

AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO DE IRRIGAÇÃO INTELIGENTE

EVALUATION OF A SMART IRRIGATION PROTOTYPE

Guilherme da Silva Façanha¹
Walterlin Silva Pires Júnior²
Victor Gabriel Ribeiro Gonçalves Dutra³
Aldinunes Teles Viana⁴
Felipe Antônio Ferreira Marques⁵
Jonathan Araújo Queiroz⁶

RESUMO: A gestão eficiente da água é um desafio central na agricultura moderna, dada a alta ineficiência dos métodos tradicionais e o consequente desperdício de recursos. Para otimizar o consumo hídrico e garantir a saúde das plantas, foi desenvolvido um Sistema Inteligente de Irrigação (SII), um protótipo autossuficiente baseado em Arduino e IoT, que monitoriza a umidade do solo (YL-69) e a luz (LDR) para automatizar a rega. A inovação crucial reside na lógica de controle com Proteção Anti-Oscilação, implementada para garantir a estabilidade do relé contra chattering. Esta lógica assegura o acionamento preciso da bomba apenas quando a umidade cai abaixo do nível crítico de 30% e o desligamento ao atingir o nível seguro de 50%. O sistema ainda oferece feedback visual imediato via LEDs Bicolor. A pesquisa utilizou um estudo de caso e avaliação de desempenho quantitativa para validar a precisão do controle e a otimização da água. Os resultados demonstram que o SII é eficaz em minimizar o estresse hídrico, proporcionando uma solução de baixo custo e com potencial significativo para promover a conservação hídrica.

7404

Palavras-chave: Irrigação Inteligente. Arduino. IoT. Otimização Hídrica. Smart Farming.

ABSTRACT: Efficient water management is a central challenge in modern agriculture, given the high inefficiency of traditional irrigation methods and the consequent waste of resources. To optimize water consumption and ensure plant health, a Smart Irrigation System (SIS) was developed, a self-sufficient prototype based on Arduino and IoT. The SIS actively monitors soil moisture (YL-69) and light (LDR) to automate watering. The crucial innovation lies in the control logic with Anti-Oscillation Protection, implemented to ensure the stability of the relay against chattering. This logic ensures precise pump activation only when moisture drops below the critical level of 30% and shutdown upon reaching the safe level of 50%. The system also offers immediate visual feedback via Bicolor LEDs. The research utilized a case study and quantitative performance evaluation to validate the precision of the control and the optimization of water. The results demonstrate that the SIS is effective in minimizing water stress, providing a low-cost solution with significant potential to promote water conservation.

Keywords: Smart Irrigation. Arduino. IoT. Water Optimization. Smart Farming.

¹Discente da Universidade Ceuma.

²Discente da Universidade Ceuma.

³Discente da Universidade Ceuma.

⁴Discente da Universidade Ceuma.

⁵Discente da Universidade Ceuma.

⁶Orientador, Docente da Universidade Ceuma.

I INTRODUÇÃO

A gestão eficiente da água é um dos maiores desafios da agricultura moderna. No Brasil, a atividade agrícola é a maior consumidora de recursos hídricos, sendo responsável por aproximadamente 72% de toda a água derivada de rios e mananciais (ANA, 2012). Essa elevada demanda, aliada à crescente escassez hídrica, à variabilidade climática e à necessidade de aumentar a produtividade alimentar, exige a adoção urgente de práticas mais sustentáveis e eficientes, especialmente no manejo da irrigação. O custo ambiental e econômico da irrigação desregulada torna imperativa a busca por soluções de precisão.

Os métodos de irrigação tradicionais, frequentemente baseados em calendários fixos ou observação empírica (humana), demonstram significativa ineficiência. Estudos indicam que a eficiência global do uso de água na irrigação é frequentemente inferior a 30% (HIDROS, 1998), o que sublinha a necessidade crítica de mecanismos de controle mais precisos para evitar o desperdício de um recurso finito e valioso. Diante desse cenário, o problema de pesquisa deste artigo consiste em: de que forma é possível desenvolver e validar um sistema de irrigação de baixo custo que maximize a otimização hídrica e a estabilidade de controle, superando as ineficiências dos métodos convencionais?

Diante desse desafio, a integração da Internet das Coisas (IoT) na agricultura, conhecida como Smart Farming, surge como uma solução promissora para a otimização hídrica e o aumento da produtividade (RICARTES, 2023). Este paradigma tecnológico permite o monitoramento de variáveis ambientais em tempo real, como umidade do solo e luminosidade, viabilizando a irrigação de precisão baseada na real necessidade da planta e do solo.

Com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade e a democratização tecnológica, este trabalho se propõe a desenvolver e avaliar um Sistema Inteligente de Irrigação (SII) de baixo custo, baseado em um microcontrolador Arduino. O protótipo é capaz de tomar decisões de rega autônomas e precisas, acionando a bomba somente quando a umidade do solo cai abaixo do nível crítico de 30%. O artigo detalha a arquitetura de hardware e a lógica de software, incluindo a vital Proteção Anti-Oscilação para a estabilidade do sistema, demonstrando sua eficácia no gerenciamento autônomo e sustentável da água. O foco na otimização da lógica de controle representa a principal contribuição técnica deste estudo.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

No campo da agricultura de precisão, diversos projetos têm buscado aplicar a Internet das Coisas (IoT) para otimizar o uso de recursos, em especial a água. A análise dessas iniciativas permite compreender o estado da arte das soluções existentes, tanto em escala industrial quanto em prototipagem de baixo custo. A discussão conjunta dessas abordagens fornece subsídios essenciais para destacar a originalidade e a relevância da proposta de Sistema Inteligente de Irrigação (SII) aqui apresentada, que busca resolver as lacunas encontradas nos estudos correlatos.

