

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ – UESPI  
CENTRO DE TECNOLOGIA E URBANISMO – CTU  
GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME OLIVEIRA DA SILVA SANTOS  
SIMPLÍCIO SILVA SANTOS JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS INTELIGENTES DE  
IRRIGAÇÃO: PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
AUTOMATIZADO COM ESP 32, SENSORIAMENTO DE UMIDADE DO  
SOLO E PLATAFORMA BLYNK PARA MONITORAMENTO E  
CONTROLE REMOTO**

TERESINA  
NOVEMBRO 2025

GUILHERME OLIVEIRA DA SILVA SANTOS  
SIMPLÍCIO SILVA SANTOS JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS INTELIGENTES DE  
IRRIGAÇÃO: PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
AUTOMATIZADO COM ESP 32, SENSORIAMENTO DE UMIDADE DO  
SOLO E PLATAFORMA BLYNK PARA MONITORAMENTO E  
CONTROLE REMOTO**

Trabalho de conclusão de curso submetido à  
Universidade Estadual do Piauí como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Grau de  
Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof<sup>o</sup>. Me. Iulle de Macedo Guerra Neves

TERESINA  
NOVEMBRO 2025

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS INTELIGENTES DE  
IRRIGAÇÃO: PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
AUTOMATIZADO COM ESP 32, SENSORIAMENTO DE UMIDADE DO  
SOLO E PLATAFORMA BLYNK PARA MONITORAMENTO E  
CONTROLE REMOTO**

**GUILHERME OLIVEIRA DA SILVA SANTOS  
SIMPLÍCIO SILVA SANTOS JÚNIOR**

‘Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, habilitação Eletrotécnica e aprovado em sua forma final pela Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Piauí.’

---

**Me. Profa. Iulle de Macedo Guerra Neves**  
Orientador

---

**Me. Prof. Patrese Veras Queleães**  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:

---

**Me. Prof. Iulle de Macedo Guerra Neves**  
Presidente

---

**Dr. Prof. André Luís da Silva Pessoa**  
Membro

---

**Me. Prof. Mauro Antônio Guimarães Clark**  
Membro

## **AGRADECIMENTOS – Guilherme Oliveira**

Agradeço a Deus, por me dar força, saúde, sabedoria e conhecimento durante toda minha vida e jornada acadêmica.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo em todas as ocasiões.

Ao meu colega Simplicio Silva Santos Júnior, pela jornada compartilhada, compreensão, parceria, apoio e pelas palavras de incentivo.

À minha orientadora Iulle de Macedo Guerra Neves, pela dedicação, paciência e orientação essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas, que estiveram comigo nas aulas, nas comemorações e nas dificuldades, sem eles o curso seria triste.

Aos professores, que contribuíram com conhecimento, experiência de vida e experiência de profissão.

E por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

## **AGRADECIMENTOS – Simplicio Júnior**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, a quem pertence toda honra e toda glória. Foi Ele quem sustentou meus passos, renovou minhas forças nos momentos de cansaço e trouxe clareza quando o caminho parecia confuso.

Agradeço profundamente aos meus pais, Simplicio Silva Santos e Maria da Conceição Lopes da Silva, que nunca deixaram de acreditar no meu potencial, mesmo quando eu próprio duvidava. O apoio constante, a paciência e a confiança foram pilares silenciosos que sustentaram toda esta jornada.

Aos meus irmãos, Gabriel da Silva Santos, Maria Letícia da Silva Santos e Mariana Vitória da Silva Santos, agradeço pela companhia, pelo apoio e pelas palavras sinceras que fizeram diferença nos momentos de maior dificuldade.

À minha namorada, Georgiany Santana dos Santos, deixo um agradecimento especial. Sua paciência, seu carinho e sua presença constante trouxeram equilíbrio aos dias mais cansativos. Sua fé no meu potencial foi combustível para que eu mantivesse o foco e seguisse adiante. Esta conquista também é sua.

Ao meu amigo e dupla, Guilherme Oliveira da Silva Santos, registro meu reconhecimento. Caminhar lado a lado neste projeto foi uma honra. Sua dedicação, comprometimento e parceria verdadeira foram fundamentais para que este trabalho alcançasse qualidade e consistência.

À nossa orientadora, Me. Iulle de Macedo Guerra Neves, agradeço pelas contribuições valiosas, que foram essenciais não apenas para a construção deste trabalho, mas também para minha formação enquanto profissional mais consciente e criterioso.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram para que este trabalho se concretizasse. Cada gesto, conselho ou incentivo deixou marcas que ajudaram a moldar não apenas o projeto, mas também a pessoa e o profissional que sigo me tornando.

A todos que fizeram parte desta caminhada, minha gratidão.

## RESUMO

A crescente escassez de recursos hídricos e a necessidade de eficiência no manejo hídrico impulsionam o desenvolvimento de sistemas inteligentes de irrigação. Neste trabalho, é apresentado o processo de prototipagem de um sistema de irrigação automatizado baseado no microcontrolador ESP32, utilizando sensores de umidade do solo e a plataforma Blynk para monitoramento e controle remoto. O sistema foi projetado para realizar a leitura contínua dos níveis de umidade, acionar a irrigação de forma autônoma e permitir comandos e visualizações em tempo real via dispositivo móvel. A implementação integra automação, comunicação sem fio e análise simples de dados para promover o uso mais eficiente da água. Os resultados obtidos demonstram que a solução desenvolvida é funcional e capaz de otimizar o manejo hídrico, evidenciando o potencial de sistemas inteligentes de irrigação aplicados à agricultura de pequena e média escala.

**Palavras-chave:** Irrigação inteligente; Automação agrícola; ESP32; Blynk; Internet das Coisas.

## **ABSTRACT**

The growing scarcity of water resources and the need for greater efficiency in water management drive the development of intelligent irrigation systems. This work presents the prototyping process of an automated irrigation system based on the ESP32 microcontroller, using soil moisture sensors and the Blynk platform for remote monitoring and control. The system was designed to continuously read moisture levels, autonomously activate irrigation, and allow real-time commands and visualization through a mobile device. The implementation integrates automation, wireless communication, and simple data analysis to promote more efficient water use. The results demonstrate that the developed solution is functional and capable of optimizing water management, highlighting the potential of intelligent irrigation systems applied to small- and medium-scale agriculture.

**Keywords:** Smart irrigation; Agricultural automation; ESP32; Blynk; Internet of Things.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos e Sistemas de Irrigação.....	15
Tabela 2 - Conceitos de Controle.....	23
Tabela 3 - Principais componentes de uma Rede de Sensores Sem Fio.....	27
Tabela 4 - Características das RSSFs.....	28
Tabela 5 - Características dos Sistemas Embarcados.....	33
Tabela 7 - Trabalhos Utilizando Arduino.....	36
Tabela 8 - Trabalhos Utilizando ESP32 e ESP8266.....	38
Tabela 9 - Trabalhos utilizando Raspberry.....	41
Tabela 10 - Trabalhos utilizando sensores de umidade do solo capacitivos e resistivos, calibração de sensores e aplicação na irrigação.....	43
Tabela 11 - Bases de dados/Fontes de dados.....	49
Tabela 12 - Palavras-chave e combinações de palavras-chave utilizadas.....	49
Tabela 13 - Materiais utilizados para desenvolvimento do protótipo.....	51
Tabela 14 - Etapas de desenvolvimento do sistema experimental.....	52



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas/Variações de irrigação por aspersão: sistema convencional (esquerda), sistema por pivô central (meio) e a carretel enrolador (direita).....	16
Figura 2 - Irrigação superficial por sulcos em culturas diversas.....	18
Figura 3 - Irrigação superficial por inundação na cultura do arroz.....	18
Figura 4 - Sistemas de irrigação localizada: gotejamento (esquerda e meio) e microaspersor (direita).....	20
Figura 5 - Sistema de irrigação localizada: Esquema com partes.....	20
Figura 6 - Tipos de sistemas de irrigação subsuperficial e subterrânea: irrigação subsuperficial por elevação do lençol freático (esquerda) e gotejamento subsuperficial (meio) e mesa de capilaridade (direita).....	22
Figura 7 - Alguns exemplos de topologias de rede.....	30
Figura 8 - Sistema de irrigação automático pronto.....	53
Figura 10 - Fluxo lógico do sistema.....	55
Figura 11 - ESP32.....	58
Figura 12 - Sensor de Umidade Resistivo.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

GPRS - *General Packet Radio Service* (Serviço Geral de Rádio por Pacotes)

GSM - Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicações Móveis)

IoT - *Internet of Things* (Internet das Coisas)

ICN - *Information-Centric Networking* (Rede Centrada em Informações)

ILPs - *Integer Linear Programs* (Programas Lineares Inteiros)

KCMC - K-Cobertura e M-Conectividade

LoRa - *Long Range* (Longo Alcance)

MQTT - *Message Queue Telemetry Transportation* (Transporte de Telemetria para Enfileiramento de Mensagens)

RSSF - Redes de Sensores Sem Fio

RSUSSF - Redes de Sensores de Umidade do Solo Sem Fio

TDR - *Time Domain Reflectometry* (Reflectometria no Domínio do Tempo)

WSN - *Wireless Sensor Networks* (Redes de Sensores Sem Fio)

Wi-Fi - *Wireless Fidelity* (Fidelidade Sem Fio)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Métodos de Irrigação.....	14
2.1.1 Aspersão.....	15
2.1.2 Superfície.....	17
2.1.3 Localizada.....	19
2.1.4 Subsuperfície ou Subterrânea.....	21
2.2 Sistemas de Controle.....	22
2.2.1 Sistemas de controle: Conceitos e características.....	22
2.2.2 Sistemas de Controle na Irrigação.....	24
2.3 Redes de Sensores sem Fio (RSSF/WSN - Wireless Sensor Network) e IoT.....	27
2.3.1 Conceitos, Características e Topologias.....	27
2.3.3 Implementação na Irrigação.....	31
2.4 Sistemas Embarcados.....	32
2.4.1 Sistemas Embarcados na Agricultura.....	32
2.4.2 Arduino.....	35
2.4.3 ESP32 e ESP8266.....	38
2.4.4 Raspberry.....	41
2.4.5 Sensores de umidade do solo (Capacitivos e Resistivos).....	42
3. METODOLOGIA.....	48
3.1 Metodologia de Pesquisa.....	48
3.2 Etapa Experimental - Construção de Protótipo.....	50
3.3 Trechos chave do código.....	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Funcionamento Geral do Sistema.....	59
4.2 Desempenho da Irrigação Automática.....	59
4.3 Estabilidade do Sistema.....	60
4.4 Precisão e Limitações do Sensor.....	60
4.5 Robustez do Sistema.....	60
4.6 Discussão Geral dos Resultados.....	61
5. CONCLUSÃO.....	62
6. REFERÊNCIAS.....	64

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente escassez de recursos hídricos e a demanda por maior eficiência nos processos agrícolas evidenciam a necessidade de soluções tecnológicas que promovam o uso eficiente da água. No contexto da irrigação, segundo Eisenhauer *et al.* (2021) para satisfazer todas as demandas das plantas e extrair a produção máxima ideal, é necessário utilizar a irrigação como ciência e não como um mero equipamento. Além disso, de acordo com Eisenhauer *et al.* (2021), mesmo uma área recebendo uma média anual satisfatória de precipitação, ainda assim a chuva pode ser mal distribuída na área plantada. O controle manual frequentemente resulta em aplicações excessivas ou insuficientes de água, comprometendo a produtividade, elevando os custos operacionais e contribuindo para o desperdício hídrico.

A utilização de sistemas automatizados baseados em microcontroladores e sistemas embarcados como o Arduino. A plataforma Arduino é uma forma barata e eficiente de controle com a possibilidade de integração com sensores, os quais, segundo Chauhdary *et al.* (2023), servem para comunicar ao circuito eletrônico de controle sobre eventos que ocorrem externamente, aos quais ele deve atuar, ou comandar uma ação para os atuadores. Sendo assim, é possível utilizar um sistema de controle baseado em microcontroladores, como Arduino, ESP8266 e ESP32, que utilizam sensores e atuadores (relés, válvulas, motores, solenoides) para administração do sistema de irrigação automatizado (SUTIKNO *et al.*, 2024).

A eficiência hídrica e aumento da produção dependem diretamente da capacidade de identificar o momento e a quantidade adequada de água a ser aplicada no solo (EISENHAUER *et al.*, 2021). Nesse contexto, segundo Sutikno *et al.* (2024), os sensores de umidade do solo destacam-se como ferramentas fundamentais para o monitoramento em tempo real das condições hídricas do solo. Esses dispositivos permitem a medição precisa do teor de umidade, fornecendo dados confiáveis que orientam a decisão de irrigação com base em parâmetros técnicos, em vez de métodos empíricos.

A tecnologia dos sensores de umidade evoluiu significativamente, permitindo sua integração com plataformas como o Arduino e o sistema embarcado ESP8266. Sensores resistivos e capacitivos são amplamente utilizados por apresentarem bom custo-benefício,

baixa complexidade de operação e fácil interface com microcontroladores (ASSIS; AZEVEDO, 2024). Tais sensores possibilitam a leitura contínua da umidade do solo e sua conversão em sinais elétricos compatíveis com sistemas automatizados, oferecendo uma base sólida para o desenvolvimento de soluções inteligentes de irrigação.

Além da precisão na leitura, o uso de sensores de umidade do solo permite a implementação de sistemas adaptativos, nos quais o fornecimento de água é ajustado dinamicamente às variações das condições do solo, que, são modificadas principalmente em relação a incidência pluviométrica do local (EISENHAUER *et al.*, 2021). Isso não apenas reduz o consumo de água em regiões de grande incidência pluviométrica, como também, complementa a necessidade hídrica das plantas em regiões onde a incidência pluviométrica é baixa ou quase inexistente (EISENHAUER *et al.* 2021). A análise histórica dos dados coletados por esses sensores também fornece base para o planejamento agrícola e gestão de recursos hídricos e financeiros.

Além disso, os sistemas de irrigação inteligentes que empregam sensores de medição de umidade podem utilizar a tecnologia das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) para aumentar a área, a velocidade e a precisão da medição. Com a utilização de RSSF a versatilidade dos projetos passa a ser maior, além de permitir a análise de dados distribuída, conexão com a internet e precisão dependendo da sumarização das áreas, podendo tornar a utilização da água mais eficiente no campo de cultivo (LI *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, torna-se evidente que a adoção de sistemas de irrigação inteligentes representa não apenas uma evolução tecnológica, mas uma necessidade para garantir maior eficiência no uso da água, redução de custos operacionais e aumento da produtividade agrícola. Nos próximos capítulos serão abordados os assuntos que regem o tema e a metodologia aplicada na construção do protótipo.

## **1.1 Objetivos**

Esta seção define os objetivos a serem alcançados na finalização deste trabalho, estabelecendo o escopo da pesquisa.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Executar a construção de um protótipo a fim de ilustrar os conceitos e as nuances existentes para o desenvolvimento de sistemas de irrigação automáticos que utilizam sistemas embarcados e sensores de umidade como componente essencial de interface entre ambiente e a máquina e que implementam sistemas de redes de sensores sem fio em sua arquitetura.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Identificar por meio de pesquisa sistemática os principais trabalhos que abordam o tema desde suas bases conceituais até as abordagens que empregam metodologias, técnicas e conceitos mais avançados e atuais, assim como abordagens alternativas, focando em: conceitos, características, metodologias, problemas, soluções, vantagens, desvantagens, desafios e implantação na agricultura.

Analisar artigos, teses e livros e discorrer, com base na literatura coletada sobre os seguintes temas: o que é irrigação, quais os métodos e sistemas de irrigação, quais as vantagens e desvantagens de cada método/sistema, conceitos de sistemas de controle, tipos de sistemas de controle, características dos sistemas de controle, aplicação de sistemas de controle na irrigação inteligente, conceitos de redes de sensores sem fio, características das RSSF, comparação das diferentes topologias de RSSF, problemas e soluções para RSSF, discorrer analisando a literatura referente a aplicação de RSSF na irrigação inteligente, apresentar os conceitos e características de Sistemas Embarcados e por fim sumarizar separadamente em quadros, os trabalhos que apresentam sistemas embarcados e sensores de umidade do solo capacitivos e resistivos aplicados à irrigação, apresentando o modelo do circuito embarcado e o tipo de sensor utilizado.

E por fim apresentar a metodologia utilizada para construção de um protótipo, utilizando o sistema embarcado ESP32, sensores de umidade do solo e plataforma de controle remoto Blynk, além de apresentar trabalhos a serem realizados no futuro com base neste trabalho

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção introduz os conceitos necessários para o entendimento do trabalho e o arcabouço resultante da pesquisa realizada descrita na próxima seção. Serão apresentados os tipos de irrigação, suas características, vantagens e desvantagens, componentes fundamentais para qualquer sistema de irrigação, sistemas de controle, redes de sensores sem fio, sistemas embarcados, hardware disponível, sensores de umidade do solo (capacitivo e resistivo).

