

Proposta de um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) ajustável para um sistema de irrigação

Proposal of an adjustable proportional-integral-derivative (PID) controller for an irrigation system

- ¹ Gabriel Almeida Carota  
- ¹ Vinicius Queiroz Pamponet Felipe  
- ¹ Brenno Silva Toledo Ferreira  
- ¹ Italo Pinto Rodrigues  
- ¹ Aloano Régio de Almeida Pereira  

¹ UniFOA - Centro Universitário de Volta Redonda

RESUMO

Este artigo aborda sobre a necessidade de soluções eficientes para o manejo hídrico na agricultura, considerando o desperdício e a utilização excessiva de recursos não renováveis em sistemas de irrigação convencionais. O problema identificado está nas limitações dos sistemas atuais que, frequentemente, operam com programações fixas, resultando em aplicações inadequadas de água, comprometendo a sustentabilidade e a produtividade agrícola. Esta proposta desenvolve um protótipo de sistema de irrigação automatizado baseado no controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), que ajusta dinamicamente a vazão da água com base nos níveis de umidade do solo monitorados em tempo real. Os testes realizados demonstraram que o protótipo alcança os *setpoints* de umidade de maneira precisa e eficiente, promovendo a redução do consumo hídrico e melhorando as condições para o desenvolvimento das culturas. Esses resultados validam a viabilidade de implementar tecnologias inteligentes para aprimorar a gestão hídrica na agricultura, com impactos positivos econômicos e ambientais.

Palavras-chave:

Controle. Gestão Hídrica. Irrigação Automática.

ABSTRACT

The article addresses the need for efficient solutions in water management for agriculture, considering the waste and excessive use of non-renewable resources in conventional irrigation systems. The identified problem lies in the limitations of current systems, which often operate with fixed schedules, resulting in inadequate water applications that compromise sustainability and agricultural productivity. The proposed solution involves the development of an automated irrigation system prototype based on a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller, which dynamically adjusts water flow according to real-time monitoring of soil moisture levels. The tests demonstrated that the prototype accurately and efficiently reaches moisture *setpoints*, reducing water consumption and improving conditions for crop development. These results validate the feasibility of implementing smart technologies to enhance water management in agriculture, delivering positive economic and environmental impacts.

Keywords:

Control. Water Management. Reliability. Automatic Irrigation.

1 INTRODUÇÃO

O processo de irrigar uma determinada cultura, como, por exemplo, o cultivo de cereais, leguminosas, frutas e hortaliças, é fundamental para o seu desenvolvimento, pois a partir dela esse produto poderá crescer de maneira saudável e com qualidade (Santos, 1998).

Guimarães (2011) destaca um sistema de irrigação capaz de fornecer água, um elemento imprescindível, para o cultivo da planta, de modo a garantir a umidade adequada para a cultura.

Porém, conforme indicado por Hashemi *et al.* (2024) e Mu *et al.* (2024), atualmente, há uma preocupação quanto aos recursos hídricos não renováveis utilizados durante o processo de irrigação, preocupação também gerada pelo desperdício de água.

Nesse sentido, são propostos sistemas cada vez mais automáticos para otimizar a irrigação e evitar desperdícios, como o sistema proposto por Routis e Roussaki (2023).

O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento do protótipo de um sistema de irrigação que permita validar o uso do controlador PID, de modo que o sistema se ajuste rapidamente ao tipo de cultura que será irrigada, incluindo as diferentes regras de irrigação, evitando desperdícios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

