....                                    | 20        |
| 3.3          | PROTOTIPAGEM .....                                                     | 27        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Impressão 3D.....</b>                                               | <b>27</b> |
| <b>3.3.2</b> | <b>Prototipagem Eletrônica.....</b>                                    | <b>32</b> |
| 3.3.2.1      | Plataforma Arduíno .....                                               | 32        |
| <b>4</b>     | <b>METODOLOGIA .....</b>                                               | <b>34</b> |
| 4.1          | IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NA PLATAFORMA DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA.....  | 34        |
| 4.2          | COMPARAÇÃO DOS DADOS CALCULADOS COM O MODELO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO..... | 34        |
| 4.3          | MONTAGEM DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO.....                                  | 35        |
| <b>4.3.1</b> | <b>Componentes utilizados .....</b>                                    | <b>42</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Montagem do circuito .....</b>                                      | <b>46</b> |
| <b>4.3.3</b> | <b>Lógica da programação.....</b>                                      | <b>47</b> |
| 4.4          | TESTES DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO.....                                    | 49        |
| <b>4.4.1</b> | <b>Testes do sistema de obtenção de temperatura .....</b>              | <b>49</b> |
| <b>4.4.2</b> | <b>Testes da válvula e medição de fluxo .....</b>                      | <b>50</b> |
| <b>4.4.3</b> | <b>Testes com armazenamento de água e vazão do gotejador .....</b>     | <b>51</b> |
| <b>4.4.4</b> | <b>Testes referentes a umidade do solo e capacidade de campo .....</b> | <b>52</b> |
| <b>4.4.5</b> | <b>Testes com a planta .....</b>                                       | <b>53</b> |
| 4.5          | MONTAGEM DO PROTÓTIPO FINAL.....                                       | 54        |
| <b>5</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                    | <b>55</b> |

|       |                                                                           |           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1   | IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NA PLATAFORMA DE<br>PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA.....  | 55        |
| 5.2   | COMPARAÇÃO DOS DADOS CALCULADOS COM O MODELO DE<br>EVAPOTRANSPIRAÇÃO..... | 56        |
| 5.3   | TESTES DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO.....                                       | 57        |
| 5.3.1 | <b>Testes do sistema de obtenção de temperatura .....</b>                 | <b>57</b> |
| 5.3.2 | <b>Testes com o sinal de ativar a válvula e medição de fluxo .....</b>    | <b>59</b> |
| 5.3.3 | <b>Testes com armazenamento de água e vazão do gotejador .....</b>        | <b>65</b> |
| 5.3.4 | <b>Testes referentes a umidade do solo e capacidade de campo .....</b>    | <b>66</b> |
| 5.3.5 | <b>Testes com a planta .....</b>                                          | <b>69</b> |
| 5.4   | MONTAGEM DO PROTÓTIPO FINAL.....                                          | 75        |
| 5.5   | DIFICULDADES E LIÇÕES APRENDIDAS .....                                    | 79        |
| 5.5.1 | <b>Dificuldades encontradas.....</b>                                      | <b>80</b> |
| 5.5.2 | <b>Lições Aprendidas .....</b>                                            | <b>81</b> |
| 6     | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                    | <b>82</b> |
|       | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                   | <b>84</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de água no mundo cresceu consideravelmente nas últimas décadas devido ao aumento de renda *per capita* e ao crescimento populacional, sendo o setor da agricultura o maior consumidor, utilizando cerca de 2/3 da água limpa do mundo. Por limitações de fontes de água limpa e as diversas mudanças climáticas que o planeta vem sofrendo, se faz cada vez mais necessário prezar pela eficiência através da conscientização por meio de campanhas e dimensionamentos adequados para o uso da água nas irrigações.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o aumento de renda da população e, conseqüentemente, maior urbanização, a busca por vasos ornamentais, ou seja, flores cultivadas em vaso, cresceu significativamente. O Instituto Brasileiro de Floricultura (IBRAFLO) relatou que o faturamento no ano de 2018 com floricultura no Brasil foi de 7,9 bilhões de reais, com uma taxa de crescimento de 9,0% ao ano estando entre os 15 maiores produtores do mundo. O mercado brasileiro em relação ao mundial ainda é pequeno, especialmente em relação aos países europeus como a Holanda, porém está em crescimento mais acelerado do que os demais (SCHOENMAKER, 2019).

As flores são plantas muito delicadas e sensíveis, sendo muito afetadas pelas condições do ambiente em que são cultivadas e pela umidade do solo. Por serem aplicadas com intuito estético, é de extrema importância mantê-las nas condições ideais de temperatura, umidade e iluminação, entre outros fatores, para atingir o efeito desejado do ponto de vista de decoração. Outro fator muito importante é a variabilidade encontrada nas flores, que como todas as plantas, possuem necessidades hídricas muito variadas, só que, em geral, são mais sensíveis do que boa parte das culturas quanto a falta ou excesso hídrico. A produção de vasos ornamentais requer uma mão de obra altamente especializada, de forma a atingir o aspecto estético ideal para o cliente final garantindo qualidade e, principalmente, assegurando a boa saúde da planta.

Devido à complexidade e a necessidade constante de monitoramento, é muito difícil o consumidor final conseguir cuidar adequadamente dos vasos ornamentais. Além disso, o ritmo de vida na cidade está cada vez mais acelerado e as pessoas

buscam economizar tempo nas mais simples atividades. Uma possibilidade de cumprir as necessidades da planta de forma eficiente, é utilizando um sistema de irrigação autônomo específico para o vaso ornamental, com intuito de fornecer a quantidade ideal de água para a flor durante o dia.

## 1.2 DELIMITAÇÕES DO PROBLEMA

Esse trabalho tem como intuito desenvolver um sistema autônomo de irrigação capaz de fornecer a quantidade ideal de água para a planta, considerando os parâmetros de medição de temperatura e umidade do solo. O protótipo eletrônico será desenvolvido utilizando a plataforma de prototipagem Arduino com auxílio de sensores e atuadores eletromecânicos. Para poder fornecer a quantidade ideal de água para a planta, será desenvolvido um sistema de controle baseado em um modelo de evapotranspiração considerando a espécie estudada. Os resultados serão então avaliados de forma a analisar a viabilidade técnica do protótipo.

## 1.3 OBJETIVOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram traçados o objetivo geral e específicos mostrados a seguir.

### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolvimento de um sistema inteligente autônomo de irrigação em escala de vaso de cultivo com base em modelo de evapotranspiração com monitoramento de variáveis climáticas para uma determinada espécie.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) implementar um modelo mecanicista de evapotranspiração para uma espécie para determinar a quantidade ideal de água a ser utilizada na irrigação;

- b) desenvolver um protótipo funcional do sistema capaz de monitorar os parâmetros climáticos e fornecer a quantidade de água necessária de forma autônoma;
- c) validar protótipo utilizando condição de cultivo real da cultura de estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta parte do trabalho serão discutidos alguns trabalhos que utilizaram a plataforma eletrônica Arduino para o desenvolvimento de sistemas de irrigação automatizados. Os sistemas que serão apresentados, de uma forma geral, são mais baratos do que os usualmente encontrados no comércio e mais viáveis para pequenos produtores e aplicações domésticas.

Um levantamento de literatura sobre sistemas inteligentes de manejo de água de irrigação, baseado em 89 artigos encontrou que apenas oito destes foram sobre sistemas de gotejamento até o ano de 2019 (GARCÍA *et al.*, 2020). Por outro lado, 59 foram baseados em Arduino com 34 utilizando placas UNO e 6 MEGA, sem definição clara para os 19 restantes. Quanto à aplicação, novamente nem todos os 89 indicaram usos, mas 5 foram sobre jardinagem, 14 para uso em casa de vegetação e 19 para ambientes externos.

Como será exemplificado abaixo, de um modo geral, a vasta maioria dos trabalhos nesta área visa reduzir o consumo de água utilizando sensores para indicar a necessidade ou não de irrigação, com o controle sendo efetuado pelo próprio sistema ou com possibilidade de interferência humana. Na maioria dos casos, o principal sensor utilizado é de umidade do solo, sem considerar culturas específicas ou condições climáticas.

O trabalho desenvolvido por Drarunkarthy *et al.* (2019) utilizou uma placa Arduino UNO para desenvolver um sistema de irrigação integrado por Android com o conceito de IoT (do inglês, *Internet of Things*). Para minimizar o uso de água na irrigação, foi avaliada a umidade do solo comparando-a com uma umidade de referência, sendo esses valores enviados por notificação para o usuário. Então, o usuário pode ligar a bomba de irrigação ou não quando desejar ou deixar o sistema irrigando de maneira automática, tornando um sistema automático e manual simultaneamente. Quando a medida de umidade do solo for acima da referência, a irrigação deve ser interrompida pelo usuário ou pelo próprio sistema dependendo do modo escolhido.

Agrawal e Singhal (2015) desenvolveram um sistema de irrigação por gotejamento utilizando Raspberry Pi e Arduino de baixo custo adaptável para pequenos jardins e grandes culturas. A partir do envio de um e-mail o Raspberry Pi comunica o Arduino para ligar a válvula solenoide caso o reservatório de água esteja no nível estipulado para irrigação. Pela comunicação por IoT o usuário recebe as informações

do sistema a partir de e-mails, mas é susceptível a falhas quando algum dos sensores falharem.

Bhattacharya *et al.* (2021) trabalhou em um sistema utilizando uma placa Arduino UNO para adquirir dados do higrômetro para comparar com um valor de referência e dar início a irrigação por meio do acionamento da bomba. O fluxo de água é interrompido quando o solo atinge a umidade de referência, evitando desperdício de água. Os dados coletados são então fornecidos ao usuário por meio de um aplicativo Android e o sistema pode ser usado em casas de vegetação para o desenvolvimento de trabalhos.

Para poder diminuir o desperdício de água na agricultura e otimizar o seu manejo no Peru, Núñez-Tapia (2020) desenvolveu um protótipo de baixo custo usando uma placa Arduino UNO. Por meio da utilização de sensores de umidade de solo e pluviométricos, o sistema avalia a umidade do solo para liberar água por meio de uma bomba de água, e para quando o solo alcança a umidade desejada. Esses dados são transmitidos via *bluetooth* para um aplicativo Android informando os dados de irrigação e umidade de solo. O estudo observou uma economia entre 75 e 76,5% do uso de água e que o sistema funcionou de forma adequada.

Já Correia *et al.* (2016) desenvolveu um protótipo de irrigação de baixo custo por meio de uma plataforma Arduino UNO para monitorar e controlar automaticamente a irrigação por aplicativo. O protótipo teve comunicação web para troca de dados via WiFi usando protocolo TCP/IP. O algoritmo foi construído utilizando o conceito de evapotranspiração de referência por meio do método de Hargreaves-Samani devido a necessidade de apenas sensores de temperatura e tinha o volume de chuva desconsiderado para o cálculo de volume a ser disponibilizado. O usuário tinha como escolher se o módulo ficaria ativo ou desligado e caso fosse ligado precisaria preencher informações como o horário de irrigação, a área de plantio, o coeficiente de cultura e a latitude geográfica. Mesmo considerando a diferença de volume de água calculada e programada pelo sistema, houve uma economia de 26,80% no modo automático. Apesar de Correia *et al.* (2016) desenvolver um sistema de irrigação utilizando a plataforma Arduino UNO com estimativa de volume de água a partir do método de Hargreaves-Samani, seu protótipo foi desenvolvido para áreas externas.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

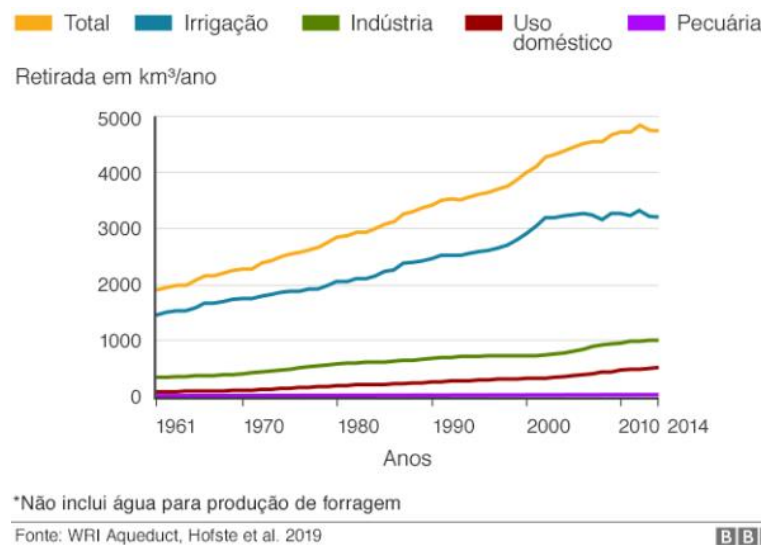
Com intuito de embasar quanto ao tema do trabalho, serão discutidos os principais conceitos ligados a irrigação de pequeno porte e as informações essenciais para o desenvolvimento de um protótipo de irrigação autônoma. Dessa forma, a fundamentação teórica será dividida em três seções: o uso da água para o desenvolvimento das atividades antrópicas, que descreverá a sua importância, bem como possíveis aplicações e seu uso na agricultura; fenômeno da evapotranspiração, no qual será apresentado o conceito e os fatores determinantes para esse fenômeno, bem como modelos utilizados para a quantificação; e, por fim, prototipagem que irá discorrer sobre a importância no desenvolvimento de novos produtos atualmente bem como duas tecnologias muito usadas, a impressão 3D e a prototipagem eletrônica.

#### 3.1 USO DA ÁGUA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS

A água está presente em diversos sistemas necessários para a sociedade, tais como geração de energia, indústrias, pecuária, agricultura e, claro, no uso doméstico. De acordo com Rockström *et al.* (2009), o consumo global de água limpa por humanos, que é equivalente a 2.600 km<sup>3</sup> de água por ano, se aproximou do limite de disponibilidade proposto de 4.000 km<sup>3</sup> por ano pelo próprio autor. Esse dado alerta quanto ao limite de água limpa disponível para consumo e tendo em vista as mudanças climáticas a redução desse limite disponível é acelerada ao longo do tempo. Por outro lado, o crescimento da população e da renda per capita, contribuem para aumentar o consumo global de água.

Analisando o período entre os anos 1961 e 2014, um estudo da *Water Resources Institute* (WRI) divulgado pela BBC, a quantidade de água doce extraída mais do que dobrou, sendo a maior demanda ligada a irrigação. No gráfico pode-se visualizar o volume de água usado anualmente no mundo por cada uma das principais atividades antrópicas, deixando claro como a maior parte do uso da água está relacionada a irrigação, sendo cerca de 2/3 do consumo mundial. Vale ressaltar também, que o uso de água pelas indústrias triplicou nos últimos anos, sendo esse crescimento maior do que observado para as demais categorias analisadas (UCHOA, 2019).

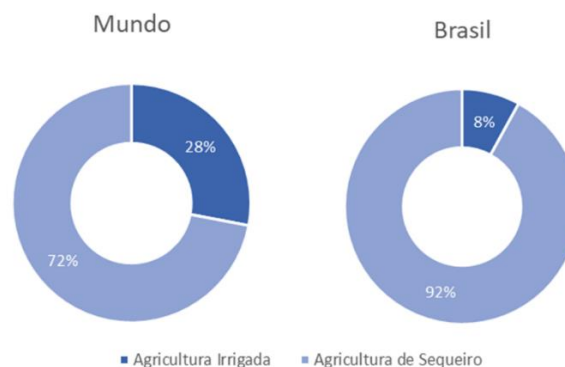
Figura 1 – Retirada de água no mundo entre 1961 - 2014



Fonte: Uchoa, 2019.

O aumento do uso de água na agricultura é fortemente ligado ao aumento populacional, já que é necessário tornar as culturas mais produtivas de forma a atender a necessidade da população. Mesmo com a grande concentração do uso da água na irrigação, vale ressaltar que no Brasil apenas 8% das plantações são irrigadas, sendo que a maioria delas são frutas e hortaliças. No cenário global, estima-se que 28% das plantações são irrigadas, enquanto os 72% restantes são dependentes da chuva, uma prática chamada agricultura de sequeiro (WRI, 2019). Um estudo da Agência Nacional de Águas (ANA) projeta que haverá um aumento da área irrigada de cerca de 45% entre 2015 e 2030, porém a retirada de água deve ficar abaixo com um aumento de 38% devido a expansão de sistemas mais eficientes (ANA, 2017).

Figura 2 – Porcentagem de área ocupada por cultivos irrigados vs. cultivos em sequeiro



Fonte: adaptado de WRI, 2019.

Um estudo realizado por Schultz e de Wrachien (2002) mostra que baseado na previsão de crescimento populacional e melhora da qualidade de vida, a produção de alimentos deveria dobrar em até 25 anos para atender a demanda. Também é discutido que 90% desse aumento deve ocorrer em terras já cultivadas, alertando para o uso de sistemas de irrigação e drenagem cada vez mais eficientes. Um estudo da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) estima que a população mundial em 2050 deve ser de nove bilhões de pessoas, sendo necessário um aumento de 60% da produção de comida. Para poder produzir de forma eficiente, igualitária e sustentável será necessário produzir comida utilizando menos água, além de utilizar tecnologias com intuito de proteger o ambiente (FAO, 2019).

Outro desafio enfrentado pela agricultura são as mudanças climáticas que o planeta está sofrendo e a falta de água em alguns locais específicos, sendo ainda mais relevante utilizar a água de forma cada vez mais sustentável (MENG *et al.*, 2017). A FAO também ressalta que as mudanças climáticas vão ocasionar variações mais extremas e frequentes de secas e enchentes, gerando danos nas produções de comida (FAO, 2019). Uma das regiões mais impactadas pela seca são as regiões como o semiárido brasileiro, que além de solos rasos e pobres, tem uma distribuição irregular da chuva e ausência de irrigação ocasionando um déficit de água para maior parte das culturas (LIRA *et al.*, 2009). Para poder viabilizar a irrigação na região semiárida nordestina, é necessário atenuar a evaporação da água do solo e reduzir as lâminas de água disponíveis durante o cultivo (LIMA *et al.*, 2006).

Para poder determinar se é necessário utilizar um sistema de irrigação, é preciso avaliar a cultura, as condições climáticas do local, a disponibilidade e qualidade da água, entre outros fatores. Dentre os métodos de irrigação conhecidos, existem quatro categorias principais, sendo eles: por superfície, por aspersão, localizada e por subirrigação (ANDRADE, 2001). Naturalmente, cada um desses métodos possui eficiências no uso da água diferentes. Por exemplo, sistemas de irrigação por superfície tendem a ser menos eficientes, estando na faixa de 30% a 80%, enquanto a irrigação por aspersão está entre 75% e 90% e a localizada entre 80% e 95% (ANDRADE; BRITO, 2011). Em cada um dos métodos citados, existem diversos sistemas possíveis de serem empregados dependendo da variação do solo e clima, dentre outros fatores.

O método de irrigação localizada consiste em irrigar a planta pontualmente, permitindo o umedecimento do solo nas proximidades das raízes, formando uma zona úmida denominada de bulbo úmido. Considerando o método de irrigação localizada

destaca-se o sistema de irrigação por gotejamento, cujo uso está crescendo para pequenas plantações de floricultura e herbáceas perenes, inclusive em vasos (RISTVEY *et al.*, 2019). Estudos mostraram que a técnica de gotejamento, quando em comparação com a irrigação por aspersão, pode reduzir até 5% da pegada hídrica total, o que significa uma redução no volume de água utilizado ao longo do cultivo (SCARDIGNO, 2020). Alguns exemplos de plantas que podem ser cultivados utilizando técnicas de gotejamento são plantas ornamentais tais como gérbera, samambaias e rosas, e hortaliças como cebolinha, tomate cereja, pimentas ornamentais ou comestíveis, frutas como citrus, uvas, dentre outros.

### 3.2 FENÔMENO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A água é, como já mostrado, um dos elementos mais importantes para a manutenção da vida. Portanto, o seu ciclo biogeoquímico é amplamente estudado e traça o caminho percorrido pela água ao longo do ecossistema. Fazendo um breve resumo simplificado do ciclo hidrológico, começando pelas fontes de água como rios e mares, a água evapora e condensa formando as nuvens que então precipitam, na forma de chuvas e geadas, retornando ao solo, irrigando as plantas que transpiram parte da água retornando para a atmosfera e outra parte é infiltrada no solo, retornando então aos corpos de água. Do ponto de vista da irrigação das plantas, é essencial estudar o fenômeno da evapotranspiração, de forma a evitar o excesso ou falta de água para o desenvolvimento da planta e garantindo a sua condição ideal (ANA, 2017).

As plantas necessitam da água para poder funcionar corretamente e especialmente para realizar o fenômeno da fotossíntese. Esse processo químico é essencial para a manutenção da vida, já que nele as plantas, com auxílio da luz solar, absorvem o gás de efeito estufa  $CO_2$  e água do solo através de suas raízes, produzindo a glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ), necessária para a nutrição ao longo da cadeia alimentar, e o gás oxigênio ( $O_2$ ) essencial para a respiração da maior parte dos seres vivos. Quando a planta abre seus estômatos para absorção do  $CO_2$ , a mesma transpira liberando vapor de água, essencial para o crescimento da planta absorvendo os nutrientes do solo para outros órgãos da planta, principalmente suas folhas, e como regulador térmico para climas quentes e/ou áridos (ALLEN JR, 2009).

Além da perda de água durante a abertura dos cloroplastos, quando a planta é irrigada, parte da água é absorvida pelo solo e outra é evaporada para a atmosfera

devido a formação de uma lâmina de água na superfície. Por causa desses dois fenômenos mencionados, é dito que a planta perde água por evapotranspiração, englobando assim a evaporação da água superficial e a transpiração realizada pela planta durante a abertura de seus estômatos durante a fotossíntese. Então, de forma a economizar água, é necessário entender a perda de água pela evapotranspiração com intuito de fornecer a quantidade de água necessária para plantas para manter seus sistemas de forma desejada e equilibrada, evitando o excesso ou falta de água em suas células.

Desde o final de 1940, os agrônomos começaram a estudar o fenômeno de evapotranspiração. Thornthwaite explicava esse processo pela temperatura média do ar e da duração do dia que afetaria o balanço de água no solo, enquanto Penman focou nos processos físicos da evaporação por elementos meteorológicos, estimando a evaporação da água, da umidade do solo e da vegetação. A partir dessa base, foi desenvolvido o conceito de evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>), que é determinada como a transferência de água do sistema solo-planta para atmosfera em uma área coberta por vegetação baixa com elevado índice de área foliar na fase adulta, com crescimento ativo, e teor de água do solo próximo ou na capacidade de campo, ou seja, com os microporos do solo ocupados por água. Com essas condições padrões foi possível observar que a evapotranspiração ocorre em função das condições atmosféricas sobre a vegetação por meio dos mais diversos modelos (CARVALHO *et al.*, 2011).

