



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
SERTÃO PERNAMBUCANO
CAMPUS PETROLINA ZONA RURAL

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**CONTROLADOR DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO
COM BASE NO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO
SEQUENCIAL DA CULTURA**

RAMIRO JOSÉ DE OLIVEIRA CAVALCANTI

PETROLINA – PE
2025

RAMIRO JOSÉ DE OLIVEIRA CAVALCANTI

**CONTROLADOR DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO
COM BASE NO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO
SEQUENCIAL DA CULTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao IFSertãoPE Campus
Petrolina Zona Rural, exigido para a obtenção
do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Marlon Gomes da Rocha

**PETROLINA – PE
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C377 Cavalcanti, Ramiro José de Oliveira.

Controlador de baixo custo para manejo da irrigação baseado no balanço hídrico climatológico sequencial da cultura / Ramiro José de Oliveira Cavalcanti. - Petrolina, 2025.
46 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Marlon Gomes da Rocha.

1. Ciências Agrárias. 2. Irrigação. 3. Automação. I. Título.

CDD 630

Gerado automaticamente pelo sistema Geficat, mediante dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RAMIRO JOSÉ DE OLIVEIRA CAVALCANTI

**CONTROLADOR DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DA
IRRIGAÇÃO BASEADO NO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO
SEQUENCIAL DA CULTURA**

Trabalho de Conclusão do Curso
apresentado ao IFSertãoPE Campus
Petrolina Zona Rural, exigido para a obtenção
do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 02 de dezembro de 2026.

Documento assinado digitalmente
 MARLON GOMES DA ROCHA
Data: 17/12/2025 16:33:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marlon Gomes da Rocha (Orientador) IFSertãoPE,
Campus Petrolina Zona Rural

Documento assinado digitalmente
 JOSE SEBASTIAO COSTA DE SOUSA
Data: 17/12/2025 17:41:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Sebastião Costa de Sousa IFSertãoPE,
Campus Petrolina Zona Rural

Documento assinado digitalmente
 PABLO TEIXEIRA LEAL DE OLIVEIRA
Data: 17/12/2025 18:00:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pablo Teixeira Leal de Oliveira IFSertãoPE,
Campus Petrolina Zona Rural

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha esposa Monyque Ellen Lopes Moraes Cavalcanti e à minha filha Catarina Moraes Cavalcanti, que são minha maior motivação. À minha mãe, Silvânia de Oliveira Cavalcanti, à minha irmã, Raquel Oliveira Cavalcanti Guimarães, pelo amor, apoio e incentivo constantes e a Luiz Carlos Ferreira Cajuhy por todo suporte. A todos que, de alguma forma, contribuíram e me apoiaram ao longo de toda a minha jornada acadêmica.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por conceder saúde, força e sabedoria para superar os desafios ao longo desta caminhada acadêmica. À minha família e amigos, pelo apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos, sendo fundamentais para a conclusão desta etapa.

À instituição IF Sertão Pernambucano – Campus Petrolina Zona Rural, pelo ensino de qualidade e pela contribuição na minha formação acadêmica e profissional. Aos professores, pelo conhecimento transmitido e pela dedicação ao ensino, em especial ao meu orientador, Dr. Marlon Gomes da Rocha, pela orientação, paciência e valiosas contribuições ao desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos docentes que participaram da banca examinadora, Dr. José Sebastião Costa de Sousa e Dr. Pablo Teixeira Leal de Oliveira, pelas análises, sugestões e contribuições que enriqueceram este trabalho.

Registro ainda um agradecimento especial ao professor Dr. Fábio Freire de Oliveira, que, mesmo não estando diretamente envolvido no presente trabalho, sempre me aconselhou profissionalmente e me apoiou em diversas oportunidades, contribuindo de forma significativa para minha trajetória.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um controlador de irrigação automatizado de baixo custo, baseado no balanço hídrico da cultura por meio da ET_0 , K_c e ET_c , com aplicação prática em sistemas de irrigação localizada. O sistema foi projetado utilizando a plataforma Arduino UNO R3, visando a automação do processo de irrigação por meio do cálculo automático do tempo de aplicação de água a partir de dados meteorológicos inseridos pelo operador. A metodologia envolveu a modelagem física e lógica de um controlador constituído por uma placa micro controladora, um módulo de relés, um display com teclado e válvulas solenoides elétricas. O operador informa apenas o valor da ET_0 , deduzindo a precipitação registrada no mesmo período, e o sistema calcula a evapotranspiração da cultura (ET_c), a lâmina líquida, a lâmina bruta e o tempo de irrigação, acionando as válvulas em sequência programada. Foram utilizados parâmetros da cultura da videira (*Vitis vinifera L.*), considerando um ciclo de 110 dias e coeficientes de cultivo (K_c) variando conforme o estádio fenológico. Os cálculos foram realizados com base nos métodos recomendados pela FAO e nas principais referências literárias especializadas nacionais, aplicando os conceitos de eficiência de irrigação, fator de disponibilidade de água e lâmina de irrigação. O sistema permite autonomia operacional, baixo consumo de energia e flexibilidade de configuração. O controlador desenvolvido tem potencial de aplicação em pequenas e médias propriedades agrícolas, permitindo maior precisão no manejo da água, redução de custos e otimização do tempo do produtor.

Palavras-chave: Controlador; Automação; Arduino; Evapotranspiração; Coeficientes de cultivo (K_c).

ABSTRACT

The present study aimed to develop a low-cost automated irrigation controller based on crop water balance using reference evapotranspiration (ET_0), crop coefficient (K_c), and crop evapotranspiration (ET_c), with practical application in localized irrigation systems. The system was designed using the Arduino UNO R3 platform, aiming to automate the irrigation process through the automatic calculation of irrigation duration based on meteorological data entered by the operator. The methodology involved the physical and logical modeling of a controller composed of a microcontroller board, a relay module, a display with keypad, and electric solenoid valves. The operator inputs only the ET_0 value, subtracting the precipitation recorded during the same period, and the system calculates crop evapotranspiration (ET_c), net irrigation depth, gross irrigation depth, and irrigation time, sequentially activating the valves according to a programmed schedule. Parameters of grapevine cultivation (*Vitis vinifera L.*) were used, considering a 110-day cycle and crop coefficients (K_c) varying according to the phenological stage. The calculations were performed based on FAO-recommended methods and major national specialized literature, applying the concepts of irrigation efficiency, water availability factor, and irrigation depth. The system provides operational autonomy, low energy consumption, and configuration flexibility. The developed controller shows potential for application in small and medium-sized agricultural properties, enabling greater precision in water management, cost reduction, and optimization of the producer's time.

Keywords: Controller; Automation; Arduino; Evapotranspiration; Crop coefficients (K_c).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 Automação na irrigação.....	14
3.2 Evapotranspiração (ET₀ e ET_c)	15
3.3 Fator de correção para irrigação localizada (K_L).....	16
3.4 Armazenamento de água no solo e disponibilidade hídrica (f).....	17
3.5 Fator de disponibilidade hídrica (f).....	19
3.6 Irrigação real necessária localizada (IRN_{LOC}) e ET_c localizada (ETC_{LOC}).....	19
3.7 Disponibilidade total de água no solo (DTA).....	21
3.8 Capacidade total de água no solo (CTA).....	21
3.9 Determinação indireta da capacidade de campo (CC).....	21
3.10 Necessidade de lixiviação de sais (N_L).....	22
3.11 Eficiência de aplicação (E_a).....	23
3.5 Tempo de irrigação (Ti).....	24
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 Local de desenvolvimento.....	26
4.2 Características físico-hídricas do solo.....	26
4.3 Cálculos de manejo da irrigação.....	28
4.3.1 Informações da cultura.....	29
4.3.2 Informações do solo.....	29
4.3.3 Informações do sistema de irrigação.....	30
4.3.4 Percentual de área molhada (PAM).....	31
4.3.5 Disponibilidade total de água no solo (DTA).....	31
4.3.6 Capacidade total de água no solo (CTA).....	31
4.3.7 Fator de disponibilidade hídrica (f).....	32
4.3.8 Capacidade real de água no solo (CRA).....	32
4.3.9 Umidade crítica (Ucrit).....	32
4.3.10 Irrigação real necessária localizada (IRN_{LOC}).....	32

4.3.11 Fator de correção para irrigação localizada (K_L).....	33
4.3.12 Necessidade de lixiviação de sais (N_L).....	33
4.3.13 Irrigação total necessária localizada (ITN_{LOC}).....	33
4.3.14 Intensidade de aplicação (I_a).....	34
4.3.15 Tempo de operação da 1 ^a irrigação.....	34
4.3.16 Tempo de irrigação, baseado na evapotranspiração diária.....	34
5 MATERIAIS UTILIZADOS.....	35
5.1 Estrutura e funcionamento lógico do sistema.....	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
6.1 Limitações do sistema e sugestões de melhorias.....	42
7 CONCLUSÃO.....	43
8 REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna enfrenta o desafio crescente de conciliar a produtividade das culturas com a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos, especialmente em regiões de clima semiárido, onde a disponibilidade de água é limitada e a evapotranspiração é elevada. A irrigação, quando bem manejada, é uma das principais ferramentas para aumentar a produção e estabilizar a oferta de alimentos, reduzindo os efeitos da deficiência hídrica sobre o rendimento das plantas.