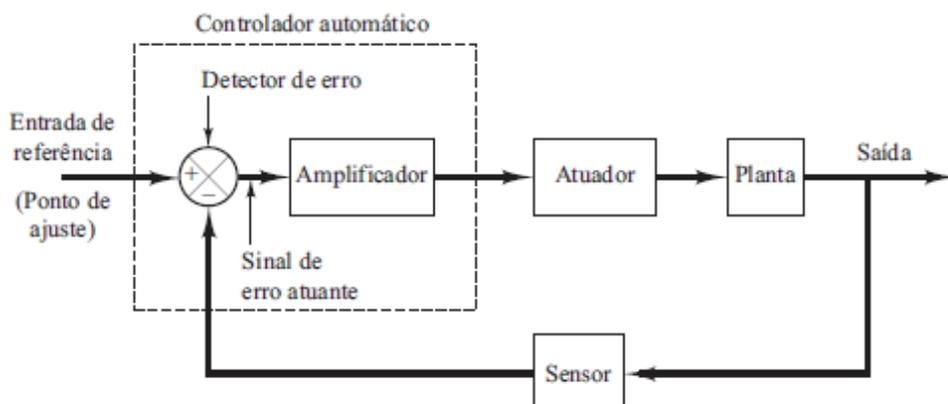
Estudos recentes apontam que o controle da irrigação pode ser realizado com base em parâmetros relacionados ao solo, às plantas e às condições climáticas, permitindo um manejo mais eficiente da água (Campos *et al.*, 2021). No entanto, muitos sistemas automatizados ainda utilizam programações fixas para irrigar, o que, frequentemente, resulta em aplicações inadequadas, seja por excesso ou escassez de água. Para superar essas limitações, pesquisadores têm concentrado esforços no desenvolvimento de tecnologias capazes de monitorar e ajustar o fornecimento de água em tempo real, garantindo uma gestão mais eficiente que equilibra a produtividade agrícola e a conservação dos recursos hídricos (Campos *et al.*, 2021).

A gestão da irrigação desempenha um papel central na agricultura, pois permite ajustar o fornecimento de água às demandas específicas das culturas, promovendo práticas mais sustentáveis. Estratégias, como a adoção de tecnologias modernas de irrigação, como o gotejamento e o uso de cobertura morta, têm demonstrado reduzir significativamente o consumo hídrico e aumentar a eficiência do uso da água (Hashemi *et al.*, 2024; Mu *et al.*, 2024). Além disso, sistemas de manejo que integram a análise das condições do solo e as demandas climáticas são essenciais para otimizar a aplicação de água, assegurando que cada cultura receba a quantidade exata para seu desenvolvimento ideal. Essas abordagens reforçam a necessidade de práticas agrícolas que equilibrem a produtividade e a preservação dos recursos hídricos.

Sendo assim, o uso de sistemas de irrigação inteligente (Benzaouia *et al.*, 2023) é uma estratégia que pode ser adotada para solucionar o problema do desperdício e a correta irrigação de acordo com a cultura.

Um sistema inteligente pode ser implementado a partir do uso de controladores, conforme apresentado por Ogata (2011) na Figura 1.

Figura 1: Diagrama de blocos de um sistema de controle industrial.



Fonte: Ogata, K. (2011)

Na literatura recente, destacam-se os trabalhos de Campos *et al.* (2021), Benzaouia *et al.* (2023) e Routis e Roussaki (2023).

Campos *et al.* (2021) ressaltam que a agricultura consome, aproximadamente, 70% da água doce disponível no mundo para irrigação. Diante desse cenário, uma gestão eficiente da água torna-se essencial para conservar os recursos hídricos, reduzir o consumo e aumentar a produtividade agrícola. A necessidade de aprimorar a precisão em sistemas tradicionais de irrigação motivou o desenvolvimento deste trabalho. Estudos apontam que sistemas convencionais, que dependem da ativação manual de bombas, geram perdas expressivas de água e energia, comprometendo a eficiência. Além disso, evidências indicam que a baixa eficiência desses sistemas não se restringe a uma única região, mas representa um desafio amplamente enfrentado em diversas áreas agrícolas (Benzaouia *et al.*, 2023).

A inovação na agricultura tem desafiado métodos tradicionais, impulsionando práticas baseadas nos princípios da agricultura 4.0. Essa abordagem propõe soluções para o uso eficiente dos recursos naturais, incorporando tecnologias avançadas. Conforme apontado por Routis e Roussaki (2023), a coleta e a análise de dados em tempo real se mostram fundamentais para reduzir falhas e aprimorar previsões agrícolas. A integração de dispositivos conectados por meio da Internet das Coisas (IoT) transforma as operações agrícolas ao unir o monitoramento preciso dos recursos e a implementação de estratégias sustentáveis e modernas, alinhadas às necessidades de um setor em constante evolução.

Benzaouia *et al.* (2023) propuseram um protótipo fundamentado na tecnologia IoT, desenvolvido para implementar a irrigação de precisão e explorar dados em tempo real. Essa solução busca reduzir erros operacionais e melhorar as previsões agrícolas. O sistema é composto por microprocessadores e um computador de placa única (SBC) que trabalham em conjunto para registrar informações coletadas por sensores responsáveis pelo monitoramento da umidade do solo.