Como a ET<sub>p</sub> é calculada para uma gramínea específica, Doorenbos & Pruitt, na década de 1970, introduziram a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para melhor parametrização. Já em 1990, a FAO definiu uma cultura de referência hipotética, próxima a grama, para ser adotada como padrão de referência que indica a demanda hídrica da cultura em um determinado local e período (CARVALHO *et al.*, 2011). Utilizando o ET<sub>o</sub>, é possível determinar a necessidade de água em diversos estágios da planta. Quando se multiplica o ET<sub>o</sub> pelo coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>), encontra-se a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), valor que se modifica ao longo da vida da planta, refletindo na mudança da necessidade hídrica da mesma (GLOAGUEN *et al.*, 2021).

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (1)$$

Existem diversos métodos de calcular a evapotranspiração de referência e, por fim, a demanda de água em uma agricultura irrigada. Mas todos esses métodos precisam levar em consideração o estágio de desenvolvimento da planta, sua espécie utilizando o  $K_c$  adequado, e o local em que está localizada a cultura. As informações referentes a cultura, solo e clima são, portanto, essenciais para o cálculo da demanda hídrica de forma a cumprir as necessidades da planta (ANA, 2017). Com o avanço das tecnologias de satélite e o uso de sensoriamento em larga escala, foi possível começar a estimar o  $E_{to}$  com maior acurácia por obtenção de dados com maior frequência e mais exatos, tornando ferramentas auxiliares no manejo de irrigação (SALGADO; MATEOS, 2021). A Figura 3 ilustra a relação de água disponível para a planta por meio da irrigação e chuvas, além da relação de evapotranspiração e os estágios de desenvolvimento da planta.

Figura 3 – Necessidade de água ao longo da vida da planta

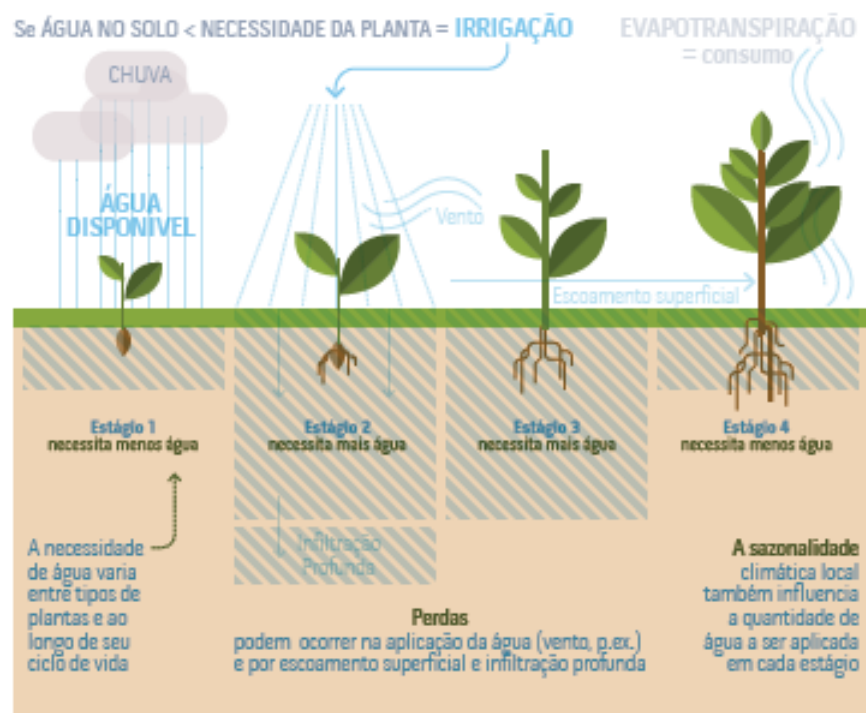


Figura 24. Representação esquemática dos processos relacionados à irrigação

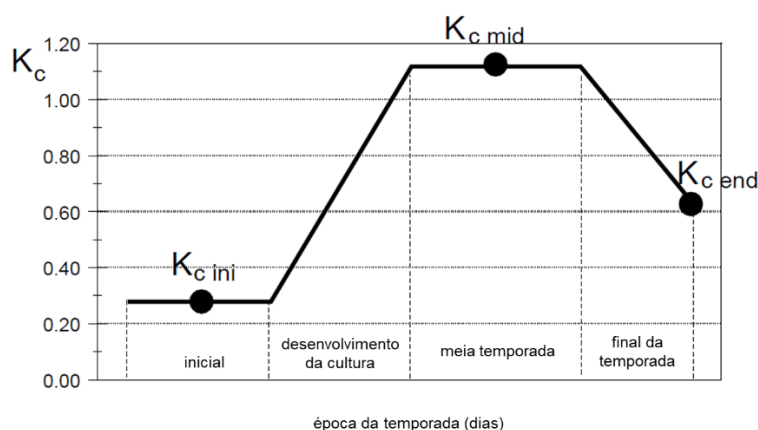
Fonte: ANA - Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017 (no prelo)

Fonte: ANA, 2017.

O  $K_c$  é a chave para poder encontrar a relação de dependência de água em relação ao estágio em que a planta se encontra e, então, calcular corretamente a quantidade de água que a planta necessita, por meio da equação (1). Esse coeficiente

incorpora simultaneamente as características das plantas ao longo de sua vida e os efeitos médios de evaporação do solo e em geral se comporta vide Figura 4. Na figura, é mostrado que inicialmente a planta precisa de menos água e atinge sua necessidade hídrica máxima no estágio de maturidade e à medida que envelhece, sua necessidade vai diminuindo. O cálculo do  $K_c$  não será explorado no presente trabalho por não estar no escopo proposto, por isso o valor será adotado de literatura para a planta já desenvolvida, ou seja, com um valor constante, e poderá ser corrigido utilizando o conceito de capacidade de campo posteriormente, se necessário. A capacidade de campo é um atributo referente ao solo que quantifica quanto de água que um solo drenado consegue absorver contra as forças gravitacionais presentes, ou seja a capacidade máxima do solo de absorver água (ALLEN *et al.*, 1998).

Figura 4 – Curva de  $K_c$



Fonte: Allen *et al.* (adaptado), 1998.

Alguns  $K_c$  encontrados na pesquisa, vale ressaltar que os estudos consideram diferentes divisões de fases, referente a floricultura são:

- considerando roseiras (cv. Carola) na fase vegetativa foi encontrando um  $K_c$  de 0,75 e na fase produtiva um de 1,18 (OLIVEIRA *et al.*, 2014);
- para a alstroemeria (*Alstroemeria x hybrida*) se tem 5 Kcs: 0,39 para a fase vegetativa; 0,41 para o início da floração; 0,95 para o florescimento; 1,50 para pleno florescimento e 0,75 para a queda do florescimento (GIRARDI *et al.*, 2016);
- para o crisântemo (*Dendranthema grandiflora* var Yellow Polaris) tem 4 Kcs: 0,43 para a fase vegetativa; 0,79 para o florescimento de 10 – 80%

de desenvolvimento; 1,59 para o florescimento de 80 – 100% de desenvolvimento; 1,33 para o estágio de floração (WREGGE; LUNARDI, 2006);

- e para a gérbera os 6 Kcs determinados foram: 0,72 para o primeiro período vegetativo, 0,81 para o segundo período vegetativo, 0,85 para o primeiro florescimento, 0,89 para o florescimento pleno, 1,33 para o florescimento pleno II e 1,03 para a queda do florescimento (PIROLI *et al.*, 2020).

Existem diversos métodos que são utilizados para estimar o Eto em uma determinada localização. E essa variedade de métodos ocorreu pois cada método se adequa de forma diferente às condições climáticas, sendo uns mais adequados para climas áridos enquanto outros podem ser melhores para ambientes úmidos, por exemplo, e pela simplicidade de utilização e indisponibilidade de alguns dados meteorológicos ou climáticos necessários como entrada dos modelos (CARVALHO *et al.*, 2011). Na Tabela 1 serão mostrados alguns métodos de estimativa da evapotranspiração de referência empíricos e/ou com fundamentação física e as variáveis necessárias para sua utilização.

Tabela 1 – Principais métodos de estimativa de evapotranspiração de referência

| Método              | Elementos meteorológicos de entrada | Variáveis auxiliares de entrada |
|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Penman              | Tx, Tn, T, UR, v, n, P, Rs, Rn      | DJ, Lat                         |
| Thornthwaite        | Tmn, Tm, T                          | Lat                             |
| Penman-Monteith-FAO | Tx, Tn, T, UR, v, n, P, Rs, Rn      | DJ, Lat                         |
| Tanque Classe A     | ECA, v, UR                          | Extensão da bordadura do tanque |
| Linacre             | Tm, Tpo, Tx, Tn                     | Lat, Alt                        |
| Camargo             | Tm                                  | Lat, Alt                        |
| Hargreaves          | T, Tx, Tn                           | DJ, Lat                         |

Siglas: Tx - temperatura diária máxima; Tn - temperatura mínima diária; T - temperatura média diária; Tmn - temperatura normal (média de 30 anos) do mês ou mensal de vários anos com representatividade climática; Tpo - temperatura do ponto de orvalho; Tm - temperatura média mensal observada no mês em estudo; UR - umidade relativa média diária; v - velocidade do vento; n - insolação ou horas de brilho solar; P - pressão atmosférica média diária; Rs - radiação solar; Rn - saldo de radiação no sistema solo-planta-atmosfera; ECA - evaporação do tanque Classe A; DJ - dia Juliano; Lat - latitude

Fonte: adaptado de Carvalho, 2011.

Cada um dos modelos possui vantagens e desvantagens, e o comumente mais utilizado é o Penman-Monteith-FAO por sua complexidade, mas ele possui entradas que não são simples de serem obtidas e pode gerar uma flutuação maior que a desejada em regiões semiárida. Já o método de Hargreaves, também conhecido como Hargreaves-Samani (HG), não apresentou bom desempenho em climas frios e úmidos, mas pode ser satisfatório quando não se tem alta insolação ou velocidade do vento, além disso é apropriado quando só se tem dados da temperatura do ar e tem vantagens em climas semiáridos (CARVALHO *et al.*, 2011). Por esse motivo, o HG pode ser aplicado de forma mais simples com sensores disponíveis para prototipagem.

O modelo de evapotranspiração de Hargreaves-Samani (HG) é o mostrado na equação (1) e foi ajustado em 1985 depois de algumas formulações para considerar picos de demanda. A equação fornece o  $E_t$  em mm de lâmina de água por dia em função de:  $Q_0$ , radiação solar incidente na atmosfera convertida em mm por dia, por meio de conversão, dado encontrado em diversas tabelas dependendo da latitude;  $T$ , temperatura média diária em °C;  $T_{max}$ , temperatura máxima diária em °C; e, por fim,  $T_{min}$ , temperatura mínima diária em °C. Esse modelo se mostra simples por necessitar apenas de um dado tabelado e de medidas de temperaturas diárias que podem ser tomadas facilmente utilizando as ferramentas de prototipagem eletrônicas atuais e pode ser usado também para irrigação marcada ou planejada (HARGREAVES; ALLEN, 2003).

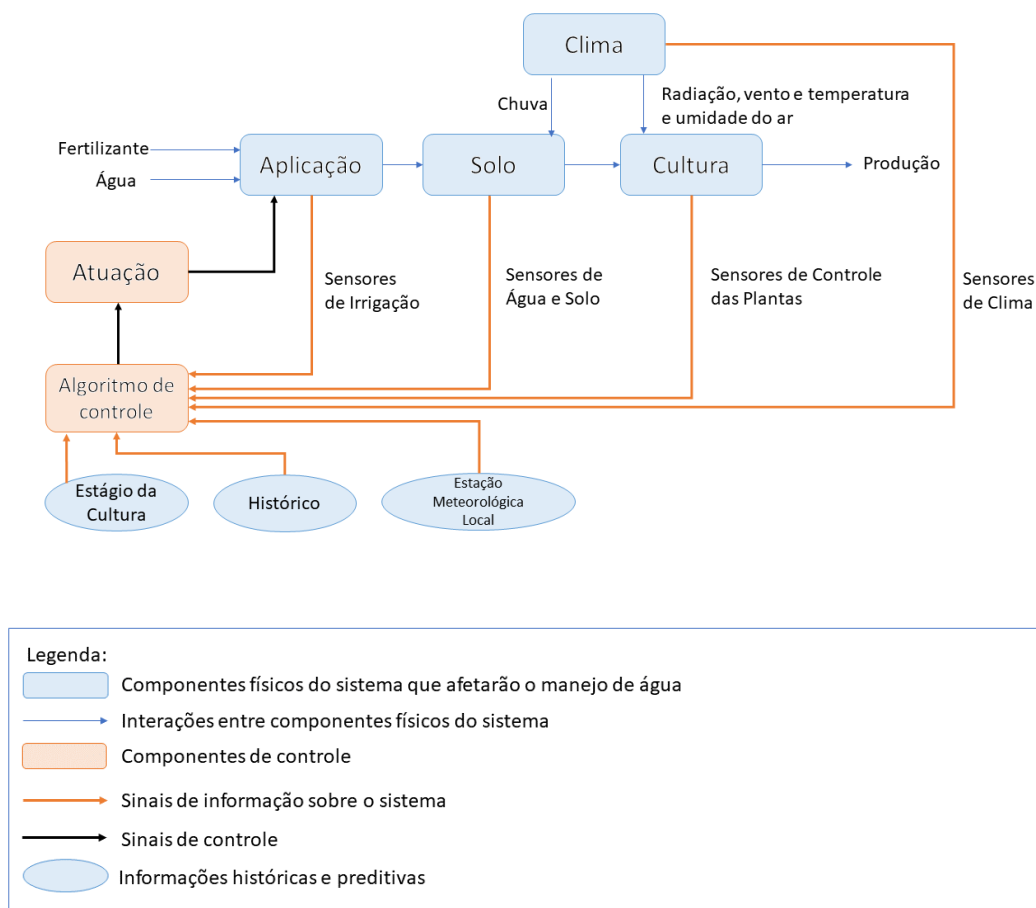
$$ET_o = 0,0023 Q_0 (T + 17,8) (T_{max} - T_{min})^{0,5} \quad (2)$$

Para utilizar melhor a água e irrigar corretamente a cultura desejada, é comumente utilizada a engenharia de controle para auxiliar nas tomadas de decisão de forma autônoma. É possível visualizar o diagrama da Figura 5 em três grandes grupos: o sistema de apoio a decisão, responsável por aplicar a irrigação e corrigir quando necessário, tendo então o papel estratégico; a atuação, que corrige o volume e/ou tempo de irrigação; e, por fim, a aplicação física da água no tempo (MCCARTHY *et al.*, 2013).

O diagrama de blocos utilizado pelo sistema de irrigação pode variar bastante dependendo dos sensores e *inputs* disponíveis inicialmente. Será discutido brevemente o sistema de irrigação geral ilustrado na Figura 5, mostrando as interações e o uso de dados. Nesse sistema, o algoritmo utiliza dados a respeito da fase em que a cultura se encontra, já que a necessidade de água depende do estágio da planta, o

histórico do local, os dados meteorológicos do local para auxiliar na estimativa do clima, além de sensores de aplicação de água, de umidade do solo, da própria planta e do clima. O algoritmo então rege o atuador, controlando a aplicação de água e fertilizante no solo que, nesse modelo, tem interações com o clima local por meio das chuvas, irradiação, temperatura, umidade relativa e ação do vento. Por fim, as plantações recebem os insumos necessários e por ser um ciclo fechado de controle, pode receber correções do modelo se necessário. Esse esquema serve como base de diversos modelos de irrigação autônoma, podendo seu algoritmo ser adaptado para um modelo de evapotranspiração que condiz com os dados disponíveis para *input* do sistema.

Figura 5 – Diagrama de blocos de sistema de irrigação proposto por McCarthy *et al.*, 2013.



Fonte: adaptado de McCarthy *et al.*, 2013.

### 3.3 PROTOTIPAGEM

De forma geral, pode-se dizer que um protótipo consiste em uma criação que está em desenvolvimento e possui o intuito de expor a ideia, aperfeiçoá-la e fazer testes para economizar no desenvolvimento final de um produto, identificando possíveis falhas em etapas iniciais do projeto. Há diversas formas de se criar um protótipo 3D, sendo as principais: a prototipagem virtual (VP), a prototipagem rápida por deposição de material (RP), a prototipagem rápida por subtração de material (SRP) e a prototipagem híbrida a partir da deposição e subtração de material (DOS SANTOS, 2016).

Para protótipos físicos, atualmente é muito utilizada a RP (do inglês: *rapid prototyping*) que utiliza como base a manufatura aditiva a partir de um modelo 3D CAD (*Computer Aided Design*), a exemplo da chamada impressão 3D (KORKEES *et al.*, 2020). Essa, por sua vez, consiste em criar um produto a partir de deposição de camadas de material, essencial na Indústria 4.0 por permitir liberdade para construir peças mais complexas e customizáveis, além de economizar material, ter alta eficiência e ser rápida (MEHRPOUYA *et al.*, 2019). Alguns dos processos mais utilizados são estereolitografia (SLA), manufatura de objetos em lâminas (LOM), sinterização seletiva a laser (SLS) e modelagem por deposição de material fundido (FDM) (MAURYA *et al.*, 2020).

#### 3.3.1 Impressão 3D

As técnicas de impressão 3D começaram a serem desenvolvidas na década de 1970 a partir do conceito de solidificação de material em pó com a aplicação de raios laser, chamada de sinterização seletiva a laser (do inglês: *selective laser sintering*, SLS). Porém, de forma comercial, a estereolitografia (do inglês: *stereolithography*, SLA) foi a primeira técnica disponível no ramo, sendo baseada na solidificação de uma resina líquida na presença de luz ultravioleta. Já no início da década de 1990, foi patenteada a mais famosa técnica de impressão 3D: a deposição de material fundido (do inglês: *fused deposition modeling*, FDM) pela empresa Stratasys Inc. (PRIEDEMAN JR; BROSCHE, 2004), encontrada hoje no mercado a preços acessíveis. Juntamente com o desenvolvimento da técnica FDM, também foi desenvolvida a impressão a partir de jato de tinta, sendo usada em atividades específicas, como na área

farmacêutica. Nos anos 2000, começou-se a difusão do conceito RepRap que consiste em impressoras imprimindo novas impressoras, de forma aberta para a comunidade, viabilizando a impressão das partes plásticas. Mesmo diante desses conceitos, a maioria das técnicas de impressão 3D conhecidas atualmente são baseadas em 3 tecnologias principais: a solidificação de material em pó, tais como a SLS; a solidificação de um líquido, a exemplo da SLA; e a extrusão de material, como a FDM (JAMRÓZ *et al.*, 2018).

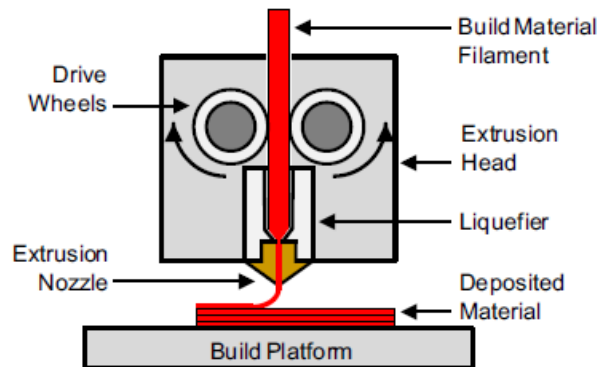
Em relação as outras tecnologias de manufatura, a impressão 3D não necessita de ferramentas e moldes, que geralmente são de alto custo na indústria. Além disso, é viável automatizá-la e reutilizar materiais previamente descartados. Com essa tecnologia, também é possível ter um estoque muito baixo de produto, desenvolver peças com geometrias exóticas com facilidade, além de ser relativamente fácil de operar. Contudo, a maioria dos produtos impressos em 3D possuem precisão menor do que a manufatura tradicional e possuem condições limitantes quanto a resistência mecânica e a calor. Outra desvantagem da impressão 3D está no preço da fabricação, já que para imprimir grandes peças o tempo gasto é comparativamente alto. Hoje, o principal uso de impressão 3D é para o desenvolvimento de protótipos, facilitando a replicação de peças a baixo custo e de forma segura, viabilizando a modificação de protótipos baseado no *feedback* do cliente (BERMAN, 2012).

O método de impressão 3D FDM, também conhecido por FFF (*Fused Filament Fabrication*, tradução livre para fabricação com filamento fundido), se baseia na extrusão de filamentos derretidos, que são depositados camada a camada, baseado no modelo 3D CAD. Com auxílio de *softwares* CAM (*Computer Aided Manufacturing*, tradução livre para Manufatura Assistida por Computador), é possível criar seções transversais da peça a ser impressa inicialmente em formato .stl, com programas chamados de *slicers* (tradução livre para fatiadores), determinando as camadas a serem impressas e os principais parâmetros para a impressão (RAHIM *et al.*, 2019).

Após o *upload* do arquivo .stl para a impressora, o filamento do material selecionado é alimentado com auxílio de rodas motrizes em uma cabeça extrusora que aquece o material e deposita por meio do bico extrusor numa plataforma, também chamada de mesa, formando uma camada da peça, vide a Figura 6. Com a deposição do material na mesa, o líquido se solidifica e uma nova camada é depositada. Esse processo é repetido até a fabricação total da peça, com um movimento relativo entre bico e plataforma. Na configuração mais comum de impressão 3D, a plataforma se

movimentar verticalmente a cada deposição de camada, enquanto a cabeça extrusora se movimenta em um plano x-y (CANTRELL *et al.*, 2017). Dependendo da geometria da peça a ser impressa, é necessário utilizar suportes que são adicionados por meio do próprio *software* de fatiamento, os quais serão posteriormente eliminados da peça final.

Figura 6 – Esquema de Impressora 3D FDM



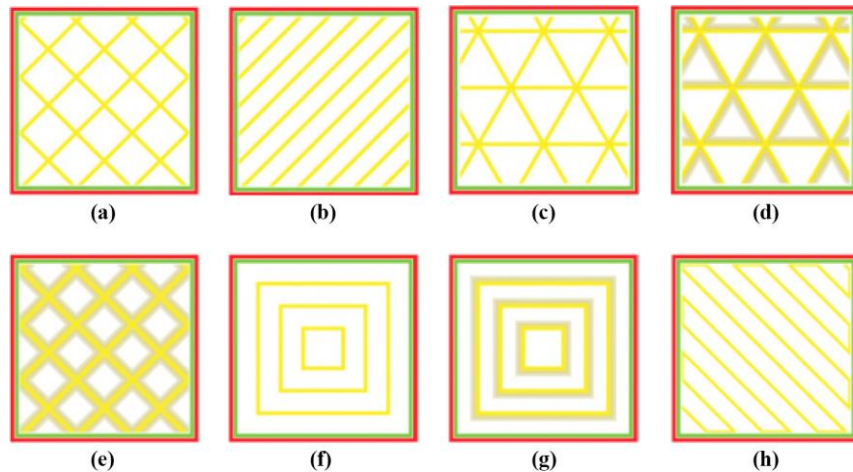
Fonte: Cantrell *et al.*, 2017.

