

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
COMPUTAÇÃO APLICADA

ALISSON FELIPE COELHO GARCIA

SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PARA CULTURAS DE ALFACE CRESPA BASEADO EM  
LÓGICA *FUZZY*

PONTA GROSSA - PR

2020

ALISSON FELIPE COELHO GARCIA

SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PARA CULTURAS DE ALFACE CRESPA BASEADO EM  
LÓGICA *FUZZY*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Computação Aplicada na área de Computação, Automação e Gestão de Dados em Agricultura.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosane Falate

PONTA GROSSA - PR

2020

G216 Garcia, Alisson Felipe Coelho  
Sistema de Irrigação para culturas de alface crespa baseado em Lógica Fuzzy / Alisson Felipe Coelho Garcia. Ponta Grossa, 2020.  
87 f.

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada - Área de Concentração: Computação para Tecnologias em Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Rosane Falate.

1. Lógica fuzzy. 2. Microcontrolador Atmega328. 3. Biblioteca eFLL. 4. Irrigação. 5. Alface crespa. I. Falate, Rosane. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Computação para Tecnologias em Agricultura. III.T.

CDD: 004



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Bairro Uvaranas - CEP 84030-900 - Ponta Grossa - PR - <https://uepg.br>

## TERMO

### TERMO DE APROVAÇÃO

**Alisson Felipe Coelho Garcia**

#### SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PARA CULTURAS DE ALFACE CRESPA BASEADO EM LÓGICA FUZZY

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Profª. Dra. Rosane Falate

Prof. Dr. Augusto Foronda

Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Junior

Ponta Grossa, 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Augusto Foronda, Usuário Externo**, em 18/11/2020, às 16:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Rosane Falate, Professor(a)**, em 18/11/2020, às 16:37, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Luiz Stevan Junior, Usuário Externo**, em 18/11/2020, às 18:08, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **0355368** e o código CRC **89D0BE2C**.

Este trabalho é dedicado à minha mãe, Marilene Coelho. Criou sozinha dois filhos pequenos, e apesar das dificuldades, nunca nos faltou o principal, amor e educação. Mãe, a senhora venceu!

Dedico também ao meu irmão, Alan Fernando Coelho Garcia, e ao meu pai, Alcides Garcia (*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar à minha mãe e ao meu irmão, pelo incentivo e apoio incondicional.

À professora Dr<sup>a</sup>. Rosane Falate, pela orientação, suporte, confiança e paciência aos atrasos.

Aos professores Dr. Sérgio Luís Stevan Junior e Dr. Augusto Foronda, membros da banca avaliadora, pelas valiosas críticas realizadas ao trabalho.

As professoras Dr<sup>a</sup>. Alaine Margarete Guimarães e Dr<sup>a</sup>. Tânia Lúcia Monteiro, por aceitarem o convite para serem membros suplentes da banca avaliadora.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, em especial aos que constroem o Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada - PPGCA, que com competência, profissionalismo e atenção aos discentes, oportunizaram-me este feito.

Ao coordenador do PPGCA professor Dr. José Carlos Ferreira da Rocha pela paciência, devido aos inúmeros questionamentos e dúvidas no decorrer do mestrado.

Aos amigos e colegas discentes. Muito obrigado pelas dicas, esclarecimentos e pelas rizadas.

Aos autores dos excelentes trabalhos citados nesta dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

*”Sempre fui sonhador, é isso que me mantém vivo!”*

*(Racionais Mc's)*

## RESUMO

A alface é a hortaliça folhosa mais consumida no mundo e, estima-se que movimentou no Brasil, em 2016, R\$ 8 bilhões apenas no varejo. Boa parte desse recurso se deve a agricultura moderna e aplicações de tecnologias, que têm colaborado para maximizar a produtividade e diminuir os custos. No entanto, o setor agrícola é o maior consumidor de água potável no mundo, devido a necessidade de irrigação das diferentes culturas. A alface, assim como outras culturas folhosas, é caracterizada por um sistema radicular superficial que exige um rigoroso controle de irrigação, umidade do solo inadequada, mesmo em períodos relativamente curtos, pode afetar a cultura. Esse trabalho apresenta o desenvolvimento teórico e experimental de um controlador *fuzzy* para a irrigação, baseado no sensoriamento da umidade do solo, com o intuito de melhorar o controle do uso da água para alface crespa e avaliar a qualidade da produção com e sem o uso deste controlador. Para isso, foi elaborado um experimento com o objetivo de comparar dois métodos de irrigação por gotejamento: irrigação automática por controlador *fuzzy* e irrigação manual por reposição da evapotranspiração. O controlador é constituído por um microcontrolador ATmega328 (placa de prototipagem Arduino Nano), sensor de umidade do solo DM v1.2 e uma válvula solenoide. Como resultado, foram analisadas as médias de cinco características da alface, cujos valores apresentados são, respectivamente, para a irrigação automática e a irrigação manual: peso de  $76,6 \pm 12,3$  g e  $77,6 \pm 16,9$  g; altura de  $14,9 \pm 1,3$  cm e  $15,0 \pm 1,9$  cm; diâmetro da cabeça de  $27,6 \pm 1,8$  cm e  $27,4 \pm 1,5$  cm; diâmetro do caule de  $16,0 \pm 0,9$  mm e  $16,3 \pm 1,3$  mm; e número de folhas de  $16,9 \pm 1,4$  unidades e  $16,9 \pm 1,6$  unidades. Os resultados obtidos indicam que o controlador *fuzzy* produziu alfaces estatisticamente iguais às produzidas pela irrigação por reposição da evapotranspiração, no entanto, com uma economia de 11% no uso de água, considerando o consumo obtido de 25,56 L, para a irrigação automática, e de 28,69 L, para a irrigação manual.

**Palavras-chaves:** Lógica *Fuzzy*, Microcontrolador ATmega328, Biblioteca eFLL, Irrigação, Alface Crespa.



## ABSTRACT

Lettuce is the most consumed leafy vegetable in the world and it is estimated that it moved in Brazil, in 2016, R\$ 8 billion only in retail. Much of this resource is due to modern agriculture and applications of technologies, which have collaborated to maximize productivity and decrease costs. However, the agricultural sector is the largest consumer of drinking water in the world, due to the need for irrigation of different crops. Lettuce, like other leafy crops, is characterized by a shallow root system that requires strict irrigation control, inadequate soil moisture, even in relatively short periods, can affect the crop. This work presents the theoretical and experimental development of a fuzzy controller for irrigation, based on the sensing of soil moisture, in order to improve the control of water use for curly lettuce and to evaluate the quality of production with and without the use of this controller. To this end, an experiment was designed to compare two methods of drip irrigation: automatic irrigation by fuzzy controller and manual irrigation by replacement of evapotranspiration. The controller consists of an ATmega328 microcontroller (Arduino Nano prototyping board), DM v1.2 soil moisture sensor and a solenoid valve. As a result, the averages of five characteristics of the lettuce were analyzed, whose values presented are, respectively, for automatic irrigation and manual irrigation: weight of  $76.6 \pm 12.3$  g and  $77.6 \pm 16.9$  g; height of  $14.9 \pm 1.3$  cm and  $15.0 \pm 1.9$  cm; head diameter of  $27.6 \pm 1.8$  cm and  $27.4 \pm 1.5$  cm; stem diameter of  $16.0 \pm 0.9$  mm and  $16.3 \pm 1.3$  mm; and number of sheets of  $16.9 \pm 1.4$  units and  $16.9 \pm 1.6$  units. The results obtained indicate that the controller *fuzzy* produced lettuces statistically equal to those produced by irrigation by replacement of evapotranspiration, however, with an economy of 11% in the use of water, considering the consumption obtained of 25.56 L, for automatic irrigation, and 28.69 L for manual irrigation.

**Keywords:** Fuzzy Logic, ATmega328 Microcontroller, eFLL Library, Irrigation, Curly Lettuce.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IA	Inteligência Artificial
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i> - Resistor Dependente de Luz
<i>SunSPOT</i>	<i>Sun Small Programmable Object Technology</i> - Tecnologia de Pequenos Objetos Programáveis da Sun
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i> - Sistema Global para Comunicação Móvel
<i>LL</i>	Lamina Líquida
$ET_c$	Evapotranspiração da Cultura
$P_e$	Precipitação Efetiva
<i>TR</i>	Turno de Rega
<i>ER</i>	Eficiência de Rega
<i>LB</i>	Lâmina Bruta
<i>ET</i>	Evapotranspiração
$ET_o$	Evapotranspiração de Referência
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> - Organização para Alimentação e Agricultura
ONU	Organização das Nações Unidas
$K_c$	Coefficiente de Cultura
PCI	Placa de Circuito Impresso
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação de Largura de Pulso
USB	Universal Serial Bus - Porta Serial Universal
RRG	<i>Robotic Research Group</i> - Grupo de Pesquisa em Robótica
eFLL	<i>Embedded Fuzzy Logic Library</i> - Biblioteca Fuzzy para Arduino e Sistemas Embarcados
CI	Circuito Integrado
SD	<i>Secure Drive</i> - Unidade Segura
CA-CC	Corrente Alternada para Corrente Contínua

WEB	<i>World Wide Web</i> - Rede Mundial de Computadores
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> - Interface Periférica Serial
GND	<i>Ground</i> - Terra
A/D	Analógico para Digital

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Estados fenológicos da alface. . . . .	28
Figura 2	–	Tela inicial do software <i>The ETo Calculation</i> versão 3.2 de 2012. . . . .	33
Figura 3	–	Coefficiente de cultura ( $K_c$ ) em diferentes estágios de desenvolvimento, sob alta umidade relativa do ar ( $UR > 70\%$ ) e vento fraco (velocidade $< 5 \text{ ms}^{-1}$ ). . . . .	34
Figura 4	–	Sensor capacitivo DM v1.2 de umidade do solo. . . . .	38
Figura 5	–	Especificações de uso do sensor, quanto a profundidade de trabalho no solo. . . . .	39
Figura 6	–	Exemplo de controlador humano. . . . .	41
Figura 7	–	Exemplo de controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	42
Figura 8	–	Representação de variável linguística, termos linguísticos e funções de pertinência. . . . .	43
Figura 9	–	Função trapezoidal, com valores do vetor $V$ diferentes entre si. . . . .	44
Figura 10	–	Função triangular, com parâmetros $v_2$ e $v_3$ do vetor $V$ iguais. . . . .	45
Figura 11	–	Saídas parciais do controlador. . . . .	47
Figura 12	–	Saída final do controlador. . . . .	47
Figura 13	–	Defuzzificador centro de gravidade. . . . .	48
Figura 14	–	Local do experimento, vasos, mudas, sistema de irrigação e tela sombrite. . . . .	49
Figura 15	–	Município de Ponta Grossa. . . . .	50
Figura 16	–	Substrato utilizado. . . . .	51
Figura 17	–	Diagrama de conexão dos componentes do controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	53
Figura 18	–	Interface do software EasyEDA com (a) esquema elétrico do circuito do controlador e (b) representação do modelo físico do circuito do controlador. . . . .	54

Figura 19	– Hardware do controlador <i>fuzzy</i> para irrigação automática sendo que em (a) está a fonte de alimentação, (b) o módulo relé e (c) a placa com microcontrolador, módulo SD e conectores para sensor, módulo relé e fonte de alimentação. . . . .	54
Figura 20	– Armazenamento das 11 amostras de solo em recipientes plásticos embaladas com filme plástico. . . . .	56
Figura 21	– Sensor de umidade do solo após aplicação de material isolante, para proteção contra oxidação. . . . .	57
Figura 22	– Leituras da umidade do solo das amostras com o sensor em bancada, para caracterização do comportamento do sensor. . . . .	58
Figura 23	– Reta de caracterização do sensor, entre as faixas de umidade do solo de 50 a 80%. . . . .	58
Figura 24	– Fluxograma de operação conceitual de funcionamento da programação do controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	59
Figura 25	– Variáveis e suas respectivas funções de pertinência: (a) umidade do solo: B (Baixa), I (Ideal) e A (Alta); (b) ativação da saída, variável irrigar: A (Adiar), N (Não) e S (Sim); (c) horário, variável hora: NI(Não Ideal) e I(Ideal). . . . .	61
Figura 26	– ETO Calculator - Aba de configuração dos dados de entrada. . . . .	65
Figura 27	– ETO Calculator - Aba de entrada de dados meteorológicos e cálculo de ETo. . . . .	66
Figura 28	– Mudanças de Alface Crespa Amanda. . . . .	67
Figura 29	– Características dos vasos que receberam as mudas transplantadas e quantidade de substrato aplicado. . . . .	67
Figura 30	– Disposição do sistema de irrigação no vaso com relação a posição da muda e do sensor de umidade. . . . .	68
Figura 31	– Delineamento experimental utilizado. . . . .	68
Figura 32	– Análises realizadas na alface. . . . .	70
Figura 33	– Máximas e mínimas temperaturas no período do experimento, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020. As curvas são somente guias visuais. . . . .	71

Figura 34	– Máximas e mínimas umidades relativa do ar no período do experimento, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020. As curvas são somente guias visuais. . . . .	72
Figura 35	– Precipitação no período do experimento, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020. . . . .	73
Figura 36	– Média diária de umidade do solo, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020. . . . .	73
Figura 37	– Uso de água pelos sistemas de irrigação, metodologias A e B, e a precipitação da água da chuva no período. . . . .	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Aplicações usando técnicas de controle de irrigação na agricultura. . . . .	23
Tabela 2	– Trabalhos sobre controle de irrigação na agricultura usando lógica <i>fuzzy</i> . . . . .	26
Tabela 3	– Parâmetros ideais para a alfaca. . . . .	28
Tabela 4	– Especificações dos Arduino Mega, Arduino Uno e Arduino Nano. . . . .	36
Tabela 5	– Especificações do Sensor DM v1.2 . . . . .	38
Tabela 6	– Climatologia do município de Ponta Grossa-PR. . . . .	50
Tabela 7	– Análise química (pH, $H^+$ , $Al^{3+}$ , $Al^{3+}$ , $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $K^+$ , Soma de Bases, Capacidade de troca de Cátions, Fósforo, Carbono, Matéria Orgânica, V% (Índice de Saturação de Bases) e m% (Índice de Saturação de Alumínio) do substrato utilizado. . . . .	52
Tabela 8	– Material e custos para a montagem do controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	53
Tabela 9	– Dados de entrada utilizados para o software <i>The ETO Calculator</i> .. . . .	65
Tabela 10	– Materiais e custos para a montagem do experimento de análise comparativa entre sistemas de irrigação. . . . .	69
Tabela 11	– Quantidade irrigada em cada metodologia. . . . .	74
Tabela 12	– Dados obtidos de cada uma das alfases cultivadas durante o período do experimento e para as metodologias A e B.. . . . .	77
Tabela 13	– Dados obtidos das análises estatística no software R. . . . .	77

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
1.1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
1.2	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	19
1.3	OBJETIVO GERAL	20
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	<b>ESTADO DA ARTE</b>	21
2.1	CONTROLE DA IRRIGAÇÃO	21
2.2	LÓGICA <i>FUZZY</i> NA IRRIGAÇÃO	24
3	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	27
3.1	A CULTURA DA ALFACE	27
3.2	IRRIGAÇÃO	28
3.2.1	Técnicas de Irrigação	29
3.2.1.1	<i>Irrigação por Gotejamento</i>	30
3.3	EVAPOTRANSPIRAÇÃO ( <i>ET</i> )	31
3.3.1	Evapotranspiração de Referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> )	31
3.3.1.1	<i>Modelo de Penman-Monteith</i>	31
3.3.1.2	<i>Software The ETo Calculator</i>	32
3.3.2	Coeficiente de Cultivo ( <i>K<sub>c</sub></i> )	33
3.3.3	Evapotranspiração da Cultura ( <i>ET<sub>c</sub></i> )	34
3.3.4	Reposição da Evapotranspiração	35
3.4	PLATAFORMA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA ARDUINO	35
3.4.1	Biblioteca eFLL	36
3.4.2	Sensor de Umidade do Solo	36
3.4.2.1	<i>Sensor DM v1.2</i>	37



3.4.2.2	<i>Caracterização do Sensor DM v1.2</i> . . . . .	38
3.5	<b>LÓGICA FUZZY</b> . . . . .	40
3.5.1	Sistemas Baseados em Regras <i>Fuzzy</i> . . . . .	41
3.5.2	Variáveis linguísticas, funções de pertinência e regras de inferência . . . . .	42
3.5.2.1	<i>Variáveis linguísticas</i> . . . . .	42
3.5.2.2	<i>Funções de pertinência</i> . . . . .	43
3.5.2.3	<i>Regras de Inferência Fuzzy</i> . . . . .	44
3.5.3	Processador de Entrada (Fuzzificação) . . . . .	45
3.5.4	Máquina de Inferência <i>Fuzzy</i> . . . . .	46
3.5.4.1	<i>Método de Mamdani</i> . . . . .	46
3.5.5	Processador de Saída (Defuzzificação) . . . . .	47
3.5.5.1	<i>Centro de Área</i> . . . . .	47
4	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	49
4.1	LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GERAIS DO EXPERIMENTO . . . . .	49
4.2	SUBSTRATO . . . . .	51
4.3	CONTROLADOR <i>FUZZY</i> . . . . .	52
4.3.1	Caracterização do Sensor de Umidade do Solo . . . . .	55
4.3.2	<i>Firmware</i> . . . . .	59
4.4	METODOLOGIAS DE IRRIGAÇÃO . . . . .	64
4.4.1	Irrigação Automática por Controlador <i>Fuzzy</i> . . . . .	64
4.4.2	Irrigação Manual por Reposição da Evapotranspiração . . . . .	64
4.5	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL . . . . .	66
4.5.1	Tratos Culturais . . . . .	69
4.6	ANÁLISES REALIZADAS . . . . .	69
5	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	71
5.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA . . . . .	74

6	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	78
6.1	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	80

## 1 INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa*) é uma hortaliça da família Asteraceae, de origem asiática. A planta cresce de forma uniforme em volta do caule, podendo as folhas serem lisas ou crespas, formando ou não uma “cabeça”, com coloração em vários tons de verde ou roxa, conforme a cultivar. É a hortaliça folhosa mais importante no mundo, sendo consumida principalmente *in natura*, na forma de saladas (SALA; COSTA, 2012; QUEIROZ; CRUVINEL; FIGUEIREDO, 2017).

Segundo Maldonade, Mattos e Moretti (2014) a preferência dos brasileiros é em alfaces com folhas crespas e lisas. Entretanto, para a cadeia de refeições rápidas (*fast food*) a alface americana é a mais preferida. Os principais tipos de cultivares de alface são (MALDONADE; MATTOS; MORETTI, 2014):

- Repolhuda lisa ou repolhuda manteiga: as cultivares deste tipo têm folhas lisas e tenras formando cabeças compactas. São as cultivares da série Brasil, Áurea, Elisa, Carolina e Aurélia;
- Repolhuda crespa: também conhecida como alface americana, as cultivares têm folhas crespas, embricadas, crocantes e cabeça compacta. São elas: Great Lakes, Salinas, Lucy Brown e Lorca;
- Alface de folhas lisas: de folhas lisas e tenras, não formam cabeças. As cultivares deste tipo mais conhecidas são: Babá de Verão, Monaliza, Regina 71 e Vitória;
- Alface de folhas crespas: as folhas são soltas, crespas, não formando cabeça. As principais cultivares do grupo são; Grand Rapids, Brisa, Verônica, Marisa, Vera, Amanda, Alcione e Elba; e
- Romana: as folhas são alongadas, duras, com nervuras protuberantes e formam cabeça fofa. As cultivares mais comuns com essas características são a Gallega e Romana.

A alface se destaca no Brasil por ser a terceira hortaliça em maior volume de produção, perdendo apenas para a melancia e o tomate (SALA; COSTA, 2012; UDSEN, 2016). No entanto, segundo Vilela e Luengo (2017), entre as hortaliças folhosas, geralmente utilizadas para salada, a alface se destaca como a hortaliça mais importante e a mais produzida no Brasil, com área cultivada de 86.799 ha; dessa área, 86% são de alface crespa, com 1.317,6 toneladas produzidas em 2016, sendo as regiões sul e sudeste responsáveis por 84% da produção nacional. Segundo Udsen (2016), a alface movimentava anualmente, em média, um montante de R\$ 8 bilhões apenas no varejo, com uma produção de mais de 1,5 milhão de toneladas ao ano.

A cultivar preferida e a mais consumida no Brasil é a alface crespa (QUEIROZ; CRUVINEL; FIGUEIREDO, 2017). Por não formarem cabeça e pelas suas folhas crespas, o manuseio e

o transporte dessa variedade são facilitados. Entretanto, com ciclo de produção curto (45 a 60 dias) e adaptação ao clima brasileiro, em todas as estações, vários cultivares de alface podem ser produzidas, possibilitando a produção durante todo o ano, e com rápido retorno de capital (SEBRAE, 2011; MALDONADE; MATTOS; MORETTI, 2014).

A irrigação tem como objetivo disponibilizar água às plantas, para que possam se desenvolver de forma adequada (RAMADAN *et al.*, 2018). De fato, segundo a FAO (2016), a agricultura é o setor que mais consome água potável no mundo, por meio da irrigação, sendo responsável por cerca de 70%. O setor de hortaliças é o que mais necessita dos recursos hídricos, pois são intensamente influenciadas pela umidade do solo. No caso da alface, a água é o seu principal constituinte, totalizando cerca de 90% da massa de matéria verde, e o principal recurso de que a planta necessita para se desenvolver (SEMERARO *et al.*, 2019). Mais especificamente, a alface, por ser caracterizada por um sistema radicular superficial, exige um rigoroso controle de irrigação, ou seja, seu crescimento pode ser comprometido se houver períodos relativamente curtos de umidade do solo inadequada (BRAGA; CALGARA, 2010).

Durante o desenvolvimento de uma cultura, a água é continuamente perdida para atmosfera pelo processo de evapotranspiração (*ET*), podendo ocasionar estresse hídrico à planta (ADEYEMI *et al.*, 2018a, 2018b). Haro-Monteagudo, Knox e Holman (2019) relatam que o estresse hídrico pode ocorrer em uma cultura não apenas pelo déficit de água, mas também pela quantidade excessiva de água no solo. Para monitorar as variações de umidade do solo, sensores podem ser utilizados, pois respondem a um estímulo físico-químico de maneira específica, transformando este estímulo em uma grandeza elétrica, para fins de medição e em apoio ao monitoramento e ao controle de processos, por exemplo, de irrigação (PATIL; KULKARNI; DESAI, 2012; YU *et al.*, 2013; ABREU, 2019; JUNHUI *et al.*, 2019; KRISHNAN *et al.*, 2020).

Assim, dados os ganhos e perdas de água durante o crescimento de uma cultura, para auxiliar no momento da irrigação, um controlador (hardware e firmware) pode ser interessante (BERNARDI; QUITAISKI; SANTOS, 2017; MOREIRA *et al.*, 2019). Para a tomada de decisão do controlador, o algoritmo (*firmware*) pode ser desenvolvido utilizando diversas técnicas de programação, como, por exemplo: lógica convencional, lógica *fuzzy*, ou técnicas de IA (Inteligência Artificial) (FILHO, 2017; FELICIANO, 2013). A técnica de programação escolhida, irá determinar o quão robustos devem ser os dispositivos que irão compor o controlador para irrigação e o custo para seu desenvolvimento.

A lógica *fuzzy* se destaca, pois utiliza funções e regras matemáticas simples para realizar o processamento dos dados e a tomada de decisão (SILVA, 2011; LI *et al.*, 2019), sendo que as regras refletem a maneira como as pessoas pensam, e modelam o senso comum de pa-

lavras, utilizado pelos seres humanos (ZADEH, 1973). Para Feliciano (2013), controladores que utilizam lógica *fuzzy* são uma alternativa a irrigação tradicional, liga-desliga, que não atende as mudanças nas variáveis climáticas, sendo necessário o recálculo, pois a demanda é variável. A introdução da lógica *fuzzy* tem conduzido as pesquisas para sistemas inteligentes, similares ao pensamento humano e mais adequados à realidade (ZADEH, 1973; KICKERT; MAMDANI, 1993; PATIL; KULKARNI; DESAI, 2012; LI *et al.*, 2019; KRISHNAN *et al.*, 2020).

Conforme apresentado, os trabalhos de Patil, Kulkarni e Desai (2012), Yu *et al.* (2013), JunHui *et al.* (2019) e Krishnan *et al.* (2020) mostra que as aplicações da lógica *fuzzy* na agricultura possuem como objetivo, otimizar a utilização de recursos, como por exemplo a água, para otimizar seu uso e produtividade da cultura. Sabendo que a alface demanda manejo contínuo quanto à irrigação, para que a planta se desenvolva corretamente, e da possibilidade de aplicar a computação na tomada de decisão deste processo importante, este trabalho propõe um controlador de irrigação que utiliza lógica *fuzzy*, com tomada de decisão baseado no monitoramento da umidade do solo por sensor.

## 1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este capítulo apresentou uma introdução ao estudo abordado e tratará das delimitações da pesquisa e dos objetivos desta dissertação. Os capítulos subsequentes tratam dos seguintes tópicos: o Capítulo 2 apresenta o estado da arte referente ao tema abordado, no Capítulo 3 são apresentados fundamentos e conceitos envolvidos e utilizados nesta pesquisa quanto à cultura da alface, irrigação, evapotranspiração, microcontrolador e lógica *fuzzy*, também são apresentados na revisão bibliográfica. No Capítulo 4 são descritos a metodologia e o material utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 5, enquanto as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

## 1.2 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa foi realizada com a cultura da alface crespa Amanda, por ter um período de desenvolvimento entre 60 e 90 dias, que foi cultivada em vasos com substrato formado por uma mistura 50/50 de terra vegetal e fertilizante orgânico, .

Para irrigação foi escolhida a técnica do gotejamento, por apresentar melhor rendimento (NAWANDAR; SATPUTE, 2019), e para aferir o desenvolvimento das plantas foi utilizado uma trena graduada em mm, no entanto, a aferição se deu visualmente, ocasionando na perda de precisão milimétrica, para uma precisão de centímetros.