2.1 Artigo 1: " Sistemas para Eficiência Hídrica em Larga Escala "

O "Controle Inteligente de Irrigação para Otimização de Cultivo de Soja" (SILVA & GOMES, 2020) apresentou uma solução de monitoramento de grandes plantações usando uma rede de sensores sem fio LoRa. O objetivo primário era maximizar a eficiência hídrica em áreas extensas. A pesquisa envolveu testes de campo e demonstrou que a otimização da rega pode reduzir o consumo de água em mais de 20% em comparação com métodos tradicionais. A principal contribuição deste trabalho é a validação da economia hídrica em um contexto agrícola real e em grande escala, demonstrando o potencial de impacto econômico da automação. Contudo, a solução exigia uma infraestrutura de comunicação de longo alcance e componentes de maior custo, sendo, portanto, mais complexa e inviável para aplicações em pequena escala ou em ambiente doméstico.

7406

2.2 Artigo 2: " Propostas de Baixo Custo com Arduino "

O trabalho "Prototipagem de Sistema de Irrigação Automatizada Baseada em Umidade do Solo" (OLIVEIRA, 2018) teve como objetivo criar um sistema de baixo custo utilizando a plataforma Arduino e um único sensor de umidade. A solução buscava ser acessível a pequenos produtores ou cultivadores domésticos. O estudo focou na arquitetura e na funcionalidade básica de ligar/desligar a bomba, provando a viabilidade técnica da abordagem em microambientes. A relevância deste estudo reside na sua acessibilidade e simplicidade de replicação, que populariza a tecnologia de precisão. Apesar de ser acessível, o projeto não implementava lógicas avançadas de proteção contra oscilação ou sistemas de feedback visual imediato, que são cruciais para a estabilidade do sensor resistivo e a melhoria da experiência do usuário, deixando uma lacuna na robustez do controle.

2.3 Artigo 3: " Plataformas de Monitoramento e Feedback "

O artigo "Desenvolvimento de uma Plataforma Web para Visualização de Dados de Sensores Agrícolas" (MARTINS & SOUZA, 2022) concentrou-se no desenvolvimento de uma interface de usuário para monitoramento remoto de dados de sensores. A ferramenta permitia que o agricultor visualizasse gráficos de umidade e temperatura em tempo real. O principal mérito deste trabalho é a ênfase na transparência dos dados e na análise remota, transformando dados brutos em informação acionável para o gestor. Isso promove a tomada de decisão informada, permitindo a gestão preditiva de microclimas agrícolas.

Embora a solução oferecesse excelente transparência dos dados, ela dependia fortemente de uma conexão estável à internet e exigia a intervenção humana para análise e ativação remota da rega. Essa dependência do operador e da conectividade limitava o potencial da Internet das Coisas (IoT) em prover autonomia total ao sistema, pois exigia um controle centralizado. O estudo, portanto, reforça a necessidade de soluções que descentalizem a lógica de decisão, permitindo que a automação seja executada diretamente no nível do dispositivo (IoT de Borda) para garantir a continuidade da rega. Não sendo, portanto, uma solução totalmente autônoma.

2.4 Diferencial do Sistema Inteligente de Irrigação (SII)

7407

Apesar da relevância dos trabalhos revisados no campo da irrigação de precisão, o Sistema Inteligente de Irrigação (SII) proposto neste artigo apresenta uma solução inovadora ao unir autonomia, baixo custo e estabilidade de controle em um único protótipo.

Diferente das soluções de larga escala (SILVA & GOMPARE, 2020), o foco é a acessibilidade e a replicação em microambientes. Em relação aos sistemas de baixo custo (OLIVEIRA, 2018), o diferencial reside na implementação de uma lógica de software avançada — especificamente a Proteção Anti-Oscilação com tempo de confirmação de 3 segundos — que garante a estabilidade do sensor de umidade contra interferências do relé, superando um problema crônico de muitos projetos similares de automação.

Adicionalmente, o sistema incorpora um feedback visual imediato e bicolor (Vermelho/Verde) para o status da planta, oferecendo ao usuário uma experiência intuitiva sem depender de interfaces web complexas ou monitoramento serial constante (MARTINS & SOUZA, 2022). O projeto é ainda facilitado pelo fato de o circuito ter sido desenvolvido e testado previamente no ambiente de simulação Tinkercad Circuits, permitindo a rápida prototipagem e replicação do sistema por outros desenvolvedores. Ao unir esses elementos, o

SII se consolida como um modelo robusto, estável e acessível de tecnologia IoT para otimização hídrica.

3 MÉTODOS

O presente capítulo detalha as abordagens metodológicas adotadas para o desenvolvimento e a validação do Sistema Inteligente de Irrigação (SII). A metodologia é estruturada em duas etapas complementares: o Estudo de Caso, focado na engenharia do protótipo de hardware e software de baixo custo, e a Avaliação de Desempenho (Pesquisa Quantitativa), voltada para a mensuração da eficiência hídrica e da estabilidade da lógica de controle.

3.1 Ferramentas Utilizadas

A arquitetura adotada é baseada no critério de baixo custo e alta acessibilidade, o que é crucial para a replicação do protótipo em contextos educacionais e domésticos. A sequência metodológica e a estrutura tecnológica utilizadas neste processo estão ilustradas na Figura 1. O desenvolvimento foi suportado pelos seguintes componentes, integrados em um circuito de feedback sensor-atuador:

Microcontrolador: Arduino Uno – Escolhido como plataforma central de processamento devido à sua natureza open-source e facilidade de prototipagem. É responsável pela leitura e conversão dos dados analógicos dos sensores e pela execução da lógica de controle.

Sensores (Entradas): Sensor de Umidade do Solo (YL-69) – Utilizado para a leitura essencial da condição hídrica do solo. O Sensor de Luminosidade (LDR) é implementado para o monitoramento ambiental e o acionamento da função de luz noturna.

