

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

Alisson Felipe Coelho Garcia (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada - UEPG)
E-mail: alissonfcg@gmail.com

Maria Salete Marcon Gomes Vaz (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada - UEPG)
E-mail: salete@uepg.br

Rosane Falate (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada - UEPG)
E-mail: rfalate@uepg.br

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. Entretanto, assim como outras culturas folhosas, exige um rigoroso controle de irrigação, e umidade do solo inadequada, mesmo em períodos relativamente curtos, pode afetar a cultura. Sabendo também que setor agrícola é o maior consumidor de água potável no mundo, devido a necessidade de irrigação das diferentes culturas, este 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-chave: Lógica Fuzzy, Irrigação, Alface Crespa.

IRRIGATION SYSTEM FOR CRESPA LETTUCE CROPS BASED ON FUZZY LOGIC

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. However, lettuce, like other leafy crops, requires strict irrigation control, and inadequate soil moisture, even in relatively short periods, can affect the crop. Since the agricultural sector is the largest consumer of drinking water in the world, due to the need for irrigation of different crops, 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 a 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 ± 12.3 g and 77.6 ± 16.9 g; height of 14.9 ± 1.3 cm and 15.0 ± 1.9 cm; head diameter of 27.6 ± 1.8 cm and 27.4 ± 1.5 cm; stem diameter of 16.0 ± 0.9 mm and 16.3 ± 1.3 mm; and number of sheets of 16.9 ± 1.4 units and 16.9 ± 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, Irrigation, Curly Lettuce.

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).

A alface se destaca no Brasil por ser a terceira hortaliça em maior volume de produção, perdendo apenas para a melancia e o tomate, e movimentada 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 (SALA & COSTA, 2012), (UDSEN, 2016). 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. Ainda, 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). 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). Para Paulino *et al.* (2009), especialmente no final do ciclo da alface, a quantidade de água no solo deve ser próxima a CC (Capacidade de Campo), a quantidade máxima de água que o solo consegue absorver, sem que haja saturação.

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). A ET da cultura pode ser calculada pelo produto da evapotranspiração de referência E_{To} , calculada a partir de dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento; multiplicada pelo coeficiente da cultura K_c que, para o alface é igual a 1 (ALLEN *et al.*, 1998).

Para monitorar as variações de umidade do solo, sensores podem ser utilizados, para fins de medição e em apoio ao monitoramento e ao controle de processos, por exemplo, de irrigação (PATIL *et al.* 2012), (JUNHUI *et al.*, 2019), (KRISHNAN *et al.*, 2020). Havendo os dados de ganhos e perdas de água durante o crescimento de uma cultura, o uso de um controlador (*hardware* e *firmware*) pode ser interessante para auxiliar no momento da irrigação. O algoritmo (*firmware*), que pode ser desenvolvido utilizando diversas técnicas de programação, como, por exemplo: lógica convencional, lógica *fuzzy*, ou técnicas de IA (Inteligência Artificial) (MARQUES FILHO, 2017).

A lógica *fuzzy* se destaca, pois utiliza funções e regras matemáticas simples para realizar o processamento dos dados e a tomada de decisão (LI *et al.*, 2019), sendo que as regras refletem a maneira como as pessoas pensam, e modelam o senso comum de palavras, utilizado pelos seres humanos (ZADEH, 1973). A introdução da lógica *fuzzy* tem conduzido as pesquisas para sistemas inteligentes, similares ao pensamento humano e mais adequados à realidade (ZADEH, 1973), (PATIL *et al.*, 2012), (LI *et al.*, 2019), (KRISHNAN *et al.*, 2020). Sabendo que a alface demanda manejo contínuo quanto à irrigação, 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.

2. Material e Método

O experimento foi realizado de julho a setembro de 2020 em local aberto, nas proximidades do campus da Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, localizada no município de Ponta Grossa - PR, pertencente à 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).

O clima nessa região é subtropical, com precipitação média nos meses de julho a setembro de 77, 63 e 124 mm.m² 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 1 apresenta os dados históricos e os observados durante o experimento.

Tabela 1 – Climatologia do município de Ponta Grossa - PR.

Mês	Temp. Mínima Média (°C)		Temp. Máxima 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	9	21		125	
Julho	8	10	21	22	77	8
Agosto	10	13	23	24	63	190
Setembro	12		24	26	124	0
Outubro	13		25		155	
Novembro	15		27		119	
Dezembro	16		27		165	

Fonte: CLIMA TEMPO (2020), SIMEPAR (2020e)

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 produzidos comercialmente pela Fertilizare LTDA.

