

Desenvolvimento de uma Plataforma de Controle e Monitoramento de Variáveis do Meio Ambiente Aplicado à Olericultura

Raul Konrrado Machado da Silva¹, Fernando de Cristo¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha (IFFar)
Campus Frederico Westphalen
Frederico Westphalen – RS – Brasil

²Curso de Bacharelado em Ciência da Computação

raul.2021009398@aluno.iffar.edu.br

fernando.cristo@iffar.edu.br

Abstract. *This paper presents the development and validation of a low-cost platform for irrigation control and monitoring in olericulture. The solution integrates Internet of Things (IoT) and web systems, employing the ESP8266 microcontroller with Wi-Fi connectivity to interface with soil moisture sensors and relay modules. The software, built upon the Django framework, enables centralized management of multiple cultivation units, offering automatic and manual operating modes, as well as remote configuration and historical data visualization interfaces. Validation was conducted in a real cultivation environment under operational field conditions. The results demonstrate that the automation reduced manual intervention, ensured soil water stability through demand-based cycles and provided the producer with an effective decision-support tool.*

Keywords: *Internet of Things; ESP8266; automated irrigation; vegetable crops; Django.*

Resumo. *Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação de uma plataforma de baixo custo para o controle e monitoramento da irrigação na olericultura. A solução integra a Internet das Coisas (IdC) e sistemas web, utilizando o microcontrolador ESP8266 com conectividade Wi-Fi para atuar sobre sensores de umidade e módulos de relé. O software, estruturado sobre o framework Django, viabiliza o gerenciamento centralizado de múltiplas unidades de cultivo, oferecendo modos de operação automático e manual, além de telas para configuração remota e visualização de históricos. A validação foi conduzida em ambiente real de cultivo, sob condições operacionais de campo. Os resultados demonstram que a automação reduziu a intervenção manual, garantiu a estabilidade hídrica do solo por meio de ciclos baseados na demanda e forneceu ao produtor uma ferramenta eficaz de suporte à decisão.*

Palavras-chave: *Internet das Coisas; ESP8266; irrigação automatizada; olericultura; Django.*

1. Introdução

A olericultura, ramo da agricultura dedicado ao cultivo de hortaliças, exige um manejo criterioso da irrigação para assegurar produtividade e qualidade dos alimentos, conforme discutido por Filgueira (2008). O excesso de água favorece a lixiviação de nutrientes, o surgimento de doenças e o desperdício de recursos hídricos; por outro lado, a deficiência hídrica compromete diretamente o desenvolvimento fisiológico das plantas (Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2009). Em pequenas e médias propriedades, esse controle ainda é predominantemente realizado de forma manual e empírica, resultando em baixa eficiência operacional e elevado risco de falhas no manejo.

No âmbito do Trabalho de Conclusão de Curso I (TCC I), foi proposta e documentada uma plataforma de controle e monitoramento de variáveis ambientais aplicada à olericultura, contemplando o estudo teórico, o levantamento de requisitos e a modelagem da solução. Na etapa subsequente, correspondente ao TCC II, a proposta foi efetivamente implementada, instalada e validada em ambiente real de cultivo.

O presente trabalho descreve essa fase de implementação e validação experimental. O objetivo principal consiste em desenvolver uma plataforma de automação da irrigação baseada em microcontroladores da família Espressif (ESP8266), integrados a sensores de umidade do solo, módulos de relé e a uma aplicação *web* construída sobre o *framework Django*. O sistema permite ao usuário configurar parâmetros de operação, acompanhar leituras em tempo quase real e alternar entre os modos automático e manual de acionamento da irrigação.

Além da contribuição técnica, a proposta busca fornecer ao produtor uma solução acessível e de baixo custo, capaz de promover o uso racional da água, reduzir a dependência de intervenções empíricas e ampliar a eficiência do manejo hídrico, contribuindo diretamente para a sustentabilidade produtiva da agricultura familiar.

2. Referencial Teórico

A fundamentação teórica deste trabalho integra conceitos interdisciplinares essenciais ao desenvolvimento da solução proposta, abrangendo a Internet das Coisas (IdC), a arquitetura de sistemas embarcados e a agricultura de precisão. Inicialmente, discute-se o paradigma da IdC e o papel dos microcontroladores como nós de borda capazes de conectar o ambiente físico à rede mundial de computadores. Em seguida, abordam-se os protocolos de comunicação e os formatos de dados necessários para garantir a interoperabilidade entre o *hardware* e a aplicação *web*. Por fim, analisa-se a aplicação dessas tecnologias na automação da irrigação em olericultura, demonstrando como o monitoramento objetivo da umidade do solo contribui para a eficiência hídrica e operacional no campo.

2.1. Automação de irrigação e olericultura

A automação da irrigação busca substituir o manejo empírico por decisões fundamentadas em medições objetivas do ambiente. Segundo Filgueira (2008), essa abordagem é particularmente relevante na olericultura, visto que as hortaliças apresentam ciclos curtos e elevada sensibilidade fisiológica tanto ao déficit quanto ao excesso hídrico.

Esse rigor no controle alinha-se aos princípios da Agricultura de Precisão, que, conforme Molin et al. (2015), propõe o gerenciamento da lavoura considerando suas variabilidades espaciais e temporais para aplicar insumos — neste caso, a água — apenas no

momento e na quantidade exata de necessidade. Em cultivos a céu aberto, sujeitos à ação direta do sol e dos ventos, Bernardo, Soares e Mantovani (2006) destacam a importância de monitorar a evapotranspiração para realizar a irrigação suplementar de forma precisa, compensando a irregularidade das chuvas sem desperdício de recursos.

A plataforma desenvolvida neste trabalho aproxima esses conceitos técnicos do contexto da pequena propriedade rural. Operacionalmente, o sistema monitora continuamente a umidade do solo em pontos estratégicos do canteiro. Ao identificar valores inferiores ao parâmetro predefinido, o controlador aciona automaticamente a irrigação, assegurando reposição hídrica estritamente sob demanda. Esse mecanismo reduz a subjetividade da análise visual e desonera o produtor do monitoramento constante exigido pelas variações climáticas.

