UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE AGRONOMIA

MATEUS KOHLER

SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA CONTROLE AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO COM O MICROCONTROLADOR ESP-32

CERRO LARGO
2025

MATEUS KOHLER

SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA CONTROLE AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO COM O MICROCONTROLADOR ESP-32

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio Zambillo Palma

Coorientador: Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons

CERRO LARGO

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Kohler, Mateus
SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA CONTROLE AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO COM O MICROCONTROLADOR ESP-32 / Mateus Kohler. -- 2025.
35 f.

Orientador: Doutor Marcos Antonio Zambillo Palma
Co-orientador: Doutor Sidinei Zwick Radons
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo,RS, 2025.

I. Palma, Marcos Antonio Zambillo, orient. II. Radons, Sidinei Zwick, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

MATEUS KOHLER

SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA CONTROLE AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO COM O MICROCONTROLADOR ESP-32

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do grau de bacharel em Agronomia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 27/11/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCOS ANTONIO ZAMBILLO PALMA
Data: 15/12/2025 14:00:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Marcos Antonio Zambillo Palma - UFFS
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br SIDINEI ZWICK RADONS
Data: 15/12/2025 09:46:03-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons - UFFS
Avaliador

Documento assinado digitalmente
gov.br LANA BRUNA DE OLIVEIRA ENGERS
Data: 15/12/2025 09:49:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª Dr.ª Lana Bruna de Oliveira Engers – UFFS
Avaliador

Dedico este trabalho aos meus pais, que
não pouparam esforços para que eu
pudesse concluir meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre foram minha base e meu porto seguro. Agradeço imensamente pelo amor incondicional, pelo incentivo constante e por todos os esforços e sacrifícios que fizeram para garantir minha educação. Sem o apoio de vocês, essa conquista não seria possível.

À Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), pela oportunidade de realizar um ensino superior público e de qualidade, e por oferecer a estrutura necessária para a minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Antonio Zambillo Palma, pela paciência, dedicação e confiança depositada em mim durante todo o processo. Agradeço pela condução sábia deste trabalho, pelas correções pontuais e por todo o conhecimento técnico compartilhado, fundamental para o desenvolvimento deste projeto.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons, pelas valiosas contribuições, disponibilidade e pelo suporte imprescindível que enriqueceu a qualidade deste trabalho.

Aos professores do curso de Agronomia, pelos ensinamentos transmitidos em sala de aula, que contribuíram não apenas para a minha formação profissional, mas também para o meu crescimento humano e crítico.

Aos meus amigos e colegas de graduação, pelo companheirismo, pelas trocas de experiências, pelos momentos de estudo em grupo e pelo apoio mútuo nos momentos de dificuldade. A jornada se tornou mais leve com a presença de vocês.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para que eu pudesse chegar até aqui. Meu muito obrigado.

RESUMO

A eficiência hídrica na agricultura é um desafio crescente, muitas vezes dificultado pelo alto custo de tecnologias de automação, que limitam sua adoção por pequenos e médios produtores. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de irrigação automatizado de baixo custo, utilizando o microcontrolador ESP-32. A metodologia consistiu na montagem de um protótipo funcional utilizando o ESP-32, módulos de relés para o acionamento de válvulas solenoides e bomba, um módulo RTC DS3231 para precisão temporal, e um display LCD 20x4, todos acondicionados em um invólucro fabricado por impressão 3D. O firmware foi desenvolvido em C++ (Arduino IDE), implementando uma interface de controle dupla (servidor web integrado e display local) e uma lógica de irrigação inteligente. Esta lógica ajusta automaticamente a duração da irrigação com base na precipitação acumulada nas últimas 48 horas, subtraindo-a da meta em milímetros definida pelo usuário. Os resultados da validação demonstraram que o protótipo é funcional e robusto, retomando ciclos de irrigação automaticamente após falhas de energia e mantendo a conectividade através de um ponto de acesso de contingência. A lógica inteligente respondeu adequadamente nos testes, ajustando o tempo de irrigação conforme a chuva simulada. A análise econômica comparativa revelou que o custo total do protótipo (R$ 339,00) representa apenas 28,25% do valor de um controlador comercial similar (R$ 1.200,00), oferecendo funcionalidades avançadas como a lógica de ajuste por chuva e a natureza open-source. Conclui-se que o sistema atingiu os objetivos, provando ser uma solução viável, acessível e eficaz, que contribui para a democratização da tecnologia de precisão no campo.

Palavras-chave: irrigação automatizada; IoT; agricultura de precisão.

ABSTRACT

Water efficiency in agriculture is a growing challenge, often hindered by the high cost of automation technologies, which limits their adoption by small and medium-sized producers. This work aimed to develop a low-cost automated irrigation system using the ESP-32 microcontroller. The methodology consisted of assembling a functional prototype using the ESP-32, relay modules to activate solenoid valves and a pump, an RTC DS3231 module for temporal precision, and a 20x4 LCD display, all housed in an enclosure manufactured via 3D printing. The firmware was developed in C++ (Arduino IDE), implementing a dual control interface (integrated web server and local display) and an intelligent irrigation logic. This logic automatically adjusts the irrigation duration based on the accumulated precipitation in the last 48 hours, subtracting it from the target in millimeters defined by the user. The validation results demonstrated that the prototype is functional and robust, automatically resuming irrigation cycles after power failures and maintaining connectivity through a contingency access point. The intelligent logic responded appropriately in tests, adjusting irrigation time based on simulated rain. The comparative economic analysis revealed that the total cost of the prototype (R$ 339.00) represents only 28.25% of the value of a similar commercial controller (R$ 1,200.00), offering advanced functionalities such as rain-based adjustment logic and its open-source nature. It is concluded that the system achieved its objectives, proving to be a viable, accessible, and effective solution that contributes to the democratization of precision technology in the field.

Keywords: automated irrigation; IoT; precision agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Protótipo da central controladora em caixa impressa em 3D 23
Figura 2 - Protótipo instalado em uma bomba de demonstração, conectado às válvulas solenoides e bomba 24
Figura 3 - Display LCD 20x4 exibindo status do sistema 25
Figura 4- Display LCD 20x4 exibindo status das válvulas e bomba 25
Figura 5 - Painel de controle principal do servidor web 26
Figura 6 - Tela de agendamento e configuração inteligente 27
Figura 7 - Mecanismo interno do pluviômetro de báscula com sensor de efeito Hall 28
Figura 8 - Pluviômetro de báscula montado com suporte de fixação 29
Figura 9 - Monitor serial do Arduino IDE mostrando os cálculos para duração da irrigação 30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog-to-Digital Converter
BLE	Bluetooth Low Energy
DAC	Digital-to-Analog Converter
ESP-IDF	Espressif IoT Development Framework
GPIO	General Purpose Input/Output
IA	Inteligência Artificial
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
LCD	Liquid Crystal Display
NTP	Network Time Protocol
PLA	Polylactic Acid
PWM	Pulse Width Modulation
ROM	Read-Only Memory
RTC	Real Time Clock
SoftAP	Software Enabled Access Point
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 REVISÃO DE LITERATURA 13
2.1 IRRIGAÇÃO 13
2.2 CONTROLADORAS DE IRRIGAÇÃO 15
2.3 PLATAFORMA ESP-32 15
2.4 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO 16
2.5 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 17
2.5.1 Inteligência artificial na agricultura 18
3 MATERIAL E MÉTODOS 20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 23
4.1 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA 24
4.1.1 Display LCD Local 24
4.1.2 Servidor Web Integrado 26
4.2 VALIDAÇÃO DO FIRMWARE E LÓGICA DE CONTROLE 27
4.2.1 Precisão Temporal (RTC e NTP) 27
4.2.2 Sensor de Chuva e Mecanismo de Medição 28
4.2.3 Testes da Lógica de Irrigação Inteligente 29
4.2.4 Robustez e Conectividade 30
4.3 VIABILIDADE ECONOMICA 31
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 32
REFERÊNCIAS 33

1 INTRODUÇÃO

A irrigação é considerada uma das práticas agrícolas mais antigas e essenciais desenvolvidas pela humanidade. Desde suas origens no Crescente Fértil, região da antiga Mesopotâmia, a necessidade de garantir a produção agrícola em ambientes de chuvas irregulares levou as civilizações a criarem soluções para controlar a disponibilidade hídrica ao longo do ano. De acordo com Sojka, Bjorneberg e Entry (2002), a irrigação representa uma das modificações ambientais mais estratégicas realizadas pelo ser humano, com impactos significativos no desenvolvimento social e econômico das populações ao longo da história.

