



Automated Conductivity and PH Control in a Hydroponic System

Gabriel Bof Moreira, Luiz Felipe Pugliese,
Diogo Leonardo Ferreira da Silva, Fadul Ferrari Rodor,
Arthur Costa de Souza and Rodrigo Aparecido da Silva Braga

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

October 8, 2024

Controle Automatizado de Condutividade e PH em um Sistema Hidropônico

Gabriel B. Moreira* Luiz F. Pugliese* Diogo L. F. Silva*
Fadul F. Rodor* Arthur C. Souza* Rodrigo A. S. Braga*

* Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá
campus Itabira, MG, (e-mail: pugliese@unifei.edu.br).

Abstract: In this work, an automation project was designed to control the conductivity and pH of the nutrient solution of a hydroponic system, aiming to demonstrate the advantages this cultivation method offers in conjunction with automation. During the development of this project, systems were identified, resulting in the implementation of two control loops using proportional, integral, and derivative controllers, tuned using the root locus method. Finally, the result obtained in a real system was compared with the expected result through simulation of the controller designed for the system.

Resumo: Neste trabalho foi elaborado um projeto de automação do controle da condutividade e pH da solução nutritiva de um sistema hidropônico, objetivando demonstrar as vantagens que este método de cultivo oferece em conjunto com a automação. Durante o desenvolvimento deste projeto foi realizada a identificação dos sistemas, resultando na implementação de duas malhas de controle utilizando controladores proporcional, integral e derivativo, sintonizados através do método do lugar das raízes. Por fim, o resultado obtido em um sistema real foi comparado com o resultado esperado através da simulação do controlador projetado para o sistema.

Keywords: NFT Hydroponics; Automation; Agriculture 4.0; PH Control; Conductivity Control.

Palavras-chaves: Hidroponia NFT; Automação; Agricultura 4.0; Controle de pH; Controle de condutividade.

1. INTRODUÇÃO

Estudos da ONU (Organização das Nações Unidas) indicam que a população mundial pode alcançar 9,7 bilhões em 2050, aumentando a demanda por alimentos em 60% devido ao crescimento populacional, urbanização e maior renda per capita (Dorling, 2021). No entanto, as mudanças climáticas dificultarão a produção agrícola tradicional, com o aumento da temperatura e a redução da disponibilidade de água. Portanto, é necessário adotar modelos agrícolas mais eficientes e racionais para aumentar a produtividade (Santos et al., 2021).

A hidroponia é uma alternativa adequada para a agricultura em cenários desafiadores, utilizando água para transportar nutrientes às plantas. As vantagens incluem redução do espaço necessário, produção próxima aos consumidores urbanos, maior conservação dos produtos, maior produtividade sem necessidade de rotação de cultura, e um período de cultivo mais curto devido ao controle direto dos nutrientes. A hidroponia pode reduzir o consumo de água em até 70% e requer menos agrotóxicos, pois o sistema pode ser isolado de pragas (Mohammed, 2018).

Em um sistema hidropônico, é essencial monitorar e ajustar periodicamente a concentração de nutrientes na água, adicionados através de fertilizantes solúveis, e o pH da solução nutritiva, que deve estar na faixa ideal para cada tipo de cultivo para garantir a absorção adequada de nutrientes pelas plantas (Atherton and Li, 2023).

Os sistemas hidropônicos inteligentes podem ser classificados pelo grau de automação, função, tipo e forma de controle. Eles monitoram e controlam variáveis como nutrição, luminosidade, pH e temperatura usando sistemas embarcados, redes de sensores sem fio e internet das coisas (Stevens et al., 2023). A maioria usa controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) integrados com microcontroladores e plataformas como Labview para ajustes e monitoramento. O método de sintonia PID de Ziegler-Nichols é comum, mas também são utilizados algoritmos de inteligência artificial, como *machine learning*, redes bayesianas e lógica fuzzy, com boa eficácia Mehare and Gaikwad (2022); Suwastika et al. (2022).

