

SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL UTILIZANDO O CONTROLADOR PI E A PLATAFORMA NODE-RED

Carlos Augusto Leal Memoria (IFPB), E-mail: c.augusto.l.m@hotmail.com

Ian Rolim de Medeiros (IFPB), E-mail: ian.medeiros@academico.ifpb.edu.br

D. Sc. Emanuel Raimundo Queiroz Chaves Junior (IFPB), E-mail: emanoel.chaves@ifpb.edu.br

M. Sc. Geronimo Barbosa Alexandre (IFPB), E-mail: geronimo.alexandre@ifpb.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema de controle automático de nível de água em um reservatório, utilizando um controlador Proporcional-Integral (PI) embarcado no microcontrolador Arduino. O sistema é composto pelo sensor ultrassônico HC-SR04 usado na medição do nível, a bomba hidráulica acionada por modulação por largura de pulso (PWM) e a ponte H L298N para *interface* de potência. O algoritmo de controle foi implementado em tempo discreto com período de amostragem de 200 ms. A lógica incorpora a média de múltiplas leituras para redução de ruído, além de zona morta e estratégia de *anti-windup* para mitigar oscilações e evitar a saturação do termo integral. O sistema permite seleção de diferentes valores de referência (10 cm, 15 cm e 20 cm), além de comandos de ativação, desativação e reinicialização do processo via comunicação serial. Para a supervisão e a análise dos dados em tempo real, foi utilizada a integração com a plataforma Node-RED, possibilitando a visualização das variáveis do processo, como nível medido, erro, integral do erro e sinal PWM aplicado. Os resultados experimentais demonstram que o controlador PI proporcionou estabilidade, pouca oscilação e eliminação do erro em regime permanente, evidenciando a viabilidade da solução para aplicações didáticas e sistemas de automação de baixo custo.

Palavras-chave: Controle PI, nível, instrumentação, supervisão remota.

LEVEL CONTROL SYSTEM USING PI CONTROLLER AND NODE-RED PLATFORM

Abstract: This paper presents the development and implementation of an automatic water level control system for a reservoir using a Proportional-Integral (PI) controller embedded in an Arduino microcontroller. The system comprises an HC-SR04 ultrasonic sensor for level measurement, a hydraulic pump driven by Pulse Width Modulation (PWM), and an L298N H-bridge for the power interface. The control algorithm was implemented in discrete time with a sampling period of 200 ms, incorporating an average of multiple readings for sensor noise reduction, a dead zone to mitigate oscillations near the setpoint, and integral term limiting to prevent saturation (*anti-windup*). The system allows the selection of different reference values (10 cm, 15 cm, and 20 cm), as well as activation, deactivation, and reset commands via serial communication. For real-time supervision and data analysis, integration with the Node-RED platform was utilized, enabling the visualization of process variables such as measured level, error, integral term, and the applied PWM signal. Experimental results demonstrate that the PI controller provided stability, low oscillation, and elimination of steady-state error, highlighting the viability of the solution for educational applications and low-cost automation systems.

Keywords: PI Control, level, instrumentation, remote supervision.

1. Introdução

O controle automático de nível de líquidos é amplamente aplicado em sistemas industriais, estações de bombeamento e processos químicos, sendo fundamental para garantir estabilidade e eficiência operacional (SILVA, *et al.*, 2025)

Com o avanço das tecnologias embarcadas e a popularização de plataformas de prototipagem, como o Arduino, tornou-se possível desenvolver sistemas de automação de baixo custo, com boa precisão e elevada flexibilidade. Esses sistemas conseguem integrar sensores, atuadores e algoritmos de controle em uma única arquitetura compacta, viabilizando soluções didáticas e industriais acessíveis. Como alternativa, o

controlador Proporcional-Integral (PI) apresenta maior suavidade na resposta e capacidade de eliminação do erro em regime permanente.

Este trabalho propõe a integração entre *hardware* de baixo custo e a plataforma Node-RED para a validação da estratégia de controle PI em um sistema de nível, visando uma solução de monitoramento em tempo real de alta acessibilidade. Demonstrando a viabilidade técnica e econômica de soluções baseadas em microcontroladores para aplicações de controle de processos, contribuindo tanto para fins acadêmicos quanto para aplicações industriais.

2. Referencial Teórico

Em processos industriais envolvendo nível de líquidos, a dinâmica geralmente apresenta comportamento integrativo e resposta relativamente lenta, o que torna essencial a utilização de estratégias de controle capazes de garantir estabilidade e precisão. A modelagem matemática desses sistemas frequentemente é representada por equações diferenciais ou funções de transferência que descrevem a relação entre vazão de entrada e altura do fluido no reservatório. A utilização de realimentação permite reduzir os efeitos de perturbações externas e incertezas paramétricas, tornando o sistema mais robusto e previsível.