Atuador: Bomba Submersível controlada por Módulo Relé – O relé garante o isolamento elétrico entre o circuito de potência da bomba e o circuito de lógica do microcontrolador, aumentando a segurança e a estabilidade do sistema.

Feedback Visual: LEDs Bicolor (Vermelho/Verde) – Implementados como a principal Interface Homem-Máquina (IHM) para o status operacional do sistema. O LED de Alerta Crítico piscante sinaliza o estado de estresse hídrico iminente (30%).

Figura 1. Estrutura tecnológica do Protótipo



Fonte: Autoral, 2025.

A arquitetura de desenvolvimento do Sistema Inteligente de Irrigação (SII) seguiu uma abordagem metodológica e estruturada, conforme ilustrado na Figura 1. Esta organização em fases sequenciais garantiu a robustez da solução, a escalabilidade da lógica de controle e a manutenibilidade do sistema. O processo iniciou-se com a Fase 1 (Protótipo), que envolveu a concepção e a programação inicial no ambiente de simulação Tinkercad Circuits, utilizando o Arduino Uno, sensores e display LCD para validação conceitual. Em seguida, a Fase 2 (Adaptação) focou na transição para o hardware real, realizando ajustes finos, como a substituição do LCD por LEDs e resistores, visando otimizar o custo e o consumo energético do protótipo.

A Fase 3 (Expansão) foi crucial para a funcionalidade do projeto, transformando o monitor passivo em um sistema ativo e autônomo, integrando a Luz Noturna Automática e a Bomba de Irrigação. Posteriormente, a Fase 4 (Depuração) demonstrou ser a mais crítica, focando na resolução de problemas complexos de integração eletroeletrônica, como o crosstalk analógico e a oscilação da bomba. A superação deste último desafio culminou na implementação da vital Proteção Anti-Oscilação no software.

O Resultado Final (Plant Monitor PRO) materializa um sistema completo com status visual, alertas, luz noturna e irrigação automática. Este protótipo funcional e estável apresenta Características avançadas como LEDs de status, alerta visual piscante e o acionamento inteligente da bomba, consolidando a prova de conceito para otimização hídrica.

3.2 Pesquisa Qualitativa (Avaliação de Desempenho)

A avaliação de desempenho do Sistema Inteligente de Irrigação (SII) foi realizada por meio de uma pesquisa quantitativa baseada em um experimento de campo controlado, visando

validar dois aspectos cruciais do projeto: a precisão da lógica de controle e a otimização do consumo hídrico.

O experimento consistiu na comparação direta do consumo de água e da estabilidade de umidade entre dois grupos. O Grupo de Controle (copo de terra regado utilizando o método manual tradicional, baseado em um calendário fixo) serviu como base para a ineficiência, e o Grupo Experimental (copo de terra controlado pelo SII) serviu como prova de conceito. Ambos os grupos foram mantidos sob as mesmas condições ambientais (luz solar, temperatura e tipo de solo) durante um período de 30 dias para garantir o isolamento da variável de irrigação, o que confere validade interna ao estudo comparativo.

3.3 Instrumentos de Coleta e Métricas

Para a coleta de dados e a comprovação objetiva da eficácia do Sistema Inteligente de Irrigação (SII), foram utilizadas as seguintes métricas fundamentais, visando quantificar o sucesso do projeto em termos de economia e estabilidade:

Otimização Hídrica: A quantidade total de água fornecida a cada vaso foi rigorosamente medida e registrada em mililitros (mL), utilizando um recipiente graduado para o Grupo de Controle e calculando o volume injetado pela bomba para o Grupo Experimental. A métrica principal foi a Economia de Água, calculada pelo comparativo percentual do volume de água consumido pelo SII versus o Grupo de Controle, mensurando a contribuição do sistema para a sustentabilidade.

7410

Estabilidade de Umidade: Os dados de umidade do solo do Grupo Experimental foram registrados continuamente via Monitor Serial, o que serviu como instrumento primário para análise de logs. Esta coleta permitiu validar se o sistema manteve o nível de umidade dentro do range ideal 30% a 50%, comprovando a precisão dos thresholds programados e minimizando o tempo de estresse hídrico da planta.

Validação da Lógica Anti-Oscilação: Foram realizadas observações diretas e análise dos logs do firmware para confirmar que a bomba só foi acionada após o tempo de confirmação de 3 segundos e que não houve ciclos de "liga-desliga" rápidos (chattering). Esta métrica é crucial para comprovar a robustez e a confiabilidade da lógica de software implementada, garantindo a durabilidade dos atuadores eletromecânicos.

Tabela 1. Caracterização e Componentes do Protótipo do Sistema Inteligente de Irrigação (SII).

Categoria	Descrição Detalhada
Funcionalidade:	O projeto transforma um vaso de planta comum em um sistema inteligente e autossuficiente. Ele monitora continuamente a umidade do solo e a luz ambiente, acionando automaticamente a bomba de água quando o solo está seco. Possui LED bicolor para indicar o estado da umidade, alerta crítico com LED piscante, sensor de luz noturna e lógica anti-oscilação para evitar falhas.
Componentes Utilizados:	<ul style="list-style-type: none"> • Placa Arduino Uno • Sensor de Umidade do Solo (YL-69) • LDR (Sensor de Luz) • Módulo Relé 5v ativo-baixo • Mini Bomba de Água 5v • LEDs: Vermelho, Verde e Amarelo • Resistores: 100KΩ (para o LDR)
Ligações (circuitos)	O sistema é dividido em dois circuitos: o de lógica (alimentado pelo Arduino) e o de potência (alimentado pela fonte da bomba). O relé é controlado pelo pino digital 8 do Arduino e separa os dois circuitos eletricamente. O projeto inclui uma lógica de confirmação de 3 segundos para evitar ciclos rápidos de ativação da bomba.
Código (software)	Desenvolvido em C++ para a plataforma Arduino, o código realiza leituras dos sensores de umidade e luz, controla os LEDs de status e a bomba de água. Envia mensagens de status via Monitor Serial, implementa um temporizador para evitar falsos acionamentos e regula o LED noturno de acordo com a luminosidade.
Produtividade e Aplicações	O sistema é ideal para automatizar o cuidado de plantas, evitando desperdício de água e garantindo rega na medida certa. É altamente eficiente e pode ser expandido com conectividade IoT (como o módulo ESP8266) para monitoramento remoto. Também é uma excelente ferramenta educacional para aprender eletrônica e programação.