Conforme Silva (2009), a análise química do substrato foi feita para pH, Ca²⁺ e Mg²⁺ (extraído com KCL 1 mol L⁻¹), K⁺ e P (extraído por Mehlich 1), e Al³⁺ (extraído com KCL 1 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 2, onde é possível observar que o pH da amostra de substrato é igual a 6,08; segundo Resende *et al.* (2015) e Maldonade, Mattos & Moretti (2014), a faixa ideal de pH está entre 5,8 e 7,2, portanto este parâmetro encontra-se ideal para o desenvolvimento da alface; observa-se também quantidades significativas dos demais elementos químicos do solo, que são importantes para a planta.

Tabela 2 – Análise química do substrato utilizado.

Nome	Unidade	Quantidade	Nome	Unidade	Quantidade
pH		6,08	CTC	mmol/dm ³	225,48
H ⁺ Al ³⁺	mmol/dm ³	28,98	P	mg/dm ³	168,00
Al ³⁺	mmol/dm ³	0,00	C	g/dm ³	67,66
Ca ²⁺	mmol/dm ³	158,40	MO	g/dm ³	116,65
Mg ²⁺	mmol/dm ³	28,80	V	%	87,15
K ⁺	mmol/dm ³	9,30	m Al	%	0,00
SB	mmol/dm ³	196,500			

Legenda: SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca de cátions, MO: matéria orgânica, V%: Índice de Saturação de bases, m Al %: índice de saturação de alumínio.

Fonte: INTERPARTNER (2020)

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 solenóide 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 1 apresenta o diagrama simplificado do controlador e da integração entre seus principais componentes.

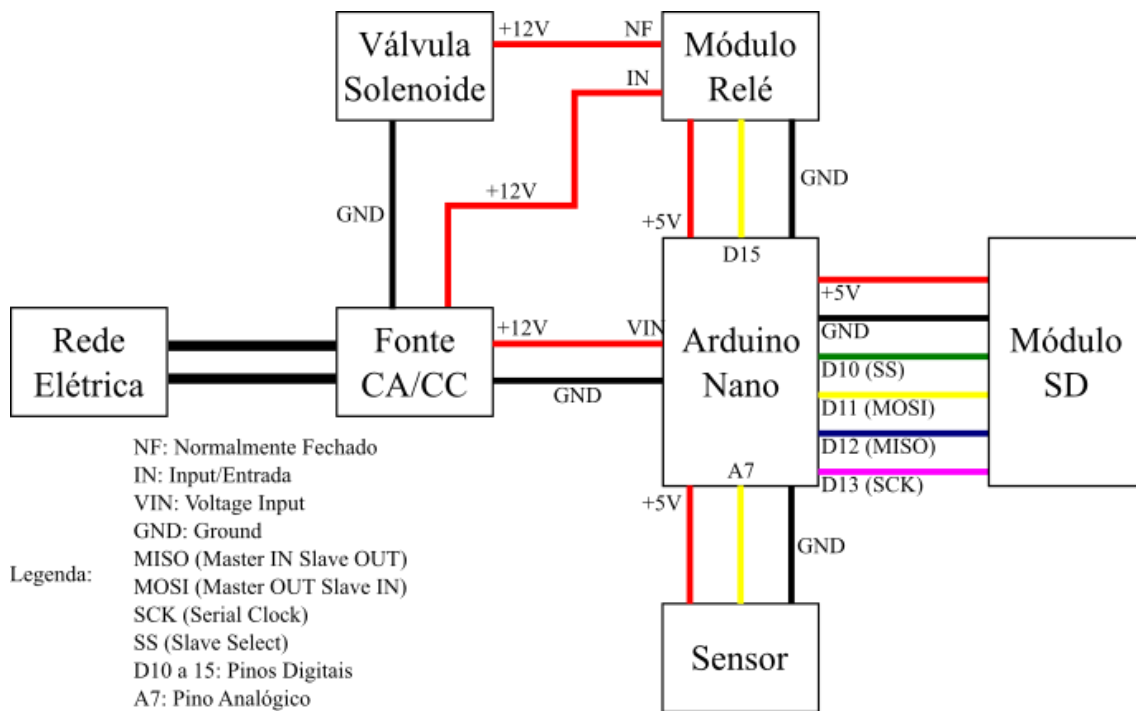


Figura 1 - Diagrama de conexão dos componentes do controlador fuzzy.