No entanto, o manejo inadequado da irrigação ainda é um problema recorrente. A aplicação de água em excesso pode causar lixiviação de nutrientes, salinização do solo e desperdício de energia, enquanto a irrigação deficitária pode comprometer o desenvolvimento das culturas e reduzir a produtividade. Nesse contexto, o manejo racional da irrigação, fundamentado em critérios técnicos, torna-se essencial para garantir eficiência e sustentabilidade. Sabendo-se que o uso otimizado da água é uma prioridade global, e o setor agrícola é o principal responsável pelo consumo desse recurso, representando mais de 70% da demanda total (FAO, 2016), em regiões semiáridas, como o Vale do São Francisco, a adoção de tecnologias que permitam maior eficiência hídrica é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Diversos métodos podem ser empregados para determinar o momento e a quantidade ideal de irrigação. Entre eles, o método do balanço hídrico é amplamente reconhecido como o mais robusto, pois se baseia em princípios físicos que relacionam o consumo hídrico das plantas às condições atmosféricas. Ao ser combinado com o coeficiente de cultivo (K_c), é possível estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c), que representa a necessidade real de água para cada espécie e estádio de desenvolvimento (Embrapa, 2021).

Tradicionalmente, esses cálculos são realizados de forma manual ou com auxílio de planilhas, exigindo a interpretação constante por parte do operador. Contudo, com o avanço das tecnologias de automação e microcontroladores, tornou-se possível integrar esse processo a sistemas eletrônicos, capazes de executar automaticamente os cálculos e controlar o tempo de irrigação com base em dados inseridos pelo usuário.

Dessa forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de um controlador de irrigação de baixo custo baseado no balanço hídrico sequencial da cultura, utilizando

a plataforma Arduino UNO R3 como unidade de processamento. O sistema foi projetado para que o operador insira apenas o valor da ET_0 , sendo os demais parâmetros calculados automaticamente. A automação inclui o acionamento sequencial de válvulas solenoides elétricas, controlando a irrigação de diferentes setores sem a necessidade de intervenções constantes.

O uso do Arduino em aplicações agrícolas vem se destacando por sua simplicidade de programação, baixo custo e flexibilidade, o que o torna uma alternativa promissora para pequenos e médios produtores. Essa abordagem permite não apenas o uso racional da água, mas também o aprendizado técnico e prático sobre automação aplicada à irrigação, contribuindo para a formação de profissionais mais qualificados e conscientes da importância do manejo sustentável da água (NEGRET, 2023).

O desenvolvimento deste controlador representa uma contribuição prática e científica para o campo da agricultura de precisão, oferecendo um modelo acessível, replicável e funcional. Além de auxiliar na gestão da irrigação, o sistema poderá servir como ferramenta didática para o ensino de irrigação e automação agrícola, ampliando o acesso às tecnologias inovadoras no meio rural.

Embora existam no mercado controladores automáticos de irrigação, a maioria deles possui alto custo (Rain Bird Esp-tm2 6 estações – R\$ 746,00 ou Rain Bird Esp-lxivm 60 Estações – R\$ 6740,50 são alguns exemplos de controladores profissionais) (MERCADO LIVRE, 2025), o que inviabiliza sua adoção em propriedades de pequeno porte. Por outro lado, o uso de plataformas abertas como o Arduino possibilita o desenvolvimento de soluções de baixo custo, alto potencial de personalização e independência tecnológica, permitindo que produtores e estudantes desenvolvam e adaptem seus próprios sistemas.

A justificativa do presente trabalho, portanto, baseia-se na necessidade de desenvolver um controlador de irrigação acessível, tecnicamente confiável e adaptável a diferentes culturas e condições climáticas, capaz de traduzir a teoria do manejo por balanço hídrico em uma prática automatizada, simples e precisa.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um controlador de irrigação automatizado, de baixo custo, baseado no balanço hídrico sequencial da cultura, utilizando a plataforma Arduino UNO R3 como unidade de processamento e controle.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar os cálculos da irrigação com base nos parâmetros da cultura da videira;
- Projetar o sistema físico do controlador, incluindo microcontrolador, relés e válvulas solenoides;
- Implementar a programação para cálculo automático de ET_c, lâmina líquida, lâmina bruta e tempo de irrigação;
- Testar e avaliar o funcionamento do sistema em condições controladas;
- Comparar os resultados obtidos com os valores teóricos calculados manualmente.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 AUTOMAÇÃO NA IRRIGAÇÃO

A irrigação é definida como o fornecimento controlado de água às plantas cultivadas, de forma a complementar a precipitação natural e suprir as necessidades hídricas do cultivo. Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2019), trata-se de um instrumento essencial para garantir a estabilidade da produção agrícola e maximizar a eficiência do uso da terra, especialmente em regiões sujeitas à escassez hídrica. Nesse contexto, a evolução da automação e dos sistemas baseados em internet das coisas (IoT) ampliou as possibilidades de monitoramento e controle, permitindo um manejo mais preciso e racional da água.

O manejo da irrigação envolve a determinação do momento de irrigar e da lâmina a ser aplicada, considerando solo, planta e clima. O objetivo é manter o solo na faixa de umidade adequada a cada fase de desenvolvimento, evitando tanto o estresse hídrico quanto a saturação. Mantovani, Bernardo e Palaretti (2013) destacam que o sucesso desse manejo depende da integração entre conhecimento técnico e instrumentos de monitoramento confiáveis. Nessa linha, os sistemas IoT agregam valor ao permitir a leitura contínua de sensores de umidade do solo e variáveis climáticas, com transmissão de dados em tempo real para plataformas de análise e tomada de decisão (GARCÍA et al., 2020).

Com o avanço da eletrônica e da computação embarcada, a automação agrícola passou a desempenhar papel decisivo na modernização da irrigação, possibilitando maior eficiência e redução de custos operacionais. Microcontroladores como o arduino permitem a implementação de sistemas de baixo custo para o controle de válvulas, bombas e sensores de forma autônoma ou semiautônoma. Integrado a módulos de comunicação, o arduino uno R3 pode atuar como nó em sistemas IoT, registrando dados, processando lógicas de controle baseadas em balanço hídrico e permitindo ajustes remotos. Esse potencial tem sido demonstrado experimentalmente: Pereira et al. (2020) desenvolveram um sistema de irrigação por válvulas baseado em arduino e inversor de frequência, capaz de manter pressão constante e acionar a irrigação conforme a demanda, comprovando a viabilidade técnica da automação de precisão. Estudos mais recentes reforçam essa tendência, evidenciando a efetividade

do arduino em sistemas automáticos de irrigação e no gerenciamento da umidade do solo (KARTHICK et al., 2024).

Diante do exposto, a literatura apresenta a integração entre manejo hídrico, automação e IoT, que representa um avanço na irrigação de precisão. O desenvolvimento de controladores acessíveis, como o proposto neste trabalho, tem potencial para democratizar essas tecnologias, aumentando a eficiência produtiva e contribuindo para a conservação dos recursos hídricos.

3.2 Evapotranspiração (ET_0 e ET_c)

A evapotranspiração de referência (ET_0) representa a taxa de perda de água, em forma de vapor, de uma superfície vegetal hipotética padrão, bem irrigada e em crescimento ativo, sob determinadas condições meteorológicas (Allen et al., 1998). De acordo com Bernardo et al (2019), a ET_0 é o parâmetro fundamental no manejo racional da irrigação, pois serve como base para estimar o consumo hídrico das diferentes culturas.