A importância da irrigação se intensificou ainda atualmente mais devido às mudanças climáticas, ao aumento da população mundial e à crescente demanda por alimentos. Segundo Fereres e Evans (2006), apesar de menos de 17% das terras agrícolas do planeta serem irrigadas, essas áreas são responsáveis por cerca de 40% da produção global de alimentos e fibras, o que demonstra sua altíssima eficiência produtiva. No contexto brasileiro, Bernardo et al. (2019) afirmam que cerca de 7 milhões de hectares são irrigados, correspondendo a 10% da área cultivada e responsáveis por 35% do valor econômico da produção agrícola nacional.

Entre os inúmeros benefícios da irrigação, destacam-se a proteção contra estiagens, a possibilidade de múltiplas colheitas na mesma área, o aumento da qualidade dos produtos agrícolas e a flexibilização do calendário de cultivo. Montovani, Bernardo e Palaretti (2009), enfatizam ainda que o uso racional da irrigação permite uma aplicação mais eficiente de fertilizantes e viabiliza a adoção de culturas de maior valor agregado, reduzindo riscos financeiros e tornando o sistema agrícola mais sustentável e lucrativo.

No entanto, para que os benefícios da irrigação sejam plenamente alcançados, torna-se fundamental o uso de tecnologias que promovam o controle e o uso eficiente da água. É nesse contexto que os controladores automatizados de irrigação ganham destaque. Esses dispositivos são responsáveis por monitorar variáveis ambientais, como a umidade do solo e as condições climáticas, e realizar a irrigação com base nesses dados. Conforme aponta Evans (2020), com o uso de sensores e sistemas de feedback, é possível alcançar eficiências de irrigação entre 85% e 95%, números muito superiores aos dos sistemas tradicionais baseados na percepção e intervenção humanas.

A evolução dos sistemas de irrigação inteligente está fortemente atrelada ao avanço da Internet das Coisas (IoT) no setor agrícola. De acordo com Obaideen et al. (2022), os sistemas de irrigação baseados em IoT oferecem uma significativa redução no consumo de água e energia, além de minimizarem a necessidade de operação manual. Essa automação resulta em maior eficiência operacional, menor desperdício de recursos e um processo de irrigação mais sustentável e economicamente viável.

Dentro desse universo tecnológico, o microcontrolador ESP-32, desenvolvido pela empresa Espressif Systems, surge como uma solução altamente promissora para sistemas de irrigação automatizados de baixo custo. Segundo Ibrahim (2019), o ESP-32 combina conectividade Wi-Fi e Bluetooth, múltiplas interfaces de entrada e saída, sensores integrados e uma estrutura de processamento eficiente em um único chip, com baixo custo e consumo energético. Essas características tornam o ESP-32 amplamente utilizado em aplicações acadêmicas, industriais e agrícolas voltadas à automação e ao monitoramento em tempo real.

Além disso, o ESP-32 é compatível com plataformas de desenvolvimento amplamente utilizadas, como o Arduino IDE, o que facilita a prototipagem e implementação de projetos mesmo por usuários iniciantes. Isso permite que pequenos produtores, técnicos agrícolas e estudantes possam desenvolver e aplicar soluções personalizadas, otimizando o uso da água em suas lavouras com investimentos reduzidos e retorno rápido.

A utilização de sistemas de irrigação automatizados com ESP-32 representa uma verdadeira democratização do acesso à tecnologia, aproximando os benefícios da agricultura de precisão de propriedades de pequeno e médio porte. Ao unir baixo custo, alto desempenho e conectividade, esses sistemas se posicionam como ferramentas fundamentais na construção de uma agricultura mais eficiente, inteligente e sustentável.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de irrigação automatizado de baixo custo, utilizando o microcontrolador ESP-32. A proposta visa contribuir para o aprimoramento do manejo hídrico na agricultura, promovendo a sustentabilidade, a inovação e a acessibilidade tecnológica no campo, em especial para produtores que buscam soluções práticas e eficazes diante dos desafios contemporâneos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IRRIGAÇÃO

De acordo com Sojka, Bjorneberg e Entry (2002), a irrigação é definida como a prática de aplicar água ao solo de forma artificial, de forma suplementar a disponibilidade natural proporcionada pelas precipitações, permitindo ou melhorando a produtividade e o desenvolvimento das plantas, melhorando a qualidade de suas folhagens ou partes a serem colhidas da planta. A irrigação é apontada como a modificação intencional estratégica do ambiente mais importante que os humanos aprenderam. Mesmo que os impactos da irrigação no seu princípio não eram tão críticos para a economia global e abastecimento de alimentos como são hoje em um mundo globalizado, ela sempre teve grandes impactos locais assim como consequências sociais e históricas (Sojka; Bjorneberg; Entry, 2002).

Segundo Angelakis et al. (2020), historiadores e arqueólogos acreditam que a irrigação teve suas origens no Crescente Fértil, região anteriormente chamada de mesopotâmia, região onde hoje é conhecido como o oriente médio, sendo que os primeiros vestígios da irrigação datam de cerca de 6000 anos a.C. Diante das condições áridas e chuvas irregulares, as civilizações desenvolveram sistemas de irrigação a fim de garantir a produção agrícola. Os primeiros sistemas de irrigação foram a construção de canais artificias desviando as águas dos rios Tigre e Eufrates para as áreas de cultivo. Conforme Angelakis et al. (2020), essas práticas não apenas sustentaram a agricultura, mas também foram responsáveis pelo desenvolvimento econômico e social dessas civilizações. O uso eficiente da água e secas foram responsáveis pela prosperidade ou declínio de muitas dinastias (Angelakis et al., 2020).

A irrigação foi desenvolvida para lidar com a seca em áreas áridas e semiáridas, utilizando uma fonte de água suplementar próxima (Fereres; Evans, 2006). Ao longo dos séculos, as terras irrigadas tornaram-se essenciais para o suprimento de alimentos mundial. Atualmente, estima-se que existam cerca de 260 milhões de hectares de terra irrigados globalmente, em comparação com menos de 100 milhões de hectares em 1950 (Fereres; Evans, 2006). Embora representem menos de 17% do total de terras agrícolas cultivadas no mundo, elas produzem 40% dos alimentos e fibras (Fereres; Evans, 2006).