Este trabalho propõe desenvolver um sistema de automação eficaz e de baixo custo para controle independente da condutividade elétrica e do pH em sistemas hidropônicos. O objetivo é criar um sistema automatizado para corrigir a concentração de nutrientes e a acidez ou alcalinidade da solução nutritiva, usando controladores PID para eliminar erros em regime permanente. A implementação usa um microcontrolador ESP32 para acionar bombas peristálticas dosadoras, ajustando as variáveis conforme necessário.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta os conceitos teóricos do sistema hidropônico; a Seção 3 detalha o desenvolvimento do hardware; a Seção 4 apresenta os modelos matemáticos e os ganhos dos controladores PID; a Seção 5 mostra os resultados simulados e práticos; e a Seção 6 discute as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. SISTEMA HIDROPÔNICO

2.1 Estrutura de um sistema NFT

Um sistema hidropônico comum devido à facilidade de implementação e menor custo é o *NFT* (*Nutrient Film Technique*) (Resh, 2022). Neste sistema, as plantas são colocadas em bancadas ou perfis inclinados de PVC, onde um filme de água com solução nutritiva passa pelas raízes, sendo bombeada de um reservatório e retornando ao mesmo por gravidade. Apesar de perdas por evaporação e absorção, o reaproveitamento da água reduz o consumo ao longo do ciclo de crescimento das plantas (Mohammed, 2018). Um esquemático da estrutura de um sistema *NFT* pode ser visto na Figura 1.

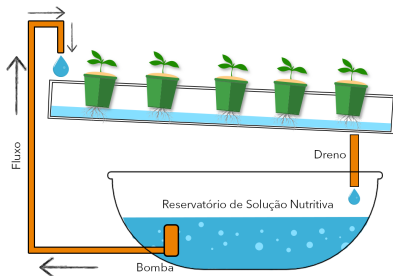


Figura 1. Esquemático de um sistema hidropônico *NFT*.

Para limitar pragas e doenças, é essencial usar uma estufa coberta por lona agrícola em torno da estrutura de plantio. Essa proteção também evita que a água da chuva entre no sistema, o que poderia alterar o nível de água no reservatório, modificando a concentração de nutrientes e o pH. Para manter a dinâmica do sistema hidropônico estável, é necessário que o nível da água no reservatório permaneça constante. Isso é geralmente alcançado com a instalação de uma boia mecânica, que controla o nível de água e sua reposição ao longo do tempo.

O tamanho do reservatório de solução nutritiva deve ser planejado de acordo com a demanda de água para o número máximo de plantas, geralmente adotando uma proporção de 0,5 a 1,0 L por planta (Li et al., 2021). A bomba deve atender à demanda de circulação da solução pelos perfis do sistema, proporcionando um fluxo de 2,0 a 6,0 L/min por perfil, acionada por um *timer* que varia conforme temperatura e luminosidade Baiyin et al. (2021).

2.2 Solução Nutritiva

Em sistemas hidropônicos, a solução nutritiva deve ser feita com água potável sem cloro e fertilizantes solúveis em água. Geralmente, usa-se pacotes de macro e micronutrientes vendidos em pó ou granulados. Dependendo do fabricante ou da planta cultivada, pode ser necessário combinar até 6 pacotes diferentes. Para hortaliças, normalmente são usados 2 pacotes padronizados. A solubilidade e proporções dos compostos são indicadas na embalagem pelo fabricante (Baiyin et al., 2021).

Para ajustar a solução nutritiva em sistemas hidropônicos, dissolve-se cada pacote de fertilizante em soluções concentradas até o limite de solubilidade, mantendo a proporção correta. Utiliza-se um medidor de condutividade para obter o valor desejado, que pode ser expresso em TDS (Total

de Sólidos Dissolvidos) em ppm (partes por milhão) ou EC (Condutividade Elétrica) em $\mu S/cm$. Os nutrientes aumentam a condutividade da água, e os valores ideais variam conforme a variedade e a fase das plantas, sendo mais altos na floração e frutificação e mais baixos durante o crescimento e desenvolvimento foliar.