O projeto apresenta diferenciais em relação aos trabalhos de Campos *et al.* (2021), Benzaouia *et al.* (2023) e Routis; Roussaki (2023), destacando-se:

- **Comunicação:** uso do protocolo MQTT, que permite troca eficiente de informações entre dispositivos IoT por meio de um *broker* central, utilizando um modelo de publicação/assinatura.

- **Supervisório:** aplicação do *Indusoft Web Studio*, software intuitivo e escalável, compatível com diversos protocolos e PLCs, oferecendo recursos, como gerenciamento de alarmes, análise de dados e acesso remoto via *web*.

3 CONTROLE PID

Zhang *et al.* (2009) destacam que os controladores PID desempenham um papel essencial no gerenciamento de processos industriais, sendo amplamente reconhecidos por sua eficiência. Essa abordagem de controle em malha fechada é projetada para manter as operações do sistema dentro de parâmetros definidos, garantindo que o desempenho se aproxime de um valor de referência, o *setpoint*. Ao ajustar continuamente as variáveis do processo, o PID reduz desvios e instabilidades, promovendo maior precisão e consistência no funcionamento do sistema.

As ações do controle PID são:

- Proporcional (P) – é responsável por fazer o ajuste da saída com base no erro atual, fazendo a ligação entre a referência apresentada e a saída atual. É representado por K_p .
- Integral (I) – é responsável por minimizar o erro em regime permanente, estabilizando a saída no valor desejado. É representado por K_i .
- Derivativo (D) – é responsável por prevenir grandes oscilações na saída. É representado por K_d .

Para que sejam calculados os referidos ganhos de cada um dos termos descritos acima, têm-se a equação geral do PID, apresentada pela Equação (1).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

Onde:

- $u(t)$ – É o sinal de saída do controlador PID.
- $e(t)$ – Erro atuante.
- τ – Variável de integração.
- K_p , K_i e K_d – Parâmetros do controlador.

A função de transferência da Equação 1 pode ser observada a seguir:

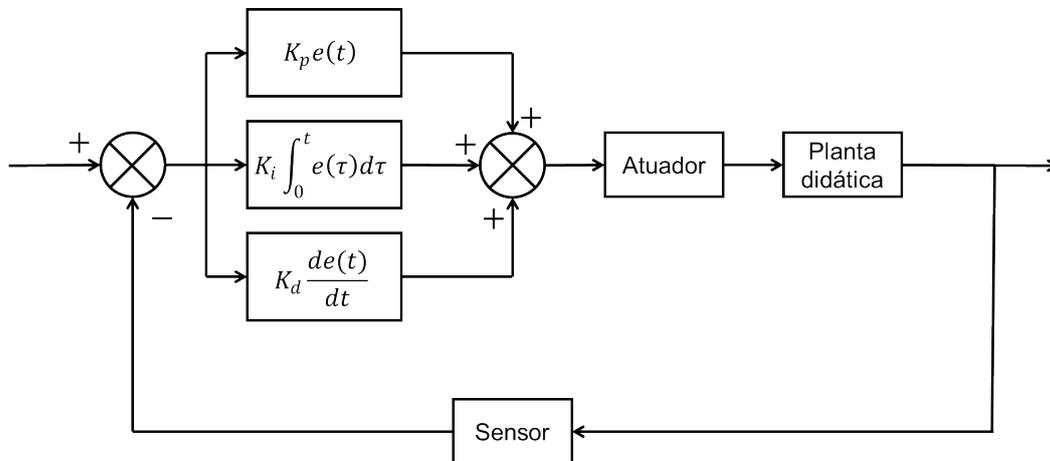
$$G_C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

Onde:

- T_i – Tempo de integração.
- T_d – Tempo de derivação.

A estrutura do controlador PID pode ser feita através da representação disposta na Figura 2.

Figura 2: Representação do Controle PID em diagrama de blocos.



Fonte: Adaptado de Ogata, K. (2011).

A Figura 2 ilustra a aplicação do controle PID em um sistema de malha fechada, caracterizado pela realimentação, onde a saída exerce influência direta sobre a entrada. Essa interação contínua permite ajustes automáticos para manter o sistema próximo do ponto de referência desejado. Em contraste, sistemas de malha aberta operam sem essa retroalimentação, o que os torna incapazes de corrigir desvios com base no desempenho da saída.

