

UM PROTÓTIPO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO INTELIGENTE BASEADO EM INTERNET DAS COISAS

Arthur Felipe de Araujo ¹, Paulo Henrique Lopes Silva ²

RESUMO

A escassez de água é uma realidade que afeta cada vez mais o mundo, e a eficiência de sua gestão é uma das maiores preocupações, especialmente na agricultura. Nesse contexto, a irrigação, responsável por grande parte do consumo desse recurso, frequentemente é feita de maneira imprecisa e excessiva, resultando em desperdício. Assim, diante da urgência de otimizar o uso da água e da falta de soluções práticas e escaláveis, foi desenvolvido um protótipo de fácil instalação e replicável, com objetivo de proporcionar uma gestão de recursos mais eficaz e ao mesmo tempo ser uma solução sustentável que pode ser aprimorada de forma contínua, tornando-se mais acessível para atender às necessidades de diferentes contextos agrícolas. Dados os requisitos deste projeto, o desenvolvimento envolveu o uso de materiais como placas de desenvolvimento e suas tecnologias internas, uma interface de desenvolvimento gráfica compatível para programação de sistemas embarcados, dentre outros materiais. Além disso, foi construída uma arquitetura que permite a escalabilidade do sistema e sua fácil utilização e, ao fim, foi demonstrada a viabilidade e eficiência do protótipo por meio de análises comparativas entre a irrigação manual e a automática, na qual foi observada economia de água durante os testes. Com isso, o protótipo se apresentou como uma solução viável para gestão da irrigação e também mostrou potencial de evolução, contribuindo para práticas mais responsáveis na agricultura.

Palavras-chave: Automação, Agricultura de precisão, Redes sem fio, Irrigação inteligente, Sistemas pervasivos.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade essencial para a humanidade, responsável pela produção de alimentos, matérias-primas e energia renovável, além de desempenhar um papel crucial no equilíbrio ecológico e no desenvolvimento econômico. Porém, apesar de vital, é também reconhecida por seu alto consumo hídrico e frequentemente associada a um uso ineficiente de água, resultando em desperdício (ROCHA; GUIMARÃES; DE OLIVEIRA, 2024). Essa realidade tem levado a buscas por soluções mais sustentáveis, como a adoção de tecnologias e práticas que visam otimizar o uso dos recursos hídricos.

Nesse contexto, a adoção de paradigmas da computação como a computação distribuída, os sistemas pervasivos e a internet das coisas (do inglês *Internet of Things* - IoT) desempenham um importante papel na otimização da agricultura.

Com a computação distribuída é possível obter o processamento eficiente de grandes volumes de dados por meio de colaboração entre múltiplos dispositivos, podendo assim

¹ Graduando do Bacharelado em Ciência da Computação da UFRSA

² Professor Associado do Departamento de Computação da UFRSA/Mossoró

garantir um bom desempenho de sistemas automáticos seja em pequena ou larga escala. Já os sistemas pervasivos viabilizam a integração contínua de sensores e atuadores no ambiente agrícola, tornando as automações mais intuitivas. E, por fim, a IoT possibilita a comunicação entre dispositivos inteligentes, promovendo o monitoramento remoto e o controle de variáveis ambientais de forma automatizada. Assim, esses paradigmas podem proporcionar soluções viáveis para otimização do uso de recursos quando integrados de maneira adequada.

1.1 A integração de soluções de *IoT* na irrigação inteligente

A insuficiência de recursos hídricos no Brasil é uma preocupação crescente, principalmente em regiões áridas e semiáridas do país, onde se tem a agricultura como atividade de subsistência de comunidades locais (ROCHA; GUIMARÃES; DE OLIVEIRA, 2024). Nisso, a implementação de técnicas de irrigação, por exercer um papel essencial na produção agrícola no fornecimento de água necessário aos plantios, se tornam imprescindíveis e, para evitar o uso ineficiente da água, se vê necessário abordar essa questão com técnicas sustentáveis como a irrigação por gotejamento e a irrigação por aspersão.

Porém, as técnicas tradicionais de irrigação, embora essenciais, muitas vezes não são suficientes para atender às demandas de sustentabilidade impostas pelas condições climáticas adversas e pela escassez de recursos hídricos. Nisso, a integração de *IoT* às práticas de irrigação oferece uma solução promissora, permitindo que o sistema de controle possa ajudar a reduzir ainda mais o consumo de água gerenciando a irrigação e o nível de água nos reservatórios (WEYMAR; MEDEIROS; REIS, 2024).

Combinando o uso de sensores, sistemas automatizados e pervasivos a irrigação inteligente destaca-se como uma abordagem prática que utiliza tecnologias da Internet das coisas para otimizar o uso da água e tornar os processos mais eficientes e sustentáveis. No contexto da agricultura denominada como agricultura 4.0, ou agricultura digital, as tecnologias de *IoT* são utilizadas para ajudar na tomada de decisão envolvendo o monitoramento e a análise de dados, buscando proporcionar a redução de custos, melhor qualidade e maior produtividade, diminuindo os impactos ambientais (WEYMAR; MEDEIROS; REIS, 2024).

Trabalhos anteriores já exploraram o uso do ESP-NOW para aplicações agrícolas, como o estudo de Isnanto et al.(2023), que apresenta um design de um robô para controle de condições do solo utilizando esse protocolo de comunicação. Essas pesquisas demonstram a viabilidade e eficiência do ESP-NOW em cenários de monitoramento de comunicação sem fio.

1.2 Objetivo

Com base nas informações levantadas e apresentadas, este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo funcional de um sistema de irrigação inteligente, com monitoramento do solo, utilizando o microcontrolador ESP32 e o protocolo ESP-NOW (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023) para a comunicação sem fio entre os dispositivos. O sistema desenvolvido é capaz de monitorar parâmetros como a umidade do solo, tomando decisões automáticas sobre a irrigação com base em valores predefinidos. Esse tipo de automação é essencial para reduzir o desperdício de água e melhorar a saúde das plantas, especialmente em regiões com recursos hídricos limitados. Além disso, o sistema se apresenta como uma solução de fácil implementação e com foco para hortas caseiras e pequenas propriedades agrícolas.

Os principais objetivos deste artigo incluem o desenvolvimento de um protótipo funcional e a validação tanto da eficácia do protocolo ESP-NOW em cenários agrícolas como

do sistema em campo. Ao final, espera-se contribuir para a popularização de tecnologias de *IoT* no agronegócio, facilitando a adoção de práticas agrícolas mais inteligentes e sustentáveis para pequenos produtores.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No contexto do atual trabalho, a computação distribuída, os sistemas pervasivos e a *IoT* emergem como paradigmas tecnológicos de suma importância para a implementação de sistemas agrícolas mais eficientes.

2.1 A Computação distribuída

A computação distribuída é um paradigma que consiste na divisão de tarefas complexas entre múltiplos dispositivos ou sistemas interconectados, que trabalham de forma colaborativa para alcançar um objetivo comum. Esses sistemas são caracterizados pela interação de diversos equipamentos e softwares, muitas vezes heterogêneos, conectados por meio de uma rede (REQUIÃO et al, 2021). Assim, ao distribuir o trabalho entre vários dispositivos, é possível alcançar uma maior escalabilidade e melhorar de forma significativa o uso dos recursos computacionais.

Além disso, ainda segundo Requião, Kovalti e Geesdorf (2021), a partir da *World Wide Web* (WWW), a computação distribuída passou a ser extremamente relevante. Os projetos de software passaram a ter como requisito básico o acesso via Internet, com o desenvolvimento de aplicações cliente/servidor sobre a pilha de protocolos padrão da Internet – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP).