Considerado que a técnica de reposição por evapotranspiração depende das condições climáticas do local onde se deseja realizar o cultivo (ALLEN *et al.*, 1998), esta pesquisa tem os resultados para o outono-inverno do município de Ponta Grossa na região dos campos gerais paranaense.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Aplicar técnicas da computação para desenvolver um controlador baseado na lógica *fuzzy*, para automatizar a irrigação da alface crespa, visando, sua produtividade com uso eficiente da água.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos têm-se:

- Caracterizar o desenvolvimento do hardware para o controle da irrigação;
- Caracterizar o desenvolvimento do *firmware* baseado na lógica *fuzzy*, para o controle da irrigação;
- Demonstrar a capacidade do equipamento em controlar a irrigação do cultivar; e
- Comparar os resultados obtidos com o controlador desenvolvido com o sistema de irrigação manual em termos de produção e consumo de água.

## 2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta trabalhos relacionados com automação da irrigação e aplicação da lógica *fuzzy* na irrigação em geral.

De acordo com a literatura (MCNEILL; THRO, 1994; SILVA, 2011; LI *et al.*, 2019), o trabalho pioneiro na automação para realizar e controlar tarefas, baseando-se em lógica *fuzzy*, foi proposto por Mamdani e Assilian (1975). Seus experimentos foram na área de máquina a vapor, e basearam-se no fato que operadores humanos expressam suas estratégias de controle linguisticamente e não de uma forma matematicamente precisa. Em 1974, Mamdani (1974) propôs um controlador *fuzzy* para uma máquina a vapor construída em laboratório. Tendo como entradas a pressão e a velocidade do motor a vapor, o controlador *fuzzy* atuava sobre o acelerador e o combustível do motor; o algoritmo foi elaborado e executado através de um computador. Segundo o autor, o controlador proposto se comportou de maneira similar, se não melhor, que o controlador clássico de motor a vapor (MAMDANI; BAAKLINI, 1975).

### 2.1 CONTROLE DA IRRIGAÇÃO

Filho (2017) desenvolveram um sistema automatizado para controle da irrigação de duas variedades de alface, americana e crespa, em casas de vegetação, com possibilidade de ajuste de programação de acordo com as necessidades das culturas em cada fase de seu desenvolvimento, considerando variáveis como: temperatura ambiente, índice de radiação solar, de umidade do ar e do solo; o sistema também possibilitou a programação manual dos parâmetros pelo usuário. Para o desenvolvimento do sistema o microcontrolador ATmega2560 (Arduino Mega) foi utilizado, juntamente com os sensores: FC-28, para umidade do solo; DHT22, para umidade e temperatura ambiente; e LDR (*Light Dependent Resistor* - Resistor Dependente de Luz), para aferição da radiação solar. Para a realização do experimento, foram construídos dois ambientes protegidos A1 e A2, modelo túnel alto, tipo arco, com pé direito de 2,75 m, possuindo área total de 50 m<sup>2</sup> cada um (5 m largura por 10 m de comprimento). No abrigo A1 (automatizado) foram instaladas três torres de sensores (T1, T2 e T3) para aquisição de dados climáticos internos, bem como atuadores para ventilação (VT), irrigação por gotejamento (RI) e nebulização (NB). No ambiente A2 não foram instalados equipamentos de atuação ambiental, somente sistema de irrigação, com operação manual, através de registro de gaveta manual (RM), com duas operações diárias, sendo uma no início da manhã e outra no final da tarde. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial de 2 x 2, com 4 tratamentos e três repetições. Os dados analisados das plantas foram: diâmetro da planta (cm); altura da planta (cm); massa fresca total (kg); e diâmetro do caule (cm). Na comparação

do controlador de irrigação projetado com a irrigação manual, a automação da irrigação incrementou em 25% a produtividade da alface tipo americana e 30% a produtividade da alface tipo crespa em termos da massa fresca das plantas.

Bernardi, Quitaiski e Santos (2017) desenvolveram um sistema automatizado de irrigação por aspersão em estufa modelo espanhola, para o cultivo da alface do tipo lisa. Para a irrigação das plantas, os autores utilizaram água proveniente da chuva. O sistema de monitoramento e processamento de informações foi desenvolvido utilizando um microcontrolador ATmega2560 (Arduino Mega) e sensores de: temperatura e umidade ambiente DHT11, pressão atmosférica BMP180, e radiação solar LDR. Para avaliação do sistema foram construídos 2 canteiros de 1 m de largura por 3 m de comprimento, um dentro da estufa e outro em ambiente externo, que recebeu irrigação manual; ambos os canteiros receberam 60 mudas de alface lisa. O estudo foi realizado por um período de 30 dias e, ao final do processo, as principais variáveis analisadas foram: altura da planta, o número de folhas, e o consumo de água pelos métodos de irrigação. Foi observado que o canteiro em ambiente externo utilizou 80 L de água, e em média produziu incremento de 12 cm na altura e de 8 folhas nas plantas; no entanto, na estufa foram utilizados 70,4 L de água, e houve incremento na altura de 26 cm e 17 folhas em média por planta. Os autores concluíram que a implantação do sistema automatizado de controle de irrigação foi o diferencial para que se houvesse uma diferença significativa de 12% de economia de água e aumento na produção de 54% em termos da altura das plantas.

Moreira *et al.* (2019) desenvolveram um trabalho para determinar a produção e crescimento da cultura da abóbora submetida a diferentes lâminas de irrigação, e avaliar dois Sistemas de Aquisição de Dados (SAD). O experimento foi realizado durante 76 dias em casa de vegetação, com a cultura da abóbora Mini Paulista Isabela, onde foram realizadas quatro repetições, utilizando cinco tratamentos de lâminas de irrigação, T1 = 120%, T2 = 100%, T3 = 80%, T4 = 60% e T5 = 40%, com base no método Penman Monteith-FAO (PM-FAO) para o cálculo da evapotranspiração ( $ET_c$ ) da cultura. Ao final do experimento, foram avaliadas as seguintes variáveis da planta: Peso Médio Seco da parte aérea (PMS), Área Foliar (AF) e produção média dos frutos por planta (PMF). Para o desenvolvimento dos SADs, foram utilizados: microcontrolador ATmega2560 (Arduino Mega); Real Time clock (RTC) modelo DS1307; e módulo microSD para cartão de memória. Para a aquisição dos dados e controle da irrigação foram utilizados: sensor de umidade do solo ECHO EC-5 da Decagon; módulos relé; e válvula solenoide. Os autores concluíram que, a AF e o PMF foram afetados pelas lâminas de irrigação, apresentando diferenças significativas dos tratamentos T1 e T2 sobre os demais tratamentos, enquanto que o PMS não apresentou diferença significativa. Eles também verificaram que tratamento T2 utilizou 114,19 mm.m<sup>2</sup> de água e foi o mais eficiente, pois apresentou PMF superior



ao tratamento T5 em aproximadamente 73%.

Nascimento *et al.* (2020) avaliaram o efeito da frequência de aplicação de água e uso da irrigação por gotejamento subsuperficial na cultura do tomate de mesa em lavoura comercial. O experimento foi implantado utilizando um delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x2 com duas técnicas de irrigação (gotejamento superficial e gotejamento subsuperficial) e duas frequências de irrigação (irrigação contínua e por pulsos) com seis repetições. Foram avaliados o potencial mátrico (pressão no solo, em kPa) e variáveis de produção: produtividade comercial; produção total; e número de frutos por planta. Para a realização do experimento foi utilizado o controlador de irrigação Rain Bird ESP-LXME, juntamente três válvulas solenoide e 7 tensiômetros instalados a 0,20 m de profundidade em 7 setores de plantio. As parcelas experimentais possuíam 5 m de comprimento, 0,90 m de largura e 0,35 m entre plantas, e onde foram transplantadas 28 plantas em fileiras duplas considerando as 08 plantas centrais por parcela para a colheita. As mudas foram transplantadas quando possuíam de 3 a 4 folhas definitivas, em fileiras duplas por canteiro com população de 14400 plantas.ha<sup>-1</sup>. Durante o experimento o acionamento do sistema de irrigação foi realizado em função da leitura crítica do potencial matricial de água no solo em 20 kPa, considerado para todas as fases fenológicas da cultura. Os resultados mostraram que a produtividade comercial foi igual a 20,78 kg.m<sup>-3</sup>, produção total de 21 kg.m<sup>-3</sup>, massa média de frutos de 113 g, e o número médio de frutos por planta igual a 26. Não houve diferenças significativas para uso da irrigação superficial, subsuperficial, contínua ou pulsos e suas interações.

A Tabela 1 apresenta o objetivo, o método de irrigação, a cultura e o resultado dos trabalhos de Filho (2017), Bernardi, Quitaiski e Santos (2017), Moreira *et al.* (2019) e Nascimento *et al.* (2020), selecionados quanto ao controle de irrigação na agricultura.

Tabela 1: Aplicações usando técnicas de controle de irrigação na agricultura.

Referência	Objetivo	Irrigação	Cultura	Resultado
Filho (2017)	Produtividade	Gotejamento	Alface	30% maior
Bernardi <i>et al.</i> (2017)	Produtividade	Aspersão	Alface	54% maior
Moreira <i>et al.</i> (2019)	Produtividade	-	Abóbora	73% maior
Nascimento <i>et al.</i> (2020)	Produtividade	Gotejamento	Tomate	Não significativa

Fonte: O Autor.

Destaca-se que todos os trabalhos indicados de controle de irrigação na agricultura possuem como objetivo a produtividade. Ainda, três deles usaram o microcontrolador ATmega2560 para o controle; dois utilizam sensores de umidade do solo, e um, para este objetivo, usou um sensor de pressão; e a maioria, para avaliar a produtividade, utilizaram de variáveis da planta como altura da planta e número de folhas ou produção média de frutos.

## 2.2 LÓGICA FUZZY NA IRRIGAÇÃO

Patil, Kulkarni e Desai (2012) propuseram um controlador de irrigação inteligente, que utilizou a lógica *fuzzy* na tomada de decisão, e uma rede de sensores sem fio. O controlador monitora através de sensores: a umidade do solo (sensor ES1100 *Watermark*), umidade das folhas da planta (sensor *Leaf Wetness Decagon*), umidade e temperatura ambiente (sensor ES1201), além de outros dados como: capacidade de absorção de água da planta, capacidade de retenção de água pelo solo, textura do solo e profundidade das raízes da planta, totalizando sete parâmetros de entrada, que geraram 53 regras *fuzzy* para o controle da irrigação. O controlador proposto foi comparado com a irrigação manual, que utilizou os mesmos dados de entrada, para três tipos diferentes de solo: argiloso, arenoso, e argiloso-arenoso. A lógica *fuzzy* foi implementada utilizando o software MATLAB *simulation tool*, mesmo ambiente usado para realizar a simulação dos cenários propostos. Os autores concluíram que o controlador *fuzzy* proposto possui vantagens em relação à irrigação manual ou o sistema tradicional de irrigação, como: aumento da eficiência da irrigação, redução no custo de mão de obra, e redução na utilização de água e eletricidade. Foram simulados 6 cenários utilizando culturas e solos distintos, em todos eles o controlador *fuzzy* se mostrou mais eficiente em termos de quantidade de água por planta, apresentando melhor resultado, de 21%, quando aplicado em cultura de árvores frutíferas com solo argiloso. Os autores também comentam que, levando em consideração outros fatores, como evapotranspiração, e adicionando novas regras ao controlador, os resultados poderiam ser otimizados.

Feliciano (2013) analisou a viabilidade do controlador *fuzzy* desenvolvido, e o aplicou à irrigação da cana-de-açúcar, simulando as variáveis climáticas para todo o período de desenvolvimento da cultura (um ano). Para isso, dados da cultura e do local ( $K_c$  da cultura e características do solo), foram previamente atribuídos aos parâmetros de entrada do controlador. O sistema foi composto por dois módulos: um para ser utilizado no campo; e uma central de informações. O módulo no campo foi planejado para medir a umidade do solo através de um sensor (Sensor Capacitivo ECH<sub>2</sub>O modelo EC-5) e para ser capaz de acionar uma válvula solenoide, para suprir as necessidades hídricas do local onde se encontra. Ao todo, foram utilizados 7 parâmetros de entrada e cada cenário simulado foi testado com diferentes bases de regras, que variaram de 6 a 48 regras *fuzzy*, de acordo com o acréscimo dos termos linguísticos relevantes para a combinação final da saída. O módulo central foi projetado para receber as informações dos módulos no campo, por meio de uma rede sem fio, utilizando dispositivos *SunSPOT* (*Sun Small Programmable Object Technology* - Tecnologia de Pequenos Objetos Programáveis da Sun), que utiliza a tecnologia *ZigBee*, e, através da inferência *fuzzy*, retornar o tempo que o atu-

ador deve ficar acionado para irrigar o local. A autora relata que os resultados nas simulações demonstraram a eficácia e a viabilidade do sistema proposto na agricultura de precisão.

Putti *et al.* (2015) utilizaram a lógica *fuzzy* para estimar as taxas intermediárias de desenvolvimento das alfaces irrigadas no campo por dois tipos de água: água tratada com magnetismo e água comum (abastecimento local). Para isso, utilizaram cinco lâminas de reposição da evapotranspiração, 40, 60, 80, 100 e 125% e avaliaram o número de folhas da cultura em diferentes estádios de crescimento, com 15, 20, 25, 30 e 35 dias. O método estatístico de regressão polinomial múltipla foi utilizado para estimar o desenvolvimento da cultura. Após os 35 dias de crescimento das alfaces, os autores verificaram que a lâmina de 100% de água, tratada com magnetismo, produziu em média alfaces com 35 folhas, o maior número registrado, e com o desenvolvimento constante das plantas. As irrigadas com água comum, entretanto, apresentaram uma média de 32 folhas após os 35 dias de desenvolvimento. Com os dados obtidos, foram geradas 9 regras *fuzzy*, a partir de 2 entradas (lâmina de irrigação e dias após o transplante) e 5 variáveis de saída (número de folhas, massa fresca das folhas, massa seca das folhas, massa fresca das raízes e massa seca das raízes); por fim, os dados com o modelo *fuzzy* foram comparados com os obtidos pela regressão polinomial múltipla. Foi obtida correlação entre 95% e 99% entre os dados obtidos experimentalmente e aqueles resultantes da lógica *fuzzy*, enquanto que foi obtida correlação entre 73% e 98% entre a regressão e os dados obtidos. Os autores concluíram que a lógica *fuzzy* foi o método que melhor se ajustou aos dados.

Similarmente ao trabalho de Putti *et al.* (2015), JunHui *et al.* (2019) aplicaram um controlador *fuzzy* na irrigação de alfaces da variedade *Italian bolting lettuce* cultivadas em uma estufa, com o objetivo de aprimorar o método tradicional utilizado, que se baseia na quantidade de luz que as plantas recebem, para realizar a irrigação. Para isso, foram formuladas 125 regras *fuzzy* e dois sensores foram utilizados: um de umidade do solo, e um sensor de condutividade, para medir a quantidade de nutrientes presentes no solo. O experimento realizado utilizando sacos de substrato de 100 por 20 por 12 cm, e em cada saco de substrato foi plantado 4 mudas de alface. Durante a irrigação, a água fluiu através do orifício sob o saco de substrato, suprindo as necessidades hídricas das plantas e a água excedente era depositada no tanque de chorume. O sensor de umidade do solo foi inserido no saco de substrato, enquanto o sensor de condutividade elétrica foi instalado no tanque de coleta de chorume. Ao final do experimento, após 22 dias, os autores constataram que o controlador desenvolvido manteve a mesma produção que o método convencional de irrigação, no entanto, a uso de água foi reduzido, de 2,2 para 1,8 L de água por planta, resultando em uma economia de 18,18% de água, e, uma eficiência no uso de água ( $\text{gL}^{-1}$ ) de 63,64% e 78,89%, para o método tradicional e para o controlador *fuzzy*, respectivamente.

Krishnan *et al.* (2020) desenvolveram um sistema para irrigação inteligente utilizando lógica *fuzzy* cuja função foi atuar sobre uma bomba de água de maneira eficiente. O controlador foi desenvolvido utilizando um microcontrolador ATmega328P (Arduino UNO), alimentado utilizando energia renovável, através de um painel solar; e recebeu como entrada três parâmetros, fornecidos por um sensor de umidade do solo (YL-69), um sensor de temperatura ambiente (DHT11) e um sensor de chuva (YL-83). A comunicação GSM (*Global System for Mobile Communication* - Sistema Global para Comunicação Móvel) foi utilizada pra realizar a comunicação do controlador com um computador, para que o usuário pudesse acompanhar o status do sistema. Foram utilizadas 27 regras *fuzzy*, para realizar o controle da bomba de irrigação. O controlador proposto foi comparado com outras duas metodologias de irrigação: irrigação manual por gotejamento e irrigação manual por inundação (sulco). Os resultados indicaram que o controlador desenvolvido conseguiu ser o método mais econômico no uso da água, polpando 13,03% de água, em relação a irrigação manual por gotejamento, que ficou em segundo lugar.

A Tabela 2 apresenta o objetivo, a quantidade de parâmetros de entrada, o número de regras *fuzzy* utilizadas e o resultado dos trabalhos desenvolvidos por Patil, Kulkarni e Desai (2012), Feliciano (2013), Putti *et al.* (2015), JunHui *et al.* (2019) e Krishnan *et al.* (2020), selecionados quanto ao controle de irrigação na agricultura utilizando a lógica *fuzzy*.

Tabela 2: Trabalhos sobre controle de irrigação na agricultura usando lógica *fuzzy*.

Referência	Objetivo	Entradas	Núm. de regras	Resultado
Patil <i>et al.</i> (2012)	Produtividade	7	53	21%
Feliciano (2013)	Viabilidade	7	6 - 48	Viável
Putti <i>et al.</i> (2015)	Desenvolvimento	2	9	99%
JunHui <i>et al.</i> (2019)	Poupar água	2	125	18,18%
Krishnan <i>et al.</i> (2020)	Poupar água	3	27	13,03%

Fonte: O Autor.

Nota-se que os trabalhos pesquisados que envolvem controle de irrigação com lógica *fuzzy* têm diferentes propósitos: produtividade, avaliar viabilidade de uso ou poupar água. Todos eles indicaram algum ganho ao adotar técnica de controle por lógica *fuzzy*, embora alguns deles usaram somente da simulação para comprovar os conceitos. Merecem destaque também os trabalhos de Putti *et al.* (2015) e Moreira *et al.* (2019), que avaliaram diferentes lâminas de irrigação, e o melhor resultado foi para a adoção de 100 % de reposição da evapotranspiração.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo descreve a teoria relacionada com a pesquisa, aprofunda conceitos sobre a cultura da alface, irrigação, evapotranspiração, microcontrolador e lógica *fuzzy*.

#### 3.1 A CULTURA DA ALFACE

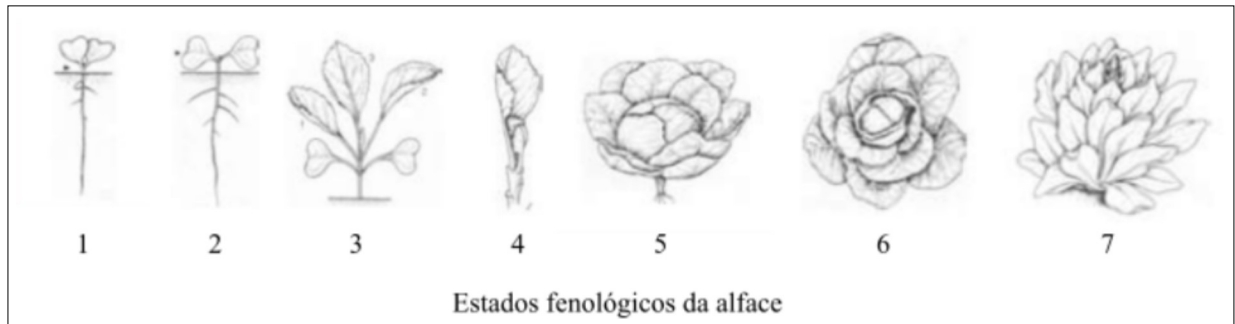
A alface (*Lactuca sativa*), pertence à família Asteraceae, sendo considerada a hortaliça folhosa de maior consumo no Brasil e a mais cultivada no mundo (BRAGA; CALGARA, 2010). O desenvolvimento da alface é bastante influenciado pelas condições ambientais. Por ser uma espécie originária de clima temperado, a cultura apresenta dificuldades de adaptação em locais de temperatura e luminosidade elevadas, o que prejudica seu crescimento e impede a expressão do potencial genético da espécie (SOUSA *et al.*, 2018).

No entanto, cultivares desenvolvidas e adaptadas à temperatura, umidade e fotoperíodo, têm sido utilizadas em todas as regiões brasileiras. Devido a sua alta perecibilidade, com o objetivo de diariamente ofertar um produto de qualidade ao consumidor, durante o ano todo, há uma disseminação de seu cultivo em todas as regiões brasileiras, contribuindo para a sua popularização (MALDONADE; MATTOS; MORETTI, 2014).

A alface apresenta sete estados fenológicos de desenvolvimento que devem ser observados para um manejo eficiente da cultura (LRSV, 2016). Cada estado é descrito a seguir e ilustrado na Figura 1:

- Estado 1: Emergência, ocorre logo a germinação da semente;
- Estado 2: Desenvolvimento dos folhas, primeiras folhas após a emergência;
- Estado 3: Quando é observada a terceira folha verdadeira (que possui nervuras) desenvolvida;
- Estado 4: Desenvolvimento das partes vegetativas, dando início da formação da cabeça;
- Estado 5: Ocorre no decorrer do desenvolvimento vegetativo da planta, com 50% do tamanho da cabeça atingido;
- Estado 6: Ao final do desenvolvimento das partes vegetativas, cabeça completamente desenvolvida; e
- Estado 7: Floração, também chamado de pendoamento, período em que a planta entra em sua fase reprodutiva.

Figura 1: Estados fenológicos da alface.



Fonte: LRSV (2016)

Assim como outras culturas folhosas, a alface é caracterizada por um sistema radicular superficial que exige um rigoroso controle de irrigação. Mesmo períodos relativamente curtos de umidade inadequada podem afetar a cultura. Logo, o manejo da umidade do solo ao longo do período de crescimento é um fator crítico para uma boa produção e com qualidade (BRAGA; CALGARA, 2010).

Marouelli *et al.* (2011) comentam que o horário de irrigação geralmente não influencia o desenvolvimento da planta. No entanto, há condições meteorológicas que podem ser evitadas, para otimizar a irrigação, por exemplo, alta incidência solar e sugere-se iniciar a irrigação no final do dia, quando a incidência solar está baixa, diminuindo a perda de água por evaporação. A Tabela 3 apresenta as principais características da alface e condições ideais para um bom desenvolvimento da planta.

Tabela 3: Parâmetros ideais para a alface.

Variável	Valor
Umidade do solo (%)	Próximo a Capacidade de Campo
Ciclo Inverno (Dias)	60 - 90
Ciclo Verão (Dias)	21 - 30
Faixa de Temperatura (°C)	4 - 27
pH do Solo	5,8 - 7,2
Condutividade Elétrica ( $dS m^{-1}$ )	1,3
Necessidade hídrica (mm)	140 - 170

Fonte: Maldonade, Mattos e Moretti (2014), Resende *et al.* (2015).

### 3.2 IRRIGAÇÃO

A finalidade da irrigação é disponibilizar água às plantas, para que possam se desenvolver de forma adequada (RAMADAN *et al.*, 2018). A técnica, ao longo do tempo, vem sendo aprimorada. Atualmente são sistemas pontuais, onde a água é aplicada no momento, em local e quantidade corretas para suprir as necessidades da planta (BRAGA; CALGARA, 2010; ORTOLA;

KNOX, 2014).

A água é o principal constituinte vegetal da alface, totalizando cerca de 90% da massa de matéria verde. Além disso, de todos os recursos que a planta necessita para crescer e funcionar, a água é o mais necessário (SEMERARO *et al.*, 2019). No entanto, a água presente no solo e nas plantas é continuamente perdida para atmosfera pelo processo de evapotranspiração, de forma que quando a perda decorrente da evapotranspiração excede a absorção de água pelas raízes, a planta entra em déficit hídrico (ADEYEMI *et al.*, 2018a, 2018b).

O estresse hídrico, porém, pode ocorrer em uma cultura não apenas pelo déficit de água, mas também quando a quantidade de água no solo é excessiva (HARO-MONTEAGUDO; KNOX; HOLMAN, 2019). Quando os níveis de oxigênio presentes no solo são reduzidos devido ao encharcamento por um longo período de tempo, o sistema de radicular pode ser severamente danificado.

Alface e plantas de folhas verdes são especialmente suscetíveis ao estresse hídrico devido aos seus sistemas radiculares rasos (TOUATI *et al.*, 2013). Ainda segundo Touati *et al.* (2013), o estresse hídrico na cultura da alface pode levar a quatro problemas principais: redução da produtividade (folhas menores, senescência (envelhecimento) foliar); produtos de má qualidade (em termos de firmeza, tamanho da cabeça e cor); apodrecimento das raízes; e atraso na colheita.

Especialmente no final do ciclo da alface, a irrigação em excesso pode reduzir a qualidade e a vida de prateleira (pós-colheita). Adicionalmente, a irrigação irregular ou excedente, acima da quantidade necessária para substituir a evapotranspiração, causa lixiviação de nutrientes, especialmente o nitrogênio, levando-o abaixo da zona radicular (HARO-MONTEAGUDO; KNOX; HOLMAN, 2019). Para PAULINO *et al.* (2009) e CHAVES (2018) a quantidade de água no solo deve ser próxima a CC (Capacidade de Campo), que é a quantidade máxima de água que o solo consegue absorver, sem que haja sua saturação.

### 3.2.1 Técnicas de Irrigação

As técnicas de irrigação mais utilizadas são descritas a seguir (ORTOLA; KNOX, 2014):

- Gotejamento: Nesse sistema de irrigação localizada, a água é levada sob pressão por tubos, até ser aplicada ao solo, através de emissores, diretamente sobre a zona da raiz da planta, em alta frequência e baixa intensidade. Segundo Ortola e Knox (2014), a técnica de irrigação por gotejamento possui uma eficiência de rega (*ER*) na ordem de 90%, ou seja, apenas 10% da água não chega a raiz das plantas.