Dentre diversos métodos, o mais aceito internacionalmente para determinação da ET_0 é o de Penman-Monteith (FAO, 1998), que considera o balanço energético entre radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento. Esse método é expresso pela equação:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Onde:

- (ET_0): evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});
- (R_n): radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
- (G): fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
- (T): temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);
- (u_2): velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1});
- ($e_s - e_a$): déficit de saturação de vapor (kPa);
- (Δ): declividade da curva de pressão de saturação (kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$);
- (γ): constante psicrométrica (kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Esse valor, uma vez calculado, é ajustado por meio do coeficiente de cultura (K_c), obtendo-se a evapotranspiração da cultura (ETc). A evapotranspiração da cultura (ETc) representa o consumo hídrico potencial de uma cultura em condições ideais de disponibilidade de água no solo. Já a evapotranspiração real (ETr) corresponde ao consumo efetivo de água pela planta, refletindo as condições reais do campo, especialmente quando há restrição hídrica, que reduz a transpiração. Assim, ETc expressa a demanda máxima, enquanto ETr expressa a demanda atendida, podendo ser igual à ETc em solo bem irrigado ou significativamente menor em situações de déficit hídrico.

Entre os métodos de manejo, o baseado na evapotranspiração é o mais difundido e tecnicamente embasado, pois relaciona o consumo de água da planta às condições meteorológicas e fisiológicas. A evapotranspiração é o processo combinado da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas, representando a perda total de água para a atmosfera. A evapotranspiração da cultura é determinada pela relação:

$$ETc = ET_0 \times K_c$$

Onde (K_c) varia conforme o tipo de cultura e o estádio fenológico.

Esses valores refletem a variação do consumo de água ao longo do ciclo, aumentando à medida que a área foliar cresce e diminuindo quando a planta entra em senescência. Segundo Mantovani et al. (2013), a correta definição do K_c é essencial para que o sistema de irrigação aplique a quantidade exata de água necessária à cultura, evitando tanto o déficit quanto o excesso.

3.3 Fator de correção para irrigação localizada (K_L)

Em sistemas de irrigação localizada, a evapotranspiração da cultura não ocorre sobre toda a superfície do solo, uma vez que apenas uma fração da área é efetivamente molhada pelo sistema. Dessa forma, a evapotranspiração estimada para condições de área total deve ser corrigida para refletir as condições reais de consumo hídrico, sendo essa correção realizada por meio do fator de localização, denominado K_L . Esse fator ajusta a evapotranspiração da cultura às condições específicas da irrigação localizada, nas quais a contribuição hídrica está associada à fração da

superfície molhada e ao volume de solo efetivamente explorado pelas raízes (BERNARDO et al., 2019).

O percentual de área molhada (PAM) representa a fração da superfície do solo que recebe água diretamente dos emissores e constitui o principal parâmetro para a determinação do fator K_L . Assim, o PAM não atua diretamente como fator de correção da lâmina, mas é utilizado para ajustar a evapotranspiração da cultura às condições do sistema localizado. Diversos métodos são apresentados na literatura para a determinação do fator K_L , destacando-se os métodos de Keller, Keller-Bliesner e Fereres. Para culturas perenes com espaçamento intermediário, como a videira, o método de Keller-Bliesner apresenta resultados satisfatórios e aplicação prática simplificada (MANTOVANI et al., 2013). Segundo esse método, o fator de correção pode ser expresso por:

$$KL = 0,1 \times \sqrt{PAM}$$

Em que PAM corresponde ao percentual de área molhada pelo sistema. A utilização do fator K_L possibilita uma estimativa mais realista da evapotranspiração da cultura sob irrigação localizada, contribuindo para o manejo racional da água e para o correto dimensionamento da lâmina de irrigação (BERNARDO et al., 2019).

3.4 Armazenamento de Água no Solo e Disponibilidade Hídrica (f)

Além da evapotranspiração, o conhecimento das propriedades físicas do solo é fundamental para o manejo da água. Parâmetros como capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e fator de disponibilidade (f) definem o limite de água que a planta pode utilizar entre duas irrigações consecutivas. Esses valores variam com a textura e estrutura do solo e devem ser determinados experimentalmente (BERNARDO et al., 2019).

O armazenamento de água no solo é a quantidade de água disponível entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). O fator de disponibilidade (f) representa a fração da água total disponível que pode ser consumida antes que ocorra estresse hídrico. Através dessas informações, é possível conhecer a necessidade de água requerida pela planta, ou Capacidade Real de Água no solo, sendo calculada da seguinte forma:

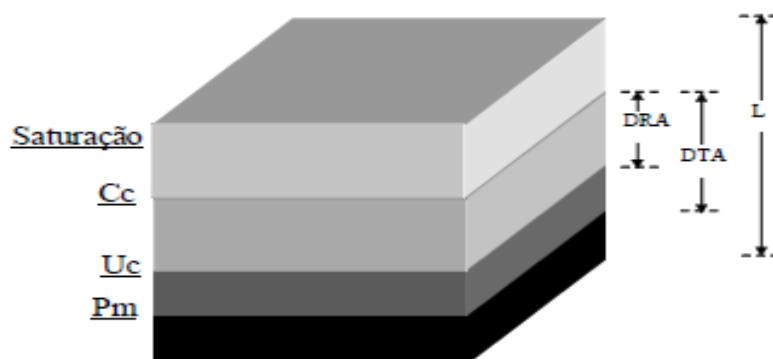
$$CRA = \frac{CC - PMP}{10} \times Da \times f \times z$$

Em que:

- (CRA): Capacidade Real de Água (mm);
- (CC): Capacidade de campo (% em peso)
- (PMP): Ponto de murcha permanente (% em peso)
- (Da): densidade do solo (g/cm³)
- (z): profundidade efetiva das raízes (cm);
- (f): fator de disponibilidade, geralmente entre 0,3 e 0,6, conforme a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico.

A determinação experimental de CC e PMP é feita em laboratório, utilizando amostras coletadas em campo com anel volumétrico, submetidas à saturação e secagem em estufa. Esses valores permitem calcular a umidade gravimétrica e, consequentemente, o teor volumétrico de água do solo (BERNARDO et al., 2019). O diagrama de disponibilidade de água no solo (Figura 1) é uma representação gráfica que mostra, de forma visual e organizada, como a água armazenada no solo se distribui entre diferentes faixas de disponibilidade para as plantas.

Figura 1 - Diagrama de disponibilidade de água no solo em função dos seus parâmetros físico-hídricos.



DRA – Capacidade real de água no solo;
 DTA – Capacidade total de água no solo;
 CC – Capacidade de campo;
 Pm – Ponto de murcha.

Fonte: Mantovani et al. (2009).

3.5 Fator de disponibilidade hídrica (f)

O fator f é o parâmetro que limita a parte de água disponível no solo que a planta pode utilizar, sem causar maiores prejuízos à produtividade. Ele varia de acordo com a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico.

De acordo com as tabelas 1, 2 e 3 abaixo, os valores a seguir podem ser utilizados como referência para a disponibilidade de água no solo, quando não for possível a realização de testes na região.

Tabela 1 – Fator de disponibilidade de água no solo (f):

Grupo de culturas	Valores de f
Verduras e legumes	0,2 a 0,6
Frutas e forrageiras	0,3 a 0,7
Grãos e algodão	0,4 a 0,8

Fonte: FAO, 1979, Boletim 33.

Tabela 2 – Grupos de culturas de acordo com a resistência ao déficit hídrico.

Grupo	Culturas
1	Cebola, pimenta e batata
2	Banana, repolho, uva, ervilha e tomate
3	Alfafa, feijão, cítricas, amendoim, abacaxi, girassol, melancia e trigo
4	Algodão, milho, azeitona, açafrão, sorgo, soja, beterraba, cana e fumo

Fonte: FAO, 1979, Boletim 33.

Tabela 3 – Fator de disponibilidade de água no solo (f) em função do grupo de culturas de evapotranspiração de referência (ET_0):

Grupo de Culturas	ET ₀ (mm/dia)									
	ET ₀₌₂	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,5	0,42	0,35	0,3	0,25	0,22	0,2	0,18	0,18	
2	0,68	0,58	0,48	0,4	0,34	0,33	0,28	0,25	0,22	
3	0,8	0,7	0,7	0,6	0,55	0,45	0,45	0,42	0,4	
4	0,88	0,8	0,7	0,6	0,55	0,45	0,45	0,42	0,4	

Fonte: FAO, 1979, Boletim 33.

3.6 Irrigação real necessária localizada (IRN_{LOC}) e ET_c localizada (ET_c_{LOC})

A irrigação real necessária em sistemas de irrigação localizada (IRN_{LOC}) corresponde à lâmina líquida de água requerida para suprir o consumo hídrico da

cultura sem que ocorra déficit hídrico, considerando as características físico-hídricas do solo, a profundidade efetiva do sistema radicular e a fração da água disponível que pode ser utilizada sem causar estresse à cultura. IRN representa a reposição do déficit hídrico permitido no solo, devendo ser sempre igual ou inferior à capacidade real de água no solo, uma vez que está diretamente associada ao fator de disponibilidade hídrica da cultura (BERNARDO et al., 2019).