### 2.1 Métodos de Irrigação

A irrigação é uma das práticas agrícolas mais antigas e essenciais para o desenvolvimento da produção de alimentos no mundo. Seu objetivo principal é garantir o suprimento adequado de água às plantas, especialmente em regiões ou períodos de déficit hídrico. Segundo Eisenhauer *et al.* (2021) irrigação é a aplicação de água no solo por métodos artificiais com o intuito de complementar ou parcializar as necessidades hídricas das plantas com o uso de recursos hídricos presentes na área.

Existem quatro métodos principais de aplicação de água à cultura conforme a Tabela 1 (MATO GROSSO DO SUL, 2024; SILVEIRA, 2023; NASCIMENTO, 2022) são eles: aspersão, superfície, localizada, subsuperfície ou subterrânea, cada um possui suas vantagens e desvantagens, a seleção do método de irrigação é baseada nos parâmetros apresentados anteriormente, esta seção tratará sobre os métodos e variações existentes, apresentando suas características, vantagens e desvantagens

Tabela 1 - Métodos e Sistemas de Irrigação

Método	Variações/Sistemas
Aspersão	Convencional Mecanizada (Pivô Central, Autopropelido, Deslocamento Linear)
Superfície	Sulcos Inundação Faixa
Localizada	Gotejamento Microaspersão
Subsuperfície ou Subterrânea	Gotejamento Subterrâneo Elevação do Lençol Freático Mesas de Subirrigação

Fonte: Elaborado pelos autores.

### 2.1.1 Aspersão

Neste método de aspersão a água é distribuída sobre a superfície do solo e sobre a cultura na forma de gotas, de forma similar a chuva, conforme mostra a Figura 1, e possui alta adaptabilidade às características topográficas e geometria do terreno (EISENHAUER *et al.*, 2021), (SILVEIRA, 2023). Este método possui 4 sistemas diferentes, segundo Mato Grosso do Sul (2024); Lacreta, Silva e Moreira (2024) e Nascimento (2022) pode-se distinguir as quatro variações da seguinte forma:

- Convencional: que pode ser fixo, semi fixo e portátil, o primeiro com as linhas fixas, na maioria das vezes permanentes, o segundo com as linhas principais fixas e as laterais móveis e o último totalmente móvel com as linhas principais e laterais móveis, e o componente de irrigação podem ser aspersores ou mini canhão.
- Autopropelido: onde um único canhão ou mini canhão é montado em um carrinho que percorre a plantação longitudinalmente, sendo o carrinho propelido pela própria pressão da água.
- Pivô Central: consiste em uma estrutura única lateral, que gira em torno de um eixo central(pivô), as estruturas metálicas são suportadas por estruturas em forma de A, cada estrutura(torre) possui um motor que permite o acionamento independente das mesmas.



- Deslocamento Linear: similar ao pivô central em estrutura, porém desloca-se continuamente no campo, transversalmente em posição e longitudinalmente na área.

As vantagens do método de irrigação por aspersão, segundo Lacreta, Silva e Moreira (2024) e Nascimento (2022), são:

- Adaptável a diversas condições de solo, relevo e área;
- Pode ser construído totalmente automatizado;
- Tem maior eficiência na distribuição da água em relação ao método de superfície;
- Facilidade na montagem e desmontagem;
- Facilidade de transporte para a área alvo;
- Permite tráfego nas áreas irrigadas;
- Permite a aplicação de fertilizantes de forma mais fácil.

Já as desvantagens do método de irrigação por aspersão, segundo Lacreta, Silva e Moreira (2024) e Nascimento (2022), são:

- Influência do vento;
- Pode danificar culturas (flores, folhas) influenciando na produção;
- Cria um ambiente propício ao aparecimento de fungos;
- Interfere no tratamento de pragas;
- Custos de instalação e operação mais elevados;
- Pode disseminar doenças as quais o vetor é a água;
- Dependendo do relevo pode causar lixiviação, interferindo na produção.

Figura 1 - Sistemas/Variações de irrigação por aspersão: sistema convencional (esquerda), sistema por pivô central (meio) e a carretel enrolador (direita).



Fonte: TESTEZLAF (2017).

### 2.1.2 Superfície

A irrigação por superfície, de acordo com Lacreta, Silva e Moreira (2024), também conhecida como transparência por superfície ou transparência por indução, utiliza a gravidade e a infiltrabilidade do solo para distribuir a água pela área plantada. A irrigação por superfície pode ser dividida em três variações de sistemas (NASCIMENTO, 2022):

- Irrigação por sulcos: a água é distribuída por meio de uma inundação parcial na área a ser irrigada acompanhando as linhas da plantação escoando e se infiltrando por meio de sulcos feitos na superfície do solo e é bastante utilizada em culturas anuais e permanentes, observável na Figura 2.
- Irrigação por inundação: a água é aplicada sobre a área plantada e é limitada por diques que são construídos nos arredores das divisões da plantação, muito utilizada em culturas como a do arroz, como mostrado na Figura 3.
- Irrigação por faixa: é a inundação total da área por meio da condução da água na superfície do solo, feita por um determinado período de tempo, suficiente para suprir a quantidade de água necessária para a irrigação.

As vantagens do método de irrigação por superfície, segundo Nascimento (2022); Lacreta, Silva e Moreira (2024) e Andrade (2024), são:

- Baixo custo para instalação;
- Pode ser utilizado sem energia elétrica;
- Pode ser utilizado com água de fontes que apresentam matéria orgânica e sólidos suspensos;
- Pouca mão de obra necessária;
- Baixo custo de operação;
- Equipamento simples e fácil de adquirir;
- Não sofre efeito do vento;
- Não interfere na estrutura superior da cultura como o método de aspersão.

Já as desvantagens do método de irrigação por superfície, segundo Nascimento (2022); Lacreta, Silva e Moreira (2024) e Andrade (2024), são:

- Eficiência baixa na aplicação de água;
- Consumo de água é elevado em comparação com os outros métodos;
- Necessário fazer grandes modificações no terreno e o manejo é mais complexo;
- Difícil de operar e automatizar;
- Depende da topografia;
- Dimensionamento difícil - é necessário realizar testes de campo, se feito de maneira errada pode causar perda de eficiência na distribuição da água;
- Requer frequentes análises para assegurar o desempenho ideal;
- Baixo interesse comercial pois requer poucos equipamentos.

Figura 2 - Irrigação superficial por sulcos em culturas diversas.



Fonte: RODRIGUES; SOUZA (2018)

Figura 3 - Irrigação superficial por inundação na cultura do arroz.



Fonte: RODRIGUES; SOUZA (2018)

### 2.1.3 Localizada

Neste método de irrigação segundo Andrade (2024) a água é aplicada sobre uma área restrita, de preferência perto do caule, embaixo da sombra da planta e na região radicular, com o objetivo de umedecer apenas a parte pertinente da planta; normalmente esses sistemas utilizam baixa vazão devido às formas de dispersão da água, como pode ser visualizado na Figura 4. A irrigação localizada é dividida entre duas configurações gerais possíveis (ANDRADE, 2024):

- Irrigação por gotejamento: a água é aplicada ao solo diretamente na estrutura radicular da planta utilizando gotejadores com baixa vazão, como pode ser visualizado na Figura 5, os quais são pequenos furos na linha de distribuição.
- Irrigação por microaspersão: utiliza micro aspersores ou sprays, tais componentes com uma vazão padrão maior que a dos gotejadores, porém pequena em comparação aos outros métodos, a água é distribuída nas partes sombreadas das plantas em forma de aerossol ou jatos finos, este tipo de sistema abrange uma área maior que a irrigação por gotejamento .

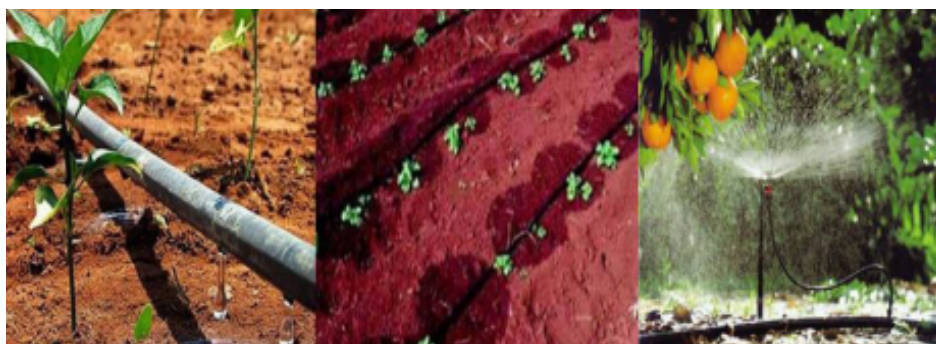
As vantagens do método de irrigação localizada, segundo Nascimento (2022); Lacrete, Silva e Moreira (2024) e Andrade (2024), são:

- Alta eficiência na aplicação de água;
- Fácil automação;
- Diminui o crescimento de ervas daninhas;
- Baixo consumo de energia, ideal para irrigação com maior frequência, ideal por exemplo para solos arenosos;
- Mão de obra diminuta;
- Permite aplicação de fertilizantes com maior facilidade;
- Não influenciada pelo vento e nem pelo terreno, o teor de umidade pode ser mantido alto por longos períodos.

Já as desvantagens do método de irrigação localizada, segundo Nascimento (2022); Lacreta, Silva e Moreira (2024) e Andrade (2024), são:

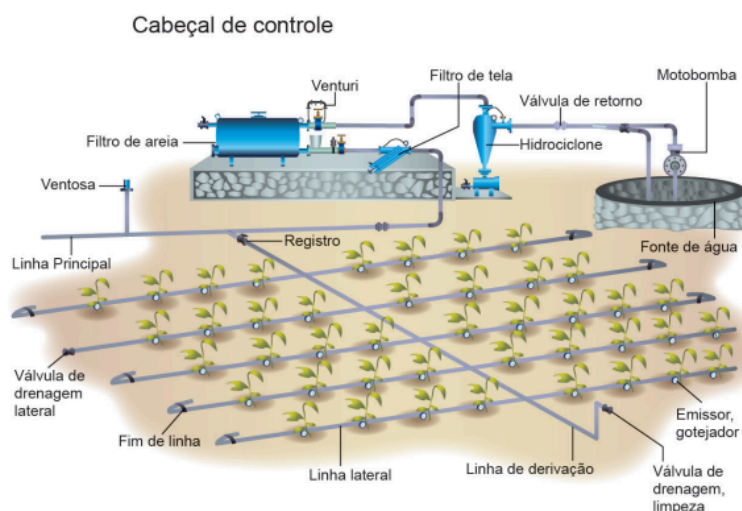
- Custo de implementação alto;
- Exige filtros e controle eficiente;
- Exige manutenção rigorosa;
- Apresenta problemas frequentes de entupimento;
- Redução da vazão com o tempo;
- Dificuldade de se encontrar entupimentos;
- Crescimento radicular da cultura limitado.

Figura 4 - Sistemas de irrigação localizada: gotejamento (esquerda e meio) e microaspersor (direita).



Fonte: RODRIGUES; SOUZA (2018).

Figura 5 - Sistema de irrigação localizada: Esquema com partes.



Fonte: RODRIGUES; SOUZA (2018, p. 120, apud JAIN, 2017).

### 2.1.4 Subsuperfície ou Subterrânea

De acordo com Pour Mohammad e Hajirad (2025) e Nascimento (2022) o método de irrigação por subsuperfície ou subterrânea, apresentado na Figura 6 utiliza meios de aplicação de água por baixo da superfície do solo, diretamente nas raízes das plantas assim como a irrigação localizada, normalmente utilizando o fenômeno de ascensão capilar, que distribui a água ao longo da diferença de potencial presente no solo. Este método é dividido em três sistemas (NASCIMENTO, 2022):

- Elevação do lençol freático: normalmente utilizada onde há camadas de impedimento subsuperficiais, que permite controlar a profundidade do lençol freático, controlando seu nível para próximo das raízes das plantas.
- Gotejamento subterrâneo ou subsuperficial: utiliza-se linhas de gotejamento enterradas a uma profundidade suficiente para suprir as necessidades da estrutura radicular da cultura.
- Mesas de Subirrigação: a água é aplicada diretamente na raiz das plantas como na hidroponia e sistemas de mesas capilares.

As vantagens do método de irrigação subterrânea, segundo Nascimento (2022); Lacrete, Silva e Moreira (2024) e Andrade (2024), são:

- íntegra irrigação e drenagem;
- baixo consumo energético;
- menor evaporação e perda por percolação profunda;
- uniformidade natural em áreas planas;
- sem interferência do vento.

Já as desvantagens do método de irrigação subterrânea, segundo Nascimento (2022); Lacrete, Silva e Moreira (2024) e Andrade (2024), são:

- controle delicado, requer topografia plana;
- custo inicial alto e instalação complexa de drenos;
- difícil aplicação em solos arenosos devido a baixa capilaridade;
- risco de salinização.



Figura 6 - Tipos de sistemas de irrigação subsuperficial e subterrânea: irrigação subsuperficial por elevação do lençol freático (esquerda) e gotejamento subsuperficial (meio) e mesa de capilaridade (direita).



Fonte: TESTEZLAF (2017).

## 2.2 Sistemas de Controle

Agora que conhecemos os principais métodos de irrigação, podemos partir para o estudo dos sistemas de controle, que é essencial para compreender o funcionamento de praticamente todas as tecnologias de automatizadas modernas. Desde o simples termostato de uma residência até os complexos sistemas industriais e robóticos, todos se baseiam nos mesmos princípios fundamentais de controle e regulação.

### 2.2.1 Sistemas de controle: Conceitos e características

Os sistemas de controle constituem uma das áreas mais fundamentais da engenharia moderna, estando presentes em praticamente todos os processos automatizados da atualidade. Em síntese, um sistema de controle é aquele capaz de manipular uma ou mais variáveis de um processo, como: umidade, vazão, tempo, pressão, evaporação, de forma a mantê-las próximas de um valor desejado (AZEREDO, 2024). Essa ação ocorre por meio de uma relação entre um sinal de entrada (comando ou referência) e uma saída (resposta do sistema), que pode ou não ser monitorada continuamente (SANTOS, 2022).

Para descrever um sistema de controle são necessários alguns conceitos relacionados às suas partes, sendo elas: sistema, controle, planta, controlador, referência, erro, transdutor ou sensor, perturbação, ruído, variável de entrada, variável de controle, variável de medida, variável de referência (SANTOS, 2022), (AZEREDO, 2024), (YONEYAMA, 2022), como mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 - Conceitos de Controle

CONCEITO	DESCRIÇÃO
SISTEMA	É a parte do universo que foi isolada para estudo, e é formado por um conjunto de elementos interdependentes organizados que interagem com o ambiente por meio de entradas e saídas.
CONTROLE	Ação que regula e altera o comportamento de algo
PLANTA	Planta ou processo é o sistema a ser controlado, podendo ser composto pela integração de vários subsistemas
CONTROLADOR	Responsável pela aplicação do controle na planta
ERRO	Medida entre o valor de referência e o valor medido pelo transdutor
TRANSDUTOR OU SENSOR	Dispositivo responsável por medir a grandeza física e convertê-la para utilização pelo sistema de controle
PERTURBAÇÃO	Sinal que tende a modificar a variável de saída e não pode ser manipulado pelo controlador
RUÍDO	Sinal indesejado que possui características estocásticas que interfere na medição e variáveis de controle
VARIÁVEL DE ENTRADA	Quantidade que será controlada
VARIÁVEL DE CONTROLE	Quantidade que será variada pelo controlador
VARIÁVEL DE MEDIDA	Quantidade que será resultado do medidor na saída da planta
VARIÁVEL DE REFERÊNCIA	Quantidade que serve como valor comparativo em relação à variável medida

Fonte: Elaborado pelos autores



Já na classificação dos sistemas de controle temos dois tipos: sistemas de malha aberta e sistemas de malha fechada (BAGIO; RODRIGUES, 2023), (SANTOS, 2022), (AZEREDO, 2024). Um sistema de malha aberta é aquele no qual a ação de controle é executada sem que haja medição ou realimentação da variável controlada (a saída não modifica a entrada). Nesse tipo de sistema, o controlador atua apenas com base em informações pré-estabelecidas, sem verificar se o resultado desejado foi realmente atingido (SANTOS, 2022), (AZEREDO, 2024). Isso torna o sistema mais simples e de custo reduzido, porém mais suscetível a erros causados por distúrbios ou variações na planta. Embora útil em condições previsíveis, esse tipo de controle não se adapta automaticamente a mudanças externas.