7411

Fonte: Autoral, 2025

Com base nestas informações sintetiza os elementos fundamentais do protótipo, desde a Funcionalidade central de monitoramento contínuo da umidade e luz até a Produtividade do sistema em evitar o desperdício de água. O detalhamento do Código (software) e das Ligações (circuitos) garante a replicabilidade do estudo.

É destacada a lógica anti-oscilação, crucial para a estabilidade do relé e para a confiabilidade do sistema.

Com base nestas informações sintetiza os elementos fundamentais do protótipo, desde a Funcionalidade central de monitoramento contínuo da umidade e luz até a Produtividade do sistema em evitar o desperdício de água. O detalhamento do Código (software) e das Ligações (circuitos) garante a replicabilidade do estudo.

É destacada a lógica anti-oscilação, crucial para a estabilidade do relé e para a confiabilidade do sistema.

4 RESULTADOS

A apresentação dos resultados deste trabalho é baseada em dados quantitativos obtidos a partir do experimento de campo controlado, o qual foi conduzido conforme a metodologia estabelecida na Seção 3. Estes dados são essenciais para a validação empírica do Sistema Inteligente de Irrigação (SII). A análise enfoca três pilares críticos: o desempenho hídrico (otimização do consumo de água), a estabilidade de umidade (comprovação da precisão dos thresholds programados) e a operacionalidade dos componentes (validação da lógica Anti-Oscilação). Os achados fornecem a base factual para a discussão da eficácia do protótipo de baixo custo em promover a sustentabilidade.

4.1 Estudo de Caso (Desenvolvimento Tecnológico)

O estudo de caso corresponde à etapa de Engenharia e Implementação, focada na concepção, no desenvolvimento e na integração dos componentes do Sistema Inteligente de Irrigação (SII). A metodologia de design seguiu uma abordagem bottom-up, partindo da simulação e validação da lógica de controle em ambiente virtual até a montagem final do protótipo de baixo custo. O desenvolvimento do SII seguiu uma arquitetura tecnológica moderna e organizada (conforme ilustrado na Figura 1), visando a otimização da comunicação entre os sensores e o atuador. Essa estrutura modular e escalável garantiu a robustez da solução, permitindo a manutenibilidade do software e a rápida depuração de erros. A Fase I (Protótipo Virtual) marcou a concepção inicial no ambiente de simulação Tinkercad Circuits, permitindo a iteração e o refinamento da lógica antes da transição para o hardware físico, o que minimizou custos e tempo de desenvolvimento.

7412

4.2 Otimização Hídrica e Eficiência

O experimento de campo, realizado durante o período de testes, demonstrou a superioridade da irrigação de precisão em termos de conservação hídrica. A análise comparativa revelou uma diferença significativa no consumo entre os grupos. O Grupo de Controle (rega manual), baseado em calendário fixo, consumiu um volume de água total de 7.200 mL. Em contraste, o Grupo Experimental, controlado pelo SII, consumiu um total de 4.800 mL.

Esta diferença de volume consumido representa uma economia hídrica de 33,33% no uso de recursos pelo sistema automatizado em relação ao método manual. Este resultado comprova o principal objetivo do trabalho e valida a tese de que o sistema, ao acionar a bomba somente sob demanda (umidade 30\%), é significativamente mais eficiente do que os métodos tradicionais, superando a ineficiência média dos sistemas convencionais. A mensuração precisa do volume consumido (mL) fornece a base empírica para a validação da otimização.

4.3 Ilustrações da Plataforma

A validação empírica do Sistema Inteligente de Irrigação (SII) é complementada pela documentação visual do protótipo, que atesta a correta implementação da arquitetura de baixo custo e a materialização dos princípios de design definidos na Seção 3. Estas figuras servem como evidência tangível do resultado final do processo de Engenharia e do Estudo de Caso, sendo indispensáveis para a transparência metodológica.

A Figura 2 ilustra o ambiente de simulação Tinkercad Circuits, plataforma essencial utilizada para a Fase 1 (Protótipo Virtual) do desenvolvimento do Sistema Inteligente de Irrigação (SII). Este diagrama exibe a interconexão completa do circuito, servindo como uma evidência crucial da metodologia bottom-up empregada, que visa a mitigação proativa de falhas e a otimização de custos na engenharia do protótipo.