- **Aspersão Convencional:** Neste tipo de irrigação são lançados jatos de água ao ar que caem sobre a cultura na forma de chuva. Esse método possui  $ER$  em torno de 65%.
- **Microaspersão:** A microaspersão possui uma  $ER$  maior que a aspersão convencional (90%), pois distribuem a água próximo a raiz das plantas, sendo muito utilizada para a irrigação de culturas perenes. Também é considerada irrigação localizada, porém, a vazão dos emissores (chamados microaspersores) é maior que a dos gotejadores.
- **Pivô central:** O sistema consiste basicamente de uma tubulação metálica onde são instalados os aspersores e que recebe a água de um dispositivo central sob pressão, chamado de pivô. Estruturalmente, a tubulação se apoia em torres metálicas triangulares, montadas sobre rodas, geralmente com pneu; e as torres movem-se continuamente acionadas por dispositivos elétricos ou hidráulicos, e realiza movimentos concêntricos ao redor do pivô. O movimento da última torre inicia uma reação de avanço em cadeia de forma progressiva para o centro.
- **Canhão Hidráulico:** Trata-se de um aspersor de grande porte (denominado canhão) que é manobrado manualmente. Por aplicar água a grandes distâncias, a eficiência do canhão é prejudicada pelo vento.
- **Sulco:** A distribuição da água se dá por gravidade através da sulcos abertos na superfície do solo, ao lado da linha onde se encontra plantada a cultura.

Para Nawandar e Satpute (2019), o sistema de irrigação por gotejamento é o que melhor se ajusta em termos de disponibilidade de água. Suas características de uniformidade de aplicação e redução do consumo hídrico o torna extremamente atraente para estimar a quantidade de água usada na irrigação.

### 3.2.1.1 Irrigação por Gotejamento

Para o cálculo da quantidade de água a utilizada pela técnica de gotejamento, são empregadas as Equações 1 e 2. Na Equação 1 é obtida a lâmina líquida ( $LL$ ), em  $\text{mm.m}^2$ , que é dada pela evapotranspiração acumulada da cultura ( $ET_c$ ), em  $\text{mm.m}^2$ , menos a precipitação efetiva ( $Pe$ ), em  $\text{mm.m}^2$ , que é a quantidade de água da chuva utilizada pela cultura, durante o turno de rega ( $TR$ ), que pode variar entre 1 e 3 dias, ou seja, irrigações diárias, de dois em dois dias, e assim sucessivamente (ALBUQUERQUE, 2010).

$$LL = \sum_i^{TR} ETc_i - Pe \quad (1)$$



Albuquerque (2010) comenta que nenhum sistema de irrigação é 100% eficiente, sendo necessário realizar uma normalização para cada tipo de irrigação. Para o sistema de irrigação por gotejamento, utiliza-se a Equação 2, que divide  $LL$  pela eficiência de rega ( $ER$ ), resultando na lâmina bruta ( $LB$ ), em  $\text{mm.m}^2$ , que é a quantidade real de água que deve ser disponibilizada para suprir as necessidades da hídricas da cultura.

$$LB = \frac{LL}{ER} \quad (2)$$

### 3.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO ( $ET$ )

A evapotranspiração ( $ET$ ) representa a perda total de água na forma de vapor, em  $\text{mm.m}^2$ , pela superfície de uma área vegetada. Essa perda é dividida entre os processos de evaporação do solo e transpiração pelas plantas (ALLEN *et al.*, 1998; COSTA, 2018).

O volume de água evapotranspirada depende principalmente das características da cultura, como espécie e estágio de crescimento; das condições meteorológicas e climáticas, como a disponibilidade de energia solar; além de fatores de manejo e outros (ALLEN *et al.*, 1998). Segundo COSTA (2018), a estimativa da evapotranspiração é fundamental, tanto do ponto de vista dos fatores de produção, quanto para fins de planejamento, dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação.

#### 3.3.1 Evapotranspiração de Referência ( $ET_o$ )

A evapotranspiração de referência,  $ET_o$ , refere-se a lâmina ( $\text{mm.m}^2$ ) que seria utilizada por uma superfície coberta por vegetação hipotética, com altura de 8 a 15 cm, albedo (luz solar refletida) de 23%, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem restrição de água (ALLEN *et al.*, 1998).

A  $ET_o$  pode ser calculada a partir de dados meteorológicos. O método Penman-Monteith FAO (PM FAO) é recomendado como o único método padrão para a definição e cálculo da evapotranspiração de referência (ALLEN *et al.*, 1998; COSTA, 2018). Esse método requer dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento.

##### 3.3.1.1 Modelo de Penman-Monteith

O trabalho de Allen *et al.* (1998), da FAO – *Food and Agriculture Organization* (Organização para Alimentação e Agricultura), pertencente a ONU (Organização das Nações Unidas),

foi um documento decisivo para a utilização do modelo de Penman-Monteith (PM FAO) como método padrão para o cálculo da  $ET_o$ , por ser o mais completo e por fornecer estimativas confiáveis em qualquer condição climática. O método de PM FAO requer informações meteorológicas de temperatura, umidade do ar, radiação solar e velocidade do vento, e assume a definição de evapotranspiração e superfície de referência propostas nesse mesmo documento.

Em virtude da parametrização, pela FAO, da equação de Penman-Monteith, atualmente alguns métodos empíricos são avaliados tomando PM FAO como referência (COSTA, 2018). Uma das vantagens desse método foram os novos procedimentos de cálculo para parâmetros climáticos e dados meteorológicos, sendo possível estimar as variáveis meteorológicas ausentes necessárias para o cálculo de  $ET_o$ . Com isso, é possível estimar a  $ET_o$  com o método PM FAO em todas as circunstâncias, mesmo no caso de dados climáticos ausentes (ALLEN *et al.*, 1998; COSTA, 2018).

Para a estimativa de  $ET_o$  pelo método de PM FAO utiliza-se a Equação 3 (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \frac{\gamma 900U_2(e_s - e_a)}{T+273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (3)$$

onde  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura ( $kPa^\circ C^{-1}$ );  $Rn$  é o saldo de radiação diário ( $MJm^{-2}dia^{-1}$ );  $G$  é o fluxo total diário de calor no solo ( $MJm^{-2}dia^{-1}$ );  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico ( $kPa^\circ C^{-1}$ );  $U_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura ( $ms^{-1}$ );  $e_s$  é a pressão de saturação de vapor ( $kPa$ );  $e_a$  é a pressão atual de vapor ( $kPa$ ); e  $T$  é a temperatura média do ar ( $^\circ C$ );

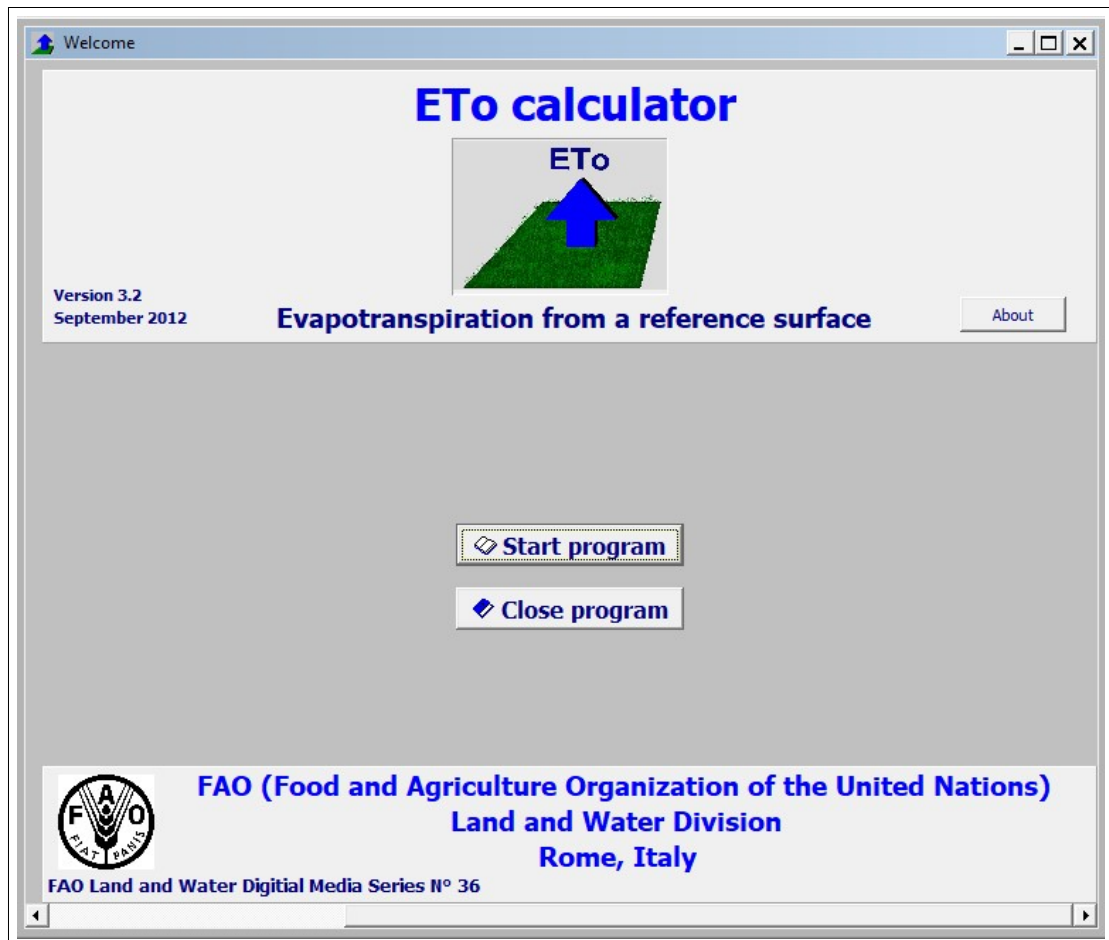
### 3.3.1.2 Software The ETo Calculator

O software *ETo Calculator* possui como objetivo auxiliar no cálculo da  $ET_o$ , através de uma interface gráfica para computador, e está disponível gratuitamente na Internet. A partir de dados meteorológicos e por meio da equação de PM FAO, o software retorna o valor da  $ET_o$ . Os dados podem ser fornecidos diariamente, de dez em dez dias ou mensalmente. Ainda é possível utilizar uma ampla variedade de unidades para os dados especificados como parâmetros climáticos de entrada (RAES, 2009).

O software (Figura 2) deve ser configurado para a localidade onde se deseja obter o cálculo de  $ET_o$ , inserindo as coordenadas geográficas (latitude e longitude) do local. Possui uma tela de configurações dos dados de entrada, onde devem ser configurados o tipo de dado e a unidade de medida, para a temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento, e bri-

lho e radiação solar. Recentemente trabalhos utilizaram o software *The ETo Calculation* como referência para comparação com os sistemas computacionais desenvolvidos academicamente (ZELEKE; LUCKETT; COWLEY, 2011; SOUSA, 2012; REIS; SOUZA, 2019; SANTOS; SOUZA, 2020).

Figura 2: Tela inicial do software *The ETo Calculation* versão 3.2 de 2012.



Fonte: Allen *et al.* (1998), Raes (2009).

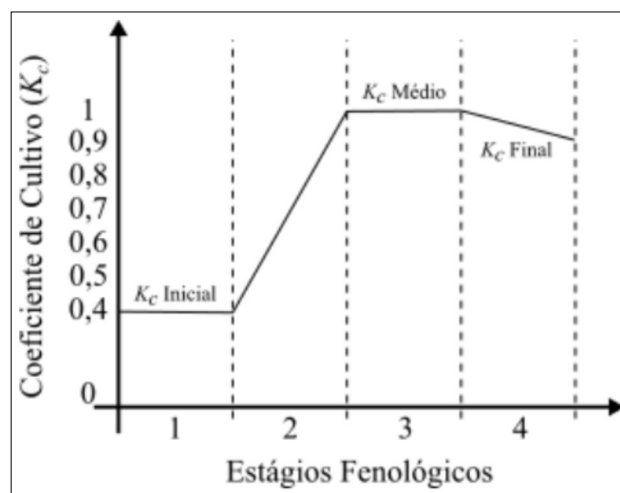
### 3.3.2 Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ )

O efeito da transpiração da cultura (característico da cultura) e os efeitos médios da evaporação do solo são integrados em um único coeficiente de cultura  $K_c$  (ALLEN *et al.*, 1998; ALBUQUERQUE; RESENDE, 2020).

Allen *et al.* (1998) relatam que, para a alface, o  $K_c$  médio recomendado é 1, e recomendam, para fins de planejamento, gerenciamento da irrigação e desenvolvimento de esquemas básicos de irrigação, a utilização dos coeficientes médios de cultura, pois são relevantes e mais convenientes do que o  $K_c$  calculado em uma etapa diária. A Figura 3 apresenta a evolução do  $K_c$  da planta, no decorrer de seu estágio fenológico, relacionando com os estados da alface, sendo:

- Estágio 1: Germinação, estado 1;
- Estágio 2: Desenvolvimento das folhas, até a terceira folha verdadeira, correspondente aos estados 2 e 3;
- Estágio 3: Desenvolvimento das partes vegetativas, que corresponde ao início da formação da cabeça até 50% do seu tamanho típico, estados 4 e 5; e
- Estágio 4: Final do desenvolvimento vegetativo, com tamanho, formato e firmeza da cabeça típicos, estado 6.

Figura 3: Coeficiente de cultura ( $K_c$ ) em diferentes estágios de desenvolvimento, sob alta umidade relativa do ar ( $UR$ ) > 70%) e vento fraco (velocidade <  $5 \text{ ms}^{-1}$ ).



Fonte: Allen *et al.* (1998), Segovia e Filho (2004), Allen *et al.* (2006).

### 3.3.3 Evapotranspiração da Cultura ( $ET_c$ )

A evapotranspiração da cultura consiste no consumo hídrico de uma determinada planta ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, em que esta vai crescendo e ocupando espaço. A cultura deve estar em bom estado fitossanitário, e em boas condições hídrica e nutricional, para que possa se desenvolver bem, expressando seu potencial genético (ALLEN *et al.*, 1998; ALBUQUERQUE; RESENDE, 2020).

A evapotranspiração da cultura é um fator importante para a irrigação, tanto no dimensionamento de projetos quanto no manejo. Ela constitui a quantidade de água a ser aplicada no solo, considerando o clima da região, para satisfazer a necessidade hídrica da planta, a fim de manter seu crescimento e produtividade em níveis compatíveis com o preestabelecido geneticamente (ALLEN *et al.*, 1998).

A  $ET_c$  pode ser bastante afetada pelo manejo da cultura. Como exemplo, pode-se citar a prática da irrigação localizada e os cultivos em sistema de plantio direto, que reduzem dras-

ticamente a  $ET_c$  por provocarem diminuição na evaporação da água contida no solo (COSTA, 2018; ALBUQUERQUE; RESENDE, 2020).

### 3.3.4 Reposição da Evapotranspiração

A reposição da evapotranspiração, consiste em repor a água perdida pela planta e pelo solo durante um período, com o objetivo de manter as condições ideais para o bom desenvolvimento da planta. Para realizar o cálculo da  $ET_c$  e saber a quantidade de água perdida pela planta e pelo solo, é usada a Equação 4 (NAWANDAR; SATPUTE, 2019):

$$ET_c = ET_o K_c \quad (4)$$

onde  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm.m}^2.\text{dia}^{-1}$ );  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm.m}^2.\text{dia}^{-1}$ ); e  $K_c$  é o coeficiente da cultura.

## 3.4 PLATAFORMA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA ARDUINO

O Arduino é uma PCI (Placa de Circuito Impresso) que tem como principal componente o microcontrolador ATmega da fabricante Atmel. Esse microcontrolador possui pinos digitais que podem ser utilizados como entrada e/ou saída de sinal e, dentre estes pinos, alguns podem ser utilizados como saída PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação de Largura de Pulso), para controle de atuadores, por exemplo; e pinos de entrada para recebimento e conversão de sinais analógicos para digitais. Para o *clock* do microcontrolador é utilizado um cristal oscilador de 16 MHz. Para realizar a programação do microcontrolador há uma conexão USB (comunicação serial) que permite que *firmwares* sejam carregados na memória programável do microcontrolador (ARDUINO, 2019b).

Dentre os diversos modelos de Arduino, três se destacam: Arduino Mega, Arduino Uno e Arduino Nano, que foram desenvolvidos para suprir as necessidades de diferentes projetos, como os que precisam de mais capacidade de armazenamento para código, ou os que necessitam de mais entradas e saídas digitais, por exemplo. A Tabela 4 apresenta as características dos três Arduinos popularmente utilizados; vale indicar que as diferenças na quantidade de pinos, memória programável e preço, são fatores importantes para a escolha do microcontrolador (SINGH; SAIKIA, 2016; ARDUINO, 2019b, 2019a)

Tabela 4: Especificações dos Arduino Mega, Arduino Uno e Arduino Nano.

<b>Id.</b>	<b>Item</b>	<b>Arduino Mega</b>	<b>Arduino Uno</b>	<b>Arduino Nano</b>
1	Microcontrolador	ATmega2560	ATmega328P	ATmega328
2	Tensão de Operação (V)	5	5	5
3	Tensão de Alimentação (V)	7 - 12	7 - 12	7 - 12
4	Pinos Digitais E/S	54	14	22
5	Pinos de Entrada Analógica	16	6	8
6	Corrente por pino E/S (mA)	20	20	40
7	Corrente do pino 3.3 V (mA)	50	50	
8	Memória Programável (kB)	256	32	32
9	SRAM (kB)	8	2	2
10	EEPROM (kB)	4	1	1
11	Velocidade de Clock (MHz)	16	16	16
12	Comprimento (mm)	101,52	68,6	45
13	Largura (mm)	53,3	53,4	18
14	Peso (g)	37	25	7
15	Preço (R\$)	79,95	38,90	29,90

Fonte: MERCADO LIVRE (2020).

### 3.4.1 Biblioteca eFLL

Desenvolvida pelo RRG (*Robotic Research Group*) - Grupo de Pesquisa em Robótica, na Universidade Estadual do Piauí (UESPI - Teresina), a biblioteca eFLL (*Embedded Fuzzy Logic Library* - Biblioteca Fuzzy para Arduino e Sistemas Embarcados) é uma opção versátil, leve e eficiente de trabalhar com a lógica *fuzzy* em sistemas embarcados (ALVE *et al.*, 2019).

Escrita em C++/C, usa apenas a biblioteca padrão da linguagem C "stdlib.h", por isto, a eFLL é uma biblioteca destinada não somente ao Arduino, mas qualquer sistema embarcado ou não que tenha seus comandos escritos em C.

A biblioteca eFLL não possui limitações explícitas de quantidade de conjuntos *fuzzy*, regras *fuzzy*, entradas ou saídas. Essas limitam-se a capacidade de processamento e de armazenamento de cada microcontrolador. A biblioteca utiliza o método max-min e mínimo de Mamdani, para a inferência; e composição e centro de gravidade, para a defuzzificação (MAMDANI, 1977; ALVE *et al.*, 2019).

### 3.4.2 Sensor de Umidade do Solo

Um sensor é definido como um dispositivo capaz de converter uma quantidade física, química ou biológica de entrada em outra (geralmente elétrica) na sua saída, para fins de medição e/ou monitoramento, por um microcontrolador ou CLP (Controlador Lógico Programável) (STEVAN JR; SILVA, 2015). Segundo Aguirre (2013) e Khanna *et al.* (2014), entre os tipos de

sensor para determinar a umidade do solo, os principais são:

- **Sensor Capacitivo:** O funcionamento deste sensor baseia-se na variação do campo elétrico no espaço em frente aos seus eletrodos (zona ativa). No caso de um sensor de umidade capacitivo, este terá a resposta na saída alterada quando o meio onde o sensor está inserido apresentar mudanças na quantidade de água em sua zona ativa. O sensor capacitivo é composto por um circuito de oscilador RC (Resistor e Capacitor) integrado. Com a alteração em sua zona ativa, o valor da capacitância é alterada. Com a variação da capacitância, a frequência do circuito oscilador muda, e esta mudança de frequência é enviada para um outro circuito chamado de detector, onde este irá transformar a variação da frequência ocasionada pela variação da capacitância em sinal de tensão. (AGUIRRE, 2013; SOUZA *et al.*, 2013, 2018).
- **Sensor Resistivo:** O funcionamento deste sensor baseia-se na variação da resistência elétrica do solo que está entre seus eletrodos (zona ativa). Quando a água penetra no solo, a resistência do mesmo é alterada, pois a água é um condutor de corrente elétrica, assim o sensor é acionado. Quanto mais úmido o solo, menor resistência à passagem de corrente elétrica, ocorrendo o contrário quando o solo está seco. O circuito de saída desse sensor é mais simples, se comparado com o do sensor capacitivo, podendo ser apenas composto por um divisor de tensão (AGUIRRE, 2013; JAMES; MAHESHWAR, 2016; AFOLABI *et al.*, 2019).

#### 3.4.2.1 *Sensor DM v1.2*

O sensor DM v1.2 (Figura 4) é um sensor capacitivo de umidade do solo, com saída analógica. Em formato de seta, possui um circuito oscilador baseado no CI (Circuito Integrado) 555, onde a variação de capacitância, resulta na variação de frequência, a qual é convertida em tensão na saída do CI (DIYMORE, 2020).

A sonda conta também com isolamento, protegendo-a contra curto e corrosão, aumentando assim sua vida útil, e fazendo parte do cálculo da capacitância, em paralelo com o segundo dielétrico (solo úmido) entre os eletrodos. Outra característica do sensor DM v1.2 é a exposição de seu circuito ao meio, pois não há proteção do mesmo, sendo necessário um cuidado adicional quando em uso. As principais características desse sensor estão apresentadas na Tabela 5.

Figura 4: Sensor capacitivo DM v1.2 de umidade do solo.



Fonte: Diymore (2020).

Tabela 5: Especificações do Sensor DM v1.2

<b>Id.</b>	<b>Item</b>	<b>Descrição</b>
1	Tensão de Alimentação (V)	3,3 - 5
2	Corrente de Operação (mA)	5
3	Tensão de Saída (V)	0 - 3,3
4	Comprimento (mm)	99
5	Largura (mm)	16
6	Peso (g)	15
7	Modelo do Conector	PH2.0-3P
8	Fabricante	Diy More
9	Preço (US\$)	8,99

Fonte: Diymore (2020)

#### 3.4.2.2 Caracterização do Sensor DM v1.2

A caracterização de um sensor analógico se faz necessária pois, diferentemente dos sensores digitais, que retornam os valores prontos da grandeza em análise, por meio de seu pino digital de saída (exemplo: sensor digital DHT11), os sensores analógicos transformam a grandeza que está sendo medida em uma grandeza elétrica (tensão) em seu pino saída; e esse valor analógico, ao ser convertido para digital, em um microcontrolador, precisa ser convertido por meio de um *firmware* para o valor correspondente analógico, para que possa ser interpretado (RADI *et al.*, 2018; NAGAHAGE; NAGAHAGE; FUJINO, 2019) .

O método gravimétrico (Equação 5) pode ser utilizado para determinar a umidade em uma amostra de solo, e, com isto, pode ser utilizado para realizar a caracterização do sensor DM v1.2, bastando saber a proporção da mistura entre solo seco e água (NAGAHAGE; NAGAHAGE; FUJINO, 2019; HRISKO, 2020).



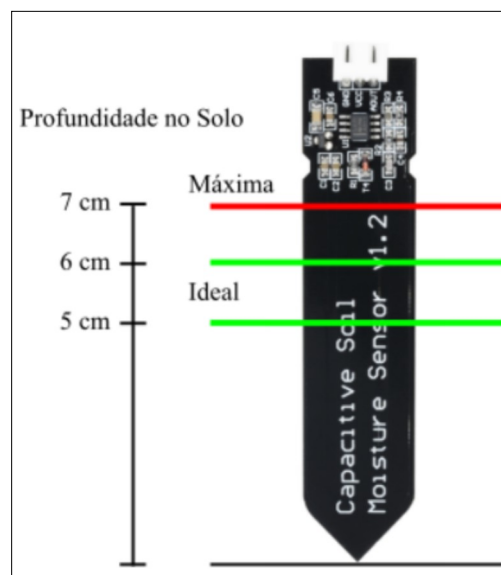
$$Umidade\ do\ solo\ (\%) = \frac{Massa\ da\ \grave{a}gua\ (g)}{Massa\ do\ solo\ (g)} \cdot 100 \quad (5)$$

Dessa forma, amostras com diferentes umidades podem ser geradas para que o sensor realize leituras das mesmas, com o objetivo de observar a variação em seu sinal de saída, para cada valor de umidade gerada nas amostras. Nagahage, Nagahage e Fujino (2019) relatam que as amostras devem ser preparadas e armazenadas por 24 horas, para homogeneização da mistura solo-água, e que as leituras devem ser feitas em ambiente controlado, com temperatura estável, para evitar interferências do meio nas leituras do sensor.

Após a preparação das amostras, o sensor deve ser inserido na amostra. Radi *et al.* (2018) e Diymore (2020) relatam que deve ser observado o limite máximo de 7 cm de profundidade de inserção do sensor (Figura 5), para não ocasionar danos ao entrar em contato com o solo, pois ele possui seu circuito exposto. Nagahage, Nagahage e Fujino (2019) comentam que o sensor deve ser mantido ligado por 10 minutos, após sua inserção na amostra, para que a leitura se estabilize, e que os valores fornecidos pelo sensor sejam armazenados após este intervalo.

Após a obtenção dos dados de todas as amostras, é possível gerar sua curva de caracterização, que será utilizada no *firmware* do controlador.

Figura 5: Especificações de uso do sensor, quanto a profundidade de trabalho no solo.



Fonte: O Autor.

### 3.5 LÓGICA FUZZY

A Lógica *Fuzzy* foi primeiramente introduzida na década de 1930 pelo filósofo e lógico polonês Jan Lukasiewicz (1878 - 1956). Através do estudo de termos do tipo alto, baixo e quente, ele propôs a utilização de um intervalo de valores  $[0, 1]$  que indicaria a possibilidade de uma declaração ser verdadeira ou falsa (KNEALE, 1952).