Segundo Rahim *et al.* (2019) os principais parâmetros a serem controlados ao imprimir utilizando a tecnologia FDM são:

- a direção ou orientação de construção;
- a espessura de cada camada, que é dependente do bico extrusor utilizado, sendo comumente adotado com 0,4mm de diâmetro;
- o ângulo de varredura referente ao eixo x da mesa, sendo geralmente 0°, 45°, 90° ou -45°;
- a temperatura do bico que irá controlar o fluxo de material e seu comportamento;
- a velocidade de impressão, determinada pela velocidade de alimentação, diâmetro do filamento e diâmetro do bico extrusor;
- a porcentagem de preenchimento, que determina a densidade final da peça e é ligada a economia de tempo e material, e ao tipo de preenchimento, que consiste na forma de preencher a peça, que também tem relação direta com sua resistência mecânica (algumas formas são apresentadas na Figura 7);
- número de cascas que envolve o produto.

Todas essas características estão diretamente ligadas a qualidade e propriedades físicas e mecânicas finais da impressão, determinando a acurácia funcional da peça bem como diminuição do custo de impressão.

Figura 7 – Formas de preenchimento na Ultimaker



**Notes:** (a) Grid; (b) lines; (c) triangles; (d) tetrahedral; (e) cubic; (f) concentric; (g) concentric 3D; (h) Zig Zag

Fonte: Gordelier *et al.*, 2019.

Sobre os materiais de impressão disponíveis para a tecnologia FDM, Besko *et al.* (2017) cita as principais características de cada um deles, sendo os mais conhecidos:

- o ácido polilático (PLA), sendo esse um termoplástico biodegradável e mais ecológico do que a maioria dos filamentos usualmente utilizados, porém é frágil e não deve ser usado em peças que necessitam boa resistência mecânica;
- o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), que tem menor custo e possui melhor resistência mecânica, quando comparado ao PLA, porém a fumaça gerada por este durante a impressão é considerada cancerígena pela sua toxicidade, além de precisar de maiores temperaturas e ser derivada de petróleo;
- o polietileno tereftalato modificado com glicol (PETG), que é um material com características intermediárias entre PLA e ABS, sendo mais simples de utilizar e sem geração de gases tóxicos como o ABS e com uma resistência mecânica maior do que a fornecida pela PLA;

- o Nylon, que é um polímero sintético flexível e, apesar da boa resistência ao impacto e da estabilidade dimensional desejada para projetos de engenharia, também libera gases tóxicos como o ABS;
- o elastômero termoplástico (TPE), o poliuretano termoplástico (TPU) e o copoliéster termoplástico (TPC), que são filamentos flexíveis de baixa densidade e baixo custo, sendo o TPU mais rígido e durável do que o TPE, enquanto o TPC resiste melhor ao calor e exposição química;
- o policarbonato (PC), que é considerado o termoplástico mais forte além de ser extremamente durável, resistente ao impacto físico e transparente.

Na Tabela 2 são categorizadas as principais propriedades desses materiais citados anteriormente comparativamente.

Tabela 2 – Principais propriedades dos filamentos para impressão 3D

| Propriedades            | PLA   | ABS   | PETG<br>(PET,PTT) | NYLON | TPE,TPU<br>e TPC | PC    |
|-------------------------|-------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|
| Ecológico               | alto  | baixo | alto              | baixo | alto             | alto  |
| Brilho                  | médio | baixo | alto              | médio | médio            | alto  |
| Transparência           | médio | baixo | alto              | baixo | médio            | alto  |
| Rigidez/Dureza          | médio | alto  | alto              | alto  | baixo            | alto  |
| Resistência Impactos    | baixo | médio | alto              | alto  | alto             | alto  |
| Flexibilidade           | baixo | médio | médio             | médio | alto             | médio |
| Contração/WARP          | baixo | alto  | médio             | baixo | médio            | baixo |
| Precisão/Detalhes       | alto  | baixo | médio             | alto  | médio            | alto  |
| Qualidade de Superfície | alto  | baixo | alto              | alto  | médio            | alto  |
| Resistência/Atritos     | baixo | médio | alto              | alto  | baixo            | alto  |
| Resistência Química     | médio | baixo | alto              | alto  | alto             | alto  |
| Resistência Temp.       | baixo | alto  | médio             | alto  | médio            | alto  |
| Usinabilidade           | baixo | alto  | baixo             | alto  | baixo            | médio |
| Densidade               | baixo | médio | baixo             | baixo | médio            | alto  |
| Temp. de Impressão      | médio | alto  | alto              | alto  | alto             | alto  |
| Temp. Mesa Aquecida     | baixo | alto  | médio             | alto  | baixo            | alto  |
| Preço por m3/grama/hora | baixo | médio | médio             | baixo | baixo            | alto  |

Fonte: Besko *et al.*, 2017.

Por fim, a impressão 3D é uma tecnologia que pode ser empregada em áreas distintas e com materiais diversos. Alguns exemplos de trabalhos que utilizam da técnica da impressão 3D são: estudos a respeito de utilização da impressão 3D para fabricação de baterias a base de grafeno (MENSING *et al.*, 2020); uso de impressoras 3D durante a pandemia de Covid-19 ao redor do mundo para fabricar equipamentos de proteção individual (EPI) focado em profissionais da saúde, sendo o mais famoso o *face shield* (protetor facial), além do desenvolvimento de respiradores para os doentes (VORDOS *et al.*, 2020); e até sobre a impressão de comida personalizada quanto a textura, aparência e valor nutricional (LE-BAIL *et al.*, 2020).

### 3.3.2 Prototipagem Eletrônica

A prototipagem eletrônica possui o mesmo intuito da prototipagem rápida, só que é utilizada para a criação de circuitos, de forma a permitir testes e aprimoramento da lógica de codificação. Utilizando plataformas dedicadas a prototipagem eletrônica, como Arduino ou Raspberry Pi, é possível fazer inúmeros testes usando bibliotecas previamente existentes de forma acessível e bem monitorada, criando protótipos dos mais simples aos mais complexos, facilitando a atividade de desenvolvimento de circuitos. Após um protótipo eletrônico ser exaustivamente testado e comprovado, é possível desenvolver placas de circuito impresso que tornam os produtos finais mais baratos e dedicados. No presente trabalho, será aprofundado sobre o Arduino que será a plataforma comercial utilizada pela autora.

#### 3.3.2.1 Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma microcontrolada de prototipagem eletrônica, formada por um conjunto de *hardware* e *software*, desenvolvida na Itália em 2005 para simplificar a prototipagem rápida (ARDUINO, 2020b). Além da tecnologia do Arduino ter baixo custo e ser altamente versátil, comparado a outros sistemas embarcados, a plataforma é *open source*, ou seja, de código aberto, o que auxilia na maior interação entre os usuários, simplificando sua usabilidade e facilita o compartilhamento de conhecimento.

Apesar de ser uma plataforma simples e intuitiva, o Arduino pode ser usado para o desenvolvimento de novos produtos, por exemplo: um alimentador automatizado de ração para animais (IBRAHIM *et al.*, 2019), um braço prostético automatizado (SHEIKH *et al.*, 2020), entre outros. Em estudos relacionados a sistemas de irrigação por IoT (Internet of Things, tradução livre para Internet das Coisas), por exemplo, 59 artigos utilizaram a plataforma Arduino como base para o projeto, sendo o modelo mais utilizado o Arduino UNO, com um total de 34 trabalhos (GARCÍA *et al.*, 2020). Por isso, o Arduino se tornou popular na comunidade *maker* e é a plataforma eletrônica mais conhecida atualmente para prototipagem rápida.

Existem atualmente diversos modelos de *hardware* do Arduino no mercado, com diferentes funcionalidades. Os modelos Lilypad, por exemplo, são voltados para *wearable tech* (tradução livre: roupas inteligentes). Já o MEGA é voltado a projetos

que precisam de mais entradas e saídas de informações do que os convencionais, permitindo desenvolver projetos mais complexos. O modelo mais utilizado e conhecido pela comunidade é o Arduino UNO, modelo inicial da marca, que tem um microcontrolador baseado no ATmega328P além de 14 saídas digitais e 6 analógicas (ARDUINO, 2020a).

Figura 8 – Arduino UNO



Fonte: Arduino, 2020a.

As entradas e saídas, chamadas comumente na área de *I/O lines*, permitem a conexão dos mais diversos sensores e atuadores ao Arduino. Os sensores e atuadores podem ser encontrados no mercado a um preço acessível e possuem especificações que devem ser obedecidas na hora da montagem para obter um funcionamento correto contidas em *datasheets*, bem como bibliotecas previamente programadas que são usadas no *software*. Alguns sensores e atuadores facilmente encontrados no mercado são os sensores de temperatura e umidade, podendo obter dados da atmosfera, solo ou água, e motores de passo.

A outra parte da plataforma, o *software*, é composta pela IDE (*Integrated Development Enviroment*), tradução livre para Ambiente de Desenvolvimento Integrado, que é um ambiente em que é possível declarar as variáveis necessárias e escrever o código para o *hardware*. A interface usuário/plataforma é baseada na linguagem C/C++ que é dividida em três partes principais: as funções, que controlam a placa e fazem os cálculos; as variáveis, que relacionam os dados; e, por fim, a estrutura, que são elementos de código. Com essas partes, é possível relacionar os pinos de entrada e saída do *hardware* ao circuito montado separadamente, bem como adicionar as bibliotecas necessárias para permitir que o sistema responda como desejado. Vale ressaltar que com as funções adicionadas no código, é possível introduzir modelos que recebam os dados dos sensores e respondam por meio de atuadores.

## 4 METODOLOGIA

O trabalho objetivou desenvolver um sistema de irrigação autônomo com intuito de fornecer a quantidade de água ideal para a planta, a partir de modelo de evapotranspiração com monitoramento de variáveis climáticas para uma determinada espécie. Para o desenvolvimento experimental, foi adotada uma metodologia sistematizada de forma a desenvolver o protótipo com vários pontos de checagem, evitando eventuais erros ao longo do desenvolvimento.

### 4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NA PLATAFORMA DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA

Inicialmente, com a finalidade de estimar a quantidade de água a ser aplicada por irrigação foi implementado na IDE do Arduino o modelo de Hargreaves-Samani de cálculo de evapotranspiração de referência. Para implementar a equação (3) no Arduino foi definido um  $Q_0$  variável apenas em relação ao mês do ano, pois a latitude será fixada no protótipo a ser desenvolvido.

$$ET_o = 0,0023 Q_0 (T + 17,8) (T_{max} - T_{min})^{0,5} \quad (3)$$

### 4.2 COMPARAÇÃO DOS DADOS CALCULADOS COM O MODELO DE EVAPO-TRANSPIRAÇÃO

Visando verificar a conformidade do código implementado na plataforma Arduino, foi avaliado o mesmo modelo proposto em simulações utilizando planilhas do *software* Microsoft Excel com os mesmos dados de entrada. O intuito dessa etapa é garantir que o cálculo realizado no Arduino corresponda ao cálculo feito utilizando as equações propostas de forma direta e testar o código inicialmente para vários parâmetros de temperatura do ambiente.

Para este fim, foram utilizados dados históricos diários de temperatura na cidade do Recife, constando temperatura máxima, mínima e média. Para isso, foram analisados e tratados os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação Recife que é localizada a 8° 03' S, 34° 57' O e altitude de 11,3m, que abordavam informações como temperatura de bulbo seco, temperatura mínima e

máxima, precipitação total, umidade relativa do ar e velocidade do vento de forma horária. Os dados relevantes para o modelo foram obtidos e tratados então para todos os dias do ano de 2019, como exemplificado na Figura 9 para o mês de janeiro.

Figura 9 – Dados climáticos diários do mês de janeiro de 2019

| Data       | Temperatura Média Diária (°C) | Temperatura Máxima Diária (°C) | Temperatura Mínima Diária (°C) |
|------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 01/01/2019 | 27,48                         | 31,50                          | 24,30                          |
| 02/01/2019 | 27,99                         | 32,60                          | 24,60                          |
| 03/01/2019 | 27,10                         | 32,00                          | 21,90                          |
| 04/01/2019 | 26,90                         | 31,70                          | 22,50                          |
| 05/01/2019 | 27,57                         | 31,60                          | 25,10                          |
| 06/01/2019 | 26,47                         | 30,30                          | 22,90                          |
| 07/01/2019 | 25,53                         | 30,80                          | 22,50                          |
| 08/01/2019 | 26,40                         | 31,80                          | 23,50                          |
| 09/01/2019 | 26,98                         | 30,40                          | 23,70                          |
| 10/01/2019 | 27,16                         | 31,10                          | 25,30                          |
| 11/01/2019 | 26,20                         | 31,10                          | 22,00                          |
| 12/01/2019 | 23,99                         | 27,70                          | 22,70                          |
| 13/01/2019 | 26,05                         | 31,00                          | 22,40                          |
| 14/01/2019 | 26,87                         | 30,80                          | 24,10                          |
| 15/01/2019 | 25,95                         | 30,80                          | 21,80                          |
| 16/01/2019 | 26,48                         | 31,50                          | 22,10                          |
| 17/01/2019 | 26,70                         | 31,10                          | 23,20                          |
| 18/01/2019 | 27,77                         | 31,90                          | 24,90                          |
| 19/01/2019 | 27,01                         | 32,20                          | 22,90                          |
| 20/01/2019 | 27,72                         | 31,20                          | 24,60                          |
| 21/01/2019 | 28,15                         | 32,10                          | 25,50                          |
| 22/01/2019 | 25,40                         | 30,30                          | 21,60                          |
| 23/01/2019 | 26,33                         | 31,70                          | 22,00                          |
| 24/01/2019 | 27,23                         | 31,90                          | 23,10                          |
| 25/01/2019 | 27,93                         | 32,10                          | 24,10                          |
| 26/01/2019 | 26,97                         | 32,20                          | 23,60                          |
| 27/01/2019 | 28,23                         | 32,20                          | 25,50                          |
| 28/01/2019 | 24,53                         | 27,20                          | 22,00                          |
| 29/01/2019 | 26,17                         | 30,90                          | 22,50                          |
| 30/01/2019 | 26,51                         | 30,60                          | 23,80                          |
| 31/01/2019 | 27,34                         | 31,70                          | 22,80                          |

Fonte: INMET (adaptado), 2020.

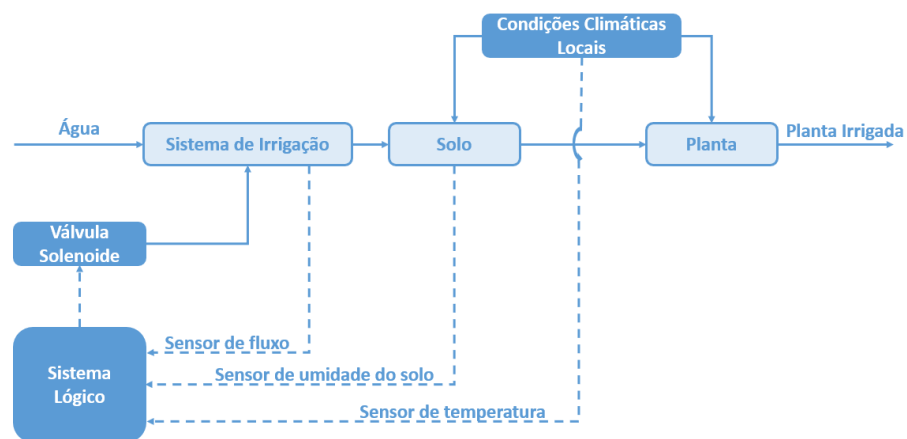
Dessa forma, esse teste não vai ser influenciado por erros provenientes dos sensores de medição, de leitura dos dados, de passagem de sinal para os atuadores e erros na atuação em si. Esses erros serão avaliados e mitigados na etapa de testes do protótipo eletrônico de forma a construir um sistema mais robusto.

#### 4.3 MONTAGEM DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO

Após a verificação da implementação correta do modelo de evapotranspiração, foi desenvolvido o sistema eletrônico com os sensores e atuadores necessários para captar as informações essenciais para os cálculos de quantidade de água. É importante salientar que esse protótipo foi desenvolvido para validar o sistema eletrônico e sua lógica, dessa forma posteriormente foi modelado um protótipo final que se assemelha a um produto, levando em consideração fatores mecânicos e estéticos.

O primeiro passo para desenvolver o protótipo foi estabelecer a lógica do sistema de irrigação e quais seriam os sensores necessários para atingir a irrigação ideal a fim de manter a planta livre de estresse hídrico e sem desperdício de água. Para isso, foi estabelecido o diagrama de blocos apresentados na Figura 10, objetivando guiar o fluxo de informação de forma correta ao longo da prototipagem eletrônica.

Figura 10 – Diagrama de blocos de sistema de irrigação desenvolvido



Fonte: A Autora, 2020.

O diagrama leva em consideração três principais blocos em que há atuação: o sistema de irrigação em si que é composto por um reservatório intermediário de água e o gotejador; o solo que armazena a água fornecida; e, por fim, a planta que absorve a água armazenada no solo. Nesse caso o solo e a planta estão sendo diretamente afetados pelas condições climáticas, como a temperatura e a umidade que regem a demanda hídrica, considerando a ausência de precipitação e o escoamento superficial, já que a planta está em um sistema controlado.

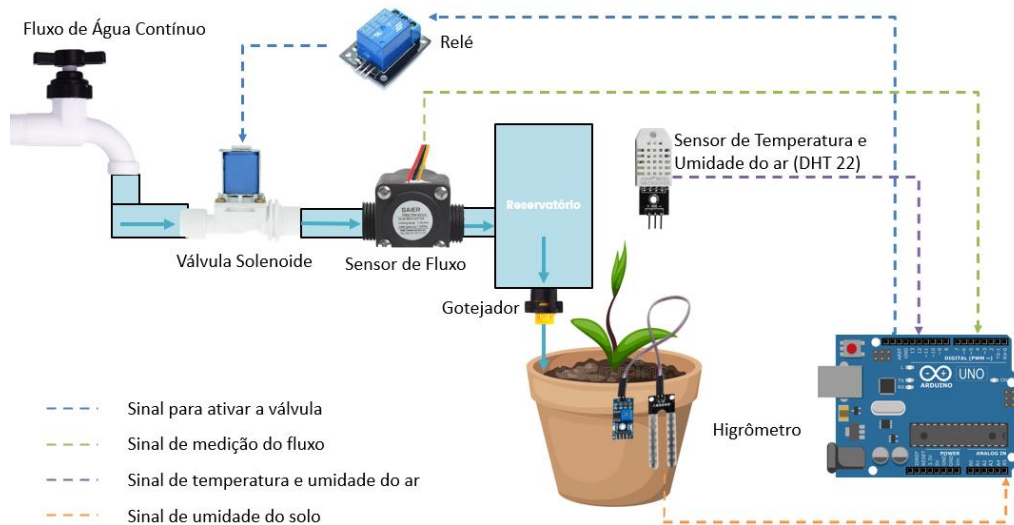
Como dito na fundamentação teórica, é necessário adquirir dados de temperatura do ambiente para poder utilizar o modelo de Hargreaves-Samani na estimativa da evapotranspiração e dados referentes a umidade do solo para poder corrigir a real quantidade de água utilizada pela cultura tornando o sistema inteligente e retroalimentado. A umidade do solo permitiu verificar déficits e excedentes hídricos com base no conhecimento da capacidade máxima de armazenamento pelo solo, denominado de capacidade de campo. Para obter estes dados, foi utilizado um sensor de temperatura, o DHT 22, e um sensor de umidade do solo, o YL-69.

Foi utilizada uma válvula solenoide que irá controlar o fluxo de água para o sistema de irrigação, sendo este o principal atuador de todo o sistema. Esse componente recebe um sinal de um relé, considerando o horário e as necessidades de água calculadas da planta, deixando a válvula aberta por um determinado período ou volume. Para decidir se a válvula solenoide irá atuar de acordo com um tempo calculado ou volume, foram realizados testes com auxílio de um medidor de fluxo para verificar se a vazão de água utilizada na irrigação é constante. Se a hipótese for verdadeira, é calculado um tempo de válvula aberta, em caso contrário a válvula solenoide fica aberta até o volume calculado com auxílio do medidor de fluxo.

Como visto na seção 3.2, o modelo de Hargreaves-Samani calcula a evapotranspiração de referência, fornecendo a quantidade de água em lâmina (mm) a ser aplicada, convertida em volume com base na área superficial do vaso. Então, o algoritmo realiza uma conversão em tempo caso o fluxo seja constante.

Para melhor visualizar os fluxos de sinais que entram e saem do protótipo, eles estão apresentados no sistema da Figura 11. Esse sistema está conectado a uma torneira na qual deve permitir fluxo contínuo de água. Além disso, a válvula solenoide, que está acoplada à torneira por meio de um chicote, permite ou não o fluxo de água, levando em consideração os aspectos levantados anteriormente. Após o sinal do relé ativar esse atuador, o fluxo de água é direcionado para o reservatório do sistema de irrigação, passando pelo sensor de fluxo que verifica a vazão de água e o volume fornecido em uma disposição inicial escolhida. A quantidade de água armazenada no reservatório é transferida para a proximidade da raiz da planta por meio do gotejador, que deve distribuir a irrigação ao longo do dia evitando acúmulo de água no solo e regulando para uma vazão ideal para a planta.

Figura 11 – Fluxo de sinais do protótipo eletrônico



Fonte: A Autora, 2020.