O controlador PI combina duas ações complementares, descritas pela equação (1),

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1)$$

onde:

- $e(t)$ é o erro do sistema;
- K_p é o ganho proporcional;
- K_i é o ganho integral.

A ação proporcional contribui para acelerar a resposta do sistema, enquanto a ação integral elimina o erro estacionário (DORF & BISHOP, 2011).

Contudo, a presença do termo integral pode ocasionar o fenômeno conhecido como *windup*, esse efeito ocorre quando o atuador atinge sua saturação e o termo integral continua acumulando erro ao longo do tempo, resultando em um excesso de ação de controle.

Como consequência, o sistema pode apresentar sobressinal elevado, maior tempo de acomodação e comportamento oscilatório após sair da condição de saturação. Para mitigar esse problema, são empregadas técnicas de *anti-windup*, que consistem na limitação ou realimentação do termo integral, impedindo seu crescimento (CHONG; ANG; LI, 2006).

Quando o erro persiste, mesmo que pequeno, a integral cresce continuamente, aumentando o sinal de controle até que o erro seja eliminado.

Em sistemas de controle de nível, essa característica é interessante, pois o reservatório apresenta comportamento integrador natural, pois a altura do líquido é resultado da integração da vazão ao longo do tempo. Dessa forma, pequenas diferenças entre vazão de entrada e saída podem gerar erro acumulado, tornando a ação integral essencial para

garantir precisão no controle.

3. Materiais e Métodos

A metodologia usada para a projeto e a validação dos sistemas de controle e supervisão do nível do tanque é ilustrada na Figura 1.

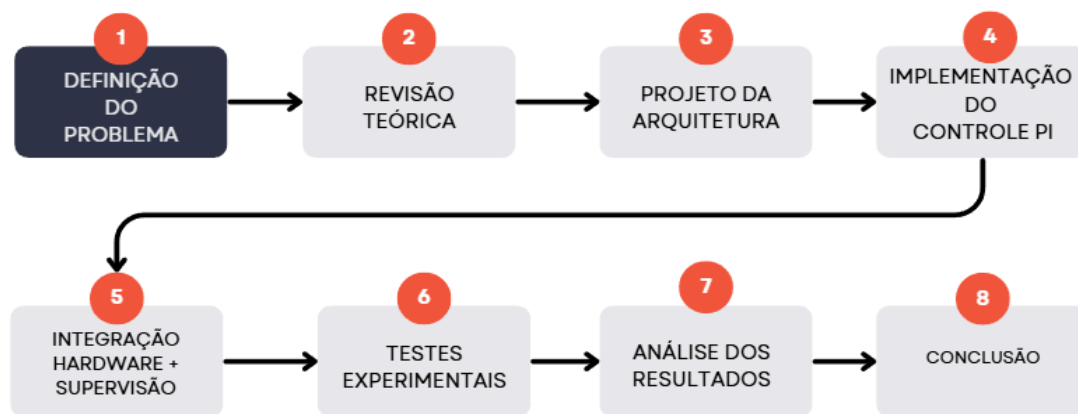


Figura 1 – Processo metodológico da pesquisa.

A revisão bibliográfica foi feita em plataformas acadêmicas especializadas no tema: IEEE Explorer Digital Library, ScienceDirect, ResearchGate, Periódico Capes e Google Acadêmico. Dessa pesquisa foram escolhidos os trabalhos de Freitas (2019), Fernandes, *et al.* (2025), Hotz (2014) e Seraphim (2018) que serviram de base do projeto. Desta forma o trabalho trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa com apresentação de um produto didático.

Após a revisão do estado da arte, foram elaborados os desenhos 2D e 3D do protótipo, bem como a lista de material com o respectivo orçamento. A Tabela 1 traz os materiais utilizados e o respectivo orçamento para a montagem da bancada didática.

Tabela 1 – Matérias utilizados no protótipo e orçamento.

Material	Quantidade	Preço total (R\$)
Arduino Uno R3	1	38,00
Fios e cabos	-	10,00
Sensor ultrassônico HC-SR04	1	9,50
Ponte H L298N	1	15,40
Bomba hidráulica 24V	1	100,00
Total	-	172,90

Fonte: Autores (2026).

3. 1. Descrição do Protótipo Experimental

Na Figura 2 é ilustrada a bancada didática de dois tanques para controle de nível.