Kneale (1952), em 1949, assistiu a uma palestra do professor J. Lukasiewicz na *University College* em Dublin (capital da Irlanda) e relata que, segundo o professor J. Lukasiewicz, em 1939, ele estava preparando uma monografia sobre o assunto em polonês, mas a prova impressa, manuscritos e todos os seus livros foram destruídos por um bombardeio em setembro daquele ano (Batalha de Varsóvia, 12 a 29 de set. de 1939 (CORUM, 2013)). Somente depois que ele se estabeleceu em Dublin, após a guerra, foi possível retomar seu trabalho.

Paralelamente aos trabalhos de J. Lukasiewicz, em 1937, o filósofo Max Black (1909 - 1988) publicou um artigo intitulado *Vagueness An exercise in logical analysis* (Imprecisão Um exercício de análise lógica), onde propôs a ideia de que a continuidade descrevia graus, definiu o primeiro conjunto *fuzzy*, e descreveu algumas ideias básicas de operações com conjuntos (BLACK, 1937).

No entanto, somente em 1965, a lógica *fuzzy* seria apresentada como é conhecida hoje, quando o matemático, engenheiro eletricitista em eletrônica e cientista da computação estadunidense, nascido no Azerbaijão, Lotfali Askar-Zadeh (1921 - 2017), publicou o artigo *Fuzzy Sets\**, que ficou conhecido como a origem da Lógica *Fuzzy* (ZADEH, 1965).

Em língua inglesa o termo *fuzzy* pode ter vários significados, que variam de acordo com o contexto de interesse; mas o conceito básico desse adjetivo é: vago, indistinto ou incerto. As tentativas de tradução para o português ainda não são unanimidade: "nebuloso", "difuso" e "multivalorada" são exemplos mais populares de traduções para *fuzzy*.

A chamada lógica booleana, desenvolvida em 1847 pelo matemático e filósofo britânico George Boole (1815 - 1864), utiliza distinções bem definidas para separar conjuntos (BOOLE, 2009). Por exemplo, pode-se dizer que o solo com 30% de umidade está seco ou úmido, nunca os dois. Isso força a construção de linhas que diferenciem membros dos não membros de uma classe. Essa divisão, muitas vezes, é um processo complicado e que não reflete a realidade do problema a ser modelado.

A lógica *fuzzy*, por outro lado, a reflete a maneira como as pessoas pensam, tentando modelar o seu senso de palavras, tomada de decisão ou senso comum (ZADEH, 1965). Como consequência, com o surgimento da lógica *fuzzy* foi possível conduzir pesquisas para sistemas

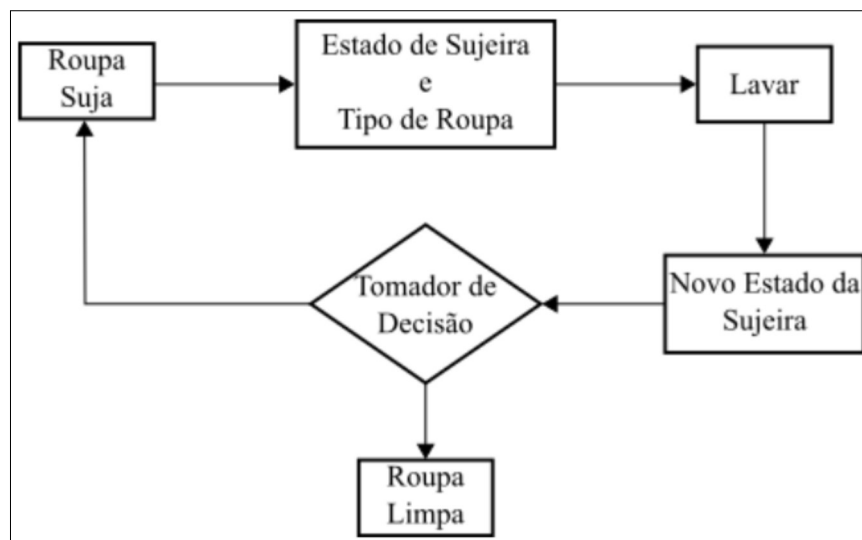
inteligentes mais similares ao humano e mais adequados à realidade (MAMDANI; ASSILIAN, 1975; MCNEILL; THRO, 1994; LI *et al.*, 2019).

Um exemplo de sentença em que pode ser utilizada a lógica *fuzzy* é: "Embora o solo esteja um pouco úmido, pode-se irrigá-lo por mais um tempo". Nessa frase existem dois termos: "um pouco" e "um tempo" subjetivos e difíceis de representar. Para um especialista que esteja conversando com outro especialista, o entendimento poderia acontecer. No entanto, durante o processo de construção de sistemas computacionais baseados em lógica booleana, é complicado para o analista de dados entender e representar esse tipo de conhecimento.

### 3.5.1 Sistemas Baseados em Regras *Fuzzy*

No cotidiano, as ações humanas operam diversos sistemas do mundo real, por meio de informações imprecisas. Cada indivíduo age como uma "caixa preta", ou seja, recebe informações, as interpreta segundo seus parâmetros e então executa uma ação. Um especialista em lavar roupas, por exemplo, é capaz de lavá-las a ponto de deixá-las limpas, segundo o seu conceito de limpeza (ZADEH, 1973; SILVA, 2011). A Figura 6 apresenta um esquema simplificado das ações desse controlador humano na execução da tarefa de lavar roupas.

Figura 6: Exemplo de controlador humano.



Fonte: O autor.

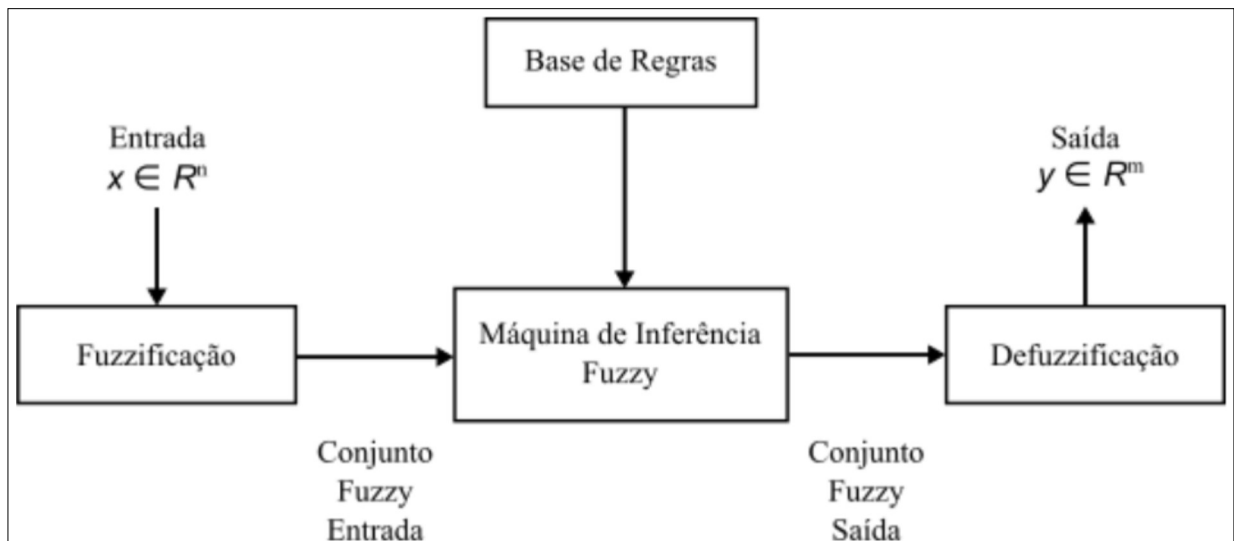
O controle e execução de tarefas pelo controlador eletrônico *fuzzy* devem seguir uma sequência de "passos" linguísticos, traduzidos por um conjunto de regras capazes de serem decodificadas (ZADEH, 1973; SILVA, 2011). Um possível caminho para a automação da tarefa de lavar roupas, descritos por regras, poderia ser:

- Regra 1: **Se** a roupa é "grossa" e a sujeira é "difícil", **então** lava-se "em muito tempo".

- Regra 2: **Se** a roupa é "grossa" e a sujeira é "fácil", **então** lava-se "em tempo médio".
- Regra 3: **Se** a roupa é "fina" e a sujeira é "fácil", **então** lava-se "em pouco tempo".
- Regra 4: **Se** a roupa é "fina" e a sujeira é "difícil", **então** lava-se "em pouco tempo".

Sistemas baseados em regras *fuzzy* contém quatro componentes: um processador de entradas (fuzzificação); uma coleção de regras *fuzzy*, também chamadas de base de regras; uma máquina de inferência *fuzzy*; e um processador de saída (defuzzificação) (MCNEILL; THRO, 1994; SILVA, 2011), como apresentado na Figura 7, onde  $x$  e  $y$  são conjuntos *fuzzy* de entrada e saída, pertencente as coleções de regras  $R^n$  e  $R^m$ , respectivamente.

Figura 7: Exemplo de controlador *fuzzy*.



Fonte: O autor.

### 3.5.2 Variáveis linguísticas, funções de pertinência e regras de inferência

Esta seção apresenta os conceitos teóricos necessários para a compreensão dos demais conceitos da lógica *fuzzy*.

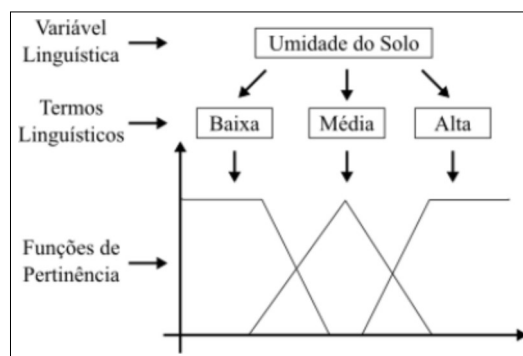
#### 3.5.2.1 Variáveis linguísticas

As variáveis linguísticas permitem a representação de informações que estão normalmente disponibilizadas de forma qualitativa; ou seja, são variáveis cujos possíveis valores são palavras ou frases, ao invés de números, podendo ser representadas mediante um conjunto *fuzzy*. Elas são expressas qualitativamente através de termos linguísticos, fornecendo um conceito a

variável, e quantitativamente, por uma função de pertinência (ZADEH, 1965; MAMDANI; ASSILIAN, 1975).

A cada variável linguística de entrada, devem ser atribuídos termos linguísticos, que representam os possíveis estados desta variável. Além disso, deve-se associar um conjunto *fuzzy* a cada termo linguístico de entrada, por meio de uma função de pertinência. Por exemplo, a Figura 8 apresenta a variável linguística "Umidade do solo", que pode ter o conjunto de termos linguísticos Baixa, Média, Alta, sendo que cada termo linguístico representa um conjunto *fuzzy* específico (ZADEH, 1965; MAMDANI; ASSILIAN, 1975).

Figura 8: Representação de variável linguística, termos linguísticos e funções de pertinência.



Fonte: O autor.

### 3.5.2.2 Funções de pertinência

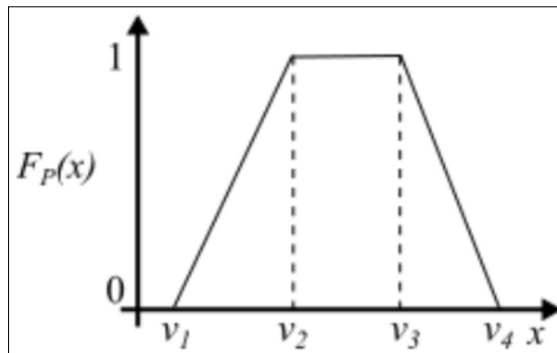
As funções de pertinência relacionam um valor *crisp* (número)  $\in \mathbb{R}$  a um termo linguístico. Como resultado, é gerado um valor *fuzzy*  $\in [0,1]$ , que pode ser interpretado como a relevância do termo linguístico para a regra *fuzzy*, onde 0 representa nenhuma relevância e 1 representa relevância máxima do termo linguístico (estado da variável). As funções de pertinência transformam entradas *crisp* em valores *fuzzy*, e podem ser elaboradas, dentre outros, com os formatos trapezoidal e triangular (ZADEH, 1965; MAMDANI; ASSILIAN, 1975).

#### Função trapezoidal

A função de pertinência do tipo trapezoidal, Figura 9, é definida pela função  $F_P = (V, x)$ , que depende das variáveis  $V$  e  $x$ . O vetor de parâmetros  $V = (v_1, v_2, v_3, v_4)$  é usado na construção da função de pertinência, a qual é avaliada no ponto  $x$  pela Equação 6, onde  $v_1, v_2, v_3, v_4$  e  $x$  pertencem ao conjunto universo de discurso  $U$  (MAMDANI; ASSILIAN, 1975).

$$F_p(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq v_1; \\ \frac{x-v_1}{v_2-v_1} & \text{se } x \in (v_1, v_2); \\ 1 & \text{se } x \in [v_2, v_3]; \\ \frac{(v_4-x)}{v_4-v_3} & \text{se } x \in (v_3, v_4); \\ 0 & \text{se } x \geq v_4. \end{cases} \quad (6)$$

Figura 9: Função trapezoidal, com valores do vetor  $V$  diferentes entre si.



Fonte: O autor.

### Função triangular

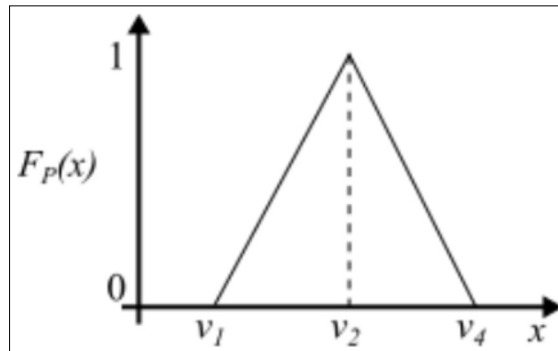
A função de pertinência triangular, Figura 10, é um caso particular da função trapezoidal, bastando o valor de parâmetros  $V$  ter duas de suas coordenadas iguais; por exemplo, se as coordenadas  $v_2$  e  $v_3$  coincidem, então  $V = (v_1, v_2, v_2, v_4)$  (MAMDANI; ASSILIAN, 1975). Assim, a função de pertinência é dada pela Equação 7:

$$F_p(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq v_1; \\ \frac{x-v_1}{v_2-v_1} & \text{se } x \in (v_1, v_2); \\ 1 & \text{se } x = v_2; \\ \frac{(v_4-x)}{v_4-v_2} & \text{se } x \in (v_2, v_4); \\ 0 & \text{se } x \geq v_4. \end{cases} \quad (7)$$

#### 3.5.2.3 Regras de Inferência Fuzzy

Uma regra *fuzzy* é uma sentença da forma 'Se  $X$  é  $A$  então  $Y$  é  $B$ ', onde  $X$  e  $Y$  são variáveis linguísticas, e  $A$  e  $B$  são termos linguísticos de  $X$  e  $Y$ , respectivamente. Tal regra pode ser interpretada como uma relação *fuzzy*  $R$  entre  $A$  e  $B$  cuja função de pertinência  $\varphi_R(x, y)$  (Equação 8) depende das funções de pertinência  $\varphi_A(x)$  e  $\varphi_B(y)$  para cada  $(x, y) \in X \times Y$  (produto cartesiano entre os conjuntos  $X$  e  $Y$ ), ou seja,  $R = A \times B$ . Essa foi a modelagem dada

Figura 10: Função triangular, com parâmetros  $v_2$  e  $v_3$  do vetor  $V$  iguais.



Fonte: O autor.

por Mamdani para representar a regra 'Se X é A então Y é B' (MAMDANI, 1974).

$$\varphi_R(x, y) = \varphi_A(x) \wedge \varphi_B(y) \quad (8)$$

Para uma coleção de regras *fuzzy*, usa-se um operador  $t$  – *conorma* (disjunção) para conectá-las, por exemplo "máximo".

Assim, a base de regras é composta por proposições *fuzzy* (antecedente e conseqüente), de acordo com as informações do especialista, onde cada uma destas proposições é descrita na forma linguística:

- (Antecedente) **Se**  $x_1$  é  $A_1$  e  $x_2$  é  $A_2$  e ... e  $x_n$  é  $A_n$
- (Conseqüente) **Então**  $u_1$  é  $B_1$  e  $u_2$  é  $B_2$  e ... e  $u_m$  é  $B_m$

É na base de regras que as variáveis ( $x_n$  e  $u_m$ ) e suas classificações linguísticas ( $A_n$  e  $B_m$ ) são catalogadas e, em seguida, modeladas por conjuntos *fuzzy*, isto é, funções de pertinência. De outro modo, a base de regras descreve relações entre as variáveis linguísticas, para serem utilizadas na máquina de inferência (MCNEILL; THRO, 1994; LI *et al.*, 2019).

### 3.5.3 Processador de Entrada (Fuzzificação)

No processador de entrada, as entradas do sistema são transformadas em conjuntos *fuzzy*. É nele que se justifica a grande importância de um especialista do fenômeno a ser modelado, pois é onde as funções de pertinência são formadas para cada conjunto *fuzzy* envolvido no processo (LI *et al.*, 2019).

### 3.5.4 Máquina de Inferência *Fuzzy*

Na máquina de inferência cada proposição *fuzzy* é "traduzida" matematicamente por meio das técnicas da lógica *fuzzy*. É onde se definem quais  $t$  – *normas* (conjunções),  $t$  – *conormas* (disjunções) e regras de inferência são utilizadas para se obter a relação *fuzzy* que modela a base de regras (MCNEILL; THRO, 1994; SILVA, 2011).

Este componente tem tanta importância quanto o componente da base de regras. Basicamente é dele que depende o sucesso do controlador *fuzzy*, já que ele fornecerá a saída (controle) *fuzzy* a ser adotada pelo controlador, a partir de cada entrada *fuzzy* (MAMDANI, 1974; SILVA, 2011).

#### 3.5.4.1 Método de Mamdani

O método de Mamdani é baseado na regra de composição de inferência max-min conforme o procedimento:

Uma regra  $R_i$  da base de regras *fuzzy* é definida pelo produto cartesiano *fuzzy* dos conjuntos *fuzzy* que compõe o antecedente (ex.: Se  $x$  é  $A$ ) e o conseqüente (ex.: Então  $y$  é  $B$ ) da regra. O método da Mamdani agrega as regras através do operador lógico OU, que é modelado para  $t$  – *conorma*  $\nabla$  (máximo) e, em cada regra, o operador lógico E é modelado pela  $t$  – *norma*  $\Delta$  (mínimo) (SILVA, 2011), como apresentado a seguir:

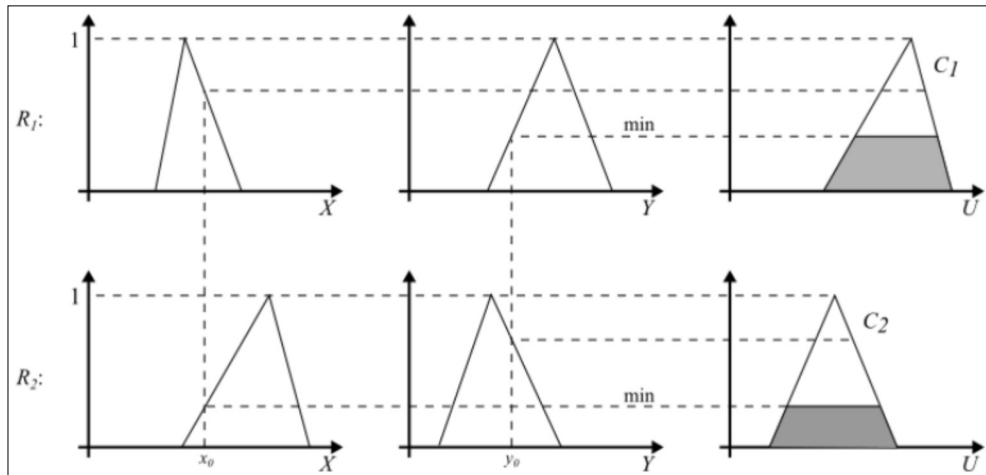
- $R_1$ : **Se**  $x$  é  $A_1$  **E**  $y$  é  $B_1$  **Então**  $z$  é  $C_1$ ; e
- $R_2$ : **Se**  $x$  é  $A_2$  **E**  $y$  é  $B_2$  **Então**  $z$  é  $C_2$ .

As Figuras 11 e 12 ilustram como uma saída  $z \in \mathbb{R}$  de um sistema do tipo Mamdani é gerada a partir das entradas  $x \in \mathbb{R}$ ,  $y \in \mathbb{R}$  e a regra de composição max-min. A saída  $z$ , Figura 12, é obtida pela defuzzificação do conjunto *fuzzy* de saída  $C = C_1 \cup C_2$ .

Ainda, por meio das Figuras 11 e 12, pode ser visto que a saída do controlador *fuzzy*, dada pelo método de Mamdani, é um subconjunto *fuzzy*, mesmo para o caso de uma entrada *crisp*. Assim, se for necessário ter um valor real, deve-se realizar uma defuzzificação do subconjunto *fuzzy* de saída para obter um valor *crisp* que o represente.

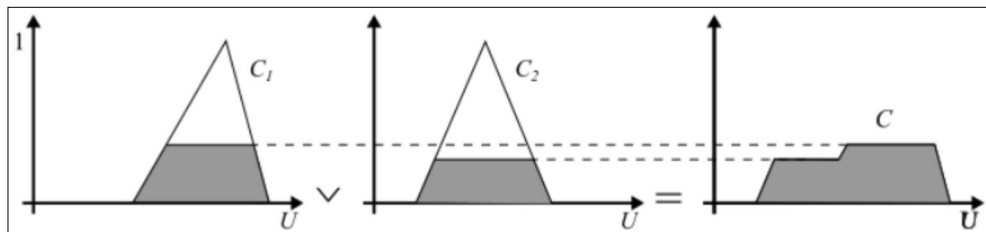


Figura 11: Saídas parciais do controlador.



Fonte: O autor.

Figura 12: Saída final do controlador.



Fonte: O autor.

### 3.5.5 Processador de Saída (Defuzzificação)

A defuzzificação é um processo que permite representar um conjunto *fuzzy* por um valor *crisp* (número real). A base de regras é modelada matematicamente por uma relação ( $RE$ ), a partir dos conjuntos *fuzzy* que a compõe. Segundo Mamdani e Assilian (1975) e Silva (2011), a função de pertinência  $\varphi$  da  $RE$  é dada pela Equação 9.

$$\varphi_R(x, u) = \nabla(\varphi_{RE_i}(x, u)), \text{ com } 1 \leq i \leq r, \quad (9)$$

onde  $x$  e  $u$  são variáveis linguísticas,  $\nabla$  é uma  $t$ -conorma do tipo máximo,  $r$  é a quantidade de regras e  $RE_i$  é uma relação *fuzzy* obtida da regra  $i$ , cuja função de pertinência  $\varphi_{RE_i}$  é obtida.

#### 3.5.5.1 Centro de Área

No controlador *fuzzy*, a cada entrada *fuzzy*, o módulo de inferência produz uma saída que indica o controle a ser adotado. Adicionalmente, se a entrada for um número real, espera-se que a saída correspondente seja também um número real. Porém, em geral, isso não ocorre

em controladores *fuzzy*, pois mesmo para uma entrada *crisp*, a saída é um valor *fuzzy*. Assim, deve-se utilizar um método de defuzzificação (MCNEILL; THRO, 1994; LI *et al.*, 2019).

A princípio, qualquer número real, que de alguma maneira possa representar razoavelmente o conjunto *fuzzy*  $C$ , pode ser chamado de defuzzificador de  $C$ .

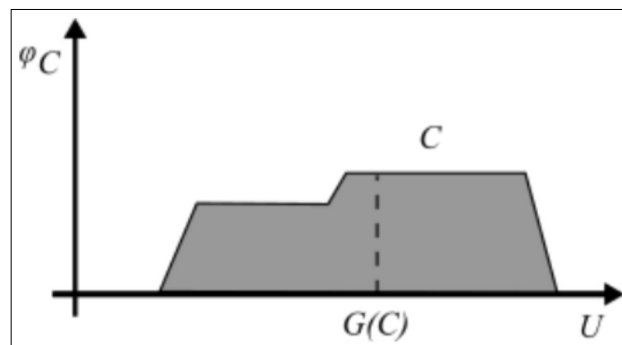
O método de defuzzificação de Mamdani é semelhante à média ponderada para a distribuição de dados, com a diferença de que os pesos são valores  $\varphi_C(u_i)$ , que indicam o grau de compatibilidade do valor  $u_i$ , com o conceito modelado pelo conjunto *fuzzy*  $C$ .

O método de defuzzificação centro de gravidade, Figura 13, dá a média das áreas de todas as figuras que representam os graus de pertinência de um conjunto *fuzzy*. Entre todos os métodos de defuzzificação, ele é o preferido, mesmo sendo talvez o mais complexo. As Equações 10 e 11 referem-se ao domínio discreto e domínio contínuo, respectivamente, do defuzzificador centro de gravidade.

$$G(C) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i \varphi_C(u_i)}{\sum_{i=0}^n \varphi_C(u_i)} \quad (10)$$

$$G(C) = \frac{\int_R u \varphi_C(u) du}{\int_R \varphi_C(u) du} \quad (11)$$

Figura 13: Defuzzificador centro de gravidade.



Fonte: O autor.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho se divide basicamente em seis etapas: localização e aspectos gerais do experimento (Seção 4.1); substrato (Seção 4.2); controlador *fuzzy* (Seção 4.3); metodologias de irrigação (Seção 4.4); delineamento experimental (Seção 4.5); e análises realizadas (Seção 4.6).

### 4.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GERAIS DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado de julho a setembro de 2020 em local aberto (Figura 14), nas proximidades do campus da Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, localizada no município de Ponta Grossa - PR (Figura 15), pertencente a região dos Campos Gerais do Paraná e distante 103 km de Curitiba, capital do estado, com coordenadas geográficas de 25° 05' 42" de latitude Sul, 50° 09' 46" de longitude Oeste e altitude média de 975 m (GOOGLE, 2020).

Figura 14: Local do experimento, vasos, mudas, sistema de irrigação e tela sombrite.



Fonte: O autor.

O clima nessa região é subtropical, com precipitação média nos meses de julho a se-

Figura 15: Município de Ponta Grossa.