2.2. Arquitetura de sistemas embarcados e Internet das Coisas

A Internet das Coisas é definida por Atzori, Iera e Morabito (2010) como a tecnologia que viabiliza a interconexão digital entre dispositivos físicos, permitindo que objetos do mundo real participem ativamente de sistemas computacionais distribuídos. No contexto da agricultura de precisão, essa conectividade possibilita o registro histórico de dados, o monitoramento remoto e o controle distribuído, recursos apontados por Ray (2017) como fundamentais para a modernização do manejo agrícola.

Para materializar essa conectividade no ambiente físico, utilizam-se sistemas embarcados. Conforme Lee e Seshia (2017), diferentemente de computadores de propósito geral, esses sistemas são projetados para funções dedicadas, operando frequentemente sob restrições de tempo real, consumo energético e confiabilidade, integrando-se diretamente ao ambiente controlado.

Na solução proposta, o núcleo do sistema embarcado é o microcontrolador ESP8266, selecionado por apresentar excelente custo-benefício ao integrar capacidade de processamento e conectividade *Wi-Fi* em uma única plataforma (Espressif Systems, 2020). Adotando a abordagem de *Edge Computing* descrita por Shi et al. (2016), o dispositivo atua como nó de borda, realizando processamento local, tomada de decisão autônoma e interação direta com o ambiente físico.

Essa interação ocorre por meio da leitura do sensor de umidade do solo, que converte a grandeza física em um sinal analógico interpretado pela entrada A0 do microcontrolador e normalizado para uma escala percentual de 0 a 100%. Com base nesses dados, o sistema aciona o módulo de relé responsável pelo controle da válvula de irrigação, realizando decisões locais sem dependência de intervenção humana constante.

2.3. Protocolos de comunicação e formatos de dados

O projeto adota o protocolo *HTTP* como base para o tráfego de informações entre o *hardware* e o servidor. Segundo Gubbi et al. (2013), a flexibilidade desse protocolo é um fator determinante para a escalabilidade de soluções em IdC. A arquitetura de comunicação implementa o padrão *REST*, no qual o microcontrolador atua como agente iniciador das conexões, realizando a sincronização periódica dos dados.

O fluxo de informações é controlado por dois métodos principais: o método *POST*, utilizado pelo dispositivo para transmitir as leituras de umidade ao servidor, e o método

GET, acionado periodicamente para consultar comandos de irrigação e parâmetros de configuração armazenados no banco de dados.

Devido às diferenças entre as linguagens do microcontrolador (C++) e do servidor (Python), adotou-se a serialização dos dados no formato *JSON* como mecanismo de interoperabilidade entre os componentes do sistema. Os dados coletados pelo ESP8266, como a umidade do solo e as informações de autenticação, são organizados nesse formato e enviados ao servidor por meio de requisições *HTTP* do tipo *POST*. Em sentido inverso, os parâmetros de configuração e comandos de controle são transmitidos ao dispositivo por requisições *GET*, sendo interpretados pelo microcontrolador para a execução das ações correspondentes. Essa implementação permite que estruturas de dados complexas sejam convertidas em mensagens textuais padronizadas, garantindo comunicação consistente entre sistemas heterogêneos. Essa abordagem garante leveza computacional, compatibilidade com dispositivos de recursos limitados e integração eficiente com a aplicação *web* (Melé, 2020).

A segurança da plataforma é assegurada por meio de um mecanismo de autenticação baseado em *tokens*. Cada dispositivo físico possui uma credencial digital exclusiva embutida em seu código, e o servidor rejeita qualquer requisição que não apresente a chave válida, garantindo que apenas dispositivos autorizados possam interagir com o sistema.

2.4. Trabalhos relacionados

A literatura especializada confirma a viabilidade técnica e o retorno econômico da automação aplicada à agricultura familiar. Correia, Rocha e Rissino (2016) demonstram uma economia média de 26% no consumo de água em sistemas de irrigação monitorados via aplicação *web*. Cunha e Rocha (2015) validam a aplicação de plataformas embarcadas na automação do processo de irrigação, enquanto Jesus et al. (2021) destacam a otimização do tempo do agricultor como um ganho gerencial estratégico.

Embora relevantes, muitos desses estudos baseiam-se em plataformas *Arduino*, o que impõe limitações de conectividade e escalabilidade. O presente trabalho avança essa abordagem ao empregar o microcontrolador ESP8266 com conectividade *Wi-Fi* nativa, reduzindo a complexidade do *hardware* e ampliando a capacidade de integração em rede. Além disso, a proposta diferencia-se por focar a olericultura em ambiente aberto e oferecer uma arquitetura *web* escalável baseada em *Django*, composta por uma interface *web* que centraliza e simplifica o gerenciamento de múltiplas hortas, permitindo ao produtor monitorar e controlar diferentes unidades produtivas de forma unificada, preenchendo uma lacuna ainda pouco explorada nos trabalhos anteriores.

2.5. Síntese do referencial teórico

A análise da literatura evidencia que a convergência entre IdC, sistemas embarcados e agricultura de precisão é determinante para a eficiência hídrica e operacional na olericultura. Os estudos analisados sustentam a adoção do ESP8266 e dos padrões *web HTTP/JSON* como soluções robustas, flexíveis e de baixo custo para a interoperabilidade entre dispositivos e sistemas de gestão. Conclui-se, portanto, que a arquitetura proposta encontra sólido respaldo teórico, oferecendo base consistente para a implementação da plataforma desenvolvida.

3. Materiais e Métodos

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados e os procedimentos adotados para o desenvolvimento e a validação da plataforma de automação da irrigação. São descritos a arquitetura geral do sistema, os componentes de *hardware* empregados na montagem do protótipo, o *firmware* implementado no microcontrolador ESP8266, a aplicação *web* responsável pelo armazenamento e visualização das leituras e, por fim, os testes de bancada e em campo realizados para avaliar o funcionamento da solução. Nos subtópicos a seguir detalham-se, respectivamente, a visão geral da arquitetura, o conjunto de *hardware*, o *software* embarcado, o modelo de dados e a metodologia de testes aplicada ao sistema.

Além disso, foi realizada uma estimativa do custo de implementação do protótipo, considerando os principais componentes empregados no sistema, com o objetivo de permitir uma análise comparativa de viabilidade econômica frente a soluções comerciais existentes para automação de irrigação.