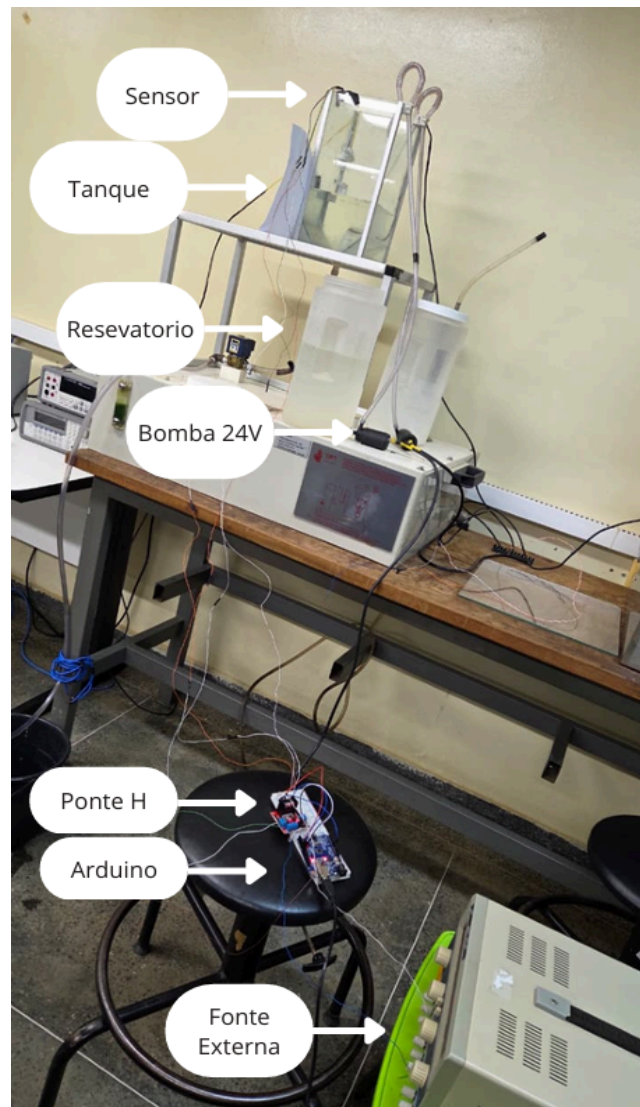


Figura 2 – Protótipo didático de tanques acoplados.

A ponte H modelo L298N é responsável por isolar eletricamente a placa Arduino UNO R3 da bomba de 12V, permitindo o controle da potência fornecida através da modulação por largura de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*). O sinal PWM gerado pelo microcontrolador é aplicado ao pino de habilitação da ponte H, possibilitando o ajuste contínuo da velocidade da bomba e, conseqüentemente, da vazão de entrada no reservatório. A ponte H foi utilizada para direção de acionamento, mantendo o segundo pino de controle fixado em nível lógico baixo. Dessa forma, o sistema opera exclusivamente no regime de enchimento do reservatório. Já o sensor ultrassônico HC-SR04 irá medir a distância entre o transdutor e a superfície da água.

Na Figura 3 é ilustrado o diagrama de ligação dos sensores e atuadores a placa Arduino UNO R3, o diagrama foi feito no Tinkercad.

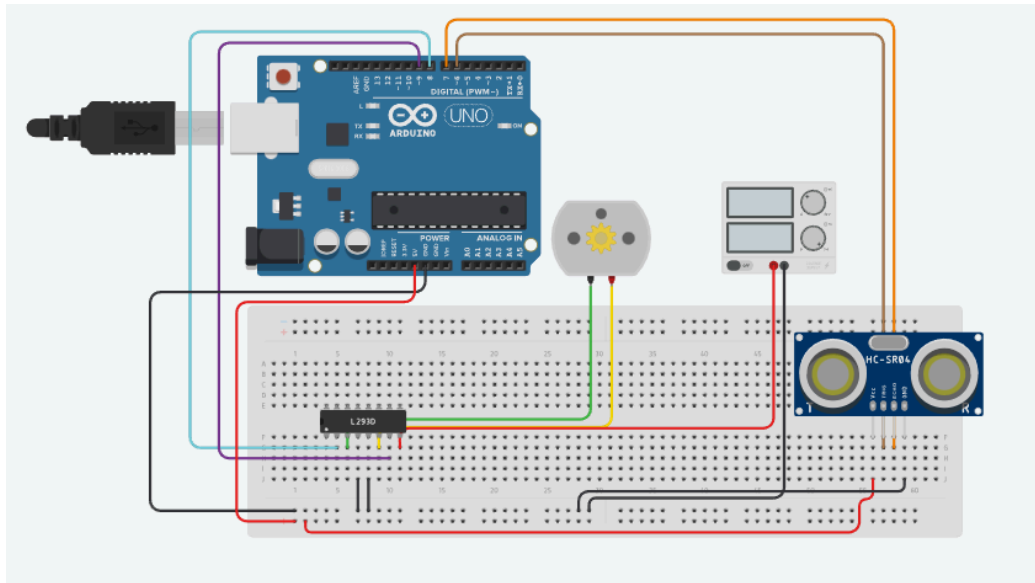


Figura 3 – Diagrama elétrico do protótipo didático.