Durante o cultivo hidropônico, a solução nutritiva deve ter um pH entre 5,5 e 6,5 para garantir a absorção adequada de nutrientes. As plantas liberam ânions ao absorver nitratos, elevando o pH da solução. A reposição de água, geralmente com pH neutro, também altera o pH ideal. Para corrigir o pH, utiliza-se ácido fosfórico alimentício em uma concentração padronizada. A correção da concentração de nutrientes na solução nutritiva torna o pH mais ácido, enquanto a correção do pH com ácido não afeta significativamente a concentração de nutrientes. A medição de pH e condutividade pode ser influenciada pela variação de temperatura, por isso é recomendado isolar termicamente o reservatório para minimizar essas variações (Asao, 2012).

3. DESENVOLVIMENTO DO *HARDWARE*

3.1 Adaptação do Sistema Hidropônico

Foi adaptado um sistema hidropônico *NFT* residencial para a produção de hortaliças para consumo doméstico. O sistema é composto por quatro perfis de PVC de 4,5 m, dispostos paralelamente com 25 cm de espaço entre eles e inclinação de 5°, permitindo o cultivo de 72 plantas. O sistema possui um reservatório de 80 L para a solução nutritiva, equipado com uma bomba submersa que fornece 2 L/min de solução nutritiva para cada perfil, controlada por um *timer* analógico que a liga em intervalos de 15 minutos.

Para proteger contra a água da chuva, foi utilizada uma lona agrícola, minimizando perturbações no controle do sistema. O sistema também conta com uma boia mecânica que mantém o nível de água do reservatório constante, garantindo a validade da dinâmica do sistema durante todo o período de funcionamento.

Foi instalada uma tubulação específica para os sensores de pH e condutividade no sistema (Figura 2). Uma bomba circula a solução nutritiva através dessa tubulação, permitindo que os sensores façam as leituras necessárias. O retorno da solução ao reservatório facilita a mistura das soluções concentradas para corrigir o sistema.

3.2 Sensores de pH e Condutividade

Sensores específicos para medir a concentração de nutrientes e o pH foram adquiridos para o reservatório de solução nutritiva do sistema hidropônico. Esses sensores possuem capacidade de operação industrial, permitindo operação contínua em imersão e mantendo a calibração por um período prolongado.

Foi adquirido um sensor de medição da concentração de nutrientes da XIN NUO QI, que lê total de sólidos dissolvidos (TDS) a partir da conversão de condutividade elétrica, operando na faixa de 0 a 2000 ppm e variando a saída entre 0 a 5 V. A relação entre TDS e condutividade

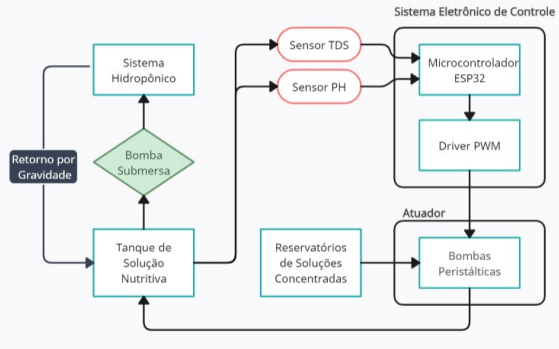


Figura 2. Diagrama do reservatório e tubulação do sistema para a leitura dos sensores.

elétrica é geralmente 1 ppm: $2 \mu S/cm$. O equipamento realiza compensação automática de temperatura e permite calibração por um procedimento simplificado.

O sensor de pH utilizado é o DF Robot SEN0169-V2, que fornece uma saída de 0 a 5 V correspondendo a valores ácidos ou alcalinos de pH. A calibração é feita em dois pontos, usando soluções com $pH = 4$ e $pH = 7$, conforme indicado pelo fabricante.

Durante os testes dos sensores, foi observado que a alimentação do sensor de condutividade precisava ser isolada da do sensor de pH e do microcontrolador, devido à interferência nas medições de íons pelo sensor de pH. Portanto, foram utilizadas duas fontes de alimentação com transformadores isolados para cada sensor, com o sensor de pH compartilhando a fonte com o circuito de controle. Para reduzir o ruído nas leituras, foi implementado um filtro de média móvel com uma janela de dez pontos.