Segundo Montovani, Bernardo e Palaretti (2009), a irrigação apresenta um papel essencial na agricultura, proporcionando uma série de vantagens que a tornam uma prática estratégica para a segurança e o aumento da produção. Entre seus principais benefícios, destaca-se a proteção contra estiagens, especialmente em regiões de clima semiúmido, garantindo a regularidade das safras (Montovani; Bernardo; Palaretti, 2009). Além disso, a irrigação contribui para o aumento da produtividade das culturas, possibilita múltiplas colheitas em uma mesma área e melhora significativamente a qualidade dos produtos agrícolas.

De acordo com Montovani, Bernardo e Palaretti (2009), a irrigação também permite a flexibilização do calendário agrícola, com colheitas fora da época tradicional, favorecendo melhores preços de mercado. Outro ponto importante é o aumento da eficiência na utilização de fertilizantes e a viabilidade de introdução de culturas de maior valor agregado, reduzindo os riscos financeiros para o produtor (Montovani; Bernardo; Palaretti, 2009).

De acordo com Angelakis et al. (2020), a irrigação a nível mundial representa mais de 60% da produção mundial de cerais, e a agricultura irrigada representa 50% do valor de todas as safras colhidas. A terra irrigada gera, em média, de duas a duas vezes e meia mais rendimento e três vezes o valor da colheita por hectare em comparação com terras agrícolas não irrigadas, sendo que a área irrigada representa apenas um sexto da área total de produção mundial, incluindo terras agrícolas e pastagens (Angelakis et al., 2020).

Segundo o Atlas Irrigação (2017), a irrigação no Brasil desempenha um papel crucial na agricultura, contribuindo significativamente para a produtividade e a segurança alimentar. De acordo com o Atlas Irrigação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2017), o país possui atualmente cerca de 7 milhões de hectares equipados para irrigação, posicionando-se entre os dez países com maior área irrigada do mundo. Esse crescimento tem sido consistente nas últimas décadas, impulsionado pela disponibilidade hídrica e pelas condições climáticas favoráveis em diversas regiões. Estima-se que até 2030, a área irrigada no Brasil possa expandir em 45%, atingindo aproximadamente 10 milhões de hectares, o que representa 28% do potencial efetivo de expansão identificado pela ANA (Atlas Irrigação, 2017). De acordo com Bernardo et al. (2019), no Brasil cerca de 7 milhões de hectares são irrigados, equivalentes a 10% da área cultivada, responsáveis por aproximadamente 20% da produção total e 35% do valor econômico da produção.

Segundo Bernardo et al. (2019), no Brasil cerca de 7 milhões de hectares são irrigados, equivalentes a 10% da área cultivada, responsáveis por aproximadamente 20% da produção total e 35% do valor econômico da produção.

2.2 CONTROLADORAS DE IRRIGAÇÃO

Em qualquer projeto de irrigação deve-se ter um manejo racional da água, considerando os aspectos ecológicos e sociais procurando maximizar a produtividade e a eficiência no uso da água, minimizando os custos de capital e mão de obra (Bernardo et al., 2019). No manejo da irrigação é necessário considerar os parâmetros do sistema, como o grau de automação, reuso da água, necessidades de sistematização e mão de obra (Bernardo et al., 2019). Utilizando sensores, software, sistemas de feedback e controle apropriados, é possível alcançar eficiências de irrigação entre 85% e 95% com a irrigação de precisão. (Evans, 2020)

Os sistemas de irrigação inteligentes aprimoram o desempenho e automatizam sistemas de irrigação e conserva o uso de água (Obaideen et al., 2022). Essa técnica ajusta a irrigação com base nas condições reais do solo e do clima, permitindo que os agricultores atendam à demanda com uma nova técnica adotada que conserva a água para o processo de irrigação (Obaideen et al., 2022).

Os sistemas de irrigação baseados em Internet das Coisas apresentam como principal benefício a redução significativa no consumo de água, uma vez que possibilitam a aplicação precisa do volume necessário, minimizando desperdícios e reduzindo substancialmente a necessidade de intervenção humana, característica comum nos métodos tradicionais (Obaideen et al., 2022). A automação desses sistemas também contribui para a diminuição do consumo de energia, dado que os equipamentos operam por períodos mais curtos e em intervalos otimizados. Além disso, a eficiência operacional proporcionada pela irrigação inteligente resulta em redução de custos, tornando o processo mais sustentável e economicamente viável (Obaideen et al., 2022).

2.3 PLATAFORMA ESP-32

A crescente demanda por dispositivos conectados à internet tem impulsionado o avanço das tecnologias sem fio, como o Wi-Fi, que se tornou amplamente utilizado em residências, comércios e indústrias (Ibrahim, 2019). Nesse contexto, a integração

de microcontroladores com conectividade Wi-Fi é essencial para o desenvolvimento de soluções embarcadas voltadas à Internet das Coisas. Esses microcontroladores, presentes em uma vasta gama de dispositivos do cotidiano, destacam-se por sua versatilidade, baixo custo e capacidade de executar funções de monitoramento e controle em tempo real (Ibrahim, 2019).

Os microcontroladores, são componentes eletrônicos fundamentais em sistemas embarcados, sendo encontrados em diversos dispositivos do cotidiano, como eletrodomésticos, equipamentos de automação e sistemas industriais (Ibrahim, 2019). Sua popularidade se deve à versatilidade, ao baixo custo e à capacidade de realizar tarefas de monitoramento e controle em tempo real (Ibrahim, 2019). A Espressif Systems, empresa chinesa responsável pelo ESP8266, revolucionou a integração Wi-Fi em microcontroladores com um chip de baixo custo e alta eficiência (Ibrahim, 2019). Como sucessor direto, o ESP32 surgiu com melhorias significativas, incluindo Bluetooth, mais GPIOs, sensores integrados e maior capacidade de processamento, ampliando consideravelmente as possibilidades de uso em projetos loT (Ibrahim, 2019).

O ESP32 é amplamente utilizado em aplicações acadêmicas, industriais e de automação devido à sua conectividade integrada, capacidade de processamento e baixo consumo de energia (Ibrahim, 2019). Sua compatibilidade com plataformas como Arduino IDE e ESP-IDF, além da vasta oferta de bibliotecas e módulos acessíveis, torna-o uma escolha popular para projetos loT e sistemas embarcados modernos (Ibrahim, 2019).

2.4 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

Uma linguagem de programação é basicamente um sistema de notação usado para descrever como as máquinas devem executar tarefas, e isso precisa ser algo que tanto o computador quanto os humanos consigam entender (Afifa Fathima et al., 2022). Ela serve para criar modelos que vão resolver problemas específicos (Afifa Fathima et al., 2022). Assim como qualquer língua tem suas palavras, símbolos e regras gramaticais, uma linguagem de programação também funciona assim, com a diferença de que as regras são chamadas de sintaxe. Cada linguagem tem um conjunto único de regras para isso. Com o tempo, desde os anos 1950, surgiram

milhares de novas linguagens, cada uma voltada para diferentes tipos de projetos (Afifa Fathima et al., 2022).

Antes da década de 1940, os programadores precisavam "programar" diretamente no hardware, ajustando manualmente os circuitos para realizar as tarefas desejadas (Louden; Lambert, 2011). Com o tempo, foi desenvolvido um sistema onde o programador podia usar códigos binários, representando operações específicas, para que o computador executasse essas tarefas sem a necessidade de modificar fisicamente o hardware. Essa evolução permitiu que a programação se tornasse mais acessível, permitindo aos programadores resolver problemas sem precisar atuar diretamente na engenharia do hardware (Louden; Lambert, 2011).