Complementando a Figura 3, temos na Tabela 2 a descrição dos pinos usados no microcontrolador.

Tabela 2 – Pinos usados na placa do Arduino Uno R3

Descrição	Pino	Funcionalidade
Entrada 1 da Ponte H	9	Saída Digital/PWM
Entrada 2 da Ponte H	8	Controle da Bomba
Eco do Sensor	6	Receber a leitura
Accionador do Sensor	7	Leitura do sensor

Fonte: Autores (2026).

3. 2. Experimento de Modelagem do Sistema

A dinâmica do sistema foi modelada utilizando o método da curva de reação. Aplicou-se um degrau de tensão de 10V (variável manipulada) à bomba hidráulica, partindo do reservatório vazio. A resposta temporal do nível (variável de processo) foi registrada para a extração dos parâmetros do modelo de primeira ordem com tempo morto, conforme (DORF & BISHOP, 2001) e (OGATA, 2010), sendo definido pela Equação (2). Os parâmetros obtidos a partir da inspeção da Figura 4, foram: ganho estacionário ($K = 1 \text{ cm/V}$), constante de tempo ($\tau = 60\text{s}$) e atraso de transporte ($\theta=2\text{s}$).

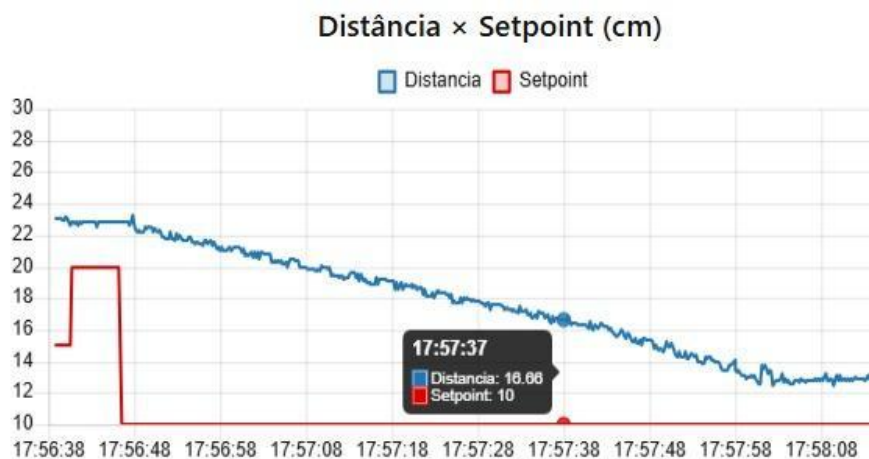


Figura 4 – Comportamento do nível do tanque em malha aberta.

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2)$$

Substituindo os valores dos parâmetros na equação (2), temos o modelo que descreve a dinâmica da planta,

$$G(s) = \frac{1 e^{-2s}}{60s + 1} \quad (3)$$

O tanque responde lentamente, leva cerca de 1 minuto para realizar 63% da mudança solicitada pela bomba e cerca de 4 a 5 minutos para estabilizar completamente.

3. 3. Sintonia do Controlador PI

Para um controlador PI, as fórmulas de sintonia baseadas na curva de reação (método de Ziegler & Nichols) estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Método da curva de reação.

Parâmetro	Fórmula
Ganho proporcional (Kp)	$(0,9 \cdot \tau) / (K \cdot \theta)$ $0,9 \times \frac{\tau}{K \times \theta}$
Tempo integral (Ti)	3,33 * θ

Fonte: Autores (2026).

Substituindo os valores, temos: o ganho proporcional vale 27 e o tempo integral vale 6,66 segundos, considerando $K_i = K_p / T_i$, temos que o ganho integral vale 4,05.