Os controladores PID também podem ser utilizados de forma parcial, permitindo a ativação de apenas um ou dois de seus ganhos, dependendo das necessidades específicas do sistema, conforme apontado por Castrucci, Bittar e Sales (2018). Essa abordagem oferece flexibilidade no ajuste do controle, como demonstrado nos exemplos a seguir, nos quais diferentes combinações de ganhos são aplicadas para atender a demandas específicas de regulação e estabilidade.

- Controlador Proporcional (P) – é utilizado quando se busca uma resposta rápida ao sistema, sem que haja a necessidade de que seja realizada a eliminação dos erros em estado estacionário.
- Controlador Proporcional-Integral (PI) – em contrapartida ao apresentado acima, esse controlador é eficiente, no que diz respeito à eliminação do erro em estado estacionário, uma vez que utiliza os ganhos dos termos proporcional e integral, sendo estes o P e I, respectivamente.
- Controlador Proporcional-Derivativo (PD) – é utilizado quando há necessidade de que não haja oscilações excessivas e uma resposta rápida. Utiliza os ganhos referentes aos termos P e D, sendo estes proporcional e derivativo, respectivamente.

4 METODOLOGIA

O sistema de irrigação automatizado integra diversas tecnologias para garantir eficiência e precisão. O controle inicia-se pelo monitoramento do nível de água no reservatório, realizado por um sensor ultrassônico que mede continuamente a distância até a superfície. Quando o nível fica abaixo do *setpoint*, o ESP32 aciona uma válvula solenoide via um módulo relé de 127 V, permitindo o reabastecimento automático do reservatório.

Na saída, uma bomba de 12 V, controlada pela ponte H L298N e modulada por PWM, ajusta o fluxo de água conforme necessário. Um controlador PID, implementado no ESP32, processa os dados de um sensor de umidade do solo para comparar a umidade real ao *setpoint* e regular a vazão da bomba, mantendo as condições ideais no solo.

A distribuição é gerenciada por três válvulas solenoides, acionadas individualmente pelo ESP32, direcionando a água para diferentes setores com base na umidade específica de cada área. Sensores de fluxo instalados na entrada do reservatório e na saída da bomba monitoram o volume de água utilizado em tempo real, permitindo uma análise detalhada do consumo.

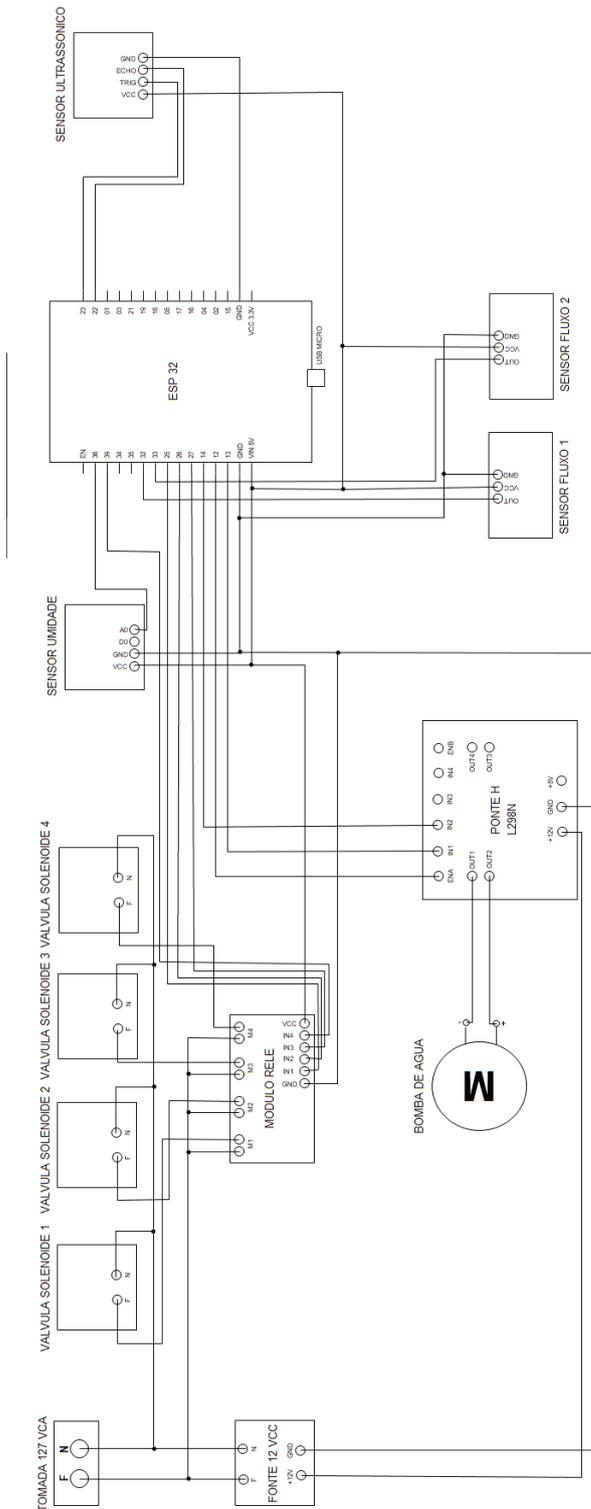
A Figura 3 ilustra o diagrama de ligação elétrica do protótipo, enquanto a Tabela 1 descreve os terminais utilizados para a comunicação entre o microcontrolador e os demais componentes do sistema. A Figura 3 evidencia que o ESP32 atua como elemento central, gerenciando a interação entre sensores e atuadores. Os sensores de fluxo, umidade e nível, conectados ao microcontrolador, fornecem os dados necessários para a tomada de decisões. Por outro lado, a ativação de dispositivos, como a bomba e as válvulas solenoides, é realizada por meio de uma ponte H que interpreta os comandos processados pelo ESP32. Essa arquitetura assegura uma conexão robusta entre os elementos físicos e o sistema de controle, promovendo a integração completa.