Fonte: ABREU (2019).

tembro de 77, 63 e 124 mm.m<sup>2</sup> respectivamente, e temperatura mínima e máxima médias neste mesmo período variando de 8 a 23 °C, ideais para o desenvolvimento da alface (NITSCHKE *et al.*, 2019). A Tabela 6 apresenta os dados históricos e os observados durante o experimento.

Tabela 6: Climatologia do município de Ponta Grossa-PR.

Mês	Temp. Máx. Média (°C)		Temp. Mín. Média (°C)		Precipitação Média (mm)	
	Histórica	Observada	Histórica	Observada	Histórica	Observada
Janeiro	17		28		182	
Fevereiro	17		28		185	
Março	16		27		149	
Abril	13		25		99	
Mai	10		22		76	
Junho	9		21		125	
Julho	8	9	21	22	77	8
Agosto	10	10	23	24	63	190
Setembro	12	13	24	26	124	0
Outubro	13		25		155	
Novembro	15		27		119	
Dezembro	16		27		165	

Fonte: Clima Tempo (2020), Simepar (2020e)

## 4.2 SUBSTRATO

O substrato utilizado foi uma mistura recomendada pelo fabricante de 50% de terra vegetal, composta por: solo "in natura", vermicomposto e casca de pinus; e 50% de fertilizante orgânico, composto por: esterco de galinha, carvão vegetal, casca de ovo, lodo orgânico ETE (Estações de Tratamento de Esgoto) e lodo ETA (Estações de Tratamento de Água), ambos (Figura 16) produzidos comercialmente pela Fertilizare LTDA.

Figura 16: Substrato utilizado.



Fonte: O autor.

Conforme Silva (2009), a análise química do substrato foi feita para pH,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (extraído com  $\text{KCL } 1 \text{ mol L}^{-1}$ ),  $\text{K}^+$  e P (extraído por Mehlich 1), e  $\text{Al}^{3+}$  (extraído com  $\text{KCL } 1 \text{ mol L}^{-1}$ ), e foram feitas a partir de amostras coletadas que foram secas ao ar, homogêneas e passadas em peneira de malha 2 mm, e então enviadas para laboratório particular (INTERPARTNER, 2020). Os resultados da análise química realizada estão apresentados na Tabela 7, é possível observar que o pH da amostra de substrato é igual a 6,08, segundo Resende *et al.* (2015) e como foi apresentado na Tabela 3 da Seção 3.1, a faixa ideal de pH está entre 5,8 e 7,2, portanto este parâmetro encontrasse ideal para o desenvolvimento da alface, observa-se também quantidades significativas dos demais elementos químicos do solo, que são importantes para a planta.

Tabela 7: Análise química (pH,  $H^+Al^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ , Soma de Bases, Capacidade de troca de Cátions, Fósforo, Carbono, Matéria Orgânica, V% (Índice de Saturação de Bases) e m% (Índice de Saturação de Alumínio) do substrato utilizado.

<b>Id.</b>	<b>Nome</b>	<b>mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></b>	<b>Quantidade</b>
1	pH	-	6,08
2	H + Al	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	28,98
3	Al	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	0,00
4	Ca	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	158,40
5	Mg	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	28,80
6	K	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	9,30
7	SB	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	196,50
8	CTC	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	225,48
9	P	mg.dm <sup>-3</sup>	168,00
10	C	g.dm <sup>-3</sup>	67,66
11	MO	g.dm <sup>-3</sup>	116,65
12	V	%	87,15
13	m Al	%	0,00

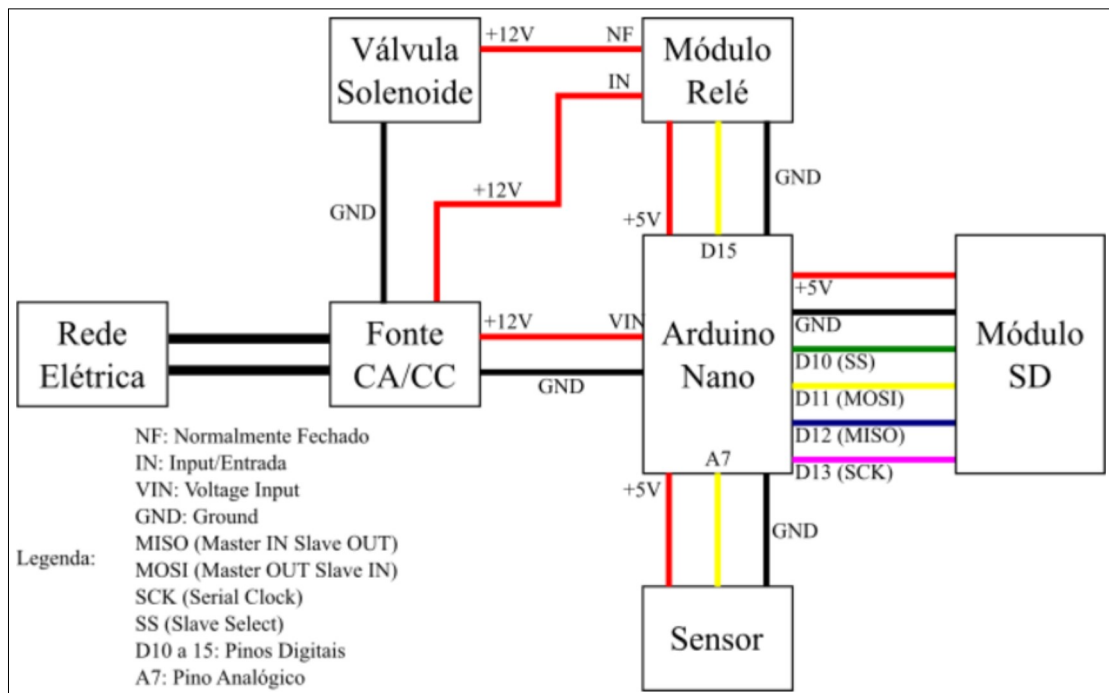
Fonte: INTERPARTNER (2020).

#### 4.3 CONTROLADOR *FUZZY*

O controlador *fuzzy* foi desenvolvido utilizando principalmente, um Arduino Nano, módulo para cartão SD (*Secure Drive* - Unidade Segura), módulo relé, fonte CA-CC (Corrente Alternada para Corrente Contínua) de 12 V, uma válvula solenoide e um sensor de umidade do solo. Para o desenvolvimento do hardware do controlador foi utilizado o software EasyEDA (EASYEDA, 2020), que possui interface WEB (*World Wide Web* - Rede Mundial de Computadores) e diagrama esquemático de diversos componentes eletrônicos. A Figura 17 apresenta o diagrama simplificado do controlador e da integração entre seus principais componentes.

Como pode ser visto na Figura 17, o diagrama simplificado de como os componentes integram o controlador, a partir da rede elétrica, a fonte CA-CC 12 V fornece alimentação para o microcontrolador e para a válvula solenoide, que é responsável por bloquear ou liberar a passagem de água para a irrigação. O módulo relé realiza a interface entre o microcontrolador e a válvula solenoide, devido a incompatibilidade da tensão de saída do microcontrolador com a tensão de acionamento da válvula solenoide, de +5 V e de +12 V, respectivamente. A comunicação do microcontrolador com o módulo SD é realizada por meio dos pinos digitais 10 a 13, por meio do Protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface* - Interface Periférica Serial). Por fim, o pino analógico A7 é utilizado como entrada do sinal analógico proveniente da saída do sensor de umidade do solo.

A relação completa dos quinze componentes necessários para o desenvolvimento do

Figura 17: Diagrama de conexão dos componentes do controlador *fuzzy*.

Fonte: O autor.

hardware do controlador, bem como uma referência de custo da data de 10 de outubro de 2020, está apresentada na Tabela 8.

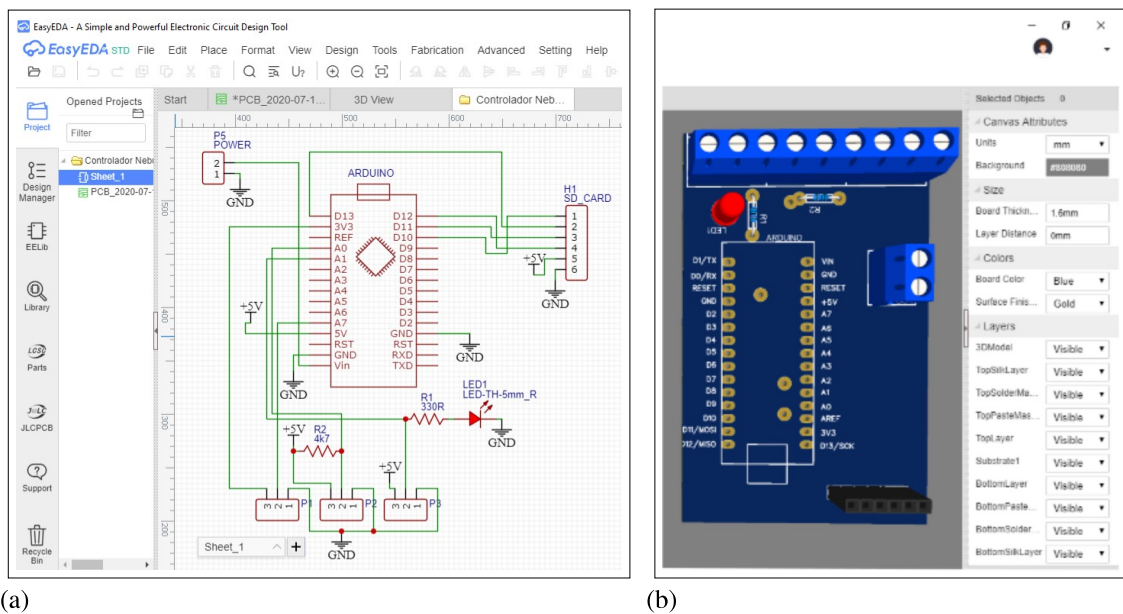
Tabela 8: Material e custos para a montagem do controlador *fuzzy*.

Id.	Item	Quant.	Preço un. (R\$)	Preço Final (R\$)
1	Arduino Nano	1	25,00	25,00
2	Módulo relé 5 V	1	15,00	15,00
3	Módulo micro SD	1	15,00	15,00
4	Cartão SD 1 GB	1	10,00	10,00
5	Resistores 1/4 W	2	0,80	1,60
6	Conector borne 3 vias	2	2,00	4,00
7	Conector borne 2 vias	1	2,00	2,00
8	Barra de pinos fêmea 1x40 2,54 mm	1	3,00	3,00
9	LED 5 mm	1	1,00	1,00
10	PCI 10x10 cm	1	12,00	12,00
11	Impressão do circuito em PCI	1	5,00	5,00
12	Válvula solenoide 12 V	1	70,00	70,00
13	Fonte CA/CC bivolt 12 V 5 A	1	35,00	35,00
14	Cabo Duplo 1,5 mm	20	1,50	30,00
15	Tomada Macho 10 A	1	2,50	2,50
			Total(R\$)	256,10

Fonte: MERCADO LIVRE (2020).

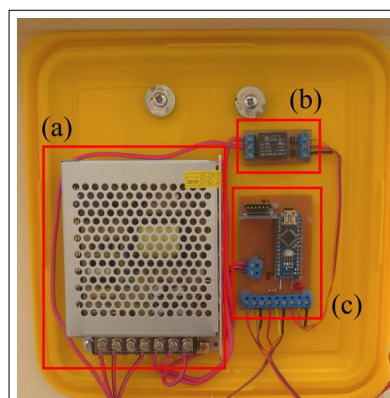
A Figura 18 apresenta interface WEB do software EasyEDA, com o projeto esquemático do circuito do controlador, e a representação do modelo físico em 3D; nota-se da Figura 18, além da placa de prototipagem Arduino Nano, os pontos de conexão com: o sensor, atuador e demais componentes. A Figura 19 apresenta o aspecto físico do controlador, sendo que na Figura 19 (a) está a fonte de alimentação; na Figura 19 (b) está o módulo relé, que está ligado à válvula solenoide; e na Figura 19 (c) está a PCI, que agrega o microcontrolador, módulo SD e conectores para o sensor, módulo relé e fonte de alimentação. Os componentes do controlador foram inseridos em um recipiente impermeável, para que o meio onde ele estava inserido não interferisse em seu funcionamento.

Figura 18: Interface do software EasyEDA com (a) esquema elétrico do circuito do controlador e (b) representação do modelo físico do circuito do controlador.



Fonte: O autor.

Figura 19: Hardware do controlador *fuzzy* para irrigação automática sendo que em (a) está a fonte de alimentação, (b) o módulo relé e (c) a placa com microcontrolador, módulo SD e conectores para sensor, módulo relé e fonte de alimentação.



Fonte: O autor.



#### 4.3.1 Caracterização do Sensor de Umidade do Solo

Para realizar a caracterização do sensor de umidade do solo foi utilizada uma adaptação das metodologias utilizadas por Nagahage, Nagahage e Fujino (2019), Placidi *et al.* (2020), e a sugerida por Diymore (2020). Utilizando uma peneira de 2 mm de granulção, foi peneirado o substrato, para que partículas grandes como pedras, matéria orgânica em decomposição e torrões, não interferissem no processo de secagem e caracterização do sensor (SILVA, 2009).

Após peneirado, para realizar a secagem, preparação e armazenamento das amostras de substrato, foi utilizado um forno micro-ondas de 1200 W, um recipiente de cerâmica de 100 ml e 150 g, um recipiente plástico (copo de 180 ml e 2 g), uma balança de precisão, modelo SF-400, com capacidade de até 10 kg e graduação de 1 em 1 grama, filme plástico e uma caixa de isopor de 13 L, conforme (TAVARES *et al.*, 2008; SANTOS; FILHO, 2019; NAGAHAGE; NAGAHAGE; FUJINO, 2019). Então, os seguintes passos foram realizados.

1. Ajustar o forno micro-ondas para potência máxima (100%);
2. Posicionar o recipiente de cerâmica vazio, sobre a balança e acionar a função tara;
3. Adicionar 20 g de substrato ao recipiente de cerâmica;
4. Levantar o recipiente de cerâmica com o substrato ao forno micro-ondas por 1 minuto;
5. Aguardar 3 minutos;
6. Repetir os passos 4 e 5, por mais 2 vezes;
7. Transferir o substrato seco do recipiente de cerâmica para o recipiente plástico, até que o mesmo fique quase cheio, de modo que, água possa ser adicionada para gerar os valores de umidade;
8. Pesar a quantidade de substrato presente no recipiente plástico;
9. Utilizar a Equação 5, da umidade gravimétrica ( $u$ ), para calcular a quantidade de água que deverá ser adicionada ao recipiente plástico, junto ao substrato seco, para que a amostra seja formada;
10. Gerar 0% de umidade na amostra (substrato seco, sem adição de água);
11. Homogenizar a amostra (misturar);
12. Embalar com o filme plástico o recipiente com a amostra, para evitar a perda de umidade ou que derrame;
13. Armazenar a amostra em uma caixa de isopor ou outro recipiente que possa manter a amostra protegida do meio;
14. Repetir os passos de 3 a 13, gerando 10% a mais de umidade em relação a amostra anterior, a partir de uma nova amostra seca gerada, até 100%; e

15. Manter as amostras armazenadas por 24 horas para estabilização e homogeneização da umidade.

A Figura 20 apresenta as 11 amostras que foram geradas pelos passos descritos anteriormente, e acomodadas em caixa de isopor. Após a preparação das amostras, o sensor de umidade do solo foi preparado para realizar as leituras nas amostras e posteriormente, permanecer exposto ao tempo no vaso.

Figura 20: Armazenamento das 11 amostras de solo em recipientes plásticos embaladas com filme plástico.



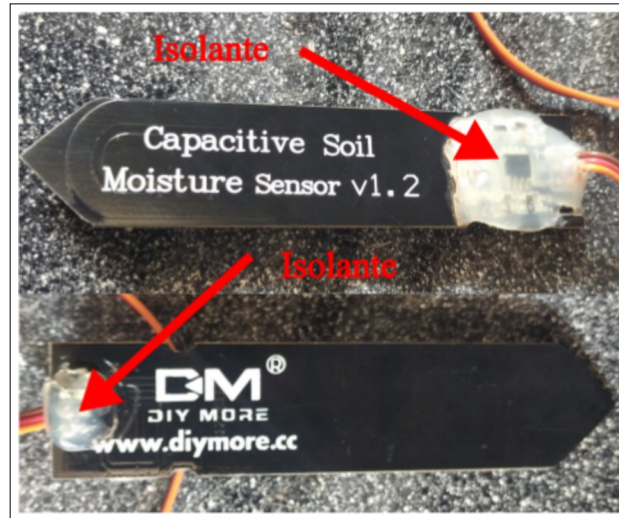
Fonte: O autor.

Pensando nisso, algumas alterações no sensor foram necessárias. Originalmente os cabos (alimentação, sinal e GND) que vem com o sensor, para realizar a comunicação do sensor com o controlador, possuem 20 cm de comprimento, sendo muito curto para realizar a ligação entre o sensor e o controlador. Outra limitação é seu circuito de leitura e tratamento de sinal, que é exposto, ou seja, não possui proteção contra o meio em que ele se encontra.

Assim, duas alterações foram realizadas no sensor antes de realizar a caracterização do mesmo: (i) substituição dos cabos de 20 cm, por outros de mesmo diâmetro e 1 m de comprimento; e (ii) aplicação de um material isolante (cola quente) sobre seu circuito para protegê-lo contra oxidação e curtos, Figura 21.

Com as amostras e o sensor preparados, o controlador foi montado em bancada, com temperatura ambiente estabilizada a 25°C (verificada visualmente em termômetro de mercúrio). Para realizar as leituras de umidades, das diferentes amostras, pelo sensor e, então, a caracterização do do mesmo, os seguintes passos foram seguidos:

Figura 21: Sensor de umidade do solo após aplicação de material isolante, para proteção contra oxidação.



Fonte: O autor.

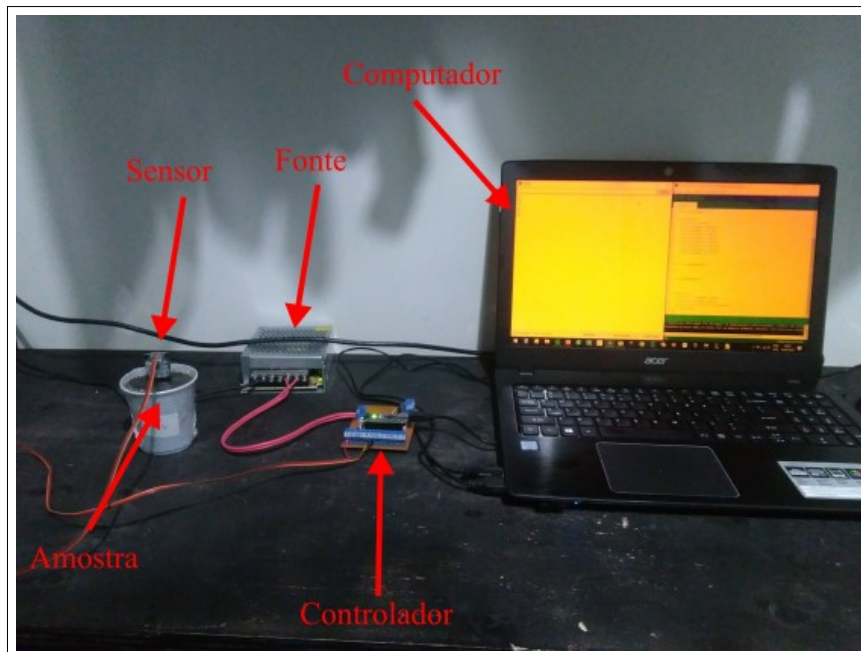
1. Remover uma amostra do recipiente de armazenamento, e, desembalá-la;
2. Com o sensor já realizando as leituras, inserir o sensor no centro da amostra, a 7 cm de profundidade;
3. Aguardar 10 minutos para estabilização das leituras;
4. Salvar os valores lidos no intervalo de 30 minutos, após a estabilização;
5. Remover o sensor do substrato e realizar a limpeza do mesmo, com pano úmido e após, com pano seco;
6. Aguardar 5 minutos; e
7. Repetir os passos de 1 a 6, até que a leitura de todas as amostras sejam realizadas.

A Figura 22 apresenta o arranjo experimental, para as leitura em bancada com sensor de umidade do solo, das diferentes amostras. Como pode ser observado, o sensor estava imerso e realizando as leituras de umidade da amostra, juntamente como o controlador de irrigação, fonte e computador, onde os dados das leituras foram salvos.

Após a realização da leitura das amostras pelo sensor e coleta dos dados, os dados foram carregados em uma planilha do Libre Office Calc, para que uma função matemática de caracterização do sensor pudesse ser gerada. Foram realizadas leituras nas 11 amostras de solo que possuíam umidade gravimétrica de 0 a 100%, entretanto, verificou-se que a partir da amostra de 80% de umidade, o sensor apresentou leituras iguais. De fato, foi verificado visualmente que as amostras de 80 a 100% estavam em saturação. Desse modo, empiricamente, a CC, para o substrato utilizado, encontra-se entre 70 e 80% de umidade.

Com base nessa informação e na necessidade de se manter a umidade do solo próximo a CC, a curva de caracterização do sensor foi reduzida para o intervalo entre 50 e 80% de

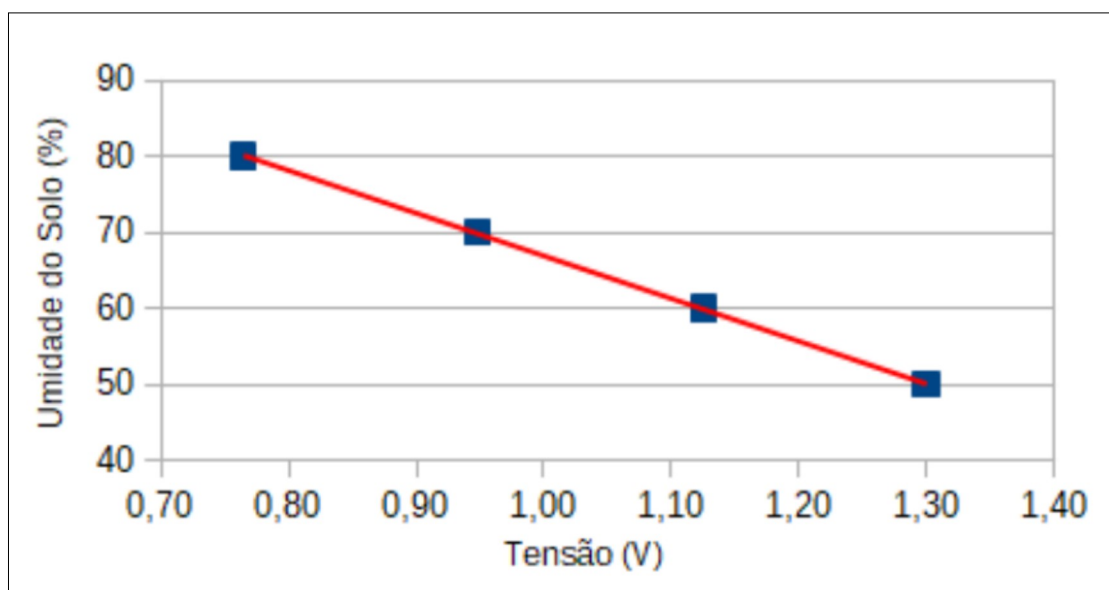
Figura 22: Leituras da umidade do solo das amostras com o sensor em bancada, para caracterização do comportamento do sensor.



Fonte: O autor.

umidade, o que possibilitou caracterizar o sensor por uma função linear, com resolução de 3 mV pelo conversor de sinal A/D (analógico para digital) do microcontrolador. A Figura 23 apresenta a reta que caracteriza o sensor para o intervalo entre 50 e 80% de umidade. Essa reta possui equação  $f(x) = -56,049x + 122,993$ , desvio padrão de  $\pm 4$ , erro igual a 1, e coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,99985.

Figura 23: Reta de caracterização do sensor, entre as faixas de umidade do solo de 50 a 80%.



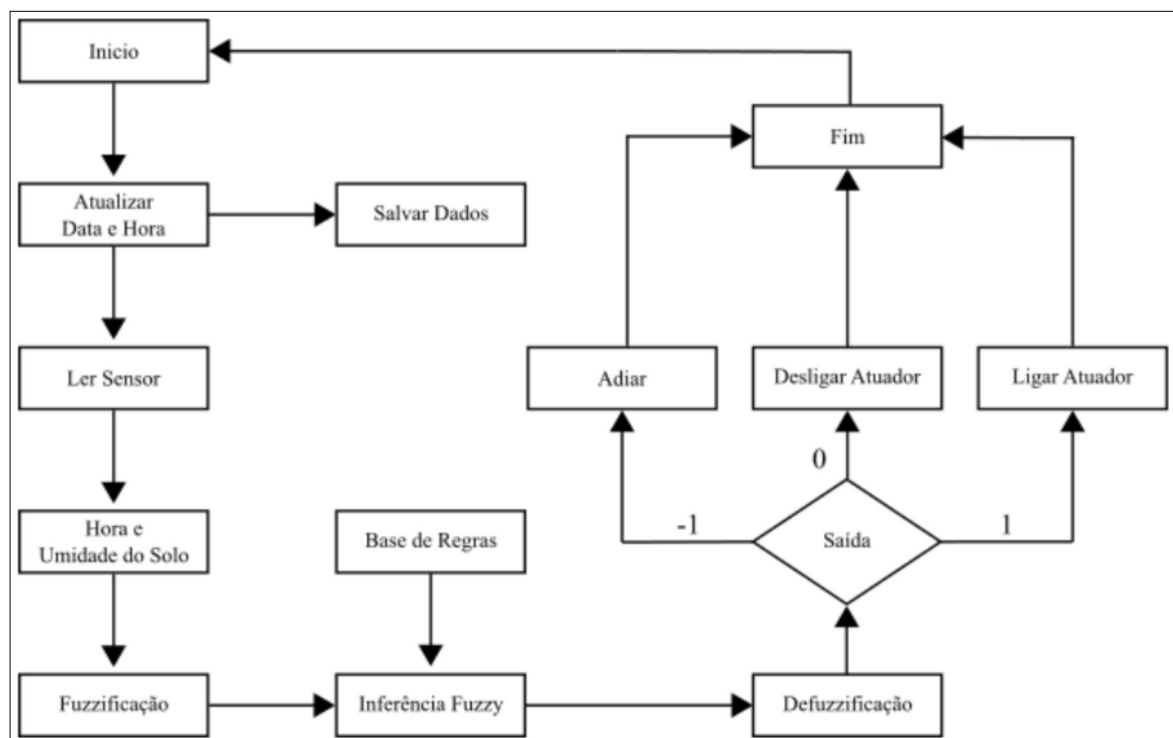
Fonte: O autor.