Já o sistema de malha fechada, em contraste, utiliza a realimentação da variável controlada para ajustar continuamente a variável manipulada. Esse processo de feedback permite que o sistema responda automaticamente a distúrbios e mantenha a variável controlada próxima ao valor de referência (SANTOS, 2022), (AZEREDO, 2024), (BAGIO; RODRIGUES, 2023). O controlador compara o valor medido com o valor desejado e calcula o erro, gerando uma ação corretiva proporcional, integral ou derivativa, conforme o tipo de controle implementado. Em sistemas de irrigação modernos, essa configuração é comum: sensores de umidade enviam dados ao controlador, que decide quando e quanto irrigar, mantendo a umidade ideal para o cultivo como demonstrado em (CHAUHDARY et al., 2023).

### **2.2.2 Sistemas de Controle na Irrigação**

O avanço tecnológico, notadamente nas áreas de eletrônica, sensoriamento e comunicação, tem permitido o desenvolvimento de sistemas cada vez mais sofisticados e acessíveis (LOPEZ-JIMENEZ; WOUWER; QUIJANO, 2022). A integração de microcontroladores, sensores de umidade do solo e plataformas de comunicação remota, como a internet e dispositivos móveis, transforma a maneira como a irrigação é gerenciada, passando de métodos manuais e baseados em calendário para abordagens automatizadas e baseadas em demanda real da cultura (BHAVSAR et al., 2023).

Com base no que já foi apresentado pode-se inferir que a principal aplicação de sistemas de controle na agricultura é a manutenção da umidade do solo dentro de uma faixa ideal para o desenvolvimento da cultura, evitando tanto o estresse hídrico (irrigação

insuficiente) quanto o desperdício de água e a lixiviação de nutrientes (irrigação excessiva) (NASCIMENTO, 2022), (ANDRADE, 2024). Na irrigação os sistemas de controle podem ser classificados de diversas maneiras, sendo as mais comuns: sistemas baseados em tempo e sistemas baseados em sensores. Os sistemas baseados em tempo (programados) são os mais tradicionais, onde a irrigação é acionada em horários e durações pré-determinadas, muitas vezes sem considerar as condições ambientais ou a umidade real do solo. Embora simples, são inerentemente ineficientes, pois não se ajustam às variações climáticas. Já os sistemas baseados em sensores (feedback) representam a evolução do controle, utilizando dados em tempo real de sensores para tomar decisões. Estes sistemas medem parâmetros como a umidade do solo, a tensão da água no solo ou as condições climáticas para determinar o momento e a duração da irrigação (BHAVSAR *et al.*, 2023), (VASCONCELOS, 2024).

Outros estudos também exploram a utilização de plataformas web e dispositivos móveis para o gerenciamento remoto, o que é facilitado pela arquitetura de sistemas embarcados e a comunicação sem fio (BHAVSAR *et al.*, 2023), (VASCONCELOS, 2024). Como abordado anteriormente nos conceitos de controle, é possível afirmar que: a eficácia de um sistema de controle de irrigação depende diretamente da qualidade e da integração de seus componentes. Em síntese, um sistema de controle inteligente na irrigação precisa de constituintes básicos que permitam a sua funcionalidade e eficiência sem a intervenção humana frequente, estes são: Unidades de controle e processamento, sensores (principalmente de umidade do solo) e protocolos de comunicação (CHAUDHARY *et al.*, 2023).

A unidade de controle e processamento é o cérebro do sistema, e é responsável por receber os dados dos sensores em campo, processá-los e acionar os atuadores quando necessário, dentro do grupo de controle e processamento estão os controladores analógicos e controladores digitais: microcontroladores e microprocessadores; Controladores digitais oferecem vantagens significativas sobre os analógicos, incluindo maior precisão, flexibilidade e capacidade de realizar funções de supervisão, como registro de dados e comunicação (FERREIRA, 2020). Entre os digitais, há dispositivos como Arduino, Raspberry Pi ou microcontroladores dedicados que são frequentemente utilizados para implementar a lógica de controle digital (FERREIRA, 2020), (SILVEIRA *et al.*, 2023).

Além da unidade de controle, a utilização de sensores é crucial para aquisição de dados em campo para a tomada de decisão da unidade de controle, a escolha do sensor é fundamental para um funcionamento preciso e eficiente do sistema. Atualmente tem se

utilizado os sensores capacitivos e o método da Reflectometria no domínio do tempo - TDR (Time Domain Reflectometry) que medem diretamente o teor volumétrico de água no solo, sendo amplamente utilizados devido à sua precisão e facilidade de leitura (MENDONÇA *et al.*, 2020).

Para que a água chegue na área a ser irrigada faz-se necessário a utilização de atuadores que controlam a vazão para uma determinada área de interesse, dentre eles estão as bombas e válvulas como já abordado na seção referente aos métodos de irrigação (MENDONÇA *et al.*, 2020). Ademais, faz-se necessário também a utilização de comunicação sem fio, principalmente em áreas remotas e de grande extensão que possuem cobertura de internet, dentre elas, recentemente tem-se utilizado dois tipos principais: Comunicação sem fio em que tecnologias como Wi-Fi, GSM/GPRS, Bluetooth e ZigBee são empregadas para transmitir dados dos sensores para a unidade de controle e enviar comandos de controle remotamente. O uso de Redes de sensores sem fio (RSSF) permite o monitoramento de grandes áreas com menor custo de infraestrutura (CHAUDHARY *et al.*, 2023). Já o segundo tipo sendo a Internet das Coisas (IoT), que tem revolucionado a agricultura, permitindo que os sistemas de irrigação se conectem à internet, coletam grandes volumes de dados e sejam gerenciados por meio de plataformas baseadas em nuvem como apresentado por (BHAVSAR, 2023; LOPEZ-JIMENEZ; WOUWER; QUIJANO, 2022).

Nas últimas décadas, abordagens e métodos de controle avançados vêm sendo utilizados com intuito de maximização da eficiência; há duas vertentes principais que podem ser utilizadas em conjunto para controle, uma é o Controle Baseado em Condições Climáticas e Evapotranspiração e a outra é Inteligência Artificial em conjunto com Lógica Fuzzy (MENDONÇA *et al.*, 2020; BARROSO; INÁCIO; OLIVEIRA, 2022; NOVAK *et al.*, 2025). O controle Baseado em condições climáticas e evapotranspiração considera que além da umidade do solo, a demanda hídrica da cultura é fortemente influenciada pelas condições climáticas, estes sistemas avançados utilizam dados de estações meteorológicas (temperatura, umidade do ar, radiação solar, velocidade do vento).

Além disso, para lidar com a incerteza e a não-linearidade dos processos solo-água-planta, técnicas de inteligência artificial, como a Lógica Fuzzy, têm sido aplicadas (MENDONÇA *et al.*, 2020). O controle Fuzzy permite que o sistema tome decisões baseadas em regras linguísticas (e.g., “se a umidade do solo está baixa e a temperatura está alta, então irrigue por um tempo médio”), imitando o raciocínio humano e proporcionando um controle

mais robusto (BARROSO; INÁCIO; OLIVEIRA, 2022). Outros estudos exploram o uso de redes neurais e algoritmos de aprendizado de máquina para otimizar a programação da irrigação, prevendo a demanda hídrica futura com base em dados históricos e em tempo real (CHAUHDARY *et al.*, 2023).

## 2.3 Redes de Sensores sem Fio (RSSF/WSN - *Wireless Sensor Network*) e IoT

As RSSF, do inglês *Wireless Sensor Networks* (WSN), representam uma tecnologia disruptiva que tem impulsionado o desenvolvimento de aplicações em uma vasta gama de áreas, desde o monitoramento ambiental e de estruturas civis até a automação industrial e monitoramento de temperatura em grandes áreas. O foco desta seção é apresentar os conceitos fundamentais, as características intrínsecas, as topologias utilizadas, os problemas e soluções existentes para os mesmos e a sua aplicação na irrigação.

### 2.3.1 Conceitos, Características e Topologias

As RSSF são redes de dispositivos com a capacidade de observar, monitorar, medir, computar e comunicar características de objetos reais, eventos e fenômenos, e em seguida converter para um meio digital, por meio de conversão analógica-digital (SANTOS, 2023), (ALVES, 2021).

Baseado em Lachowski (2020), Bharathi (2023) e Santos (2023) os principais componentes de uma RSSF são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 - Principais componentes de uma Rede de Sensores Sem Fio.

<b>Nós sensores:</b> São os componentes básicos da rede. Cada nó é um sistema embarcado que integra quatro unidades funcionais: a unidade de sensoriamento (sensores e conversores analógico-digitais), a unidade de processamento (microcontrolador e memória), a unidade de comunicação (transceptor de rádio) e a unidade de energia (bateria).
<b>Nós sorvedouros(sink):</b> Atuam como <i>gateways</i> entre a RSSF e o usuário final. Eles coletam os dados dos nós sensores e os encaminham para um servidor ou estação base, geralmente via protocolo de comunicação escolhido.
<b>Estação base / Central de controle / Ponto de Acesso:</b> É o ponto de coleta e análise dos dados, onde os usuários interagem com a rede para configurar tarefas, processar informações e visualizar os resultados

Fonte: Elaborado pelos autores.

Além disso, as RSSF são um pilar fundamental da Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things* - IoT), atuando como camada de sensoriamento que conecta o mundo físico ao mundo digital (ALHASNAWI; JASIM; ISSA, 2020), (DOMINGUESCHE, 2021). A evolução das RSSF está intimamente ligada à IoT, com o desenvolvimento e utilização de padrões de comunicação de baixa potência e longo alcance como o LoRa (*Long Range*), ZigBee e MQTT (*Message Queue Telemetry Transportation*) (ALHASNAWI; JASIM; ISSA, 2020), (RODRIGUES, 2022), (SANTOS, 2023).

As RSSF possuem características que as distinguem de outras redes sem fio, impondo restrições significativas no projeto de seus protocolos e aplicações, pode-se citar as seguintes características para RSSF (BHARATHI, 2023), (SANTOS, 2023):

Tabela 4 - Características das RSSFs

Características	Descrição
Dependência da aplicação	Os parâmetros de rede (configuração, operação e manutenção) variam de acordo com a aplicação.
Agregação dos dados e cooperação	É a capacidade de uma RSSF agregar e sumarizar os dados ainda dentro da rede, aumentando a eficiência e a precisão, pois cada nodo pode completar as informações do outro.
Mobilidade dos sensores	Os sensores podem se mover ou não, de acordo com o ambiente em que estão colocados.
Autonomia	RSSF normalmente operam em áreas remotas e de difícil acesso, portanto devem operar sem a necessidade de intervenção humana.
Restrições de energia	Localização remota e grande quantidade de nós torna a substituição de baterias inviável.
Fluxo de dados	Uma RSSF dissemina informação para fora da rede, na seguinte sequência: nós sensores, nós sorvedouros e ponto de acesso ou estação base.
Restrições dos dados coletados	Uma entidade de supervisão como os nós sorvedouros, limita o tempo de aquisição de dados pelos nós sensores, limitando a quantidade de informação adquirida em um determinado intervalo de tempo.
Auto-organização, topologia dinâmica e tolerância a falha	Faz-se necessária a utilização de uma estrutura dinâmica e auto organizante para que a rede se mantenha ativa, pois a perda de sensores é inevitável, e as redundâncias podem

	comprometer a fonte de energia dos nós.
Capacidade de responder a consultas	Dependendo da sumarização da rede, grupos de nodos podem ser estabelecidos e responder a seu respectivo nodo sorvedouro, as consultas podem por consequência serem divididas em áreas bem determinadas.

Fonte: Elaborado pelos autores

Já as topologias, segundo Pinheiro (2024), visualizadas na Figura 7, podem ser divididas em: Barramento, Estrela, Árvore, Anel, Malha, Circular e Grade. Cada topologia tem suas particularidades, especialmente no quesito conexão dos componentes da rede, ainda baseado em Pinheiro (2024), ele ranqueia as topologias que possibilitam as RSSF terem um melhor desempenho, em seu trabalho ele apresenta a seguinte sequência: Grade, Circular e Malha, Árvore e Estrela, e por fim Barramento segundo os seguintes critérios de desempenho: caminho, falha de nós, balanceamento de carga, congestionamento, confiabilidade, consumo de energia e tempo de vida da rede, dando notas de 1 a 5 para cada critério.

A topologia de barramento ou topologia linear opera com todos os nós conectados a um único barramento, em redes sem fio os nós seriam conectados a um único canal, com todos os componentes recebendo o mesmo sinal, entre si, causando congestionamento de tráfego e comunicação de sentido único, com esses problemas, essa topologia funciona apenas quando o número de sensores a ser utilizado não é maior que algumas dúzias (PINHEIRO, 2024). Já a topologia em estrela, opera com um nó central sorvedouro, com a capacidade de receber dados de todos os outros nós conectados na rede; nesta topologia os nós sensores não se comunicam entre si, sendo necessário a passagem pelo nó central para fazê-la; O problema desta topologia segundo Pinheiro (2024) é a necessidade do nó central, caso haja falha no mesmo, toda a rede é comprometida.

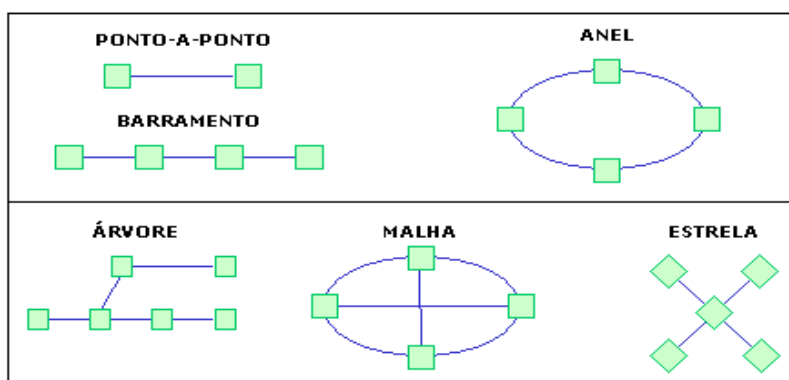
Já na topologia árvore, o caminho de comunicação pode ser de salto único ou múltiplos saltos, sendo crucial encontrar caminhos otimizados para proporcionar mais tempo de vida para a rede e garantir menor latência (PINHEIRO, 2024). A topologia em anel de acordo com Pinheiro (2024), por sua vez, permite que cada nó tenha dois vizinhos, possibilitando comunicação em sentido horário ou anti-horário, possibilitando tanto salto único quanto múltiplos saltos, porém, caso um ou dois nós da rede falharem pode resultar,

respectivamente, em maior latência devido à quebra do anel e divisão do anel em duas partes, podendo comprometer toda a rede.

. A topologia em malha é bastante comum em RSSF devido a sua escalabilidade e facilidade de implementação, além de ter tolerância a falhas, porém é necessário a utilização de algoritmos para evitar a latência em caso de falhas e evitar sobrecarga dos canais de comunicação (PINHEIRO, 2024). Contiguamente, existe também a topologia circular que é construída considerando a lógica da topologia de malha, porém com o sorvedouro no centro e os nós sensores distribuídos no círculo, com os nós podendo comunicar livremente entre si. Essa configuração é eficiente, de fácil implementação e manutenção (PINHEIRO, 2024).

Por fim, temos a topologia em grade, onde a área de monitoramento é separada em vários quadrados, sem sobreposição e de mesmo tamanho, em cada área pode haver vários sensores, porém apenas um que é chamado de nó mestre ou cabeça de grade funciona em um determinado intervalo de tempo, enquanto os outros permanecem em espera e modo economia de energia, propiciando uma extensão do tempo de vida da rede, outros nós da rede podem funcionar como retransmissores e auxiliar o nó mestre, para manter o fluxo de dados para o sorvedouro. Nessa topologia o protocolo de múltiplos saltos é utilizado para manter a rapidez e evitar congestionamento, e apesar de ser complexa no quesito implementação, ainda é a mais utilizada quando se trata de RSSF pois tem alta escalabilidade, alta disponibilidade e alta eficiência (PINHEIRO, 2024).

Figura 7 - Alguns exemplos de topologias de rede



Fonte: TELECO. Redes SDH: Topologias, 2025. Disponível em:

[https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrsdh/pagina\\_3.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrsdh/pagina_3.asp). Acesso em: 8 nov. 2025.

### 2.3.3 Implementação na Irrigação

A implementação de RSSF na irrigação vem se estabelecendo nos últimos anos, em 2020, Cavalcanti, Correia e Brito, apresentaram uma pesquisa com o objetivo de projetar e validar a aplicação de uma RSSF para monitoramento remoto de umidade do solo em plantações de fruticultura irrigada, utilizando comunicação sem fio também no processo de controle da irrigação, com resultados apontando uma robustez alta no modelo proposto para aplicação nas áreas de culturas de fruticultura.

Ainda em 2020, LI *et al.* (2020) apresentam um trabalho de revisão bibliográfica sobre sistemas de irrigação baseados em redes de sensores, que utilizam IoT e sensoriamento remoto. Os autores afirmam que, baseado nos estudos realizados, a agricultura de precisão é um programa sistemático projetado para maximizar a produção da cultura, juntando cuidadosamente medição do solo e gerenciamento de cultura para encontrar as necessidades específicas de cada tipo de cultura preservando a qualidade do ambiente. Além disso, (LI *et al.*, 2020), dão foco na revisão de literatura sobre desenvolvimento de sistemas de irrigação automáticos e RSSF, juntamente com métodos de tomada de decisão e de suporte para a medição de parâmetros no campo da agricultura, e, solucionam o problema de energia das RSSF por meio da utilização de painéis fotovoltaicos.