Como pode ser visto na Figura 1, 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 solenóide, 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 solenóide, devido a incompatibilidade da tensão de saída do microcontrolador com a tensão de acionamento da válvula, 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, e o 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.

Para realizar a caracterização do sensor de umidade do solo foi utilizada uma adaptação das metodologias utilizadas por Nagahage, Nagahage & Fujino (2019), Placidi *et al.* (2020), e a sugerida por Diymore (2020). Utilizando uma peneira de 2 mm de granulação, 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 1, da umidade gravimétrica, 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) Homogeneizar 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 à 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.

$$Umidade\ do\ solo\ (\%) = \frac{Massa\ da\ \acute{a}gua\ (g)}{Massa\ do\ solo\ (g)} \cdot 100 \quad (1)$$

Com as amostras e o sensor preparados, o controlador foi montado em bancada, com temperatura ambiente estabilizada a 25 °C (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: (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) Registrar 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.

Após a realização da leitura das amostras pelo sensor e coleta dos dados, os dados foram carregados em uma planilha do Libreoffice 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, e empiricamente, obteve-se a CC, para o substrato utilizado 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 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. Essa função possui equação $f(x) = -56,049x + 122,993$, desvio padrão de ± 4 , erro igual a 1, e coeficiente de determinação, R^2 igual a 0,99985.

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 da 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 2 apresenta o fluxograma com maiores detalhes das operações do controlador.

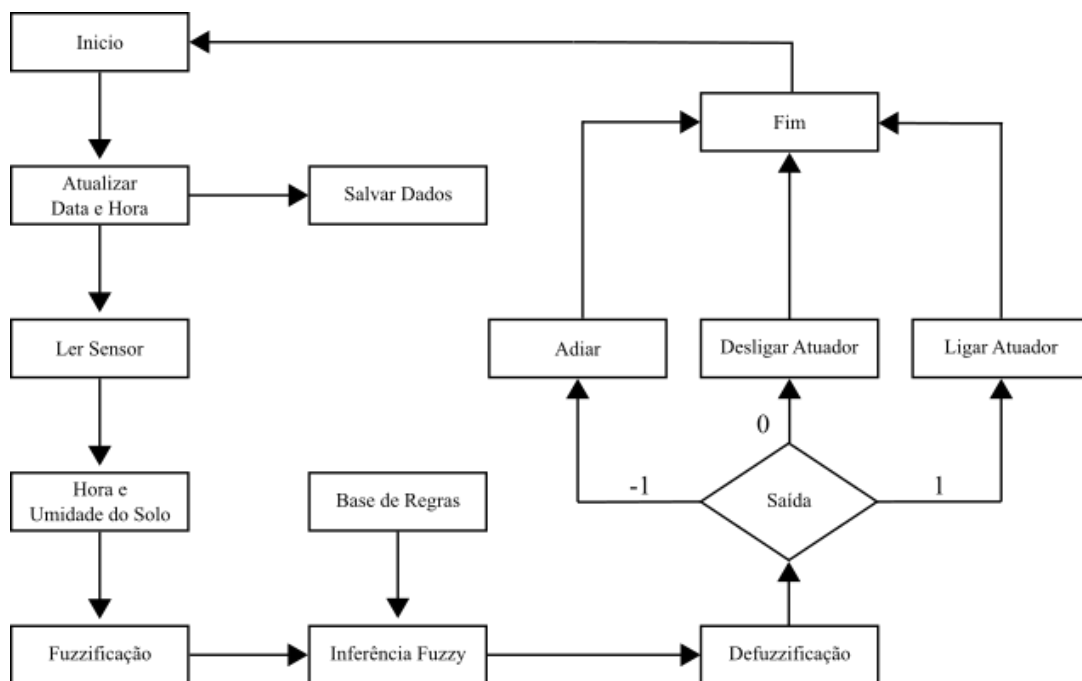


Figura 2 - Fluxograma de operação conceitual de funcionamento da programação do controlador *fuzzy*.

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 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 3) para cada uma das variáveis foram criadas levando em conta as recomendações da literatura quanto ao final da tarde como horário para irrigação da alface, e sobre a umidade do solo 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.