A respeito dos sinais envolvidos no protótipo, que estão tracejados na Figura 10, há 6 sinais principais, sendo 4 deles representados na Figura 11 e dois não explícitos, que são relacionados ao sistema de armazenamento de informação, sendo todos os sinais detalhados a seguir:

- **Sinal para ativar a válvula:** esse sinal é fornecido pelo Arduino e, como já explicado anteriormente, indica que a válvula pode ser aberta por meio do relé ou a mantém fechada, impedindo a passagem de água da torneira para o reservatório;
- **Sinal de medição do fluxo:** o sinal responsável pela medição de fluxo, obtido através do sensor SEM-HZ21WA, foi utilizado para verificar a situação da vazão de água. Caso seja constante, como já mencionado, o volume de água fornecido será calculado por base no tempo de ativação da válvula solenoide, caso contrário, no volume medido a partir dos dados coletados pelo sensor de fluxo. Esses dados serão armazenados no cartão de memória SD para serem avaliados na seção de resultados e discussões;
- **Sinal de temperatura do ar:** o sinal fornecido pelo sensor DHT 22 disponibiliza dados de temperatura do ar local. Essas informações são tomadas em um intervalo pré-estabelecido e são obtidas através do sensor, ao longo do dia. Os dados coletados e posteriormente tratados são

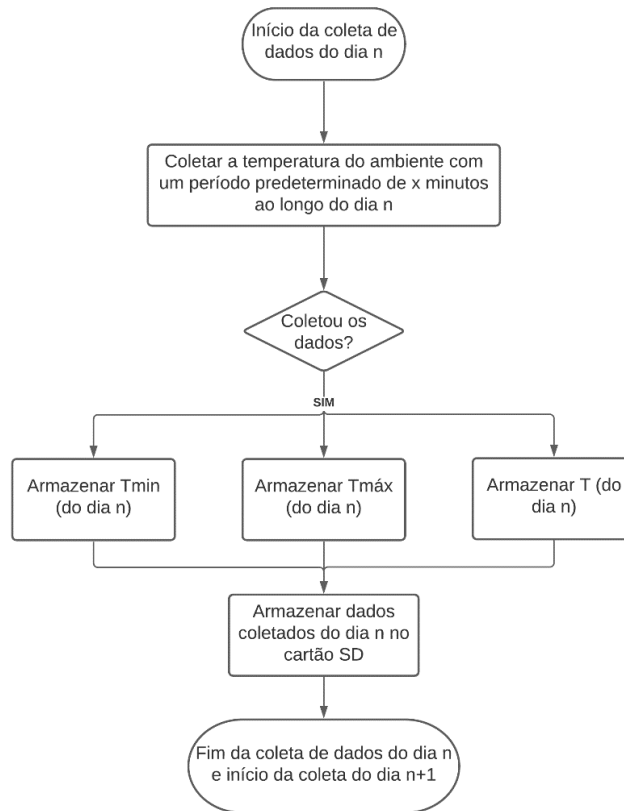
as temperaturas média, mínima e máxima do dia, que são necessárias para o cálculo da ETo por Hargreaves-Samani. Esses dados e as medições de umidade do ar são armazenadas em um cartão SD para serem discutidos na seção de resultados e discussões com maior profundidade;

- **Sinal de umidade do solo:** como mencionado anteriormente, o sinal de umidade do solo é fornecido para o Arduino por meio do sensor YL-69 e visa de avaliar a umidade do solo e comparar com a capacidade do campo considerando uma faixa de mais ou menos 2% em relação a umidade encontrada com o experimento da capacidade de campo realizado com a planta, identificando então se o solo está encharcado, diminuindo o coeficiente de cultura em 5%, ou mais seco do que o aceitável, aumentando o Kc em 5%. Esses dados são armazenados no cartão de memória SD para serem avaliados na seção de resultados e discussões;
- **Sinal de data e hora:** o sinal de data e hora é tomado utilizando um módulo RTC, que ao estar conectado com uma pilha de relógio comum, impede o desligamento do sistema em caso de falta de energia. Esse sinal deve fornecer ao Arduino as informações de horário para serem salvas no cartão de memória SD e deve ser considerado na obtenção dos dados e atuação para os outros sinais;
- **Sinal de armazenamento de dados:** o último sinal do sistema é referente ao armazenamento de dados que é realizado com auxílio de um cartão de memória que permite a avaliação dos dados referentes ao sistema na seção de resultados e discussões para trazer maior profundidade ao trabalho.

Para poder desenvolver o código de fato, foram construídos dois diagramas, com o intuito de estabelecer a lógica inicial do algoritmo. Para isso foi bem estabelecida a ordem de acontecimentos, bem como os momentos de verificação e como devem ser efetuadas as correções sobre o próprio sistema.

A Figura 12 representa a operacionalização da obtenção de dados de temperatura do ambiente. O diagrama relaciona os pontos explicados a respeito de sinais de temperatura do ar, bem como armazenamento de dados e data e hora.

Figura 12 – Diagrama referente a coleta de dados de temperatura do ambiente

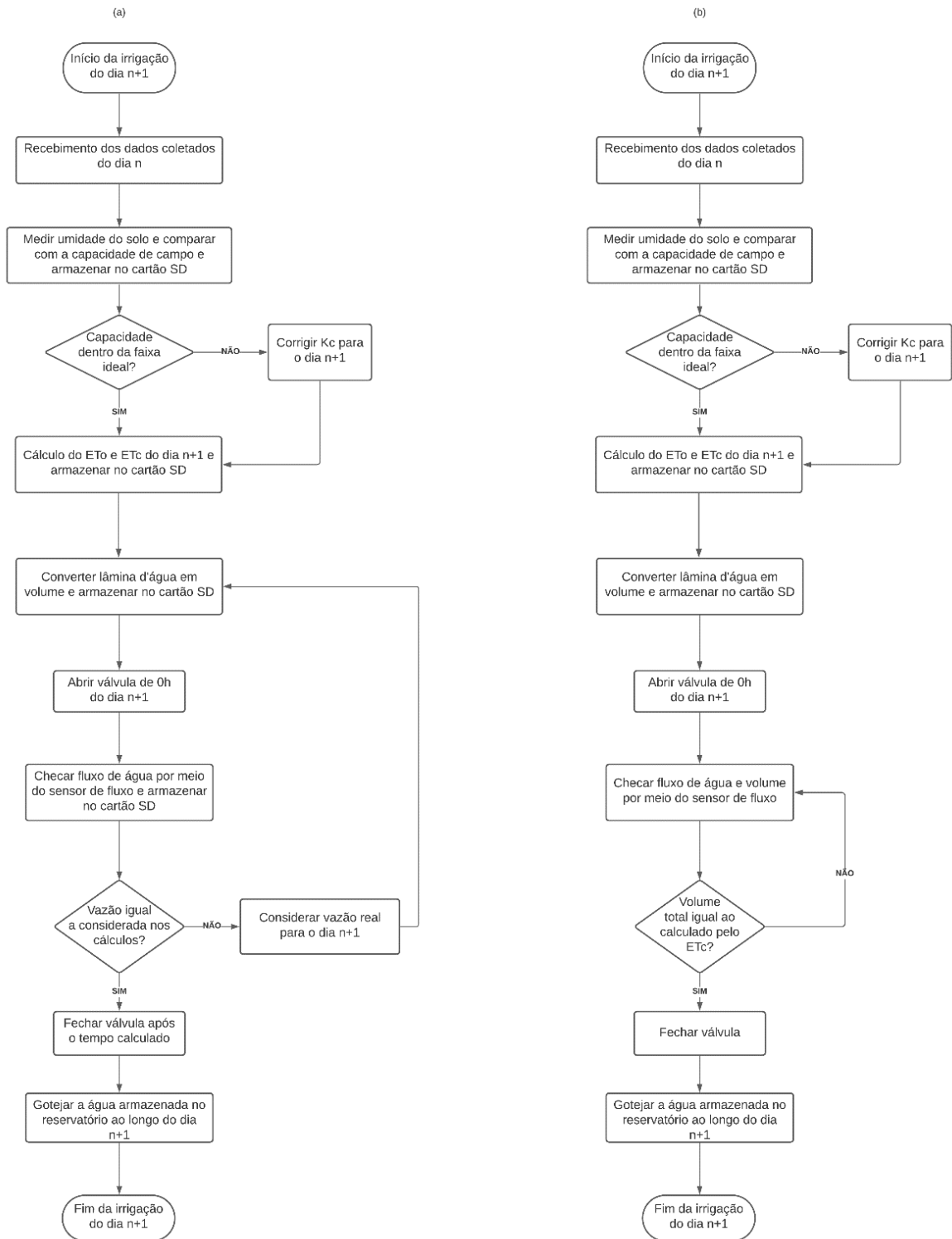


Fonte: Autora, 2020.

Além da aquisição e armazenamento dos dados diretos de temperatura do ar, o fluxograma também mostra que a cada coleta de informação do sensor se armazenam as informações de temperatura mínima, máxima e média do dia. Para isso, foram utilizados laços para calcular a cada passo estas temperaturas: para a média, foi utilizado um somatório das temperaturas para posteriormente dividir pelo número de coletas válidas realizadas pelo sensor no período de um dia; já para as temperaturas mínimas e máximas, foi feita uma comparação com os dados anteriores de forma a sempre atualizar estas informações quando necessário, obtendo uma temperatura mínima e máxima diária.

Após a aquisição de dados do dia n descritos no diagrama da Figura 12, o protótipo irá dar início a irrigação no dia n+1, seguindo as etapas mostradas nos fluxogramas da Figura 13. A diferença de um dia entre a coleta de dados e o início da irrigação se dá pelo fato de que o modelo calcula a ETo baseada nos dados de temperatura do dia anterior (n).

Figura 13 – Diagramas referentes ao fornecimento de água: (a) fluxo constante; (b) fluxo variável



Fonte: A Autora, 2020.

Na Figura 13, foram apresentados dois possíveis diagramas de atuação do sistema. A Figura 13a, representa o sistema caso o fluxo fornecido pela mangueira seja constante, neste caso regido pelo tempo de válvula aberta calculado pelo volume. Enquanto isso, a Figura 13b representa um sistema com fluxo variável, sendo então

usado o volume como condição de parada da válvula. Em ambos os casos há a presença de um reservatório de água conectado ao gotejador. Vale ressaltar que um sistema desenvolvido para fluxo variável também pode ser utilizado para fluxo constante sem necessidade de alterações, por isso foi desenvolvido um código considerando esse fator.

#### 4.3.1 Componentes utilizados

Para compreender melhor o sistema e suas limitações, se faz necessário conhecer cada um de seus componentes eletrônicos e eletromecânicos. Por isso, será apresentado de forma sucinta algumas informações de cada uma das partes do sistema de irrigação.

- **Placa Arduino UNO:** o modelo UNO das placas Arduino, como mencionado na seção 3.3.2.1 é o mais conhecido e tem um microcontrolador baseado no ATmega328P além de 14 saídas digitais e 6 analógicas. Para o desenvolvimento desse projeto, optou-se por utilizar uma placa Arduino UNO por ser amplamente utilizada em estudos de irrigação e por apresentar melhor custo-benefício.

Figura 14 – Arduino UNO

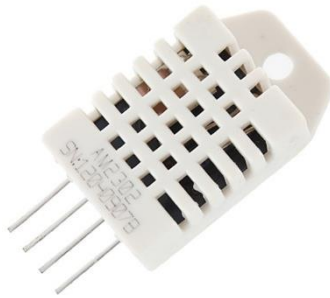


Fonte: Arduino, 2020a.

- **Sensor de temperatura e umidade – DHT22:** o sensor digital DHT22 tem capacidade de medir temperaturas que variem entre -40°C e 80°C

com uma precisão de meio grau Celsius e umidade relativa do ar com precisão de 2% (FILIPEFLOP, 2020c).

Figura 15 – Sensor DHT22



Fonte: FilipeFlop, 2020c.

- **Módulo Cartão Micro SD:** esse módulo permite que o microprocessador ATmega328P escreva as informações desejadas diretamente em um cartão micro SD. Para isso, o módulo tem 6 pinos, sendo dois deles o *ground* (GND) e o VCC, e os 4 pinos restantes referentes a interface de comunicação SPI (MOSI, SCK, MISO e CS) que tem portas digitais fixas.

Figura 16 – Módulo Cartão Micro SD



Fonte: Recicomp, 2020a.

- **Real Time Clock RTC DS3231:** o modelo selecionado é um relógio de alta precisão que fornece a data e a hora de forma simples por já corrigir

os meses que tem menos de 31 dias e anos bissextos. O uso desse módulo com a bateria evita também a perda de dados em caso de falta de energia e novos *setups* para corrigir a data e hora inicial.

Figura 17 – Módulo RTC DS3231



Fonte: FilipeFlop, 2020b.

- **Válvula solenoide:** essa válvula de vazão é normalmente fechada e precisa ser alimentada por uma fonte de 12V para poder ser aberta e permitir o fluxo de água, caso contrário a válvula permanece fechada. Para poder conectar ao sistema, é necessário fazer o uso de um relé para permitir a passagem de corrente para a válvula. É importante ressaltar que a válvula tem uma pressão de operação entre 0,2 e 8kgf/cm<sup>2</sup> o que impossibilita projetos com pressão abaixo de 19 MPa (FILIPEFLOP, 2020d).

Figura 18 – Válvula de vazão solenoide 12VDC



Fonte: FilipeFlop, 2020d.

- **Módulo Relé:** o módulo relé escolhido para ativar a válvula solenoide tem uma tensão de operação de 5V, ou seja, a mesma tensão fornecida pela placa Arduino UNO, e tem o intuito de converter o sinal transmitido pelo processador para corrente elétrica para a válvula solenoide. Por só precisar de 1 canal, foi escolhido um modelo mais simples de 5V 1 Canal.

Figura 19 – Módulo Relé 5V 1 Canal



Fonte: FilipeFlop, 2020a.

- **Sensor de fluxo de água – Saier SEM-HZ21WA:** esse sensor foi utilizado para medir a vazão e como consequência medir o volume de água liberado. O sensor se baseia no efeito Hall e um rotor interno, que a medida que a água passa gera um pulso proporcional à velocidade do rotor permitindo a obtenção de dado por uma entrada digital conectada a placa Arduino. Esse modelo de sensor tem uma precisão estimada de 10% e trabalha numa faixa de fluxo de 1 a 30 l/min (RECICOMP, 2020b).

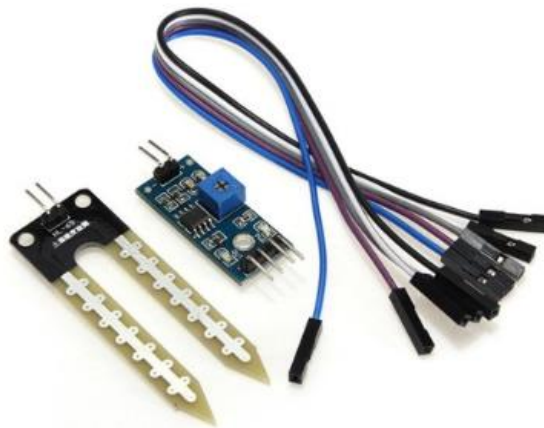
Figura 20 – Sensor de Fluxo de Água Saier SEM-HZ21WA



Fonte: Recicomp, 2020b.

- **Sensor de umidade do solo – YL-69:** o sensor YL-69 foi utilizado para detectar a umidade do solo do vaso de forma a avaliar a necessidade de correção de  $K_c$  como descrito na Figura 13. O sensor tem sua saída analógica (A0) conectada a placa Arduino e fornece uma conversão de tensão lida para um valor entre 0 e 1023, sendo o menor equivalente a água e o maior ao ar. Para seu uso, é necessário calibrar o sensor, já que o mesmo é influenciado pela composição do solo ou substrato utilizado.

Figura 21 – Sensor de Umidade do Solo YL-69



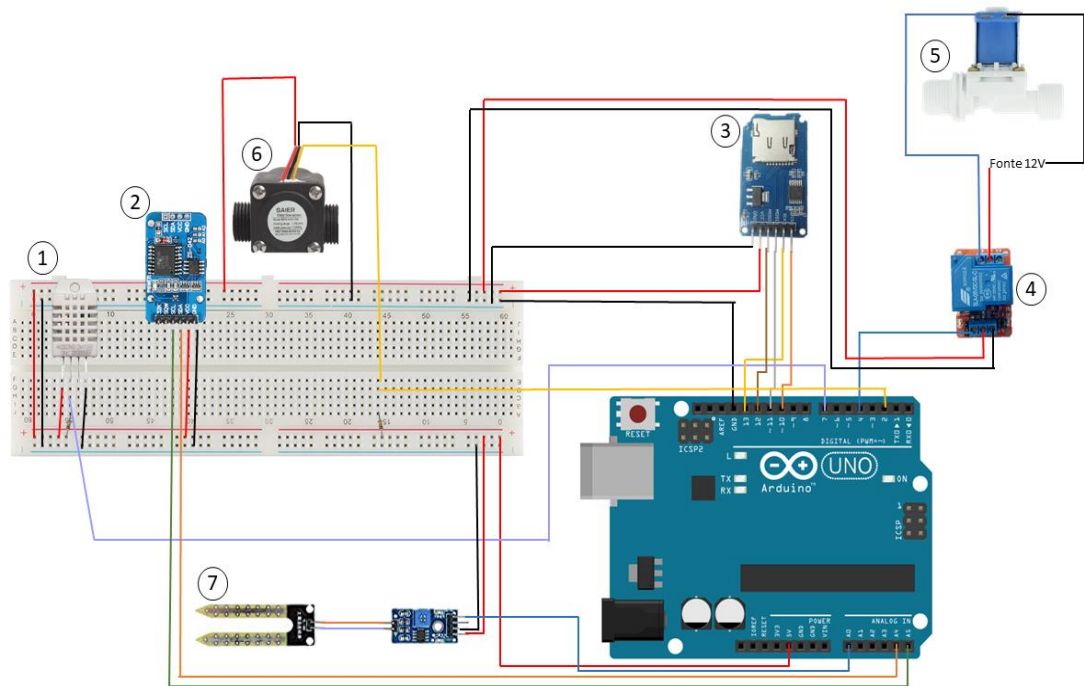
Fonte: Recicomp, 2020c.

#### 4.3.2 Montagem do circuito

O circuito montado para o sistema de irrigação está ilustrado na Figura 22, fora de escala, foi mostrado para melhor entendimento das ligações dos componentes utilizados e portas utilizadas. Uma observação de montagem é que foram utilizadas duas fontes chaveadas com plug P4, sendo uma delas 9V para manter o Arduino ligado durante todo os testes e outra 12V para uso exclusivo da válvula solenoide.

Para melhor leitura de sinal do DHT22 e do sensor de vazão, foram utilizadas duas resistências de 10 k $\Omega$  como *pull-up* para garantir que sempre seja lido o sinal e torne as medidas mais estáveis, o que provoca menos erros de leitura. Uma observação que em caso de falta de energia, mesmo com a bateria utilizada para o módulo RTC, o sistema não deve funcionar normalmente, já que também precisa de energia para ativar a válvula solenoide.

Figura 22 – Representação do circuito eletrônico do protótipo



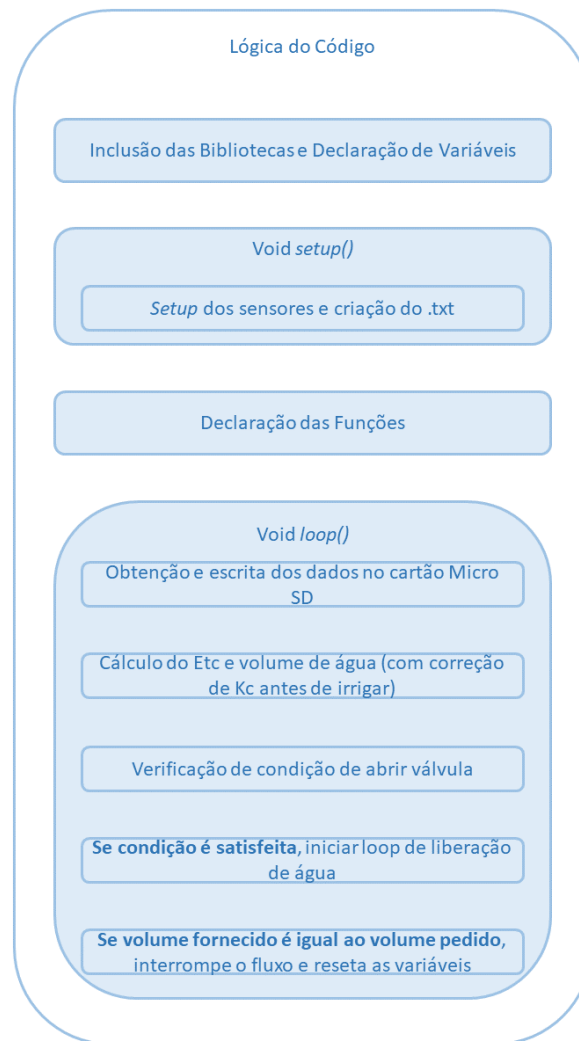
- ① Sensor de temperatura - DHT 22
- ② Real Time Clock RTC DS3231
- ③ Módulo Cartão Micro SD
- ④ Módulo Relé 5V
- ⑤ Válvula Solenoide 12V
- ⑥ Sensor de fluxo - SEM-HZ21WA
- ⑦ Sensor de umidade do solo - YL-69

Fonte: A Autora, 2020.

#### 4.3.3 Lógica da programação

Para melhor compreensão, foi criado o diagrama apresentado na Figura 23 que engloba todas as etapas do código desenvolvido na IDE do Arduino. Um fator crucial na hora do desenvolvimento do algoritmo foi a preocupação com a memória ocupada, pela limitação da placa selecionada Arduino UNO. Para poupar o processamento, foram utilizadas funções, que auxiliam a economizar linhas de código, a exemplo de funções para escrita no cartão SD que executa também o tratamento de dados e funções menores para efetuar cada um dos cálculos necessários.

Figura 23 – Esquema de lógica do código utilizado para controle e atuação da irrigação



Fonte: A Autora, 2020.

O programa escrito no *void loop()*, como explicado na Figura 13, tem o intuito de obter as temperaturas médias, mínimas e máximas ao longo do dia para o cálculo da ETc. Com a lâmina de água equivalente calculada, é encontrado o volume necessário que é depositado em um reservatório no horário desejado. Esse reservatório tem um gotejador acoplado que deposita gotas de água ao longo do dia na proximidade da raiz da planta.

Uma correção do Kc é calculada antes do cálculo do volume de água com base na umidade real do solo em relação a capacidade de campo previamente determinada. Então é feita, por meio de um *if*, uma avaliação se o horário atual corresponde à 00h para ativar um sinal de ligado no relé e permitir o fluxo de água pela válvula solenoide. Com esse sinal de ligado positivo o programa entra em uma estrutura de

repetição *do...while* em que mede o volume liberado enquanto esse volume for menor que o volume calculado pela ETc. Quando o volume liberado for maior ou igual ao volume calculado, o sinal ligado torna negativo e o sistema zera as variáveis e continua obtendo dados de temperatura para a irrigação do dia seguinte.