No ano de 2024, Silva *et al.* (2024) propõem que o monitoramento da variação da umidade do solo é crucial para melhoria da eficiência do uso da água na agricultura, além disso, os autores apresentam o desenvolvimento de uma plataforma digital com integração com RSSF para monitoramento de umidade do solo, utilizando uma variação das RSSF, as Redes de Sensores de Umidade do Solo Sem Fio ou RSUSSF, que monitoram continuamente a umidade do solo, auxiliando na tomada de decisão para manejo da cultura e irrigação. Atualmente, Meriç (2025), propõe a implementação de uma RSSF em um projeto de sistema de irrigação por gotejamento, com um sistema composto principalmente por: válvulas de controle e nós especializados e de monitoramento de umidade do solo, os nós sensores, por sua vez, tem o papel essencial de coleta de dados em tempo real, coletando dados de volume de água, taxa de vazão, pressão do encanamento e principalmente umidade do solo. O autor conclui que as RSSF têm alto potencial de melhoria nas práticas de gerenciamento na agricultura, e conclui também, que, a aquisição de dados em tempo real pelos sensores e as



capacidades de controlar o sistema remotamente, resulta em um sistema integrado que oferece ferramentas para otimização do uso da água e conservação dos reservatórios de água.

## **2.4 Sistemas Embarcados**

Muitos trabalhos abordam a utilização de sistemas embarcados, pois eles apresentam capacidades de realizar tarefas específicas simples e complexas por um baixo custo e fácil implementação (CÂMARA, 2025).

### **2.4.1 Sistemas Embarcados na Agricultura**

Sistemas embarcados, segundo Câmara (2025), é definido como um sistema computadorizado projetado para uma função específica, como controle de um sistema de irrigação inteligente (RAHMOUNA; MOUSSA; MAHDI, 2023) Sistemas embarcados são dispositivos que possuem um sistema que pode ser controlado através de entrada automática de dados ou por meio de interfaces, como teclados, controles remotos e que possuem a capacidade de realizar a conexão entre hardware e software (CÂMARA, 2025).

Algumas características dos sistemas embarcados também são características de RSSF, pois nós sensores e sorvedouros são um tipo de sistema embarcado. As características dos sistemas embarcados são elencadas na Tabela 5:

Tabela 5 - Características dos Sistemas Embarcados

Comportamento determinístico	As interações entre os sistemas embarcados e o ambiente é feita com dispositivos que necessitam de tempos de resposta não variáveis e comunicação em tempo real.
Tolerância a Falhas	Possuem diversos graus de autonomia e redundância, dependendo da aplicação.
Baixo consumo energético	Possuem alta eficiência no uso de energia, para garantir operação por longos períodos
Interface com o usuário	Devido o alto grau de autonomia, a maioria dos circuitos embarcados não precisa de interface com os usuários, pois podem realizar as tarefas automaticamente sem a interferência de um operador
Onipresença nas aplicações	Atualmente, grande parte dos equipamentos possuem algum ou vários sistemas embarcados e estão presentes na vida cotidiana de praticamente todas as pessoas.
Diversos níveis de custo e complexidade	São apresentados em diversos modos de configuração, complexidade e custos; um sistema embarcado, por exemplo, de satélites e foguetes é construído de forma diferente em relação aos utilizados em eletrodomésticos, elevando os custos dos anteriores em relação aos últimos.
Computação de Borda	O processamento de dados é realizado próximo ao ponto de coleta, reduzindo a demanda por comunicação e latência.

Fonte: Elaborado pelos autores, baseado em CÂMARA (2025).

A partir do explanado, alguns trabalhos foram escolhidos para que o leitor possa se guiar no aprendizado a respeito da aplicação de sistemas embarcados na irrigação. Na Tabela 6 são mencionados os trabalhos tratados:

Tabela 6 - Trabalhos que abordam Sistemas Embarcados na Irrigação

Autor(es) e Ano	Título	Assuntos/Contribuições
KARAR <i>et al.</i> (2020)	<i>IoT and Neural Network-Based Water Pumping Control System For Smart Irrigation</i>	Utilização de rede neural e aprendizado de máquina para controle de irrigação
GOMES, ARAÚJO e QUEIROZ (2022)	Germina: Um Sistema Embarcado com Ênfase em Agricultura de Precisão	Desenvolvimento de plataforma para gerenciamento de irrigação
SOUZA, L. (2022)	Potencialidades da Automação no Processo de Irrigação na Agricultura	Revisão literária densa para estudo de automação de irrigação
NETO <i>et al.</i> (2022)	Sistema embarcado de controle de irrigação do solo para plantio	Utilização de Inteligência Artificial
GUIMARÃES, LUCENA e COELHO (2022)	Relato de experiência da linguagem de modelagem SysADL para documentação de sistemas embarcados com Arduino	Apresenta maior detalhamento no quesito de funcionamento de hardware
FILHO (2023)	Dispositivos para Controle Inteligente de Reservatórios de Água e Sistemas de Irrigação via Aplicativo mobile	Projeto focado em pequenas áreas, e com alcance maior, devido ao sensoramento de reservatório
REIS, (2024)	Sistema Embarcado com Câmera Térmica e Processamento de Imagens para Monitoramento da temperatura Foliar de Plantas	Utilização de câmera térmica para cálculo de variáveis da plantação, como por exemplo a evaporação
PEREIRA, G. <i>et al.</i> (2024)	Monitoramento de Plantas com Sistemas Embarcados para Famílias	Sistema de pequeno porte, para jardinagem
KALIDAS <i>et al.</i> (2024)	<i>Intelligent drip irrigation: leveraging embedded systems and sensor networks for realtime monitoring and fault diagnosis</i>	Implementa o diagnóstico de problemas dentro da tomada de decisão

FALCÃO <i>et al.</i> (2024)	Custo de Produção de um Sistema de Irrigação Inteligente com Arduino	Sistema utilizado para pequenas aplicações, porém tem alta escalabilidade devido o baixo custo
OPPONG (2025)	<i>Integration of IoT-based, sprinklers, embedded systems, data and cloud computing for smart irrigation management</i>	Apresenta revisão bibliográfica diversificada, e bem detalhada, ideal para aprofundamento no IoT
CANJA (2025)	Caracterização Experimental de Sensores de Baixo Custo Assistidos por Sistema Embarcado para o uso em Agricultura Sustentável	Utilização de sensores resistivos e capacitivos no estudo, além de sensores de temperatura e umidade relativa
MARTINS (2025)	Sistema de Monitoramento e Irrigação de Baixo Custo Usando Inteligência Artificial e Previsão do Tempo em uma Horta Caseira	Utilização de Inteligência Artificial em conjunto com previsão do tempo para irrigação de hortaliças em pequena área

Fonte: Elaborado pelos autores.

### 2.4.2 Arduíno

A seguir, serão apresentados os principais sistemas embarcados e sensores mais utilizados em projetos de irrigação automatizada e utilizar um procedimento similar ao da Tabela 6 para listar as referências recentes em ordem temporal. As tabelas 7, 8, 9, 10 serão separadas por sistemas embarcados e sensores na sequência: Arduino, ESP32 e ESP8266, Raspberry, sensores de umidade capacitivos e resistivos na irrigação, respectivamente.

Tabela 7 - Trabalhos Utilizando Arduino

Autor(es) e Ano	Título	Arduino utilizado
SIQUEIRA e FERREIRA, (2023)	Sistema de Irrigação Automatizada para Estufas de Cultivo de Tomate Utilizando a Plataforma Arduino	Arduino UNO R3
SILVEIRA <i>et al.</i> (2023)	Controle Automático da Irrigação por Gotejamento em Jardins Verticais Através do Arduino via Sistema Supervisório	Arduino UNO R3
SANTOS <i>et al.</i> (2023)	Controle de Irrigação Inteligente - Arduino	Arduino UNO R3
INOUE, JUNQUEIRA e CARAVIERI (2023)	AGRO4U: Sistema Integrado de Irrigação em Arduino para Agricultura de Precisão	Arduino UNO R3 em conjunto com ESP8266
COSTA e SANTOS (2023)	Sistemas de Gerenciamento de Irrigação Baseado em Arduino para Culturas de Pequeno Porte	Arduino UNO R3
CARVALHO (2023)	Desenvolvimento de um protótipo para Irrigação com o uso da Plataforma Arduino	Arduino UNO R3
CAMPOS e VITÓRIA (2023)	Cultura Maker e Automação para a Agricultura Familiar: Proposta de Irrigação de Baixo Custo com Microcontrolador Arduino	Arduino UNO R3
BRITO e BRANDÃO (2023)	Projeto de Desenvolvimento de Sistema Automatizado e Expansível para Irrigação Rural	Arduino Nano e Arduino Mega
BONFIM, F; TURIN e BONFIM, R. (2023)	Irrigação Automatizada para Cultivo de Morango	Arduino UNO R3
BESCAINO e SANTOS (2023)	SIIA: Sistema de Irrigação Inteligente com Arduino	Arduino UNO R3
AYRES (2024)	Sistema de Irrigação	Arduino UNO R3

	Automatizado de Baixo Custo	
CARR <i>et al.</i> (2024)	Automação de Irrigação por Gotejamento com Arduino Uno: Uma Estratégia para Diminuição de Desperdícios Hídricos e Energéticos	Arduino UNO R3
MARCHI <i>et al.</i> (2024)	Automatização de um Processo de Irrigação Sustentável, Interligado a um Sistema Tecnológico de Sensores de Solo, alimentado por Placas Solares	Arduino UNO R3
SANTOS, FERREIRA e BENTES (2024)	Projeto Arduino de Irrigação Automática: Uma Abordagem Tecnológica para a Gestão Eficiente de Recursos Hídricos	Arduino UNO R3
SOUSA e COQUEIRO (2024)	Estudo de um Protótipo de Irrigação Utilizando o Arduino: Sistema de Automação na Agricultura Familiar	Arduino UNO R3
AMORIM e SANTOS (2025)	AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO NO PLANTIO DE MARACUJÁ: Utilização de Arduino para desenvolver um sistema de irrigação automatizado do plantio de maracujá no sudoeste da Bahia	Arduino Mega 2560
ROMUALDO <i>et al.</i> (2025)	Automação de Irrigação com Arduino no Ensino de Produção de Mudas: Um Projeto de Extensão para Estudantes da Educação Básica	Arduino UNO R3

Fonte: Elaborado pelos autores

Com base nos trabalhos listados, notou-se uma preferência pelo modelo Arduino UNO R3, devido à extensa literatura existente, baixo custo, facilidade de implementação em projetos e facilidade de integração com outras plataformas.

#### 2.4.3 ESP32 e ESP8266

A seguir, na Tabela 8, os principais artigos pesquisados que utilizam ESP32 e ESP8266, considerados no intervalo de 2022 a 2025.

Tabela 8 - Trabalhos Utilizando ESP32 e ESP8266

Autor(es) e Ano	Título	ESP utilizado
RIBEIRO, JUNIOR e MARTINS (2022)	Hortomação: Sistemas de Automação de Horta Utilizado IoT em Parceria com Escola Estadual	ESP32
(ARINGO et al., 2022)	<i>Development of Low-cost Soil Moisture Monitoring System for Efficient Irrigation Water Management of Upland Crops</i>	ESP8266
(BONRUQUE; CELARINO; SOUZA, 2022)	HortaIno: Horta Automatizada de baixo custo com esp8266 para Auxiliar os Produtores Familiares	ESP8266
(BRANDÃO, 2022)	Automação do Monitoramento de Plantas Usando Módulo NodeMCU V3 ESP8266	ESP8266
(MISHRA et al., 2022)	<i>Smart Agriculture Monitoring &amp; Auto Irrigation System using IoT with ESP8266</i>	ESP8266
SILVA (2023)	Solução de Internet das Coisas para Pequenos Agricultores na Região do Vale Jaguaribe	ESP32

ABREU (2023)	Sistema de Irrigação Automatizado para Hortas Verticais	ESP8266
DANGE <i>et al.</i> (2023)	<i>Smart Agriculture Automation using ESP8266 Node MCU</i>	ESP8266
DWIVEDI <i>et al.</i> (2023)	<i>Smart Farming: Monitoring of Field Status and Control of Irrigation Using Sensors and Esp8266 Nodemcu Module</i>	ESP8266
HALIM <i>et al.</i> (2023)	<i>IoT based smart irrigation, control, and monitoring system for chilli plants using NodeMCU-ESP8266</i>	ESP8266
NASCIMENTO (2023)	SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COM AUTOMAÇÃO 4.0: desenvolvimento de um sistema automático de irrigação para plantações voltado para indústria 4.0	ESP8266
PATEL e JOSEPH (2023)	<i>Smart Irrigation using Water Flow Sensor, Soil Moisture Sensor, Temperature Sensor and ESP8266 Arduino Board</i>	ESP8266
RIBEIRO <i>et al.</i> (2024)	Estado da Arte em Construção e Avaliação de Protótipos com Placa Microcontrolada ESP32 LoRa, Aplicados na Área de Monitoramento de Sistemas de Irrigação	ESP32
PINHEIRO <i>et al.</i> (2024)	AGRONET: Um Sistema para Controle e Gerenciamento da Irrigação Utilizando <i>Internet Of Things</i>	ESP8266



OLIVEIRA <i>et al.</i> (2024)	Sistema de Tecnologias para Otimizar a Saúde do Solo	ESP32
MORCHID <i>et al.</i> (2024)	<i>High-technology agriculture system to enhance food security: A concept of smart irrigation system using Internet of Things and cloud computing</i>	ESP32
GURGEL, PRUDÊNCIO (2024)	Modelagem e Arquitetura de um Sistema de Irrigação Automática com ESP32, TypeScript e React	ESP32
FILHO, SILVA e SANTOS (2024)	Implementação de um Sistema de Irrigação Inteligente Utilizando Tecnologias IoT para Gestão Hídrica Sustentável	ESP8266
(SUTIKNO <i>et al.</i> , 2024)	<i>Smart irrigation system using node microcontroller unit ESP8266 and Ubidots cloud platform</i>	ESP8266
PEREIRA, CAMPOS (2025)	Sistema de irrigação inteligente, gerenciado por um Chatbot, para gestão hídrica no contexto agrícola	ESP32
NOVAK <i>et al.</i> (2025)	Sistema de irrigação inteligente baseado em lógica fuzzy integrado com internet das coisas para a cultura do tomate cereja	ESP32
KUNT (2025)	<i>Development of IoT and AI based Smart Irrigation System</i>	ESP32
HASSEBO, MONTES e CABRERA (2025)	<i>Arduino-ESP32 based Smart Irrigation System</i>	ESP32
CRUZ, FERREIRA (2025)	Monitoramento e Controle de Sistemas Hidráulicos Utilizando Sensores de Vazão, Comunicação RF e Interface WEB	ESP32

AMRI, KHAIR e SYARI (2025)	<i>Design and Build an IoT System for Monitoring and Automation of Irrigation in Agriculture</i>	ESP32 CAM
GUIMARÃES e FERREIRA (2025)	Projeto de Automação Residencial para um Jardim Suspenso com Sensores de Temperatura, Umidade do Ar e Umidade do Solo, Controle e Programação para ESP8266	ESP8266
IFEAGWU e OBIAGELI (2025)	<i>Design and Implementation of Smart IoT Based Plant Irrigation System Using NodeMCU ESP8266 Microcontroller and Blynk Interface Technology</i>	ESP8266
TEIXEIRA (2025)	Projeto de Irrigação Automática com Monitoramento Remoto e <i>Energy Harvesting</i>	ESP8266

Fonte: Elaborado pelos autores

Nota-se que a escolha dos sistemas embarcados ESP32 e ESP8266 está conectada diretamente com a IoT, pois estes possuem conexão Wi-Fi nativa, o que possibilita a criação de redes de sistemas embarcados para utilização em projetos de irrigação inteligente.

#### 2.4.4 Raspberry

A seguir, na Tabela 9, os principais artigos que utilizam Raspberry Pi, considerados no intervalo de 2020 a 2025.