2.5 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Inteligência artificial, é uma área da ciência da computação que busca criar máquinas capazes de simular comportamentos que costumamos associar à inteligência humana, como aprender, tomar decisões, resolver problemas e até se adaptar a novas situações (Luger, 2013). A ideia central é fazer com que computadores consigam "pensar" de forma parecida com a dos humanos, usando dados, regras e algoritmos para agir de maneira autônoma. Mesmo sendo um conceito bastante discutido, ainda não existe uma definição única sobre o que exatamente é inteligência artificial. Isso acontece, em parte, porque nem nós entendemos totalmente como a inteligência humana funciona (Luger, 2013). Ainda assim, a IA tenta aproximar máquinas desse funcionamento, enfrentando desafios técnicos e filosóficos para construir sistemas cada vez mais inteligentes e úteis no dia a dia (Luger, 2013).

A história da inteligência artificial tem raízes profundas na filosofia, especialmente nas correntes racionalista e empirista. Desde os tempos de Aristóteles, o desejo humano de entender e replicar a inteligência se manifesta nas tentativas de formalizar o pensamento (Luger, 2013). Durante os séculos XVII e XVIII, pensadores como Descartes, Leibniz e Pascal abordaram questões fundamentais sobre o pensamento e a racionalidade humana, sem ainda dispor das ferramentas tecnológicas necessárias para realizar tais propostas (Luger, 2013).

O desenvolvimento da IA se intensificou no século XX, com contribuições significativas de matemáticos e filósofos como Alan Turing, que em 1950 propôs o famoso "teste de Turing" para avaliar a inteligência das máquinas, e o trabalho de

figuras como John McCarthy, Allen Newell e Marvin Minsky na década de 1950 (Russell; Norvig, 2022). Segundo Russell e Norvig (2022), a IA passou a ser definida formalmente, e o conceito de máquinas capazes de aprender e raciocinar se solidificou. Entretanto, as primeiras tentativas de replicar a inteligência humana foram limitadas, e as expectativas inicialmente elevadas resultaram em um "inverno da IA" nas décadas de 1970 e 1980, devido à dificuldade de criar sistemas robustos (Russell; Norvig, 2022). Nos anos 2000, com a ascensão do "*big data*" e o desenvolvimento de redes neurais profundas, a IA experimentou uma nova fase de crescimento e aplicação, levando a avanços significativos em áreas como reconhecimento de voz, visão computacional e jogos (Russell; Norvig, 2022).

A IA tem sido amplamente aplicada em diversas áreas, abrangendo desde jogos e raciocínio automatizado até o desenvolvimento de sistemas especializados e o aprendizado de máquina (Luger, 2013). No campo dos jogos, por exemplo, a IA é utilizada para simular processos de decisão em ambientes restritos, como o xadrez e quebra-cabeças, explorando espaços de busca para encontrar soluções eficientes. Além disso, a IA tem sido aplicada com sucesso na criação de sistemas especialistas, como no diagnóstico médico e análise química, onde o conhecimento de especialistas humanos é simulado para resolver problemas complexos (Luger, 2013). A compreensão de linguagem natural também é uma área crescente, permitindo que sistemas de IA interajam de maneira mais intuitiva com os humanos, seja em *chatbots* ou assistentes virtuais (Luger, 2013).

2.5.1 Inteligência artificial na agricultura

A IA tem se consolidado como um dos pilares da modernização do setor agrícola, promovendo uma transformação significativa na forma como a produção de alimentos é conduzida (Patel; Patil, 2022). Sua aplicação vai desde a automação de tarefas operacionais, como irrigação e colheita, até o diagnóstico preciso de doenças nas plantas, controle de pragas e recomendação de insumos ideais com base em dados climáticos, do solo e do mercado. Tecnologias como drones com câmeras de alta definição, sensores inteligentes, robôs autônomos e análise de imagens via aprendizado de máquina oferecem uma nova perspectiva sobre o cultivo, permitindo o monitoramento em tempo real da saúde das plantações e a tomada de decisões embasadas em dados concretos (Patel; Patil, 2022). Tais avanços permitem que

agricultores otimizem recursos naturais, enfrentem com mais eficiência os desafios da escassez de mão de obra e ainda elevem a produtividade das lavouras com menor impacto ambiental, adotando uma abordagem mais estratégica e preditiva na gestão agrícola (Patel; Patil, 2022).

A agricultura é uma indústria global que movimenta cerca de 5 trilhões de dólares, e a tecnologia de IA desempenha um papel crucial nesse cenário ao possibilitar o cultivo de safras mais saudáveis, o controle de pragas, o monitoramento do solo e das condições de crescimento, além da organização de dados e apoio direto à carga de trabalho dos agricultores (Patel; Patil, 2022). A IA também contribui para otimizar uma ampla gama de tarefas ao longo de toda a cadeia de suprimentos alimentares. Com um potencial expressivo de crescimento, o mercado global de aplicações de IA na agricultura foi avaliado em cerca de 1 bilhão de dólares em 2019, e estima-se que esse valor salte para quase 8 bilhões até 2030 (Patel; Patil, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A seleção dos componentes de hardware para este projeto foi pautada em suas funcionalidades, desempenho e adequação aos requisitos do sistema. O microcontrolador central é o ESP32, em sua versão de placa de desenvolvimento com 38 pinos, um dispositivo que se destaca por sua alta capacidade de processamento e conectividade, sendo ideal para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Ele é dotado de um processador Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6 com *clock* de até 240 MHz, 448 *KBytes* de ROM, 520 *KBytes* de SRAM e 4 MB de memória *flash*, garantindo performance para tarefas complexas. A conectividade é um ponto forte, integrando Wi-Fi 802.11 b/g/n e *Bluetooth* v4.2 BR/EDR e BLE. A placa de 38 pinos oferece uma vasta gama de periféricos de I/O, incluindo 34 pinos GPIO multifuncionais que suportam interfaces como I2C, SPI e UART, além de ADC, DAC e PWM, operando com nível lógico de 3,3V.

Para o acionamento de cargas de maior potência, utiliza-se um módulo de relés de 8 canais, que permite ao microcontrolador controlar dispositivos de alta tensão e corrente. No contexto deste projeto, este módulo é especificamente responsável por acionar as válvulas solenoides que controlam os diferentes setores de irrigação. Cada relé é capaz de comutar cargas de até 10A em 250VAC ou 30VDC e é acionado por 5V. A segurança do microcontrolador é garantida por optoacopladores, que isolam o circuito de controle. De forma similar, um módulo de relé de 1 canal é empregado para o controle da bomba d'água principal, que pressuriza toda a linha de irrigação. Suas características de comutação e isolamento são análogas às do módulo maior, oferecendo uma solução robusta e dedicada para esta carga crítica.

Para a contagem precisa do tempo, independentemente do estado de alimentação do sistema, incorpora-se um Módulo de Relógio de Tempo Real (RTC) baseado no circuito integrado DS3231. Este módulo é fundamental para funções de agendamento e registro de eventos. Sendo um RTC de alta precisão com oscilador a cristal compensado por temperatura, ele se comunica com o ESP32 via interface I2C e mantém o controle de segundos, minutos, horas, dia, data, mês e ano, com compensação para anos bissextos. Uma bateria de backup garante a continuidade da contagem mesmo sem a alimentação principal.

A interface homem-máquina é implementada por meio de um *display* de cristal líquido (LCD) de 20x4, que exibe quatro linhas de vinte caracteres. O uso de um

módulo adaptador I2C simplifica a conexão, reduzindo a necessidade de pinos para apenas dois (SDA e SCL). O display opera com 5V, possui retroiluminação controlável e um potenciômetro para ajuste de contraste, facilitando a visualização das informações do sistema em diferentes condições de iluminação.