#### 4.4 TESTES DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO

Foram realizados alguns testes no protótipo eletrônico desde a verificação da montagem do circuito até o funcionamento do sistema como todo. Para verificar se o algoritmo foi implementado corretamente do ponto de vista lógico, calibragem e se os sensores apresentaram o comportamento esperado foram realizados os testes descritos a seguir.

##### 4.4.1 Testes do sistema de obtenção de temperatura

Foram realizados os seguintes testes: verificação do circuito e código básico; obtenção de dados; tratamento dos dados e armazenamento dos dados.

Os primeiros testes físicos realizados no presente trabalho foram relacionados a obtenção e tratamento dos dados de temperatura provenientes do sensor DHT 22. Para isso, foi desenvolvido um circuito eletrônico com parte do algoritmo principal de forma a identificar a presença de erros relacionados à leitura da temperatura. Apesar desse sistema ser apenas uma parte do protótipo eletrônico, ele é crucial para toda a atuação do sistema de irrigação, pois se os dados forem tratados de forma incorreta, todo o cálculo da ETc seria comprometido.

Inicialmente, foi verificada a existência de sinal entre o Arduino UNO e sensor, posteriormente checkou-se se o circuito foi montado corretamente. Com estes pontos checkados, foi feito um teste de obtenção e armazenamento de dados, de 1 em 1 minuto durante 2h, com checagem pelo monitor *serial* disponível na IDE do Arduino e verificação dos dados salvos no cartão de memória do tipo Micro SD utilizado posteriormente. Para poder comparar os dados obtidos na IDE e no cartão Micro SD, foi utilizado o Excel para tratar os dados obtidos, de forma a confirmar os cálculos feitos pelo Arduino estavam coerentes.

Também foram realizados testes com diferentes períodos de armazenamento de dados, já que o código foi desenvolvido para armazenar todos os dados diretamente no cartão Micro SD e não haveria uso de memória dinâmica adicional do Arduino. Dentre esses períodos foram realizados testes considerando: um período total de 3h de experimento com armazenamento de dados de 30 em 30s; uma duração de 2h de experimento com armazenamento de dados de 10 em 10s; uma duração de 2h com armazenamento de dados de 5 em 5 minutos; e, por último, um teste com 12h de duração e armazenamento de dados de 20 em 20s. Ao verificar que o sistema estava consistente e coerente, além de não haver falhas nos cálculos de temperatura média, máxima e mínima nos períodos estudados, foi possível seguir para o sistema de ativar a válvula e medir fluxo de água.

#### 4.4.2 Testes da válvula e medição de fluxo

Foram realizados os seguintes testes: verificação do circuito, do código básico, do funcionamento dos dispositivos, da variação do fluxo e da melhor disposição entre válvula solenoide e medidor de fluxo. Também foram testados o tempo de reação da válvula solenoide, a vazão do fluxo de alimentação de água para o reservatório, o cálculo da ETo e o fornecimento do volume desejada de água.

Para validar o fornecimento de água para o sistema de irrigação, é necessário testar as três principais partes do sistema relacionado: o relé, a válvula solenoide e o medidor de fluxo. Para isso, foram realizados testes em série para verificar o funcionamento dos dispositivos de forma gradual, sendo adotado primeiro uma validação do relé, em seguida do relé com a válvula e por fim dos três dispositivos simultaneamente, como descrito a seguir.

- **Teste com o relé:** para testar o relé, foi utilizado um botão que serviu de condição para ativar o sinal do relé e então a energia. Com esse teste e conexões corretas, prosseguiu para conectar a válvula solenoide ao relé;
- **Teste com a válvula solenoide:** para verificar se a válvula solenoide estava fornecendo a água quando desejado foi realizada a ligação do sinal disponibilizado pelo relé com o *ground* de uma fonte de 12V adaptada. Em seguida, foi escrito um código que deixasse a válvula aberta

por um determinado tempo quando o botão fosse ativado. Com esse teste bem sucedido, foi possível incluir o sensor de fluxo no circuito;

- **Teste com o sensor de fluxo:** para verificar se o sensor Saier SEM-HZ21WA foi conectado e adicionado no programa de forma correta, foi feita a conexão por meio de um chicote de 1/2" entre a válvula e o sensor de fluxo na posição horizontal inicialmente. Para poder verificar a melhor posição foram feitos testes com o sensor de fluxo medindo o volume antes da válvula solenoide e em posição vertical também, com intuito de diminuir o efeito de um regime turbulento provocado pela válvula e retenção de água nos chicotes.

#### 4.4.3 Testes com armazenamento de água e vazão do gotejador

Com os resultados da verificação do volume disponível de água para o reservatório seguindo o calculado pela ETo referente aos dados de temperatura do Recife no ano de 2019 disponibilizados pelo INMET descrito na seção 4.2, foi possível avaliar as maiores lâminas de água calculadas pelo método de Hargreaves-Samani ao longo do ano. Além do estudo das maiores ETos do ano de 2019, foi analisada a situação de áreas de vasos para estimar o volume para as maiores ETos com intuito de encontrar o volume máximo necessário para um reservatório.

A partir daí, foi possível ter uma estimativa do volume mínimo necessário para o reservatório do protótipo final, podendo ser prototipada utilizando impressão 3D de forma correta e auxiliar na escolha do reservatório para testes.

A partir do teste de armazenamento, também foi possível estudar com mais detalhes o uso do gotejador propriamente dito, de forma a ajustá-lo para proporcionar uma vazão adequada para a planta e irrigá-la por um tempo mais longo, evitando a evaporação da água disposta por muito tempo no solo. Para isso, foi testado mais de um gotejador de forma a regular para a posição ideal de abertura e determinou-se experimentalmente qual foi a melhor vazão encontrada com auxílio de uma balança digital Wincy e um cronômetro digital.

#### 4.4.4 Testes referentes a umidade do solo e capacidade de campo

Foram realizadas medições do solo a ser trabalhado de forma a determinar uma faixa ideal de umidade, definindo então a umidade do solo em sua capacidade de pote, e foram realizados testes de calibração do higrômetro para o substrato utilizado em função da necessidade de calibração de cada tipo de solo (JIMÉNEZ, 2018).

Para encontrar a capacidade de pote do vaso com substrato, o vaso foi irrigado subsuperficialmente até a saturação, e em seguida colocado para drenar livremente através dos seus orifícios de drenagem até a completa drenagem gravitacional, sendo este ponto considerado como capacidade de pote, e determinada a umidade relativa utilizando o sensor YL-69. Sua umidade em termos percentuais de massa foi determinada por secagem em forno doméstico até peso constante.

Paralelamente, amostras do mesmo substrato foram umedecidas até a plena saturação com quantidades conhecidas de água e incrementos de 25 ml, sendo determinada a leitura utilizando o sensor YL-69 de umidade de solo até leitura constante. Com as umidades em base massa foi realizada regressão linear entre leitura no sensor e umidade para encontrar uma equação que convertesse a leitura analógica do sensor em dados de umidade relativa para o substrato comercial utilizado, conforme necessidade de calibração indicada por (JIMÉNEZ, 2018).

Com a curva de calibração do sensor YL-69 encontrada e a umidade relativa do solo quando o mesmo se encontra na capacidade de pote, pode-se desenvolver a função de correção de  $K_c$ . Como mencionado anteriormente na seção 4.3, o  $K_c$  vai ser corrigido para o ciclo de irrigação baseada na umidade do solo antes do momento da irrigação, pois é considerado que no primeiro dia a planta estará em sua faixa de umidade ideal. Se a umidade estiver acima da umidade encontrada na capacidade de pote, considerando inicialmente uma margem igual de 2%, o  $K_c$  deve ser reduzido em 5% com intuito de corrigir o valor encontrado em outro estudo e diminuir o volume de água fornecido, caso a umidade esteja abaixo da aceitável, considerando a mesma margem de 2%, o valor de  $K_c$  será aumentado em 5% com intuito de disponibilizar mais água. Para verificar se a correção do  $K_c$  estava sendo feita de forma adequada, foi feito um teste, ainda sem a planta, com o sensor em um substrato muito úmido e um muito seco para avaliar a correção para ambas as margens, que foi positivo.

#### 4.4.5 Testes com a planta

Com todos os testes positivos, foi iniciado o teste com uma gérbera que foi adquirida em estágio de pleno florescimento por três dias. Nesse teste o sistema inteiro foi acoplado e teve como objetivo verificar se o protótipo eletrônico disponibilizou água na quantidade calculada pelo modelo e verificar o estado de saúde da planta por meio de pesagens diárias. Também se estudou indiretamente se o  $K_c$  utilizado foi correto e se a correção foi realizada de forma eficaz ou se seria melhor modificar as margens de umidade do solo.

Antes do início do experimento, o sistema vaso-planta foi saturado subsuperficialmente até a saturação, e em seguida colocado para drenar livremente através dos seus orifícios de drenagem até a completa drenagem gravitacional, com intuito de atingir sua capacidade de pote. Com isso, deu-se início ao experimento em si depois de 1 dia de coleta de dados de temperatura com irrigação programada para às 00h em um ambiente arejado e com fonte de luz solar, porém fechado para não permitir interferência externa, tais como chuva ou animais, simulando uma varanda ou ambiente interno de uma casa bem iluminado. Antes da irrigação de cada um dos dias, o sistema vaso-planta-sensor de umidade foi pesado por uma balança digital da marca Wincy com capacidade de 10kg e precisão de 1g para avaliar se o sistema estava ganhando ou perdendo massa, indicando um possível excesso ou falta de água na irrigação, podendo ser um erro do próprio modelo ou do  $K_c$  encontrado.

Para manter como controle e verificar se os volumes calculados pelo modelo estavam razoáveis, foi colocada no mesmo ambiente uma segunda gérbera que também estava em estágio de pleno florescimento para ser irrigada de forma manual baseado na água perdida ao longo do dia. O cálculo da água perdida foi realizado com auxílio da mesma balança digital usada para o experimento do dispositivo, em que o sistema vaso-planta foi pesado em sua capacidade de campo e pesado nos dias seguintes com intuito de definir a quantidade de água perdida considerando que a planta não aumenta de massa. Esse volume foi encontrado pela diferença do peso medido entre os dias e então foi depositado de forma homogênea nas proximidades da raiz.

#### 4.5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO FINAL

Após verificar que o protótipo eletrônico funcionou de forma adequada e realizar os testes com a gérbera, avaliou-se como o produto poderia ser disponibilizado para um cliente, considerando um vaso ornamental com uma gérbera. Para isso, foi prototipado um modelo que englobasse o circuito e seus sensores, de forma a protegê-los da água e ficar mais agradável visualmente. Para desenvolver o modelo 3D, foi utilizado o *software* de modelagem 3D gratuito DesignSpark, que é similar ao SpaceClaim do ANSYS, por ser estudado ao longo do curso e apresentar todas as ferramentas necessárias. Para a impressão foi utilizada a técnica de impressão 3D FDM com uma impressora do modelo Standard da CNC Brasil e o material escolhido foi o PLA, por ser facilmente encontrado e o protótipo não exigir boa resistência mecânica.

O modelo então teve o intuito de proteger todo o circuito, que para um produto final utilizaria uma PCB, placa de circuito impressa, no local de um Arduino. Com todo o circuito protegido, seria mais simples para o cliente utilizar e evitaria erros de montagem. Para o reservatório, foi decidido que poderia ser adaptável, de forma que o cliente poderia aproveitar uma garrafa PET de sua residência para o sistema, reutilizando-a de forma eficiente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão mostrados os resultados encontrados ao longo deste trabalho, bem como discutidos alguns detalhes cruciais sobre o comportamento do sistema diante os dados obtidos.

### 5.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NA PLATAFORMA DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA

Para realizar a implementação do modelo na plataforma de prototipagem eletrônica, foi necessário inicialmente tratar os dados fornecidos pelo INMET com auxílio do Microsoft Excel, já que esses cálculos exigiam muito da memória do Arduino UNO. Com isso, foi avaliada a planilha do INMET com os registros horários climáticos horários referentes ao Recife e foram calculadas as temperaturas médias, máximas e mínimas de todos os dias de 2019 utilizando o Excel. Também foi adicionada na mesma planilha o valor referente a radiação solar de acordo com o mês e a latitude do Recife que é de aproximadamente  $-8^\circ$  obtida a partir do trabalho de Camargo (1962). Vale ressaltar que aparentemente houve problemas na obtenção de dados pelo INMET e que em alguns horários não havia dados disponíveis em relação a temperaturas máximas e mínimas, por isso foi criado uma variável auxiliar para desconsiderar esses horários de forma a não utilizar de forma incorreta esses dados.

Com as informações devidamente selecionadas, foi definida uma matriz com os dados no *void setup()* do código no Arduino com 365 linhas e 6 colunas, referentes a dia, mês, radiação solar convertida em mm, temperaturas média, máxima e mínima. Em seguida, foi definido um laço responsável por calcular os valores de ETo para cada linha da matriz T definida anteriormente. Também foi inserido dentro do laço, um comando para imprimir o valor calculado no monitor *serial* da IDE.

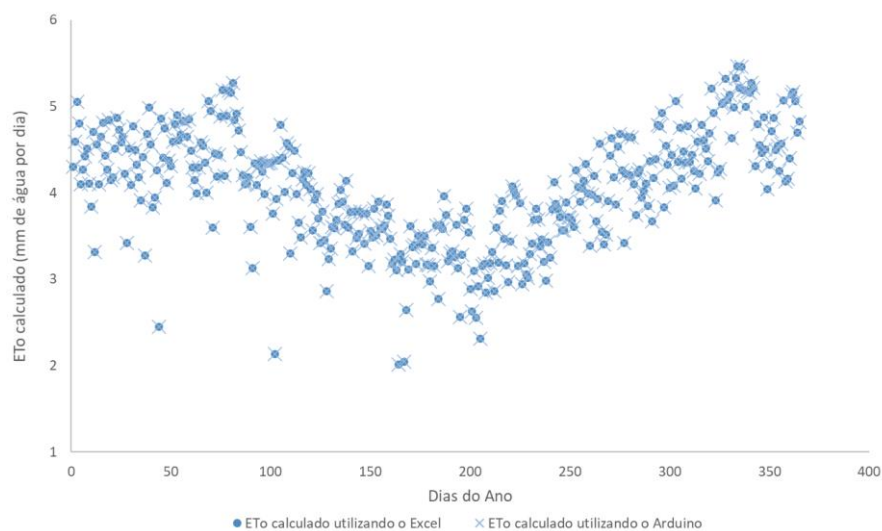
No entanto, foi observado que o Arduino estava calculando os valores, mas no momento de mostrar para o usuário no *serial monitor* havia problemas relacionados ao uso de memória. Por isso, foi definida uma variável auxiliar chamada *sizeT* para encontrar, por meio de métodos de tentativa e erro, quantos dados o Arduino UNO conseguiria processar e mostrar ao usuário o resultado calculado de ETo. Dessa forma foi *sizeT* foi definida como 30 para varrer o período de um mês sem sobrecarregar a memória do Arduino UNO.

## 5.2 COMPARAÇÃO DOS DADOS CALCULADOS COM O MODELO DE EVAPO-TRANSPIRAÇÃO

A partir da implementação dos dados fornecidos pelo INMET e do código no Arduino UNO explicada na seção 5.1, foi possível obter todos os valores calculados da ETo para o ano de 2019 em Recife do apresentados na

Figura 24. Esse gráfico indica a quantidade da lâmina d'água necessária para uma cultura de referência estimada utilizando o método de Hargreaves-Samani por meio do Excel e do Arduino. Com este gráfico é possível visualizar melhor a variação da necessidade hídrica ao longo do ano pela planta devido as alterações climáticas, presentes mesmo em uma cidade como Recife que não possui grandes diferenças de temperatura e umidade ao longo do ano.

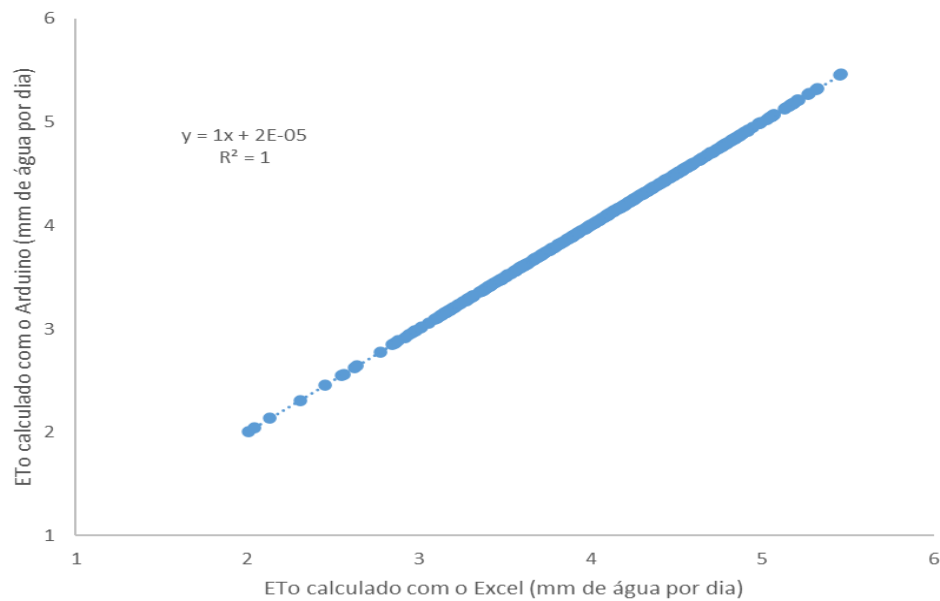
Figura 24 – Comportamento da ETo calculada ao longo do ano de 2019 na cidade do Recife pelo método de Hargreaves-Samani



Fonte: A Autora, 2020.

De forma a comprovar os cálculos realizados pelo Arduino, foi feita a comparação entre os dados calculados pelo Excel e pela plataforma de prototipagem eletrônica sendo encontrado um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito próximo a 1 (Figura 25).

Figura 25 – ETo calculado pelo Arduino vs. pelo Excel



Fonte: A Autora, 2020.

O valor encontrado para  $R^2$  variou apenas na nona casa decimal, o que comprova que o poder de cálculo do Arduino UNO é suficiente para a determinação da ETo e pode ser utilizada para esse fim sem perdas significativas de informações.

### 5.3 TESTES DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO

Nessa seção serão descritos os principais resultados encontrados ao longo dos testes realizados e descritos na metodologia.

#### 5.3.1 Testes do sistema de obtenção de temperatura

Inicialmente foi testado o circuito e código básico de funcionamento do DHT22. Porém foram encontrados com uma frequência alta problemas do tipo *nan* (do inglês, *not a number*) no momento de leitura da temperatura através da visualização no *serial monitor*, o que acarretou inicialmente em erros no cálculo de temperatura mínima, máxima e média. Por meio de diversas pesquisas em fóruns da comunidade do Arduino, foi visualizado que após uma atualização da biblioteca <DHT.h> a estabilidade do sensor foi comprometida, gerando uma quantidade razoável de erros. Após entender melhor a natureza do erro e a sintaxe da biblioteca, modificou-se a declaração de

*setup* do sensor, os erros foram mitigados, mas esporadicamente encontrados novamente.

Devido a presença de erros *nan* foi desenvolvido um sistema de condições nas funções responsáveis pelo tratamento dos dados de temperatura afim de não considerar esses valores para as contas. Essas condições foram desenvolvidas considerando que o sensor estaria obrigatoriamente entre 0°C e 100°C para ser levado em consideração e com isso valores obtidos do tipo *nan* não respeitariam essa condição. Dessa forma, foi contornada a situação de erro *nan* já que a presença desses valores não afetaria os cálculos de temperatura mínima, máxima e média.

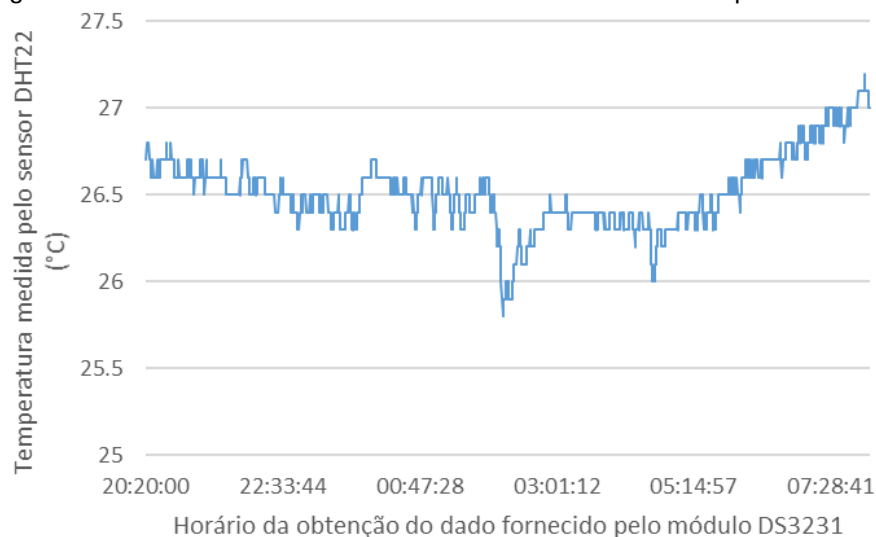
Após estas correções, foram testados o módulo RTC DS3231 e o módulo de cartão Micro SD em conjunto. Como esses módulos já são bem conhecidos, não ocorreram problemas na implementação nem na criação do código, com exceção de um problema de contato ocasional do *clock* que mostrava valores como 165/165/2165 e 0/0/2034 quando havia um momento de falta de sincronia entre o DS3231 e a placa Arduino UNO. Porém foi percebido a simples adição do módulo de cartão de memória aumentou muito o uso da memória dinâmica e estática pelo uso do processador ATmega328P, fato que foi correlacionado ao uso excessivo de memória das bibliotecas <SD.h> e <SPI.h> em diversos fóruns de Arduino. Por isso, a autora se preocupou em otimizar o código ao máximo de forma a evitar possíveis erros.

Também foi estudada a possibilidade de criar mais de um arquivo para escrever os dados separadamente, porém os testes mostraram que com uma placa Arduino UNO não era viável por causa da memória necessária para criar um arquivo. Além disso houve uma preocupação quanto à quantidade de informações que se tinha na linha do cartão micro SD, pois o arquivo criado no formato .txt foi preenchido como .csv. Esta escolha visou facilitar as análises por meio do Microsoft Excel e exigia muitas linhas de escrita por causa das vírgulas. Foi observado, então, que a partir de uma certa quantidade de informações em uma linha, ou seja um loop da função utilizada para escrever no cartão, o arquivo não era escrito no cartão Micro SD inviabilizando uma futura análise.