3.1. Visão geral da arquitetura

A solução foi estruturada sob uma arquitetura de três camadas (*three-tier architecture*), projetada para assegurar a modularidade, a escalabilidade e a separação de responsabilidades entre o mundo físico e o digital. No nível mais baixo, encontra-se a **Camada de Percepção e Controle (*Edge*)**, onde ocorre a interação direta com o plantio. No protótipo implementado, esta camada é constituída pelo microcontrolador ESP operando como nó de borda, interligado a um sensor de umidade do solo (entrada) e a um módulo de relé (saída) responsável pelo acionamento da válvula solenoide (220 V), tendo como função primordial a aquisição de dados ambientais e a execução local dos comandos de irrigação.

Subindo o nível de abstração, a **Camada de Servidor e Processamento (*Backend*)** centraliza a inteligência e a persistência dos dados. Implementada através do *framework Django* e hospedada em nuvem, esta camada gerencia a autenticação de usuários, o cadastro de múltiplas hortas (*multitenancy*) e o armazenamento histórico das leituras, sendo responsável também por processar as requisições *API* e validar as regras de negócio do sistema. Complementando a arquitetura, a **Camada de Interface e Visualização (*Frontend*)** constitui o ponto de interação com o usuário final. Desenvolvida com tecnologias *web* responsivas, permite ao produtor monitorar gráficos de umidade em tempo real, configurar os parâmetros de irrigação e realizar acionamentos manuais remotamente, sendo acessível via navegador em computadores ou dispositivos móveis.

A integração entre essas camadas é viabilizada pelo protocolo *HTTP*, adotando o padrão *REST* e a serialização de dados em *JSON*, conforme fundamentado no referencial teórico. Para garantir a segurança e a integridade dos dados, implementou-se um mecanismo de autenticação via *Tokens*, onde cada dispositivo físico possui uma credencial exclusiva. Vale ressaltar que, embora a validação de campo tenha sido conduzida com uma unidade física instalada, a arquitetura de *software* foi concebida para suportar a escalabilidade horizontal. O modelo de dados permite que um único usuário gerencie múltiplas hortas simultaneamente, associando cada área de cultivo a um dispositivo ESP distinto, o que prepara a solução para expansão futura.

Adicionalmente, a arquitetura da solução foi concebida de forma modular, na qual cada unidade de cultivo (horta) é associada a um único microcontrolador ESP8266 responsável exclusivamente pela automação de um canteiro. Nesse modelo, cada dispositivo

opera de maneira independente e foi projetado para receber apenas um sensor de umidade do solo, simplificando a lógica de controle, a calibração e a manutenção do sistema. Embora o ESP8266 possua capacidade técnica para a leitura de múltiplos sensores, a adoção dessa abordagem unitária mostrou-se mais adequada ao contexto da aplicação, favorecendo a escalabilidade do sistema, uma vez que a expansão para novos canteiros ocorre pela simples adição de novos módulos ESP, sem necessidade de reconfigurações estruturais no *firmware* ou na aplicação *web*.

3.2. Especificação e montagem do *hardware*

A arquitetura física do sistema integra sensoriamento, processamento e atuação em um nó de controle autônomo, projetado para operar de forma modular e independente. O núcleo da solução é o kit de desenvolvimento NodeMCU, equipado com o microcontrolador ESP8266, ilustrado na Figura 1. A escolha deste componente justifica-se pela sua conectividade *Wi-Fi* nativa e capacidade de processamento, eliminando a necessidade de periféricos de comunicação e simplificando o layout do circuito.

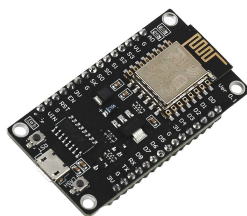


Figura 1. NodeMCU ESP8266.

Para a aquisição de dados, emprega-se um sensor de umidade do solo do tipo resistivo (modelo HD-38), apresentado na Figura 2. Conectado à entrada analógica (ADC) do microcontrolador, o sensor realiza a leitura da resistência elétrica do solo, cuja variação está diretamente associada ao seu teor de umidade: à medida que a umidade aumenta, a resistência medida diminui. Essa característica possibilita o monitoramento contínuo das condições hídricas do solo, fornecendo informações essenciais para o controle automatizado da irrigação.



Figura 2. Sensor de umidade do solo (HD-38).

A *interface* de potência, por sua vez, é gerenciada por um módulo de relé eletromecânico, conforme ilustrado na Figura 3. Esse componente permite a comutação da carga de potência associada à válvula solenoide, permitindo que dispositivos de baixa potência comandem equipamentos de maior consumo energético de forma segura e controlada.

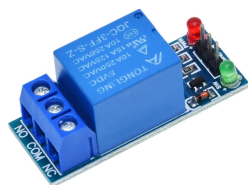


Figura 3. Módulo de relé.

O relé é responsável pelo acionamento direto da válvula solenoide, ilustrada na Figura 4, a qual regula o fluxo de água na tubulação de irrigação. O acionamento elétrico da válvula ocorre por meio de alimentação em 220 V, enquanto o controle lógico do relé é realizado em baixa tensão pelo microcontrolador, assegurando o isolamento adequado entre os circuitos de potência e de controle e garantindo a execução segura da irrigação nos canteiros.



Figura 4. Válvula solenoide.

Visando a validação em campo, a instalação física foi consolidada em uma caixa de proteção hermética posicionada próxima à área de cultivo. O compartimento abriga o microcontrolador, o módulo relé e a fonte de alimentação, protegendo a eletrônica contra intempéries e danos mecânicos, conforme detalhado na Figura 5. Esta disposição organiza as conexões elétricas e mantém a acessibilidade para eventuais manutenções de *hardware*.



Figura 5. Instalação dos Componentes.

Por fim, a integração do sistema à infraestrutura hidráulica é visualizada na Figura 6. O conjunto, composto pela válvula solenoide e tubulações, responde aos comandos do relé para restabelecer a umidade do solo aos níveis configurados no sistema, garantindo a distribuição eficiente da água no canteiro.



Figura 6. Canteiro com a infraestrutura instalada.

A análise dos componentes empregados no protótipo permitiu estimar um custo de implementação situado na faixa de R\$ 200 a R\$ 300, considerando o microcontrolador ESP8266, a válvula solenoide de 220 V, o módulo relé, o sensor de umidade HD-38 e os materiais auxiliares necessários à instalação elétrica e hidráulica. Esse valor evidencia a viabilidade econômica da solução desenvolvida, sobretudo quando comparada a sistemas comerciais de irrigação que oferecem recursos similares de monitoramento e controle.