### 4.3.2 Firmware

Após desenvolvido o hardware do controlador e caracterizado o sensor de umidade, o próximo passo foi desenvolver o *firmware* que será gravado no microcontrolador. Primeiramente foram determinadas as atividades que o controlador deverá realizar. Ele possui a função de coletar, armazenar e analisar os dados obtidos do sensor de umidade do solo; a leitura do sensor deve ser realizada de minuto em minuto.

Com os dados coletados, o microcontrolador decide, através da lógica *fuzzy*, se deve ou não acionar o atuador responsável por irrigar a horta. Para isso, o microcontrolador altera o estado de seu pino digital 15 para HIGH (+5 V), acionando o módulo relé, que libera a tensão de +12 V para que a válvula solenoide se abra. A cada 60 minutos o microcontrolador deve salvar os dados da umidade do solo e de irrigação. Caso a irrigação tenha sido acionada nesse período, registra-se e salva-se também o tempo em que a mesma permaneceu ligada. A Figura 24 apresenta o fluxograma com maiores detalhes das operações do controlador.

Figura 24: Fluxograma de operação conceitual de funcionamento da programação do controlador *fuzzy*.



Fonte: O autor.

Ao iniciar pela primeira vez o controlador, deve-se configurar data e hora, de sua função relógio, para que os dados possam ser salvos corretamente. Devem ser instanciadas as regras *fuzzy* pelo controlador, e, em seguida, o valor da umidade do solo deve ser obtida, por meio da leitura do sensor de umidade do solo.

Com a hora e umidade do solo atual, as funções *fuzzy* são acionadas. Primeiramente a fuzzificação de ambos os valores *crisp* (hora e umidade) é realizada, transformando-os em valores *fuzzy*, para que a inferência *fuzzy* possa ser feita, através da base de regras *fuzzy*. Após a inferência, o valor *fuzzy* gerado é defuzzificado, com o método de defuzzificação centro de gravidade, gerando um valor *crisp* entre -1 e 1, que será responsável por ligar ou desligar o atuador, ou adiar a irrigação.

Os procedimentos listados devem ser realizados a cada 60 segundos e, a cada uma hora, o controlador deverá salvar os dados no cartão SD, para posterior coleta dos dados. Caso ocorra o adiamento da irrigação, o controlador deverá manter apenas a função relógio ativa, e, a cada 30 minutos, verificar a possibilidade de realizar a irrigação.

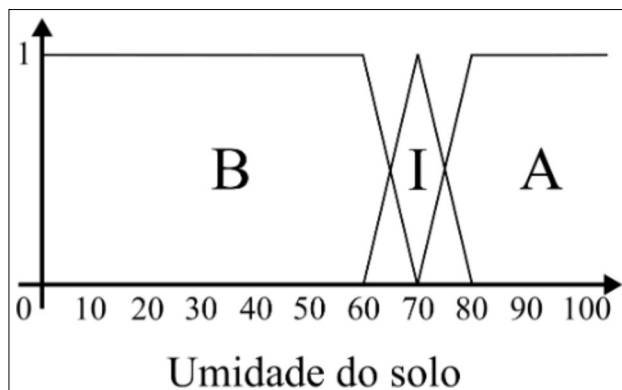
Para que o controlador *fuzzy* funcione corretamente, é necessário realizar o levantamento das variáveis linguísticas e regras. Para a irrigação, tem-se as seguintes variáveis e suas respectivas classificações linguísticas: (i) Umidade do solo: Baixa, Ideal e Alta; (ii) Hora: Ideal e Não Ideal; e (iii) Irrigar (Saída): Adiar, Não e Sim.

Com as variáveis definidas, as funções de pertinência (Figura 25) para cada uma das variáveis foram criadas levando em conta as recomendações dos autores citados na Seção 3.1, quanto ao final da tarde como horário para irrigação da alface; e na Seção 3.2, quanto a umidade do solo, que deve sempre estar próxima a CC. Dessa forma, foi determinado como umidade do solo ideal o intervalo entre 60 e 80%, e horário ideal para irrigação o intervalo entre as 17 e 21 horas.

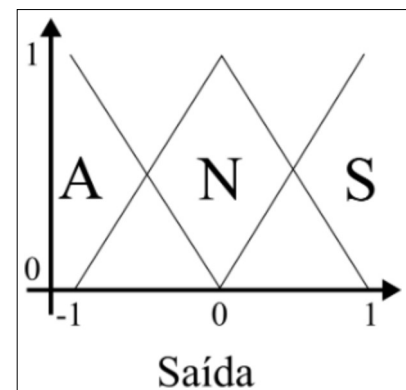
Após a identificação das variáveis e suas classificações linguísticas, as regras para cada combinação de classificação linguística podem ser geradas. Seis regras foram criadas de maneira que: (i) quando a umidade está ideal ou alta, não seja acionada a irrigação; (ii) quando a umidade está baixa e o horário é ideal para irrigação, a mesma é feita; e (iii) quando a umidade está baixa mas o horário não é adequado para irrigação, este processo é adiado.

- **Regra 1:** Se (Umidade é baixa e hora é ideal) então irrigar é sim.
- **Regra 2:** Se (Umidade é baixa e hora é não ideal) então irrigar é adiar.
- **Regra 3:** Se (Umidade é ideal e hora é ideal) então irrigar é não.
- **Regra 4:** Se (Umidade é ideal e hora é não ideal) então irrigar é não.
- **Regra 5:** Se (Umidade é alta e hora é ideal) então irrigar é não.
- **Regra 6:** Se (Umidade é alta e hora é não ideal) então irrigar é não.

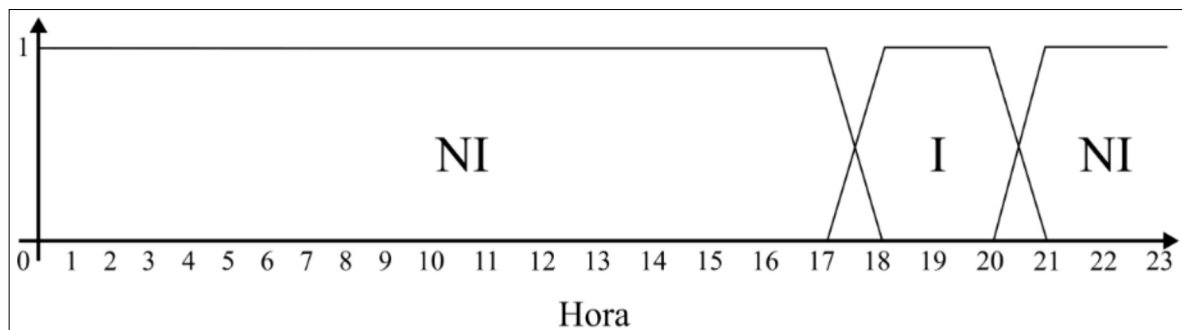
Figura 25: Variáveis e suas respectivas funções de pertinência: (a) umidade do solo: B (Baixa), I (Ideal) e A (Alta); (b) ativação da saída, variável irrigar: A (Adiar), N (Não) e S (Sim); (c) horário, variável hora: NI(Não Ideal) e I(Ideal).



(a)



(b)



(c)

Fonte: O autor.

Definidas as regras que o controlador fuzzy deverá seguir, utilizando a IDE Arduino, foi implementado o *firmware* que foi carregado no microcontrolador. A biblioteca eFLL (ALVE *et al.*, 2019) foi utilizada para que as funções *fuzzy* pudessem ser aplicadas e compiladas pelo microcontrolador. O fragmento do *firmware* é apresentado no Código 4.1, e a descrição linha a linha está logo após.

Código 4.1: Fragmento do firmware desenvolvido para o controlador *fuzzy*

```

1 #include <Fuzzy.h>
2
3 Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
4
5 FuzzyInput *umidade = new FuzzyInput(1);
6 FuzzySet *baixa = new FuzzySet(0, 0, 60, 70);
7 umidade->addFuzzySet(baixa);
8 fuzzy->addFuzzyInput(umidade);
9
10 FuzzyInput *hora = new FuzzyInput(2);
11 FuzzySet *ideal = new FuzzySet(17, 18, 20, 21);;
```

```

12  hora->addFuzzySet(ideal);
13  fuzzy->addFuzzyInput(hora);
14
15  FuzzyOutput *irrigar = new FuzzyOutput(1);
16  FuzzySet *sim = new FuzzySet(0, 1, 1, 1);
17  irrigar->addFuzzySet(sim);
18  fuzzy->addFuzzyOutput(irrigar);
19
20  FuzzyRuleAntecedent *SE\_umidadeBaixa\_E\_horaIdeal = new
      FuzzyRuleAntecedent();
21  SE\_umidadeBaixa\_E\_horaIdeal->joinWithAND(baixa, ideal);
22
23  FuzzyRuleConsequent *ENTAO\_irrigarSim = new FuzzyRuleConsequent();
24  ENTAO\_irrigarSim->addOutput(sim);
25
26  FuzzyRule *regraFuzzy1 = new FuzzyRule(1, SE\_umidadeBaixa\_E\_horaIdeal,
      ENTAO\_irrigarSim);
27
28  fuzzy->addFuzzyRule(regraFuzzy1);
29
30  fuzzy->setInput(1, getUmidade());
31  fuzzy->setInput(2, getHora());
32
33  fuzzy->fuzzify();
34
35  int saida = fuzzy->defuzzify(1);
36
37  if (saida == -1) {
38      adiarIrrigacao();
39  }
40  if (saida == 0) {
41      desligarAtuador();
42  }
43  if (saida == 1) {
44      ligarAtuador();
45  }

```

---

Primeiramente a biblioteca eFLL (Fuzzy.h) foi inserida ao código (linha 1), para que seja possível utilizar suas funções e instanciar objetos. Após a inclusão da biblioteca, o objeto 'fuzzy' do tipo Fuzzy() (linha 1) foi instanciado (linha 3), de maneira que ele seja visível (global) a todas as funções do programa. Em seguida, foram criadas as variáveis linguísticas de



entrada (antecedente), neste caso, foram gerados os objetos 'umidade' e 'hora' do tipo FuzzyInput. Nessa configuração de programação, para cada objeto instanciado, um número deve ser inserido na classe FuzzyInput (linhas 5 e 10).

Utilizando a classe FuzzySet, foram instanciados dois novos objetos, 'baixa' e 'ideal', um para cada variável linguística (linhas 6 e 11). Esses dois novos objetos são as funções de pertinência, sendo possível criar quantas forem necessárias.

Após, as funções de pertinência, foram inseridas as suas respectivas variáveis, utilizando o método addFuzzySet() ((linhas 7 e 12). Por fim, as variáveis linguísticas com sua respectiva função de pertinência foram inseridas ao objeto 'fuzzy', utilizando o método addFuzzyInput() (linhas 8 e 13).

O mesmo processo foi utilizado para criar a variável linguística 'irrigar', possuindo apenas uma diferença: a utilização do método addFuzzyOutput ao invés do addFuzzyInput, linhas 15 a 18, respectivamente. Desse modo, a variável 'irrigar' foi atribuída ao objeto 'fuzzy' como uma variável de saída (consequente).

As regras *fuzzy* foram compostas por duas "subregras": antecedente e consequente. Para a criação do antecedente, foi instanciado o objeto SE\_umidadeBaixa\_E\_horaIdeal do tipo FuzzyRuleAntecedent (linha 20). No entanto, para que o mesmo cumpra sua função lógica, foi utilizado o método joinWithAND(), passando como parâmetro as duas funções de pertinência ('baixa' e 'ideal') as quais a regra se refere (linhas 20 e 21), assim, uma lógica E foi criada (Se umidade = baixa E hora = ideal).

O consequente (objeto ENTAO\_irrigarSim) da regra foi instanciado utilizando a classe FuzzyRuleConsequent e utilizando o método addOutput(), com a função de pertinência 'sim' como parâmetro (linhas 23 e 24).

O objeto regraFuzzy1 do tipo FuzzyRule (linha 26) foi instanciado, passando como parâmetros o número identificador da regra, o antecedente e o consequente, formando assim, uma regra *fuzzy*, que deve ser adicionada ao objeto 'fuzzy'. Para isso, foi usado o método addFuzzyRule(), passando como parâmetro o objeto regraFuzzy1 (linha 28). Dessa forma, a regra *fuzzy* "SE umidade = baixa E hora = ideal ENTÃO irrigar = sim" foi criada. As demais regras foram implementadas de maneira similar. Podem ser geradas quantas regras forem necessárias para a modelagem do cenário em estudo.

Para que o controlador *fuzzy* gere um resultado, dois valores *crisp* de entradas, 'umidade' e 'hora', referentes às variáveis de entrada, devem ser passados como parâmetro ao método setInput(), que pertence ao objeto 'fuzzy' (linhas 30 e 31). O número referente a variável

a qual o valor representa também deve ser informado. Após, o método `fuzzify()` (linha 33), que pertence ao objeto 'fuzzy', deve ser chamado, assim, a fuzzificação das entradas é realizada.

Em seguida, a função `defuzzify()` e o índice (número) de uma variável de saída devem ser informados (linha 35). Assim, todas as regras que a contenham, vão passar pela inferência *fuzzy*. Ao final, a função retorna o valor *crisp*, referente a defuzzificação. Como o resultado de saída da função `defuzzify()` é um valor float (número real) e se deseja um valor int (número inteiro), atribuiu-se o resultado da função `defuzzify()` a uma variável do tipo int, de modo a ter os valores float arredondados para o int mais próximo: -1, 0 ou 1. Assim, a variável local 'saida' do tipo int (inteiro), foi criada para receber esse valor.

Após a defuzzificação e a atribuição do valor *crisp* à variável 'saida', a mesma é testada por três IFs, que determinam qual função ou ação o controlador deve tomar (linha 37 a 45): (i) desligar a irrigação (atuador), (ii) ligar a irrigação (atuador), ou (iii) adiar a irrigação. Por fim, o controlador retorna ao seu estado inicial e executa suas demais funções como, por exemplo, atualizar a hora e salvar dados.

#### 4.4 METODOLOGIAS DE IRRIGAÇÃO

Foram utilizadas duas metodologias: irrigação automática por controlador *fuzzy* (Metodologia A) e irrigação manual com reposição da evapotranspiração (Metodologia B). Ambas as metodologias contam com: mesmo substrato; 8 vasos, compondo uma área total de 0,16 m<sup>2</sup>; 8 mudas de alface crespa; sistema de irrigação por gotejamento, composto por 8 gotejadores, com vazão total (todos os gotejadores) de 0,96 L.h<sup>-1</sup>.

##### 4.4.1 Irrigação Automática por Controlador *Fuzzy*

O controlador *fuzzy* possui a função de coletar, armazenar, analisar os dados obtidos do sensor de umidade do solo localizado no vaso 1 e, após o processamento dos dados, se houver a necessidade de realizar a irrigação da cultura, acionar um atuador. Para a análise e tomada de decisão é utilizada a lógica *fuzzy*. O atuador, quando acionado, tem a função de liberar água para o sistema de irrigação por gotejamento.

##### 4.4.2 Irrigação Manual por Reposição da Evapotranspiração

O software *The ETO Calculator* foi configurado para o município de Ponta Grossa-PR, inserindo suas coordenadas geográficas. Em seguida, na tela de configurações dos dados de entrada (Figura 26), foram configurados o tipo de dado e a unidade de medida para a temperatura

do ar, umidade do ar, velocidade do vento, e brilho e radiação solar. A Tabela 9 apresenta as configurações utilizadas.

Figura 26: ETO Calculator - Aba de configuração dos dados de entrada.

The screenshot shows the 'Data and ETo menu' window of the ETO Calculator software. The 'Station' is set to 'Paraná' and 'Country' to 'Brasil'. The 'File' name is 'teste.DTA'. The 'Input data description' tab is active, showing four main sections:

- Air temperature:** Radio buttons for '° Celsius' (selected) and '° Fahrenheit'. Checkboxes for 'Mean temperature' (unchecked) and 'Minimum and Maximum temperature' (checked).
- Air humidity:** Checkboxes for 'Mean Relative Humidity' (unchecked), 'Minimum and Maximum Relative Humidity' (checked), 'Mean dew point temperature' (unchecked), and 'Mean actual vapour pressure' (unchecked, set to 'kPa'). A 'Psychrometric data' section includes 'Mean dry and wet bulb temperature' (unchecked) with radio buttons for 'Ventilated', 'Natural ventilated' (selected), and 'Indoors'. A 'Coefficient psychrometer' is set to '0.000800'. An 'IF missing air humidity' section has 'T<sub>dew</sub> = T<sub>min</sub> + subtract' set to '0.0' and '(sub)humid' selected.
- Wind speed:** Checkboxes for 'Mean wind speed' (checked) and 'height of measurement' set to '2.0' (meter). A dropdown menu is set to 'm/sec'. An 'IF missing wind speed' section has 'U2 = 0.5' and 'light wind' selected.
- Sunshine and Radiation:** Checkboxes for 'Hours of bright sunshine (n)' (checked), 'Relative sunshine hours (n/N)' (unchecked), 'Solar radiation (R<sub>s</sub>)' (unchecked), and 'Net radiation (R<sub>n</sub>)' (unchecked). Dropdown menus for R<sub>s</sub> and R<sub>n</sub> are set to 'MJ/m2.day'. A 'Coefficients Angstrom equation' button is present. An 'IF missing radiation' section has a dropdown set to '0.16' and a formula:  $R_s = 0.16 \times \text{SQRT}(T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \times R_a$ .

Buttons for 'Cancel' and 'Main menu' are at the bottom.

Fonte: O autor.

Tabela 9: Dados de entrada utilizados para o software *The ETO Calculator*.

Variável	Tipo de Entrada
Temperatura do ar (°C)	Máx. e Mín. temperatura
Umidade do ar (%)	Máx. e Mín. umidade
Velocidade do vento ( $m s^{-1}$ )	Média
Brilho do Sol e Radiação (horas)	Horas de sol

Fonte: O autor.

Para o cálculo da  $ET_o$  ( $mm.m^2.dia^{-1}$ ), foram coletados, diariamente às 17 horas, os dados das últimas 24 horas registrados pela estação meteorológica localizada no município de Ponta Grossa-PR, através do site do SIMEPAR (Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná) (SIMEPAR, 2020e), que apresenta, de hora em hora, os dados meteorológicos coletados em suas estações. As variáveis meteorológicas coletadas foram: (i) temperatura máxima; (ii) temperatura mínima; (iii) umidade relativa máxima; (iv) umidade relativa mínima;

(v) velocidade do vento; e (vi) horas de sol; e que são referentes ao período de 24 horas antes do momento da coleta, ou seja, das 17 horas do dia anterior, até as 17 horas do dia atual. A Figura 27 apresenta a tela de inserção dos dados do software *The ETO Calculator*. Após a inserção dos dados, a última linha, referente ao valor de  $ET_o$ , é preenchida automaticamente pelo software.

Figura 27: ETO Calculator - Aba de entrada de dados meteorológicos e cálculo de  $ET_o$ .

The screenshot shows the 'Data and ETo menu' window of the ETO Calculator software. The interface includes input fields for 'Station' (Paraná), 'Country' (Brasil), and 'File' (teste.DTA). Below these are tabs for 'Input data description', 'Meteorological data and ETo', 'Plot data', and 'Export results'. The 'Meteorological data and ETo' tab is active, displaying a table with columns for Day (4-10), Month (September), and Year (2020). The table lists various meteorological parameters and their values, with the final row showing the calculated  $ET_o$  values.

Day		4	5	6	7	8	9	10
Month		September	September	September	September	September	September	September
Year		2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Tmax	°C	28.0	28.0	29.0	28.0	26.0	25.0	30.0
Tmin	°C	12.0	12.0	13.0	15.0	15.0	13.0	14.0
RHmax	%	85.0	92.0	90.0	88.0	90.0	92.0	92.0
RHmin	%	41.0	35.0	32.0	27.0	56.0	56.0	35.0
u(2)	m/sec	2.20	4.20	5.60	5.00	3.60	5.60	2.80
n	hour/day	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.00	7.00
ETo	mm/day	4.2	5.4	6.4	6.2	4.2	4.3	4.9

At the bottom of the window, there are buttons for 'Symbols', 'Switch Units', 'Data Limits', 'Save data', 'Cancel', and 'Main menu'.

Fonte: O autor.

Com o valor de  $ET_o$  fornecido pelo software, foi escolhido utilizar valor de  $K_c = 1$  e irrigações diárias, para isso  $TR = 1$ , como recomendam Allen *et al.* (1998) e Feliciano (2013). Assim é possível calcular o valor  $ET_c$ ,  $LL$  e  $LB$ , como visto nas Seções 3.2.1.1 e 3.3.4. Então, o valor de  $LB$  deve ser ajustado para a área correspondente aos 8 vasos ( $0,16 m^2$ ).

#### 4.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, pois as plantas foram submetidas as mesmas condições do meio (local, clima e substrato), durante todo o experimento, variando apenas o método de irrigação aplicado. Foram adquiridas 16 mudas de Alface Crespa

Amanda (Figura 28) em uma casa agropecuária, com 45 dias desde o plantio da semente e número de folhas igual a 4 (estágio fenológico 2). As mudas foram numeradas de 1 a 16 e foram divididas aleatoriamente em dois grupos A e B, cada um com 8 mudas, e que receberam os metodologias A e B, respectivamente.

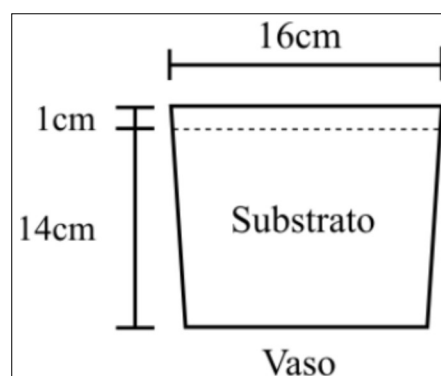
Figura 28: Mudas de Alface Crespa Amanda.



Fonte: O autor.

As mudas foram transplantadas no dia 09 de julho de 2020, próximo as 17 horas, para os vasos definitivos (Figura 29), que possuem 3 litros de volume. O substrato foi inserido no vaso de modo que sobrasse 1 cm até a borda, para que, durante a irrigação, a água não escoasse para fora do vaso.

Figura 29: Características dos vasos que receberam as mudas transplantadas e quantidade de substrato aplicado.

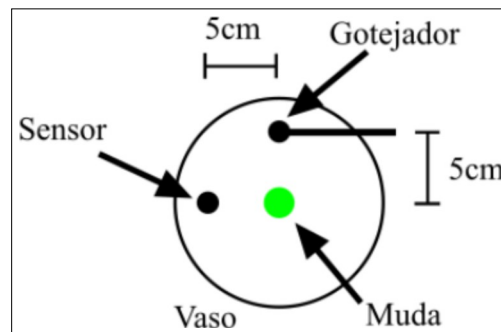


Fonte: O autor.

Logo após o transplante, as mudas foram irrigadas manualmente com um regador. Em seguida, os sistemas de irrigação foram montados, conforme a Figura 30.

Então, os vasos com as mudas foram posicionados a uma distância de 30 cm de uma muda a outra (Figura 31), para que, no decorrer do desenvolvimento da alface, não houvesse competição por luz solar. Apenas o vaso 1 da metodologia A, possui o sensor de umidade do

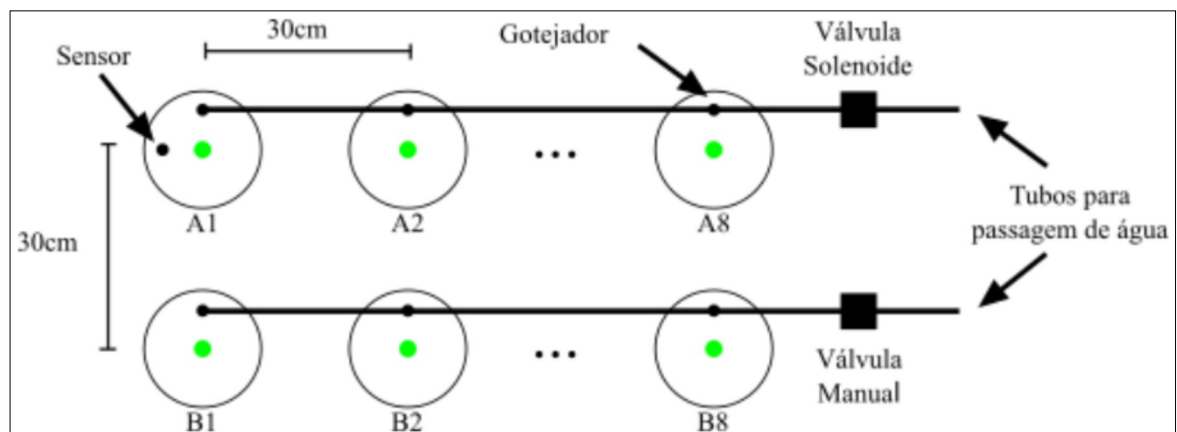
Figura 30: Disposição do sistema de irrigação no vaso com relação a posição da muda e do sensor de umidade.



Fonte: O autor.

solo, e, com base nos dados obtidos a partir dele, os demais vasos desta metodologia foram irrigados de maneira homogênea, pois os gotejadores foram equalizados, para distribuir de forma igualitária, a mesma quantidade de água por vaso, possuindo os 8 gotejadores uma vazão total de  $0,96 \text{ Lh}^{-1}$ .

Figura 31: Delineamento experimental utilizado.



Fonte: O autor.

A Tabela 10 apresenta a relação de itens, quantidade e valores, para a montagem do experimento, totalizando R\$ 272,50 investidos, para montagem dos dois sistemas de irrigação por gotejamento.