Para a coleta de dados pluviométricos, essencial para a estratégia de irrigação inteligente, foi desenvolvido um pluviômetro digital baseado no mecanismo de báscula. O sistema utiliza um funil para captação da água, direcionando o fluxo para uma gangorra interna. A detecção do movimento é realizada por um sensor de efeito Hall (modelo 3144E) que atua em conjunto com um ímã fixado na estrutura móvel. A cada basculamento da gangorra, o campo magnético aciona o sensor, enviando um pulso digital ao ESP32. O dispositivo foi calibrado de forma que cada pulso corresponda a 0,1 mm de precipitação acumulada, permitindo ao sistema quantificar o volume de chuva com precisão.

Finalmente, para abrigar e proteger este conjunto de componentes, foi projetada uma case customizada no software Autodesk Fusion 360. A fabricação do invólucro foi realizada por meio de impressão 3D, utilizando filamento PLA (Ácido Polilático), um material que oferece boa resistência mecânica e acabamento para a montagem final do protótipo.

O firmware, que dota o sistema de inteligência, foi desenvolvido na linguagem de programação C++ dentro do ambiente da Arduino IDE. Durante o processo de criação do código, foram consultadas ferramentas de inteligência artificial, como os modelos ChatGPT, DeepSeek e Gemini, para auxiliar na elaboração de algoritmos, refatoração de código e depuração de erros. A base do sistema reside em sua estrutura de dados; para cada relé, uma estrutura *ReleConfig* armazena seus agendamentos, estado operacional (ativo, manual), e os parâmetros para a irrigação inteligente, como a meta em milímetros (*targetMM*) e a duração base para atingi-la. Para garantir a integridade dos dados, a biblioteca *Preferences* é utilizada para salvar todas as configurações e a chuva acumulada na memória flash não volátil do ESP-32, assegurando a recuperação após qualquer interrupção de energia.

A principal funcionalidade do código é seu módulo de controle de irrigação autônomo. A função *checkSchedules* verifica continuamente se a hora atual corresponde a um dos quatro agendamentos possíveis para cada válvula. Em caso afirmativo, a função *calculateAdjustedDuration* é invocada para subtrair a chuva acumulada nas últimas 48 horas da meta de irrigação. Se a meta é de 10 mm e choveu

4 mm, o sistema irriga apenas o equivalente aos 6 mm restantes, ajustando o tempo de acionamento com base na vazão daquele setor. Se a chuva exceder a meta, a irrigação é cancelada. A gestão da bomba d'água também é automatizada: ela é ativada somente quando ao menos uma válvula está em funcionamento e desligada assim que a última válvula se fecha, otimizando o consumo de energia. O código ainda possui mecanismos de robustez, como a função *checkPendingSchedules*, que, na inicialização, verifica se o sistema reiniciou durante uma irrigação e a retoma pelo tempo restante.

A interação do usuário com o sistema é realizada por duas interfaces. A primeira é um servidor web integrado, acessível por qualquer navegador, que oferece um painel de controle completo para visualização de status, acionamento manual, e configuração detalhada dos agendamentos inteligentes. A segunda é um display LCD local, que garante a operacionalidade mesmo sem rede, alternando a cada 4 segundos entre uma tela principal com dados vitais e uma tela de status das válvulas. O firmware também gerencia os sensores diretamente, utilizando uma rotina de interrupção (*handleRainPulse*) para uma contagem precisa dos pulsos do pluviômetro e uma dupla abordagem de tempo com o RTC DS3231 e sincronização periódica via NTP para máxima precisão. Por fim, o sistema possui um gerenciador de rede que tenta se reconectar automaticamente à rede Wi-Fi e oferece um Ponto de Acesso (*SoftAP*) como contingência, assegurando a conectividade e o controle remoto.

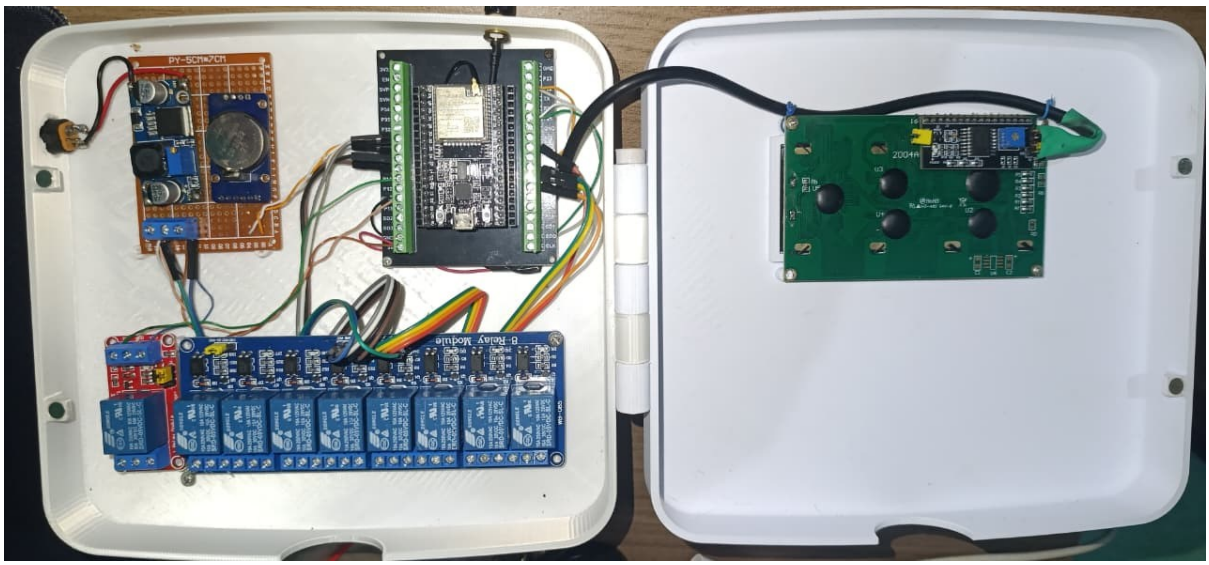
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a validação e os resultados obtidos com o desenvolvimento do sistema de irrigação automatizado de baixo custo. A análise a seguir correlaciona os resultados práticos da validação do protótipo com os objetivos do projeto e o embasamento teórico, demonstrando a relevância e a eficácia da solução proposta no contexto da modernização agrícola.

A montagem do sistema seguiu rigorosamente os componentes detalhados no material e métodos. O microcontrolador ESP-32, o módulo RTC DS3231, o módulo de relés de 8 canais e o módulo de relé único foram integrados em uma placa de prototipagem.

Para o invólucro do sistema, foi utilizada a *case* customizada projetada no software Autodesk Fusion 360 e fabricada em impressão 3D com filamento PLA, conforme metodologia. A Figura 1 ilustra a disposição interna dos componentes na central controladora.