A equação do controlador PI projetado no domínio do tempo é:

$$u(t) = 27 \left(e(t) + \frac{1}{6,66} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (4)$$

Ou usando o ganho integral,

$$u(t) = 27 * e(t) + 4,05 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5)$$

3. 4. Fluxo Lógico no Node-RED

A malha de controle de nível foi implementada em tempo discreto, operando com um período de amostragem fixo de 200 ms. Este parâmetro foi definido como uma constante do projeto para assegurar o determinismo temporal necessário à execução das tarefas de processamento e controle no microcontrolador Arduino. O ciclo de operação inicia-se com a aquisição de dados do sensor ultrassônico HC-SR04, em que se aplica uma técnica de média aritmética de múltiplas leituras para a mitigação de ruídos de medição intrínsecos ao ambiente do reservatório.

Após o tratamento do sinal, o erro do sistema é calculado pela diferença entre o valor de referência (*setpoint*) e o nível medido. Este erro alimenta o algoritmo do controlador Proporcional-Integral (PI) projetado, que gera uma ação de controle baseada na combinação da resposta proporcional com a integral do erro acumulado. Para otimizar o desempenho dinâmico e garantir a integridade do sistema, a lógica de controle incorpora

uma zona morta para mitigar oscilações desnecessárias próximas ao ponto de ajuste e uma estratégia de anti-windup, que limita o termo integral para prevenir a saturação do sinal de controle e acelerar a recuperação do sistema após transientes.

O sinal resultante é convertido em modulação por largura de pulso (PWM) e aplicado à ponte H L298N, ajustando a potência fornecida à bomba hidráulica e, conseqüentemente, a vazão de entrada. Toda a estrutura lógica e as variáveis de processo — como erro, ação integral e sinal de atuação — são transmitidas via interface serial para a plataforma Node-RED, possibilitando a supervisão e análise de dados em tempo real.

4. Resultados e Discussões

A partir da tela de comando e supervisão no Node-RED foram testados e avaliados três *setpoints* de nível, 10 cm, 15 cm e 20 cm. Na Figura 5 é ilustrado o gráfico do nível frente ao *setpoint* de 20 cm. Os gráficos do erro, do sinal PWM aplicado na bomba e o sinal da ação integrativa para o *setpoint* de 20 cm estão ilustrados na Figura 6.

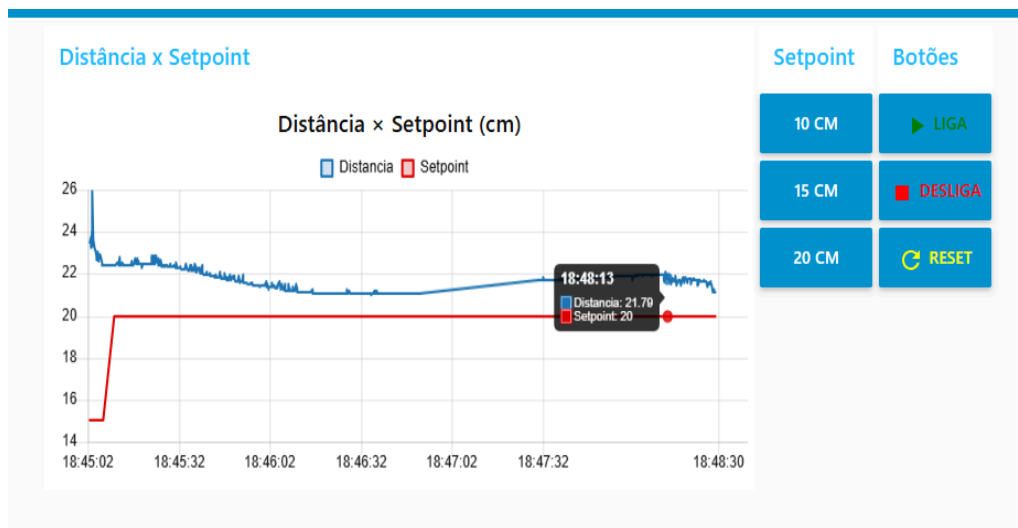


Figura 5 – Gráfico do nível medido para um *setpoint* de 20cm.



Figura 6 – Gráficos do erro, sinal PWM e ação integrativa – Setpoint de 20cm.

O gráfico da Figura 5 mostra uma ação de controle estável, pois não há oscilações descontroladas, contudo há um erro residual de ~1.7 cm. A dinâmica do nível neste cenário descreve um sistema superamortecido, caracterizada pela ausência de *overshoot* (sobressinal), o que é ideal para evitar transbordamentos em reservatórios.

A eficácia da estratégia de *anti-windup* é evidenciada no gráfico da ação integral, onde o sinal atinge o limite superior estabelecido de 100 unidades sem apresentar crescimento indefinido, prevenindo a saturação excessiva que comprometeria a capacidade de recuperação do sistema. Simultaneamente, o sinal PWM da bomba apresentou uma resposta coerente, com um esforço inicial máximo para reduzir o erro e uma estabilização subsequente em torno de um ciclo de trabalho de 20% (PWM próximo a 52) para manter o nível desejado.