O sistema supervisorio, por sua vez, oferece uma plataforma visual que permite acompanhar em tempo real todas as variáveis operacionais. Ele apresenta informações, como o nível de água no reservatório, a umidade do solo, o fluxo nas tubulações e o *status* das bombas e válvulas. Além disso, uma interface gráfica consolidada exibe o funcionamento do sistema de maneira clara e acessível. Na

Figura 4, pode-se observar a tela do supervisorio, projetada para proporcionar uma experiência de uso intuitiva e eficiente, consolidando os dados essenciais em uma única visão. A tela do supervisorio é atualizada de acordo com os dados que são recebidos via MQTT.

O sistema realiza o monitoramento e ainda permite que o usuário interfira diretamente no processo, ajustando variáveis em tempo real, como o *setpoint* da umidade do solo. Essas alterações são aplicadas de forma imediata ao controlador PID, que ajusta dinamicamente o funcionamento da bomba de água por meio da modulação PWM. Essa abordagem garante uma regulação precisa da umidade, otimizando o consumo de água e energia para atender às necessidades do sistema.

Figura 3: Diagrama elétrico do Sistema



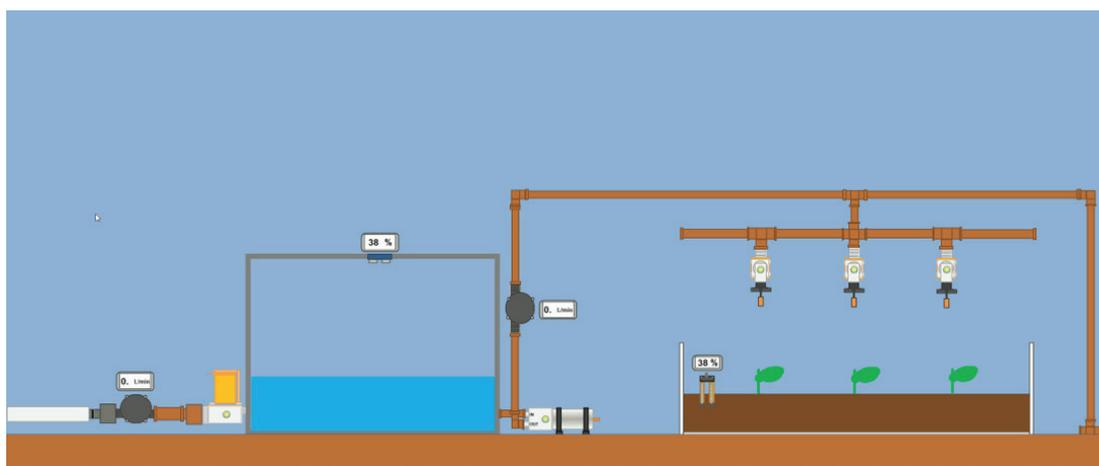
Fonte: Autores (2024)