No contexto da irrigação localizada, a IRN_{LOC} pode ser determinada a partir do balanço hídrico do solo, considerando a diferença entre a umidade na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PM), convertida em lâmina de água com base na densidade aparente do solo, na profundidade efetiva das raízes e no fator de disponibilidade hídrica, sendo ainda ajustada pela fração da área efetivamente molhada pelo sistema. Essa abordagem é expressa pela seguinte relação:

$$IRN_{LOC} = \frac{CC - PM}{10} \times Da \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times Z (cm) \times f \times \frac{PAM}{100}$$

Onde f é o fator de disponibilidade hídrica, PAM corresponde ao percentual de área molhada pela área útil da planta e Da é a densidade aparente do solo. Essa formulação é particularmente adequada quando o manejo da irrigação é realizado com intervalos maiores entre irrigações, permitindo a reposição do déficit hídrico acumulado no solo (MANTOVANI et al., 2013).

Por outro lado, em sistemas de irrigação localizada com alta frequência de aplicação, especialmente quando as irrigações são realizadas diariamente, o consumo hídrico da cultura pode ser estimado diretamente pela evapotranspiração da cultura ajustada às condições do sistema, denominada evapotranspiração da cultura localizada (ETc_{LOC}). Conforme descrito por Bernardo et al. (2019), a ETc localizada pode ser obtida pela expressão:

$$ETc_{LOC} = ETo \times Kc \times K_L$$

Onde K_L é o fator de correção para irrigação localizada. Nessas condições, quando o solo é mantido próximo à capacidade de campo e não ocorre significativo déficit hídrico, a irrigação real necessária localizada pode ser considerada numericamente equivalente à evapotranspiração da cultura localizada, ou seja,

$IRN_{LOC} \approx ET_{CLOC}$. Assim, enquanto a primeira expressão baseia-se no balanço hídrico do solo, a segunda está associada diretamente ao consumo atmosférico da cultura, sendo ambas conceitualmente coerentes e aplicáveis conforme a estratégia de manejo adotada (BERNARDO et al., 2019; MANTOVANI et al., 2013).

3.7 Disponibilidade total de água no solo (DTA)

Água total armazenada disponível para a planta entre a capacidade de campo de o ponto de murcha permanente (MANTOVANI, 2009). Pode ser expressa em de lâmina de água, profundidade do solo (mm/cm), ou em volume de água por unidade de área de solo. A DTA é expressa pela fórmula:

$$DTA = \frac{CC (\%peso) - PMP (\%peso)}{10} \times Da \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

3.8 Capacidade total de água no solo (CTA)

Água armazenada na região com maior concentração de raízes (>80%) (MANTOVANI, 2009), onde z representa a profundidade do sistema radicular presente com maior capacidade de absorção de água e nutrientes.

$$CTA = DTA \left(\frac{mm}{cm} \right) \times Z (cm)$$

3.9 Determinação indireta da Capacidade de Campo (CC)

A capacidade de campo pode ser obtida por meio da determinação da umidade gravimétrica do solo, metodologia amplamente adotada pela Embrapa. Esse método baseia-se na quantificação da água retida no solo após a drenagem da água gravitacional, considerada a condição ideal de armazenamento hídrico para as plantas. A umidade gravimétrica é determinada pela diferença entre a massa do solo úmido e a massa do solo seco em estufa a 105 °C, expressa em relação à massa do solo seco. A secagem nessa temperatura garante a remoção da água presente nos poros do solo, permitindo estimar de forma confiável o teor de água correspondente à

capacidade de campo. Essa abordagem é amplamente utilizada em estudos de manejo da irrigação e caracterização físico-hídrica do solo (EMBRAPA, 2017).

A umidade gravimétrica é obtida pela relação:

$$Ug = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$$

Onde:

- (Ug): umidade gravimétrica (% em peso)
- (Mu): massa da amostra úmida (g);
- (Ms): massa da amostra seca (g).

3.10 Necessidade de lixiviação de sais (NL):

Para que a água de irrigação não adicione sais no solo, o que pode prejudicar a absorção de água (seca fisiológica), crescimento radicular e produtividade, é feito o cálculo de um acréscimo na lâmina, que varia de acordo com a condutividade elétrica da água e do solo, utilizada para lixiviar o excesso de sais e manter a condutividade adequada para a cultura. A tabela 4 apresenta os valores das reduções percentuais de produtividade para cada cultura, sendo que, na fórmula de lâmina de lixiviação, deve-se utilizar o valor tabelado para 100% na redução do rendimento para CE_{es}.

$$NL = 1 - \frac{CEa}{2 \times CEes}$$

Tabela 4: Redução do crescimento de diversas culturas glicófitas submetidas ao estresse salino (Adaptado de AYERS & WESTCOTT, 1976).

Cultura	Redução do rendimento*								
	0%		10%		25%		50%		Máx
	ECe	ECw ²	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe
Cevada (<i>Hordeum vulgare</i>)	8,0	5,3	10	6,7	13	8,7	13	12	28
Algodão (<i>Gossypium</i>)	7,7	5,1	9,6	6,4	13	8,4	17	12	27
Beterraba (<i>Beta vulgaris</i>)	7,0	4,7	8,7	5,8	11	7,5	15	10	24
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,4	13	8,7	20
Soja (<i>Glycine max</i>)	5,0	3,3	5,5	3,7	6,2	4,2	7,5	5,0	10
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	4,0	2,7	5,1	3,4	7,2	4,8	11	7,2	18
Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	3,0	2,0	3,8	2,6	5,1	3,4	7,2	4,8	11,5
Milho (<i>Zea mays</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,5
Azeitona (<i>Olea europaea</i>)	2,7	1,8	3,8	2,6	5,5	3,7	8,4	5,6	14
Laranja (<i>Citrus sinensis</i>)	1,7	1,1	2,3	1,6	3,2	2,2	4,8	3,2	8,0
Limão (<i>Citrus limon</i>)	1,7	1,1	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8,0
Maça (<i>Malus sylvestris</i>)	1,7	1,0	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8,0
Uva (<i>Vitis spp.</i>)	1,5	1,0	2,5	1,7	4,1	2,7	6,7	4,5	12
Ameixa (<i>Prunus domestica</i>)	1,5	1,0	2,1	1,4	2,9	1,9	4,3	2,8	7,0
Morango (<i>Fragaria spp.</i>)	1,0	0,7	1,3	0,9	1,8	1,2	2,5	1,7	4,0
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	2,5	1,7	3,3	2,2	4,4	2,9	6,3	4,2	10
Melão (<i>Cucumis melo</i>)	2,2	1,5	3,6	2,4	5,7	3,8	9,1	6,1	16
Espinafre (<i>Spinacia oleracea</i>)	2,0	1,3	3,3	2,2	5,3	3,5	8,6	5,7	15
Batata (<i>Solanum tuberosum</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10
Milho doce (<i>Zea mays</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10
Batata (<i>Ipomoea batatas</i>)	1,5	1,0	2,4	1,6	3,8	2,5	6,0	4,0	10,5
Alface (<i>Lactuca sativa</i>)	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,2	3,4	9,0
Cebola (<i>Allium cepa</i>)	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9	7,5
Cenoura (<i>Daucus carota</i>)	1,0	0,7	1,7	1,1	2,8	1,9	4,6	3,1	8,0
Alfafa (<i>Medicago sativa</i>)	2,0	1,3	3,4	2,2	5,4	3,6	8,8	5,9	15,5

*Redução do crescimento = (rendimento em meio salino/rendimento em meio não salino) x 100.

Fonte: Willadino e Camara (2010).

3.11 Eficiência de Aplicação (Ea)

A eficiência de aplicação (Ea) expressa a proporção da água aplicada que é efetivamente utilizada pela planta. Em sistemas de irrigação localizada, essa eficiência é normalmente superior a 90%, devido à aplicação direcionada e à redução de perdas por evaporação e percolação profunda. O sistema de gotejamento tem como eficiência média 90% (tornando-se ideais para culturas de alto valor econômico e regiões com limitação hídrica), enquanto por aspersão convencional 75% (FAO, 2000).