Tabela 9 - Trabalhos utilizando Raspberry

Autor(es) e Ano	Título	Modelo de Raspberry utilizado
FERREIRA (2020)	Sistema IoT de Coleta, Armazenamento e Transmissão de Dados em Lisímetros de Lençol	Raspberry Pi

	Freáticos utilizando Raspberry Pi	
BHAI e KUMAR (2020)	<i>Design and Development of Smart Irrigation System Using Raspberry Pi</i>	Raspberry Pi
RACHID (2022)	Desenvolvimento de um Sistema de Irrigação e Monitoria do Campo Agrícola com Base em <i>Internet of Things</i> (IoT)	Raspberry Pi
CASTRO (2024)	Utilização de um Robô Manipulador Móvel para Monitoramento e Regulagem Automática de Gotejadores para Irrigação Localizada	Raspberry Pi
LIYAKAT (2024)	<i>Intelligent Watering System (IWS) for Agricultural Land Utilising Raspberry Pi</i>	Raspberry Pi
MEDEIROS (2025)	Desenvolvimento de um Sistema IoT de Irrigação Automatizada com Raspberry Pi Pico W	Raspberry Pi Pico W

Elaborado pelos autores

Nota-se que a utilização do sistema embarcado Raspberry Pi está conectada diretamente com as aplicações IoT, como os sistemas embarcados ESP32 e ESP8266, porém é menos utilizado pelo custo mais elevado e adição de complexidade na implementação.

#### 2.4.5 Sensores de umidade do solo (Capacitivos e Resistivos)

A seguir, na Tabela 10, os principais artigos que utilizam os sensores de umidade do solo, tanto capacitivos, quanto resistivos, considerados no intervalo de 2020 a 2025.

Tabela 10 - Trabalhos utilizando sensores de umidade do solo capacitivos e resistivos, calibração de sensores e aplicação na irrigação.

Autor(es) e Ano	Título	Tipo de sensor utilizado
JONG <i>et al.</i> (2020)	<i>Monitoring Soil Moisture Dynamics Using Electrical Resistivity Tomography under Homogeneous Field Conditions</i>	Sensor de umidade resistivo
JUSOH, ZUHARIMAN e MUTTALIB (2020)	<i>Efficacy of Arduino based low-cost Resistive Sensor in Evaluating Soil Moisture from different Soil types Collected in the Kelantan-Terengganu plain of Malaysia</i>	Sensor de umidade resistivo
SENA <i>et al.</i> (2020)	Calibração do Sensor Capacitivo de Umidade do Solo EC-5 em Resposta a Granulometria do Solo	Sensor de umidade do solo capacitivo
HARDIE (2020)	<i>Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture</i>	Revisão bibliográfica tratando tanto de sensores de umidade do solo capacitivos, quanto resistivo, além de trabalhar outros métodos
NIÑO <i>et al.</i> (2020)	<i>Analysis of the Variability in Soil Moisture Measurements by Capacitance Sensors in a Drip-Irrigated Orchard</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
SILVA (2021)	Análise da Hidrodinâmica com Sensores Capacitivo e Resistivo de Arduino em Solo do Cerrado	Sensores de umidade do solo capacitivo e resistivo
OKASHA <i>et al.</i> (2021)	<i>Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Monitoring Unit Operated by Solar Cells for Greenhouse Irrigation Management</i>	Sensores de umidade do solo capacitivo
YU <i>et al.</i> (2021)	<i>Review of Research Progress</i>	Revisão bibliográfica

	<i>on Soil Moisture Sensor Technology</i>	trabalhando tanto sensores de umidade do solo resistivos e capacitivos
KANDWAL <i>et al.</i> (2021)	Development and Analysis of Novel IoT Based Resistive Soil Moisture Sensor using Arduino UNO	Sensor de umidade do solo resistivo
MENDES <i>et al.</i> (2021)	Calibração de Sonda de Baixo Custo para Monitorar Umidade em Substrato Comercial	Sensor de umidade do solo resistivo
LEÃO <i>et al.</i> (2021)	Avaliação e Calibração de Sensores de Monitoramento da Umidade Superficial do Solo	Sensor de umidade do solo resistivo
KULMÁNY <i>et al.</i> (2022)	<i>Calibration of an Arduino-based Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensor for Smart Agriculture</i>	Calibração de sensor de umidade do solo capacitivo
PEREIRA, SANDRI e JÚNIOR (2022)	<i>Evaluation of Low-Cost Capacitive Moisture Sensors in Types of Soils in the Cerrado, Brazil</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
SARMPHIM <i>et al.</i> (2022)	<i>IoT Based Soil Moisture Management Using Capacitive Sensor and User-Friendly Smartphone Application</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
SANTOS, C. <i>et al.</i> (2022)	<i>Performance of the Capacitive Moisture Sensor Under Different Saline Conditions</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
CHOWDHURY, SEN e JANARDHANAN (2022)	<i>Comparative Analysis and Calibration of Low Cost Resistive and Capacitive Soil Moisture Sensor</i>	Sensores de umidade do solo capacitivo e resistivo
SILVA, SOUZA e PESSOA (2022)	Calibração de Sensores Capacitivos para a	Sensor de umidade do solo capacitivo

	Estimativa da Umidade do Solo	
RASHEED <i>et al.</i> (2022)	<i>Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review</i>	Revisão bibliográfica tratando tanto de sensores de umidade do solo capacitivos, quanto resistivo, além de trabalhar outros métodos
SANTOS <i>et al.</i> (2023)	Efeito da Salinidade do Solo nas Leituras de Umidade Realizadas com Sensor Resistivo	Sensor de umidade do solo resistivo
MAJUMDER <i>et al.</i> (2023)	<i>Assessing Low-cost Capacitive Soil Moisture Sensors: Accurate, Affordable, and IoT-ready Solutions for Soil Moisture Monitoring</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
RODRIGUES (2023)	Transdutor de Umidade do Solo Usando a Técnica Capacitiva em Altas Frequências	Sensor de umidade do solo capacitivo de alta frequência
SCHWAMBACK <i>et al.</i> (2023)	<i>Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: Trade-Off between Cost and Accuracy</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
PUHL <i>et al.</i> (2023)	Sensores Capacitivos e Resistivos de Umidade do Solo	Sensores de umidade do solo capacitivos e resistivos
BORGES (2024)	Protótipo de Sensor de Umidade do Solo de Baixo Custo	Sensores de umidade do solo capacitivos e resistivos
SANT'ANNA (2024)	Desenvolvimento e Aplicação de Sistemas de Baixo Custo Baseados em Sensores Capacitivos para Monitoramento da Umidade do Solo em Vinhas do Alto Douro	Sensor de umidade do solo capacitivo
NANDI e SHRESTHA (2024)	<i>Assessment of Low-Cost and Higher-End Soil Moisture Sensors</i>	Sensores de umidade do solo capacitivos e resistivos

	<i>across Various Moisture Ranges and Soil Textures</i>	
FERNANDES <i>et al.</i> (2024)	Avaliação e Calibração do Sensor de Umidade do Solo YL-69 de Baixo Custo em Três Texturas de Solo	Sensores de umidade do solo resistivos
CUNHA e PEREIRA (2024)	Calibração de Sensor Resistivo de Umidade Superficial de Solo Wi-Fi sob Diferentes Solos Irrigados por Gotejamento por Pulsos	Sensor de umidade do solo resistivos
GÜMÜSER, PICHLHÖFER e KORJENIC (2025)	<i>A Comparison of Capacitive Soil Moisture Sensors in Different Substrates for Use in Irrigation Systems</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
KUMAR <i>et al.</i> (2025)	<i>Assessing Capacitance Soil Moisture Sensors for Precision Irrigation Scheduling in Wheat Crop</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
MARGIWIYATNO <i>et al.</i> (2025)	<i>Use of Capacitive Sensors for Measuring Soil Water Content in Irrigation Systems: A Review</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
RAHEJA <i>et al.</i> (2025)	<i>Designing and Field Calibration of Low-Cost Microcontroller-based Soil Moisture Sensor for Subsurface Drip-Irrigation System</i>	Sensor de umidade do solo capacitivo
SOUSA <i>et al.</i> (2025)	Comparação de Sensores de Umidade Utilizando Microcontrolador Arduino em Solo de Textura Franco Arenosa	Sensores de umidade do solo capacitivos e resistivos

Fonte: Elaborado pelos autores.

De modo geral, os estudos listados indicam que a adoção de sistemas de irrigação com apoio de sistemas embarcados com complexidade baixa, e baixo custo como: Arduino, ESP32, ESP8266, Raspberry Pi, estão em alta de utilização em tais projetos, apresentando um grande volume de referências nos últimos cinco anos, além disso, a literatura existente a respeito de sensores é bastante vasta, e tem foco em sensores de umidade do solo, tanto capacitivos, quanto resistivos, devido ao seu baixo custo e calibração relativamente fácil.



### **3. METODOLOGIA**

A metodologia deste trabalho descreve de forma detalhada as ferramentas, procedimentos e critérios utilizados para alcançar os objetivos propostos. Nessa seção, são apresentados o tipo de pesquisa adotado, o delineamento do estudo, os métodos de coleta e análise dos dados, bem como os critérios utilizados para a seleção das fontes e materiais. A escolha dessa abordagem visa garantir a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos, assegurando que o processo de investigação seja conduzido de maneira sistemática, coerente e alinhada aos propósitos do estudo.

#### **3.1 Metodologia de Pesquisa**

A presente pesquisa caracteriza-se como o desenvolvimento de um protótipo de sistema de irrigação inteligente, tendo como objetivo reunir, analisar, discutir e listar produções científicas relevantes sobre o tema proposto e logo após realizar a construção do protótipo baseado nas análises. Tendo foco em pesquisas relacionadas à parte mais conceitual do desenvolvimento de sistemas inteligentes de irrigação, abordando os conceitos pertinentes a irrigação, sistemas de controle, redes de sensores sem fio e sistemas embarcados. Como também, foco no desenvolvimento de um protótipo de irrigação inteligente

Após a escolha do tema, delimitação do escopo do estudo e da sequência de abordagem dos temas no referencial teórico, o próximo passo é a escolha das ferramentas a serem utilizadas para tornar a pesquisa mais eficiente, nessa etapa foram escolhidas ferramentas que tem uma base de dados atual. Para a realização das pesquisas foram utilizadas as seguintes plataformas apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11 - Bases de dados/Fontes de dados

Plataforma	Tipo
Google Scholar/Acadêmico	Navegador para pesquisa acadêmica
SciELO	Base de dados
Periódicos Acadêmicos	Base de dados
Repositórios de Teses e Dissertações e Anais de Congressos	Base de dados

Fonte: Elaborado pelos autores

Também foram utilizadas palavras-chave e combinações de palavras chave, como pode-se ver na Tabela 12:

Tabela 12 - Palavras-chave e combinações de palavras-chave utilizadas

Irrigação	Irrigação, métodos de irrigação, irrigação por aspersão, irrigação livros, irrigação localizada, irrigação por superfície, irrigação por subsuperfície, sistemas de irrigação	<i>Irrigation, irrigation methods, sprinkler irrigation, irrigation systems, localized irrigation, surface irrigation, subsurface irrigation, irrigation systems</i>
Sistemas de Controle	Sistemas de controle, Sistemas de controle na Irrigação, sistema de controle de malha fechada, sistemas de controle de malha aberta, sistema de controle livros	<i>Control systems, Control systems in irrigation, closed-loop control systems, open-loop control systems, control systems books</i>
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio, Topologias de Redes de Sensores Sem Fio, Redes de Sensores Sem Fio e Irrigação, Redes de Sensores Sem Fio e IoT	<i>Wireless Sensor Networks, Wireless Sensor Network Topologies, Wireless Sensor Networks and Irrigation, Wireless Sensor Networks and IoT</i>

Sistemas Embarcados	Sistemas Embarcados, Sistemas Embarcados na Irrigação, Arduino e irrigação, ESP32 e irrigação, ESP8266 e irrigação, Raspberry Pi e irrigação, Sistemas Embarcados e IoT, IoT e Irrigação, Sistemas embarcados livros	<i>Embedded Systems, Embedded Systems in Irrigation, Arduino and Irrigation, ESP32 and Irrigation, ESP8266 and Irrigation, Raspberry Pi and Irrigation, Embedded Systems and IoT, IoT and Irrigation, Embedded Systems books</i>
---------------------	--	--

Fonte: Elaborado pelos autores

Além das palavras-chave apresentadas, foi utilizado o condicional “e” para pesquisa direcionada, como por exemplo em: Arduino e irrigação, ESP32 e irrigação, ESP8266 e irrigação, Raspberry Pi e irrigação, diminuindo o escopo da pesquisa para algo mais estreito e direto.

Foram considerados artigos, dissertações e livros publicados entre 2020 e 2025, escritos em língua portuguesa e língua inglesa, que abordassem os assuntos relacionados ao tema proposto. Os critérios de inclusão envolveram: relevância temática, abordagens conceituais, consistência metodológica e atualidade, já os critérios de exclusão envolveram: ausência de relação com o tema e falta de acesso ao texto(recorrente). Após a seleção, as obras foram analisadas por meio de leitura exploratória, interpretativa e dinâmica, buscando identificar contribuições, lacunas e convergências entre os autores.

### 3.2 Etapa Experimental - Construção de Protótipo

A etapa teórica permitiu identificar as principais tecnologias, sensores, controladores e plataformas de monitoramento empregadas em sistemas modernos de irrigação. Com base na etapa teórica, foi desenvolvido um modelo físico de controle automatizado, capaz de gerenciar duas zonas de irrigação de forma independente, monitorando a umidade do solo e acionando válvulas e bombas conforme a necessidade detectada. Essa etapa teve caráter exploratório e demonstrativo.

O protótipo foi desenvolvido utilizando os componentes listados na Tabela 13, seguindo os princípios presentes na literatura referente ao tema.

Tabela 13 - Materiais utilizados para desenvolvimento do protótipo

Categoria	Componente/ Ferramenta	Descrição e função principal
Unidade de controle	ESP32 DevKit V1	Microcontrolador com Wi-Fi integrado; leitura dos sensores e controle dos atuadores.
Sensores	6 sensores resistivos de umidade do solo	Medição da umidade em duas zonas (três sensores por zona).
Atuadores	2 válvulas solenoides 12V e 1 bomba 12V	Executam a irrigação conforme o comando do ESP32.
Interface de potência	3 módulos de relé 3V	Isolam o circuito lógico do circuito de carga.
Protótipo e conexões	Protoboard e jumpers	Permitem a montagem e interligação dos componentes.
Fonte de alimentação	Fonte Chaveada 12V / 10A	Alimenta a bomba e as válvulas solenoides.
Software de controle IoT	Aplicativo e servidor Blynk	Interface de monitoramento e comando via internet.
Ambiente de programação	Arduino IDE	Plataforma utilizada para codificação e upload do firmware no ESP32.

Fonte: Elaborado pelos autores

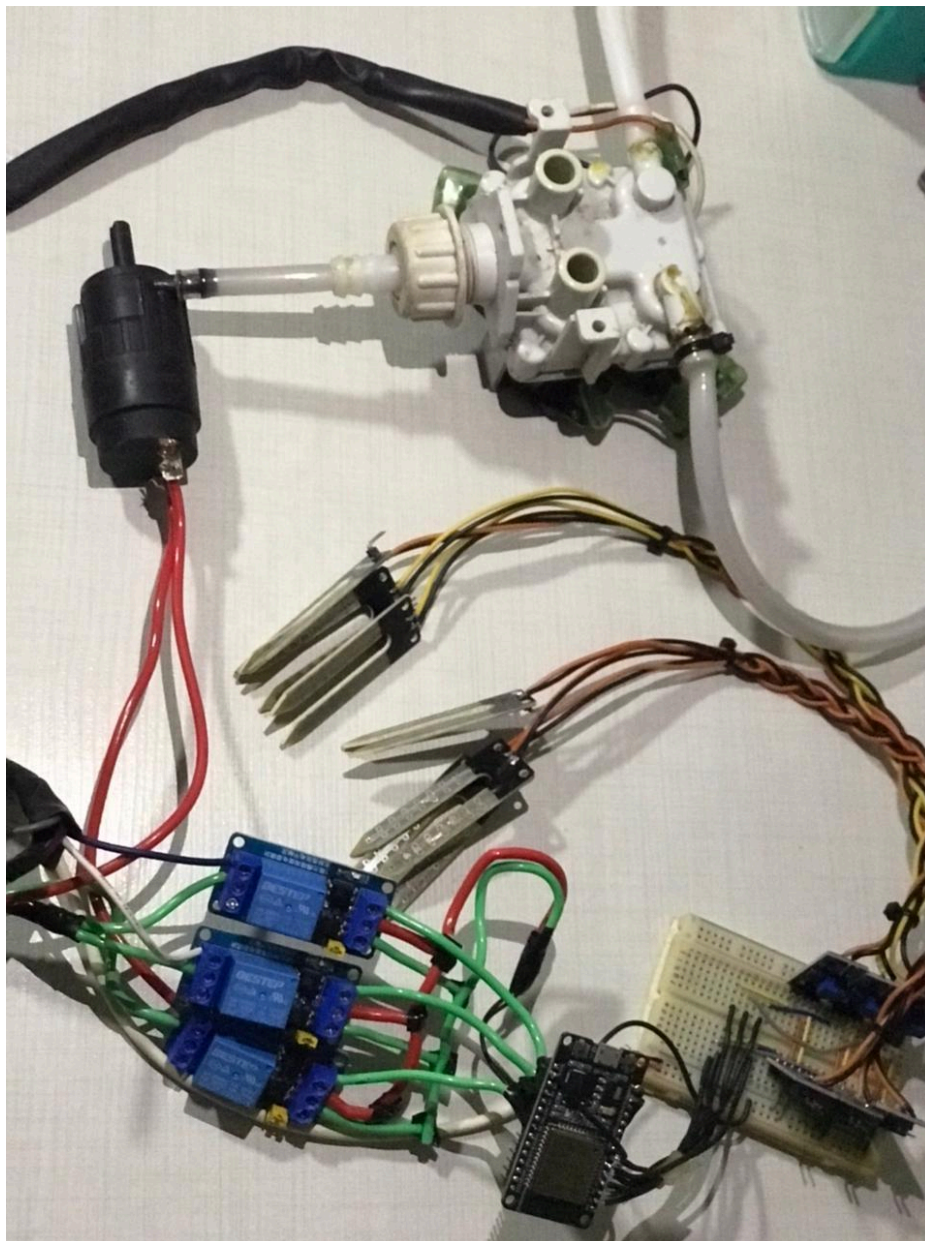
O método escolhido justifica-se pela sua relevância prática e aplicabilidade tanto na agricultura de precisão como em hortas de pequeno porte, possibilitando o uso eficiente de recursos hídricos e a redução da intervenção humana no manejo da irrigação. O processo de desenvolvimento do sistema foi dividido em cinco etapas, que podem ser consultadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Etapas de desenvolvimento do sistema experimental