2.2 Os sistemas pervasivos

Também conhecido como computação ubíqua, segundo Sánchez (2024), os sistemas pervasivos referem-se à integração de dispositivos computacionais no ambiente cotidiano, de forma invisível e natural, permitindo que a tecnologia esteja sempre disponível e adaptada às necessidades do usuário. Além disso, esses sistemas são compostos por diferentes meios tecnológicos com a capacidade de se conectar à internet e serem gerenciados por meio de *smartphones* ou outros dispositivos, de qualquer ponto geográfico.

A partir dos sistemas pervasivos surgiram novas tecnologias pervasivas, como aplicações *online*, softwares executáveis, aplicativos móveis e pacotes de produtividade (softwares de escritório), que possibilitam a criação, transferência e disseminação de conteúdos e mensagens dentro das dinâmicas dos sistemas de informação pervasivos (SÁNCHEZ, 2024). Impulsionando, dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias que tornam o acesso e a troca de informações mais automatizados, facilitando a interação com o ambiente digital.

2.3 A *IoT*

A Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (*IoT*), deriva seu nome da união das palavras “Internet” e “Coisas” que juntas ganham significado de inovação disruptiva no cenário das tecnologias da informação e comunicação (SILVA; ESPEJO, 2024). A Internet é classificada pela *Internet Society*, uma instituição de caridade global que capacita as pessoas a manter a Internet segura, como redes interconectadas operadas por provedores de serviços, empresas individuais, universidades e governos. Por sua vez, “Coisas”, dentro da perspectiva do *IoT*, pode se referir a quaisquer objetos que possam ser distinguidos por meio de endereçamento único e quando possuem pequenos computadores são comumente chamados

de objetos inteligentes, pois podem agir de forma mais inteligente do que aqueles que não foram equipados com essa tecnologia (FIGUEIREDO, 2024).

Ainda segundo Figueiredo (2024), A Internet das Coisas já faz parte do nosso cotidiano, com dispositivos inteligentes integrando-se progressivamente às nossas casas, serviços, centros urbanos e até mesmo aos objetos que carregamos no bolso.

De acordo com Simões e Rossi (2024), em 2020 existiam 11,3 bilhões de dispositivos *IoT* conectados e a previsão para 2025 é que este número atinja 27,1 bilhões, sendo que a pesquisa realizada não leva em conta a quantidade de sensores individuais existentes, como dispositivos conectados por redes cabeadas, tornando o número real possivelmente maior. Nesse contexto, se torna notável a consolidação da *IoT* como elemento essencial na infraestrutura digital, impulsionando a interconexão de dispositivos e ampliando as possibilidades de aplicações com automação e monitoramento.

2.4 A *IoT* na agricultura

Frequentemente denominada de “Agricultura Inteligente”, na agricultura, a *IoT* (Internet das Coisas, do inglês, *Internet of Things*) tem como um dos principais objetivos enfrentar desafios globais como mudanças climáticas, escassez de recursos hídricos, aumento de demanda por alimentos e a necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis. O conceito de *IoT* aplicado à agricultura pode levar a uma gestão agrícola avançada, reduzindo o desperdício e aumentando a produção agrícola com impacto ambiental mínimo (STROPARO, 2024). Nisso, a Internet das coisas pode vir a contribuir para a preservação de recursos naturais e para a produção de alimentos de forma responsável.

No ambiente rural, a *IoT* surge como uma tecnologia promissora para viabilizar as fazendas inteligentes, uma vez que, por meio da coleta, processamento, gerenciamento e disseminação de dados, as propriedades são capazes de integrar sistemas e serviços, tornando seus processos mais eficientes e otimizados (SILVA; ESPEJO, 2024). Assim, uma gestão mais precisa de recursos como água e fertilizantes é possibilitada, além de promover a sustentabilidade e aumentar a produtividade agrícola.

3 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, serão apresentadas as informações essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, estruturadas em duas subseções principais. A primeira abordará os materiais e métodos adotados na construção da solução, detalhando as estratégias e abordagens utilizadas para a implementação do sistema. A segunda irá descrever a arquitetura e a organização do sistema, evidenciando a estrutura tecnológica utilizada e sua contribuição para a eficiência da irrigação inteligente.

3.1 Materiais e métodos

Nesta subseção, é apresentado o método empregado para a implementação do protótipo, bem como os materiais utilizados no seu desenvolvimento. A seguir, são detalhados os processos adotados ao longo do desenvolvimento do sistema.

3.1.1 Método

Com a intenção de atingir os objetivos estabelecidos, o desenvolvimento do protótipo de sistema de irrigação inteligente foi estruturado em etapas organizadas conforme descrito a seguir:

1. **Estudo de placas de prototipagem e protocolos de comunicação:** Antes da definição dos componentes do sistemas, foi realizado um estudo entre diferentes

microcontroladores e protocolos de comunicação sem fio. O objetivo foi identificar a alternativa mais adequada para a proposta do trabalho, levando em consideração critérios como consumo energético, custo e compatibilidade com sensores de umidade do solo. Como resultado foi optado pelo uso do ESP32 devido seu baixo custo, baixo consumo energético e o seu suporte ao protocolo ESP-NOW. Esse protocolo foi escolhido por estar nativamente integrado ao ESP32, permitindo uma boa comunicação entre os dispositivos sem a necessidade de um *WiFi* convencional.

2. **Definição da arquitetura do sistema:** Com base nos resultados do estudo de placas e protocolos, foi estruturada a arquitetura do sistema de forma com que seja garantida a comunicação e integração adequada entre os sensores e atuadores.
3. **Levantamento dos requisitos:** Foram definidos requisitos funcionais e não funcionais do sistema, incluindo a precisão na identificação da umidade do solo, a eficiência na comunicação entre os dispositivos e a capacidade de acionamento da irrigação.
4. **Modelagem do sistema:** Para garantir uma estruturação correta dos componentes do sistema, foi elaborado um diagrama representando as interações entre os componentes do sistema. Nisso, foi incluído a definição dos fluxos de dados, estrutura de mensagens transmitidas e a lógica de controle de irrigação.
5. **Desenvolvimento do *firmware*:** O software incorporado no dispositivo foi desenvolvido utilizando a Arduino IDE (ARDUINO, 2024) e a linguagem da IDE que é baseada em C/C++. A implementação incluiu a leitura dos dados do sensor de umidade do solo, a comunicação via ESP-NOW e a lógica de controle de irrigação.
6. **Testes e validação:** O sistema foi submetido a testes em ambiente simulado para avaliar seu desempenho em diferentes condições de umidade. Nesse contexto, a eficiência do protocolo escolhido e a resposta do sistema de irrigação foram analisadas para validar sua confiabilidade.

Com isso, a divisão das etapas contribuiu para a condução mais clara do desenvolvimento do protótipo, permitindo organizar o processo e facilitar a identificação de possíveis problemas na construção ou implementação.