3.3 Atuadores do Sistema e Driver PWM

Para corrigir o pH e a condutividade da solução nutritiva do sistema, foram utilizadas bombas peristálticas que succionam líquidos concentrados e os depositam no reservatório. Essas bombas criam vácuo em mangueiras de silicone através de um motor CC. O controle de condutividade é feito por duas bombas peristálticas de 12 V, com capacidade de até 450 mL/min, responsáveis pela dosagem dos dois concentrados de solução nutritiva. Para a correção de pH, é utilizada uma bomba peristáltica de 24 V, com capacidade de até 100 mL/min, para adicionar ácido concentrado ao reservatório.

Os atuadores são acionados por um sinal do controlador PID, enviado por um microcontrolador ESP32, resultando em um sinal PWM de 12 bits com frequência de 5 KHz. Devido às regiões de operação não lineares dos atuadores, testes foram realizados para determinar a faixa de operação linear. Foi constatado que a faixa de 50% a 100% do PWM é aceitável, produzindo uma vazão próxima ao comportamento linear. Para acionar as bombas peristálticas com um sinal de controle do microcontrolador ESP32, foi criada uma placa de driver com acopladores ópticos 4N25 para isolar eletricamente o circuito de controle do circuito de potência, reduzindo ruído e protegendo o circuito de controle. Este driver usa um transistor TIP31 para chavear o PWM e pode ser visto na Figura 3.

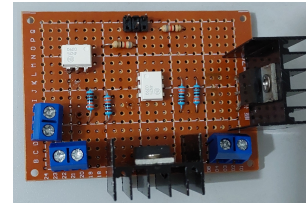


Figura 3. Placa do circuito de driver PWM dos atuadores.

Nos testes, as bombas peristálticas dos nutrientes concentrados mostraram diferenças de vazão. Para manter a proporção na injeção de nutrientes, foi feita uma diluição proporcional para cada concentrado, levando em conta a vazão das bombas. Essa diluição considerou a solubilidade indicada pelo fabricante para reduzir o tempo de resposta dos sistemas.

3.4 Protótipo Comercial do Controlador

Um protótipo inicial do controlador, com potencial para se tornar um produto comercial, foi construído. Foram desenvolvidos circuitos de proteção contra curto-circuito e sobrecorrente para a alimentação dos atuadores e do sistema eletrônico controlado.

Um microcontrolador ESP32 foi usado para controlar o sistema. Ele está conectado a um módulo relé de duas saídas com optoacoplador, que aciona uma bomba para injetar a solução nutritiva na tubulação dos sensores sempre que o microcontrolador solicita a leitura das variáveis. A segunda saída do relé aciona dois agitadores magnéticos com ímãs acoplados a motores, que misturam os concentrados de solução nutritiva. Essa mistura é essencial para manter a homogeneidade dos concentrados e garantir o desempenho do controle do sistema.

Para aumentar a precisão da leitura do sensor de pH, foi utilizado um conversor A/D ADS1115 conectado ao ESP32, permitindo leituras com precisão de 16 bits. Os atuadores são acionados por um sinal PWM de 12 bits, enviado pelo ESP32 ao driver de controle, permitindo uma variação de 0 a 4095. O protótipo do sistema é composto por dois módulos: o módulo dos atuadores e o módulo do controlador, conforme mostrado na Figura 4.

4. IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE DOS SISTEMAS

4.1 Identificação das Dinâmicas do Sistema

Durante o processo de identificação do sistema, foram realizados testes para determinar como as saídas variavam conforme as entradas aplicadas. O pH e a condutividade da solução nutritiva aumentaram com as entradas produzidas pelas bombas peristálticas. Devido a essa ação integradora em malha aberta, foi usado um pulso retangular de duração definida como entrada para obter os dados da resposta do sistema. Os dados obtidos passaram por decimação após análise de autocorrelação e tiveram a resposta inicial zerada.