Apesar da estabilidade alcançada, observou-se um erro residual persistente de aproximadamente 1,79 cm em regime permanente. Este fenômeno pode ser justificado pela presença da zona morta configurada no algoritmo, que interrompe a atuação da bomba ao atingir uma faixa de tolerância próxima ao valor de referência para preservar a vida útil dos componentes e evitar oscilações desnecessárias causadas pelo ruído intrínseco do sensor ultrassônico HC-SR04.

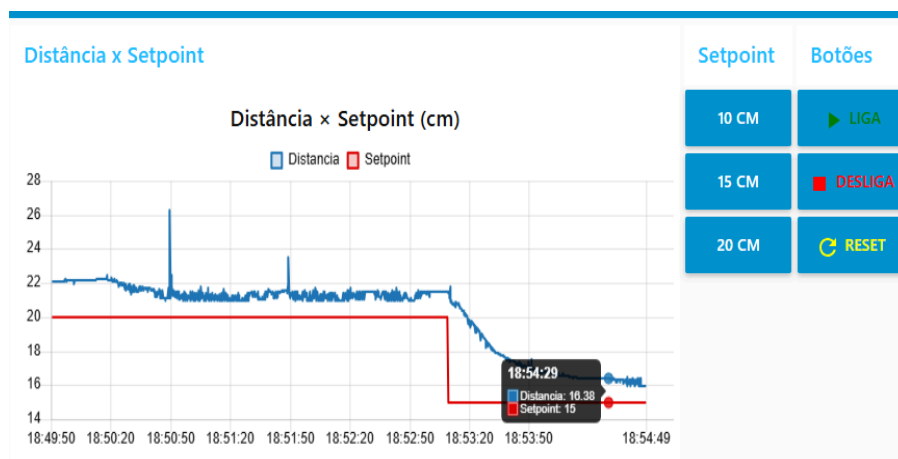


Figura 7 – Gráfico do nível medido frente um setpoint de 15cm.