Conhecendo a lâmina líquida e a eficiência do sistema utilizado, é possível calcular a lâmina bruta, que é a quantidade de água requerida pela cultura, considerando as perdas. A lâmina bruta (LB) é obtida a partir da lâmina líquida (LL) dividida pela eficiência de aplicação, multiplicada pela necessidade de lixiviação, e expressa em mm:

$$LB = \frac{LL}{Ea \times NL} \text{ (mm)}$$

O valor resultante do cálculo da lâmina de irrigação corresponde à lâmina total (lâmina bruta) que deve ser aplicada pelo sistema, de modo a repor as perdas ocorridas no processo de aplicação e garantir o suprimento hídrico adequado às plantas. Dessa forma, a eficiência na aplicação constitui um conceito fundamental no manejo da irrigação, pois expressa a razão entre a água efetivamente aproveitada pelas plantas e o volume total aplicado pelo sistema, refletindo as perdas por percolação profunda, escoamento superficial, evaporação e desuniformidade de aplicação (BERNARDO et al., 2019; AYERS; WESTCOTT, 1999).

3.12 Tempo de Irrigação (Ti)

O tempo de irrigação é um parâmetro central no manejo da irrigação, pois define quanto tempo o sistema deve permanecer em operação para aplicar a lâmina necessária à cultura. A lâmina bruta resulta da lâmina líquida requerida pela cultura, corrigida pela eficiência de aplicação, enquanto a intensidade de aplicação depende da vazão dos emissores e do espaçamento no campo. Manuais de manejo e dimensionamento de irrigação, como os publicados pela FAO, apresentam essa relação ao tratar do ajuste entre demanda hídrica, capacidade de infiltração do solo e desempenho do sistema de irrigação, destacando a importância de definir corretamente o tempo de funcionamento para evitar tanto o déficit quanto o excesso de água (FAO, 1989). Nesse contexto, a automação torna esse processo mais acessível ao produtor sem formação técnica, ao incorporar a fórmula em controladores, softwares e plataformas de irrigação inteligente, que convertem o cálculo agronômico em comandos práticos de ligar e desligar o sistema no momento e duração adequados (SILVA et al., 2025).

O tempo de irrigação (Ti) é calculado a partir da lâmina bruta e intensidade de aplicação de água.

$$Ti = \frac{\text{Lâmina Bruta}}{\text{Intensidade de aplicação}}$$

Onde a intensidade de aplicação é a razão da soma da vazão de todos os emissores em uma planta pela área útil da planta, como indicado na fórmula abaixo (BERNARDO et al., 2019):

$$Ia = \frac{N \times q}{AUP}$$

Onde,

- (Ia): Intensidade de aplicação (mm/h)
- (N): número de emissores
- (q): vazão por emissor (L/h)
- (AUP): área útil da planta (m²) – Espaçamento entre plantas (m) x Espaçamento entre linhas (m).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de Desenvolvimento

O projeto foi desenvolvido no Instituto Federal do Sertão Pernambucano – Campus Petrolina Zona Rural, Projeto Senador Nilo Coelho, Núcleo 4, no Laboratório de Irrigação ($9^{\circ}20'21.68"S$; $40^{\circ}41'34.14"O$) e no laboratório IFEduca4.0 ($9^{\circ}20'11.27"S$; $40^{\circ}41'19.34"O$). A região é de clima semiárido, caracterizado por temperatura média anual de $27,2^{\circ}C$ e precipitação média de 419 mm, segundo o INMET, concentrada principalmente entre janeiro e março. A tabela 5, a seguir, apresenta os dados da normal climatológica de 30 anos (1991-2020), contendo os dados da evapotranspiração média de cada mês, de algumas cidades do território brasileiro.

Tabela 5. Normal climatológica de algumas cidades do Brasil, incluindo Petrolina-PE.

Normal Climatológica do Brasil 1991-2020															
		Evapotranspiração Potencial (mm)													
Código	Nome da Estação	UF	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Ano
83228	PEIXE	TO	189,6	165,5	176,2	161,8	157,1	127,1	126,0	181,6	219,7	241,7	206,9	204,4	2157,6
83985	PELOTAS	RS	170,8	143,4	138,8	104,3	77,4	62,9	69,4	81,7	87,7	113,6	138,6	163,1	1351,7
82983	PETROLINA	PE	252,3	216,8	228,7	198,8	186,2	142,7	132,0	153,7	199,1	258,6	267,3	272,4	2508,6
83376	PIRENÓPOLIS	GO	141,1	121,8	125,4	113,7	102,1	89,0	95,0	127,2	155,6	166,9	141,0	147,3	1526,1
82480	PIRIPIRI	PI	215,0	171,0	166,2	151,9	158,6	156,9	178,3	197,8	217,4	243,4	247,3	253,9	2357,7

Fonte: INMET, 2021.

4.2 Características físico-hídricas do solo

O solo foi coletado ao lado do laboratório de irrigação, no IFSertão-PE Campus Petrolina Zona Rural (item 4.1), apresentando características de solo franco-arenoso. A figura 2 ilustra as etapas da coleta de solo, pesagem e secagem para determinação do percentual de umidade (CC) e densidade aparente do solo (Da).

Figura 2. a) pesagem do anel volumétrico; b) altura do anel volumétrico; c) diâmetro do anel volumétrico; d) profundidade da coleta; e) coleta de solo; f): pesagem do solo úmido; g): secagem em estufa; h) resfriamento do solo; i) pesagem do solo seco.



Fonte: Autor, 2025.

Após obtidas as massas do solo úmido ($M_u = 228,049$ g) e do solo seco ($M_s = 208,839$ g) e subtraída a massa do anel volumétrico (78,389 g), a umidade foi calculada conforme a equação abaixo:

$$Ug = \frac{149,651\text{ g} - 130,441\text{ g}}{130,441\text{ g}} \times 100 = 14,73\%$$

Para calcular a densidade aparente do solo, foi necessário obter o volume do anel utilizado na coleta da amostra, medindo este 47,45 mm de diâmetro e 52,25 mm de altura. A massa do solo seco foi aferida em balança analítica, sendo 208,839 g (solo seco + anel). A massa do anel volumétrico foi de 78,398 g.

$$Da = \frac{\text{massa do solo seco}}{\text{volume do anel}} = \frac{208,839 - 78,398}{\pi \times 2,373^2 \times 5,225} = 1,41 \text{ g/cm}^3$$

A partir da tabela 1, pôde-se inferir o PMP, conhecendo-se a densidade do solo e a sua CC. No projeto do controlador, foi utilizado o valor de 7,37%, em peso, para o PMP, que está dentro do intervalo descrito. O valor do PMP foi definido dessa forma, devido à complexidade da obtenção do valor real, necessitando de aparelhos laboratoriais indisponíveis durante a elaboração do projeto.

Tabela 6 – Valores aproximados para algumas características físico-hídricas do solo, segundo a sua classe textural (VERMEIREN; JOBLING, 1997).

Textura do solo	VIB (cm/h)	Densidade (g/cm ²)	CC (%peso)	PMP ³ (%peso)	CAD (%peso)	CAD (mm/m)
Arenoso	5 (2,5-22,5)	1,65 (1,55-1,80)	9 (6-12)	4 (2-6)	5 (4-6)	85 (70-100)
Franco-arenoso	2,5 (1,3-7,3)	1,5 (1,40-1,60)	9 (6-12)	6 (4-8)	8 (6-10)	120 (90-150)
Franco	1,3 (0,8-2,0)	1,4 (1,35-1,50)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)	170 (140-190)
Franco-argiloso	0,8 (0,25-1,5)	1,35 (1,30-1,40)	27 (25-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	190 (170-220)
Silto-argiloso	0,25 (0,03-0,5)	1,3 (1,25-1,35)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	210 (190-230)
Argiloso	0,05 (0,01-0,1)	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	230 (200-250)

O primeiro valor representa a média e os valores entre parênteses representam a faixa de variação.

VIB - Velocidade de infiltração básica

CC - umidade do solo na capacidade de campo

PMP - umidade do solo no ponto de murcha permanente

CAD (%peso) - água total disponível (CC - PMP)

CAD (mm/m) - CAD em lâmina de água por profundidade de solo

Fonte: Albuquerque (2010).

4.3 Cálculos do manejo da irrigação

Os cálculos foram feitos baseando-se na cultura da videira, com ciclo de 110 dias até a colheita. O solo utilizado para obter as informações possui textura franco-arenosa, com 10-20% de argila. Abaixo estão as características da cultura, do solo e

do sistema de irrigação que foram utilizadas no projeto, como exemplo. É importante frisar de que os dados de solo, cultura e sistema de irrigação, podem ser adaptados à diferentes condições.

4.3.1 Informações da cultura

A seguir, são apresentadas informações gerais sobre a cultura, utilizadas de forma fictícia como exemplo para o desenvolvimento e a aplicação do projeto do controlador de irrigação. Esses dados têm caráter ilustrativo e foram adotados com o objetivo de demonstrar o funcionamento do sistema proposto.