O sistema possui duas entradas e duas saídas que variam a condutividade e o pH, mas apresenta três dinâmicas distintas, pois a inserção de nutrientes também reduz o pH. No entanto, a correção do pH para cima durante

$$G_1(s) = \frac{69,29 \cdot 10^{-5} s^2 + 91,36 \cdot 10^{-5} s + 4,25 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 0,2493 s^2 + 0,02198 s + 3,51 \cdot 10^{-6}} e^{-12s} \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{-4,151 \cdot 10^{-6} s^3 - 3,361 \cdot 10^{-7} s^2 - 4,943 \cdot 10^{-8} s - 3,043 \cdot 10^{-10}}{s^4 + 5,209 \cdot 10^{-2} s^3 + 7,124 \cdot 10^{-3} s^2 + 5,585 \cdot 10^{-5} s + 1,413 \cdot 10^{-8}} e^{-18s} \quad (2)$$



Figura 4. Módulos do protótipo do projeto.

a inserção de nutrientes será desconsiderada, já que a maioria dos sistemas hidropônicos tende a elevar o pH ao longo do tempo e com a reposição da água. Portanto, essa compensação é geralmente desnecessária, pois a injeção de nutrientes não reduz o pH a ponto de sair da faixa ideal de operação.

A identificação dos sistemas foi realizada usando a função *tfest* do software Matlab, buscando o melhor resultado para os dados de validação através do método NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*) e dois critérios de redução do erro: FPE (*Final Prediction Error*) e MSE (*Mean Square Error*). O NRMSE avalia a adequação do modelo aos dados, enquanto o FPE e o MSE permitem comparar diferentes modelos para determinar a ordem ideal. A qualidade do modelo é maior quanto menores forem esses erros. Se aumentar a ordem do modelo não reduzir significativamente o erro, isso pode indicar que a complexidade do modelo está aumentando sem melhorar sua capacidade de descrever a dinâmica do sistema. Os modelos escolhidos foram aqueles que apresentaram precisão satisfatória em relação aos dados coletados para validação, com o menor custo de complexidade.

A dinâmica do sistema que explica a variação no sensor de condutividade para uma entrada de solução nutritiva concentrada pode ser descrita pela equação (1), mostrando um atraso de transporte de 12 s. Este modelo obteve um NRMSE de 94,28% e apresentou os menores valores de FPE (144,7) e MSE (136,8) entre os modelos testados. A comparação com os dados utilizados na identificação pode ser vista na Figura 5.

A dinâmica do pH do sistema, ao inserir ácido no reservatório, é descrita pela função de transferência na equação (2). Este modelo apresentou um fit de 96,16% (NRMSE) e baixos valores de FPE (0,0001314) e MSE (0,0001267). A comparação com os dados de identificação pode ser vista na Figura 6. Assim como no sistema de condutividade, o sistema de pH apresenta um atraso de transporte, neste caso de 18 s.

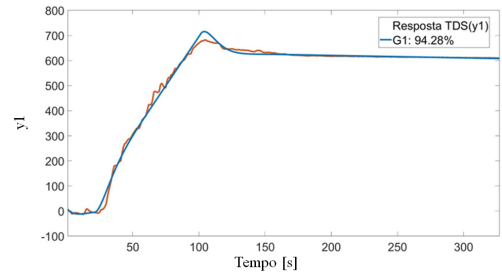


Figura 5. Sistema identificado para a malha de condutividade.

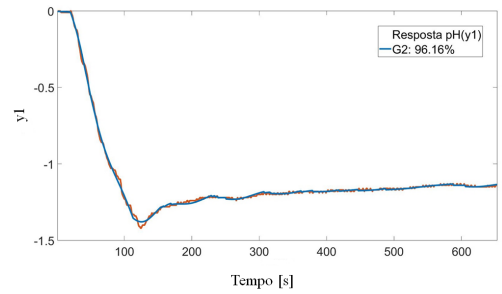


Figura 6. Sistema identificado para a malha de pH.

A correção do pH no sistema é um processo não linear; à medida que mais ácido é inserido, seu efeito na redução do pH diminui. Por isso, foi utilizada uma faixa de dados para identificação onde as respostas do sistema se aproximavam de uma região linear.