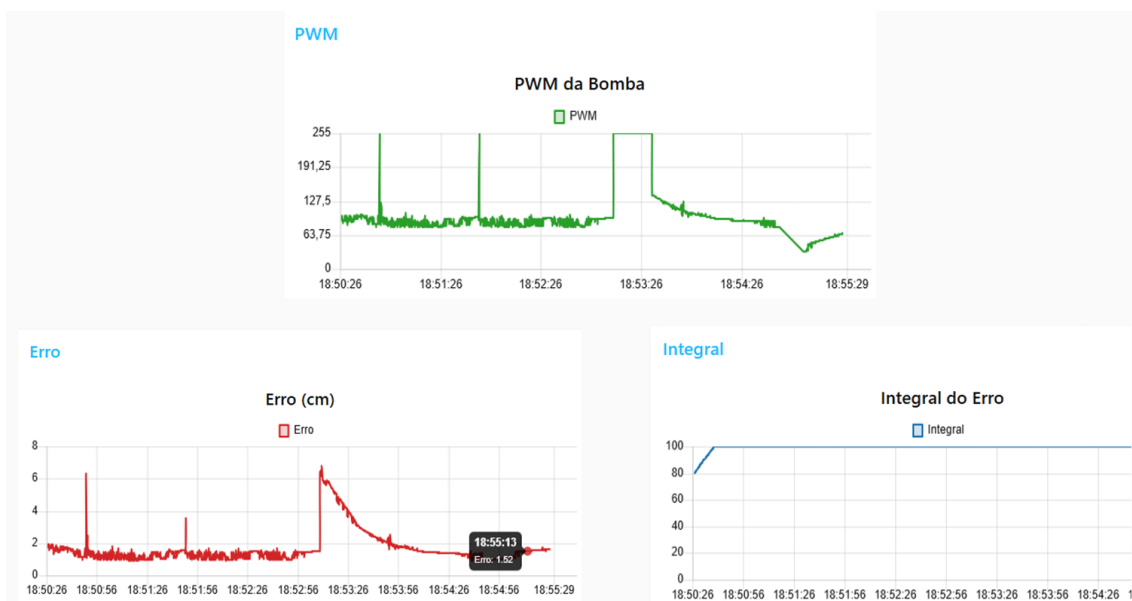


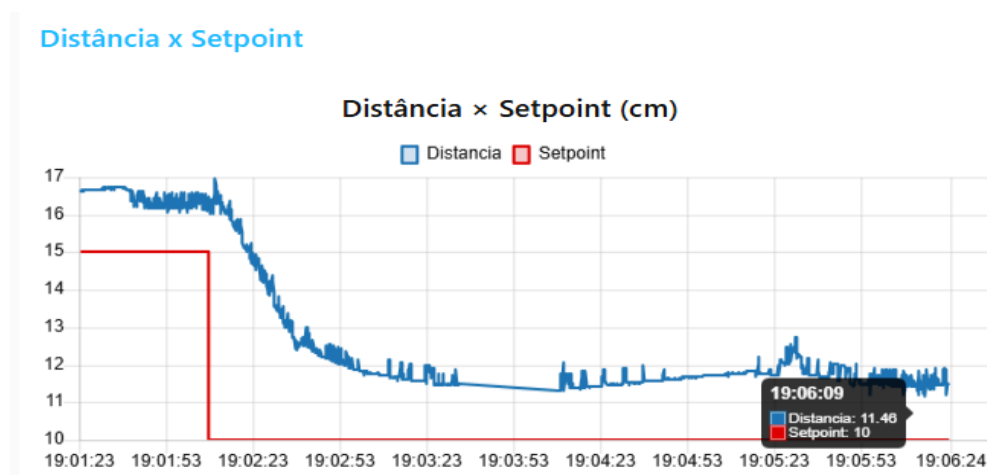
Figura 8 – Gráficos do erro, sinal PWM e ação integrativa – *Setpoint* de 15cm.

O cenário de validação do controle PI para um *setpoint* de 15 cm é ilustrado nos gráficos das Figuras 7 e 8. Observando os gráficos das Figura 8 e 9, nota-se que, após a transição do patamar de 20 cm para 15 cm por volta das 18:53:20, o nível medido (curva azul) inicia uma descida suave e controlada, aproximando-se da nova referência (curva vermelha) de forma assintótica.

Este comportamento é acompanhado por uma resposta imediata na variável manipulada (PWM), que apresenta um salto para o valor máximo (255, equivalente a 10V de tensão) durante o período de maior erro, seguido de uma redução gradual para um patamar de estabilização próximo a 63 (equivalente a 2,47V de tensão). A presença de picos pontuais no PWM sugere que o controlador está compensando ativamente o ruído de leitura do sensor HC-SR04 para manter a estabilidade.

O gráfico da integral do erro mostra que o acumulador atinge rapidamente o limite de saturação (*anti-windup*) definido em 100 unidades e permanece nesse patamar durante todo o regime estacionário, apesar do esforço máximo do integrador, há a limitação física, impedindo anulação total do erro residual, que se estabiliza em 1,38 cm.

O cenário de validação do controle PI para um *setpoint* de 10cm é ilustrado nos gráficos das Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Gráfico do nível medido frente um *setpoint* de 10cm.

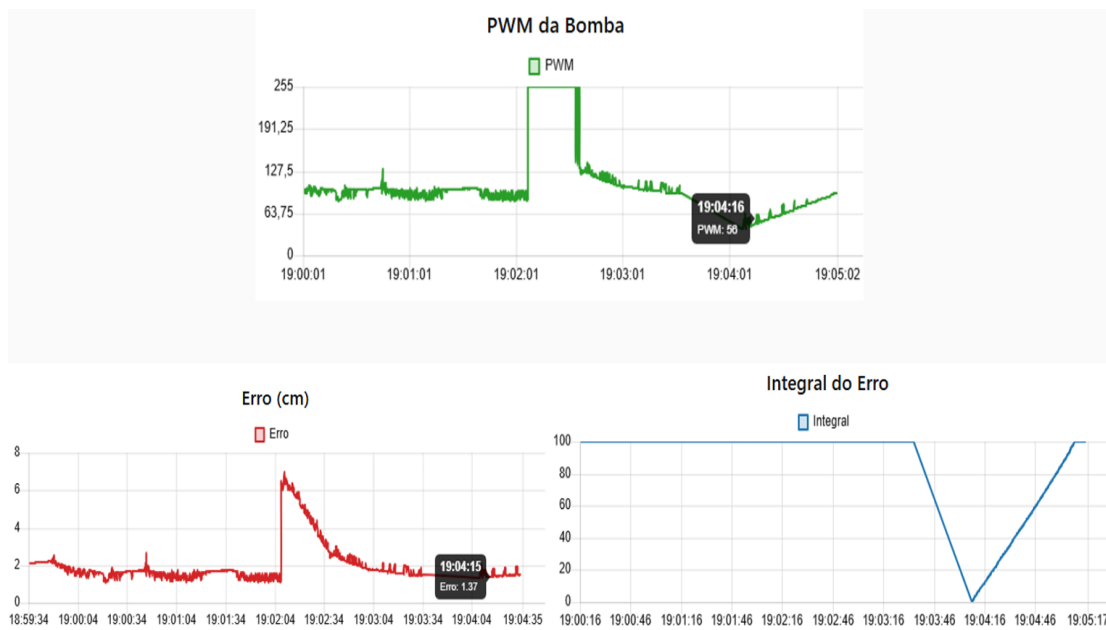


Figura 10 – Gráficos do erro, sinal PWM e ação integrativa – *Setpoint* de 10cm.