3.3. Software embarcado no ESP8266

O *firmware* do microcontrolador foi desenvolvido na *IDE* Arduino, aproveitando o ecossistema de bibliotecas nativas para o gerenciamento da pilha *TCP/IP* e do protocolo *HTTP*. A arquitetura de *software* opera em um ciclo de controle contínuo, iniciando pela configuração dos pinos de entrada/saída (*GPIOs*) e pelo estabelecimento da conexão com a rede *Wi-Fi* local através das credenciais de acesso pré-configuradas.

A lógica de funcionamento baseia-se em uma máquina de estados temporizada. Em intervalos regulares, o dispositivo realiza a aquisição do sinal analógico do sensor HD-38, convertendo-o para um valor percentual de umidade através de uma função de mapeamento linear. Esses dados são serializados em formato *JSON* e transmitidos ao servidor *Django* via requisição *POST*.

Imediatamente após o envio da telemetria, o ESP executa uma requisição *GET* para sincronizar seu estado com a aplicação *web* e determinar o modo de operação. No **Modo Automático**, o dispositivo atua como um controlador de borda (*Edge*), comparando a umidade atual com o *setpoint* mínimo configurado; se o solo estiver seco, a bomba é acionada, caso contrário, permanece desligada. Já no **Modo Manual**, o dispositivo delega a decisão ao usuário, limitando-se a executar a instrução (“ligar” ou “desligar”) recebida diretamente do painel *web*.

Visando a robustez do sistema, o código implementa rotinas de segurança (*fail-safe*). Caso ocorra falha na conexão *Wi-Fi* ou erro na comunicação com o servidor, o sistema assume preventivamente o estado de “bomba desligada”, protegendo a infraestrutura hidráulica e evitando o desperdício de água até que a conectividade seja restabelecida.

3.4. Algoritmo de controle do *firmware*

A Figura 7 detalha a lógica de controle implementada no microcontrolador, evidenciando o ciclo de leitura, comunicação e atuação.

```

1: Setup: Configurar pinos (Sensor: Entrada, Relé: Saída)
2: Inicializar Serial e conectar ao Wi-Fi
3: estadoBomba  $\leftarrow$  DESLIGADA
4: while True do                                     ▷ Loop principal
5:   if Wi-Fi desconectado then
6:     Tentar reconexão
7:   end if
8:   if Tempo atual - ultimoEnvio  $\geq$  INTERVALO_LEITURA then
9:     leituraBruta  $\leftarrow$  LerEntradaAnalogica()
10:    umidade  $\leftarrow$  ConverterParaPercentual(leituraBruta)
11:                                     ▷ Envio de Telemetria (POST)
12:    payload  $\leftarrow$  JSON({token, umidade})
13:    respostaPOST  $\leftarrow$  EnviarHTTP_POST(payload)
14:    if respostaPOST é Erro then
15:      failSafe  $\leftarrow$  True
16:    else
17:      failSafe  $\leftarrow$  False
18:    end if
19:                                     ▷ Sincronização de Estado (GET)
20:    dadosServidor  $\leftarrow$  EnviarHTTP_GET()
21:    if dadosServidor é Válido then
22:      Atualizar variáveis: modoAuto, setpoint, comandoManual
23:    else
24:      failSafe  $\leftarrow$  True
25:    end if
26:                                     ▷ Lógica de Atuação
27:    if failSafe é True then
28:      estadoBomba  $\leftarrow$  DESLIGADA
29:    else if modoAuto é True then
30:      if umidade < setpoint then
31:        estadoBomba  $\leftarrow$  LIGADA
32:      else
33:        estadoBomba  $\leftarrow$  DESLIGADA
34:      end if
35:    else                                     ▷ Modo Manual
36:      if comandoManual == "LIGAR" then
37:        estadoBomba  $\leftarrow$  LIGADA
38:      else
39:        estadoBomba  $\leftarrow$  DESLIGADA
40:      end if
41:    end if
42:    AtualizarPinoRele(estadoBomba)
43:    ultimoEnvio  $\leftarrow$  TempoAtual()
44:  end if
45: end while

```

Figura 7. Pseudocódigo.

3.5. Aplicação *web* e modelo de dados

A camada de servidor e processamento (*Backend*) foi implementada sobre o *framework* Django, utilizando seu sistema de mapeamento objeto-relacional (*ORM*) para estruturar o banco de dados. A lógica de negócio organiza-se em torno de quatro entidades principais: o modelo de **Usuários**, que gerencia a autenticação e as permissões de acesso à plata-

forma; a entidade **Horta**, que representa a unidade lógica de cultivo e armazena o *Token* de segurança para vínculo com o dispositivo físico (ESP8266); a tabela de **Leituras**, que atua como uma série temporal persistindo o histórico de umidade e o carimbo de tempo (*timestamp*); e a entidade de **Controle**, que armazena o estado desejado da automação, incluindo o modo de operação (Automático/Manual), o *setpoint* de umidade e o status atual da bomba.

A interação do usuário com o sistema segue um fluxo estruturado para garantir a segurança e a correta execução dos comandos. O processo inicia-se com a autenticação no painel *web*, seguida pela seleção da horta desejada e definição do modo de operação, culminando na execução física da irrigação pelo microcontrolador. Este passo a passo operacional está detalhado no fluxograma da Figura 8.

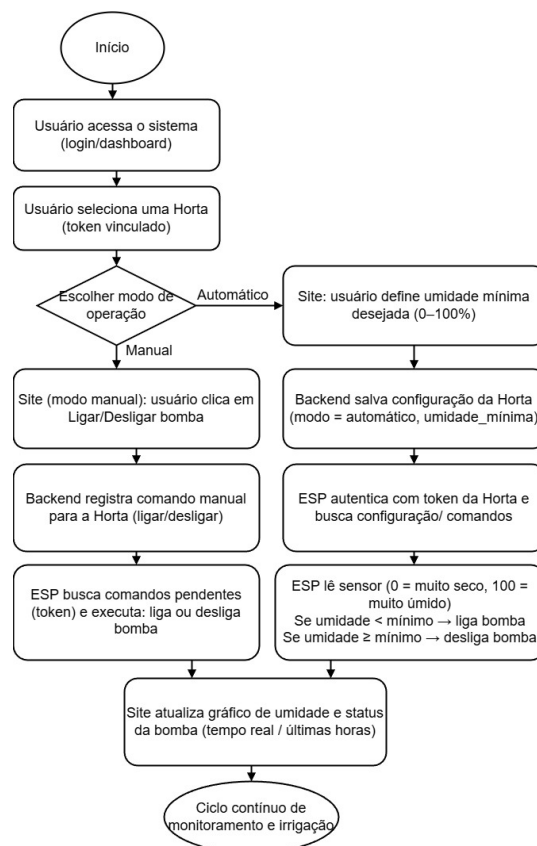


Figura 8. Fluxograma.