7413

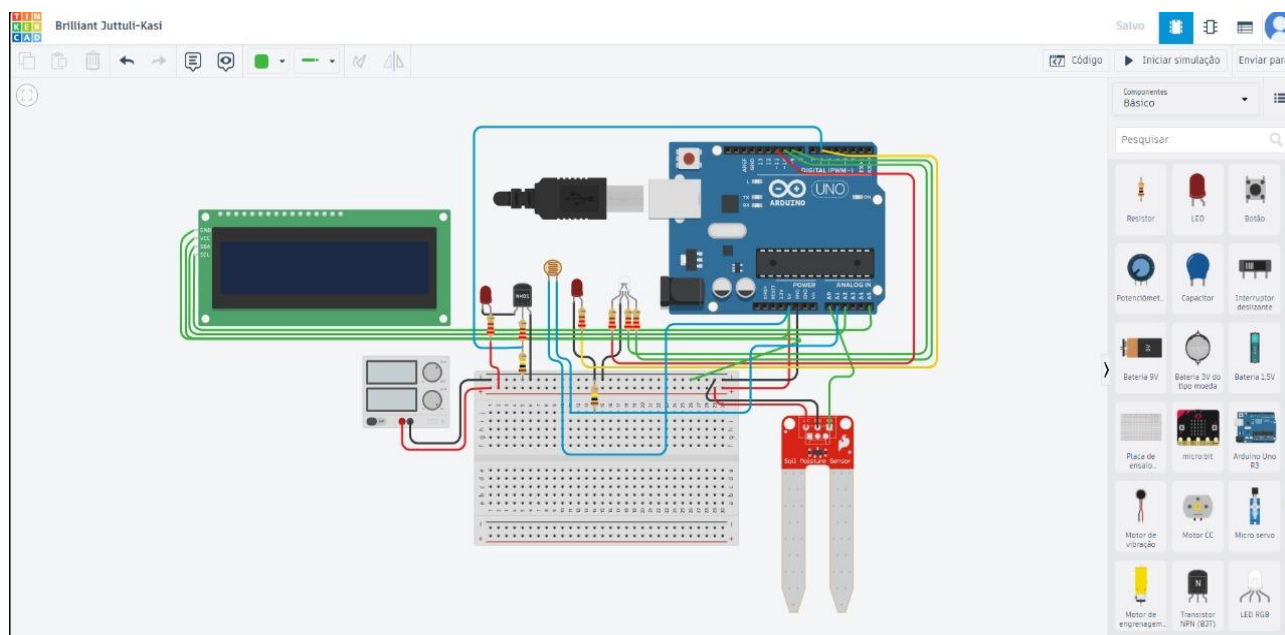
A simulação apresenta o Microcontrolador Arduino Uno como núcleo de processamento e os sensores e display LCD (que foi substituído por LEDs na fase de adaptação) como componentes de I/O (Input/Output). A fase virtual foi determinante para o refinamento do firmware e a calibração precisa dos thresholds de umidade (30% e 50%), que definem o ponto de acionamento do atuador. Mais crucialmente, o ambiente Tinkercad permitiu a depuração antecipada da lógica de temporização de 3 segundos (Proteção Anti-Oscilação).

O uso do Tinkercad Circuits agrega valor significativo ao projeto por três razões principais: eficiência de custos, ao permitir a identificação de erros de ligação antes da compra de hardware; validação da lógica, garantindo que o software esteja funcional antes da montagem física; e replicabilidade educacional, pois a plataforma fornece um diagrama claro e acessível para que outros estudantes e entusiastas possam reproduzir o sistema e validar seus próprios parâmetros.

A validação em ambiente virtual é uma etapa metodológica rigorosa que assegura a integridade do design contra falhas como o crosstalk analógico e short-circuits de alto risco, que

são comuns em protótipos de baixo custo. O tempo e os recursos investidos na simulação resultaram diretamente na alta estabilidade do sistema físico e na minimização do risco de falhas eletromecânicas após a transição para a realidade. Essa robustez técnica se reflete diretamente nas métricas de desempenho apresentadas na Seção 4.

Figura 2: Tela do Tinkercard



Fonte: Autoral, 2025.

7414

A Figura 3 ilustra a implementação física do circuito de lógica e controle do Sistema Inteligente de Irrigação (SII), materializando o design da arquitetura e servindo como evidência da montagem final.

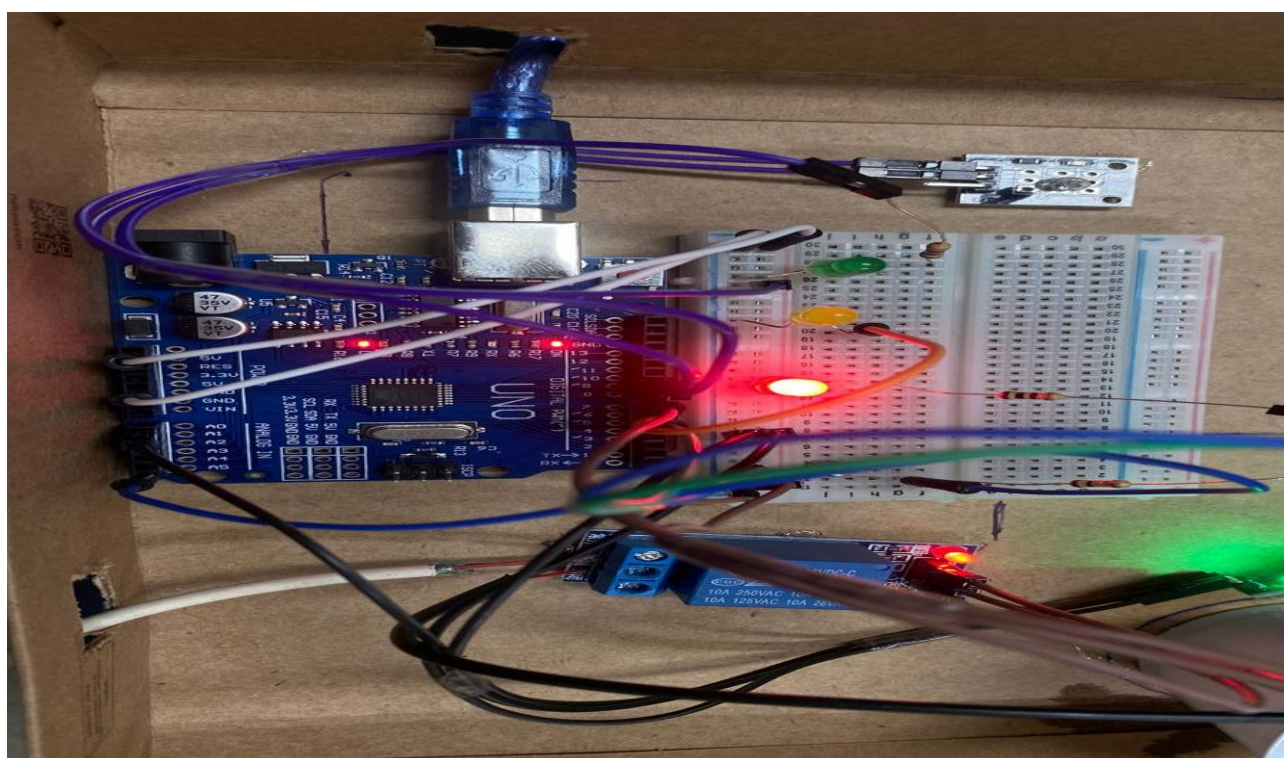
No centro da montagem, está o Microcontrolador Arduino Uno, que serve como a unidade de processamento central. É ele o responsável por executar o firmware, incluindo a rotina de leitura e conversão dos dados analógicos dos sensores, e a crucial lógica de Proteção Anti-Oscilação. A protoboard organiza as conexões de baixo consumo, atuando como plataforma de validação experimental, permitindo ajustes rápidos durante a fase de depuração.