3.1.2 Materiais utilizados

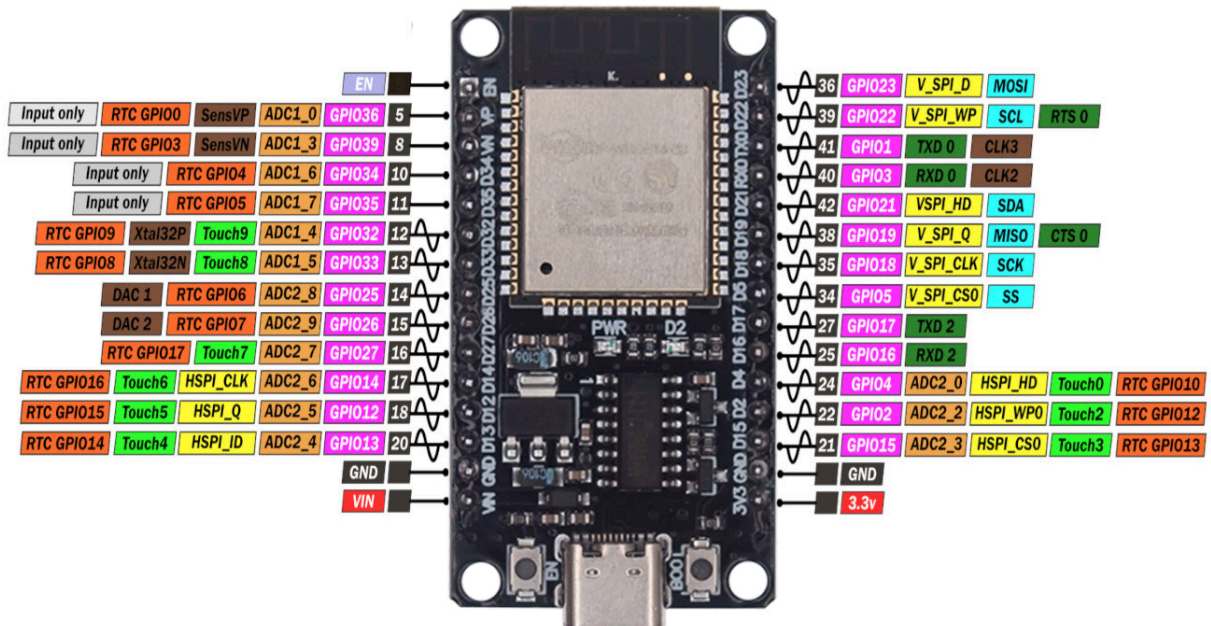
Dentre os materiais empregados, destacam-se o ESP32, responsável pelo processamento e comunicação do sistema; o protocolo ESP-NOW, utilizado para a transmissão eficiente de dados sem a necessidade de uma rede Wi-Fi convencional; a Arduino IDE, ambiente de desenvolvimento adotado para a programação do microcontrolador utilizando linguagem de programação C/C++ ; e um sensor de umidade do solo capacitivo, utilizado para coleta de dados do solo.

3.1.2.1 O ESP32

Microcontrolador desenvolvido pela *Espressif*, empresa especializada no desenvolvimento de microcontroladores e módulos de conectividade sem fio, o ESP32 (Figura 1) é amplamente utilizado em aplicações de *IoT* devido à sua conectividade sem fio, baixo consumo energético e alta capacidade de processamento.

Integrando Wi-Fi e Bluetooth, também oferece suporte a múltiplos pinos GPIO (*General Purpose Input/Output*), permitindo a conexão com sensores e atuadores. Ademais, sua robustez operacional possibilita o funcionamento em uma faixa de temperatura variando de -40°C a 105°C, tornando-o ideal para aplicações comerciais e industriais que demandam alta durabilidade e confiabilidade (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

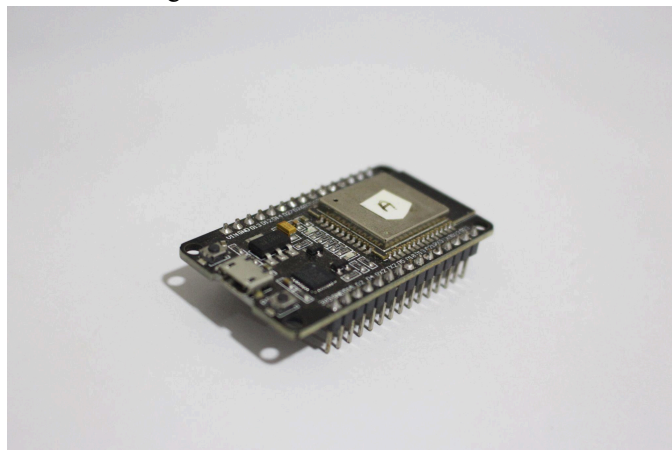
Figura 1 – Pinagem do Módulo ESP32 WROOM



Fonte: Adaptado de Dien Tu Nhat Tung (2024)

Além disso, ele se destaca pelo baixo consumo energético e pelo suporte nativo a criptografia avançada, incluindo AES (*Advanced Encryption Standard*) (FIPS PUB 197, 2001), SHA (*Secure Hash Algorithm*) (FIPS PUB 180, 2012) e RSA (*Rivest–Shamir–Adleman*) (RIVEST; SHAMIR; ADLEMAN, 1978), garantindo a segurança e integridade dos dados na comunicação e no armazenamento (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Figura 2 – Módulo ESP32 WROOM



Fonte: Autoria própria (2024)

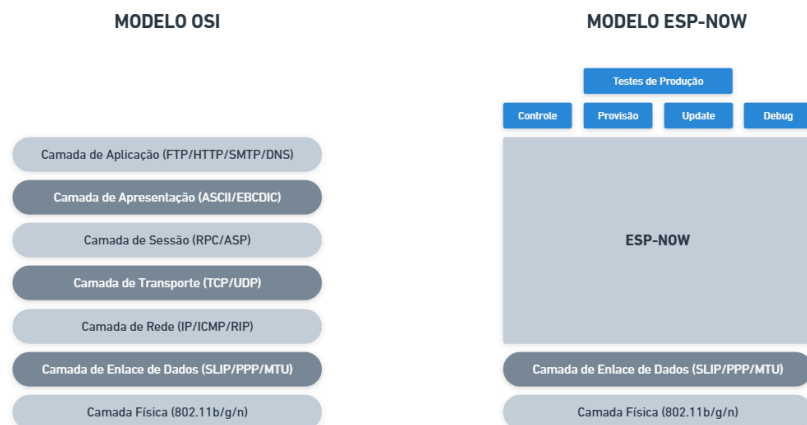
A escolha do ESP32 (Figura 2) para este trabalho deve-se à sua versatilidade em aplicações *IoT* e, principalmente, à sua capacidade de comunicação eficiente entre sensores e atuadores sem depender de redes Wi-Fi convencionais ou bluetooth. Isso é possível graças ao suporte ao protocolo *ESP-NOW*, que permite a transmissão direta e de baixa latência entre dispositivos.

3.1.2.2 O Protocolo ESP-NOW

De acordo com a *Espressif Systems*, o ESP-NOW é um protocolo de comunicação sem fio baseado na camada de enlace de dados, que reduz cinco camadas superiores do modelo OSI (Open Systems Interconnection) a apenas uma, eliminando a necessidade de transmissão de dados pelas camadas de rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação (Figura 3). Como resultado, o ESP-NOW dispensa cabeçalhos e processos de desempacotamento em múltiplas camadas, garantindo uma comunicação mais rápida e eficiente minimizando atrasos e reduzindo a latência causada por perdas de pacotes.

Para reduzir a sobrecarga das camadas superiores do modelo OSI o ESP-NOW utiliza um formato de pacote simplificado. Em vez de depender de endereços IP e protocolos de transporte como TCP ou UDP, ele se baseia diretamente nos endereços MAC dos dispositivos para estabelecer comunicação.

Figura 3 – Modelo ESP-NOW



Fonte: Autoria Própria (2025)

O protocolo se mostra especialmente útil em cenários onde a comunicação deve ser rápida, confiável e independente de infraestrutura externa visto que suas características permitem que dois ou mais dispositivos se comuniquem de forma segura, dispensando a necessidade de uma rede Wi-Fi tradicional, apresentando baixo consumo de energia e possuindo compatibilidade com rede P2P (*Peer-to-Peer*), sem a necessidade de *handshake* (aperto de mão) após o emparelhamento (ERIDANI; ROCHIM; CESARA, 2021).

A escolha do ESP-NOW se deu por sua eficiência na transmissão de dados com baixa latência e consumo reduzido de energia, características essenciais para aplicações *IoT* e sistemas pervasivos. E, além disso, por ser ideal para cenários onde a conectividade Wi-Fi não está disponível ou é instável.

3.1.2.3 Ambiente Arduino IDE

Para a programação do microcontrolador ESP32, optou-se pelo uso da Arduino IDE (*Integrated Development Enviroment*) uma ferramenta de desenvolvimento de código aberto amplamente utilizada, simplificando o processo de criação, compilação e *upload* de códigos (ARDUINO, 2025). O software possui compatibilidade com diversas placas tornando uma escolha interessante para o desenvolvimento de sistemas embarcados.