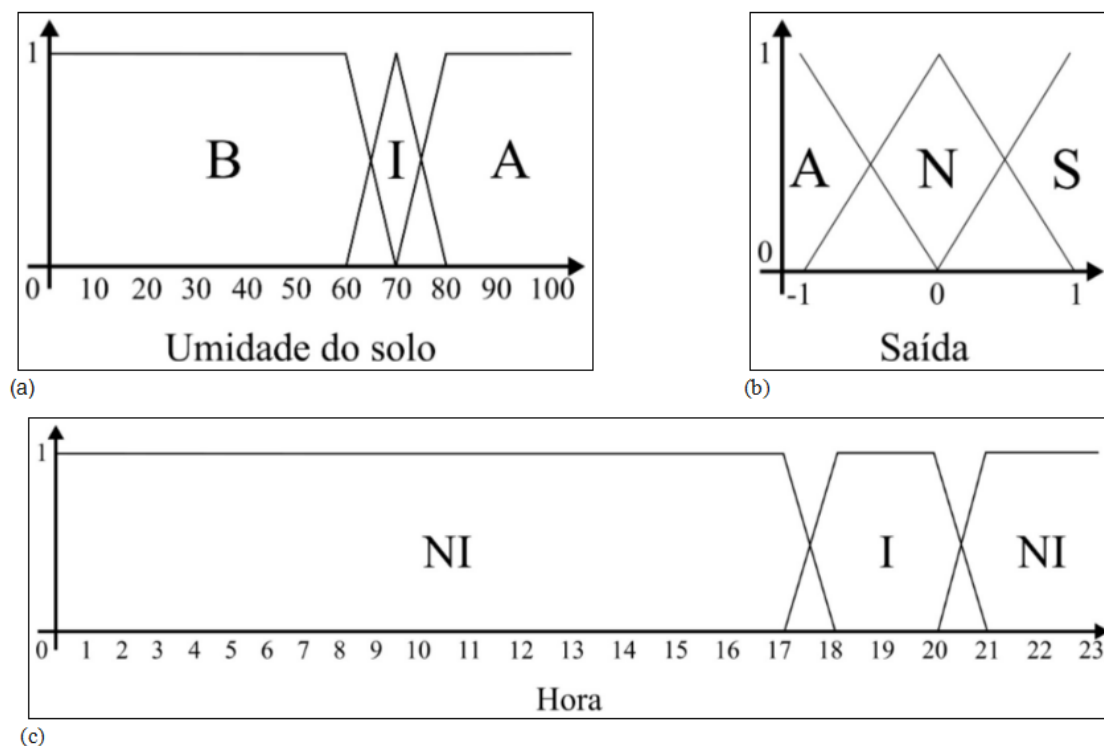


Figura 3: Variáveis e suas respectivas funções de pertinência: (a) umidade do solo: B (Baixa), I (Ideal) e A (Alta); (b) ativação da saída, variável irrigar: A (Adiar), N (Nao) e S (Sim); (c) horário, variável hora: NI (Nao Ideal) e I (Ideal).

2.1. 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, 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 3 apresenta as configurações utilizadas.

Tabela 3 – Dados de entrada utilizados no 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)	Média
Brilho do sol e radiação (horas)	Horas de sol

Fonte: O autor.

Para o cálculo da ETo ($\text{mm.m}^2/\text{dia}$), 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, 2020), 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. Assim, após a inserção dos dados software The ETO Calculator, a última linha, referente ao valor de ETo, é preenchida automaticamente. Com o valor de ETo fornecido pelo software, foi escolhido utilizar valor de $K_c = 1$ e irrigações diárias, conforme Allen *et al.* (1998). Com isso, calculou-se o valor de ET, LL (lâmina líquida, dada, para irrigações diárias, pela diferença entre ET e a precipitação efetiva) e LB (quantidade real de água que deve ser disponibilizada para suprir as necessidades hídricas da cultura) (ALBURQUERQUE, 2010). A partir disso, o valor de LB deve ser ajustado para a área correspondente aos 8 vasos ($0,16 \text{ m}^2$).

2.2. Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, pois as plantas foram submetidas às 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 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 as metodologias A (controlador *fuzzy*) e B (reposição da evapotranspiração), respectivamente.

As mudas foram transplantadas no dia 09 de julho de 2020, próximo às 17 horas, para os vasos definitivos, 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. Logo após o transplante, as mudas foram irrigadas manualmente com um regador. Em seguida, os sistemas de irrigação foram montados, mais precisamente, considerando a muda no centro do vaso com borda circular, tanto o gotejador quanto o sensor ficaram afastados da muda 5 cm, com ângulo entre 90° entre o sensor e o gotejador, considerando a muda como a origem.

Então, os vasos com as mudas foram posicionados a uma distância de 30 cm de uma muda a outra, 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 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 $0,96 \text{ Lh}^{-1}$.