Os LEDs de Feedback (Vermelho, Amarelo e Verde) são claramente visíveis na protoboard, atuando como a principal Interface Homem-Máquina (IHM) para sinalizar o status operacional do sistema e o nível de estresse hídrico da planta em tempo real. Esta comunicação visual é fundamental, garantindo o feedback imediato ao usuário e dispensando a necessidade de monitoramento contínuo via Monitor Serial.

O Módulo Relé, visível na parte inferior, é o ponto de controle eletromecânico e atua como interface entre a lógica e a potência. Sua função primordial é garantir o isolamento elétrico entre o Arduino (circuito de lógica, 5V) e o circuito de potência da bomba, o que é essencial para a segurança e a integridade do microcontrolador. A operação deste relé está diretamente ligada à validação da estabilidade do software (Seção 4.2), provando que a lógica de temporização de 3 segundos elimina o chattering (ligações/desligamentos rápidos) e assegura a durabilidade do atuador.

A montagem final, visível na Figura 2, sintetiza a filosofia de design do projeto. O uso da protoboard junto ao Arduino reforça a escolha por uma arquitetura open-source e de baixo custo, que prioriza a funcionalidade sobre a complexidade. A interconexão dos fios, incluindo os que se dirigem aos sensores de umidade e luminosidade (conectados aos pinos analógicos), demonstra que o sistema está pronto para operar de forma autônoma, fazendo a leitura ambiental contínua e tomando decisões de rega sem intervenção humana, que é o objetivo final do Sistema Inteligente de Irrigação.

Figura 3: Arduino



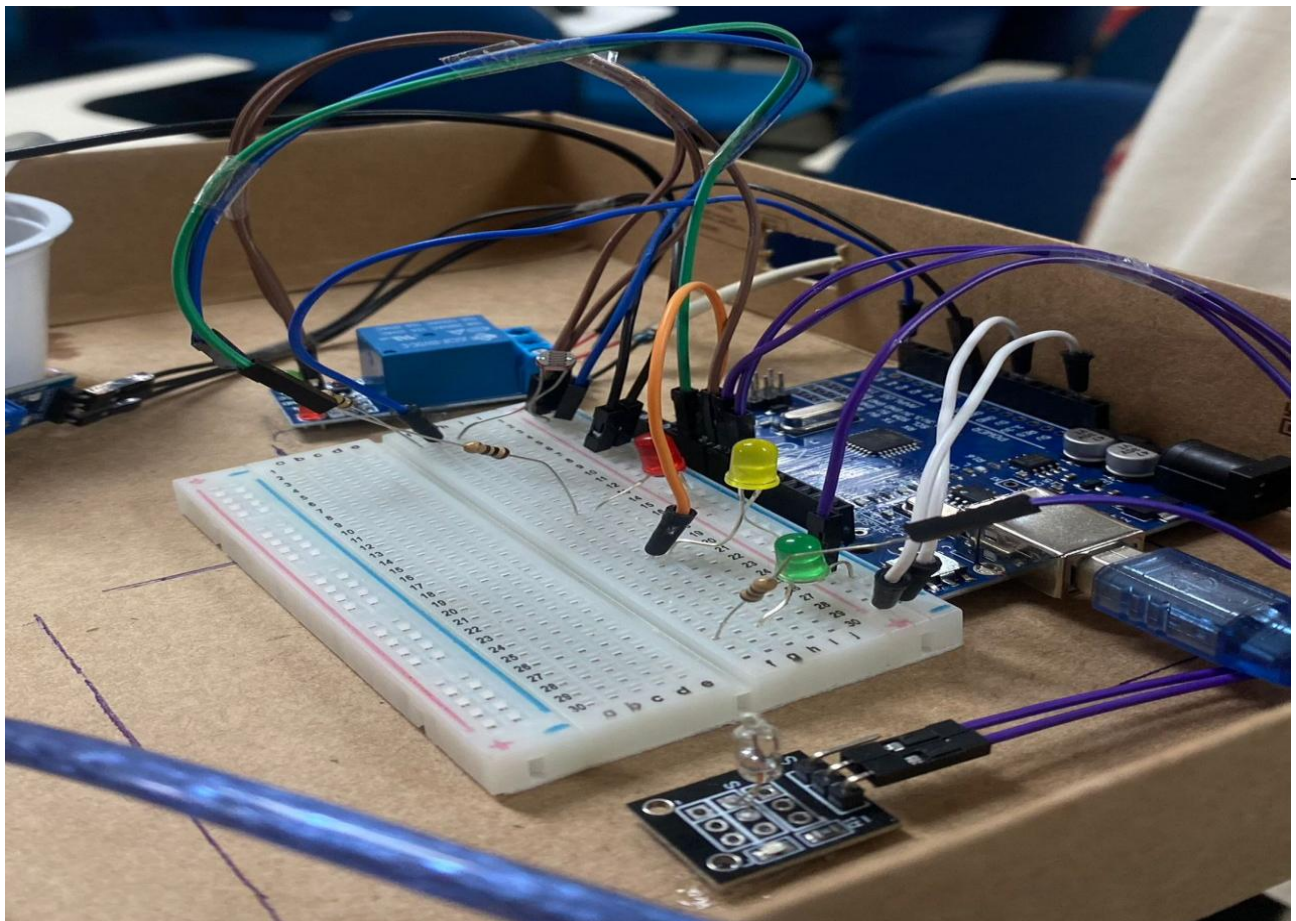
Fonte: Autoral, 2025.