Etapas	Descrição
Planejamento e Revisão Bibliográfica	Análise de referências técnicas e definição da arquitetura do sistema
Montagem do Hardware	Conexão dos componentes em <i>protoboard</i> e configuração do ESP32
Desenvolvimento do Software e Integração	Desenvolvimento do código na Arduino IDE e configuração da plataforma Blynk
Testes e Ajustes	Calibração dos sensores e validação da sequência segura de acionamentos
Validação e Demonstração	Monitoramento via aplicativo Blynk e análise de desempenho

Fonte: Elaborado pelos autores

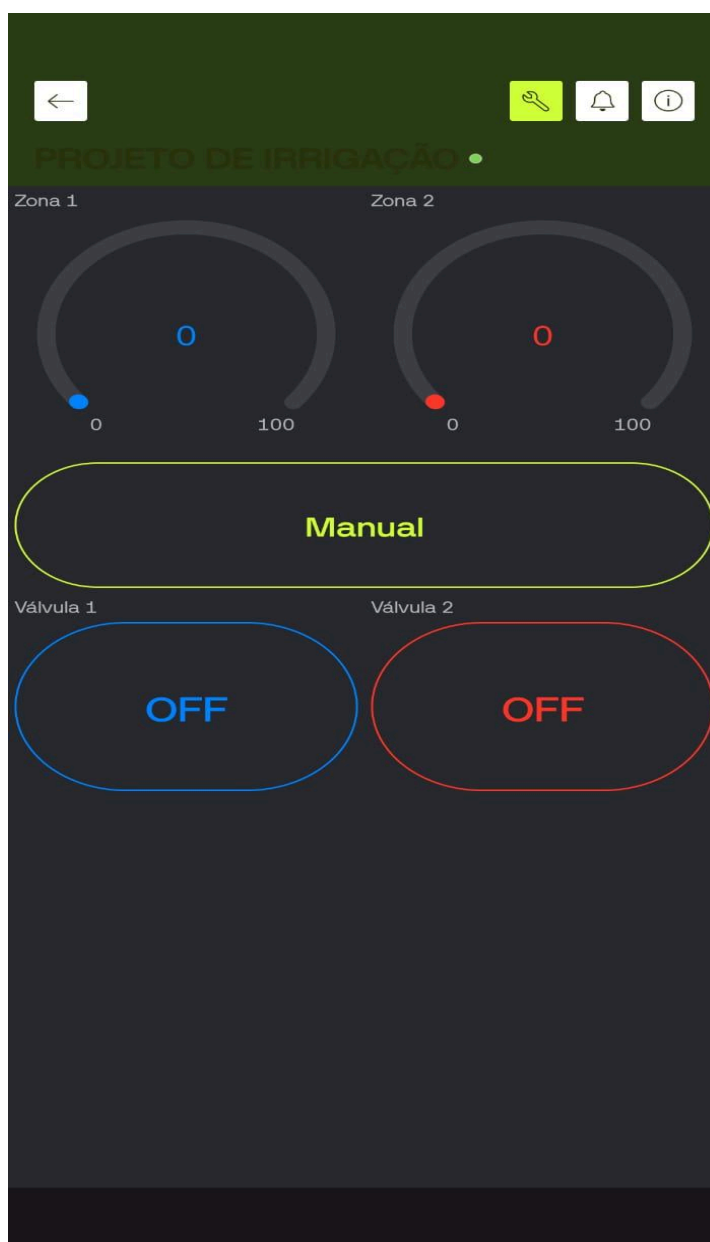
Figura 8 - Sistema de irrigação automático pronto



Fonte: Elaborado pelos autores

O sistema foi configurado para operar em duas zonas de irrigação independentes, cada uma monitorada por três sensores de umidade. O ESP32 realiza a leitura periódica das entradas analógicas e calcula a média percentual de umidade de cada zona. A comunicação entre os módulos ocorre via rede Wi-Fi local, utilizando o protocolo TCP/IP para integração com o servidor Blynk. Já o aplicativo, acessado pelo site Blynk.cloud ou app móvel, exibe em tempo real as leituras dos sensores (pode ser visualizado na Figura 9) e permite o acionamento manual dos relés.

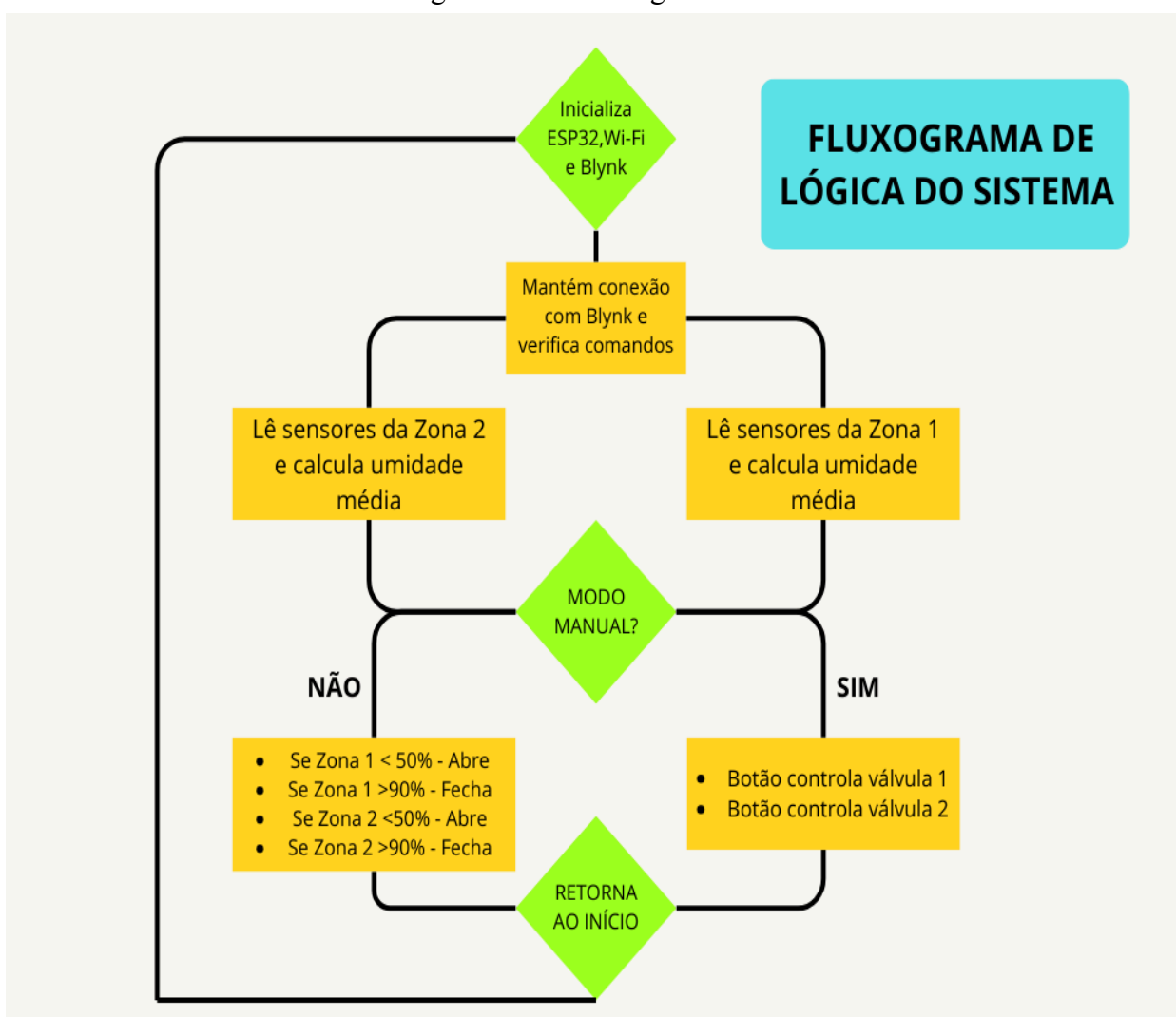
Figura 9 - Sistema de irrigação automático funcionando: Plataforma Blynk



Fonte: Elaborado pelos autores

Enquanto a lógica de controle implementada garante a sequência operacional segura: a válvula abre logo em seguida a bomba é acionada. No desligamento, a bomba desliga primeiro após, a válvula é fechada. Este procedimento evita o aumento de pressão na tubulação. Em caso de uso manual via Blynk, o sistema retorna ao modo automático após mudança do estado do botão via aplicativo. O fluxo lógico do sistema pode ser consultado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxo lógico do sistema



Fonte: Elaborado pelos autores



A partir daí, os testes foram realizados em ambiente controlado, simulando condições de solo seco e úmido para ambas as zonas. As leituras dos sensores foram calibradas para definir os limites de umidade (seco e úmido), o que assegura a coerência dos valores obtidos. A análise de desempenho contemplou o tempo de resposta entre leitura e acionamento, a estabilidade da comunicação Wi-Fi, a confiabilidade da integração com o aplicativo Blynk e a precisão das leituras. Os resultados confirmaram o funcionamento estável e a eficiência do sistema.

### 3.3 Trechos chave do código

```
float converterUmidade(float leituraADC, Calibracao calib) {
    float pct = 100.0 * (calib.seco - leituraADC) / (calib.seco - calib.umido);
    return constrain(pct, 0.0, 100.0);
}
```

O primeiro trecho apresentado corresponde à função responsável por transformar a leitura bruta dos sensores em uma porcentagem de umidade. Como os sensores operam com valores analógicos entre 0 e 4095, o código aplica uma regra de calibração — previamente definida para cada sensor — e converte esses valores em uma escala compreensível (0% a 100%). Dessa forma, as decisões de irrigação se baseiam em métricas reais e padronizadas.

```
float lerMediaZona(const int sensores[], Calibracao calib[], int quantidade) {
    float soma = 0;
    for (int i = 0; i < quantidade; i++) {
        int leitura = analogRead(sensores[i]);
        float umid = converterUmidade(leitura, calib[i]);
        soma += umid;
    }
    return soma / quantidade;
}
```

Cada zona de irrigação possui três sensores, e para evitar decisões baseadas em leituras isoladas ou distorcidas, o sistema faz uma média entre todos eles. O código percorre cada sensor, converte sua leitura em porcentagem e calcula uma média final. Esse processo aumenta a confiabilidade das decisões automáticas e reduz a influência de ruídos ou variações pontuais.

```

if (umidadeZona1 < 50) {
    digitalWrite(VALVULA1, HIGH);
} else if (umidadeZona1 > 90) {
    digitalWrite(VALVULA1, LOW);
}

```

```

if (umidadeZona2 < 50) {
    digitalWrite(VALVULA2, HIGH);
} else if (umidadeZona2 > 90) {
    digitalWrite(VALVULA2, LOW);
}

```

A lógica principal do sistema automático também foi apresentada. Ela segue dois limites definidos no projeto, quando a umidade cai abaixo de 50%, a válvula da respectiva zona é aberta, quando a umidade ultrapassa 90%, a válvula é fechada. Esses dois limites formam uma zona segura de operação, impedindo tanto a falta quanto o excesso de água. Essa lógica de “liga/desliga” é simples, eficiente e adequada para culturas que não exigem alta precisão hídrica.

```

if (zona1_aberta || zona2_aberta) {
    digitalWrite(BOMBA, HIGH);
} else {
    digitalWrite(BOMBA, LOW);
}

```

Outro trecho essencial é o controle da bomba. Ela só é acionada quando ao menos uma das válvulas está aberta. Isso evita o funcionamento desnecessário da bomba, reduz o consumo de energia e prolonga a vida útil do sistema hidráulico. Caso nenhuma das zonas necessite de irrigação, a bomba é desligada automaticamente.

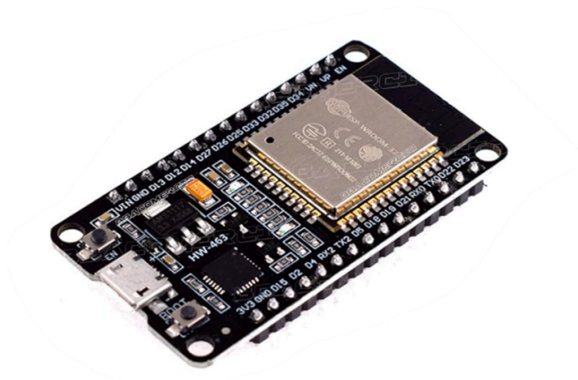
```

BLYNK_WRITE(V3) {
    if (!modoAutomatico) {
        int estado = param.asInt();
        digitalWrite(VALVULA1, estado ? HIGH : LOW);
    }
}

```

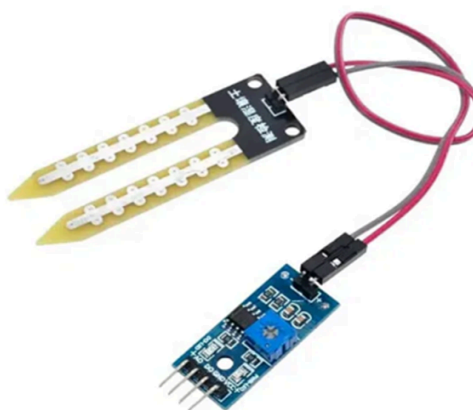
O sistema também permite controle manual diretamente pelo smartphone. O trecho escolhido exemplifica o comando responsável por abrir ou fechar a válvula da Zona 1 quando o modo manual está ativo. Esse recurso garante ao usuário a possibilidade de intervir no sistema quando desejar, mesmo que as condições automáticas não exijam irrigação naquele momento.

Figura 11 - ESP32



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 12 - Sensor de Umidade Resistivo



Fonte: Elaborado pelos autores

Por fim, conclui-se que a metodologia aplicada se mostrou eficaz para o desenvolvimento de um sistema de irrigação inteligente de baixo custo e alta confiabilidade. A integração entre o ESP32, que pode ser visualizado na Figura 11, sensores de umidade, que podem ser visualizados na Figura 12, atuadores controlados por relés e o aplicativo Blynk permitiu a criação de uma solução prática e escalável para monitoramento e controle de irrigação em tempo real. A combinação de pesquisa sistemática e prototipagem experimental garantiu o embasamento teórico e a validação prática, reforçando o potencial do método proposto para aplicações em automação agrícola e gestão sustentável de recursos hídricos.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a construção, calibração e testes do protótipo de irrigação inteligente desenvolvido neste trabalho. As etapas experimentais permitiram observar, de maneira prática, o desempenho do sistema diante das variações de umidade do solo, bem como a eficiência dos sensores, atuadores e algoritmos de controle empregados.

### **4.1 Funcionamento Geral do Sistema**

O sistema desenvolvido demonstrou capacidade de monitorar continuamente a umidade do solo nas duas zonas de irrigação, realizando leituras periódicas conforme definido no código. A média das leituras de cada conjunto de sensores foi calculada de forma estável, permitindo que o ESP32 interpretasse corretamente a condição hídrica do solo. A integração ao aplicativo Blynk possibilitou acompanhar, em tempo real, os valores de umidade, o modo de operação ativo e o estado das válvulas e da bomba. O protótipo respondeu de maneira coerente aos comandos remotos, alternando entre os modos automático e manual sem interrupções ou atrasos perceptíveis, o que valida a viabilidade do monitoramento remoto e do controle centralizado.