No lado do cliente (*Frontend*), a *interface* foi desenvolvida utilizando HTML, CSS e JavaScript, priorizando a responsividade para acesso via dispositivos móveis. O sistema oferece um *dashboard* interativo que permite ao produtor visualizar gráficos de evolução da umidade, monitorar o status das bombas em tempo quase real e alterar as configurações. O conjunto de funcionalidades disponibilizadas aos diferentes perfis de acesso (Usuário Comum e Administrador) está formalizado no diagrama de casos de uso da Figura 9.

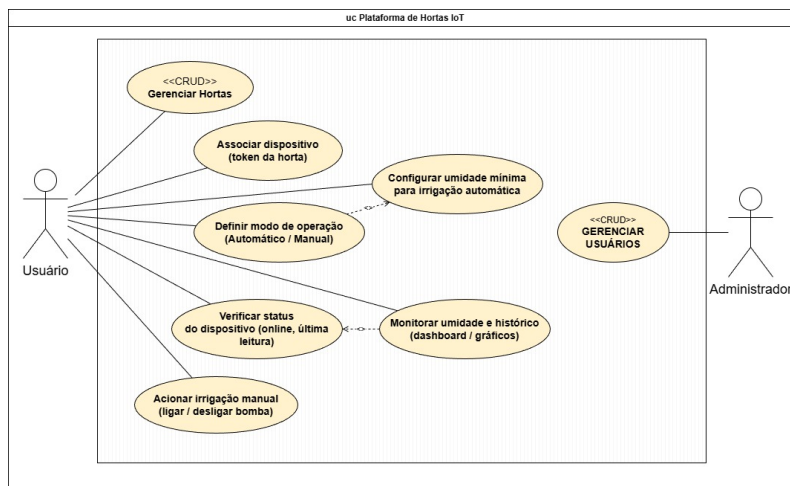


Figura 9. Diagrama de casos de uso.

3.6. interface do sistema

Nesta subseção são apresentadas as principais telas da aplicação desenvolvida, com o objetivo de ilustrar os mecanismos de interação oferecidos ao usuário e evidenciar os recursos disponíveis para a gestão e operação do sistema de irrigação. A interação com a plataforma ocorre por meio de uma interface projetada para facilitar tanto a gestão administrativa quanto a operação diária do produtor. O acesso ao sistema é protegido por uma tela de *login* (Figura 10), que atua como barreira de segurança, exigindo credenciais válidas para autenticar o usuário e liberar as funcionalidades correspondentes ao seu perfil de acesso.

Figura 10. tela login.

Para o perfil administrador, após a autenticação, o sistema disponibiliza um painel administrativo exclusivo, apresentado na Figura 11. Esta tela centraliza o controle de acesso, permitindo visualizar a relação de usuários cadastrados no banco de dados e gerenciar suas permissões, garantindo a governança dos dados da plataforma.

Login	Ações	Nome
fernando	<button>Edit</button> <button>Excluir</button>	Fernando
raul	<button>Edit</button> <button>Excluir</button>	Raul Konrado Machado Da Silva

Figura 11. tela painel administrativo.

Para o perfil comum, após a autenticação, o usuário é direcionado ao *Dashboard* de Hortas, Figura 12. Esta tela fornece uma visão panorâmica das unidades de cultivo vinculadas à conta, exibindo cartões (*'cards'*) que resumem o estado atual de cada horta. O objetivo é permitir que o produtor identifique rapidamente quais setores estão ativos antes de acessar os detalhes específicos.

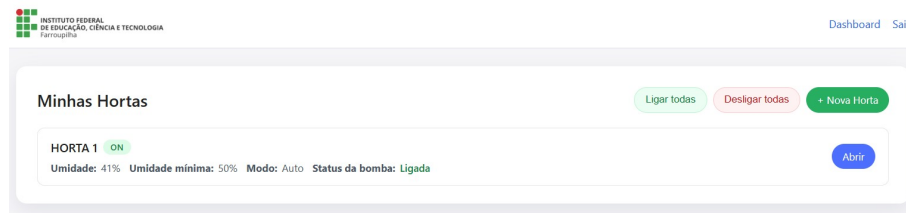


Figura 12. tela painel de hortas

Ao selecionar uma horta específica, o usuário acessa a tela de controle detalhado, ilustrada na Figura 13. Esta é a tela central da operação, onde é possível analisar o histórico de umidade através de gráficos, visualizar o status da conexão do dispositivo e, principalmente, atuar sobre o sistema. Nela, o produtor pode definir o *setpoint* (limiar) de umidade para o modo automático ou alternar para o modo manual, acionando a bomba remotamente.

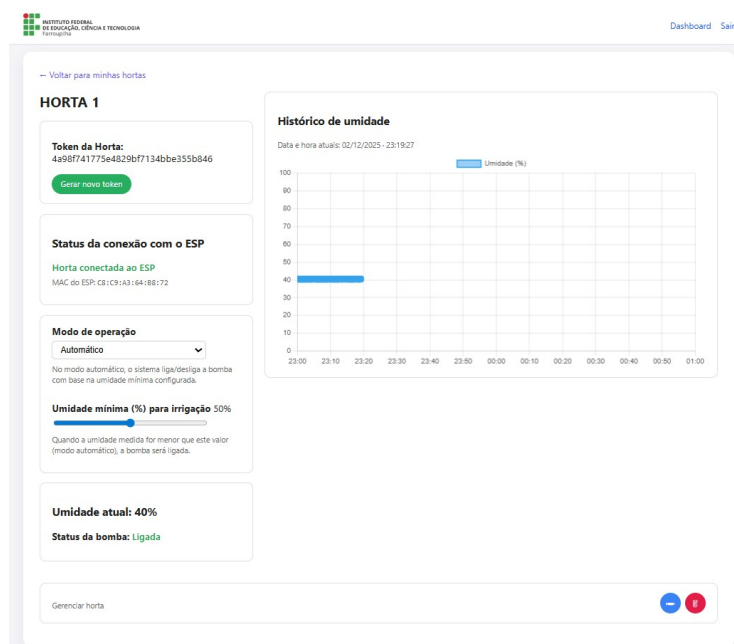


Figura 13. tela de operação.