Pensando na presença de valores *nan* foi estudado o melhor tempo de obtenção de dados de temperatura, foram realizados testes com a frequência de 1 segundo, 10 segundos, 20 segundos, 30 segundos, 1 minuto e 5 minutos em períodos mais curtos. Foi observado nesses testes que o DHT22 não tem sensibilidade alta o suficiente para modificar a temperatura em intervalos menores do que 1 minuto.

Na Figura 26 estão apresentados os dados de temperatura escritos no cartão de memória ao longo de um teste de aproximadamente 12h de duração com tomada de dados de 20 em 20s. O arquivo .txt gravado ocupou 20KB enquanto o arquivo referente ao teste de 2h de duração com um período de tomada de dados de 10s ocupou 36KB devido a frequência maior de escrita no cartão Micro SD. Essa informação foi relevante quando se avalia que nesses testes só foram armazenadas informações referentes a data, horário, temperatura medida, mínima, máxima e média calculadas e que no sistema final ainda seriam armazenados dados de umidade do solo, fluxo médio, volume final, Kc, ETc e o volume calculado pela ETc. Por isso, buscou um período ideal para o funcionamento do sistema e uso adequado do cartão Micro SD.

Figura 26 – Leitura do sensor DHT22 em um teste de 12h com período de 20s



Fonte: A Autora, 2020.

Com esses testes, foi possível constatar que o uso de memória do microcontrolador ATmega328P não era afetado pela frequência apesar de não ter escrito no arquivo .txt no caso do período de 1s. De forma a evitar que houvesse muitos valores *nan* em sequência que influenciassem negativamente no cálculo, foi adotado um intervalo de 1 minuto entre tomada de dados.

### 5.3.2 Testes com o sinal de ativar a válvula e medição de fluxo

Foi inicialmente testado o funcionamento do relé a partir de um botão que manteve o sinal ativado por um período de 10s e com esse teste validado, foi realizado

teste com a válvula solenoide considerando o mesmo sistema de ativação do teste do relé, permitindo o fluxo de água durante 10s. No teste da válvula foi possível perceber que o tempo de reação era rápido o suficiente para não haver nenhuma falha de cálculo.

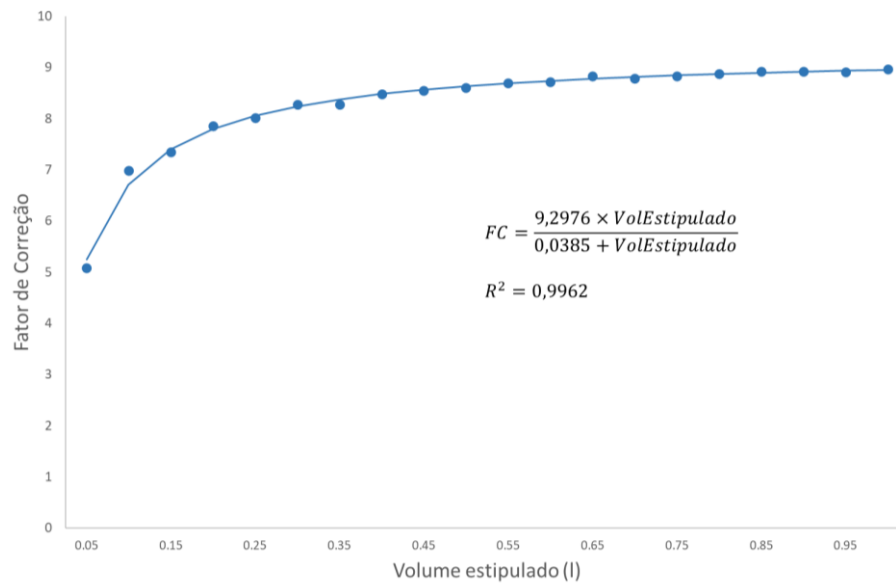
Em seguida foram iniciados os testes com o sensor de fluxo SEM-HZ21WA e foi possível perceber que o fluxo era variável e estava com valores muito acima dos esperados, mas como o código foi baseado no volume fornecido pela válvula não foram necessárias modificações na lógica do programa. Para corrigir os erros de leitura, foi desenvolvido um fator de correção (FC) da leitura do fluxo pelo ATmega328P comparando o resultado lido pelo sensor e a vazão real média baseada no volume disponibilizado para um recipiente de teste e no tempo fornecido pelo *clock* interno da placa Arduino.

Para estimar a curva de fator de correção foi primeiro estimada para os sensores dispostos na direção horizontal na ordem mostrada na Figura 11, sendo os pontos os melhores valores de FC encontrados e a linha a equação encontrada por meio de regressão. Para encontrar a vazão média real, foi utilizado um recipiente de teste para receber a água fornecida pelo sistema, pesado com auxílio de uma balança digital e definido o tempo de liberação de água a partir do cronômetro interno da placa Arduino UNO.

Para poder encontrar essa curva, foram encontrados de forma interativa valores ideais de FC para incrementos de volume de 50ml começando a partir de 50ml de água até 1l. Para isso, foi inicialmente utilizado um fator de 5 quando o volume fosse 50ml e era escolhido um valor ideal de FC para cada um dos volumes analisados considerando uma faixa de erro de menos de 2% na variável de correção. Essa variável de correção era multiplicada pelo FC do teste de forma a convergir para obter o menor erro possível entre o volume calculado pelo Arduino e o volume real disponibilizado.

Inicialmente foi utilizado o *software* Microsoft Excel para encontrar a melhor curva utilizando a função de tendência, mas nenhuma das curvas disponíveis no programa apresentou um  $R^2$  acima de 0,95. Por isso, foi utilizado o *software* estatístico SAS para encontrar os coeficientes de uma equação hiperbólica de forma interativa (Figura 27) e apresentou um  $R^2$  de 0,9962 provando ser uma curva que representa muito bem o sistema.

Figura 27 – Curva de Fator de Correção para a posição horizontal do sistema



Fonte: A Autora, 2020.

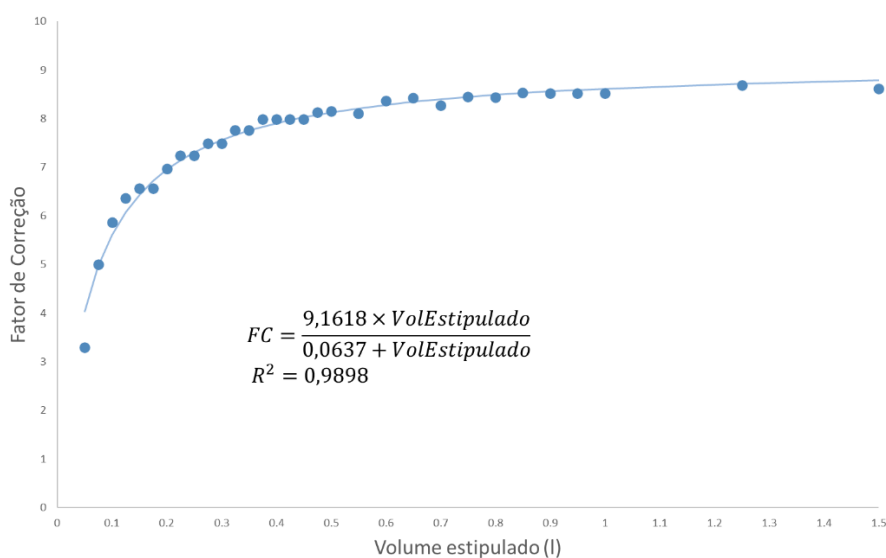
Porém foi percebido que na posição horizontal havia um acúmulo de água que ficava preso no chicote após o sensor de fluxo e no momento que o recipiente de referência era retirado para pesar esse volume de água era desperdiçado. De forma a evitar essa imprecisão, o sistema foi modificado dispondo o sensor de fluxo antes da válvula solenoide na posição vertical. Foi escolhido que o sensor de fluxo ficasse antes da válvula porque a condição de desligamento da válvula solenoide era o fluxo que passou pelo sensor. Dessa forma, com o sensor de fluxo antes, poderia ser enviado o sinal e fechar a solenoide evitando que fosse disponibilizada mais água do que o pedido.

Ao testar a curva de FC calculada para a posição horizontal no sistema na vertical percebeu-se que a mesma curva não poderia ser usada pois fornecia valores discrepantes de volume. Por isso, foi adotada a mesma metodologia do que a adotada com o outro cálculo de FC, porém com menores intervalos de volume. Quando o volume pedido estava entre 50 ml e 500 ml foi adotado um intervalo de 25ml para encontrar uma curva que representasse melhor o sistema, entre 500 ml e 1l foram adotados intervalos de 50 ml e para a faixa de volume entre 1l e 1,5l foi adotado um intervalo de 250ml.

Adotando o mesmo procedimento de cálculo utilizado para encontrar a outra curva de FC, foi utilizado o SAS para os pontos ótimos de FC mostrados na Figura 28.

A respeito da escolha do FC ideal para realizar a regressão foi levada em consideração o desvio percentual do volume fornecido em relação ao volume estipulado menor que 5%, além da condição anterior de fator de correção com menos de 2% de erro. Apesar da curva encontrada ter um fator de  $R^2$  menor (0,9898) do que a primeira curva (0,9962), essa se tornou bem mais estável e confiável.

Figura 28 – Curva de Fator de Correção para a posição vertical do sistema



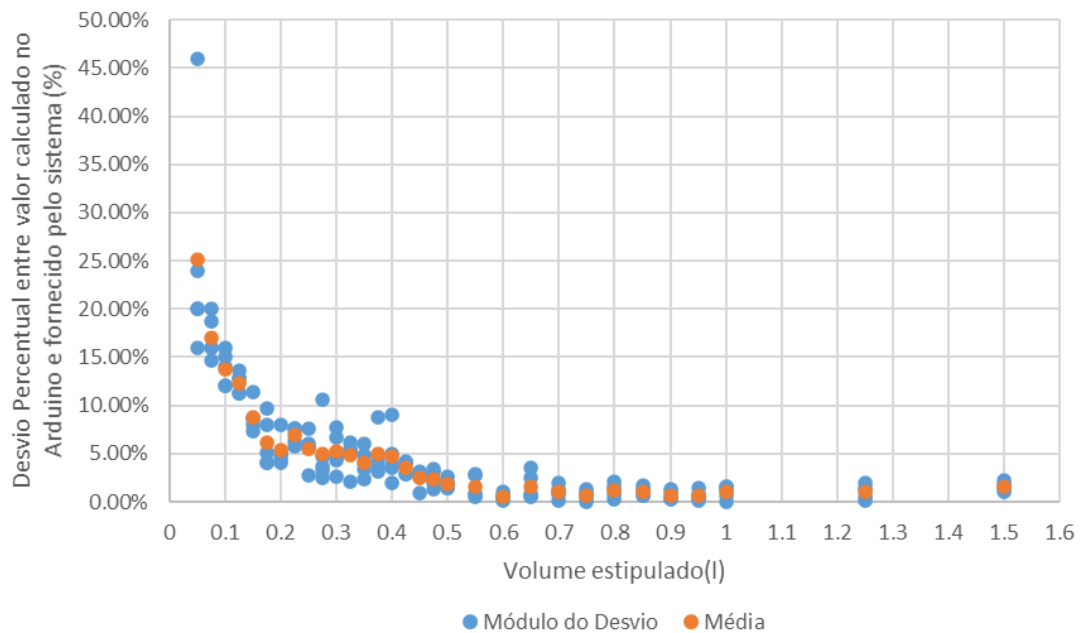
Fonte: A Autora, 2020.

Para poder avaliar a confiabilidade do sistema e da curva do fator de correção definida, foi realizado um teste de confiabilidade do volume disponibilizado em relação ao volume calculado e estipulado pelo código. Para realizar essa curva, foram tomadas 5 medidas de cada um dos volumes utilizados para o cálculo do FC e foram calculados 3 módulos de desvios percentuais: valor calculado no Arduino e valor fornecido pelo sistema (Figura 29); valor calculado pelo Arduino e valor estipulado (Figura 30); e, por fim, valor fornecido pelo sistema e valor estipulado (Figura 31). De forma a facilitar a visualização, foram traçadas no mesmo gráfico o valor médio de desvio para cada volume na cor laranja.

Na Figura 29 encontra-se relacionado o desvio entre o valor calculado pelo sensor de fluxo e o volume real fornecido pelo sistema, sendo essencial para verificar se os volumes reais são menores ou maiores do que os calculados pelo sensor. Com a curva utilizada para o FC, foi possível perceber que a partir de 500 ml o sistema começa a fornecer mais água do que o calculado pelo Arduino, mas com uma faixa

de confiabilidade melhor do que 2%. Já para volumes entre 50 ml e 200 ml o sistema se mostrou não muito confiável quanto a esse desvio, variando de 25% a 5%. Portanto foi avaliado que o melhor comportamento do sistema ocorre para valores acima de 200 ml.

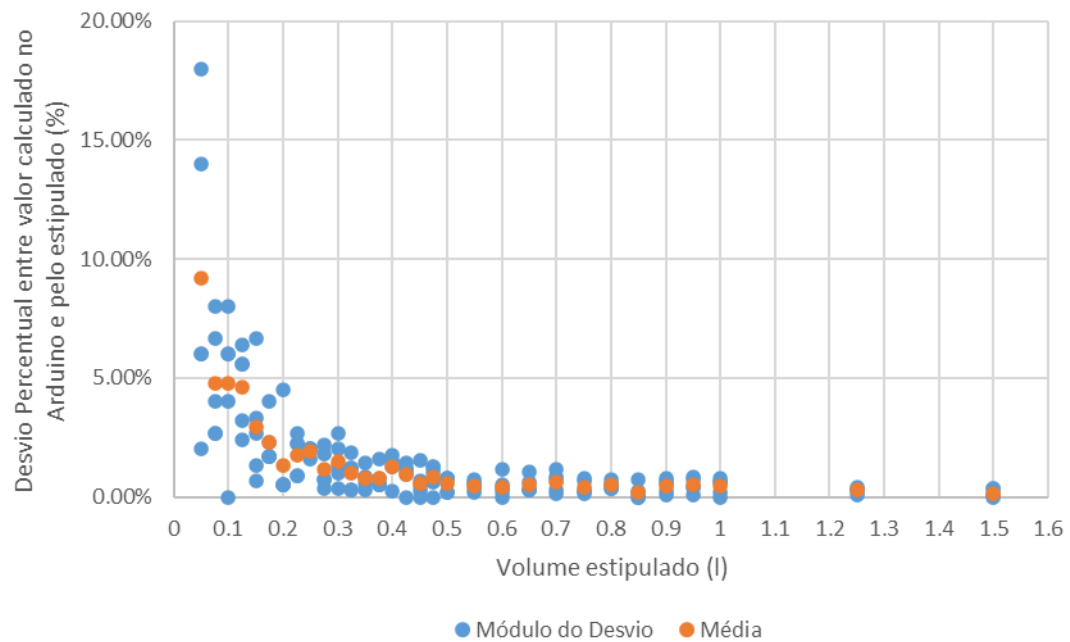
Figura 29 – Desvio entre o valor calculado pelo Arduino e fornecido pelo sistema de acordo com o volume estipulado



Fonte: A Autora, 2020.

Em relação ao desvio entre o calculado pelo Arduino e o volume estipulado, mostrado na Figura 30, pode-se garantir que o desvio foi menor do que 10% em toda a faixa de estudo e a partir de um volume de 75 ml o desvio já era inferior a 5%. Isso indica que o Arduino está conseguindo emitir o sinal de parada logo depois que identifica o volume estipulado, como rege o laço *do...while* escrito no código, só resultando em pequenos erros já que o fluxo não é constante e ao contrário de outros sensores da categoria, esse sensor não apresenta pulso com volume constante, provavelmente devido a uma vedação ineficiente ou parâmetros de fabricação diferentes.

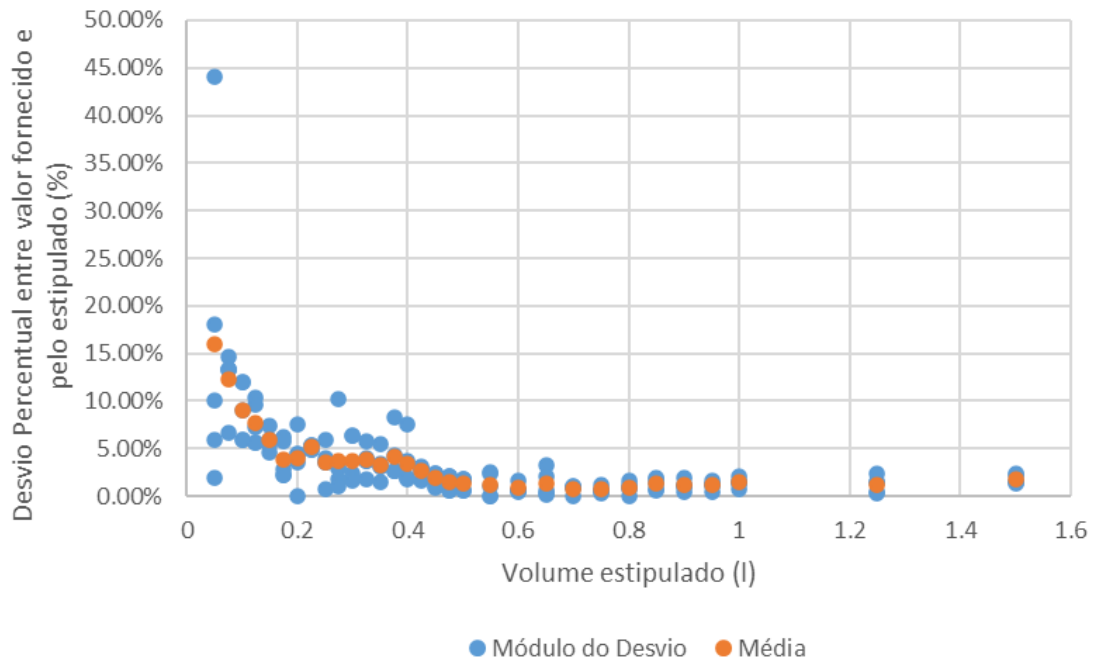
Figura 30 – Desvio entre o valor calculado pelo Arduino e volume estipulado de acordo com o volume estipulado



Fonte: A Autora, 2020.

Por fim, na Figura 31 encontra-se apresentado o principal fator a ser estudado, que é o desvio entre o volume fornecido e o volume estipulado pelo programa. Dessa forma, é possível observar que valores abaixo de 100 ml apresentam uma faixa de erro médio maior do que 10% e valores acima de 200 ml apresentam uma faixa equivalente a 5%. Isso significa que o sistema fornece os valores de até menos que 5% do volume estipulado para volumes de 200 ml ou superiores. Vale ressaltar que para volumes acima de 400 ml, é possível visualizar uma estabilidade do erro em menos de 1%.

Figura 31 – Desvio entre o valor fornecido pelo sistema e estipulado de acordo com o volume estipulado



Fonte: A Autora, 2020.

### 5.3.3 Testes com armazenamento de água e vazão do gotejador

Para poder escolher o volume mínimo do recipiente a ser utilizado e posteriormente prototipado, foi considerado a maior ETo calculada na seção 5.2 equivalente a 5,4622 mm de água por dia, o que equivaleria a um volume de aproximadamente 165 ml, considerando vasos comerciais médios, com diâmetros de 17cm, e para a cultura da gérbera em pleno florescimento. Visando criar uma situação em que englobasse plantas com um Kc maior, ou ambientes com maior demanda hídrica, foi selecionado um volume mínimo de 500 ml de armazenamento, possibilitando também o uso de vasos com maior área sem problemas. A fim de realizar os experimentos então foi adotada uma garrafa de 500 ml com sua tampa adaptada com um gotejador.

O gotejador utilizado no projeto foi um gotejador simples do fabricante IRRIJET com vazão ajustável de 0 a 40 l/h para poder fornecer água nas proximidades da raiz da planta ao longo do maior período possível.

Figura 32 – Gotejador com vazão ajustável



Fonte: biosementes, 2020.

A fim de escolher qual posição do gotejador seria utilizada e disponibilizaria uma vazão adequada para planta, foram realizados 3 testes para encontrar uma vazão média do gotejador considerando um volume fixo de 100 ml. Os resultados desses testes estão descritos na Tabela 3, sendo escolhido então a posição 3 por disponibilizar a menor vazão, sendo equivalente ao gotejador praticamente fechado. Em relação a especificação do gotejador, foi percebido que no momento da montagem do gotejador na tampa, o seu sistema de trava deve ter sido comprometido, o que não permitiu um ajuste fino da vazão.

Tabela 3 – Posição do gotejador em relação a vazão

| Posição | Tempo (min) | Vazão (l/min) |
|---------|-------------|---------------|
| 1       | 10          | 0.010         |
| 2       | 9.5         | 0.011         |
| 3       | 34          | 0.003         |

Fonte: A Autora, 2020.

#### 5.3.4 Testes referentes a umidade do solo e capacidade de campo

Com a finalidade de determinar capacidade de pote do vaso com substrato, o vaso foi irrigado subsuperficialmente até a saturação por 4 horas como mostrado na Figura 33. Para determinar o ponto de saturação do substrato, foi observada uma formação de uma lâmina d'água superficial indicando que já havia ocorrido o máximo de absorção de água para aquele vaso. Após a saturação, o vaso de teste foi colocado para drenar livremente através dos seus orifícios de drenagem até a aparente completa drenagem gravitacional durante 4h e foi feita uma leitura com auxílio do sensor

YL-69 de 390 após o equilíbrio, levando em consideração que o 0 teórico do sensor equivale a água e o 1023 ao ar.

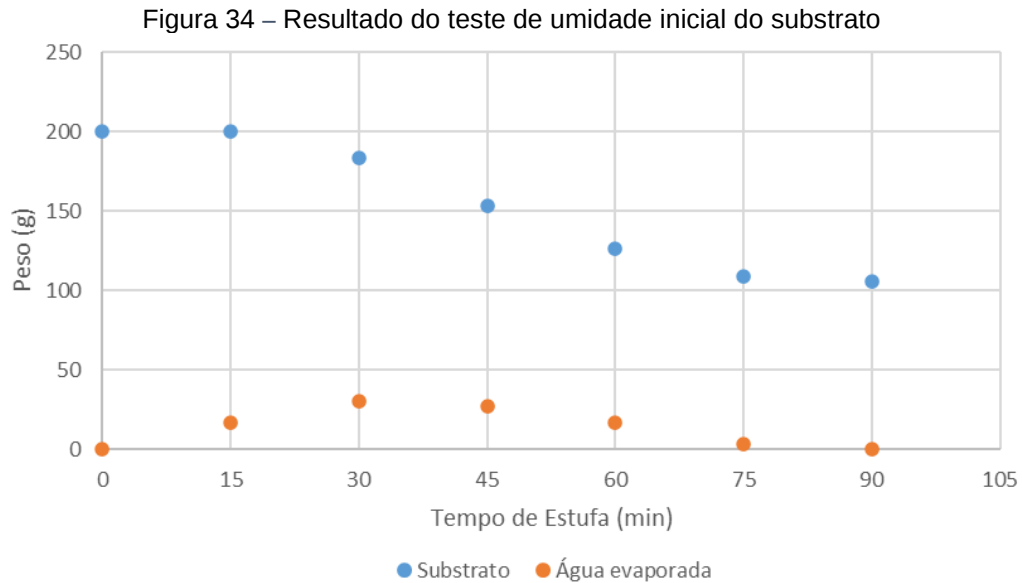
Figura 33 – Vaso com substrato irrigado subsuperficialmente até a saturação



Fonte: A Autora, 2020.