### **4.2 Desempenho da Irrigação Automática**

A lógica implementada, ligar a irrigação quando os valores estivessem abaixo de 50% e desligar acima de 90%, apresentou comportamento consistente durante os testes. Em situações de baixa umidade, o sistema aciona automaticamente as válvulas correspondentes e, simultaneamente, a bomba de água, garantindo irrigação direcionada apenas às zonas que necessitavam. Quando os níveis atingiram a faixa superior, o sistema desativou a irrigação, evitando excesso hídrico. Esse ciclo automático mostrou-se eficiente, permitindo que cada área recebesse apenas a quantidade necessária de água. O mecanismo de decisão, baseado na média dos sensores, contribuiu para evitar flutuações instantâneas, conferindo maior equilíbrio ao processo.

### 4.3 Estabilidade do Sistema

A estabilidade geral do protótipo foi favorecida tanto pela estrutura do código quanto pelos recursos do ESP32. O intervalo de leitura predefinido e o uso do *watchdog timer* evitaram travamentos e reinicializações indevidas, garantindo funcionamento contínuo. A comunicação via Wi-Fi manteve-se estável durante os testes, permitindo envio regular de dados ao Blynk. Mesmo com múltiplos ciclos de irrigação, o sistema não apresentou instabilidades nos pinos de saída, e a alternância entre os modos manual e automático ocorreu sem conflitos. Essa estabilidade operacional indica que o sistema possui capacidade de operar por longos períodos sem intervenção direta.

### 4.4 Precisão e Limitações do Sensor

Os sensores de umidade empregados apresentaram precisão satisfatória para o propósito do projeto, respondendo de forma proporcional à variação da umidade no solo. Contudo, algumas limitações foram observadas. Por se tratarem de sensores resistivos, alterações no tipo de solo, compactação, salinidade e temperatura podem influenciar as leituras. Também foi perceptível que leituras isoladas exibem pequenas oscilações, o que justifica o uso da média entre três sensores por zona. Embora não comprometam o funcionamento geral, essas limitações devem ser consideradas em cenários mais exigentes ou que demandem dados com maior precisão técnica.

### 4.5 Robustez do Sistema

O sistema demonstrou robustez adequada para um protótipo, conseguindo operar com múltiplos componentes como sensores, válvulas, bomba e módulo Wi-Fi, sem perda de desempenho. A lógica implementada no código impediu acionamentos indevidos e evitou conflitos entre as zonas. O controle independente das válvulas, associado ao acionamento automático da bomba apenas quando necessário, otimizou o uso dos componentes e reduziu o risco de sobrecarga. A robustez também foi evidenciada pela capacidade de suportar variações momentâneas nas leituras sem provocar comportamento instável. Embora ainda se trate de um protótipo, a arquitetura adotada demonstrou potencial para aplicações reais de pequeno porte.

#### **4.6 Discussão Geral dos Resultados**

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram que a proposta de desenvolver um sistema inteligente de irrigação com ESP32, sensores de umidade e integração via Blynk é viável e apresenta desempenho satisfatório. O protótipo conseguiu unir automação, tomada de decisão baseada em dados e monitoramento remoto, características essenciais em soluções modernas para otimização do uso de recursos hídricos. Apesar das limitações naturais de sensores resistivos e da dependência da conectividade Wi-Fi, o sistema cumpriu os objetivos da pesquisa e mostrou potencial para evoluções futuras, como aprimoramento da precisão de sensoriamento, aumento da autonomia energética e integração com algoritmos avançados a aplicação de tecnologias acessíveis pode viabilizar soluções eficientes para o manejo hídrico em ambientes residenciais, educacionais e experimentais.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento e a prototipagem de um sistema de irrigação inteligente capaz de monitorar as condições do solo e acionar a irrigação de forma automatizada, utilizando sensores de umidade resistivos, um sistema embarcado ESP32 e atuadores. Diferentemente de uma pesquisa estritamente bibliográfica, a revisão da literatura cumpriu aqui a função de embasar teoricamente o processo de construção, oferecendo o suporte conceitual necessário para justificar a construção do sistema de irrigação inteligente.

Com base nos conceitos estudados, incluindo sistemas de controle, redes de sensores, sistemas embarcados e princípios gerais da irrigação, foi possível projetar um sistema funcional e de fácil implementação. Os testes realizados demonstraram que o protótipo apresentou comportamento coerente com o esperado: houve resposta eficiente às variações de umidade, baixo consumo energético e estabilidade satisfatória do microcontrolador durante o acionamento da bomba de irrigação. Esses resultados mostram que soluções tecnológicas simples e acessíveis podem fornecer um desempenho adequado para sistemas de irrigação de pequeno porte.

A construção do protótipo também permitiu identificar limitações práticas que não aparecem de forma explícita na literatura, como a sensibilidade real dos sensores em condições ambientais variáveis e a necessidade de calibração e manutenção periódica. Esses aspectos evidenciam que, apesar da robustez teórica das obras consultadas, a implementação prática ainda exige ajustes, validação de parâmetros e adaptações ao ambiente físico onde o sistema é instalado.

Além disso, verificou-se que a integração entre componentes de baixa potência é viável, porém depende de uma abordagem criteriosa de projeto, especialmente no que diz respeito ao gerenciamento de energia, proteção elétrica e confiabilidade da comunicação entre módulos. Assim, os resultados práticos reforçam a importância de unir teoria e aplicação, uma vez que o comportamento real do sistema complementa e até corrige entendimentos abstratos obtidos apenas por meio do referencial teórico.

Em síntese, o trabalho cumpriu seu objetivo ao demonstrar a construção e operação de um sistema prototipado de irrigação inteligente, validando os conceitos estudados e evidenciando sua aplicabilidade em soluções para agricultura de precisão. Com base nos

resultados obtidos e nas limitações observadas, recomenda-se que pesquisas futuras considerem:

- Integração com redes de sensores sem fio (RSSF);
- Utilizar sensores capacitivos;
- Substituir a leitura direta no microcontrolador por nós distribuídos;
- Avaliar protocolos de baixa energia (LoRa, ZigBee, BLE Mesh);
- Controle preditivo baseado em IA ou lógica fuzzy;
- Otimização da irrigação com dados meteorológicos e históricos;
- Implementar controle por setores, controlando mais de duas zonas;
- Comparar consumo hídrico entre diferentes estratégias;
- Alimentação solar com gerenciamento energético inteligente;
- Redução do consumo dos sensores e microcontrolador;
- Avaliar desgaste dos sensores;
- Verificar a precisão após meses de operação;
- Caixa hermética, cabos adequados e proteção contra intempéries;
- Monitoramento remoto via MQTT ou LoRaWAN;
- Armazenamento de dados e alertas automatizados.



## 6. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, G. da S. G. de. **Tecnologia de irrigação: vantagens, impactos e principais métodos**. 2024. 25 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Agroecologia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Barreiros, Barreiros, 2024.
- AMRI, K.; KHAIR, H.; SYARI, M. A. **Design and build an IoT system for monitoring and automation of irrigation in agriculture**. Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (JAIEA), v. 5, n. 1, 15 out. 2025.
- SANT'ANNA, P. C. G. **Desenvolvimento e Aplicação de Sistemas de Baixo Custo Baseados em Sensores Capacitivos para Monitoramento da Umidade do Solo em Vinhas do Alto Douro**. 2024. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território) - Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Porto, 2024.
- ALVES, I. N. L. **Deteção de intrusão em nós sensores de redes de sensores sem fio**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Foz do Iguaçu, 2021.
- ABREU, A. M. B. de. **Sistema de irrigação automatizado para hortas verticais**. 2023. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2023.
- ARINGO, M. Q. et al. **Development of Low-cost Soil Moisture Monitoring System for Efficient Irrigation Water Management of Upland Crops**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, [Filipinas]. [S. l.]: IOP Publishing, 2022. v. 1038, p. 012029.
- AMORIM, A. L. F.; SANTOS, D. A. **Automação do sistema de irrigação no plantio de maracujá: utilização de Arduino para desenvolver um sistema de irrigação automatizado do plantio de maracujá no sudoeste da Bahia**. [S. l.]: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), 2025.

AYRES, V. O. **Sistema de irrigação automatizado de baixo custo**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2024.

ALHASNAWI, B. N; JASIM, B. H.; ISSA, B. A. **Internet of Things (IoT) for Smart Precision Agriculture**. Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering, Basrah, v. 16, n. 1, p. 28-38, jun. 2020.

AZEREDO, Y. C. de. **Controlador em malha fechada para um sistema de refrigeração magnética**. 2024. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2024.

ASSIS, J. S.; AZEVEDO, L. M. **Comparativo entre sensores de umidade resistivos e capacitivos para irrigação inteligente**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 18, n. 1, p. 1-10, 2024.

BAGIO, L. Q; RODRIGUES, V. da S. **Vantagens e desvantagens: desenvolvimento de um protótipo para irrigação do solo utilizando controle em malha aberta e malha fechada**. 2023. 31 f. Artigo (Graduação em Engenharia da Computação) – Centro Universitário UniSATC, [S. l.], 2023.

BORGES, I. B. **Protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo**. 2024. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) - Instituto Federal Goiano, Urutaí, 2024.

BHAVSAR, D. et al. **A comprehensive and systematic study in smart drip and sprinkler irrigation systems**. Smart Agricultural Technology, [S. l.], v. 5, p. 100303, 2023.

BONRUQUE, E.; CELARINO, A; SOUZA, O. M. de. **HortaIno: Horta Automatizada de baixo custo com esp8266 para auxiliar os produtores familiares**. Congresso Brasileiro de Agricultura 4.0, 2022, [S. l.]. [S. l.: s. n.], 2022. p. 1–4.

BRANDÃO, R. dos S. **Automação do monitoramento de plantas usando o módulo NodeMCU V3 ESP8266**. 2022. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Computação) – Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Tucuruí, 2022.

BHAI, G. V.; KUMAR, S. R. **Design and development of smart irrigation system using Raspberry Pi**. Material Science and Technology, v. 19, n. 2, out. 2020.

BONFIM, F. DE F.; TURIN, F. A. M.; BONFIM, R. F. **Irrigação automatizada para cultivo de morango**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Automação Industrial) - ETEC Philadelpho Gouvêa Netto, São José do Rio Preto, 2023.

BARROSO, F. S. M.; INÁCIO, M. J.; OLIVEIRA, F. G. **Embedded fuzzy controller for application in irrigation systems**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 42, ed. especial, e20210138, 2022.

BESCAINO, C. D.; SANTOS, G. G. DOS. **SIIA: Sistema de Irrigação Inteligente com Arduino**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Eletroeletrônica) - ETEC Trajano Camargo, Limeira, 2023.

BRITO, J. S.; BRANDÃO, R. DE S. **Projeto de desenvolvimento de sistema automatizado e expansível para irrigação rural**. WORKSHOP INTERNACIONAL SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2023, Campinas. Anais [do] Sustentare & WIPIS2023. Campinas: PUC-Campinas, EESC USP, Comitês PCJ, 2023.

BHARATHI, V. **Wireless Sensor Networks (R20A0465): lecture notes**. Secunderabad: Malla Reddy College of Engineering & Technology, Department of CSE (Emerging Technologies), 2023.

CHAUHDARY, J. N. et al. **Advances in sprinkler irrigation: a review in the context of precision irrigation for crop production**. Agronomy, Basel, v. 14, n. 1, p. 47, 2023.

CHOWDHURY, S; SEN, S; JANARDHANAN, S. **Comparative Analysis and Calibration of Low Cost Resistive and Capacitive Soil Moisture Sensor**. [S.l.]: arXiv, 2022.

CARR, C. N. et al. **Automação de irrigação por gotejamento com arduino uno: uma estratégia para diminuição de desperdícios hídricos e energéticos**. Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, v. 22, n. 8, p. 58-75, 2024.

CANJA, J. F. **Caracterização experimental de sensores de baixo custo assistidos por sistema embarcado para o uso em agricultura sustentável**. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

COSTA, B. P; SANTOS, W. S. **Sistema de gerenciamento de irrigação baseado em Arduino para culturas de pequeno porte**. 2023. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico de Nível Médio Integrado em Meio Ambiente) – Instituto Federal de Alagoas, Campus Penedo, Penedo, AL, 2023.

CARVALHO, D. M. DE. **Desenvolvimento de um protótipo para irrigação com o uso da plataforma Arduino**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2023.

CAMPOS, K. G. DE L.; VITÓRIA, H. **Cultura maker e automação para a agricultura familiar: proposta de irrigação de baixo custo com microcontrolador Arduino**. EMPÍRICABR, [S.l.], 2023.

CRUZ, P. L. S; FERREIRA, A. F. **Monitoramento e controle de sistemas hidráulicos utilizando sensores de vazão, comunicação RF e interface web**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação REASE, São Paulo, v. 11, n. 7, jul. 2025.

CAVALCANTI, A. J. F. N. et al. **Validação de uma rede de sensores sem fio aplicada à fruticultura irrigada do vale do São Francisco**. Brazilian Applied Science Review, [s. l.], v. 4, n. 5, [s.p.], 2020.

CUNHA, L. H. S. R; PEREIRA, A. A. A. **Calibração de sensor resistivo de umidade superficial de solo wi-fi sob diferentes solos irrigados por gotejamento por pulsos**. 2024.

CASTRO, J. P. de. **Utilização de um robô manipulador móvel para monitoramento e regulação automática de gotejadores para irrigação localizada**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Cascavel, 2024.

CÂMARA, M. **Sistemas Embarcados**. 2025.

DANGE, R. et al. **Smart Agriculture Automation using ESP8266 Node MCU**. Journal of Electronics Computer Networking and Applied Mathematics, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 1–9, 1 ago. 2023.

DWIVEDI, M. D. et al. **Smart Farming: Monitoring of Field Status and Control of Irrigation Using Sensors and Esp8266 Nodemcu Module**. Journal of Physics: Conference Series, [S. l.], v. 2570, n. 1, p. 012035, 2023.

DOMINGUESCHE, F. B. **Desenvolvimento de uma Plataforma de Internet das Coisas (IOT) Integrado a Redes de Sensores Sem Fio**. 2021.

EISENHAUER, D. E. et al. **Irrigation systems management**. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2021. 371 p.

FERREIRA, N. F. C. **Sistema IoT de Coleta, Armazenamento e Transmissão de Dados em Lisímetros de Lençol Freáticos utilizando Raspberry Pi**. 2020. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Cuiabá - UNIC, Cuiabá, MT, 2020.

FILHO, M. C. de B. **Dispositivos para Controle Inteligente de Reservatórios de Água e Sistemas de Irrigação via Aplicativo mobile**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

FILHO, L. G. L.; SILVA, L. F. V. D. DA; SANTOS, P. C. dos. **Implementação de um sistema de irrigação inteligente utilizando tecnologias IoT para gestão hídrica sustentável**. JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 16.; SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 13., 2024, Muzambinho. **Anais**. Muzambinho: IFSULDEMINAS, 2024.

FALCÃO, J. F. et al. **Custo de produção de um sistema de irrigação inteligente com arduino**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S.l.], v. 10, n. 5, p. 2579-, 2024.

FERNANDES, C. N. et al. **Avaliação e calibração do sensor de umidade do solo YL-69 de baixo custo em três texturas de solo**. Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, Curitiba, v. 22, n. 10, p. 01-22, 2024.

GOMES, W. T. S.; ARAÚJO, S. R. F. de; QUEIROZ, P. G. G. **Germina: Um Sistema Embarcado com Ênfase em Agricultura de Precisão**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2022.

GÜMÜSER, M. A.; PICHLHÖFER, A.; KORJENIC, A. **A Comparison of Capacitive Soil Moisture Sensors in Different Substrates for Use in Irrigation Systems**. *Sensors*, v. 25, n. 5, art. 1461, 2025.

GUIMARÃES, S.; LUCENA, M.; COELHO, R. **Relato de experiência da linguagem de modelagem SysADL para documentação de sistemas embarcados com Arduino**. [S.l.]: Departamento de Informática e Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

GUIMARÃES, F. J. C; FERREIRA, A. F. **Projeto de automação residencial para um jardim suspenso com sensores de temperatura, umidade do ar e umidade do solo, controle e programação para ESP 8266**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação REASE, São Paulo, v. 11, n. 7, jul. 2025.

GURGEL, R.; PRUDÊNCIO, W. **Modelagem e arquitetura de um sistema de irrigação automática com ESP32, TypeScript e React**. 2024.

HALIM, A. A. A. et al. **IoT based smart irrigation, control, and monitoring system for chilli plants using NodeMCU-ESP8266**. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 3053–3060, out. 2023.

HASSEBO, A. D.; MONTES, K. B.; CABRERA, E. **Arduino-ESP32-based smart irrigation system**. ASEE NORTHEAST SECTION CONFERENCE, 2025, Bridgeport. **Proceedings**. Bridgeport: University of Bridgeport, 2025.

HARDIE, Marcus. **Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture**. *Sensors*, Basel, v. 20, n. 23, art. 6934, 2020.