3.7. Procedimentos de teste e validação

A metodologia de validação do sistema foi estruturada em duas fases distintas e complementares: testes de bancada e testes de campo. Inicialmente, os testes de bancada foram conduzidos em ambiente controlado, visando verificar a lógica funcional do *firmware* e

a integridade do circuito eletrônico. Nesta etapa, simularam-se diferentes estados de saturação hídrica (solo seco, úmido e saturado) para validar a precisão da leitura exibida no *dashboard*, o tempo de resposta do acionamento do relé e a correta serialização dos pacotes *JSON* na comunicação entre o microcontrolador e o servidor.

Posteriormente, a etapa de campo foi conduzida em ambiente operacional de olericultura. O protótipo foi instalado junto a um canteiro produtivo e integrado à infraestrutura hidráulica existente. O monitoramento, mantido por um período contínuo, submeteu o equipamento à ação direta de variáveis climáticas — como radiação solar, chuva e oscilações térmicas —, permitindo avaliar, de forma sistemática, a resistência do sistema por meio da inspeção periódica do invólucro, da verificação de possíveis infiltrações, da observação do funcionamento estável do microcontrolador e da continuidade da comunicação com o servidor ao longo do período de testes.

De maneira complementar, os critérios de avaliação do teste de campo concentraram-se na robustez da conectividade *Wi-Fi* e na capacidade de reconexão automática em caso de falhas; na eficácia da lógica de controle em assegurar que o acionamento da bomba ocorra estritamente sob real necessidade de irrigação; e na validação da Experiência do Usuário, por meio da verificação da intuitividade da tela e da adequação da plataforma à operação cotidiana do produtor.

No que se refere à implantação prática da solução em uma pequena propriedade rural, a instalação do sistema proposto envolve, além dos componentes de *hardware* descritos, a realização de procedimentos técnicos específicos. Esses procedimentos incluem a correta montagem elétrica dos dispositivos, a instalação física do conjunto próximo ao canteiro, a configuração da conexão do microcontrolador ESP8266 à rede *Wi-Fi* disponível na propriedade e o cadastro do dispositivo no servidor da aplicação *web*, associando-o à conta do usuário e à respectiva unidade de cultivo. Dessa forma, a implementação completa da solução requer conhecimentos básicos de eletrônica, redes e configuração de *software*, podendo ser executada por um técnico capacitado ou por um usuário treinado, o que torna a proposta aplicável ao contexto da agricultura familiar desde que acompanhada de orientação técnica adequada.

4. Resultados e Discussão

Esta seção detalha o desempenho da plataforma desenvolvida, analisando a eficácia dos mecanismos de controle, a precisão do monitoramento ambiental e a usabilidade das telas de gestão. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da integração entre o microcontrolador ESP8266 e a arquitetura *web* proposta, validando o sistema tanto em bancada quanto em ambiente operacional de olericultura. A discussão a seguir aborda o comportamento da automação, a calibração dos sensores, a experiência do usuário e as limitações técnicas identificadas.

4.1. Validação do controle e automação

A lógica de automação demonstrou estabilidade operacional durante o período de testes. No **modo automático**, o sistema atuou conforme projetado: o microcontrolador realizou leituras periódicas e acionou o relé sempre que a umidade do solo decaiu para níveis inferiores ao limiar configurado, garantindo ciclos de irrigação consistentes até a estabilização hídrica do canteiro.

No **modo manual**, a plataforma permitiu a intervenção humana imediata por meio do *dashboard*. Os comandos de “ligar” e “desligar” enviados pelo servidor foram recebidos e executados pelo dispositivo de campo com latência mínima, validando a capacidade do sistema de realizar irrigações de reforço e ajustes operacionais no manejo do canteiro.

A eficácia agrônômica da solução pode ser observada inicialmente por meio da comparação visual entre os canteiros submetidos a diferentes estratégias de irrigação. Durante os testes de campo, manteve-se um canteiro operando sob irrigação automatizada por temporização, o qual apresentou episódios de estresse hídrico, evidenciados pelo murchamento das folhas em dias de elevada temperatura (Figura 14a). Em contrapartida, no canteiro gerenciado pela plataforma desenvolvida (Figura 14b), a manutenção contínua da umidade do solo assegurou maior turgidez das plantas e um desenvolvimento vegetativo mais vigoroso.

A comparação entre os dois sistemas de cultivo — o canteiro testemunha operando com automação por temporizador e o canteiro operando com a automação proposta — evidenciou a superioridade da abordagem desenvolvida neste trabalho. Diferentemente de uma programação fixa baseada apenas em tempo, o sistema automatizado foi capaz de responder às variações reais de umidade do solo, inclusive àquelas decorrentes de eventos de precipitação, evitando acionamentos desnecessários da irrigação. Essa resposta dinâmica refletiu-se na economia de água e energia elétrica, além de reduzir o risco de excesso hídrico, condição que poderia comprometer o desenvolvimento das plantas e a produtividade do cultivo.

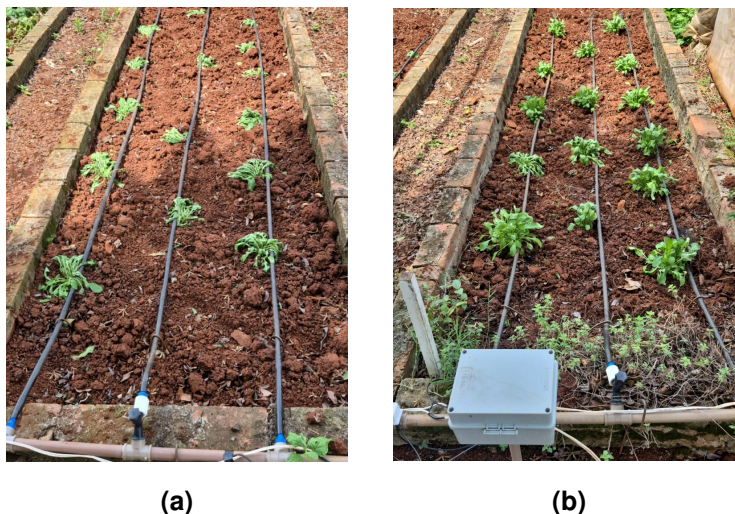


Figura 14. Comparação visual entre os canteiros.