4.2 Controlador de Condutividade

No desenvolvimento do controlador PID para acionar as bombas peristálticas dos nutrientes concentrados, buscou-se obter o menor *overshoot* possível com um tempo de subida razoável, conforme a capacidade de vazão das bombas. A planta identificada é de terceira ordem, com três polos (dois complexos conjugados negativos e um real próximo da origem) e dois zeros reais negativos. Utilizou-se uma aproximação de Padé de segunda ordem para representar o atraso de tempo de 12 s, adicionando dois polos e zeros ao lugar das raízes da planta do sistema.

A compensação do sistema foi projetada utilizando o lugar das raízes para obter um *overshoot* máximo de 5% e um tempo de subida próximo de 180 s. Para isso, foram inseridos um par de zeros reais ou complexos conjugados e um polo integrador na origem, representando a função de transferência de um PID. A resposta em malha fechada do sistema de controle projetado para uma entrada em degrau resultou em um tempo de subida de 170 s e um *overshoot* de 5,87%. Com o controlador projetado, os ganhos obtidos foram $K_p = 5,602$, $K_d = 56,32$ e $K_i = 0,006314$.

4.3 Controlador de pH

No projeto do controlador de pH, assim como no controlador de condutividade, o objetivo foi obter uma resposta com baixo *overshoot* e um tempo de subida razoável, com um ganho máximo próximo ao limite superior da bomba peristáltica dentro da faixa de correção de pH em que ela operará.

O sistema identificado da dinâmica do pH possui dois polos reais negativos e dois polos complexos conjugados em região de estabilidade, além de um zero real negativo próximo da origem e dois zeros complexos conjugados negativos. Com a aproximação de Padé de segunda ordem para representar o atraso de 18 s, foram adicionados um par de zeros e um par de polos. O sistema tende a operar próximo à instabilidade, então o controlador foi projetado para afastar os polos dessa região, variando os ganhos com tolerância para *overshoot* de até 8% e um tempo de subida próximo a 125 s. O controlador PID implementado resultou em um tempo de subida de 121 s e um *overshoot* de 6,32% para a resposta ao degrau do sistema compensado. Os ganhos obtidos foram $K_p = -2008$, $K_d = -12648$ e $K_i = -3,48$, indicando uma ação de controle direta.

5. RESULTADOS

5.1 Simulação das Malhas de Controle

Para prever o comportamento do sistema de controle projetado, foi criado um diagrama de blocos no Simulink, conforme mostrado na Figura 7, para simular a ação dos controladores de condutividade e pH.

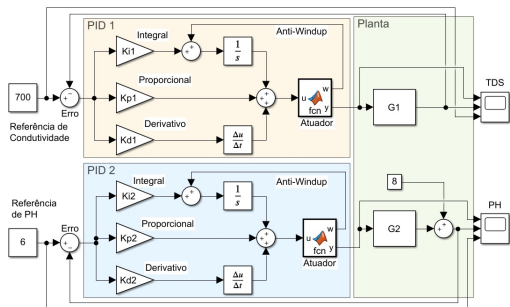


Figura 7. Diagrama de blocos das malhas de controle do sistema hidropônico simulado.

Para a simulação, foram considerados os limites de saturação dos atuadores no PWM, com 4096 sendo o máximo e 2048 o mínimo. Fora dessa faixa, o sistema está em uma região de não-linearidade, por isso foi adotada uma ação *anti-windup* para a ação integral de ambos os controladores. O *anti-windup* utilizou o método *back-calculation*, recalculando o termo integral na região de saturação do atuador e limitando o ganho máximo. Isso foi feito multiplicando o erro entre o sinal de controle e o sinal do atuador por uma constante baseada nos valores de T_i e T_d do controlador PID.

A resposta simulada para o controle de condutividade, apresentada na Figura 8 com uma referência de 700 ppm, mostra que a saída seguiu a ação do controlador PID.

O sistema operou dentro dos limites especificados para o atuador, com um tempo de subida de 140 s e um *overshoot* de 8%, ligeiramente acima do limite projetado.