Essa ferramenta utiliza de uma linguagem de programação baseada nas linguagens C e C++, na qual o código é escrito em *sketches*, a unidade de código que é carregada e executada em uma placa arduino ou compatível. Diante disso, existem duas funções especiais em cada *sketch*: *setup()* e *loop()*. A primeira é chamada uma única vez ao iniciar o programa e

geralmente é responsável por tarefas de configuração, como definição de modos de pinos ou inicialização de bibliotecas. Já a segunda é chamada repetidamente e representa o coração da maioria dos programas (ARDUINO, 2025). Dessa maneira, a abordagem do software da arduino se mostra simples de usar e também flexível o bastante para projetos maiores e mais complexos.

Ainda segundo a Arduino, além das funções convenientes de edição de código, o *Arduino Software* (IDE) conta com um conjunto de bibliotecas que adicionam funcionalidades extras aos programas e simplificam a integração com sensores, displays, módulos e outros componentes. Ademais, é possível realizar a importação de bibliotecas externas que permitem a adaptação de outras placas de desenvolvimento, como o ESP32, o que torna a arduino IDE uma ótima escolha para o desenvolvimento do projeto.

Com isso, neste trabalho, a Arduino IDE é utilizada para o carregamento de código e para depuração, facilitando a identificação e correção de eventuais falhas no desenvolvimento.

3.1.2.4 Sensor capacitivo de umidade do solo

Para a análise da umidade do solo foi utilizado um sensor de umidade capacitivo (Figura 4) que funciona no princípio da capacitância, que varia de acordo com o conteúdo de água presente no solo.

Figura 4 – Sensor de solo capacitivo



Fonte: Mamute Eletrônica (2025)

A escolha do sensor capacitivo se dá pela sua maior confiabilidade em comparação com sensores resistivos, que podem ser afetados pela corrosão ao longo do tempo. O sensor capacitivo é imune à oxidação, tornando-o mais durável e adequado para ambientes ao ar livre (ROBOCORE, 2025).

No caso do ESP32, são integrados dois ADCs (*Analog-to-Digital Converter*) SAR (*Successive Approximation Register*) de 12 bits, o que significa que pode gerar valores de 0 a 4095, resultantes de uma amostra de tensão analógica (ESPRESSIF SYSTEMS, 2025). A conversão é realizada a partir da tensão de entrada, medida de acordo com a referência do ADC. Assim, quanto maior a umidade do solo, maior será a capacitância e, consequentemente, o valor gerado pelo ADC.

Com isso, esses valores acabam por servir como referência para o acionamento do sistema de irrigação, garantindo que ela ocorra somente quando necessária.

3.2 Arquitetura e Organização

A arquitetura do sistema foi projetada para ser modular e escalável, permitindo o controle de múltiplos pontos de análise de solo e irrigação através de dispositivos ESP32, com comunicação sem fio via ESP-NOW. O sistema é composto por dispositivos de controle de irrigação que monitoram a umidade do solo, acionam torneiras solenóides para irrigação e enviam dados a um servidor central em Node.js (NODE.JS FOUNDATION, 2025) para processamento de registro.

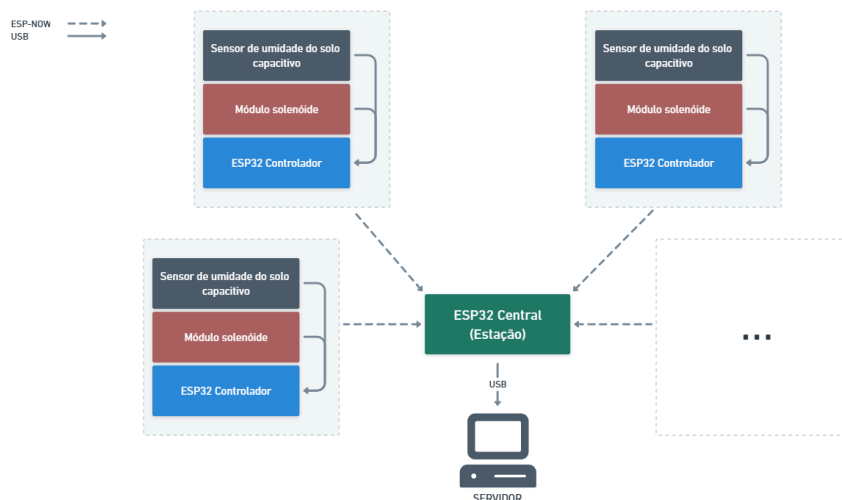
3.2.1 Estrutura do sistema

O sistema é composto pelos seguintes componentes principais:

1. **Controlador de irrigação:** ESP32 equipados com sensores de solo capacitivos e com uma válvula solenóide que podem monitorar a umidade do solo, controlar o acionamento da válvula de irrigação e enviar informações sobre a umidade e *status* da irrigação para um ESP central via ESP-NOW.
2. **ESP32 central (Estação):** Um ESP32 que funciona como ponto de coleta de dados, recebendo informações de múltiplos controladores de irrigação. Este dispositivo é conectado via USB a um computador ou servidor caseiro, permitindo a transmissão dos dados para o *backend*.
3. **Servidor:** o ESP32 estação, conectado ao servidor via USB, transmite os dados recebidos para o *backend* em Typescript (TYPESCRIPT, 2024), que está sendo executado em um notebook Dell comum. O servidor processa os dados e os armazena, gerando *logs* e permitindo o acompanhamento do histórico de irrigação.

A organização dos dispositivos ESP32 segue uma topologia em estrela, na qual a estação atua como um *hub* centralizado para a coleta e processamento dos dados enviados pelos controladores de irrigação. Essa estrutura possibilita a comunicação entre múltiplos dispositivos, permitindo expansão do sistema com a adição de novos controladores.

Figura 5 – Esquema da arquitetura do sistema



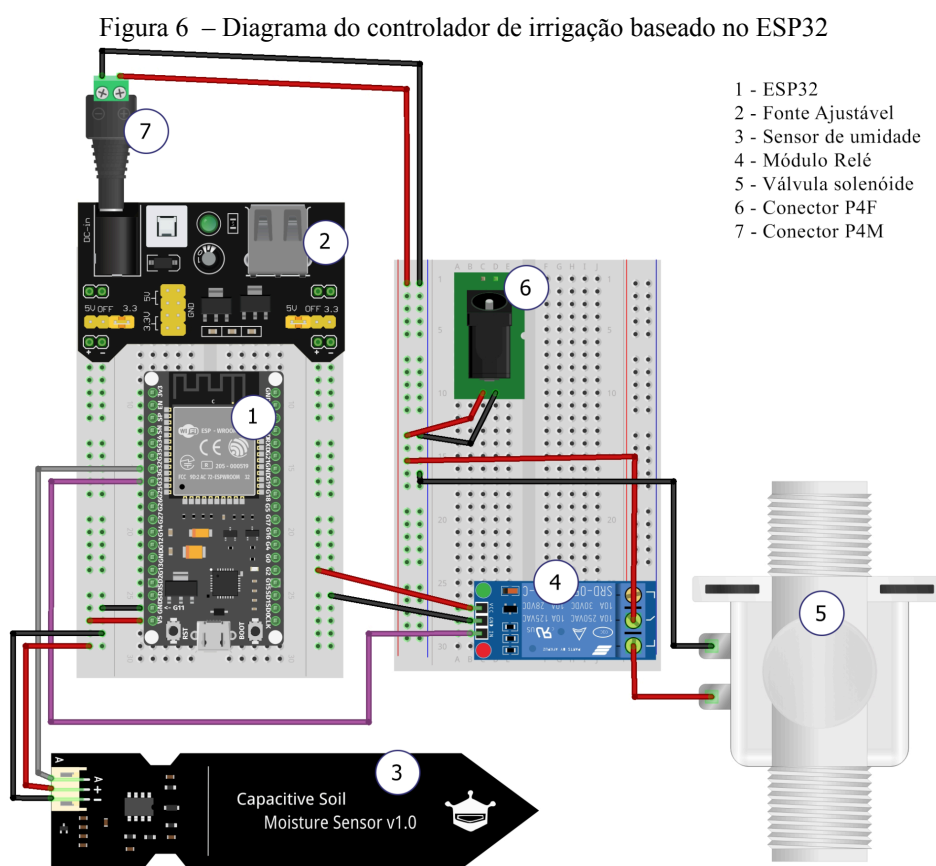
Fonte: Autoria Própria (2025)