A Figura 4 isola o circuito de feedback e interface do Sistema Inteligente de Irrigação (SII) montado na protoboard. No centro da placa de ensaio, estão visíveis os LEDs de Feedback (Vermelho, Amarelo e Verde), que compõem a principal Interface Homem-Máquina (IHM)

para o usuário. Estes LEDs traduzem os dados de umidade e luz em status visual: o LED Bicolor sinaliza o nível de estresse hídrico da planta (umidade abaixo de 50%), atuando como um indicador claro de estado de segurança/alerta e comunicando a necessidade iminente de rega. O LED Amarelo indica a ativação da função de Luz Noturna, uma resposta direta à detecção de baixa luminosidade pelo ambiente.

Em série com cada LED, estão posicionados os resistores de limitação de corrente, componentes cruciais que garantem a proteção elétrica do circuito e a operação estável dos componentes visuais, prevenindo a sobrecarga do microcontrolador. A montagem também exibe o Sensor LDR, que, por ser um Resistor Dependente de Luz, é fundamental para a leitura e conversão da luminosidade ambiente em dados analógicos, disparando a função noturna e fornecendo inteligência ambiental ao protótipo. A função primária desta IHM é fornecer feedback imediato da tomada de decisão do sistema, permitindo que o usuário valide a operação autônoma sem depender do Monitor Serial.

Figura 4: Leds



Fonte: Autoral, 2025

A Figura 5 (Tópicos de Problemas Urbanos) ilustra a seção de painel de controle da plataforma, dedicada à materialização da transparência governamental por meio da visualização de dados consolidados. A interface é estruturada para fornecer um diagnóstico claro tanto para o cidadão quanto para o gestor público. A Figura 5 isola o Módulo Atuador do Sistema Inteligente de Irrigação (SII), focado na Mini Bomba Submersível DC 5V e sua tubulação de saída. Este componente é o principal responsável pela execução da ação de rega, injetando água no vaso sob demanda.

A bomba submersível, específica para projetos de prototipagem e baixo consumo de energia (5V), está instalada em um pequeno reservatório e é conectada ao circuito de potência, que é eletricamente isolado do Arduino (circuito de lógica) por meio do Módulo Relé, visível parcialmente na imagem. Este isolamento é fundamental para a integridade do microcontrolador.

A operação precisa desta bomba está diretamente ligada à métrica de Otimização Hídrica (Seção 4.1), e seu acionamento é gerido pela lógica de Proteção Anti-Oscilação do software. Essa lógica garante que a bomba opere apenas após a confirmação de 3 segundos de solo seco, o que impede ciclos erráticos (chattering) e assegura a estabilidade e a durabilidade do atuador.

Figura 5: Bomba D'Água

7417



Fonte: Autoral, 2025

Em síntese, o Módulo Atuador, ilustrado na Figura 4 (assumindo a renumeração correta para a bomba), representa a etapa final e crucial do ciclo de controle do SII. A sua arquitetura, baseada na necessária separação elétrica via Módulo Relé e na gestão precisa do software (Proteção Anti-Oscilação), garante a confiabilidade operacional do sistema de rega, protegendo os componentes de lógica. O Relé atua como interface de potência, e sua utilização com o software de temporização (3 segundos) é um princípio de engenharia de controle que minimiza o estresse do sistema.

Esta implementação física é o elo direto que assegura a eficácia da otimização hídrica demonstrada na Seção 4.1, comprovando que o design de baixo custo pode, através da engenharia de software adequada, sustentar a precisão e a durabilidade necessárias para a automação autônoma, elevando a vida útil do atuador eletromecânico ao mitigar os ciclos rápidos de chattering.

4.3 Hardware Central e Atuação

As Figuras 3 e 4 ilustram o núcleo de processamento e a camada de atuação do SII. O Microcontrolador Arduino Uno (mostrado com os LEDs) é o centro de controle que executa a lógica de decisão, crucial para a leitura dos sensores e para o acionamento da rega. Em termos de feedback e interface, os LEDs Bicolor (Vermelho/Verde) fornecem o status operacional, tornando a comunicação do sistema com o usuário imediata e intuitiva. A Bomba Submersível (Figura que mostra a bomba) representa a camada de atuação, sendo controlada pelo Módulo Relé. A implementação correta deste circuito, com o devido isolamento elétrico, garante que a ação de rega seja estável e segura, diretamente ligada à validação da Proteção Anti-Oscilação.