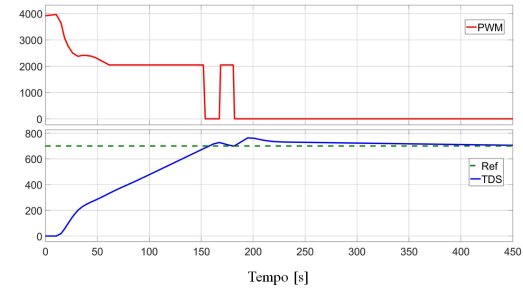


Figura 8. Resposta de TDS obtida com a ação simulada do controlador PID.

Na simulação do controlador de pH, foi inserido um valor constante de 8 na saída para simular sua ação em relação a uma referência de pH = 6. A ação do controlador PID resultou na resposta simulada apresentada na Figura 9.

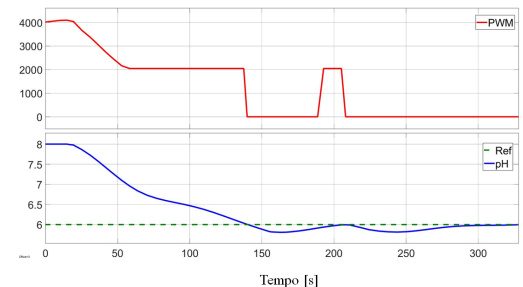


Figura 9. Resposta de pH obtida com a ação simulada do controlador PID.

Respeitando os limites teóricos do atuador, a simulação mostrou um tempo de descida de 120 s e um *overshoot* de 7%, próximo ao projetado.

5.2 Resultados Práticos do Sistema

Para reproduzir o experimento simulado na prática, o reservatório do sistema hidropônico foi preenchido apenas com água potável sem cloro, representando o TDS inicial da água. A mesma referência da simulação foi implementada no código do microcontrolador ESP32, incluindo limitadores de saturação e um *anti-windup* na ação integradora do PID.

Na implementação prática do protótipo do controlador, ao energizar o circuito do sistema, a bomba da tubulação dos sensores e os agitadores de nutrientes são ativados pelo relé. Em seguida, verifica-se o erro na leitura de condutividade da solução nutritiva. Se o erro for maior que 150 ppm, a correção da concentração de nutrientes no reservatório é iniciada e o controlador PID calcula sua ação de controle a cada segundo.

O resultado do controle PID de condutividade da solução nutritiva é mostrado na Figura 10, onde é possível ver o sinal PWM acionado pelo controlador dentro dos limites de saturação.

O sistema teve um erro em regime permanente de 0,86%, considerado satisfatório. O *overshoot* foi de 2,8%, melhor

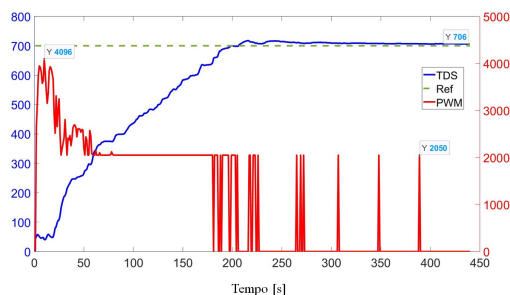


Figura 10. Resposta de TDS(ppm) obtida com a ação do controlador PID.

que o simulado e projetado. O tempo de subida foi de 164 s, próximo ao valor projetado. Os resultados mostraram que, apesar da redução do ruído com um filtro de média móvel, as variações rápidas nas leituras ainda afetaram a parcela derivativa do controlador, alterando o sinal de controle em relação à simulação. Uma filtragem de ruído mais agressiva ou um filtro derivativo poderia reduzir esse efeito para obter resultados mais próximos dos simulados.

Para o controlador PID de pH, foi estabelecido um limite de zero para o PWM acima de 10 e um ganho derivativo condicional. Quando o erro for negativo (positivo para o controlador de pH) acima de uma pequena faixa próxima a zero, a parte derivativa será zerada para evitar pulsos causados por ruído na região de saturação mínima do motor. A verificação do erro de pH para ativação do controlador de pH pode ser iniciada pelo microcontrolador se o erro na condutividade da solução nutritiva não exceder 150 ppm ou após a correção da condutividade. Se o erro de pH for superior a 0,5 em relação à referência de pH = 6, o controle de pH é ativado, operando como o controlador de condutividade. O resultado da ação do controle PID para o pH é mostrado na Figura 11.