INOUE, L. Y; JUNQUEIRA, P. C. S; CARAVIERI, F. P. M. **AGRO4U: Sistema integrado de irrigação em Arduino para agricultura de precisão**. SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DA

FATEC JALES, 7., 2023, Jales/SP. Anais [do] VII Simpósio de Tecnologia da Fatec Jales. Jales, SP: FATEC Jales, 2023. ISSN 2595-2323.

IFEAGWU, E. N.; OBIAGELI, A. M. **Design and implementation of smart IoT based plant irrigation system using NodeMCU ESP8266 microcontroller and Blynk interface technology.** Caritas Journal of Engineering Technology (CJET), v. 4, n. 2, 2025.

JONG, S. M. de; HEIJENK, R. A.; NIJLAND, W; MEIJDE, M. van der. **Monitoring Soil Moisture Dynamics Using Electrical Resistivity Tomography under Homogeneous Field Conditions.** Sensors, Basel, v. 20, n. 18, p. 5313, 2020.

JUSOH, M. et al. **Efficacy of Arduino based low-cost Resistive Sensor in evaluating Soil Moisture from different Soil types collected in the Kelantan-Terengganu plain of Malaysia.** INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2020. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [S.l.]: IOP Publishing, 2020. v. 596, n. 1, art. 012097.

KARAR, M. E. et al. **IoT and Neural Network-Based Water Pumping Control System for Smart Irrigation.** Information Sciences Letters, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 107-112, maio 2020.

KUMAR, A. et al. **Assessing capacitance soil moisture sensors for precision irrigation scheduling in wheat crops.** CABI Agriculture and Bioscience, [S.l.], v. 6, n. 1, art. 0025, 2025.

KALIDAS, N. et al. **Intelligent drip irrigation: leveraging embedded systems and sensor networks for real-time monitoring and fault diagnosis.** E3S Web of Conferences, [S.l.], v. 564, n. 07009, 2024.

KUNT, Y. E. **Development of IoT and AI based smart irrigation system.** 2025. B.Sc. Thesis (Electrical and Electronics Engineering Department) – Mugla Sitki Kocman University, Mugla, Türkiye, 2025.

KULMÁNY, I. M. et al. **Calibration of an Arduino-based low-cost capacitive soil moisture sensor for smart agriculture.** Journal of Hydrology and Hydromechanics, [S.l.], v. 70, n. 3, p. 330-340, 2022.

KANDWAL, A. et al. **Development and Analysis of Novel IoT Based Resistive Soil Moisture Sensor using Arduino UNO**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE COMPUTING, COMMUNICATION AND SYSTEMS, 2., 2021. Anais. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1-6.

LI, W. et al. **Review of Sensor Network-Based Irrigation Systems Using IoT and Remote Sensing**. Advances in Meteorology, [s. l.], v. 2020, Article ID 8396164, 14 p., 2020.

LEÃO, D. V. F. et al. **Avaliação e calibração de sensores de monitoramento da umidade superficial do solo**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, PR, v. 7, n. 3, p. 26294 (artigo n.), 2021.

LACHOWSKI, R. **Protocolos Centrados em Informação para Redes de Sensores Sem Fio de Larga Escala**. 2020. 90 f. Dissertação (Doutorado em Informática) - Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020.

LOPEZ-JIMENEZ, J; VANDE WOUWER, A; QUIJANO, N. **Dynamic modeling of crop–soil systems to design monitoring and automatic irrigation processes: a review with worked examples**. Water, Basel, v. 14, n. 6, p. 889, 2022.

LIYAKAT, K. K. S. **Intelligent watering system (IWS) for agricultural land utilizing Raspberry Pi**. Recent Trends in Fluid Mechanics, v. 10, n. 2, 2024.

MATO GROSSO DO SUL (Estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação. **Programa Estadual de Irrigação**. Campo Grande: SEMADESC, 2024. 72 p.

MEDEIROS, A. C. A. de. **Desenvolvimento de um sistema IoT de irrigação automatizada com Raspberry Pi Pico W**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

MENDES, J. P. P. et al. **Calibração de sonda de baixo custo para monitorar umidade em substrato comercial**. Meio Ambiente (Brasil), [S.l.], v. 3, n. 1, p. 089-095, 2021.



MENDONÇA, K. H. et al. **Aplicação de um controlador baseado na lógica fuzzy para o controle da vazão e da pressão de um sistema de irrigação.** CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 23., 2020, [S. l.]. Anais... [S. l.]: Sociedade Brasileira de Automática, 2020. p. 1-4.

MARGIWIYATNO, A. et al. **Use of Capacitive Sensors for Measuring Soil Water Content in Irrigation Systems: A Review.** BIO Web of Conferences, [S.l.], v. 158, art. 01001, 2025.

MARCHI, V. A. et al. **Automatização de um processo de irrigação sustentável, interligado a um sistema tecnológico de sensores de solo, alimentado por placas solares.** Revista VIDA: Ciências Exatas e da Terra (VIECIT), v. 1, n. 2, p. 1-13, 2024.

MARTINS, L. N. **Sistema de monitoramento e irrigação de baixo custo usando inteligência artificial e previsão do tempo em uma horta caseira.** 2025. 37 f. Monografia (Bacharelado em Sistemas de Informação) – Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, AM, 2025.

MAJUMDER, S. et al. **Assessing Low-cost Capacitive Soil Moisture Sensors: Accurate, Affordable, and IoT-ready Solutions for Soil Moisture Monitoring.** International Journal of Environment and Climate Change, v. 13, n. 11, p. 2233-2242, 2023.

MERICİ, M. K. **Implementation of a wireless sensor network for irrigation management in drip irrigation systems.** Scientific Reports, [s. l.], p. 1-20, 2025.

MORCHID, A. et al. **High-technology agriculture system to enhance food security: A concept of smart irrigation system using Internet of Things and cloud computing.** Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2024.

MISHRA, A. et al. **Smart Agriculture Monitoring & Auto Irrigation System using IoT with ESP8266.** International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET ), [S. l.], v. 10, n. 6, p. 2681–2686, jun. 2022.

NASCIMENTO, G. N. do. **Métodos de irrigação: tradicional e automatizada através da plataforma Arduino.** 2022. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Pombal, 2022.

NASCIMENTO, J. P. M. do. **Sistema de irrigação com automação 4.0: desenvolvimento de um sistema automático de irrigação para plantações voltado para indústria 4.0.** [S. l.: s. n.], 2023. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Automação Industrial) – Fatec Bauru, Bauru, 2023.

NANDI, R.; SHRESTHA, D. **Assessment of Low-Cost and Higher-End Soil Moisture Sensors across Various Moisture Ranges and Soil Textures.** Sensors, 2024.

NIÑO, J. M. D. et al. **Analysis of the Variability in Soil Moisture Measurements by Capacitance Sensors in a Drip-Irrigated Orchard.** Sensors, Basel, v. 20, n. 18, art. 5092, 2020.

NETO, D. S. do N. et al. **Sistema embarcado de controle de irrigação do solo para plantio.** FÓRUM RONDONIENSE DE PESQUISA, 8., 2022, Ji-Paraná, RO. Anais do 8º Fórum Rondoniense de Pesquisa. Ji-Paraná, RO: Centro Universitário São Lucas Ji-Paraná, 2022.

NOVAK, S. S. et al. **Sistema de irrigação inteligente baseado em lógica fuzzy integrado com internet das coisas para a cultura do tomate cereja.** Revista Caderno Pedagógico, Goiás, v. 22, n. 12, [s.p.], 2025.

OPPONG, R. A. **Integration of IoT-based, sprinklers, embedded systems, data and cloud computing for smart irrigation management.** World Journal of Advanced Research and Reviews, [S.l.], v. 25, n. 03, p. 126-151, mar. 2025.

OLIVEIRA, G. Z. de et al. **Modernizando a agricultura: sistema de tecnologias para otimizar a saúde do solo.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico MTEC em Automação Industrial) – Escola Técnica Estadual Dep. Ary de Camargo Pedroso, Piracicaba, 2024.

OKASHA, A. M. et al. **Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Monitoring Unit Operated by Solar Cells for Greenhouse Irrigation Management.** Sensors, Basel, v. 21, n. 16, art. 5387, 2021.

POURMOHAMMAD, P; HAJIRAD, I. **Innovative irrigation practices for sustainable agriculture: environmental benefits and implementation challenges.** Journal of Sustainable Development of Natural Resources Management, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 1010601, 2025.

PEREIRA, R. M; SANDRI, D; JÚNIOR, J. J. da S. **Evaluation of low-cost capacitive moisture sensors in three types of soils in the cerrado, brazil.** Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v. 30, p. 262-272, 2022.

PATEL, C. K.; JOSEPH, J. **Smart Irrigation using Water Flow Sensor, Soil Moisture Sensor, Temperature Sensor and ESP8266 Arduino Board.** Grenze International Journal of Engineering and Technology, Jan Issue, 2023.

PEREIRA, R. D.; CAMPOS, L. B. **Sistema de irrigação inteligente, gerenciado por um Chatbot, para gestão hídrica no contexto agrícola.** Vitória da Conquista: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Coordenação de Sistemas de Informação, 2025.

PINHEIRO, L. F. **Otimização Multiobjetivo da Topologia de Redes de Sensores Sem Fio Heterogêneas.** 2024. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro, 2024.

PUHL, E. B. et al. **Sensores capacitivos e resistivos de umidade do solo.** MOSTRA NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA INTERDISCIPLINAR (MICTI), 16., 2023, Campus Luzerna. *Anais....* [S.l.: s.n.], 2023.

PINHEIRO, A. L. A. et al. **AGRONET:** Um sistema para controle e gerenciamento da irrigação utilizando Internet of Things. 2024.

PEREIRA, G. L. W. et al. **Monitoramento de plantas com sistemas embarcados para famílias.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico de Nível Médio em Desenvolvimento de Sistemas) – ETEC Cotia, Cotia, 2024.

RODRIGUES, R. A. S; SOUSA, Patrícia Ferreira Cunha. **Irrigação e drenagem.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

REIS, D. L. dos. **Sistema embarcado com câmera térmica e processamento de imagens para monitoramento da temperatura foliar de plantas.** 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2024.

RODRIGUES, E. O. **Transdutor de umidade do solo usando a técnica capacitiva em altas frequências**. 2023. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Santa Catarina, Itajaí, 2023.

RACHID, A. M. **Desenvolvimento de um sistema de irrigação e monitoria do campo agrícola com base em Internet of Things (IoT)**. 2022. Trabalho de Licenciatura (Engenharia Informática) - Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Maputo, 2022.

ROMUALDO, I. P. et al. **Automação de irrigação com Arduino no Ensino de Produção de Mudanças**: Um Projeto de Extensão para Estudantes da Educação Básica. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM COMPUTAÇÃO, 5., 2025. *Anais...* [S. l.]: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2025.

RAHEJA, A. et al. **Designing and field calibration of low-cost microcontroller-based soil moisture sensor for subsurface drip-irrigation system**. Scientific Reports, [S.l.], v. 15, art. 35948, 2025.

RASHEED, M. W. et al. **Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics**: A Comprehensive Review. Sustainability, [S.l.], v. 14, n. 18, p. 11538 (artigo n.), 2022.

RIBEIRO, M. M. A; JUNIOR, O. V; MARTINS, C. P. **HORTOMAÇÃO**: Sistema de Automação de Horta Utilizando IoT em Parceria com Escola Estadual. SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DA FATEC JALES, 6., 2022, Jales. Jales: Fatec Jales, 2022. p. 1–14.

RIBEIRO, A. F. S.; LIMA, N. S. M; OLIVEIRA, I. V. N. de C. **Estado da arte em construção e avaliação de protótipos com placa microcontrolada ESP32 LoRa, aplicados na área de monitoramento de sistemas de irrigação**. Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia (RECIT), Medianeira, v. 15, n. 36, p. 31-45, jan./abr. 2024.

RODRIGUES, R. **Aplicação de Métodos para Lidar com Paradigmas de Sincronização em Redes de Sensores Sem Fio LoRa**. 2022. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2022.

RAHMOUNA, El B; MOUSSA, M; MAHDI, Z. **Design and Realization of an Auto Irrigation Based on the Embedded System.** Journal of Electrical and Electronics Engineering. Algeria, 2023.

SOUZA, L. G. C. de. **Potencialidades da automação no processo de irrigação na agricultura.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Anhanguera de Rondonópolis, Rondonópolis, 2022.

SCHWAMBACK, D. et al. **Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: Trade-Off between Cost and Accuracy.** Sensors, v. 23, n. 5, art. 2451, 2023.

SANTOS, L. G. R. et al. **Efeito da salinidade do solo nas leituras de umidade realizadas com sensor resistivo.** JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO DO IF Sertão PE, 18.; JORNADA DE INTEGRAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO, 12., 2023, Petrolina, PE. **Anais.** [S.l.: s.n.], 2023.

SARMPHIM, P. et al. **Iot based soil moisture management using capacitive sensor and user-friendly smartphone application.** INMATEH - Agricultural Engineering, [S.l.], v. 66, n. 1, 2022.

SANTOS, C. P. dos et al. **Performance of the capacitive moisture sensor under different saline conditions.** Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, CE, v. 53, e20207351 (artigo n.), 2022.

SOUSA, G. P. et al. **Comparação de sensores de umidade utilizando microcontrolador Arduino em solo de textura franco arenosa.** Revista DELOS, Curitiba, v. 18, n. 65, p. 01-18, 2025.

SILVA, S. M; PESSOA, J. G; SOUZA, C. F. **Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo.** Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente, [S.l.], v. 12, e12217 (artigo n.), 2022.

SIQUEIRA, A. S; FERREIRA, A. F. **Sistema de irrigação automatizada para estufas de cultivo de tomate utilizando a plataforma Arduino.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S.l.], v. 9, n. 2, 2023.

SILVA, M. de M. e. **Análise da hidrodinâmica com sensores capacitivo e resistivo de Arduino em solo do Cerrado**. 2021. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado) - Programa de Pós-Graduação em Irrigação no Cerrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Ceres-GO, 2021.

SANTOS, H. dos et al. **Controle de irrigação inteligente - Arduino**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Mecatrônica) – Etec Paulino Botelho, Centro Paula Souza, São Carlos, SP, 2023.

SENA, C. C. R. et al. **Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 17228-17240, abr. 2020.

SOUSA, E. DE; COQUEIRO, T. A. S. **Estudo de um protótipo de irrigação utilizando o Arduino: sistema de automação na agricultura familiar**. CONGRESSO BRASILEIRO DE TECNOLOGIAS ABERTAS, 5., 2024, Castanhal. **Anais**. Castanhal: Universidade Federal do Pará, 2024.

SANTOS, F. E. M; FERREIRA, I. S; BENTES, R. B. **Projeto Arduino de Irrigação Automática: uma abordagem tecnológica para a gestão eficiente de recursos hídricos**. SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (SITI), 6., 2024, Maceió. **Anais**. Maceió: PPGCI/UFAL, 2024.

SUTIKNO, T et al. **Smart irrigation system using node microcontroller unit ESP8266 and Ubidots cloud platform**. Computer Science and Information Technologies, Indonesia, v. 5, n. 2, p. 168-175, Jul. 2024.

SILVA, A. C. et al. **Plataforma Digital Integrada a Rede de Sensores Sem Fio para Monitoramento Contínuo da Umidade do Solo**. Rio de Janeiro, 2024.

SILVA, D. R. da. **Solução de Internet das Coisas para pequenos agricultores na região do Vale Jaguaribe**. 2023. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2023.

SILVEIRA, B. C. da. **QIrriga - Aplicativo para manejo de irrigação via clima**. 2023. 55 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido) – Instituto Federal Baiano, Campus Guanambi, Guanambi, 2023.

SANTOS, D. V. **Uma introdução à teoria do controle de sistemas mecânicos**. Open Science Research VII. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2022. p. 1060-1065.

SILVEIRA, A. F. S. DA; SANTOS, E. S. de O; GOMES, E da S. **Controle automático da irrigação por gotejamento em jardins verticais através do arduíno via sistema supervisorio**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Automação Industrial) – Faculdade SENAI, João Pessoa, 2023.

SANTOS, I. P. dos. **Rede de Sensores Sem Fio Baseado em IoT para a Coleta dos Dados Climáticos de Catalão**. 2023. 64 p. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Catalão, Instituto de Biotecnologia, Catalão, 2023.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2017.

TEIXEIRA, S. C. **Projeto de irrigação automática com monitoramento remoto e energy harvesting**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, 2025.

VASCONCELOS, P. R. **Irrigação inteligente com ESP32 e MQTT**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

YONEYAMA, T. **Engenharia de controle: teoria e prática**. São Paulo: Blucher, 2022.

YU, L. et al. **Review of research progress on soil moisture sensor technology**. Int J Agric & Biol Eng, Pequim, v. 14, n. 4, p. 32-48, jul. 2021.

ZACCARIN, A. M. et al. **Inductively coupled capacitive soil moisture sensors printed on a biodegradable substrate: Characterization and long-term testing**. Smart Agricultural Technology, [S.l.], v. 11, art. 101052, 2025.