2.3. Análises realizadas

O experimento foi finalizado no dia 10 de setembro de 2020, após realizar a última irrigação à 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:

- Com a planta ainda em seu vaso, as medidas de altura (h) a partir do substrato e diâmetro (d) da planta foram avaliados;
- Utilizando uma faca, um corte rente ao substrato foi realizado no caule da planta e o diâmetro do caule da planta foi medido (JUNHUI *et al.*, 2019).
- 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;
- As folhas da planta foram removidas uma a uma e contadas, apenas folhas com comprimento superior a 5 cm foram consideradas.

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.

3. Resultados

Obteve-se um consumo de água, durante todo o experimento, pelas metodologias A e B, de 25,56 e 28,69 L, respectivamente. 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 diferença significativa entre as quantidades irrigadas por cada metodologia.

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 do que α assim, 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, $1,07 \pm 0,26$ mm.0,16m², e a metodologia B, utilizou em média $0,54 \pm 0,20$ mm.0,16m². 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 seis 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. A Tabela 4 apresenta os resultados do teste estatísticos no software R para os dados coletados das alfaces, para 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.

Tabela 4 – Dados obtidos das análises estatísticas no software R.

Variável	p-value	Médias		Erro	
		Metod. A	Metod. B	Metod. A	Metod. 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
Número de folhas (un.)	1	16,9 ± 1,4	16,9 ± 1,6	0,5	0,5

Fonte: O autor.

Observou-se com os resultados dos testes que, para todas as comparações, o p-value (valor p) esteve maior que α , indicando que não houve uma diferença significativa entre os dados analisados; 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 *et al.* (2012), que obteve 21% a mais de produtividade na cultura da alface, bem como nos trabalhos de Marques Filho (2017), Bernardi, Quitaiski & Santos (2017) e Moreira *et al.* (2019), com acréscimo de 30% ou mais na produtividade. Quanto às características das alfaces pós colheita, Bezerra 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.

4. Conclusões

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.

Referências

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>.

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.

ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements

Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 09 nov. 2022 [S.l.]: FAQ Irrigation and drainage paper 56, 1998.

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: 09 nov. 2022.

DIYMORE. *DYMORE - Capacitive Soil Moisture Sensor*. 2020. Disponível em: <https://www.diy-more.cc/products/2pcs-capacitive-soil-moisture-sensor-v1-2-analog-corrosion-resistant-dc-3-3-5-5v>. Acesso em: 09 nov. 2022.

EASYEDA. *EasyEDA Designer -An Easier and Powerful Online PCB Design Tool*. Disponível em: <https://easyeda.com/editor>. Acesso em: 09 nov. 2022.

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. Acesso em: 09 nov. 2022.

MARQUES 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.

GOOGLE. *Mapa do Parana*. 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: 09 nov. 2022.

INTERPARTNER. *Interpartner Laboratório de Análises*. Disponível em: <http://interpartnerpg.com.br/contato/>. Acesso em: 09 nov. 2022.

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>.

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>.

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://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/118353/1/DOC-142.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2022.

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, v. 6, n. 9, p. 65903-65919, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-135>.

BEZERRA NETO, F. 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>.

NITSCHÉ, P. R. et al. *Atlas Climático do Parana*. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/pagina/atlas-climatico>. Acesso em: 09 nov. 2022.

PATIL, P. et al. *Fuzzy logic based irrigation control system using wireless sensor network for precision agriculture*. In: Agriinformatics and Precision Agriculture (AIPA 2012), 2012.

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>.

QUEIROZ, A. A.; CRUVINEL, V. B.; FIGUEIREDO, K. M. E. *Produção de al-face 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>.

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>.

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: 09 nov. 2022.

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

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: http://bis.sebrae.com.br/bis/download.zhtml?t=D&uid=E3D05C5BC28A430A83257984003EA3D8_ Acesso em: 09 nov. 2022.

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: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.027>

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: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 09 nov. 2022.

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. Acesso em: 09 nov. 2022.

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>.

UDSEN, S. *O Mercado de Folhosas: Números e tendências*. Campinas - SP: ABC- SEM - Associação Brasileira de Comércio de Sementes e Mudas, 2016. Disponível em: https://www.abcsem.com.br/upload/arquivos/O_mercado_de_folhosas__Numeros_e_Tendencias_-_Steven.pdf. Acesso em: 09 nov. 2022.

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: 09 nov. 2022.

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. *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>.