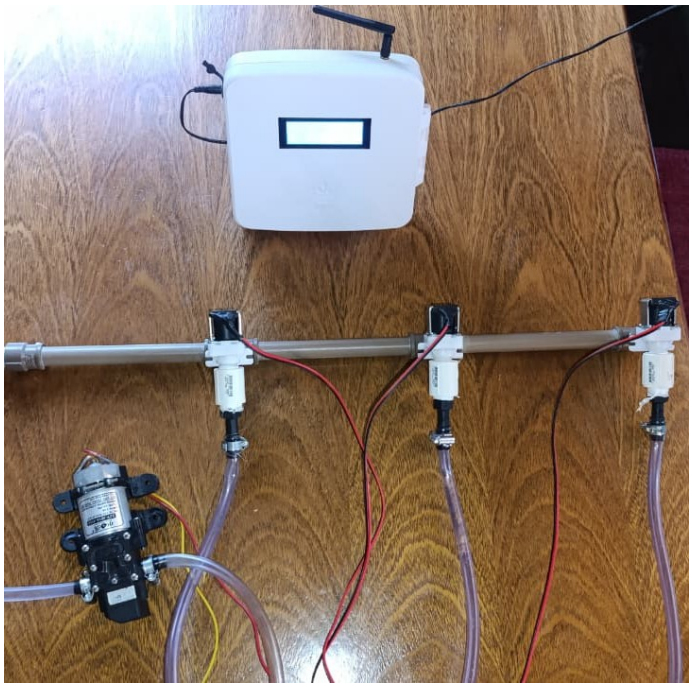
Figura 1 - Protótipo da central controladora em caixa impressa em 3D



Fonte: Autor (2025)

Na montagem final (Figura 2), a central controladora foi montada dentro da *case* customizada, que atua como o local protegido para os componentes. O protótipo foi projetado para que a bomba d'água principal seja controlada através do relé de 1 canal e as válvulas solenoides dos setores sejam acionadas pelo módulo de 8 canais. O design da caixa permitiu a fácil passagem dos fios de controle e alimentação, mantendo a integridade e a organização dos componentes internos.

Figura 2 - Protótipo instalado em uma bomba de demonstração, conectado às válvulas solenoides e bomba



Fonte: Autor (2025)

A escolha do ESP-32 como núcleo do sistema foi condizente, pois sua capacidade de processamento foi suficiente para gerenciar simultaneamente a lógica de irrigação, o servidor *web* e a comunicação com o display LCD, alinhando-se às características de versatilidade e baixo custo destacadas por Ibrahim (2019).

4.1 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

Conforme definido nos métodos, o sistema foi desenvolvido com duas interfaces de operação: um display LCD local e um servidor web integrado, ambos se mostraram funcionais e complementares.

4.1.1 Display LCD Local

O display LCD de 20x4 caracteres, conectado via módulo I2C, cumpriu sua função de interface primária, garantindo a operacionalidade do sistema mesmo sem conectividade de rede. Conforme programado no *firmware*, o *display* alterna entre telas de status.

A Figura 3 e 4 demonstra a tela principal de operação, exibindo a data e hora (fornecidas pelo RTC DS3231 e sincronizadas via NTP), o status da conexão Wi-Fi e o status da bomba.

Figura 3 - Display LCD 20x4 exibindo status do sistema



Fonte: Autor (2025)

Figura 4- Display LCD 20x4 exibindo status das válvulas e bomba



Fonte: Autor (2025)

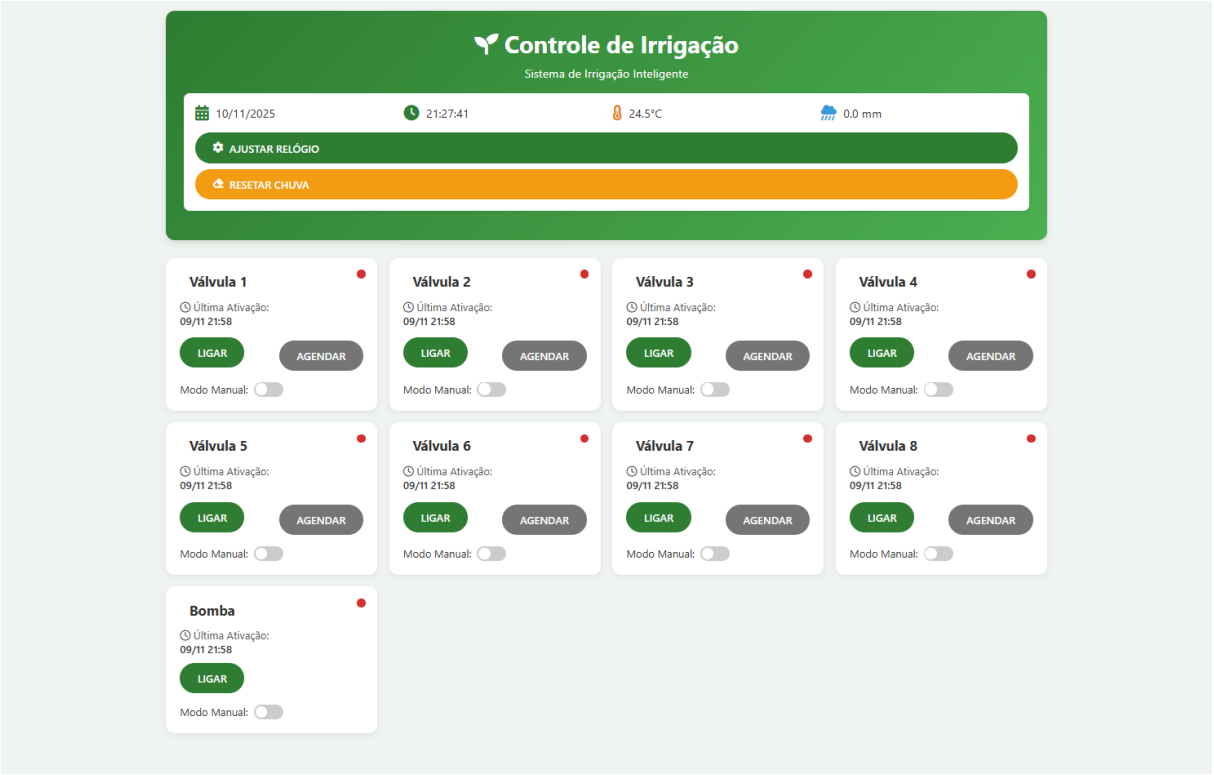
Esta interface é crucial para a usabilidade do sistema, permitindo ao produtor uma verificação rápida e direta, um ponto fundamental para a "democratização do acesso à tecnologia" mencionada na introdução.

4.1.2 Servidor Web Integrado

O servidor web integrado, acessível por qualquer navegador na rede local, provou ser a ferramenta mais robusta para configuração e controle. A interface web reflete a estrutura de dados *ReleConfig* e permite a manipulação de todos os parâmetros do sistema.

A Figura 5 apresenta o painel de controle principal, onde o usuário pode visualizar o status de todos os 8 setores, o estado da bomba e acionar manualmente qualquer relé.