Como mostrado na Figura 5, os ESPs controladores possuem uma válvula solenóide e um sensor capacitivo de umidade do solo, dessa forma eles podem monitorar a umidade e ligar ou desligar os módulos responsáveis pela irrigação. A estação, por sua vez, consolida as

informações recebidas dos controladores via ESP-NOW (linha cinza tracejada), que utiliza pacotes de dados, que contêm as informações sobre a umidade do solo e o *status* da irrigação em formato de texto (*string*) de até 250 bytes, e transmite por meio de conexão serial (linha cinza contínua com título “USB”) ao servidor que em seguida processa, armazena e disponibiliza os dados para futuras análises ou usos.

3.2.1.1 O controlador de irrigação

Baseado no microcontrolador ESP32, o controlador de irrigação atua como unidade de processamento para a leitura dos sensores e o acionamento do sistema de irrigação. Cada controlador pode ser responsável por monitorar a umidade do solo em uma área específica e tomar decisões sobre a ativação da irrigação instalada.



Fonte: Autoria Própria (2025)

A Figura 6 mostra a representação do controlador do sistema de irrigação desenhado no software *Fritzing*, uma iniciativa de hardware de código aberto que permite aos usuários documentar protótipos eletrônicos, criar *layouts* e fabricar placas de circuito impresso (do inglês, Printed Circuit Boards - PCB) profissionais (FRITZING, 2025). Por meio desse software, foi possível criar uma representação visual precisa do módulo controlador de modo a facilitar a compreensão e o desenvolvimento do mesmo.

O módulo consiste em 7 itens principais que formam a estrutura do controlador. O primeiro item é o ESP32 (item 1) responsável por gerenciar o funcionamento do protótipo, incluindo a alimentação e o recebimento dos sinais analógicos do sensor de umidade de solo capacitivo (item 3), além de enviar os sinais de controle para o relé (item 4). O relé, por sua vez, acionado pelo ESP32, controla a passagem de corrente que ativa o módulo solenóide de 12v (item 5), funcionando como uma torneira eletrônica. O sensor de solo envia os dados para o ESP, que após a conversão por meio do ADC integrado, verifica o valor obtido e

dependendo do valor, envia o sinal para ativar ou desativar o solenóide através do relé, controlando, dessa forma, o fluxo de água.

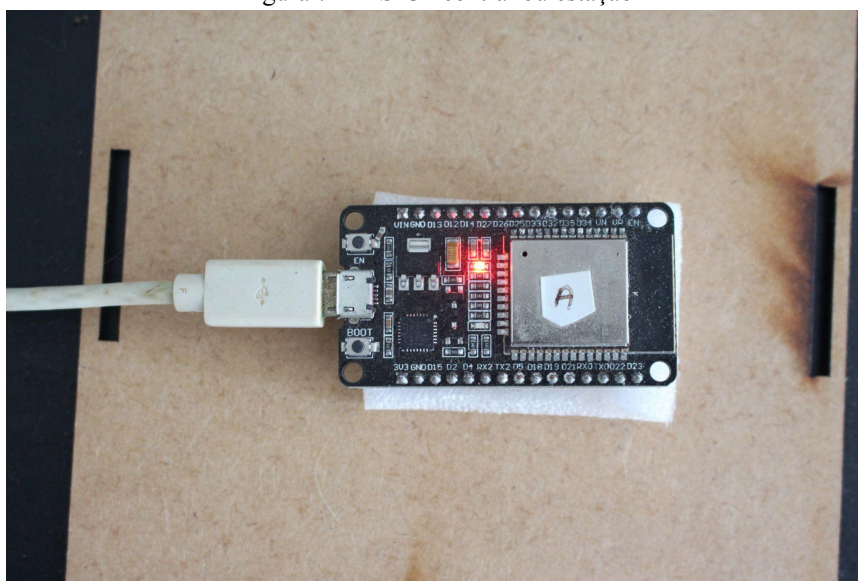
A alimentação do sistema é fornecida a partir de um conector P4 fêmea com borne (item 6), a qual permite que o sistema seja alimentado tanto via fonte 12v conectada a uma tomada quanto a uma bateria de 12v. O solenóide recebe alimentação direta da corrente de 12v, enquanto que o ESP32 é alimentado por uma corrente de 5v, convertida do 12v por meio de um conector P4 macho com borne (item 7), que transfere a corrente 12v para uma fonte ajustável MB102 (item 2) a qual converte a corrente para 5v e então pode alimentar o ESP32 através pino VIN. Com isso, o controlador pode operar de forma correta e ainda possuir uma estrutura que permite uma flexibilidade em sua fonte energética.

Além disso, os controladores operam de forma independente para decidir quando ativar a irrigação, com base nos valores de umidade coletados. Os dados são enviados para o ESP32 central via ESP-NOW, permitindo o monitoramento remoto e o armazenamento das informações no servidor.

3.2.1.2 ESP estação ou ESP32 central

O ESP32 central ilustrado na Figura 7, também chamado de estação, é o principal ponto de coleta de dados enviados pelos controladores de irrigação, ele recebe dados brutos em formato de texto sobre a umidade do solo analisada pelo sensor capacitivo e o *status* de abertura da válvula solenóide (ex.: “*umidity:4095,irrigation:on*”), consolidando esses dados em um texto (*string*) JSON (*JavaScript Object Notation*) padronizado (ex.: {*‘umidade’:4095,‘irrigation’:‘on’*}) antes de transmiti-los ao servidor via conexão USB.

Figura 7 – ESP32 central ou estação



Fonte: Autoria Própria (2025)

Esse fluxo de envio de mensagem pela estação garante que o sistema de irrigação opere de forma centralizada, mantenha o monitoramento contínuo das atividades dos controladores e mantenha a coordenação entre os controladores.

3.2.1.3 Servidor Node.js

Responsável pelo processamento e armazenamento de dados recebidos da estação, o servidor, feito em Node.js, é um ambiente de execução *JavaScript* (ECMAScript, 2025) de código aberto e multiplataforma, que garante a comunicação entre os dispositivos de irrigação

e o sistema de monitoramento. O servidor recebe as mensagens JSON transmitidas via USB, interpreta os dados, monitora o *status* da irrigação e gera *logs* locais para registrar o histórico de funcionamento do sistema, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Informação tratada exibida via terminal pelo servidor

```
Resposta do servidor HTTP: { message: 'Dados recebidos com sucesso!' }
Dados recebidos do ESP32: Slave 0 - MAC: a0:dd:6c:0f:ec:f0, Message: {"sensor_name": "Sensor A", "humidity": 4095, "irrigation": "on"}, Status: Active
{
  MAC: 'a0:dd:6c:0f:ec:f0',
  message: { sensor_name: 'Sensor A', humidity: 4095, irrigation: 'on' },
  status: 'active',
  timestamp: '28/02/2025-18:01:45'
}
```

Fonte: Autoria Própria (2025)

Os dados das mensagens recebidas incluem o endereço MAC (*Media Access Control*) do dispositivo, um identificador único atribuído a uma interface de rede, além do nome do sensor, do valor da umidade do solo, do status da irrigação e do status atual do dispositivo, que indica se ele está desativado ou fora de alcance, e, por fim, também inclui a data do envio da mensagem. Dessa forma, com essas informações, se torna possível rastrear o histórico de funcionamento do sistema e seus controladores.