Tabela 10: Materiais e custos para a montagem do experimento de análise comparativa entre sistemas de irrigação.

<b>Id.</b>	<b>Item</b>	<b>Quant.</b>	<b>Preço un. (R\$)</b>	<b>Preço Final (R\$)</b>
1	Kit irrigação por gotejamento	2	70,00	140,00
2	Saco terra vegetal 20 Kg	2	20,00	40,00
3	Tela sombrite 50% 1,5x1 m	3	1,50	4,50
4	Saco fertilizante orgânico 2 Kg	14	4,00	56,00
5	Muda alface crespa Amanda	16	0,50	8,00
6	Vasos 3 L	16	1,50	24,00
			<b>Total(R\$)</b>	<b>272,50</b>

Fonte: MERCADO LIVRE (2020).

#### 4.5.1 Tratos Culturais

No decorrer do desenvolvimento das plantas, algumas folhas murcharam e secaram, sendo estas cuidadosamente arrancadas. Também foi necessário realizar o desbaste de plantas invasoras.

Ao longo do experimento, houve a ocorrência de fortes chuvas e a possibilidade de geadas, que poderiam danificar as plantas. Para realizar a proteção das plantas contra chuva forte, granizo e geada, foi realizada a instalação de tela sombrite 50%, a qual também foi bastante útil na segunda metade de experimento, quando ocorreram temperaturas acima de 30°C e alta incidência solar.

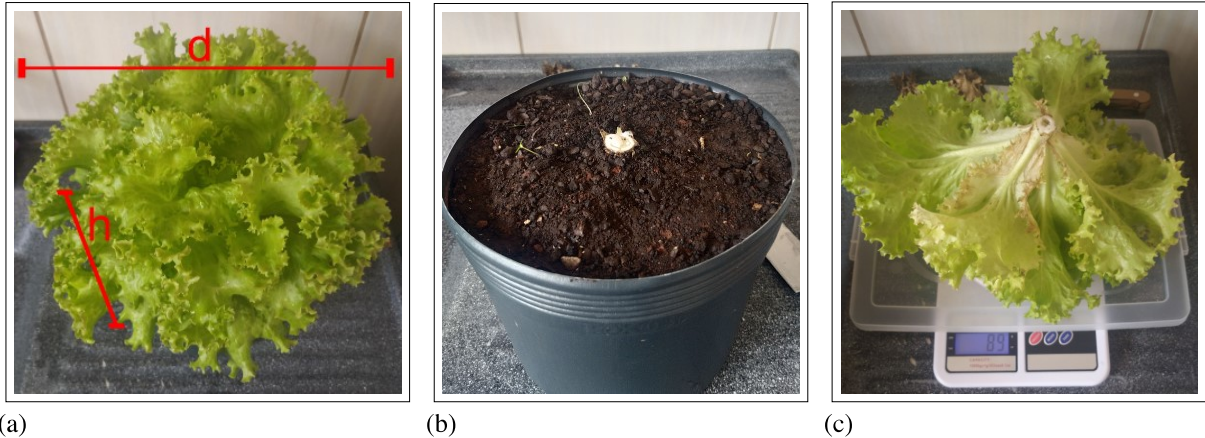
#### 4.6 ANÁLISES REALIZADAS

O experimento foi finalizado no dia 10 de setembro de 2020, após realizar a última irrigação a tarde. No dia seguinte, pela manhã, o cartão SD do controlador foi removido para cálculo do uso de água pelo experimento. Em seguida, as plantas foram recolhidas para a coleta de dados como: diâmetro da "cabeça", altura, diâmetro do caule, peso fresco e número de folhas; para isso, foi utilizada uma trena com resolução de 1 mm, e a mesma balança utilizada anteriormente para a preparação das amostras de solo. Os seguintes passos foram realizados em cada planta:

1. Com a planta ainda em seu vaso, as medidas de altura (h) a partir do substrato e diâmetro (d) da planta foram avaliados, como apresentado na Figura 32(a).
2. Utilizando uma faca, um corte rente ao substrato foi realizado no caule da planta (Figura 32(b)) e o diâmetro do caule da planta foi medido (JUNHUI *et al.*, 2019).
3. Uma base ampla foi posta sobre a balança, para que pudesse comportar a "cabeça" da planta; inicialmente, com a base vazia, a função tara foi acionada, e, após a colocação da planta, a mesma foi pesada, como mostra a Figura 32(c).

4. As folhas da planta foram removidas uma a uma e contadas, apenas folhas com comprimento superior a 5 cm foram consideradas.

Figura 32: Análises realizadas na alface.



Fonte: O autor.

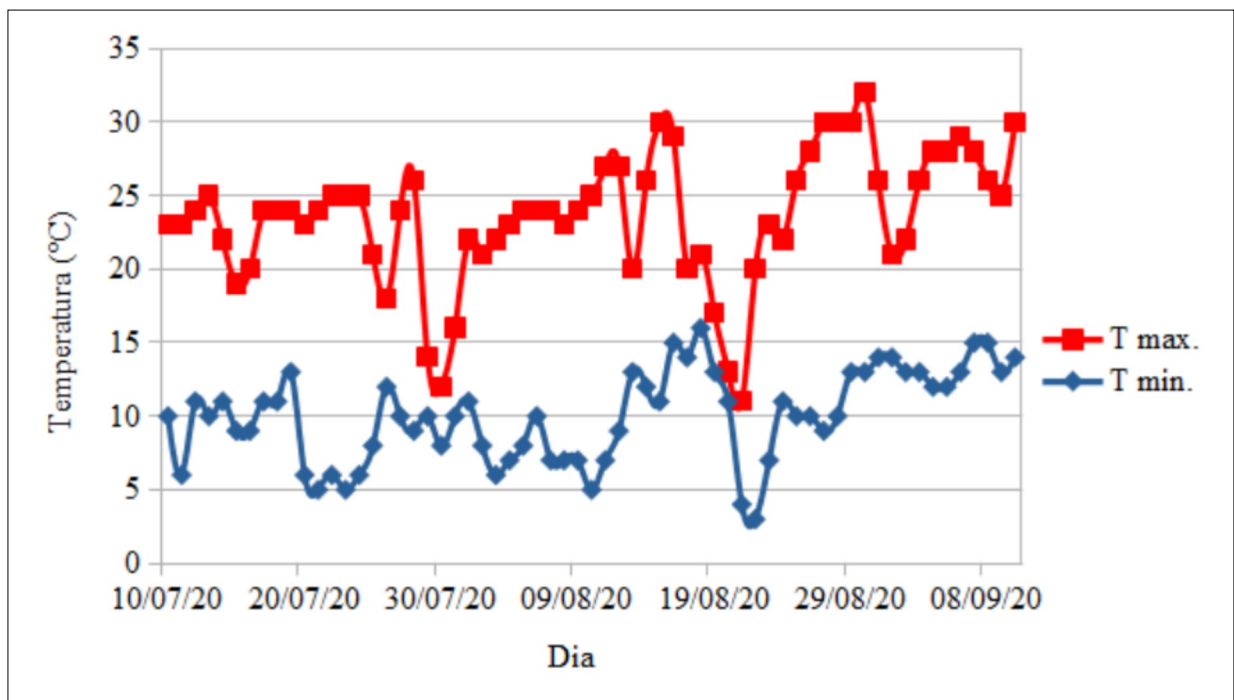
Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de *Shapiro Wilk* e ao teste estatístico *t-student* com 95% de confiança. Para isso, foi usado o software RStudio versão 1.2.5001, com pacote R versão 3.6.1.



## 5 RESULTADOS

O experimento foi realizado entre final do outono e o inverno, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020, e, por este motivo, eram esperadas temperaturas entre os 9 °C e 23 °C, possibilidade de geada e pouca precipitação (SIMEPAR, 2020c). No entanto, no decorrer do experimento, foram verificadas grandes variações nas condições meteorológicas, principalmente quanto a temperatura, como mostra Figura 33, com a menor temperatura, 3 °C, no dia 22 de agosto de 2020; e, 8 dias após, em 30 de agosto de 2020, foram observadas a maior temperatura, 32 °C e a menor umidade relativa do ar, 24 % (Figura 34). Adicionalmente, no dia 27 de agosto foi registrada uma amplitude térmica de 21 °C, com temperatura máxima de 30 °C e mínima de 9 °C (SIMEPAR, 2020e).

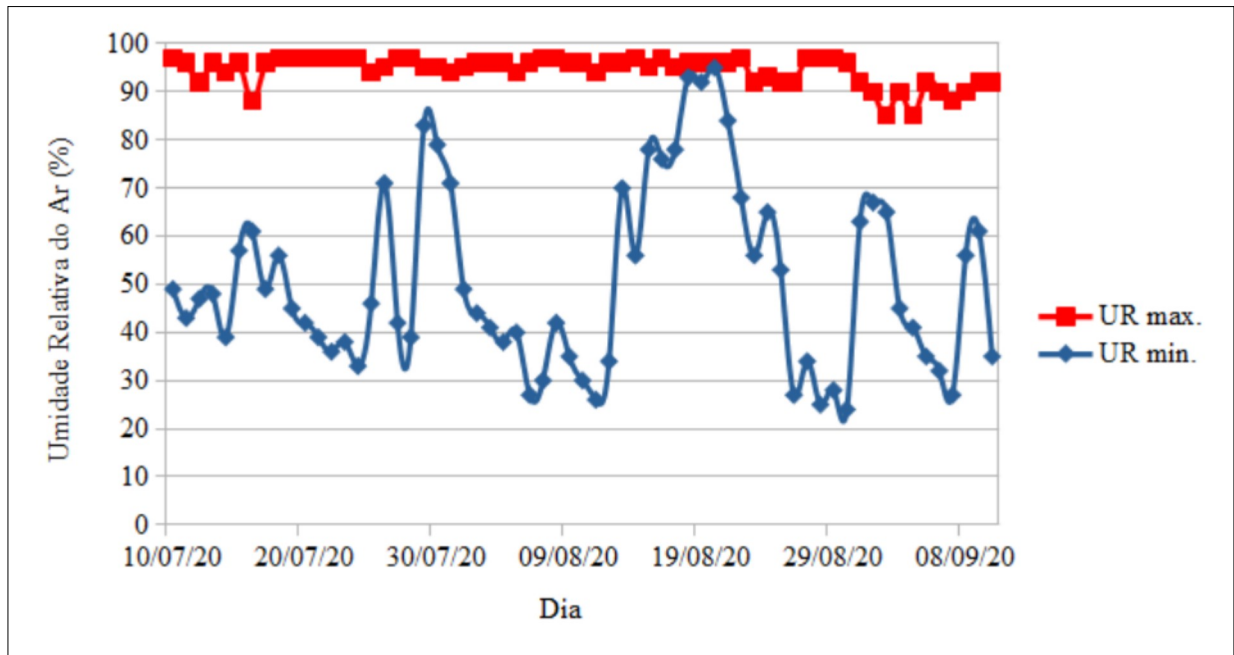
Figura 33: Máximas e mínimas temperaturas no período do experimento, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020. As curvas são somente guias visuais.



Fonte: Simepar (2020e).

O estado do Paraná, no ano de 2020, passa por uma grande estiagem, que vem sendo veiculada como a pior da história (G1, 2020)(BEM PARANÁ, 2020)(CORDEIRO, 2020). O mês de julho e setembro foram os mais secos com déficit de chuva de 60 mm.m<sup>2</sup> para a região de Ponta Grossa (SIMEPAR, 2020b) (SIMEPAR, 2020d). Somente no mês de agosto houve chuvas volumosas no Paraná (SIMEPAR, 2020a).

Figura 34: Máximas e mínimas umidades relativa do ar no período do experimento, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020. As curvas são somente guias visuais.

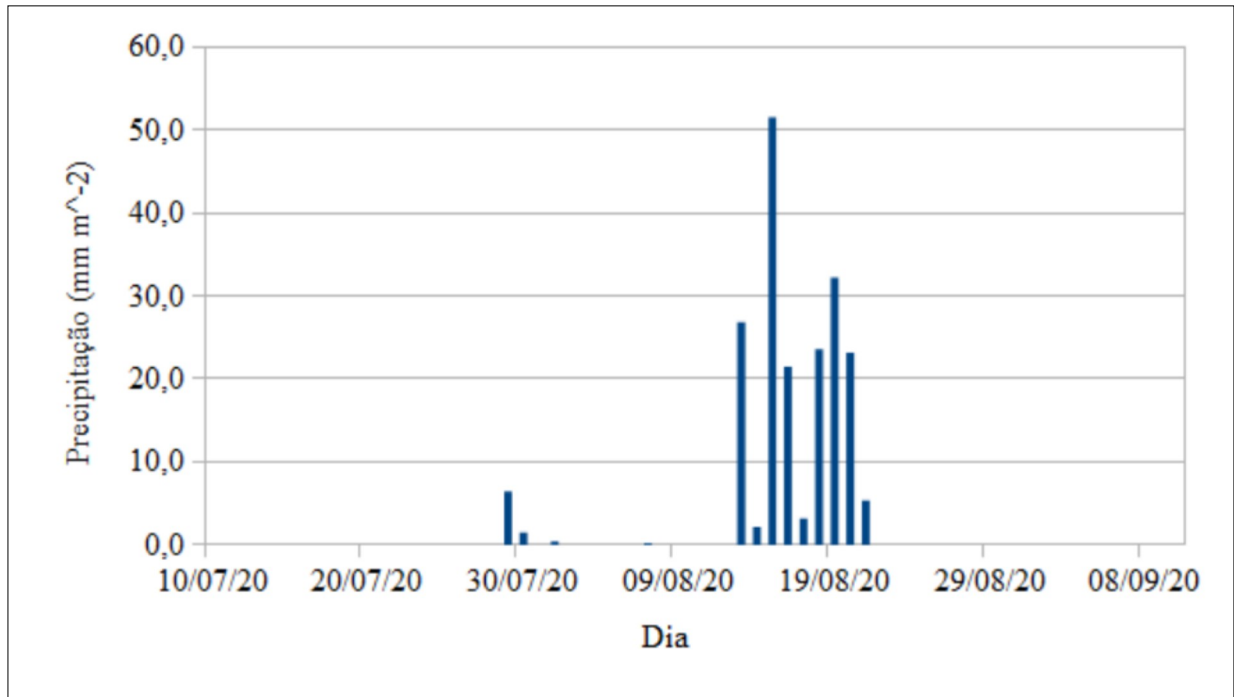


Fonte: Simepar (2020e).

Ao longo de todo o experimento foram constatadas precipitações em 13 dias, totalizando 198,2 mm.m<sup>2</sup>, com os demais 50 dias sem chuva. Em apenas dois períodos ocorreram precipitações significativas, entre os dias 29 e 30 de julho de 2020 e entre 13 a 21 de agosto de 2020, totalizando 7,9 e 189,6 mm.m<sup>2</sup> respectivamente, com a maior precipitação, 51,5 mm.m<sup>2</sup>, registrada no dia 15 de agosto de 2020, não houve ocorrência de chuva no mês de setembro.

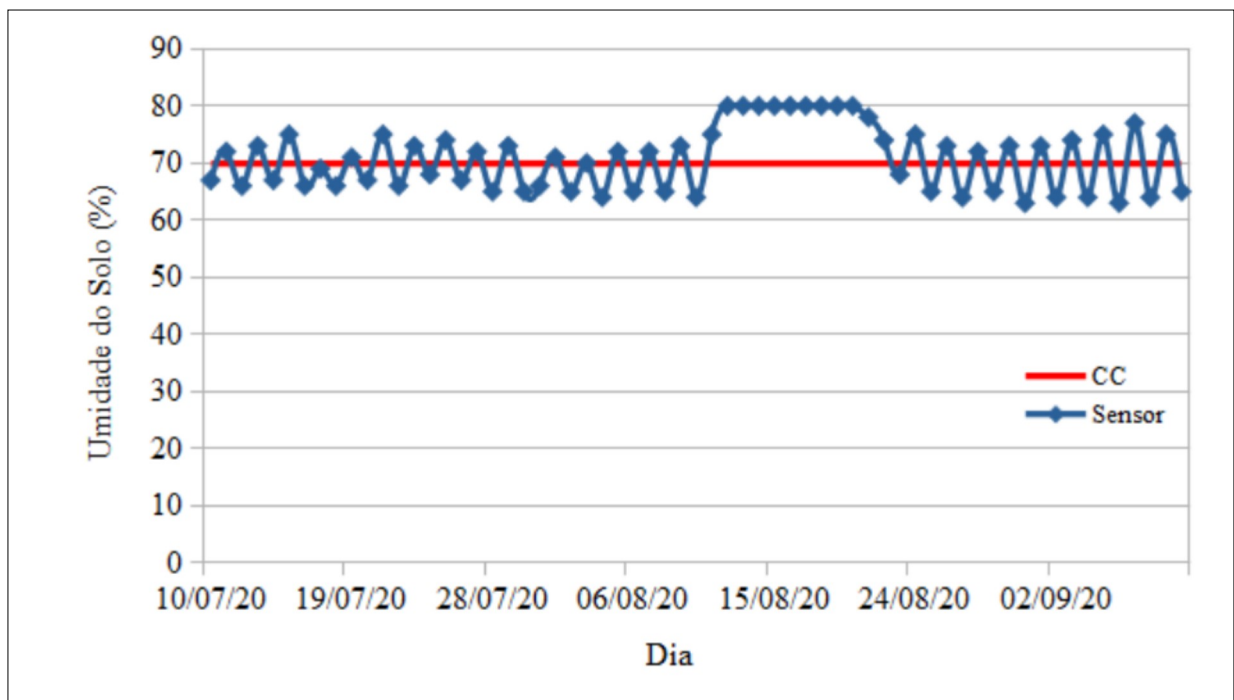
Os dados de precipitação estão apresentados na Figura 35. Destaca-se novamente o período entre 13 a 21 de agosto de 2020, quando ocorreram precipitações significativas, e, com isto, uma condição saturação do substrato, como mostra a Figura 36; adicionalmente, nos demais períodos, a umidade do solo esteve controlada, em torno da CC (Capacidade de Campo), como mostram os dados obtidos através do sensor de umidade do solo.

Figura 35: Precipitação no período do experimento, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020.



Fonte: Simepar (2020e).

Figura 36: Média diária de umidade do solo, entre 10 de julho de 2020 e 10 de setembro de 2020.



Fonte: O autor.

## 5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Tabela 11 apresenta dos dados de consumo de água, durante todo o experimento, pelas metodologias A e B, totalizando 25,56 e 28,69 L, respectivamente. A Figura 37 apresenta a quantidade de água em mm.0,16m<sup>2</sup> utilizada e a precipitação por dia.

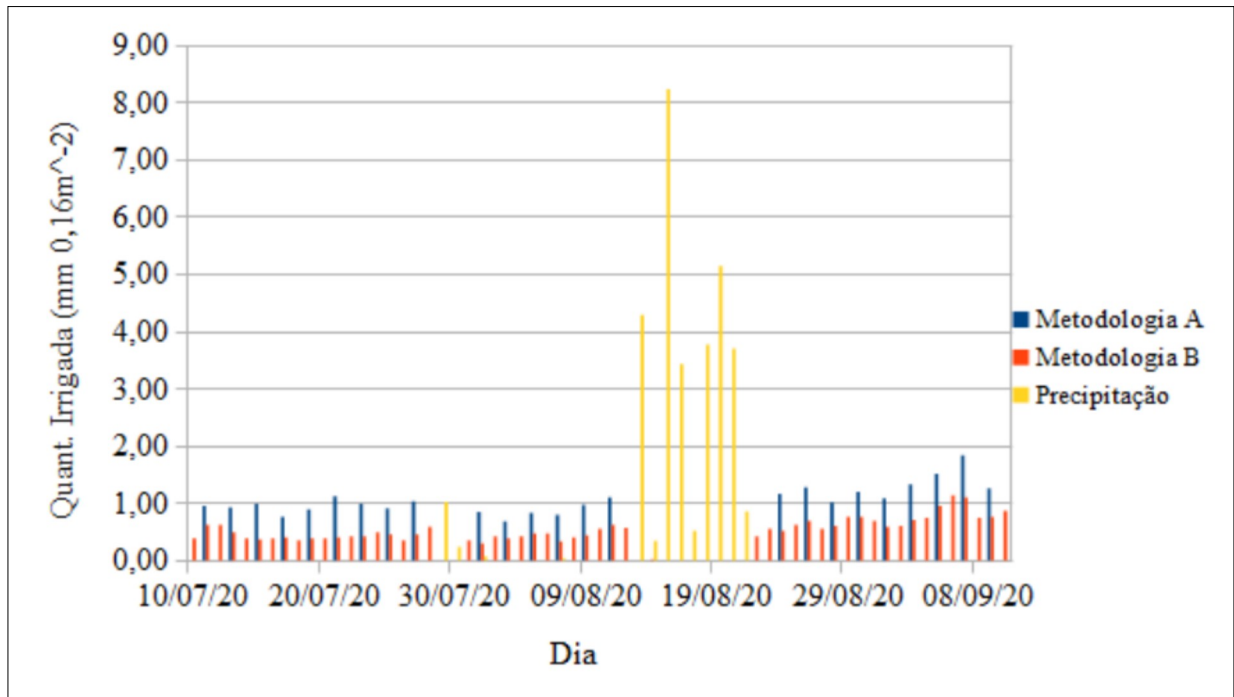
Tabela 11: Quantidade irrigada em cada metodologia.

<b>Quantidade irrigada em cada metodologia (mm.0,16m<sup>2</sup>)</b>					
<b>Dia</b>	<b>Metodologia A</b>	<b>Metodologia B</b>	<b>Dia</b>	<b>Metodologia A</b>	<b>Metodologia B</b>
10/07/20	0,00	0,39	11/08/20	1,10	0,62
11/07/20	0,96	0,62	12/08/20	0,00	0,57
12/07/20	0,00	0,62	13/08/20	0,00	0,00
13/07/20	0,93	0,50	14/08/20	0,00	0,02
14/07/20	0,00	0,39	15/08/20	0,00	0,00
15/07/20	0,99	0,37	16/08/20	0,00	0,00
16/07/20	0,00	0,39	17/08/20	0,00	0,00
17/07/20	0,77	0,41	18/08/20	0,00	0,00
18/07/20	0,00	0,36	19/08/20	0,00	0,00
19/07/20	0,90	0,39	20/08/20	0,00	0,00
20/07/20	0,00	0,39	21/08/20	0,00	0,00
21/07/20	1,12	0,41	22/08/20	0,00	0,43
22/07/20	0,00	0,43	23/08/20	0,00	0,55
23/07/20	0,99	0,43	24/08/20	1,17	0,52
24/07/20	0,00	0,50	25/08/20	0,00	0,62
25/07/20	0,91	0,46	26/08/20	1,28	0,69
26/07/20	0,00	0,36	27/08/20	0,00	0,55
27/07/20	1,04	0,46	28/08/20	1,02	0,60
28/07/20	0,00	0,59	29/08/20	0,00	0,76
29/07/20	0,00	0,00	30/08/20	1,20	0,76
30/07/20	0,00	0,00	31/08/20	0,00	0,69
31/07/20	0,00	0,36	01/09/20	1,09	0,59
01/08/20	0,85	0,30	02/09/20	0,00	0,60
02/08/20	0,00	0,43	03/09/20	1,33	0,71
03/08/20	0,69	0,39	04/09/20	0,00	0,75
04/08/20	0,00	0,43	05/09/20	1,52	0,96
05/08/20	0,83	0,48	06/09/20	0,00	1,14
06/08/20	0,00	0,48	07/09/20	1,84	1,10
07/08/20	0,80	0,34	08/09/20	0,00	0,75
08/08/20	0,00	0,41	09/09/20	1,26	0,76
09/08/20	0,98	0,44	10/09/20	0,00	0,87
10/08/20	0,00	0,55	Total	25,56	28,69

Fonte: O autor.

Os dados de uso da água pelas metodologias foram submetidos ao teste estatístico *t-student*, não pareado, bilateral e com significância  $\alpha = 0,05$ , para verificar, se há ou não dife-

Figura 37: Uso de água pelos sistemas de irrigação, metodologias A e B, e a precipitação da água da chuva no período.



Fonte: O autor.

rença significativa entre as quantidades irrigadas por cada metodologia. Duas hipóteses foram elaboradas:

- $H_0$ : Não há diferença significativa entre as médias da metodologia A e as médias da metodologia B, sendo as mesmas estatisticamente iguais;
- $H_1$ : Há diferença significativa entre as médias da metodologia A e as médias da metodologia B, sendo as mesmas estatisticamente diferentes.

No resultado do teste estatístico para o consumo de água das metodologias A e B, obteve-se o *p-value* (valor p) de  $2,225 \cdot 10^{-10}$ , valor menor que  $\alpha$ , assim, a hipótese  $H_0$  é rejeitada e  $H_1$  aceita. Portanto, as metodologias A e B, em relação a quantidade de água utilizada nas irrigações, produziram médias estatisticamente diferentes. Analisando as médias diárias da quantidade de água utilizada para cada metodologia, observou-se que a metodologia A utilizou, em média,  $1,07 \pm 0,26 \text{ mm.0,16m}^2$ , e a metodologia B, utilizou em média  $0,54 \pm 0,20 \text{ mm.0,16m}^2$ . Na metodologia A, a irrigação foi acionada apenas 23 vezes, enquanto que, na metodologia B, foi acionada 53 vezes, resultando em um consumo de 25,56 e 28,69 L de água, respectivamente. Portanto, a metodologia A, utilizou 11% menos água comparado a metodologia B.

Quanto a otimização do uso de água, o controlador *fuzzy* proposto (metodologia A), comparado com os trabalhos correlatos de mesmo objetivo, poupar água na irrigação utilizando lógica *fuzzy*, obteve resultado inferior aos trabalhos de JunHui *et al.* (2019) e Krishnan *et al.* (2020), que conseguiram redução de 18,18% e 13,03%, respectivamente. Porém, JunHui *et al.* (2019) e Krishnan *et al.* (2020) utilizaram respectivamente 125 e 27 regras *fuzzy* em seus controladores, quantidade superior às 6 regras utilizadas pelo controlador proposto por este trabalho. A diferença no número de regras utilizadas implica na complexidade do *firmware* do controlador; no entanto, é possível ajustar o controlador desenvolvido, adicionando novas variáveis de entrada e regras *fuzzy*, para que haja um maior controle da irrigação e, com isto, maior economia de água.