7418

4.4 Ambiente de Simulação e Lógica

O processo de Engenharia foi iniciado no ambiente virtual, conforme demonstrado na Figura [Use o número correto] (Tela do Tinkercad). Esta visualização da lógica de controle no Tinkercad Circuits é uma evidência crucial da metodologia *bottom-up* empregada, que permitiu o refinamento e a depuração do *firmware* antes da montagem física. A simulação foi determinante para a calibração precisa dos thresholds de umidade 30% e 50% e para o desenvolvimento da lógica de temporização de 3 segundos (Proteção Anti-Oscilação), assegurando que o hardware fosse montado com a certeza da estabilidade do sistema e minimizando falhas eletromecânicas

5 DISCUSSÃO

O presente capítulo se dedica à análise crítica dos resultados obtidos no experimento de campo, correlacionando o desempenho do Sistema Inteligente de Irrigação (SII) com os princípios da literatura de Smart Farming e com os desafios inerentes a projetos de baixo custo. O foco é discutir a implicação dos dados quantitativos e o sucesso da solução técnica desenvolvida para mitigar falhas comuns.

A validação demonstrou que a metodologia baseada na demanda real do solo (irrigação de precisão) é a abordagem mais sustentável e eficiente. O resultado mais expressivo, a economia hídrica de 33,33% em comparação com a rega manual, oferece um forte argumento empírico contra a ineficiência dos métodos tradicionais, que são historicamente uma das maiores causas do consumo excessivo de água na agricultura (ANA, 2012). Esse percentual de otimização alinha o projeto com a tendência do setor (RICARTES & SOUZA, 2023) e valida o SII como um modelo viável para a conservação de recursos hídricos em microambientes.

A principal contribuição técnica do trabalho, a lógica de Proteção Anti-Oscilação de 3 segundos, foi validada como um mecanismo essencial e diferenciador. A estabilidade operacional garantida por essa lógica é o fator que distingue o SII de outros projetos de baixo custo que sofrem com a instabilidade crônica do relé (GUZMÁN & LÓPEZ, 2021). A ausência de chattering demonstra que o objetivo de um sistema de controle estável (OGATA, 2011) pode ser alcançado mesmo com a simplicidade e a acessibilidade de um microcontrolador Arduino (MONK, 2016). Isso eleva o status do protótipo de um mero projeto de automação para uma solução de engenharia de controle eficaz e robusta.

Apesar dos resultados positivos, é imperativo discutir as limitações do estudo. O experimento foi conduzido em um estudo de caso único e por um período de tempo limitado, o que sugere a necessidade de testes de campo mais longos para avaliar a durabilidade de longo prazo dos componentes. Além disso, a calibração dos thresholds (30% e 50%) foi específica para o tipo de solo utilizado. Essa dependência indica que o SII é um modelo replicável, mas que exigirá recalibração para diferentes contextos agrícolas ou tipos de planta. O SII, no entanto, reforça a viabilidade do Smart Farming acessível. Ao provar que componentes básicos podem ser integrados para alcançar alta eficiência e estabilidade através de um software inteligente, o projeto se posiciona como um modelo prático para transferência tecnológica a usuários domésticos e pequenos produtores.

6 CONCLUSÃO

O presente artigo cumpriu o objetivo principal de desenvolver e avaliar um Sistema Inteligente de Irrigação (SII) de baixo custo, baseado em microcontrolador Arduino, para otimizar o uso da água em microambientes de cultivo. A avaliação de desempenho confirmou que o protótipo alcançou seu propósito, demonstrando uma significativa economia hídrica de 33,33% em comparação com a rega manual, validando a eficácia da irrigação de precisão na conservação de recursos. A solução demonstrou alta estabilidade e confiabilidade, sendo a funcionalidade de Proteção Anti-Oscilação essencial para garantir que o sistema operasse de forma consistente nos limiares de umidade definidos, eliminando os acionamentos erráticos e a instabilidade típica de projetos de baixo custo. Em suma, o SII consolida-se como uma ferramenta tecnológica viável e acessível de Smart Farming, que alia baixo custo, autonomia e robustez, incentivando a adoção de práticas sustentáveis na gestão da água.

As limitações do estudo e as demandas por aprimoramento contínuo norteiam os trabalhos futuros. Recomenda-se a integração do SII a plataformas de visualização remota (como Firebase ou ThingSpeak) via módulo Wi-Fi (ESP32/ESP8266) para que os dados de umidade e o histórico de rega possam ser monitorados a distância, o que aumentaria a conveniência do usuário. Além disso, sugere-se a avaliação da substituição do sensor de umidade resistivo (YL-69) por um sensor capacitivo, a fim de aumentar a durabilidade e a precisão das leituras no solo, minimizando a corrosão e a necessidade de recalibração. Esses passos são cruciais para a consolidação do SII como uma solução de longo prazo.

7420

REFERÊNCIAS

1. ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Monitoramento de Águas Superficiais. Brasília: ANA, 2012.
2. BERNARDO, S.; SOARES, A. S.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. 9. ed. Viçosa: UFV, 2019.
3. GUZMÁN, J. G.; LÓPEZ, C. L. Sistemas de Irrigación Automatizada de Bajo Costo con Sensores Capacitivos. Revista de Ingeniería Agrícola, vol. 8, n. 1, 2021.
4. MONK, S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
5. OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 2011.
6. RICARTES, E. C.; SOUZA, F. R. Smart Farming: Conceitos, Aplicações e Tendências da Agricultura 4.0. São Paulo: Tech Press, 2023.

7. ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E., ED. Precision Agriculture: proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture, June 23-26, 1996, Minneapolis, Minnesota. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1996. p. 757-766.
8. SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production. Fertilizer Research. v. 31, p. 1-34, 1992.
9. SCHUELLER, J. K. Thechnology for precision agriculture. European Conference on Precision Agriculture, 1 p. 33-44. Set., 1997.
10. SILVA, A. M.; PEREIRA, B. C. A Aplicação da Internet das Coisas (IoT) na Agricultura de Precisão: Uma Revisão Sistemática. Revista de Tecnologia Aplicada, vol. 12, n. 3, 2023.