O servidor também é responsável por armazenar os eventos de irrigação sempre que a irrigação é iniciada ou finalizada, nisso o sistema registra os horários e a duração do evento, gerando os *logs* em formato JSON organizados por data como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Logs de irrigação gerados pelo sistema

```
artie@artie:~/hydroMesh_project_server/irrigation_logs$ ls
log_02-02-2025.json  log_17-01-2025.json  log_22-01-2025.json
log_03-02-2025.json  log_18-01-2025.json  log_23-01-2025.json
log_04-02-2025.json  log_19-01-2025.json  log_24-01-2025.json
log_14-01-2025.json  log_20-01-2025.json  log_31-01-2025.json
log_16-01-2025.json  log_21-01-2025.json
```

Fonte: Autoria Própria (2025)

Além disso, o servidor expõe um *endpoint* HTTP para recebimento e registro dos dados, permitindo a integração com outras aplicações e interfaces de monitoramento.

3.3 Aspectos do sistema

A seguir, serão apresentados os testes e desempenho do sistema de irrigação e monitoramento automatizados, destacando aspectos críticos observados durante sua implementação e operação.

3.3.1 Instalação do protótipo

A instalação do protótipo para os testes foi planejada de forma a garantir a funcionalidade do sistema em um ambiente controlado, mas que simula o máximo possível condições reais de uso. Foi montado um pequeno espaço utilizando canos de PVC (Figura 10), sendo dois canos maiores destinados ao apoio do solo, adubado com material orgânico, e à criação da horta, enquanto um cano menor foi utilizado para simular o encanamento da irrigação automática. Este espaço foi instalado em uma área coberta, mas com acesso direto à luz solar, garantindo que as condições de irrigação fossem representativas de um ambiente ao ar livre.

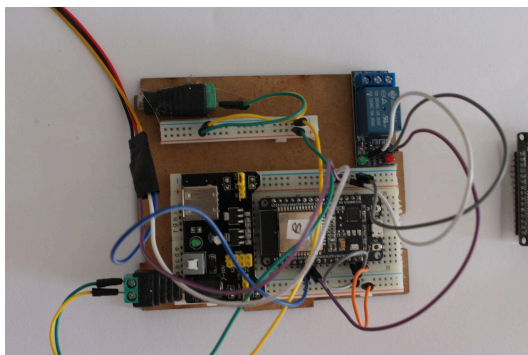
Figura 10 - Espaço de testes de irrigação do protótipo



Fonte: Autoria Própria (2025)

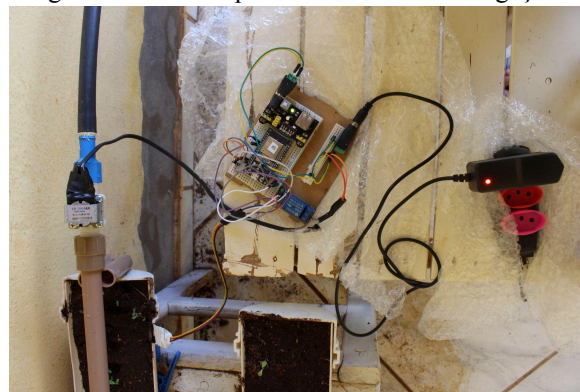
A localização do protótipo foi escolhida próxima a uma conexão de água encanada, facilitando a conexão da mangueira ao cano onde a válvula solenóide foi instalada. Essa configuração permitiu que o sistema fosse alimentado com água continuamente durante os testes.

Figura 11 – Protótipo do controlador de irrigação sem o solenóide



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 12 – Protótipo do controlador de irrigação



Fonte: Autoria Própria (2025)

Como pode ser visto na Figura 11, o protótipo do controlador de irrigação foi montado sobre uma fina placa de madeira, permitindo uma boa organização dos componentes eletrônicos. Embora o sistema pudesse ser alimentado por baterias, foi optado pelo uso de uma fonte de 12V conectada a uma tomada elétrica comum (Figura 12), mantendo maior estabilidade e autonomia para os testes.

Figura 13 – Estação (ESP32 central) conectada via USB ao servidor caseiro



Fonte: Autoria Própria (2025)

A estação foi conectada via USB a um computador local representado por um notebook Dell Inspiron 13 (Figura 13), que executa uma distribuição Linux, mais especificamente a Ubuntu Server 24.04.2 LTS (CANONICAL, 2024). O notebook, equipado com 4 GB de RAM e 1TB de HDD, está conectado a um monitor via HDMI, permitindo fácil visualização do terminal do sistema, mesmo com a tampa do notebook abaixada.

Após a instalação do Node.js e de um gerenciador de pacotes como o NPM (*Node Package Manager*), o servidor foi configurado para hospedar e disponibilizar os *endpoints* HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) necessários para a comunicação com o sistema.

3.3.2 A comunicação

Durante os testes práticos, foi possível verificar o alcance da comunicação entre o ESP32 central e o controlador de irrigação utilizando o protocolo ESP-NOW, mesmo sem o uso de uma antena maior. Em um teste realizado para avaliar o alcance do ESP-NOW, o controlador foi posicionado em um ponto fixo, enquanto que o ESP estação foi transportado manualmente e conectado a um notebook para observação do terminal de comandos. O experimento consistiu em aumentar gradativamente a distância entre os dispositivos, seguindo uma trajetória em linha reta em um terreno plano, enquanto era monitorado o status da conexão. Mesmo com a presença de uma parede entre os dispositivos, a comunicação foi mantida até aproximadamente 22 metros.

No ambiente de instalação do protótipo, o ESP central estava localizado a cerca de 10 metros do controlador e entre eles havia 3 paredes como obstáculos e ainda assim a comunicação foi estabelecida rapidamente até mesmo na reinicialização do ESP central, o que demonstra a robustez do protocolo ESP-NOW em cenários com obstáculos.

Os resultados demonstram o quão eficiente pode ser o ESP-NOW para sistemas pervasivos, especialmente em ambientes onde a distância e obstáculos podem interferir na comunicação.

4 RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos a partir da execução dos testes realizados com o sistema de irrigação e monitoramento automatizados. Nisso, para avaliar a eficácia do protótipo, foi conduzido um experimento comparativo entre a irrigação automática e uma irrigação manual.

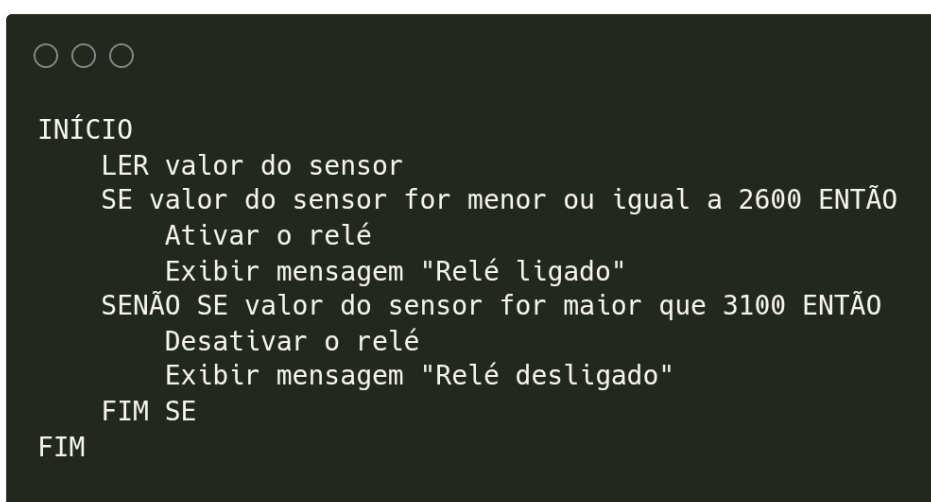
4.1 Validação do protótipo em campo

Durante um período de 15 dias, foram coletados dados diários sobre o tempo de ativação das válvulas, permitindo determinar a quantidade de água consumida pelo sistema automatizado. Paralelamente, registrou-se a quantidade de água utilizada na irrigação manual para fins comparativos.