Tabela 1: Ligação dos componentes aos terminais do ESP32

Componente	Terminal	Entrada/Saída ESP32
Controle de umidade (PWM)	12	Saída
Controle do motor anti-horário (L298N)	13	Saída
Controle do motor horário (L298N)	14	Saída
Sensor de fluxo 1	32	Entrada
Sensor de fluxo 2	33	Entrada
Interruptor do sensor de fluxo 1	34	Entrada
Interruptor do sensor de fluxo 2	35	Entrada
Leitura do sensor de umidade	36	Entrada
Eco (Echo) do sensor ultrassônico	22	Entrada
Trigger do sensor ultrassônico	23	Saída
Controle do relé 1	25	Saída
Controle do relé 2	26	Saída
Controle do relé 3	27	Saída
Controle do relé 4	28	Saída

Fonte: Autores (2024)

Figura 4: Tela de monitoramento do sistema pelo supervisório.



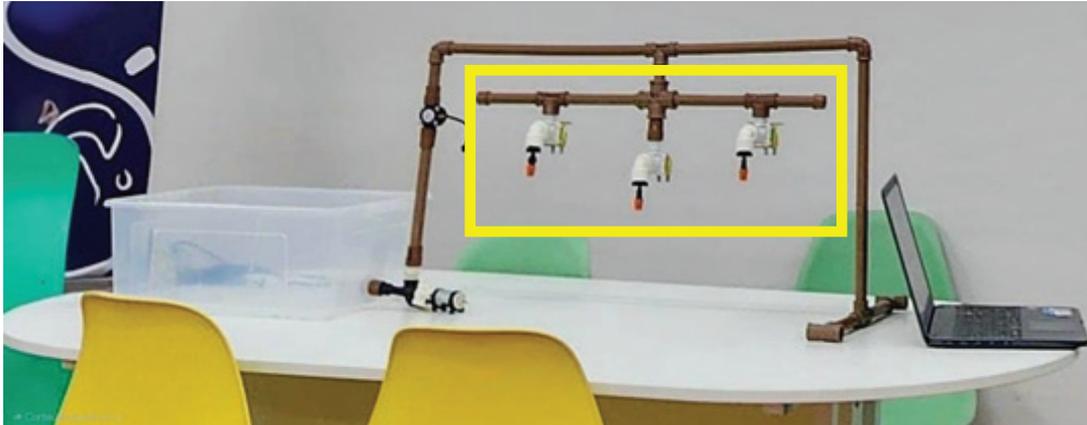
Fonte: Autores (2024).

Para avaliar a funcionalidade do sistema, foi elaborado um conjunto de cenários de teste projetados, para analisar o desempenho do controle em diferentes condições de umidade do solo e vazão de água. Os testes incluíram: i) solo seco (0% de umidade), simulando uma situação em que o sensor detecta completa ausência de umidade; ii) umidade intermediária (aproximadamente 30%), representando uma faixa entre 0% e 50%, na qual o sistema deve manter a umidade estável; iii) umidade elevada (50%), para verificar a capacidade do controle de ajustar o sistema ao *setpoint* configurado; e iv) solo com alta umidade (70%), excedendo os níveis normais, para testar a resposta do sistema em condições de saturação. Esses cenários permitiram avaliar a eficácia e a viabilidade do controle em diferentes configurações operacionais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta a estrutura proposta e utilizada durante os testes. Abaixo dos bicos aspersores (destacado em amarelo), é colocada a área que será irrigada e monitorada.

Figura 5: Protótipo montado em sua fase final.