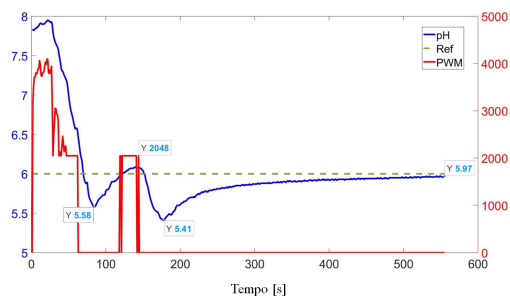


Figura 11. Resposta de pH obtida com a ação do controlador PID.

O sistema teve um erro em regime permanente de 0,5%, próximo ao ideal. O *overshoot* da resposta de pH foi de 9%, acima do projetado. O tempo de descida foi de 65 s, menor que os valores da simulação. O resultado se deve ao comportamento não linear da correção de pH. Como o teste foi feito em uma solução nova, sem adição constante de ácido, o ganho da injeção estava em um máximo, causando um *overshoot* maior e uma resposta mais rápida do que o esperado.

6. CONCLUSÃO

Os resultados dos controladores projetados foram semelhantes aos obtidos na simulação computacional. A inser-

ção das limitações práticas na simulação foi crucial para o desenvolvimento e correção dos controladores. Isso reduziu o impacto do ruído na parte derivativa e contornou problemas de integração na região de saturação. Os controladores apresentaram um desempenho satisfatório, alcançando um erro em regime permanente próximo ao esperado, mesmo em uma região com ganho natural elevado no sistema de pH.

A próxima etapa é transformar este trabalho em um produto comercial, mais acessível que os controladores atuais de R\$5.000. O desenvolvimento custou cerca de R\$1.500, mostrando sua viabilidade. Para isso, o protótipo precisa ser aprimorado com uma interface de usuário, permitindo calibração, ajuste manual dos ganhos ou autotuning. Além disso, deve monitorar temperatura e umidade e ajustar os atuadores para melhorar o desempenho.

REFERÊNCIAS

- Asao, T. (2012). *Hydroponics: A standard methodology for plant biological researches*. BoD—Books on Demand.
- Atherton, H.R. and Li, P. (2023). Hydroponic cultivation of medicinal plants—plant organs and hydroponic systems: Techniques and trends. *Horticulturae*, 9(3), 349.
- Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Shao, Y., An, P., Yamamoto, S., and Ibaraki, Y. (2021). Effect of nutrient solution flow rate on hydroponic plant growth and root morphology. *Plants*, 10(9), 1840.
- Dorling, D. (2021). World population prospects at the un: our numbers are not our problem? In *The Struggle for Social Sustainability*, 129–154. Policy Press.
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., and Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, 106558.
- Mehare, J.P. and Gaikwad, A. (2022). Classification and regression supervised machine learning approach in smart farming for hydroponics system with intelligent and precise management based on iot. *NeuroQuantology*, 20(10), 9334.
- Mohammed, S. (2018). *Tomorrow's Agriculture: NFT Hydroponics-Grow Within Your Budget*. Springer.
- Resh, H.M. (2022). *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC press.
- Santos, C.V.d., Oliveira, A.F.d., and Ferreira Filho, J.B.d.S. (2021). Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of brazil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60.
- Stevens, J.D., Murray, D., Diepeveen, D., and Toohey, D. (2023). Development and testing of an iot spectroscopic nutrient monitoring system for use in micro indoor smart hydroponics. *Horticulturae*, 9(2), 185.
- Suwastika, N.A., Helmi, M., Aulia, M.M.S., and Wardana, A.A. (2022). Design of a fogponics farming system based on the internet of things and fuzzy logic. In *2022 2nd International Conference on Intelligent Cybernetics Technology & Applications (ICICyTA)*, 99–104. IEEE.