Para calcular a quantidade de água utilizada por minuto pelo sistema, foi realizado anteriormente um teste de vazão utilizando o cano de PVC menor. Os testes indicaram que o cano escolhido possui uma vazão de 800 ml por minuto. Já a medição da irrigação manual foi feita por meio de um recipiente graduado, com capacidade de 0ml a 750ml, permitindo aferir com precisão o volume de água utilizado em cada irrigação.

Para determinar os valores característicos de umidade no solo, foi realizado um teste empírico, coletando medições do sensor em diferentes condições de umidade. Durante esses testes, foi possível identificar que o valor de capacitância médio para o solo úmido é abaixo de 2600 unidades do ADC, enquanto para solo seco é 3100 unidades, esses valores representam os valores do ADC correspondentes à variação na capacitância do solo. O pseudocódigo da Figura 14 ilustra a lógica de ativação e desativação da irrigação.

Figura 14 – Pseudocódigo da condicional de irrigação



Fonte: Autoria Própria (2025)

As informações foram organizadas de forma comparativa, como podemos ver na Tabela 1, permitindo a análise do desempenho do sistema em relação ao método tradicional de irrigação.

Tabela 1 - tabela comparativa entre irrigação manual e a automatizada pelo protótipo

Data	Horta manual Qtd de água (ml)	Horta automatizada Qtd de água (ml)	Observações
14/01/2025	0 ml	267 ml	
16/01/2025	1850 ml	80 ml	
17/01/2025	0 ml	693 ml	
18/01/2025	0 ml	320 ml	Ocorreram chuvas

19/01/2025	0 ml	53 ml	
20/01/2025	0 ml	160 ml	
21/01/2025	0 ml	160 ml	
22/01/2025	750 ml	240 ml	
23/01/2025	0 ml	0 ml	Ocorreram chuvas e houve ajustes no protótipo
24/01/2025	0 ml	0 ml	Ocorreram chuvas
30/01/2025	1750 ml	0 ml	Houve ajustes no protótipo
31/01/2025	0 ml	0 ml	
02/02/2025	0 ml	107 ml	
03/02/2025	500 ml	134 ml	
04/02/2025	0 ml	0 ml	Ocorreram chuvas
Total	4850 ml	2214 ml	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados coletados e apresentados na Tabela 1 permitiram uma análise mais detalhada do desempenho do sistema automatizado, levando em consideração as práticas comuns de irrigação manual, como regar de acordo com a observação visual da umidade do solo.

No início da irrigação, a horta manual foi regada com uma quantidade significativa de água, suficiente para deixar o solo visivelmente úmido, dado que o solo utilizado, majoritariamente composto por substrato orgânico, estava inicialmente bastante seco. A definição da quantidade a ser aplicada foi determinada com base em uma avaliação direta das condições do solo e das necessidades do cultivo. Com isso, essa prática foi realizada com intuito de garantir que a horta manual recebesse a quantidade adequada de água, de acordo com as necessidades perceptíveis para o cultivo.

Em contraste, o sistema automatizado, no início, aplicou uma quantidade menor de água (aproximadamente 347 ml do dia 14/01 ao dia 16/01), com o objetivo de umedecer o solo de forma mais gradual e controlada. A irrigação automatizada aparentou hidratar o solo aos poucos, detectando o aumento de umidade interna do solo, ao invés de umedecer a superfície visivelmente, como foi feito na irrigação manual. Essa diferença de abordagem reflete a tentativa do sistema de fornecer a quantidade exata de água necessária, em intervalos mais controlados, sem sobrecarregar o solo.

Nos dias subsequentes, no período do dia 17/01 a 21/01 houve uma pausa na irrigação da horta manual, pois o solo, enriquecido com substrato, permaneceu visivelmente úmido e sem sinais evidentes da necessidade de rega. Em contrapartida, o sistema de irrigação automatizado continuou operando em intervalos, resultando no uso de aproximadamente 1386 ml de água. Isso levou a um total de 1733 ml de água consumidos pela irrigação automatizada até aquele momento, representando 93,68% do volume utilizado pela irrigação

manual para manter a horta úmida durante a semana. Nesse cenário se observou uma economia de água de aproximadamente 6,32% naquela semana.

No dia 22/01, observou-se uma leve necessidade de rega na horta manual, sendo utilizado 750 ml de água até que o solo ficasse, novamente, visivelmente úmido. Já na horta automatizada, o sistema utilizou 240 ml, mantendo a continuidade das pequenas irrigações diárias tendo, somente nesse dia, já uma economia de aproximadamente 510 ml.

Entre os dias 23/01 e 29/01, imprevistos como chuvas fortes e raios obrigaram à interrupção temporária do protótipo e seu reposicionamento, especialmente devido à necessidade de acesso à fonte de alimentação elétrica, tendo em vista a escolha do uso da fonte 12v, e a fim de evitar riscos decorrentes de possível contato dos componentes eletrônicos do protótipo com a água.

Durante esse período, aproveitou-se o desligamento do sistema para verificar a calibração e o funcionamento dos valores de capacitância do sensor de solo, convertidos pelo ADC do ESP32. Além disso, foram corrigidos possíveis vazamentos no encanamento ligado à entrada da torneira solenóide que poderiam afetar na eficiência econômica da irrigação automática.

A partir do dia 30/01, o ambiente foi reposicionado e o sistema voltou a operar. Observou-se que o solo da irrigação manual estava seco, e foi necessário utilizar 1750 ml para umedecer o solo novamente. A irrigação automatizada, por sua vez, estava mais exposta a água devido aos testes realizados durante o período de desligamento, os quais consistiram em realizar a análise de valor necessário para ativar a torneira solenóide o que, algumas vezes, causou acidentalmente a irrigação mesmo sem a necessidade, resultando em um solo já umedecido e com registros de irrigação ausentes. Isso ocasionou uma perda de precisão na análise comparativa durante essa segunda semana de testes.

No dia 01/02, não houve registros de irrigação automática, possivelmente devido à retirada acidental da fonte de alimentação por terceiros. A irrigação manual, por sua vez, foi mantida sem regar até o dia 03/02, quando foi novamente observada a necessidade de rega, para isso foram utilizados pela última vez 500ml de água. E, por fim, entre os dias 02/02 e 04/02, o sistema automatizado realizou aproximadamente 241 ml de irrigação.

Figura 15 – Horta manual com brotos



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 16 – Horta automatizada com brotos



Fonte: Autoria Própria (2025)

Apesar dos imprevistos e das condições climáticas adversas, os dados coletados oferecem uma visão da eficiência do sistema e com resultados visíveis nas hortas ao longo do período de testes, como ilustrado nas Figuras 15 e 16. Mesmo com as interrupções e variações, é possível notar que a irrigação automatizada procurou manter o consumo da água mais controlado em comparação à irrigação manual, que simula o método tradicional de rega baseado em observação visual. Além disso, na primeira semana foi registrada uma economia de pouco mais de 6%, o que já sugere um potencial de economia de água a ser explorado, e os dados apresentados revelam que, durante o período de testes completo com o método escolhido e ambiente montado, a irrigação manual utilizou um total de 4850 ml de água, enquanto que o sistema automatizado consumiu 2214 ml, representando uma economia de 54,3% de água.