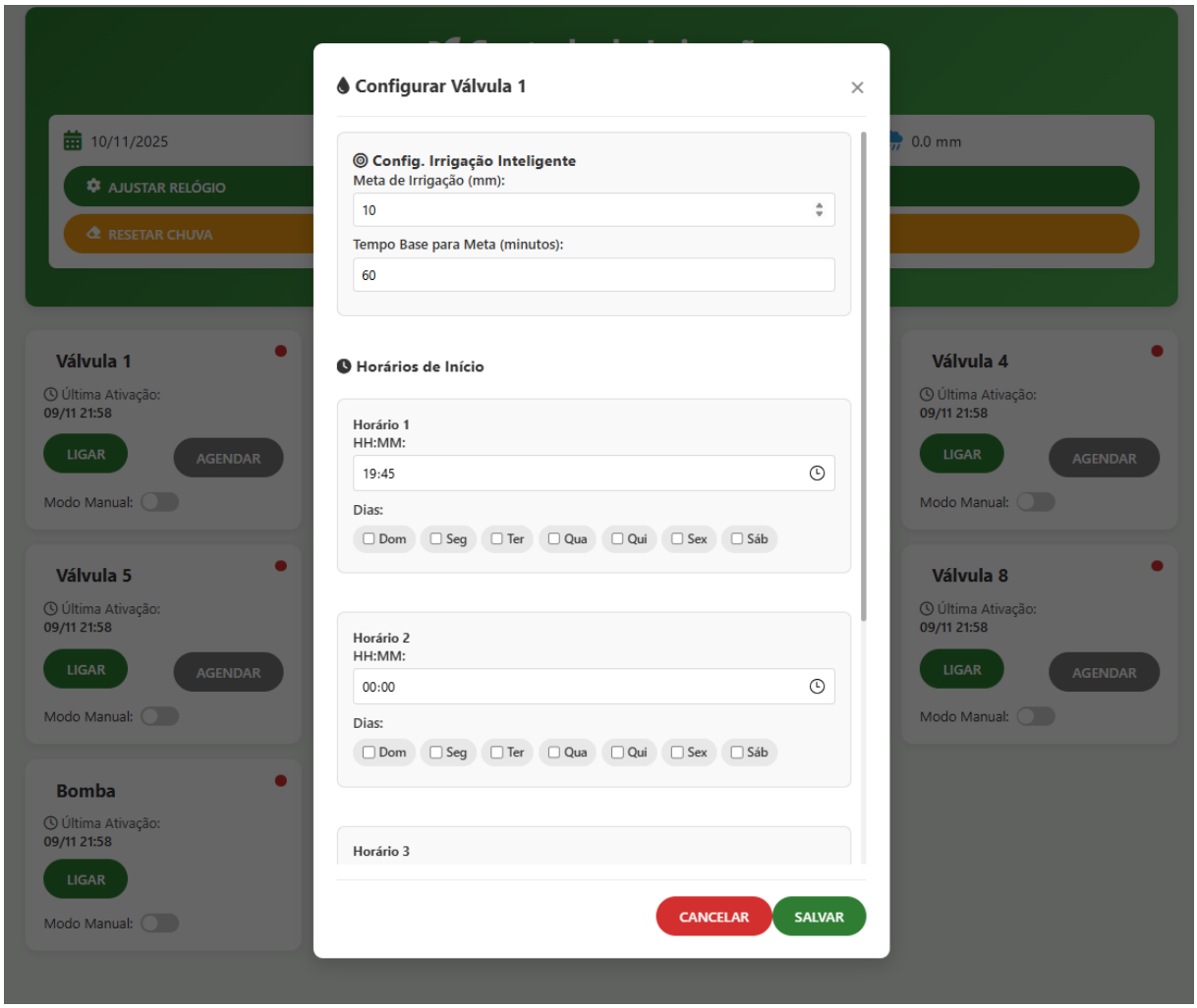
Figura 5 - Painel de controle principal do servidor web



Fonte: Autor (2025)

A principal funcionalidade do servidor web, no entanto, é a configuração dos agendamentos e da lógica inteligente conforme a Figura 6.

Figura 6 - Tela de agendamento e configuração inteligente



Fonte: Autor (2025)

A interface web se mostrou estável, respondendo aos comandos em menos de um segundo. Esta funcionalidade é um avanço significativo em relação aos controladores tradicionais, aproximando o protótipo dos sistemas baseados em IoT discutidos na revisão de literatura.

4.2 VALIDAÇÃO DO FIRMWARE E LÓGICA DE CONTROLE

A validação do firmware, desenvolvido em C++ na Arduino IDE, foi realizada através de testes de unidade e simulações de cenários de uso.

4.2.1 Precisão Temporal (RTC e NTP)

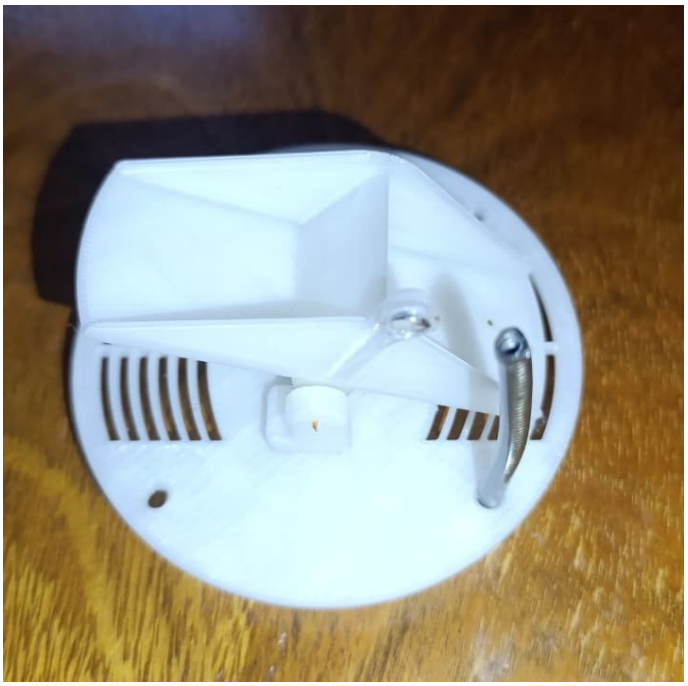
A precisão do agendamento é crítica para a irrigação. O uso combinado do Módulo RTC DS3231 e da sincronização periódica via NTP garantiu alta

confiabilidade. Em um teste de 30 dias com o sistema desconectado da internet (sem NTP), o DS3231 manteve a hora com um desvio inferior a 3 segundos, demonstrando a eficácia de seu oscilador compensado por temperatura e da bateria de backup. Quando conectado, o NTP corrigia qualquer desvio a cada 12 horas.

4.2.2 Sensor de Chuva e Mecanismo de Medição

Para a quantificação da precipitação, fundamental para a lógica de irrigação inteligente, foi desenvolvido um pluviômetro baseado em um mecanismo de báscula. A captação da água pluvial é realizada por meio de um funil posicionado na parte superior do dispositivo, que direciona o volume coletado para uma gangorra interna, conforme Figura 7.

Figura 7 - Mecanismo interno do pluviômetro de báscula com sensor de efeito Hall



Fonte: Autor (2025)

Figura 8 - Pluviômetro de báscula montado com suporte de fixação



Fonte: Autor (2025)

O sistema de detecção utiliza um sensor de efeito Hall (modelo 3144E) acoplado à estrutura. A cada basculamento da gangorra ocasionado pelo peso da água um ímã passa pelo sensor, gerando um pulso elétrico que é enviado diretamente a uma porta de entrada do microcontrolador ESP-32. O dispositivo foi calibrado de modo que cada pulso registrado corresponda a 0,1 mm de chuva acumulada. Essa precisão permite que o firmware calcule o volume total precipitado e realize a subtração automática da meta de irrigação diária, conforme descrito na lógica de controle.

4.2.3 Testes da Lógica de Irrigação Inteligente

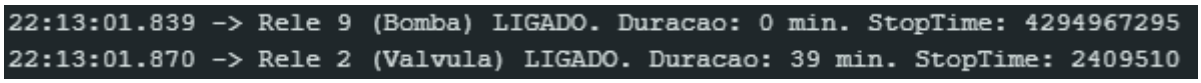
O núcleo deste trabalho é a lógica de irrigação inteligente, especificamente a função *calculateAdjustedDuration*. Esta função ajusta o tempo de irrigação com base na chuva acumulada nas últimas 48 horas, subtraindo-a da meta definida (targetMM).