4.2. Avaliação quantitativa da produtividade no cultivo de rúcula

De forma complementar à análise visual, realizou-se um experimento comparativo para quantificar o impacto da automação na produtividade do cultivo de rúcula, considerando os mesmos dois canteiros previamente apresentados. Ao término do ciclo produtivo, foram colhidos quatro maços de rúcula de cada sistema, procedendo-se à pesagem total da produção. A Figura 15(a) apresenta a produção obtida no canteiro operando com irrigação por temporizador, enquanto a Figura 15(b) ilustra a produção correspondente ao canteiro com a automação proposta.



Figura 15. Comparação do peso da produção.

O sistema de irrigação temporizado apresentou uma produção total de 215,9 g, enquanto o sistema automatizado desenvolvido neste trabalho atingiu 271,5 g, o que corresponde a um incremento de 25,75% na produtividade. Esse resultado confirma, de forma quantitativa, a superioridade do manejo hídrico baseado na umidade real do solo, refletindo diretamente no ganho de massa e na qualidade dos maços colhidos.

4.3. Calibração do sensoramento e parâmetros agronômicos

A calibração do sensor resistivo (HD-38) foi determinante para a confiabilidade das leituras. Através de ensaios com o solo em estados de seca extrema, umidade ideal e saturação, foi possível mapear os valores analógicos brutos para uma escala percentual (0 a 100%).

Nos experimentos de campo, definiu-se um limiar de acionamento (*setpoint*) situado na faixa entre 40% e 50% de umidade. Este intervalo mostrou-se adequado para a cultura testada, mantendo o solo com disponibilidade hídrica suficiente. Observou-se, contudo, a necessidade de pesquisas futuras para determinar a profundidade ideal de instalação do sensor, variável que pode oscilar conforme o estágio fenológico da cultura e o tipo de irrigação utilizado.

4.4. Usabilidade da interface

A avaliação da interface *web*, no contexto do uso pelo produtor responsável pela área experimental, indicou que a arquitetura de informação adotada facilitou a operação do sistema durante o período de testes. O *feedback* obtido a partir do usuário que interagiu diretamente com a plataforma apontou que a aplicação é de fácil utilização e permite alterações ágeis nos parâmetros de umidade do solo, proporcionando ganhos operacionais em relação aos métodos tradicionais de manejo.

O modelo de dados, estruturado em torno do conceito de "Hortas", provou-se eficiente para a organização do manejo. A visualização gráfica permitiu identificar padrões de secagem, embora tenha sido sugerida a ampliação do período de histórico visualizável para facilitar a análise de longo prazo. A solução foi percebida como uma tecnologia de alto potencial e baixo custo, acessível para aplicação na agricultura familiar.

4.5. Limitações técnicas observadas

Apesar do êxito funcional, a arquitetura apresenta limitações de escopo que devem ser consideradas para sua aplicação em cenários produtivos mais amplos. Uma das principais restrições refere-se à dependência da infraestrutura de comunicação, visto que a operação remota do sistema está condicionada à disponibilidade de cobertura *Wi-Fi* na área de cultivo. No ambiente experimental em que o protótipo foi validado, a rede de comunicação foi previamente planejada e estendida até a proximidade do canteiro. Entretanto, em propriedades rurais convencionais, essa condição nem sempre se verifica, uma vez que o acesso à internet geralmente se concentra na residência do produtor, enquanto os canteiros e áreas de cultivo encontram-se a distâncias consideráveis, o que pode inviabilizar o uso direto da solução sem investimentos adicionais em infraestrutura de rede.

Além disso, outra limitação técnica está relacionada ao emprego de sensores resistentes de baixo custo para a medição da umidade do solo. Embora o sensor HD-38 possua hastes em aço inoxidável, característica que contribui para ampliar sua resistência à oxidação e à corrosão em comparação a modelos convencionais, esse tipo de dispositivo ainda está sujeito à degradação progressiva ao longo do tempo de uso. Dessa forma, torna-se necessária a realização periódica de ajustes e recalibrações no solo, a fim de preservar a confiabilidade das leituras e a precisão do controle hídrico.

Adicionalmente, identificou-se a demanda por funcionalidades de gestão agrícola mais abrangentes, tais como um módulo de anotações de campo para o registro sistemático de informações relacionadas às cultivares, datas de plantio, tratos culturais, aplicações de insumos e períodos de colheita. A ausência desses recursos na versão atual restringe a rastreabilidade completa do ciclo produtivo, entendida como a capacidade de acompanhar e documentar todas as etapas do processo de produção desde o preparo do solo até a colheita final, aspecto considerado relevante tanto para a organização do manejo quanto para a conformidade com exigências técnicas e normativas do setor agrícola. Ainda assim, mesmo diante dessas limitações, a implementação atingiu os objetivos propostos, demonstrando a viabilidade técnica da automação baseada em ESP8266 aplicada à olericultura.

5. Conclusão

O presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao desenvolver e validar uma plataforma de automação para irrigação agrícola baseada no microcontrolador ESP8266, integrada a uma aplicação *web* e fundamentada em uma arquitetura de três camadas (*three-tier architecture*). A solução proposta demonstrou-se funcional, estável e economicamente viável, atendendo às demandas de monitoramento e controle hídrico em ambiente real de olericultura.

Os resultados experimentais evidenciaram que o sistema de irrigação automatizado, operando a partir da umidade real do solo, apresentou desempenho superior quando comparado ao manejo baseado em temporização. A análise quantitativa do cultivo de rúcula indicou um incremento de 25,75% na produtividade, além de melhorias visíveis no desenvolvimento vegetativo das plantas, confirmando os benefícios agrônômicos do controle hídrico inteligente. Tais resultados não apenas validam a eficácia da solução, como também demonstram seu potencial impacto direto na eficiência produtiva e na sustentabilidade do uso da água, aspecto crítico no contexto da agricultura contemporânea.