Para poder realizar a calibração do sensor YL-69 foi necessário obter dados reais de umidade em termos percentuais de massa para confrontar com os valores fornecidos pela função *analog.read()* do sensor. Devido a pandemia provocada pelo Covid-19, não foi possível utilizar os equipamentos adequados para essa determinação como estufas com temperatura controlada e balanças de precisão disponíveis nos laboratórios da UFPE ou UFRPE. Por isso foi utilizado um forno doméstico para aquecer a uma temperatura de 180°C uma amostra de 200g de substrato até atingir o peso constante.

De forma a avaliar a quantidade de água evaporada e o tempo em que o substrato manteria um peso constante foram adotados intervalos uniformes de 15 minutos com pesagem da amostra. Com esse teste, foi possível perceber que nos 30 primeiros minutos a quantidade de água perdida foi maior e que o substrato fica constante após 75 minutos de teste (Figura 34). Como resultado, observou-se que a umidade relativa do substrato utilizado foi de 47% em massa e em relação ao cálculo da capacidade de pote, foi verificada uma umidade de 62,88% em massa.



Fonte: A Autora, 2020.

Paralelamente foi adotado outro sistema com 300g de substrato e adicionou-se 25 ml de água de forma incremental até a observação da saturação do solo. A cada iteração era avaliado o valor fornecido pela função *analog.read()* quando o mesmo se tornava estável. Dessa forma foi realizado o teste até uma adição de 175 ml de água, como mostrado na Tabela 4.

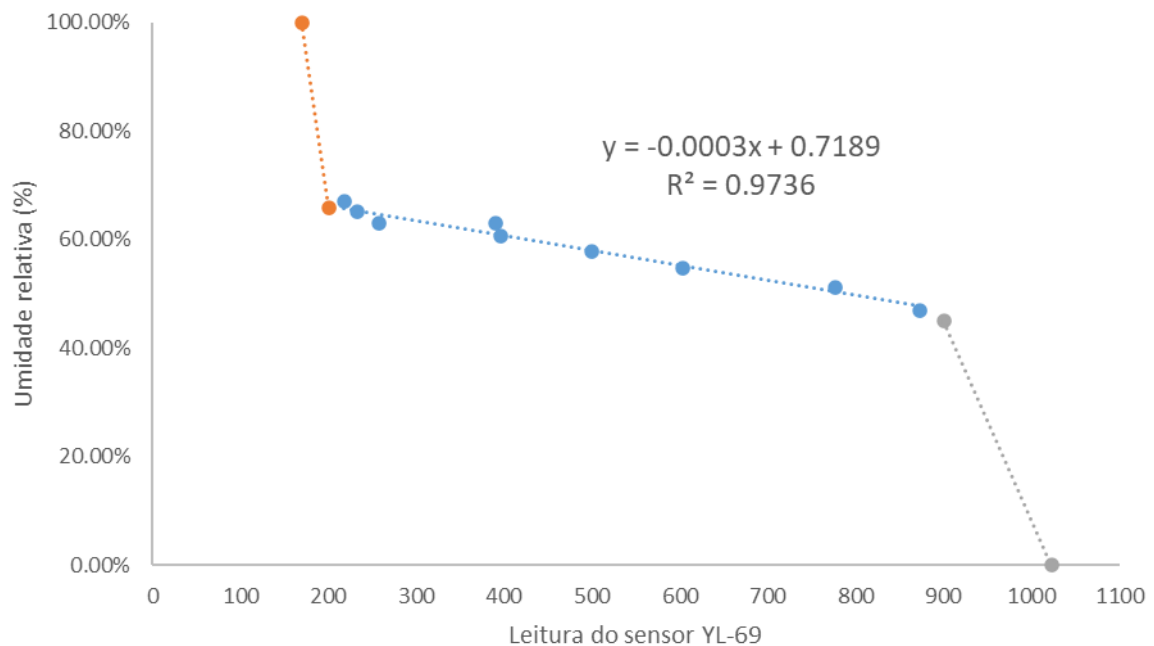
Tabela 4 – Valores lido pelo YL-69 ao longo da calibração do sensor

| Quantidade de água | Analog read |
|--------------------|-------------|
| 0                  | 873         |
| 25                 | 777         |
| 50                 | 603         |
| 75                 | 500         |
| 100                | 396         |
| 125                | 257         |
| 150                | 233         |
| 175                | 218         |

Fonte: A Autora, 2020.

Além dos pontos mostrados na Tabela 4, foram avaliados as leituras do higrômetro para a água e o ar afim de obter os valores analógicos reais lidos, já que a curva gerada pelos dados obtidos, mostrada na Figura 35, não satisfazia as condições extremas de leitura. Por isso, foi inserido na função de leitura do sensor de umidade do Arduino três condições com equações distintas, sendo os valores entre 100 e 200 e os valores a partir de 900 determinados por meio da função *map()* do *software*.

Figura 35 – Curvas de calibração do sensor YL-69



Fonte: A Autora, 2020.

A curva mostrada em azul na Figura 35 foi calculada a partir dos dados coletados na Tabela 4 e gerou um  $R^2$  maior do que 0,97 o que mostra uma boa adequação da regressão linear para o caso. Comparando com os resultados obtidos na tese de Jiménez (2018) foi possível avaliar melhor a influência do tipo de solo na calibração do higrômetro. Outro ponto que foi perceptível que depois de 125 ml de água o solo não alterou pois já havia alcançado sua capacidade de pote.

### 5.3.5 Testes com a planta

Para começar a testar o sistema com a planta, foi realizada o mesmo procedimento de saturação descrito na seção 5.3.4 com duas gérberas em pleno crescimento, com  $K_c$  de 1,33 como mencionado na seção 3.2. Estas plantas foram posteriormente colocadas para drenar por aproximadamente 8h antes de dar-se a primeira irrigação e em paralelo o sistema adquiriu os dados de temperatura do ar para o cálculo da  $ET_c$ .

Figura 36 — Saturação das duas gérberas utilizadas para os testes



Fonte: A Autora, 2020.

Após a drenagem do vaso foi observado o valor de umidade na capacidade de pote. Esse valor foi levemente diferente do encontrado em 0 sendo de 60% de umidade relativa em peso, possivelmente devido ao maior tempo de drenagem. Após a drenagem os conjuntos vaso com gérbera e prato de drenagem, sendo o primeiro utilizado na irrigação que também considerou o higrômetro, com 1364g no total, e o segundo com 1375g. Esses pesos foram monitorados diariamente cerca de 1h antes do início da irrigação para avaliar a perda de água da planta. O primeiro vaso foi irrigado pelo sistema desenvolvido, enquanto o segundo foi irrigado com base na perda de água em relação ao primeiro dia, como estimativa da evapotranspiração diária real.

Como explicado anteriormente, o sistema escolhido de fornecimento de água foi vertical para obter melhor precisão do sistema de fluxo e está mostrado na Figura 38. Esse sistema foi colocado em uma área telada e com um telhado para proteger de animais e de potenciais chuvas com o intuito de não danificar o circuito e molhar a planta, o que afetaria o valor disponibilizado para a flor.

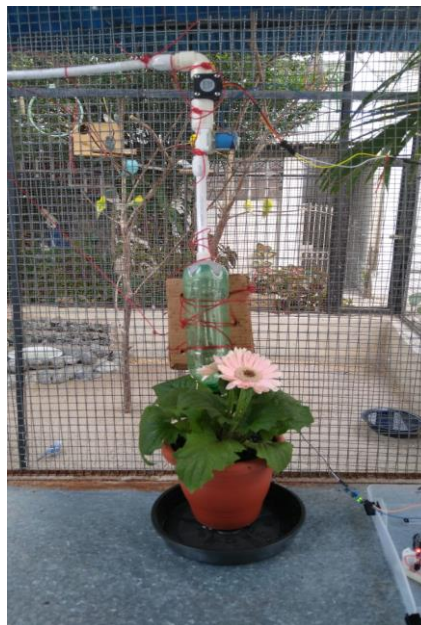
Figura 37 – Disposição geral do sistema de irrigação



Fonte: A Autora, 2020.

A Figura 38 mostra a disposição do sistema de irrigação de forma ampliada para melhor compreensão.

Figura 38 – Disposição do sistema de irrigação



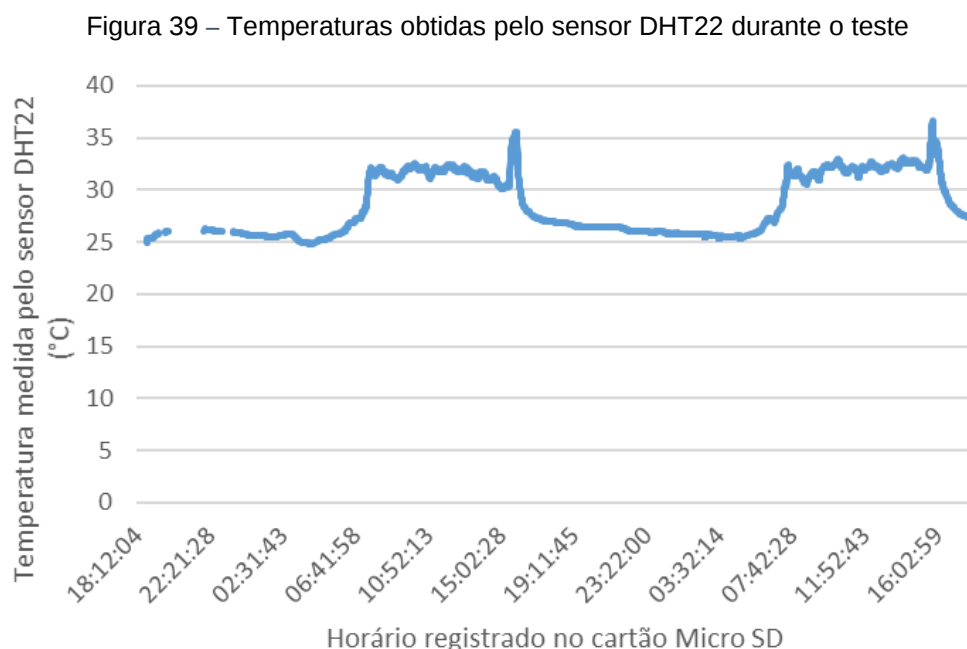
Fonte: A Autora, 2020.

O teste durou 3 dias, tendo em todos eles aquisição de dados e apenas nos dois últimos a irrigação que se deu início arbitrariamente às 00h. Porém devido a uma

chuva de vento de alta intensidade o teste foi comprometido, já que o circuito foi molhado e a gravação de dados foi interrompida. Apesar da perda de dados, o sistema apresentou uma boa leitura e tratamento das informações de temperatura e umidade do solo, e mesmo com a interrupção da gravação dos dados realizou a irrigação no horário previsto.

Por isso, foi decidido fazer um novo teste em uma área completamente coberta, mas que houvesse irradiação solar para melhor saúde da planta. Antes de começar os novos 3 dias de teste, que tiveram como horário de irrigação escolhido de 18h, foi verificado que o módulo de cartão SD estava funcionando como esperado apesar da falha já descrita para o primeiro teste.

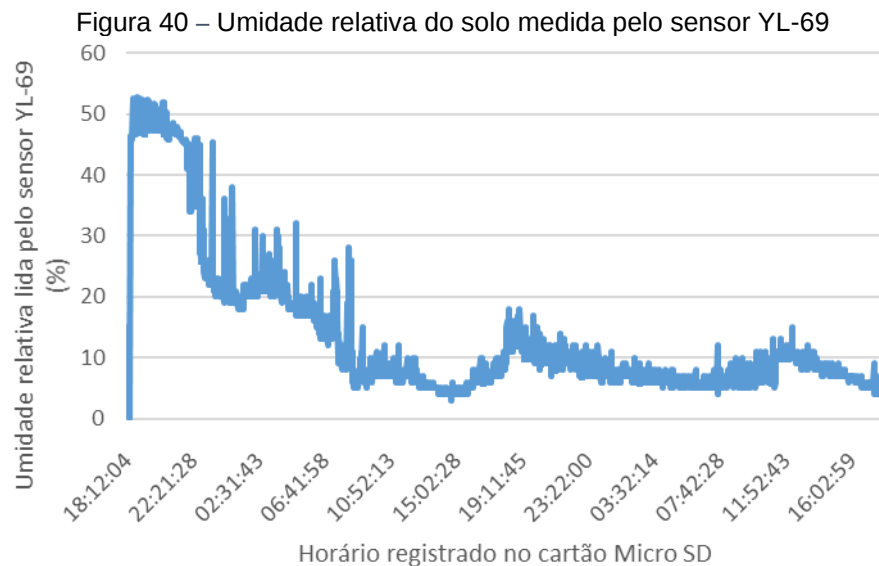
Na Figura 39 estão apresentadas todas as temperaturas armazenadas no cartão Micro SD durante o período do teste. A descontinuidade do gráfico se deve a presença de 225 erros do tipo *nan*, todos concentrados nas seis primeiras horas de teste. Apesar desses erros, o sistema se apresentou de forma esperada com uma amplitude de temperatura de mais de 10°C ao longo do dia, sendo a mínima nesse período 24,8°C e a máxima 36,6°C.



Fonte: A Autora, 2020.

Quanto a avaliação do sensor de umidade, foram identificados problemas de oxidação (Figura 41) que podem ter sido provocados pela chuva não detectado no

início do segundo teste. Como ilustrado na Figura 40, foram detectados picos inexplicados de umidade além de uma queda de umidade muito acima do justificável, principalmente considerando o bom estado da planta ao final do período. Por isso, os valores de  $K_c$  foram ajustados nos 2 dias já que a umidade se encontrava fora da faixa de 58% a 62% estimada com base na capacidade de pote.



Fonte: A Autora, 2020.

Figura 41 – Higrômetro após os testes



Fonte: A Autora, 2020.

Por fim, foram confrontadas as informações referentes as pesagens feitas dos sistemas ao longo dos 3 dias de teste com o volume calculado pela  $ET_c$  e disponibilizado pelo Arduino considerando o cálculo do fluxo. Porém após a primeira rodada de

teste foi visível que as plantas perderam massa pela perda de pétalas por senescência normal. O primeiro teste mostrou resultados muito favoráveis e que, o vaso ainda estava acima da capacidade de campo quando seu vaso pesou 1364g, pois o peso de 1309g se manteve constante ao longo de todo o primeiro teste.

Tabela 5 – Pesagens diárias feitas no primeiro teste

| <b>Dia</b> | <b>Vaso 1 (g)</b> | <b>Vaso 2 (g)</b> |
|------------|-------------------|-------------------|
| Referência | 1364              | 1375              |
| Dia 1      | 1308              | 1210              |
| Dia 2      | 1309              | 1229              |
| Dia 3      | 1309              | 1238              |

Fonte: A Autora, 2020.

Como houve perda dos dados referentes ao volume estipulado no primeiro teste, foi estudado o peso da segunda rodada de avaliação do sistema mostrado na Tabela 6. Os pesos do dia 1 foram obtidos antes de uma irrigação manual levando em consideração o procedimento utilizado para a planta do vaso 2 que foi usada como padrão, sendo de respectivamente 55 ml e 137 ml. A partir do dia 2, a planta do vaso 1 passou a ser irrigada de forma automática, enquanto a do vaso 2 seguiu sendo irrigada manualmente. Vale ressaltar que as temperaturas obtidas, mostradas na Figura 39, foram muito elevadas, o que aumentou a evapotranspiração das plantas.

Tabela 6 – Pesagens diárias dos vasos no segundo teste

| <b>Dia</b> | <b>Vaso 1 (g)</b> | <b>Vaso 2 (g)</b> |
|------------|-------------------|-------------------|
| Referência | 1364              | 1375              |
| Dia 1      | 1309              | 1238              |
| Dia 2      | 1228              | 1208              |
| Dia 3      | 1233              | 1197              |

Fonte: A Autora, 2020.

Para avaliar a diferença entre os volumes de água calculado pela ET<sub>c</sub> com base no método de Hargreaves-Samani utilizando o algoritmo, o medido a partir do sensor de fluxo e o determinado a partir de pesagem do vaso 2 foi desenvolvida a Tabela 7.

Ela indica que apesar das massas registradas na Tabela 6 terem diminuído, possivelmente devido ao aumento de temperatura e amadurecimento da gérbera, o volume estimado pela ETc foi muito próximo ao volume encontrado por pesagens diárias do vaso 2 com um erro de apenas 2% que seria corrigido quando a umidade lida pelo sensor YL-69 fosse acima dos 62%. Em relação ao volume calculado pelo sensor de fluxo, houve um erro de até 6,74% em relação ao pesado e 4,39% em relação ao volume calculado pela ETc. Esses erros se encontram na faixa do esperado de acordo com o estudo da confiabilidade do sensor de fluxo mostrado na seção 5.3.2.

Tabela 7 – Volumes de água calculados, disponibilizados e reais

| Dia   | Volume Etc (ml) | Volume Disponibilizado (ml) | Volume Pesado (ml) |
|-------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
| Dia 1 | -               | -                           | -                  |
| Dia 2 | 171             | 174                         | 167                |
| Dia 3 | 182             | 190                         | 178                |

Fonte: A Autora, 2020.

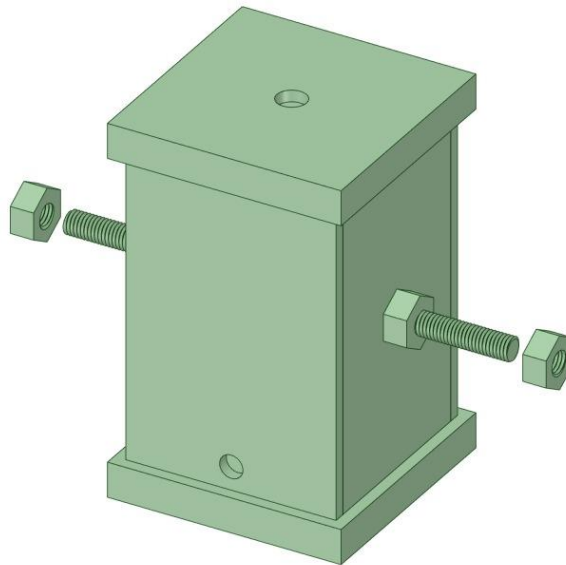
Com a realização dos dois testes é possível perceber ele deveria ter sido realizado desde o início em um ambiente fechado de forma a evitar problemas com a chuva. Mas apesar de todas as adversidades na execução dos dois testes, foi possível avaliar o sistema, a validade do algoritmo que respondeu como desejado dentro dos dados recebidos e identificar suas principais fragilidades. Dessa forma é ressaltada a importância em utilizar um sistema de proteção ao circuito de forma a não perder dados, além disso poderia ser aplicado também o conceito de IoT para não haver a perda de dados como foi o caso do primeiro experimento, que facilitaria o estudo dos dados.

#### 5.4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO FINAL

O modelo 3D foi desenvolvido no *software* de CAD DesignSpark e teve o cuidado com construir um protótipo que adequasse todos os sensores utilizados no sistema com proteção a água que se mostrou fundamental nos experimentos com a planta. A ideia com o desenvolvimento do modelo apresentado na Figura 42 foi armazenar com ajuste ideal o sensor de fluxo, a luva e a válvula solenoide na parte interna onde a placa Arduino e a *proto board* teria posição fixa para maior segurança. Vale

ressaltar que para um produto final seria impressa uma PCB que utilizaria o microcontrolador ATmega328P e já conteria o módulo RTC DS3231, módulo de adaptador Micro SD, ligações necessárias e resistências corretas.

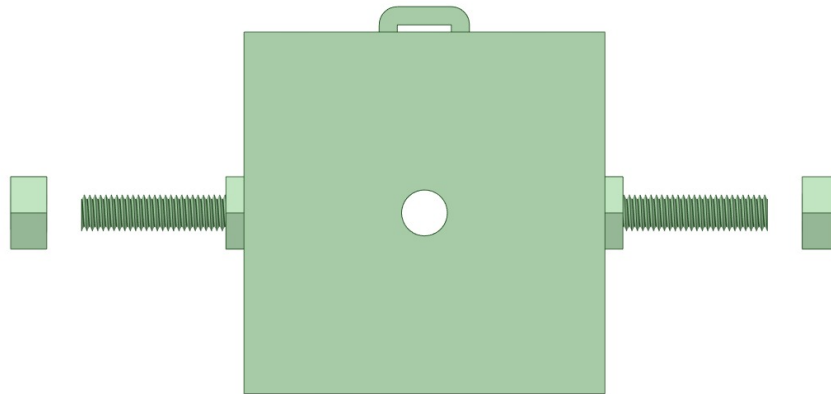
Figura 42 – Modelo 3D em vista isométrica



Fonte: A Autora, 2020.

Há orifícios no sistema para a passagem de fios para dois sensores que obrigatoriamente ficam expostos: o DHT22, para poder obter a temperatura real do ar, e o YL-69 que precisa estar inserido no solo do vaso. O terceiro orifício foi projetado para poder permitir que o sistema seja alimentado por meio das fontes de energia externas. Outra parte desenvolvida foi um suporte para o DHT, na forma de uma alça, na superfície externa de forma a mantê-lo justo com o sistema, evitando assim movimentações indesejadas, mostrado na Figura 43.

Figura 43 – Vista superior do modelo 3D



Fonte: A Autora, 2020.

Para garantir maior versatilidade a um produto, foi pensado que o reservatório poderia ser adaptado pelo próprio cliente ao utilizar uma garrafa PET comum a exemplo da Figura 44. Dessa forma, o cliente pode utilizar um volume maior se necessário e, ao mesmo tempo, reutiliza uma garrafa que é facilmente encontrada nas residências atualmente. Para isso, o produto contaria com um gotejador acoplado em uma tampa universal que se adaptaria as garrafas de uma forma geral. Uma das maiores preocupações foi o suporte do sistema, já que o mesmo tem que ficar em cima do vaso de forma segura. Por isso, foram desenhados dois fusos e porcas para fixarem as mãos francesas utilizadas para fixação do sistema a parede.