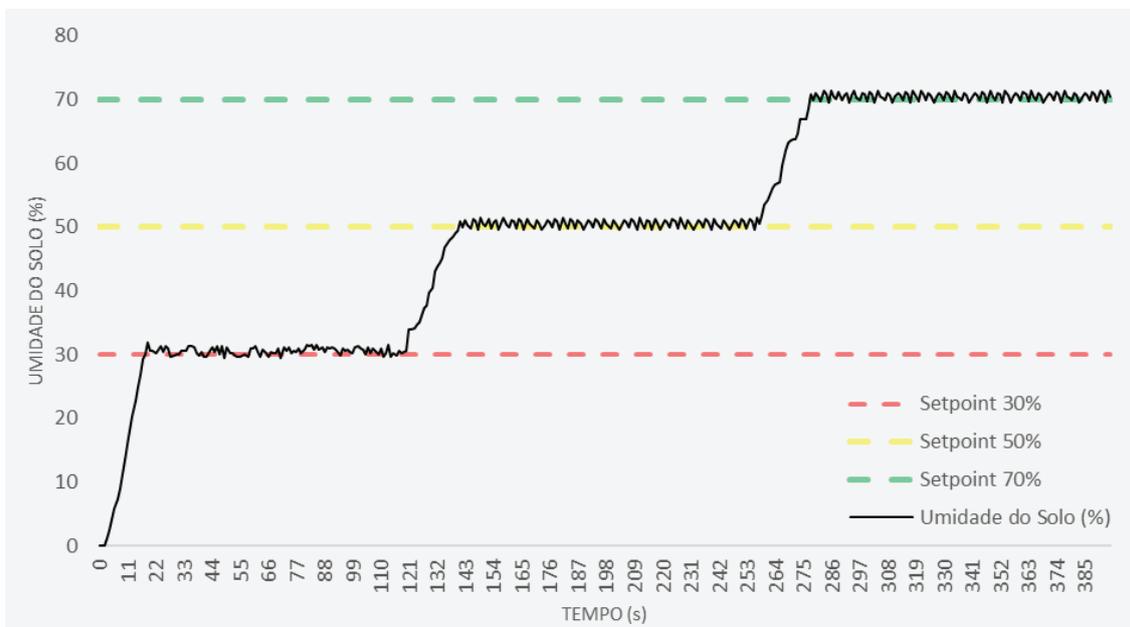


Fonte: Autores (2024).

Utilizando o protótipo, foram realizados os testes, de modo a monitorar o percentual de umidade no solo, em comparação com o *setpoint* requerido no sistema, ao longo de, aproximadamente, 2 minutos para cada valor desejado.

Na Figura 6, é apresentado um gráfico da umidade do solo em função do tempo conforme a alteração do valor de *setpoint*, em que o sistema tende a se adequar em conformidade com essa alteração feita. Os valores do *setpoint* seguem os cenários estabelecidos anteriormente.

Figura 6: Gráfico de atuação da umidade do solo em relação a um *setpoint* móvel ao longo do tempo.



Fonte: Autores (2024).

A partir da Figura 6, pode-se observar que o sistema apresentou uma primeira subida (entre 0 e 22 segundos) da umidade do solo de forma abrupta. Esse comportamento ocorre devido à necessidade de o sistema alcançar a estabilidade inicial de maneira rápida, especialmente no primeiro momento de operação, no qual

a diferença entre o estado inicial e o *setpoint* é mais significativa. Para atender a essa necessidade, optou-se por aumentar os ganhos do controlador PID, adotando valores de 90, 10 e 10, conforme mostrado no Quadro 1. Essa configuração permitiu que o sistema atingisse o *setpoint* de 30% em menor tempo, mas com maior instabilidade, caracterizada por oscilações na resposta.

O método escolhido para determinar os parâmetros PID foi tentativa e erro, ajustando os valores empiricamente até alcançar um desempenho aceitável. Essa abordagem evidenciou que a alta proporcionalidade empregada no *setpoint* de 30% resultou em uma resposta mais agressiva, ideal para situações em que a prioridade é a rapidez. Por outro lado, para os demais *setpoints*, foram utilizados ganhos mais baixos, privilegiando a estabilidade em detrimento da velocidade, refletindo a necessidade de ajustes mais suaves à medida que o sistema se aproxima de patamares já estabilizados.

Quadro 1: Dados coletados da umidade do solo em relação ao tempo.

Variável	Setpoint (%)	Valor Inicial (%)	Valor Final (%)	Tempo Inicial (s)	Tempo Final (s)	Ganho P	Ganho I	Ganho D
Umidade	30	0	30,32	0	119	90	10	10
	50	30,32	50,50	119	258	50	0,01	0,01
	70	50,50	70,50	258	395	50	0,01	0,01

Fonte: Autores (2024).

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, é apresentado um protótipo capaz de controlar o consumo de água de um sistema de irrigação, relatando valores próximos aos desejados e com uma estabilidade aceitável nos momentos de irrigação com esse controle, estabilizando, assim, a sua vazão, testada em alguns cenários que podem se encontrar, trazendo uma compreensão instrutiva e dinâmica para o seu usuário em uma tela gráfica.