Cultura	Videira
Ciclo (dias)	110
Espaçamento (m)	3,5 x 2,0
Área por planta (m ²)	7,0
Kc (0–21 dias)	0,70
Kc (22–95 dias)	1,00
Kc (96–110 dias)	0,50
Profundidade sistema radicular (cm)	30

4.3.2 Informações do solo

Abaixo, estão as informações referentes ao solo, determinadas e adotadas pelo próprio autor, utilizadas como base para os cálculos e a aplicação dos parâmetros no projeto do controlador de irrigação.

Massa do solo úmido (g)	149,651
Massa do solo seco (g)	130,441
Massa da água (g)	19,21
Volume do anel (cm ³)	92,35
Densidade aparente - Da (g/cm ³)	1,41
Capacidade de campo - CC (% peso)	14,73

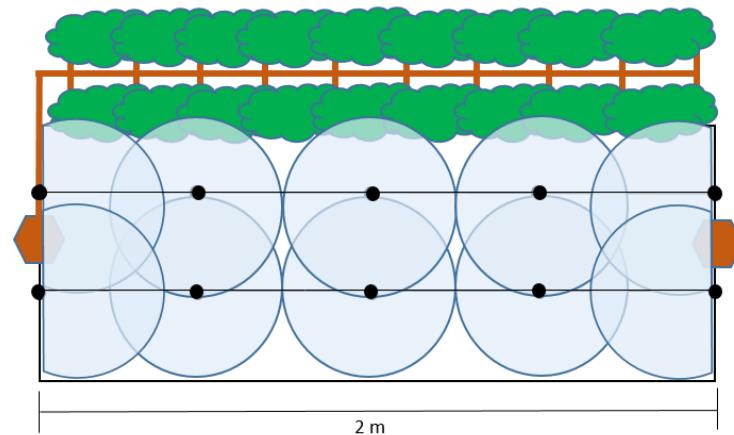
Ponto de murcha permanente - PMP (% peso)	7,37
CE do extrato de saturação - CEes (dS/m)	0,11

4.3.3 Informações do sistema de irrigação

Na sequência, são descritas informações fictícias sobre o sistema de irrigação, utilizadas como base para demonstrar o funcionamento do controlador e a lógica de operação, sem caráter de recomendação prática.

Sistema de irrigação	Gotejamento
Nº de linhas laterais por fila	2
Gotejadores por planta	8
Largura da faixa molhada (m)	1,0
Espaçamento entre emissores (m)	0,50
Vazão por emissor (L/h)	1,68
Eficiência de aplicação (%)	90
Condutividade da água - CEa (dS/m)	0,08

Figura 3 - Sistema de irrigação fictício para o controlador.



Fonte: Autor, 2025.

4.3.4 Percentual de área molhada (PAM)

Percentual de área molhada pelo sistema de irrigação em relação à área total. Considerando o espaçamento de 3,5 m x 2 m e largura do camalhão (faixa molhada) de 1m, tem-se:

$$PAM = \frac{\text{Área molhada (planta)}}{\text{Área útil da planta}}$$

$$PAM = \frac{2 \text{ m}^2}{7 \text{ m}^2} = 0,29 = 29\%$$

4.3.5 Disponibilidade total de água no solo (DTA)

Cálculo da lâmina total disponível entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, em mm/cm.

$$DTA = \frac{CC (\%peso) - PMP (\%peso)}{10} \times Da \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$DTA = \frac{14,73 - 7,37}{10} \times 1,41$$

$$DTA = 1,0378 \text{ mm/cm}$$

4.3.6 Capacidade total de água no solo (CTA)

Lâmina total armazenada na região de maior concentração radicular, onde é mais importante manter a umidade adequada (30 cm, para o caso da videira).

$$CTA = DTA \times Z$$

$$CTA = 1,04 \left(\frac{mm}{cm} \right) \times 30 (cm)$$

$$CTA = 31,1340 \text{ mm}$$

4.3.7 Fator de disponibilidade hídrica (f)

Baseando-se nas tabelas 1, 2 e 3, e considerando a cultura da videira e a média de (ET_0) na cidade de Petrolina (1990 – 2020) obtidas pelo INMET (7 – 8 mm) (tabela 5), o valor de f foi definido como:

$f = 0,3$, onde até 30% da água do solo (CC – PMP) deve ser considerada para uma irrigação mais eficiente.

4.3.8 Capacidade real de água no solo (CRA)

Lâmina necessária para manter a cultura em boas condições hídricas, sendo parte da CTA, limitada pelo fator f:

$$CRA = CTA \times f$$

$$CRA = 31,134 \text{ mm} \times 0,3 = 9,3402 \text{ mm}$$

4.3.9 Umidade crítica (Ucrit)

Limite máximo de água a ser consumida. A partir desse ponto, a planta não consegue permanecer em seu máximo potencial produtivo, reduzindo a produtividade.

$$\begin{aligned} Ucrit. &= CTA - CRA \\ Ucrit. &= 31,1340 \text{ mm} - 9,3402 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$Ucrit. = 21,7938 \text{ mm}$$

4.3.10 Irrigação real necessária localizada (IRN_{Loc})

Lâmina necessária para que a cultura se desenvolva sem déficit hídrico em um determinado solo. Deve ser sempre igual ou inferior a capacidade real de água no solo (IRN≤CRA) (MANTOVANI, 2009).

$$IRN_{LOC} = \frac{CC - PM}{10} \times Da \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times Z (cm) \times f \times \frac{PAM}{100}$$

$$IRN_{LOC} = \frac{14,73 - 7,37}{10} \times 1,41 \times 30 \times 0,3 \times \frac{29}{100}$$

$$IRN_{LOC} = 2,7086 \text{ mm}$$

4.3.11 Fator de correção para irrigação localizada (K_L)

Devido ao sistema ser localizado, e não molhar a área total, deve-se corrigir o valor da lâmina através de um fator (K_L), para que haja uma compensação da área não molhada:

$$KL = 0,1 \times \sqrt{PAM}$$

$$KL = 0,1 \times \sqrt{29} = 0,54$$

4.3.12 Necessidade de lixiviação de sais (N_L)

Segundo a tabela 4, o valor de CE_{es} para a máxima redução de rendimento na videira é 12 dS/m. Sendo assim:

$$N_L = 1 - \frac{CEa}{2 \times CE_{es}} = 1 - \frac{0,08}{2 \times 12} = 0,9967 = 99,67\%$$

4.3.13 Irrigação total necessária localizada (ITN_{LOC})

Lâmina necessária para manter e desenvolver a cultura, considerando perdas com evaporação, vento, percolação, etc, ou seja, considerando a eficiência do sistema. No cálculo, foi utilizada Ea de 90%, dentro do intervalo de eficiência para gotejamento (Salomon, 1990).

$$ITN_{LOC} = \frac{IRN_{LOC}}{Ea \times NL} = \frac{2,7086}{0,9 \times 0,9967} = 3,0195 \text{ mm}$$

4.3.14 Intensidade de aplicação (Ia)

No projeto, foi considerado um espaçamento entre emissores de 0,5 m e entre plantas de 2 m, resultando em 8 emissores por planta. A vazão (q) de cada emissor foi de 1,68 L/h.

$$Ia = \frac{N \times q}{\text{área da planta}} = \frac{8 \times 1,68 \frac{L}{h}}{7 \text{ m}^2} = 1,92 \text{ mm/h}$$

(lâmina média na área útil da planta)

4.3.15 Tempo de operação da 1^a irrigação

Tempo de operação do sistema de irrigação para elevar o solo à capacidade de campo (CC) na primeira irrigação, considerando que o solo não foi irrigado anteriormente. Observe que não é necessário irrigar até chegar no PMP, pois não é interessante manter a umidade nesse ponto, apenas até onde as raízes possuem melhor eficiência na absorção.

$$Ti = \frac{ITN_{LOC}}{Ia} = \frac{3,0195}{1,92} = 1,57 \text{ h} \times 60 = 94,2 \text{ min}$$

4.3.16 Tempo de irrigação, baseado na evapotranspiração diária

Considerando irrigações diárias, onde $IRN_{LOC} = ETc_{LOC}$ e conhecendo o K_c da cultura durante o ciclo, o K_L calculado, a N_L (necessidade de lixiviação) e Ia (intensidade de aplicação), tem-se:

$$Ti = \frac{IRN_{LOC}}{Ia} = \frac{\frac{IRN_{LOC}}{(Ea \times NL)}}{Ia}$$

$$Ti = \frac{IRN_{LOC}}{Ia \times Ea \times N_L} = \frac{ETc_{LOC}}{Ia \times Ea \times N_L}$$

$$Ti = \frac{ETo \times Kc \times K_L}{Ia \times Ea \times N_L} \times 60 \text{ min}$$

$$Ti = \frac{ETo \times Kc \times 0,54}{1,92 \times 0,9 \times 0,9967} \times 60 \text{ min}$$

Sendo Kc igual a 0,7; 1,0 ou 0,5; variando de acordo com a fase fenológica. No projeto, de acordo com a programação, será feita a contagem após cada inserção de ET_0 pelo operador, iniciada com a primeira irrigação do controlador até o 110º dia, com o auxílio de um módulo RTC (relógio), mantendo a contagem correta mesmo se o controlador for desligado da rede elétrica.