Outra análise realizada foi quanto às características das alfaces produzidas pelas metodologias A e B. Os dados coletados das alfaces, Tabela 12, foram submetidos ao teste estatístico *t-student*, não pareado, bilateral e com significância  $\alpha = 0,05$ , para verificar se há ou não diferença significativa ou não entre os resultados das metodologias. Duas hipóteses foram elaboradas:

- **H<sub>0</sub>**: Não há diferença significativa entre as médias da metodologia A e as médias da metodologia B, sendo as mesmas estatisticamente iguais;
- **H<sub>1</sub>**: Há diferença significativa entre as médias da metodologia A e as médias da metodologia B, sendo as mesmas estatisticamente diferentes.

A Tabela 13 apresenta os resultados do teste estatísticos no software R. Observou-se com os resultados dos testes que, para todas as comparações, o *p-value* (valor p) esteve maior que  $\alpha$ , indicando que não houve uma diferença significativa entre os dados analisados; com base nesta informação, a hipótese H<sub>0</sub> foi aceita e H<sub>1</sub> rejeitada. Logo, as metodologias A e B em relação às alfaces, produziram plantas com características estatisticamente iguais, assim como (NASCIMENTO *et al.*, 2020), que não observou diferenças significativas na produtividade. Porém, há a possibilidade de acréscimo na produtividade, como mostrado no trabalho de Patil, Kulkarni e Desai (2012), que obteve 21% a mais de produtividade na cultura da alface, bem como nos trabalhos de Filho (2017), Bernardi, Quitaiski e Santos (2017) e Moreira *et al.* (2019), com acréscimo de 30% ou mais na produtividade. Quanto as características das alfaces pós colheita, Neto *et al.* (2005) obtiveram resultados semelhantes para número de folhas e diâmetro da cabeça da alface, os autores também fizeram uso de tela sombrite na cor preta em seu trabalho, resultado em 16,05 folhas por planta e 32,71 cm de diâmetro da cabeça por planta.

Tabela 12: Dados obtidos de cada uma das alfaces cultivadas durante o período do experimento e para as metodologias A e B.

<b>Dados obtidos das alfaces</b>			
<b>Peso fresco (g)</b>		<b>Altura (cm)</b>	
<b>Metodologia A</b>	<b>Metodologia B</b>	<b>Metodologia A</b>	<b>Metodologia B</b>
72,5	50,5	15,5	12,5
59,5	70,5	13,5	15,5
63,5	88,5	13,5	16,5
90,5	78,5	17,5	17,5
71,5	94,5	14,5	14,5
89,5	99,5	15,5	16,5
75,5	79,5	14,5	16,5
90,5	59,5	14,5	12,5
<b>Diâmetro da cabeça (cm)</b>		<b>Diâmetro do caule (mm)</b>	
<b>Metodologia A</b>	<b>Metodologia B</b>	<b>Metodologia A</b>	<b>Metodologia B</b>
27,5	25,5	16,5	15,5
25,5	26,5	15,5	14,5
26,5	27,5	14,5	17,5
25,5	26,5	16,5	16,5
30,5	27,5	15,5	17,5
28,5	30,5	16,5	16,5
27,5	27,5	15,5	17,5
29,5	27,5	17,5	14,5
<b>Número de folhas (un.)</b>			
<b>Metodologia A</b>	<b>Metodologia B</b>		
17	14		
15	16		
15	19		
18	17		
17	18		
17	18		
17	17		
19	16		

Fonte: O autor.

Tabela 13: Dados obtidos das análises estatística no software R.

<b>Variável</b>	<b>p-value</b>	<b>Médias (Metod. A e B)</b>		<b>Erro (Metod. A e B)</b>	
Peso fresco (g)	0,90	76,6 ± 12,3	77,6 ± 16,9	4,4	6,0
Altura (cm)	0,65	14,9 ± 1,3	15,0 ± 1,9	0,5	0,7
Diâmetro da cabeça (cm)	0,77	27,6 ± 1,8	27,4 ± 1,5	0,6	0,5
Diâmetro do caule (mm)	0,66	16,0 ± 0,9	16,3 ± 1,3	0,3	0,5
Núm. de folhas (un.)	1	16,9 ± 1,4	16,9 ± 1,6	0,5	0,5

Fonte: O autor.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo deste trabalho foi aplicar técnicas da computação para desenvolver um controlador baseado na lógica *fuzzy* para automatizar a irrigação da alface crespa, com foco na produtividade com uso eficiente da água. Este e os demais objetivos específicos foram alcançados pelo controlador desenvolvido, que apresenta as seguintes vantagens: a utilização de um número reduzido de componentes para formar o hardware, seis ao todo: um microcontrolador ATmega328 (Arduino Nano), um sensor de umidade do solo, uma fonte de energia, uma válvula solenoide, um módulo SD e um módulo relé, e a utilização de plataformas e biblioteca *fuzzy* gratuitas, agilizado o desenvolvimento do *firmware* do controlador; pelos resultados apresentados quanto a capacidade em controlar a irrigação; e pela comparação realizada do sistema controlado com o sistema de irrigação manual em termos de produção e consumo de água.

Com os resultados obtidos no presente trabalho, é possível chegar aos seguintes aspectos práticos. O hardware proposto se mostrou robusto, apesar de utilizar componentes simples de prototipação, mantendo-se funcional durante 63 dias consecutivos. O controlador *fuzzy* (metodologia A) com apenas seis regras, produziu alfaces iguais estatisticamente as alfaces produzidas pela irrigação manual por reposição da evapotranspiração (metodologia B), porém a metodologia A economizou 11% de água. O controlador *fuzzy* proposto necessitou de um investimento de R\$ 256,00 reais, para o hardware utilizado em seu desenvolvimento, e de R\$ 272,50 reais para a implantação da horta e sistema de irrigação. No entanto, os valores referentes ao sistema de irrigação variam em função das dimensões da horta. Os valores apresentados são de 10 de outubro de 2020.

Durante a realização do trabalho, foi observado um dos piores cenários hídricos do estado do Paraná e do município de Ponta Grossa, tornando evidente a importância de trabalhos que proponham modernizar os métodos contemporâneos de irrigação.

Por fim, conclui-se que a computação foi aplicada a agricultura, através dos conhecimentos utilizados para desenvolver o hardware e o *firmware* apresentados, e por sua integração à um sistema de irrigação agrícola.

### 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros têm-se:

- Realizar a repetição do experimento em ambiente protegido (estufa), utilizando outro delineamento experimental, afim de comparar os resultados entre um experimento realizado ao ar livre e em ambiente protegido;



- Embora o controlador *fuzzy* tenha se mostrado eficiente, no gerenciamento da água para irrigação da alface crespa, há variáveis como temperatura, umidade do ar e velocidade do vento, que podem ser adicionadas como entrada para aprimorar o controlador;
- Utilização de energia renovável, adicionando painel solar e bateria ao hardware do controlador, tornando-o assim, independente da rede elétrica; e
- Como descrito durante o trabalho, a presença de um especialista é fundamental para o correto funcionamento do controlador *fuzzy*, para facilitar a entrada de dados e configuração do controlador, um IHM (Interface Homem Máquina) se faz necessário para aplicações no campo.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, R. L. **Mapa do Paraná**: Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parana\\_MesoMicroMunicip.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parana_MesoMicroMunicip.svg). Acesso em: 11 dez. 2019.
- ADEYEMI, O. *et al.* **dynamic modelling of lettuce transpiration for water status monitoring**. Computers and Electronics in Agriculture, Elsevier BV, v. 155, p. 50–57, dez 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.008>.
- ADEYEMI, O. *et al.* **dynamic modelling of the baseline temperatures for computation of the crop water stress index (cws) of a greenhouse cultivated lettuce crop**. Computers and Electronics in Agriculture, Elsevier BV, v. 153, p. 102–114, out 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.009>.
- AFOLABI, D. I. *et al.* **development and performance evaluation of automated irrigation system**. In: 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA). IEEE, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/robomech.2019.8704785>.
- AGUIRRE, L. A. **Fundamentos de Instrumentação**. [S.l.]: Pearson Universidades, 2013. 332 p. ISBN 9788581431833.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. d. **Estratégias de Manejo de Irrigação: Exemplos de Cálculo**. Sete Lagoas - MG: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2010. 25 p. ISSN 1518-4269. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/25532/1/Circ-136.pdf>. Acesso em: 18 set. 2019.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; RESENDE, M. **Árvore do Conhecimento - Milho**. 2020. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01\\_73\\_16820051120.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_73_16820051120.html). Acesso em: 6 jul. 2020.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**: Disponível em: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm#Contents>. Acesso em: 10 jul. [S.l.]: FAO Irrigation and drainage, 1998.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Evapotranspiración del cultivo**. 2006. Disponível em: <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>. Acesso em: 18 set. 2020.
- ALVE, A. J. *et al.* **eFLL - Uma Biblioteca Fuzzy para Arduino e Sistemas Embarcados**: Disponível em: <https://github.com/zerokol/eFLL>. Acesso em: 11 dez. 2019.
- ARDUINO. **Arduino Nano**. 2019. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Acesso em: 18 set. 2019.
- ARDUINO. **Introduction**. 2019. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 18 set. 2019.
- BEM PARANÁ. **Paraná apresenta a situação hídrica mais crítica de todo o país e a região de Curitiba enfrenta a pior seca de sua história**: Disponível em:

<https://www.bemparana.com.br/noticia/parana-apresenta-a-situacao-hidrica-mais-critica-de-todo-o-pais-e-a-regiao-de-curitiba-enfrenta-a-pior-seca-de-sua-historia.X4cQu-1v-00>. Acesso em: 2 out. 2020.

BERNARDI, A. L.; QUITAISKI, K. P.; SANTOS, P. R. dos. **Sistema de Irrigação Automatizado de Hortaliças**: Tcc (trabalho de conclusão de curso) - universidade tecnológica federal do paraná. 2017.

BLACK, M. **vagueness. an exercise in logical analysis**. Philosophy of Science, University of Chicago Press, v. 4, n. 4, p. 427–455, out. 1937. Disponível em: <https://doi.org/10.1086/286476>.

BOOLE, G. **The Mathematical Analysis of Logic**. Cambridge University Press, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511701337>.

BRAGA, M. B.; CALGARA, M. **sistemas de produção**. In: Embrapa Semiárido. 2010. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melancia/SistemaProducaoMelancia/irrigacao.htm>. Acesso em: 18 set. 2019.

CHAVES, H. A. **Moitoramento de Parâmetros de Produção da Cultura da Rúcula (Eruca sativa miller) Através da Automação da Irrigação**: Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais. 2018.

Clima Tempo. **Climatologia de Ponta Grossa-PR**. 2020. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/279/pontagrossa-pr>. Acesso em: 3 jun. 2020.

CORDEIRO, V. **Paraná Portal - Paraná registra a pior estiagem do país, e região de Curitiba enfrenta ‘seca extrema’**: Disponível em: <https://paranaportal.uol.com.br/cidades/parana-seca-extrema-curitiba-regiao-sanepar/>. Acesso em: 25 set. 2020.

CORUM, J. S. **the luftwaffe's campaigns in poland and the west 1939-1940: a case study of handling innovation in wartime**. Security and Defence Quarterly, War Studies University, v. 1, n. 1, p. 173–175, mar. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.35467/sdq/103158>.

COSTA, J. A. **Evapotranspiração e Coeficiente de Cultivo da Mamona (Ricinus communis L.), cv. BRS Energia, no Recôncavo da Bahia**: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. 2018.

DIYMORE. **DYMORE - Capacitive Soil Moisture Sensor**. 2020. Disponível em: <https://www.diymore.cc/products/2pcs-capacitive-soil-moisture-sensor-v1-2-analog-corrosion-resistant-dc-3-3-5-5v>. Acesso em: 20 set. 2020.

EASYEDA. **EasyEDA Designer - An Easier and Powerful Online PCB Design Tool**: Disponível em: <https://easyeda.com/editor>. Acesso em: 10 jan. 2020.

FAO. **AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture: Water uses**. 2016. Disponível em: [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water\\_use/index.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm). Acesso em: 6 ago. 2019.

FELICIANO, R. de A. C. **Controle Fuzzy Espacialmente Diferenciado para um Sistema de Irrigação**: Dissertação (mestrado) - universidade federal do rio grande do norte. 2013.

FILHO, A. C. M. **Sistema de Automação e Controle Inteligente para Cultivo Protegido - Tecnologia Acessível ao Pequeno Produtor**: Dissertação (mestrado) - instituto federal de educação, ciência e tecnologia de santa catarina. 2017.

G1. **Paraná enfrenta a pior seca já registrada no estado:** Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2020/06/01/parana-enfrenta-a-pior-seca-ja-registrada-no-estado.ghtml>. Acesso em: 5 jul. 2020.

GOOGLE. **Mapa do Paraná:** Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Ponta+Grossa,+PR/@-25.1387919,-50.2990988,11z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x94e81ac65f102321:0xacb0f4e64629b2f1!8m2!3d-25.0994246!4d-50.1583223>. Acesso em: 20 mai. 2020.

HARO-MONTEAGUDO, D.; KNOX, J. W.; HOLMAN, I. P. **d-risk: a decision-support webtool for improving drought risk management in irrigated agriculture.** Computers and Electronics in Agriculture, Elsevier BV, v. 162, p. 855–858, jul 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.029>.

HRISKO, J. **capacitive soil moisture sensor theory, calibration, and testing.** Unpublished, 2020. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.36214.83522>.

INTERPARTNER. **Interpartner Laboratório de Análises:** Disponível em: <http://www.interpartnerpg.com.br/contato.html>. Acesso em: 08 jun. 2020.

JAMES, J.; MAHESHWAR, M. P. **plant growth monitoring system, with dynamic user-interface.** In: 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). IEEE, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/r10-htc.2016.7906781>.

JUNHUI, W. *et al.* **fuzzy control system of substrate lettuce cultivation based on light-dependent irrigation control method.** In: 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). IEEE, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icece48499.2019.9058503>.

KHANNA, N. *et al.* **design and development of soil moisture sensor and response monitoring system.** v. 3, p. 2278–5299, 12 2014.

KICKERT, W.; MAMDANI, E. **analysis of a fuzzy logic controller.** In: Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems. Elsevier, 1993. p. 290–297. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-1450-4.50033-x>.

KNEALE, W. **aristotle's syllogistic from the standpoint of modern formal logic. by jan lukasiewicz. (oxford: clarendon press. 1951. pp. xi 141. 15s.).** Philosophy, Cambridge University Press (CUP), v. 27, n. 102, p. 279–282, jul. 1952. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/s0031819100034227>.

KRISHNAN, R. S. *et al.* **fuzzy logic based smart irrigation system using internet of things.** Journal of Cleaner Production, Elsevier BV, v. 252, p. 119902, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119902>.

LI, M. *et al.* **a real-time fuzzy decision support system for alfalfa irrigation.** Computers and Electronics in Agriculture, Elsevier BV, v. 163, p. 104870, ago 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2019.104870>.

LRSV. **Caderno de Campo Asteráceas (alface).** 2016. Disponível em: <http://posei.azores.gov.pt/ficheiros/512016153441.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2020.

MALDONADE, I. R.; MATTOS, L. M.; MORETTI, C. L. **Manual de boas práticas agrícolas na produção de alface**. Brasília - DF: Embrapa Hortaliças, 2014. 44 p. (Documentos, 142). ISSN 1415-2312. Disponível em: [https://www.ibrahort.org.br/uploads/1/0/1/9/101976270/manual\\_de\\_boas\\_praticas\\_agricolas\\_na\\_producao\\_de\\_alface..pdf](https://www.ibrahort.org.br/uploads/1/0/1/9/101976270/manual_de_boas_praticas_agricolas_na_producao_de_alface..pdf). Acesso em: 18 set. 2019.

MAMDANI. **application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis**. *IEEE Transactions on Computers*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), C-26, n. 12, p. 1182–1191, dez. 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tc.1977.1674779>.

MAMDANI, E. **application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant**. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Institution of Engineering and Technology (IET)*, v. 121, n. 12, p. 1585, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>.

MAMDANI, E.; ASSILIAN, S. **an experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**. *International Journal of Man-Machine Studies*, Elsevier BV, v. 7, n. 1, p. 1–13, jan. 1975. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7373(75)80002-2).

MAMDANI, E.; BAAKLINI, N. **prescriptive method for deriving control policy in a fuzzy-logic controller**. *Electronics Letters, Institution of Engineering and Technology (IET)*, v. 11, n. 25-26, p. 625, 1975. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/el:19750476>.

MAROUELLI, W. A. *et al.* **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. 2011. 222-224 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55931/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap5.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2020.

MCNEILL, F. M.; THRO, E. **Fuzzy Logic A Practical Approach**: Elsevier. 1994.

MERCADO LIVRE. **Mercado Livre Brasil**: Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2020. 2020.

MOREIRA, C. G. *et al.* **Produção e Crescimento da Abóbora Submetida a Diferentes Lâminas de Irrigação Usando Sistema Automático**: V INOVAGRI International Meeting. 2019.

NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. **calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system**. *Agriculture, MDPI AG*, v. 9, n. 7, p. 141, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture9070141>.

NASCIMENTO, J. M. S. do *et al.* **irrigação por gotejamento superficial e pulsos na produção de tomate de mesa**. *Brazilian Journal of Development*, Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 9, p. 65903–65919, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-135>.

NAWANDAR, N. K.; SATPUTE, V. R. **iot based low cost and intelligent module for smart irrigation system**. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier BV, v. 162, p. 979–990, jul 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.027>.

NETO, F. B. *et al.* **produtividade de alface em função de condições de sombreamento e temperatura e luminosidade elevadas**. *Horticultura Brasileira*, FapUNIFESP (SciELO), v. 23, n. 2, p. 189–192, jun. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0102-05362005000200005>.

NITSCHKE, P. R. *et al.* **Atlas Climático do Paraná**: Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/pagina/atlas-climatico>. Acesso em: 6 dez. 2019.

ORTOLA, M. P.; KNOX, J. W. **water relations and irrigation requirements of onion (*allium cepa* l.): a review of yield and quality impacts**. *Experimental Agriculture*, Cambridge University Press (CUP), v. 51, n. 2, p. 210–231, nov 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479714000234>.

PATIL, P.; KULKARNI, U.; DESAI, B. L. **fuzzy logic based irrigation control system using wireless sensor network for precision agriculture**. In: . [s.n.], 2012. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/FUZZY-LOGIC-BASED-IRRIGATION-CONTROL-SYSTEM-USING-Patil-Kulkarni/8b07eaa353320ebeb97f67153e7244d7f7f18e1c>. Acesso em: 18 set. 2019.

PAULINO, M. A. D. O. *et al.* **manejo da Água no cultivo de alface irrigado pelo sistema de microaspersão**. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 3, n. 1, p. 22–29, dez. 2009.

PLACIDI, P. *et al.* **characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for iot networks**. *Sensors*, MDPI AG, v. 20, n. 12, p. 3585, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20123585>.

PUTTI, F. F. *et al.* **fuzzy modeling of development of sheets number in different irrigation levels of irrigated lettuce with magnetically treated water**. In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Computational Intelligence*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5220/0005599701620169>.

QUEIROZ, A. A.; CRUVINEL, V. B.; FIGUEIREDO, K. M. E. **produção de alface americana em função da fertilização com organomineral**. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, v. 14, n. 25, p. 1053–1063, jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18677/encibio2017a84>.

RADI *et al.* **calibration of capacitive soil moisture sensor (sku:sen0193)**. In: *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*. IEEE, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icstc.2018.8528624>.

RAES, D. **The ETO Calculator**. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations Land and Water Division, jan. 2009. Disponível em: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/faowater/docs/ReferenceManualETo.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/faowater/docs/ReferenceManualETo.pdf).

RAMADAN, K. M. *et al.* **design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures**. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier BV, v. 148, p. 148–159, maio 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.038>.

REIS, G. A.; SOUZA, M. M. de. **Desenvolvimento do Aplicativo "EToCALC 1.0" para Estimar a Evapotranspiração de Referência**: Tcc (trabalho de conclusão de curso) - universidade federal da grande dourados. 2019.

RESENDE, G. M. *et al.* **Alface, qual cultivar?** Embrapa Semiárido, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125472/1/Milanez.pdf>. Acesso em: 18 set. 2019.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. **retrospectiva e tendência da alfacultura brasileira**. Horticultura Brasileira, FapUNIFESP (SciELO), v. 30, n. 2, p. 187–194, jun. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0102-05362012000200002>.

SANTOS, A. A.; SOUZA, J. L. M. **Desempenho de Módulo Automático para Estimar Séries de Evapotranspiração de Referência Diária e Horária**. 2020.

SANTOS, S. L. M. D.; FILHO, E. P. D. S. **determinação da umidade de solo pelos métodos estufa e forno micro-ondas em diferentes texturas de um latossolo vermelho-amarelo sul-amazônico**. *GEOGRAFIA (Londrina)*, Universidade Estadual de Londrina, v. 28, n. 2, p. 41, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2019v28n2p41>.

SEBRAE. **Alface: Saiba como cultivar hortaliças para colher bons negócios**. Brasília - DF: SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2011. 28 p. (Agricultura Familiar). Disponível em: [https://www.ibrahort.org.br/uploads/1/0/1/9/101976270/cartilha\\_alface\\_passo-a-passo.pdf](https://www.ibrahort.org.br/uploads/1/0/1/9/101976270/cartilha_alface_passo-a-passo.pdf). Acesso em: 18 set. 2019.

SEGOVIA, J. F. O.; FILHO, R. P. L. **Irrigação de Hortaliças no Estado Amapá**. 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/348926/1/Circular200433.PDF>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SEMERARO, T. *et al.* **modelling fuzzy combination of remote sensing vegetation index for durum wheat crop analysis**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 156, p. 684 – 692, 2019. ISSN 0168-1699. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918311347>.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Informática Agropecuária e Embrapa Solos, 2009. 627 p. ISBN 978-85-7383-430-7. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pcid=256766biblioteca=vaziobusca=autoria:%22SILVA,%20F.%20C.%22qFacets=autoria:%22SILVA,%20F.%20C.%22sort=paginacao=tpaginaAtual=1>. Acesso em: 3 jan. 2020.

SILVA, F. F. B. **Desvendando a Lógica Fuzzy**: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia. 2011.

SIMEPAR. **Agosto/2020 com chuva acima da média no Paraná**: Disponível em: <http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/timeline/noticias>. Acesso em: 2 out. 2020.

SIMEPAR. **Julho/2020 com déficit de chuva no Paraná**: Disponível em: <http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/timeline/noticias>. Acesso em: 12 ago. 2020.

SIMEPAR. **Previsão climática - inverno 2020**: Disponível em: <http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/timeline/noticias>. Acesso em: 12 ago. 2020.

SIMEPAR. **Setembro/2020 seco e quente no Paraná**: Disponível em: <http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/timeline/noticias>. Acesso em: 10 out. 2020.

SIMEPAR. **Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR): Previsão do Tempo - Ponta Grossa/PR**: Disponível em: [http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/forecast\\_by\\_counties/4119905](http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/forecast_by_counties/4119905). Acesso em: 10 jul. 2020.

SINGH, P.; SAIKIA, S. **arduino-based smart irrigation using water flow sensor, soil moisture sensor, temperature sensor and esp8266 wifi module**. In: *2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*. IEEE, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/r10-htc.2016.7906792>.

SOUSA, J. S. C. de. **procal\_eto: programa computacional para cálculo da eto pelo método de penman-monteith**. *IRRIGA*, Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA, v. 1, n. 01, p. 380, maio 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v1n01p380>.

SOUSA, V. S. *et al.* **desempenho da alfaca do grupo solta crespa cultivadas no verão em jataí-go**. *Revista de Ciências Agronômicas*, v. 27, p. 288–296, set 2018. ISSN 2446-8355. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183668/1/milanez-2018.pdf>.

SOUZA, C. F. *et al.* **monitoramento do teor de Água no solo em tempo real com as técnicas de tdr e fdr**. *IRRIGA*, Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA, v. 1, n. 01, p. 26, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p26-42>.

SOUZA, F. C. *et al.* **calibração de sonda fdr e tdr para a estimativa da umidade em dois tipos de solo**. *IRRIGA*, Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA, v. 18, n. 4, p. 597, dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p597>.

STEVAN JR, S. L.; SILVA, R. A. **Automação e Instrumentação Industrial Com Arduino - Teoria e Projetos**. [S.l.: s.n.], 2015. 338 p. ISBN 9788536514789.

TAVARES, M. H. F. *et al.* **uso do forno de microondas na determinação da umidade em diferentes tipos de solo**. *Semina: Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina*, v. 29, n. 3, p. 529, set. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2008v29n3p529>.

TOUATI, F. *et al.* **a fuzzy logic based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of qatar**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 98, p. 233 – 241, 2013. ISSN 0168-1699. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169913001968>.

UDSEN, S. **O Mercado de Folhosas: Números e tendências**. Campinas - SP: ABCSEM - Associação Brasileira de Comércio de Sementes e Mudas, 2016. Disponível em: [http://www.abcsem.com.br/upload/arquivos/O\\_mercado\\_de\\_folhosas\\_\\_Numeros\\_e\\_Tendencias\\_-\\_Steven.pdf](http://www.abcsem.com.br/upload/arquivos/O_mercado_de_folhosas__Numeros_e_Tendencias_-_Steven.pdf). Acesso em: 18 set. 2019.

VILELA, N. J.; LUENGO, R. de F. A. **Produção de hortaliças folhosas no Brasil**. 2017. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/producao-de-hortalicas-folhosas-no-brasil/>. Acesso em: 18 jun. 2020.

YU, X. *et al.* **a survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture**. *Computer Standards Interfaces*, Elsevier BV, v. 35, n. 1, p. 59–64, jan 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csi.2012.05.001>.

ZADEH, L. A. **fuzzy sets\***. *Information and Control*, n. 8, p. 338–353, 1965.

ZADEH, L. A. **outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes**. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), SMC-3, n. 1, p. 28–44, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tsmc.1973.5408575>.



ZELEKE, K. T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. **calibration and testing of the fao aquacrop model for canola**. *Agronomy Journal*, Wiley, v. 103, n. 6, p. 1610–1618, nov. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0150>.