Do ponto de vista tecnológico, a integração entre o dispositivo de borda (*Edge*), a camada de processamento em nuvem (*Backend*) e a interface de usuário (*Frontend*) confirmou a robustez da arquitetura adotada, bem como a adequação do uso do protocolo *HTTP* e da serialização em *JSON* para aplicações de IdC aplicadas ao meio agrícola. A estratégia de associar um dispositivo ESP8266 a cada unidade de cultivo mostrou-se particularmente acertada, pois simplificou o controle local, favoreceu a escalabilidade do sistema e reduziu a complexidade de manutenção, aspectos essenciais para a adoção da tecnologia em pequenas propriedades.

Entretanto, a análise crítica do sistema evidencia limitações importantes, especialmente no que se refere à dependência de conectividade *Wi-Fi*, à necessidade de manutenção periódica dos sensores de umidade e à ausência, na versão atual, de funcionalidades completas de rastreabilidade agrícola. Tais restrições não comprometem a validade da proposta, mas delimitam seu escopo de aplicação e indicam oportunidades concretas de evolução técnica e científica, como a incorporação de novos protocolos de comunicação, sensores mais robustos e módulos avançados de gestão do ciclo produtivo.

Dessa forma, a solução apresentada transcende a simples automação da irrigação, configurando-se como uma base tecnológica para sistemas agrícolas mais inteligentes, integrados e sustentáveis. Conclui-se, portanto, que a plataforma desenvolvida constitui uma alternativa tecnicamente sólida, de baixo custo e com elevado potencial de aplicação na agricultura familiar, contribuindo para o uso racional da água, o aumento da produtividade e a modernização do manejo agrícola por meio de soluções baseadas em IdC.

6. Trabalhos Futuros

Embora os resultados obtidos neste trabalho validem a viabilidade técnica e agronômica da plataforma desenvolvida, diversas possibilidades de evolução podem ser exploradas em estudos futuros, tanto no âmbito tecnológico quanto no metodológico.

Um primeiro eixo de aprimoramento refere-se à infraestrutura de comunicação. A atual dependência de conectividade *Wi-Fi*, embora adequada ao ambiente experimental, limita a aplicação do sistema em propriedades rurais onde o acesso à internet é restrito ou inexistente nas áreas de cultivo. Como alternativa, recomenda-se a investigação e implementação do protocolo *LoRaWAN* (*Long Range Wide Area Network*), tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo energético, amplamente empregada em aplicações de IdC agrícola. Essa abordagem permitiria a transmissão de dados por distâncias superiores a 10 km em áreas rurais, reduzindo significativamente a necessidade de infraestrutura de rede local.

A adoção de *LoRaWAN* exigiria a inclusão de módulos de rádio específicos nos dispositivos de campo e a implantação de um *gateway* concentrador, cujo custo adicional estimado situa-se entre R\$ 300 e R\$ 600, dependendo da tecnologia empregada. Apesar desse acréscimo no investimento inicial, tal evolução ampliaria substancialmente o alcance e a aplicabilidade da solução, tornando-a adequada a propriedades de maior extensão territorial.

Outro eixo de evolução da plataforma está associado ao aprimoramento do subsistema de sensoriamento, com ênfase na realização de estudos de caracterização do solo, visando identificar de forma mais precisa o melhor posicionamento e a profundidade ideal

de instalação do sensor de umidade no canteiro. Essa abordagem permitiria adequar o processo de medição às condições físicas do solo e às características da cultura, contribuindo para aumentar a confiabilidade das leituras sem comprometer a proposta de baixo custo da solução.

No âmbito do *software*, trabalhos futuros podem incorporar módulos mais avançados de gestão agrícola, como funcionalidades de rastreabilidade do ciclo produtivo, registro de cultivares, histórico de tratos culturais, aplicações de insumos e controle de colheitas. A ausência desses recursos na versão atual limita o potencial da plataforma como ferramenta completa de apoio à decisão, indicando um campo relevante de evolução para ampliar sua utilidade no planejamento e na gestão da produção agrícola.

Por fim, recomenda-se a ampliação da validação experimental para diferentes culturas, ciclos produtivos mais longos e múltiplos ambientes de cultivo, de modo a consolidar a generalização dos resultados e avaliar o desempenho da solução em cenários agrícolas distintos. Em conjunto, as propostas apresentadas ao longo desta seção evidenciam que a plataforma desenvolvida estabelece uma base técnica consistente para a evolução de sistemas agrícolas inteligentes, escaláveis e sustentáveis, alinhados aos princípios da agricultura de precisão e IdC, consolidando o trabalho como uma contribuição relevante para a modernização do manejo agrícola em pequenas propriedades.

Referências

- Atzori, L., Iera, A., and Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805.
- Bernardo, S., Soares, A. A., and Mantovani, E. C. (2006). *Manual de irrigação*. Editora UFV, Viçosa, MG, 8 edition.
- Correia, G. R., Rocha, H. R. d. O., and Rissino, S. d. D. (2016). Automação de sistema de irrigação com monitoramento via aplicativo web. *Revista Engenharia na Agricultura (REVENG)*, 24(4):314–325.
- Cunha, K. C. B. d. and Rocha, R. V. d. (2015). Automação no processo de irrigação na agricultura familiar com plataforma arduino. *RECoDAF–Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar*, 1(2):62–74.
- Espressif Systems (2020). *ESP8266 Technical Reference*. Espressif Systems. Disponível em: <https://www.espressif.com>. Acesso em: jan. 2024.
- Filgueira, F. A. R. (2008). *Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças*. Editora UFV, Viçosa, MG, 3 edition.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., and Palaniswami, M. (2013). Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7):1645–1660.
- Jesus, J. B. d., Nascimento, V., Brito, A., and Ribeiro, C. (2021). Viabilidade econômica de um sistema de irrigação automatizado acionado via web. *Revista Técnico-Científica do IFSC*, 1(1):1–10.
- Lee, E. A. and Seshia, S. A. (2017). *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach*. MIT Press, Cambridge, MA, 2 edition.

- Mantovani, E. C., Bernardo, S., and Palaretti, L. F. (2009). *Irrigação: princípios e métodos*. Editora UFV, Viçosa, MG, 3 edition.
- Melé, A. (2020). *Django 3 By Example*. Packt Publishing, Birmingham, UK.
- Molin, J. P., Amaral, L. R. d., and Colaço, A. F. (2015). *Agricultura de precisão*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Ray, P. P. (2017). Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 8(4):395–420.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., and Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5):637–646.