5 MATERIAIS UTILIZADOS

A estrutura do controlador é composta pelos seguintes componentes, descritos nas figuras 4 a 10, abaixo:

- Microcontrolador ATmega328P, 14 portas digitais e 6 analógicas: R\$ 25,90.

Figura 4 - Placa Arduino UNO R3.



Fonte: Mercado livre (2025).

- Interface de entrada e saída de dados: R\$ 25,00.

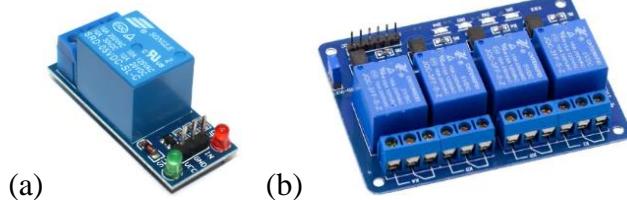
Figura 5 - Display LCD 16x2 com teclado (Keypad Shield).



Fonte: Mercado livre (2025).

- 2 Dispositivos eletromecânicos para acionar cargas elétricas por sinais de baixa tensão: R\$ 19,00 (a); R\$ 25,00 (b).

Figura 6 – a) módulo relé de 1 canal (5V); b) módulo relé de 4 canais (5v).



Fonte: Mercado livre (2025).

- 5 válvulas responsáveis pela abertura e fechamento do fluxo de água: R\$ 40,85 cada.

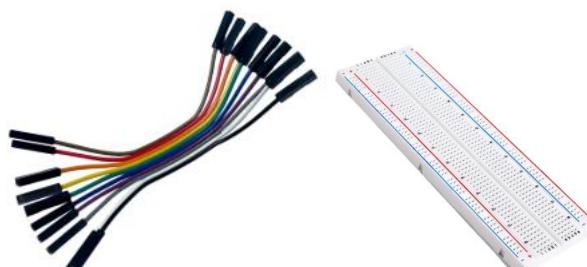
Figura 7 - Válvulas solenoides elétricas de $\frac{1}{2}$ " (até 32L/h).



Fonte: Mercado livre (2025)

- Placa e conexões para montagem do circuito de testes: R\$ 33,50.

Figura 8 - Placa Protoboard e jumpers.



Fonte: Mercado livre (2025)

- Fonte de energia para alimentar os componentes conectados à placa arduino: R\$ 17,79.

Figura 9 - Fonte de alimentação 9V.



Fonte: Mercado livre (2025)

- Módulo para armazenar informações como temporizadores e contadores para, em caso de queda de energia ou desligamento do aparelho, dar continuidade à contagem dos dias do ciclo da cultura: R\$ 22,50.

Figura 10 - Módulo RTC.



Fonte: Mercado livre (2025)

- Cabos e conectores – Realizam as interligações elétricas e hidráulicas: R\$ 20,00.

Esses componentes foram selecionados por apresentarem baixo custo, com o total de R\$ 132,69, sem as válvulas hidráulicas e sem a placa protoboard, pois serviram apenas para testes, assim como a fácil aquisição e compatibilidade total com a plataforma Arduino.

5.1 Estrutura e funcionamento lógico do sistema

O controlador possui um relé principal, que aciona a válvula geral do sistema, e quatro relés setoriais, que acionam individualmente as válvulas das parcelas. O funcionamento segue a seguinte lógica:

1. O operador insere o valor da ET_0 ;
2. O sistema calcula automaticamente ETc , LL , LB e Ti ;

3. A válvula principal é aberta e permanece açãoada durante todo o período de irrigação, até o desligamento da última válvula setorial.
4. As válvulas setoriais abrem uma de cada vez, seguindo a ordem programada e o tempo correspondente, calculado pelo controlador. A primeira setorial abre juntamente com a principal;
5. Após a irrigação da última parcela, ela será desligada, assim como a válvula principal.

Essa sequência garante controle preciso e evita irrigar duas áreas ao mesmo tempo, mantendo a pressão adequada do sistema durante toda aplicação, garantindo a uniformidade de distribuição da lâmina.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o desenvolvimento e a avaliação do controlador de irrigação demonstram que o sistema atendeu às especificações propostas em projeto, tanto do ponto de vista eletrônico quanto operacional, alcançando plenamente os objetivos específicos estabelecidos. Inicialmente, foram realizados os cálculos de irrigação com base nos parâmetros da cultura da videira, os quais serviram como referência para o dimensionamento do sistema e para a programação do controlador. Esses cálculos permitiram definir corretamente variáveis como evapotranspiração da cultura, lâmina líquida, lâmina bruta e tempo de irrigação, garantindo coerência entre a fundamentação teórica e a aplicação prática.

Nos testes em bancada, o controlador apresentou funcionamento adequado, acionando e desligando os componentes exatamente dentro dos tempos programados, o que comprova a eficiência da lógica implementada no Arduino e a correta integração entre hardware e software. Esse desempenho consistente em ambiente controlado foi fundamental para validar o circuito eletrônico, o projeto físico do controlador — composto por microcontrolador, módulos relé e válvulas solenoides — e a interação com os periféricos responsáveis pelo acionamento do sistema de irrigação. A figura 11, abaixo, mostra o andamento da montagem do controlador.

Figura 11 – Montagem do hardware do controlador.



Fonte: Autor, 2025

Observa-se que o custo total do controlador desenvolvido neste trabalho foi significativamente inferior ao de controladores comerciais com funcionalidades semelhantes. Enquanto o modelo comercial apresenta custo superior a R\$ 6.700,00, o protótipo baseado na plataforma Arduino apresentou custo total de R\$ 132,69, representando uma redução expressiva no investimento inicial. Essa diferença reforça

o caráter de baixo custo do sistema proposto, sem comprometer sua funcionalidade básica de cálculo automático do tempo de irrigação.

Comercial	Preço
Rain Bird ESP-LXME / ESP-LXIVM	R\$ 6.752,00

Protótipo	Preço
Projeto Arduino	R\$ 132,69

Esses resultados confirmam o êxito do objetivo relacionado à implementação da programação para o cálculo automático da ETc, da lâmina líquida, da lâmina bruta e do tempo de irrigação, bem como a confiabilidade do sistema em condições controladas de operação. Observa-se (figura 12), que o sistema funcionou perfeitamente em bancada, ligando e desligando as quatro válvulas de forma consecutiva e no tempo programado.

Figura 12 – Teste em bancada do controlador e conferência do tempo de operação comparado ao tempo teórico calculado manualmente.



Fonte: Autor, 2025

$$Ti = \frac{ETo \times Kc \times 0,54}{1,92 \times 0,9 \times 0,9967} \times 60 \text{ min}$$

$$Ti = \frac{5 \times 0,7 \times 0,54}{1,92 \times 0,9 \times 0,9967} \times 60 \text{ min} = 65,8 \text{ min}$$

A comparação entre os valores calculados manualmente e aqueles obtidos automaticamente (Figura 12) pelo controlador indicou concordância entre os resultados, evidenciando que a lógica programada reproduz corretamente os cálculos teóricos do manejo da irrigação. Dessa forma, o objetivo de comparar os resultados experimentais com os valores teóricos foi plenamente atendido, reforçando a consistência técnica do sistema desenvolvido.

Um aspecto relevante deste trabalho é o seu potencial de aplicação junto a pequenos produtores rurais, especialmente aqueles que não possuem conhecimento técnico aprofundado em irrigação ou em eletrônica. A automação simples, baseada em controladores de baixo custo, pode representar uma importante ferramenta para melhorar o uso da água na agricultura, reduzindo desperdícios e contribuindo para um manejo mais racional dos recursos hídricos. Quando associada ao conhecimento técnico de profissionais da área (agronomos, engenheiros agrícolas ou técnicos agrícolas) e ao trabalho de extensão rural, essa tecnologia pode servir como um elo entre a pesquisa e a prática no campo, auxiliando na difusão de informações, no aumento da produtividade e, consequentemente, na ampliação da produção de alimentos.