O sistema foi capaz de validar o conceito de ajuste automático da irrigação com base em referências de umidade do solo, assegurando condições ideais para a saúde das plantas e reduzindo desperdícios de água. A confiabilidade e precisão dos resultados obtidos mostram que o protótipo atende ao objetivo de promover uma gestão hídrica mais eficiente.

Foi implementado um sensor de nível ultrassônico para monitorar e manter automaticamente o volume de água, garantindo o funcionamento contínuo do sistema. O controlador PID ajustou a vazão da bomba com base nos dados do sensor de umidade, demonstrando capacidade de adaptar-se às condições variáveis do solo e mantendo a estabilidade necessária para a irrigação eficiente.

A interface supervisória criada permitiu o monitoramento em tempo real e a configuração de *setpoints* personalizados para diferentes cenários de irrigação, o que facilita o uso pelo operador e contribui para a individualização do manejo hídrico.

Os testes realizados em quatro cenários distintos mostraram a robustez do sistema, que conseguiu atingir os valores de umidade desejados com tempo de resposta adequado e estabilidade, mesmo em condições iniciais extremas.

Os resultados comprovam que o protótipo é uma solução viável para melhorar o uso da água na agricultura, oferecendo benefícios econômicos e ambientais. A modularidade e a capacidade de adaptação do sistema abrem caminhos para aplicações em diferentes culturas e escalas de plantio.

Para consolidar os resultados obtidos até o momento, é fundamental projetar as próximas etapas de desenvolvimento, buscando aperfeiçoar o sistema de irrigação com novas tecnologias. Essa evolução não apenas solidifica as conquistas realizadas, mas também abre portas para a implementação de inovações que permitirão uma gestão hídrica mais eficiente.

Para consolidar essas conquistas, recomenda-se investir em etapas futuras de aprimoramento, como a implementação de algoritmos de ajuste automático para os parâmetros do PID, além do uso de inteligência artificial para otimizar a tomada de decisões com base em um catálogo de dados de culturas.

REFERÊNCIAS

- BENZAOUIA, M.; HAJJI, B.; MELLIT, A.; RABHI, A. Fuzzy-IoT smart irrigation system for precision scheduling and monitoring. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 215, p. 108407, dez. 2023. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108407. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169923007950>. Acesso em: 7 set 2024.
- CAMPOS, H. DE M.; OLIVEIRA, H. F. E. DE; MESQUITA, M.; CASTRO, L. E. V. DE; FERRAREZI, R. S. Low-cost open-source platform for irrigation automation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 190, p. 106481, nov. 2021. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169921004981?via%3Dihub>. Acesso em: 16 nov 2024.
- CASTRUCCI, P. B.; BITTAR, A.; SALES, R. M. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 2
- GUIMARÃES, V. G. **Automação e monitoramento remoto de sistema de irrigação na agricultura**. Brasília - DF: Universidade de Brasília, fev. 2011.
- HASHEMI, S.-Z.; DARZI-NAFTCHALI, A.; KARANDISH, F.; RITZEMA, H.; SOLAIMANI, K. Enhancing agricultural sustainability with water and crop management strategies in modern irrigation and drainage networks. **Agricultural Water Management**, v. 305, p. 109110, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109110. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377424004463?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2024.
- MU, L.; LUO, C.; LI, Y.; TAN, Z.; GAO, S. 'They adopt, I also adopt': The neighborhood effects and irrigator farmers' conversion to adopt water-saving irrigation technology. **Agricultural Water Management**, v. 305, p. 109141, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109141. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377424004773?via%3Dihub>. Acesso em: 16 nov. 2024.
- OGATA, K. **Modern control engineering**. 5. ed. [s.l.] Pearson Education Inc., 2011. v. 1
- ROUTIS, G.; ROUSSAKI, I. Low Power IoT Electronics in Precision Irrigation. **Smart Agricultural Technology**, v. 5, p. 100310, out. 2023. DOI: 10.1016/j.atech.2023.100310. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375523001399?via%3Dihub>. Acesso em 7 set. 2024.
- SANTOS, Raul M. P. Morais. **Estação Multissensorial para Estufas Agrícolas**. 1998. 212 p. Dissertação de Mestrado em Eletrônica Industrial da Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- ZHANG, J.; ZHUANG, J.; DU, H.; WANG, S. Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers. **Information Sciences**, v. 179, n. 7, p. 1007–1018, 15 mar. 2009. DOI: 10.1016/j.ins.2008.11.038. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020025508004970?via%3Dihub>. Acesso em: 16 nov. 2024