É importante destacar que o método de irrigação escolhido e a implementação do ambiente de irrigação possuem impactos diretos nos resultados da economia de água. Com isso, os resultados obtidos fornecem informações úteis para a análise e aprimoramento do sistema, objetivando otimizar seu desempenho e melhorar sua precisão.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos estabelecidos para o trabalho, foi desenvolvido um protótipo de monitoramento e irrigação automática, voltado para pequenos produtores. O sistema foi estruturado com base em dispositivos *IoT* e conceitos de sistemas distribuídos, o que permite fácil modularização e escalabilidade. Além disso, o sistema disponibiliza um *endpoint* HTTP, viabilizando sua integração com diversas formas de visualização como interfaces online, aplicativos ou outras plataformas.

Pode-se concluir que é possível criar uma irrigação automatizada que possua um potencial considerável de expansão de forma modular, permitindo a adição de controladores ao microcontrolador principal, essa característica de expansão facilita a adaptação do sistema para diferentes tamanhos de hortas. Além disso, a análise dos resultados sugere que o sistema pode contribuir para a redução do desperdício de água, principalmente quando se considera de

forma cuidadosa o controle de vazão de água, que é um fator importante na eficiência do sistema.

Com isso, embora os resultados não possam ser considerados definitivos, algumas evidências indicam que o protótipo tem um bom desempenho e pode ser aprimorado para atender as necessidades de irrigação e monitoramento em determinados ambientes.

Durante o desenvolvimento do sistema foram enfrentados alguns desafios, como a organização eletrônica do protótipo que exigia um planejamento para a disposição dos componentes e a integração entre os sensores e atuadores, permitindo alimentação de componentes 12v e 5v na mesma protoboard. Além disso, a necessidade de adaptar o sistema às condições climáticas apresentou dificuldades, levando a decisão de focar na proteção do protótipo para validar seu funcionamento antes de outras otimizações. Não só isso, mas também as adversidades climáticas introduziram variáveis externas não controladas, dificultando a obtenção de resultados consistentes nas análises de desempenho em determinados momentos.

Como contribuições deste trabalho, além de um estudo sobre a viabilidade e o desempenho do sistema de irrigação automatizada, podemos considerar que o protótipo desenvolvido representa uma evolução por sua modularidade.

Para trabalhos futuros derivados deste, é possível refinar os requisitos do sistema, introduzindo funcionalidades mais amplas, como o monitoramento e uso de parâmetros ambientais além da umidade do solo ou a integração de algoritmos de inteligência artificial para aumentar a precisão dos dados de monitoramento e da irrigação. Além disso, é possível realizar a criação de interfaces gráficas para facilitar a visualização pelo usuário, seja ela uma interface web ou via aplicativo móvel. Outra possibilidade envolve a implementação de mecanismos mais detalhados de registro de dados, permitindo uma análise mais formal do desempenho do protótipo, com um histórico mais completo das leituras e ações do sistema. Dessa forma, essas melhorias possuem o potencial de tornar o sistema mais robusto e adaptável a diferentes cenários agrícolas.

REFERÊNCIAS

ARDUINO. *Arduino IDE*. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 23 fev. 2025.

CANONICAL. *Ubuntu Server 24.04.2 LTS*. Disponível em: <https://ubuntu.com/download/server>. Acesso em: 12 mar. 2025.

DIEN TU NHAT TUNG. ESP32-WROOM-32 Type-C 38-pin CP2102 Kit de desenvolvimento. 2024. Disponível em: <https://dientunhattung.com/wp-content/uploads/2024/11/esp32-wroom-32-type-c-38pin-cp2102-kit-phat-trien-ho-esp32.png>. Acesso em: 10 mar. 2025.

DOS SANTOS, Bruna Pires et al. Agricultura e Irrigação no Brasil no cenário das Mudanças Climáticas. *Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável*, v. 1, n. 2, 2022.

ECMAScript. *ECMAScript Language Specification*. 2024. Disponível em: <https://tc39.es/ecma262/>. Acesso em: 24 mar. 2025.

ERIDANI, Dania; ROCHIM, Adian Fatchur; CESARA, Faiz Noerdiyan. Comparative performance study of ESP-NOW, Wi-Fi, bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance. In: 2021 international seminar on application for technology of information and communication (iSemantic). IEEE, 2021. p. 322-328.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ADC - ESP32 API reference*. ESP-IDF v4.2. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.2/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>. Acesso em: 10 mar. 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP-NOW: Solution for Low-Power Connectivity. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>. Acesso em: 13 fev. 2025.

FEDERAL INFORMATION PROCESSING STANDARDS PUBLICATION. Advanced Encryption Standard (AES). FIPS PUB 197. National Institute of Standards and Technology, 2001.

FIGUEIREDO, Thiago Silva de et al. *Internet das Coisas Sociais: uma abordagem quantitativa*. 2024.

FRITZING. Fritzing: open-source hardware design software. Disponível em: <https://fritzing.org/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

INTERNET SOCIETY. *Internet Society*. Disponível em: <https://www.internetsociety.org/internet/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

ISNANTO, R. Rizal, WINDARTO, Yudi Eko, GLORIAWAN, Jonathan Imago Dei, CESARA, Faiz Noerdiyan. Design of a robot to control agricultural soil conditions using ESP-NOW protocol. In: 2020 fifth international conference on informatics and computing (ICIC). IEEE, 2020. p. 1-6.

NODE.JS FOUNDATION. *Node.js*. Disponível em: <https://nodejs.org/en>. Acesso em: 12 mar. 2025.

PUB, Fips. Secure hash standard (shs). Fips pub, v. 180, n. 4, p. 180-4, 2012.

REQUIÃO, Bruna Caroline; DE FÁTIMA KOVATLI, Marilei; GEESDORF, Curt. BOINC: a contribuição da computação distribuída nos avanços científicos. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 3, p. 22016-22035, 2021.

RIVEST, Ronald L.; SHAMIR, Adi; ADLEMAN, Leonard. A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, v. 21, n. 2, p. 120-126, 1978.

ROBOCORE. Sensor de Umidade de Solo Capacitivo. Disponível em: <https://www.robocore.net/sensor-ambiente/sensor-de-umidade-de-solo-capacitivo>. Acesso em: 23 fev. 2025

ROCHA, Luís Othávio; GUIMARÃES, Carla Regina Rocha; DE OLIVEIRA, Rosângela Aparecida Pereira. exploração do uso eficiente de recursos hídricos na agricultura: investigação de técnicas de irrigação e tecnologias para a minimização do desperdício de água. *Revista foco*, v. 17, n. 4, p. e4950-e4950, 2024.

RODRIGUES, Geraldo Stachetti; IRIAS, Luiz José Maria. *Considerações sobre os impactos ambientais da agricultura irrigada*. 2004.

SÁNCHEZ, Hugo Alberto Guadarrama. De la computación pervasiva a los sistemas de información pervasivos. *Investigación Bibliotecológica: archivonomía, bibliotecología e información*, v. 38, n. 99, p. 35-54, 2024.

SILVA, Eduardo Corneto; ESPEJO, Márcia Maria dos Santos Bortolucci. Adoção da Internet das Coisas (IoT) na agropecuária: uma revisão sistemática sobre as possibilidades de adoção no ambiente produtivo rural brasileiro. *Interações (Campo Grande)*, 2024.

SIMÕES, Priscila Bayer De Oliveira; ROSSI, Rogério. Internet of things data streaming and maintenance 40: a literature review internet das coisas dados em tempo real e manutenção 40: uma revisão da literatura. 2024.

STROPARO, Telma Regina. Transformação digital na agricultura: Impactos da Internet das Coisas (IoT) na eficiência produtiva e sustentabilidade. *Lumen et Virtus*, v. 15, n. 38, p. 1573-1581, 2024.

TYPESCRIPT. *TypeScript: JavaScript with syntax for types*. Disponível em: <https://www.typescriptlang.org/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

WEYMAR, R. R.; MEDEIROS, F. A.; REIS, A. V. Desafios e possibilidades da IoT na agricultura 4.0. 2024.