Outra vantagem importante do controlador desenvolvido é a sua versatilidade. Embora os testes tenham sido realizados com sistema de irrigação por gotejamento e o projeto tenha sido pensado inicialmente para a cultura da videira, o equipamento não se limita a esse sistema nem a essa cultura específica. Com ajustes relativamente simples na programação e no dimensionamento do sistema hidráulico, o controlador pode ser adaptado para diferentes métodos de irrigação, como aspersão convencional em pastagens, sistemas em culturas anuais, frutíferas diversas e hortaliças. Essa característica amplia significativamente o campo de aplicação do dispositivo, permitindo que a mesma base tecnológica seja utilizada em diferentes realidades produtivas.

Dessa forma, o trabalho realizado não se restringe apenas à validação de um protótipo, mas aponta para um caminho promissor na integração entre automação, manejo da irrigação e extensão rural. A adoção de controladores simples, eficientes e economicamente acessíveis contribui para que pequenos produtores tenham acesso a tecnologias antes restritas a sistemas mais complexos e onerosos. Em conjunto com orientação técnica adequada, essa abordagem apresenta potencial para melhorar o uso da água, reduzir custos de produção, aumentar a produtividade das culturas e

colaborar com a segurança alimentar, ao mesmo tempo em que favorece a sustentabilidade no uso dos recursos naturais.

6.1 Limitações do sistema e sugestões de melhorias

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos com o funcionamento do controlador desenvolvido, algumas limitações e possibilidades de aprimoramento podem ser destacadas. A ausência de conexão com a internet constitui uma delas, uma vez que a integração com serviços climáticos ou estações meteorológicas poderia permitir a inserção automática de dados, como a evapotranspiração de referência, reduzindo a necessidade de intervenção manual do operador. Outra melhoria cabível refere-se à comunicação entre o controlador e as válvulas instaladas no campo, que poderia ser realizada por meio de sinais de rádio de baixa frequência, ampliando o alcance e aumentando a confiabilidade do sistema, além de torná-lo independente de conexão com a internet, aspecto relevante em áreas rurais onde a qualidade do sinal costuma ser limitada.

Adicionalmente, destaca-se a necessidade de aprimorar a proteção elétrica do sistema, especialmente em relação a descargas elétricas e oscilações ou interrupções no fornecimento de energia. A inclusão de dispositivos de proteção, como disjuntores diferenciais residuais (DR), fusíveis, supressores de surtos ou fontes de alimentação mais robustas, poderia aumentar a segurança e a durabilidade do equipamento, protegendo componentes sensíveis, como a placa microcontroladora alimentada em baixa tensão (9 V). Essas melhorias representam oportunidades para trabalhos futuros, sem comprometer os resultados positivos obtidos com o protótipo desenvolvido.

7 CONCLUSÃO

A construção do controlador de irrigação desenvolvido neste trabalho demonstrou a viabilidade técnica da automação do manejo hídrico com base em parâmetros agronômicos consolidados. Os resultados indicaram plena concordância entre os tempos de irrigação calculados teoricamente, a partir da relação LB/la, e os tempos efetivamente executados pelo controlador, evidenciando que a lógica implementada é adequada para converter a lâmina de irrigação em comandos operacionais precisos. Essa coerência confirma que o sistema é capaz de aplicar a lâmina planejada com elevada confiabilidade, reduzindo a dependência de decisões empíricas por parte do produtor.

Além disso, os objetivos específicos estabelecidos para o desenvolvimento do trabalho foram plenamente atingidos. Os cálculos de irrigação realizados com base nos parâmetros da cultura da videira possibilitaram a determinação consistente da evapotranspiração da cultura, das lâminas líquida e bruta de irrigação e do tempo necessário de funcionamento do sistema, fornecendo subsídios técnicos adequados para a automação proposta. Esses cálculos constituíram a base conceitual para a lógica de programação implementada no controlador.

O projeto físico do sistema, envolvendo a integração entre microcontrolador, módulos de relé e válvulas solenoides, mostrou-se funcional e compatível com a aplicação em sistemas de irrigação localizada. A implementação da programação permitiu o cálculo automático das variáveis de manejo e sua conversão em comandos sequenciais de acionamento das válvulas, atendendo ao objetivo de automatizar o processo de irrigação a partir de dados meteorológicos fornecidos pelo operador.

Os testes realizados em condições controladas, possibilitaram avaliar o desempenho do controlador de forma segura e gradual, confirmando o correto funcionamento do sistema. A comparação entre os resultados obtidos automaticamente pelo controlador e os valores calculados manualmente demonstrou concordância entre os métodos, validando a precisão da lógica implementada. Dessa forma, o controlador desenvolvido apresenta-se como uma solução tecnicamente viável, de baixo custo e com potencial de aplicação prática no manejo da irrigação, especialmente em pequenas e médias propriedades agrícolas.

8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. E. P. de. Manejo da irrigação. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 18–28, nov./dez. 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/875096/1/Manejoirrigacao.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

ALBUQUERQUE, Paulo Emílio Pereira de. Estratégias de manejo de irrigação: exemplos de cálculo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 36 p. (Circular Técnica, 136). ISSN 1679-1150.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.

AYERS, R. S.; WESTCOTT, D. W. Water quality for agriculture. 2. ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 29).

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. Manual de irrigação. 9. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2019.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. 9. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2019. 545 p.

BERNARDO, Salassier; SOARES, Antônio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. Manual de irrigação. 9. ed. Viçosa, MG: UFV, 2019.

EMBRAPA. Estratégias de manejo de irrigação: exemplos de cálculo. Circular técnica, n. 136. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/865592/1/Circ136.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Irrigation water management: irrigation scheduling. Rome: FAO, 1989. (FAO Training Manual, 4).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. How is water used in agriculture? Rome: FAO, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Water-use efficiency in irrigated agriculture. Rome: FAO, 2000. (FAO Plant Production and Protection Paper, 21).

GARCÍA, L. et al. IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors (Basel)*, v. 20, n. 4, e1042, 2020. DOI: 10.3390/s20041042.

INMET — INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas 1991–2020. Brasília: INMET, 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 27 nov. 2025.

KARTHICK, A. et al. Development of a prototype automatic irrigation system using Arduino Uno for enhanced soil moisture management. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, v. 19, n. 5, p. 606–613, 2024. DOI: 10.18280/ijdne.190506.

MANTOVANI, Everardo Chartuni; BERNARDO, Salassier; PALARETTI, Luiz Fabiano. Irrigação: princípios e métodos. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013.

MANTOVANI, Everardo; MORAES, Jorge Marcos de; FERNANDES, Henrique de Oliveira (org.). Irrigação: dos fundamentos ao manejo de sistemas. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 572 p.

MERCADO LIVRE. Controlador para irrigação ESP-LXIVM (60 estações) – Rain Bird. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/controlador-para-irrigacao-esp-lxivm-60-estacoes-rain-bird/p/MLB1834987743>

. Acesso em: 9 dez. 2025.

Mercado Livre

MERCADO LIVRE. Controlador de irrigação ESP-TM2 (6 estações) – Indoor – Rain Bird. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/controlador-irrigacao-esp-tm2-6-estacoes-indoor-rain-bird/p/MLB51343114>

. Acesso em: 9 dez. 2025.

Mercado Livre

NEGRETE, Jaime Cuauhtémoc. Arduino in agriculture and the teaching of mathematics. *Horticulture International Journal*, v. 7, n. 3, p. 80–83, 2023. DOI: 10.15406/hij.2023.07.00280.

PEREIRA, F. A. L. et al. Automação de precisão utilizando Arduino e inversor de frequência aplicado a sistemas de irrigação por válvulas. *Irriga*, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 27–37, 2020. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n1p27-37.

SILVA, Vitor Gabriel Sales de Brito et al. Sistema de irrigação inteligente: automação e eficiência utilizando tecnologias IoT. *Revista Brasileira de Estudos de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 2, n. 1, 2025. Disponível em: <https://periodicos.unemat.br/index.php/rbedrpp/article/view/12628>

. Acesso em: 13 dez. 2025.

WILLADINO, Lilia; CÂMARA, Terezinha Rangel. Tolerância das plantas à salinidade: aspectos fisiológicos e bioquímicos. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 6, n. 11, 2010. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2010c/tolerancia%20das%20plantas.pdf>

. Acesso em: 9 dez. 2025.