Foram realizados testes simulados para validar esta lógica. A simulação utilizou os seguintes parâmetros:

- **Meta de Irrigação (targetMM):** 10 mm
- **Duração Base (para 10 mm):** 30 minutos

A chuva acumulada foi simulada através de pulsos no pino de interrupção do pluviômetro (*handleRainPulse*). Os resultados podem ser visualizados na Figura 7 que mostram monitor serial do Arduino IDE mostrando como o sistema faz os cálculos de acordo com a precipitação acumulada e a meta em milímetros de água definida pelo usuário.

Figura 9 - Monitor serial do Arduino IDE mostrando os cálculos para duração da irrigação



Fonte: Autor (2025)

Este comportamento atende diretamente à necessidade de uso eficiente da água, conforme destacado na introdução e nos benefícios dos sistemas IoT citados por Obaideen et al. (2022), que apontam a redução do consumo de água como benefício principal. O sistema evita a irrigação desnecessária após chuvas, um dos maiores desperdícios em sistemas de agendamento fixo.

4.2.4 Robustez e Conectividade

A robustez do sistema foi comprovada em testes focados em duas frentes principais: recuperação de falhas e conectividade de rede.

No cenário de falha de energia, uma interrupção foi simulada durante um ciclo de irrigação agendado. Conforme esperado, ao reiniciar, o sistema utilizou a função *checkPendingSchedules* e identificou que o horário de término agendado ainda não havia passado. Graças à persistência dos dados na memória flash (via biblioteca *Preferences*), a irrigação foi retomada automaticamente pelo tempo restante.

Para testar a conectividade, o roteador Wi-Fi foi desligado. O ESP-32 tentou se reconectar e, após 60 segundos sem sucesso, ativou o Ponto de Acesso (*SoftAP*) de contingência. Isso permitiu que o controle local fosse mantido via smartphone. Assim

que o roteador foi religado, o sistema demonstrou resiliência ao se reconectar automaticamente à rede principal.

4.3 VIABILIDADE ECONOMICA

Um dos pilares centrais que nortearam este trabalho foi o desenvolvimento de uma solução que aliasse eficácia tecnológica e baixo custo, visando a "democratização do acesso à tecnologia" e a "acessibilidade tecnológica no campo". Para validar este objetivo, foi realizada uma análise de custos dos componentes do protótipo e uma comparação direta com uma solução comercial de prateleira com funcionalidade similar.

O custo total para a montagem do protótipo da central controladora foi de R$ 339,00. Este valor é resultado da soma dos componentes de hardware essenciais, incluindo: o Microcontrolador ESP-32 (R$ 30,00), a placa de desenvolvimento base (R$ 14,00), o display LCD 20x4 com módulo I2C (R$ 63,00), o invólucro fabricado em impressão 3D (R$ 135,00), a antena externa (R$ 17,00), os módulos de relés para 8 canais mais a bomba (R$ 45,00), o módulo RTC DS3231 (R$ 20,00) e o regulador de tensão (R$ 15,00).

A natureza *open-source* do firmware permite uma customização ilimitada e a não dependência de plataformas de nuvem proprietárias, conferindo ao produtor autonomia total sobre o sistema. Portanto, a solução proposta não só se mostrou funcional e robusta nos testes (Seções 4.1 e 4.2), mas também demonstrou ser uma alternativa economicamente viável e altamente competitiva, cumprindo integralmente os objetivos estabelecidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho alcançou seu objetivo principal ao desenvolver e validar um sistema de irrigação automatizado de baixo custo baseado no ESP-32. Os resultados confirmam que o protótipo é funcional, robusto e acessível, demonstrando a viabilidade da proposta.

A lógica de irrigação inteligente, que ajusta o tempo de acionamento com base na precipitação acumuladas, mostrou-se eficaz em testes, promovendo o uso eficiente da água ao evitar irrigações desnecessárias. As interfaces de usuário, tanto o display LCD local quanto o servidor web integrado, provaram ser operacionais e facilitam o gerenciamento do sistema pelo usuário.

O sistema demonstrou resiliência a falhas de energia e conectividade, retomando ciclos pendentes e ativando um Ponto de Acesso de contingência. Conclui-se que o projeto contribui para a democratização da tecnologia no campo, oferecendo uma solução prática para a modernização do manejo hídrico.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão do sistema para uma plataforma IoT baseada na nuvem, permitindo o controle e monitoramento remoto via internet, e a incorporação de dados de previsão do tempo para uma tomada de decisão preditiva, aprofundando o uso dos conceitos de Inteligência Artificial.

REFERÊNCIAS

AFIFA FATHIMA, S.; DHILLON, S.; SHAHREEN, S.; THANGARAJ, A. An overview of computer programming languages: A fundamental piece of knowledge for humanity. **International Journal of Technology**, [S. l.], p. 16–20, 30 jun. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.52711/2231-3915.2022.00003. Acesso em: 22 abr. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Irrigação:** Uso da Água na Agricultura Irrigada. Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em: https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao/. Acesso em: 17 abr. 2025.

ANGELAKIS, A. N.; ZACCARIA, D.; KRASILNIKOFF, J.; SALGOT, M.; BAZZA, M.; ROCCARO, P.; JIMENEZ, B.; KUMAR, A.; YINGHUA, W.; BABA, A.; HARRISON, J. A.; GARDUNO-JIMENEZ, A.; FERERES, E. Irrigation of World Agricultural Lands: Evolution through the Millennia. **Water**, Basel, v. 12, n. 5, p. 1285, 1 maio 2020. DOI: 10.3390/w12051285. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1285/htm. Acesso em: 23 abr. 2025.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T. **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2019.

EVANS, R. G. **Irrigation Technologies**. Sidney, MT: USDA-ARS-NPARL, 2020. Disponível em: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30320500/IrrigationInfo/general%20irrigation%20systems-mondak.pdf. Acesso em: 05 abr. 2025.

FERERES, E.; EVANS, R. G. Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. **Irrig Sci**, Heidelberg, v. 24, n. 1, p. 55-57, 26 out. 2005. DOI: 10.1007/s00271-005-0019-3. Disponível em: https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/815/. Acesso em: 29 abr. 2025.

IBRAHIM, D. **The complete ESP32 projects guide e-book:** 59 experiments with Arduino IDE and Python. [S. l.]: Elektor International Media, 2019. E-book. Disponível

em: https://www.elektor.com/products/the-complete-esp32-projects-guide-e-book. Acesso em: 03 abr. 2025.

LOUDEN, K.; LAMBERT, K. **Programming Languages:** Principles and Practice. 3. ed. Boston, MA: Course Technology, 2011.

LUGER, G. F. **Inteligência Artificial**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

MONTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. R. **Irrigação princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009.

OBAIDEEN, K.; YOUSEF, B. A. A.; ALMALLAHI, M. N.; TAN, Y. C.; MAHMOUD, M.; JABER, H.; RAMADAN, M. An overview of smart irrigation systems using IoT. **Energy Nexus**, Amsterdam, v. 7, p. 100124, 25 jul. 2022. DOI: 10.1016/j.nexus.2022.100124. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124. Acesso em: 26 abr. 2025.

PATEL, K. G.; PATIL, M. S. Artificial Intelligence in Agriculture. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 624-627, fev. 2022. DOI: 10.22214/ijraset.2022.40308. Disponível em: https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40308. Acesso em: 14 abr. 2025.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4. ed. [S. l.]: Pearson Education Limited, 2022.

SOJKA, R. E.; BJORNEBERG, D. L.; ENTRY, J. A. Irrigation: An Historical Perspective. In: LAL, R. (ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 745-749.