Figura 44 – Reservatório de água com gotejador



Fonte: A Autora, 2020.

A respeito da impressão do protótipo houve alguns contratempos ao longo da impressão, em particular em relação a umidade absorvida pelo PLA e problemas de configuração da impressora Standard da CNC Brasil. Porém, foi possível imprimir uma primeira versão do protótipo como mostrada na Figura 45. Ao se montar o protótipo, percebeu-se que havia ocorrido o fenômeno de retração nos furos e por isso seria

necessário fazer novos protótipos de forma a alcançar um encaixe melhor e otimizar bem o espaço.

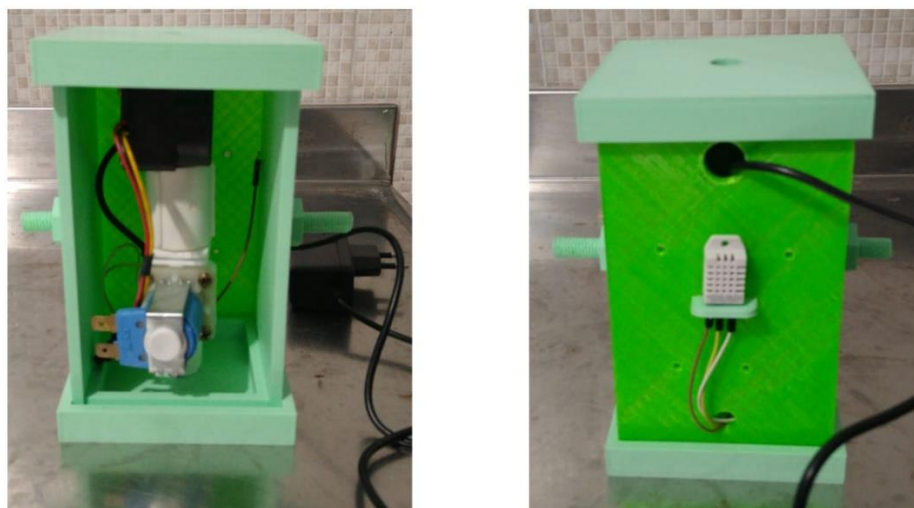
Figura 45 – Protótipo final impresso



Fonte: A Autora, 2020.

Com o modelo impresso, foi possível montar a disposição final do potencial produto para um cliente mostrada na Figura 46. Por causa da retração dos furos, não foi possível montar o sistema por completo com a utilização do reservatório mostrado na Figura 44 e adicionar a placa Arduino.

Figura 46 – Protótipo montado



Fonte: A Autora, 2020.

Todos os gastos realizados para o desenvolvimento do protótipo foram descritos na Tabela 8 para melhor visualização do leitor. Vale ressaltar que para um produto

final não seria necessário ter todos os itens descritos e a proteção também não seria manufaturada utilizando a impressão 3D. Além disso, esses preços são de varejo e seria necessário negociar diretamente com os fornecedores e fazer testes de confiabilidade dos componentes com intuito de diminuir o erro e o preço.

Tabela 8 – Gastos para o desenvolvimento de um protótipo

| Itens                                         | Custo            |
|-----------------------------------------------|------------------|
| Fonte DC Chaveada 9V 1A Plug P4               | R\$ 18.90        |
| Fonte DC Chaveada 12V 1A Plug P4              | R\$ 18.90        |
| Jumpers                                       | R\$ 28.00        |
| Protoboard 830 pontos                         | R\$ 20.00        |
| Real Time Clock RTC DS3231                    | R\$ 18.90        |
| Módulo Cartão Micro SD                        | R\$ 10.90        |
| Sensor de Umidade do Solo (YL-69)             | R\$ 13.90        |
| Sensor de Fluxo de Água                       | R\$ 34.90        |
| Sensor de Temperatura e Umidade do Ar (DHT22) | R\$ 35.00        |
| Placa UNO R3 + Cabo USB                       | R\$ 60.00        |
| Válvula solenoide 12VDC 180°                  | R\$ 54.90        |
| Módulo Relé 5V 1 Canal                        | R\$ 9.90         |
| Gotejador de Vazão Regulável                  | R\$ 0.51         |
| Engate de Plástico Flexível 1/2" (Chicote)    | R\$ 17.70        |
| Luva Roscável PVC Branco 1/2"                 | R\$ 2.22         |
| Joelho 90° Roscável PVC Branco 1/2"           | R\$ 5.54         |
| Nípel Roscável PVC Branco 1/2"                | R\$ 0.57         |
| Mangueira Trançada                            | R\$ 69.90        |
| Adaptador para Mangueira 1/2"                 | R\$ 1.30         |
| Gérbera (2)                                   | R\$ 24.00        |
| Vaso para Plantas 17cm                        | R\$ 27.58        |
| Prato para Vaso                               | R\$ 11.80        |
| Substrato de Samambaia                        | R\$ 36.90        |
| Material para impressão 3D                    | R\$ 51.20        |
| <b>Total</b>                                  | <b>R\$487.62</b> |

Fonte: A Autora, 2020.

## 5.5 DIFICULDADES E LIÇÕES APRENDIDAS

Durante a prototipagem do sistema autônomo de irrigação mostrado no presente trabalho foram identificados alguns pontos de dificuldade e com eles tomadas algumas lições aprendidas que serão mostradas a seguir com intuito de ajudar pessoas que tenham interesse de trabalhar na área.

### 5.5.1 Dificuldades encontradas

Ao longo desse trabalho foram enfrentadas algumas dificuldades provocadas especialmente devido a pandemia do Covid-19, tais como:

- a falta de acesso a instrumentos de medição corretos e equipamentos, tais como balanças de precisão e estufa com temperatura controlada que tornaria os processos de calibração do solo e do sensor de fluxo mais precisas;
- a adaptação do sistema em casa em condições não ideais que acabaram afetando o teste inicial realizado com a planta. Caso o teste tivesse sido realizado em uma casa de vegetação, esse problema seria contornado pelo ambiente ser devidamente protegido;
- receio na compra de componentes do sistema, optando por alguns sensores não ideais de fácil acesso para não ter problemas com os correios, como foi o caso do sensor de fluxo;
- a conciliação entre atividades do período excepcional de 2020.3 com o desenvolvimento deste trabalho se tornou difícil em alguns momentos devida à dedicação maior necessária para aulas remotas;
- a falta de concentração em alguns momentos devido a situação da pandemia em si, especialmente no início.

Fora do âmbito da pandemia ainda foram encontradas outras dificuldades, tais como:

- foram identificados erros de leitura do sensor DHT22 devido a atualização da biblioteca, mas que puderam ser contornados a partir do tratamento de dados. Apesar desse erro, o sistema funcionou corretamente e tratou as temperaturas de forma correta;
- o uso do sensor de fluxo foi dificultado devido a vazão variável do fluxo de água e o pulso também variável do próprio sensor, que provavelmente deve-se a uma vedação ineficiente ou problemas de folga, exigiu vários testes e calibrações que um outro modelo não exigiria;
- problemas com o uso de memória com o microcontrolador ATmega328P que poderia ser contornado com o uso de uma placa Arduino MEGA sem grandes adaptações.

### 5.5.2 Lições Aprendidas

O desenvolvimento do trabalho também trouxe diversas lições que podem ser aplicadas para a profissão e desenvolvimento de outros trabalhos com a plataforma Arduino, a exemplo de:

- sempre fazer pesquisas em fóruns, a exemplo dos voltado a plataforma Arduino, quando encontrar problemas, pois o público *maker* é muito solícito e bem provavelmente várias pessoas estão passando pelo mesmo problema. Esse hábito foi essencial para identificar o erro do DHT22 e tratá-lo da forma correta;
- quando estiver fazendo o desenvolvimento de um protótipo, deve-se optar a testá-los aos poucos para identificar melhor possíveis erros. Dessa forma, é mais fácil isolar uma falha e tratá-la do que com todo o protótipo montado;
- complementar à lição anterior, devem ser sempre salvas as alterações nos códigos como revisão diferentes de forma a identificar mais facilmente as modificações e facilitar o processo caso seja necessário voltar a um estado anterior. Essa observação também é válida para outros arquivos;
- ter cuidado ao escrever códigos, pois diferente de compiladores como C e Matlab que o cuidado com memória tem que ser menor, o microcontrolador ATmega328P tem uma limitação bem maior. Para isso, é muito bom utilizar funções quando o código se repete em mais de um ponto no *loop* de forma a economizar linhas;
- mesmo sob condições adversas, deve-se tentar utilizar o sensor com melhor custo-benefício para evitar trabalhos não essenciais para o desenvolvimento de um sistema.

## 6 CONCLUSÃO

Esse trabalho objetivou desenvolver um sistema de irrigação autônomo em escala de vaso com base em modelo de evapotranspiração com monitoramento de variáveis climáticas para uma gérbera. Para a prototipagem eletrônica foram utilizados sensores e atuadores de baixo custo conectados a uma placa Arduino UNO para realizar o monitoramento, armazenamento dos dados e atuação do sistema.

Considerando a disponibilidade de sensores para o desenvolvimento do protótipo foi escolhido o método de Hargreaves-Samani para a determinação da ETo de referência por necessitar apenas de informações a respeito da temperatura diária e a latitude do local. E com esse método e o Kc encontrado por meio de pesquisa, foi possível disponibilizar uma quantidade de água compatível com o volume necessário para um sistema que utilize apenas o conceito de capacidade de pote.

Ao longo do trabalho, foi muito importante avaliar o funcionamento dos sensores e atuadores de forma a fazer as calibrações necessárias para obter as leituras corretas. Por meio da calibração foi possível estudar a confiabilidade no fornecimento de água pelo sensor de fluxo SEM-HZ21WA para o sistema considerando uma vazão variável. O estudo permitiu definir que a partir de 200 ml de volume requerido o sistema prototipado tem um erro de menos de 5% de volume que pode ser corrigido em outros ciclos de irrigação por meio da correção do Kc realizada antes de cada irrigação.

Outra calibração muito importante foi a do higrômetro YL-69 que tem papel crucial no ajuste do Kc. Para a aplicação em um produto, seria necessário fazer a análise de vários substratos de forma a calibrar o sensor para mais de um substrato, podendo efetuar as leituras com melhor precisão. Também a respeito de um produto, seria necessário fazer uma viabilidade econômica do sistema, mas o mesmo pode ser adaptado sem grandes problemas para canteiros, irrigações em floriculturas que precisam de um controle maior de suas flores e estudos em casa de vegetação, poupando o tempo para irrigação e monitorando de forma mais completa os experimentos.

Os testes com a gérbera permitiram perceber possíveis falhas do sistema que podem ser contornadas com o uso em um ambiente adequado ou utilizando uma proteção mais eficiente para o circuito como o sugerido por meio da modelagem 3D. Porém mesmo com os problemas enfrentados ao longo dos testes, a lógica do programa se mostrou correta e o sistema poderia ser melhorado utilizando sensores de melhor qualidade para evitar a obtenção errada de dados. Para melhor avaliar os resultados,

o teste deveria ser realizado ao longo de um ciclo completo da gérbera e serem avaliadas as correções de  $K_c$ , que infelizmente devida a oxidação do higrômetro não puderam ser discutidas neste trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros é possível integrar IoT ao sistema para retirar o módulo de cartão de memória Micro SD que exige muito da memória do Arduino, podendo desenvolver um aplicativo ou colocar os dados diretamente em um site exclusivo, facilitando o uso para aplicações de estudo em casas de vegetações ou uso comerciais. Em relação aos componentes utilizados poderia ser utilizado um sensor de nível no lugar do sensor de fluxo para medir com melhor precisão o volume disponibilizado e um gotejador autocompensado para manter a vazão para a planta constante. Outro adicional que o sistema pode ter é um banco de dado de diversos  $K_c$ 's para ser escolhido por parte do usuário tornando a aplicação mais ampla ao abranger diversas plantas, não sendo necessariamente só flores, e estágios de crescimento. Para poder contornar possível falta de energia, também pode ser adotada uma fonte de energia alternativa, a exemplo de alimentação por energia solar que já foi usada em alguns trabalhos da área.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, N.; SINGHAL, S. Smart drip irrigation system using Raspberry Pi and Arduino. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, Noida, p. 928–932, 2015. Trabalho apresentado no International Conference on Computing, Communication & Automation, 2015, [Noida, Índia].
- ALLEN JR, L. H. Evapotranspiration responses of plants and crops to carbon dioxide and temperature. **Journal of Crop Production**, Londres, v. 2, n. 2, p. 37–70, 2009.
- ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Roma, v. 56, 1998.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <<http://atlasirrigacao.ana.gov.br/>>. Acesso em: 27 jul 2020.
- ANDRADE, C. de L. T. de. **Seleção do sistema de irrigação**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001, 18 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 14).
- ANDRADE, C. de L. T. de; BRITO, R. A. L. **Árvore do Conhecimento: Métodos**, 2011. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01\\_72\\_16820051120.html#](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_16820051120.html#)>. Acesso em: 15 jun 2020.
- ARDUINO. **Arduino Store**, 2020a. Arduino UNO Rev3. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 5 jun 2020.
- ARDUINO. **Site do Arduino**, 2020b. Introduction. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 4 jun 2020.
- BERMAN, B. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, Indiana, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012.
- BESKO, M.; BILYK, C. B.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Revista Gestão Tecnologia & Inovação**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 9-18, 2017.
- BHATTACHARYA, M.; ROY, A.; PAL, J. Smart irrigation system using internet of things. Em **Applications of Internet of Things: Lecture Notes in Networks and Systems**. Springer, Singapura, 2021. v. 137. p. 119–129.
- BIOSEMENTES. **Loja online Biosementes**, 2020. Gotejador com vazão ajustável de 0 a 40 L/h. Disponível em: <<https://www.biosementes.com.br/loja/item/Gotejador-com-vazao-ajustavel-de-0-a-40-L%7B47%7Dh.html>>. Acesso em: 10 nov 2020.
- CAMARGO, A. P. de. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, n. 12, p. 163–213, 1962.

CANTRELL, Jason T. *et al.* Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 23, n. 4, p. 811–824, 2017.

CARVALHO, L. G. de *et al.* Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.

CORREIA, G. R.; ROCHA, H. R. O.; RISSINO, S. D. Automação de sistema de irrigação com monitoramento via aplicativo Web. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 314–325, 2016.

DHARUNKARTHI, V. R. *et al.* Smart irrigation integrated with IoT. **i-manager's Journal on Electrical Engineering**, Nagercoil, v. 12, n. 3, 2019.

DOS SANTOS, Eduardo Henrique. **Levantamento do estado da arte e análise comparativa entre as principais ferramentas de prototipagem virtual e manufatura aditiva (prototipagem rápida) utilizadas como apoio ao processo de desenvolvimento de produtos com apresentação de estudos de caso**. 2016. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Gestão de Desenvolvimento de Produto - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Water**. Roma: FAO, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/water/en/>>. Acesso em: 27 jul 2020.

FILIPEFLOP. **Loja online FilipeFlop**, 2020a. Módulo Relé 5V 1 Canal. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/modulo-rele-5v-1-canal/>>. Acesso em: 7 nov 2020.

FILIPEFLOP. **Loja online FilipeFlop**, 2020b. Real Time Clock RTC DS3231. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/real-time-clock-rtc-ds3231/>>. Acesso em: 7 nov 2020.

FILIPEFLOP. **Loja online FilipeFlop**, 2020c. Sensor de Umidade e Temperatura AM2302 DHT22. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-umidade-e-temperatura-am2302-dht22/>>. Acesso em: 7 nov 2020.

FILIPEFLOP. **Loja online FilipeFlop**, 2020d. **Válvula de vazão solenóide 12VDC 180 graus rosca 1/2" x 1/2"**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/valvula-de-vazao-solenoide-12vdc-180-graus-rosca-12-x-12/>>. Acesso em: 7 nov 2020.

GARCÍA, L. *et al.* IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 4, 2020.

GIRARDI, L. B. *et al.* Evapotranspiração e coeficiente de cultura da alstroemeria

(*Alstroemeria × hybrida*) cultivada em estufa. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 817–829, 2016.

GLOAGUEN, R. M. *et al.* A method for developing irrigation decision support systems *de novo*: example of sesame (*Sesamum indicum* L.) a known drought tolerant species. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 243, n. July 2020, p. 106435, 2021.

GORDELIER, T. J. *et al.* Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 25, n. 6, p. 953–971, 2019.

HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 129, n. 1, p. 53–63, 2003.

IBRAHIM, M.; ZAKARIA, H.; XIAN, E. E. W. Pet food autofeeder by using Arduino. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Ilha de Penang, v. 670, n. 1, p. 1-5, 2019. Trabalho apresentado no 6th International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering, 2019, [Ilha de Penang, Malásia].

JAMRÓZ, W. *et al.* 3D printing in pharmaceutical and medical applications: recent achievements and challenges. **Pharmaceutical Research**, Berlim, v. 35, n. 9, p. Article 176, 2018.

JIMÉNEZ, Anabel de los Ángeles Calva. **Calibração do sensor de umidade do solo modelo YL-69 para manejo da irrigação**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

KORKEES, F.; ALLENBY, J.; DORRINGTON, P. 3D printing of composites: design parameters and flexural performance. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 26, n. 4, p. 699–706, 2020.

LE-BAIL, A.; MANIGLIA, B. C.; LE-BAIL, P. Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing. **Current Opinion in Food Science**, Amsterdã, v. 35, p. 54–64, 2020.

LIMA, P. A. *et al.* Efeito do manejo da irrigação com água moderadamente salina na produção de pimentão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, Recife, v. 1, n. 1, p. 73–80, 2006.

LIRA, M. de A. *et al.* Cactus forage and semi-arid sustainability. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 811, p. 327–332, 2009.

MAURYA, N. K.; RASTOGI, V.; SINGH, P. An overview of mechanical properties and form error for rapid prototyping. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Amsterdã, v. 29, p. 53–70, 2020.

MCCARTHY, A. C.; HANCOCK, N. H.; RAINE, S. R. Advanced process control of irrigation: The current state and an analysis to aid future development. **Irrigation Science**, Amsterdã, v. 31, n. 3, p. 183–192, 2013.

MEHRPOUYA, M. *et al.* The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review. **Applied Science**, Basel, v. 9, n. 18, p. 3865, 2019.

MENG, Q. *et al.* Designing a new cropping system for high productivity and sustainable water usage under climate change. **Nature**, Londres, v. 7, p. 1–12, 2017.

MENSING, J. P.; LOMAS, T.; TUANTRANONT, A. 2D and 3D printing for graphene based supercapacitors and batteries: a review. **Sustainable Materials and Technologies**, Amsterdã, v. 25, p. 1-21, 2020.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados Históricos Anuais**. Brasília: INMET, 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 29 set 2020.

NÚÑEZ-TAPIA, L. A prototype of an automatic irrigation system for peruvian crop fields. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, Nova Iorque, v. 11, n. 8, p. 731–734, 2020.

OLIVEIRA, E. C. *et al.* Evapotranspiração da roseira cultivada em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 314–321, 2014.

PIROLI, J. D. *et al.* Crop coefficient of cut gerbera with water supplementation in a protected environment. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 15, n. 1, p. 1–7, 2020.

PRIEDEMANN JR, W. R.; BROSCHE, A. L. **Soluble Material and Process for Three-Dimensional Modeling**, 2004.

RAHIM, T. N. A. T.; ABDULLAH, A. M.; MD AKIL, H. Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites. **Polymer Reviews**, Washington D.C., v. 59, n. 4, p. 589–624, 2019.

RECICOMP. **Loja online Recicomp**, 2020a. Módulo Cartão Micro SD. Disponível em: <<https://www.recicomp.com.br/produtos/modulo-cartao-micro-sd/>>. Acesso em: 7 nov 2020.

RECICOMP. **Loja online Recicomp**, 2020b. Sensor de Fluxo Vazão de Água 1/2". Disponível em: <<https://www.recicomp.com.br/produtos/sensor-de-fluxo-vazao-de-agua-1-2/>>. Acesso em: 7 nov 2020.

RECICOMP. **Loja online Recicomp**, 2020c. Sensor de Umidade do Solo Higrômetro. Disponível em: <<https://www.recicomp.com.br/produtos/sensor-de-umidade-do-solo-higrometro/>>. Acesso em: 7 nov 2020.

RISTVEY, A. G.; BELAYNEH, B. E.; LEA-COX, J. D. A comparison of irrigation-water

containment methods and management strategies between two ornamental production systems to minimize water security threats. **Water**, Basel, v. 11, n. 12, p. 1–14, 2019.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, Londres, v. 461, p. 472–475, 2009.

SALGADO, R.; MATEOS, L. Evaluation of different methods of estimating ET for the performance assessment of irrigation schemes. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 243, p. 106450, 2021.

SCARDIGNO, A. New solutions to reduce water and energy consumption in crop production: A water–energy–food nexus perspective. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, Amsterdã, v. 13, p. 11–15, 2020.

SCHOENMAKER, K. **O mercado de flores no Brasil**. Holambra: INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORICULTURA (IBRAFLOR), 2019. Disponível em: <[https://354d6537-ca5e-4df4-8c1b-3fa4f2dbe678.filesusr.com/ugd/b3d028\\_424e52e4b94549308df7321829759faa.pdf](https://354d6537-ca5e-4df4-8c1b-3fa4f2dbe678.filesusr.com/ugd/b3d028_424e52e4b94549308df7321829759faa.pdf)>. Acesso em: 4 set 2020.

SCHULTZ, B.; DE WRACHIEN, D. Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century. **Irrigation and Drainage**, Hoboken, v. 51, n. 4, p. 311–327, 2002.

SHEIKH, M. A. T. *et al.* Design and fabrication of automated prosthetic arm. **AIP Conference Proceedings**, College Park, v. 2236, p. 070003, 2020.

UCHOA, Pablo. **Os países em que a água já é um recurso em falta**. São Paulo: BRITISH BROADCASTING CORPORATION NO BRASIL (BBC BRASIL), 2019. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-49243195>>. Acesso em: 19 mai 2020.

VORDOS, N. *et al.* How 3D printing and social media tackles the PPE shortage during Covid – 19 pandemic. **Safety Science**, Amsterdã, v. 130, p. 1-7, 2020.

WREGE, M. S.; LUNARDI, D. M. C. Evapotranspiração e coeficientes de cultura (Kc) do crisântemo (*Dendranthema grandiflora* var Polaris Amarelo). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Serra Talhada, v. 14, n. 1, p. 43–52, 2006.

WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Aqueduct Water and Food Security Analyzer**. Washington D.C.: WRI, 2019. Disponível em: <<https://www.wri.org/applications/aqueduct/food/#/>>. Acesso em: 20 mai 2020.