No cenário de validação em 10 cm do nível do tanque, percebe-se uma descida com inclinação constante, dinâmica natural de esvaziamento do reservatório. Durante esse transiente, o sinal de erro atinge um pico de aproximadamente 7 cm, e o controlador reage saturando o sinal PWM em seu valor máximo (255) para tentar acelerar a convergência, antes de retornar a um patamar de operação estável próximo a 56.

A análise da integral do erro revela que o mecanismo de *anti-windup* foi fundamental para a estabilidade neste cenário. O nível se estabilizou em torno de 11,46 cm, resultando em um erro de regime permanente de 1,46 cm.

A Tabela 4 traz o comparativo para os três cenários de validação do controle PI na regulação do nível do tanque.

Tabela 4 – Comparativo dos cenários de validação do controle PI.

<i>Setpoint</i> (cm)	Tempo de Acomodação (s)	Nível Estabilizado (cm)	Erro Regime Permanente	PWM Médio (%)
20	190	21,79	1,79 cm	20,4%
15	150	16,38	1,38 cm	24,7%
10	185	11,46	1,46 cm	22,0%

Fonte: Autores (2026).

O erro em regime permanente médio observado foi de aproximadamente 1,54 cm. Analisando a Tabela 4, nota-se que o erro não é linearmente proporcional ao *setpoint*, sugerindo que a resolução do sensor ultrassônico (0,3 cm) e as reflexões acústicas nas paredes do reservatório impõem um limite físico à precisão do controle integral, mesmo com a estratégia de *anti-windup* ativa.

Em todos os testes, o sistema apresentou um comportamento superamortecido, com overshoot nulo (0,0%). Esta característica é crítica para sistemas de reservatórios, pois garante que o nível nunca ultrapasse a margem de segurança, evitando transbordamentos.

O tempo de acomodação médio foi de 175 s, que está coerente com a constante de tempo da planta identificada ($\tau = 60$ s) dado que sistemas de primeira ordem levam de 3

a 4 vezes o valor de τ para estabilizar completamente (180 s a 240 s).

4. Conclusões

A validação da bancada didática de tanques acoplados, comprova a eficácia da utilização de ferramentas de baixo custo, como a plataforma Arduino e o sensor ultrassônico HC-SR04, para aplicações de automação e instrumentação. A metodologia adotada, que integrou a modelagem da planta em malha aberta com a sintonia de um controlador Proporcional-Integral (PI) via método de Ziegler-Nichols, permitiu alcançar um controle estável e seguro do processo.

Os ensaios experimentais realizados para os *setpoints* de 10 cm, 15 cm e 20 cm validaram a robustez do algoritmo implementado. Entre os principais destaques, evidenciou-se a importância da estratégia de *anti-windup*, que preveniu a saturação excessiva do termo integral e garantiu a capacidade de recuperação do sistema perante mudanças de referência.

Além disso, a incorporação de uma zona morta e da média de múltiplas leituras, mostrou-se essencial para lidar com o ruído intrínseco do sensor ultrassônico, protegendo a vida útil dos componentes eletrônicos e mecânicos ao evitar oscilações desnecessárias. Embora tenha sido observado um erro residual em regime permanente (variando entre 1,38 cm e 1,79 cm), este foi considerado aceitável dada a resolução da instrumentação utilizada e as limitações físicas do protótipo, como a reflexão de onda nas paredes do reservatório.

A integração com a plataforma Node-RED viabilizou a supervisão eficiente em tempo real. Tal característica consolida o projeto como uma solução técnica e economicamente viável, aplicável tanto ao ambiente acadêmico quanto à prototipagem de sistemas industriais.

Como trabalhos futuros sugere-se: (a) Implementar a sintonia adaptativa dos ganhos do controlador em tempo real; (b) Evoluir o sistema para uma configuração de controle em cascata; (c) Expandir a *interface* Node-RED para permitir o armazenamento do histórico operacional em bancos de dados (como InfluxDB ou MySQL); (d) Explorar algoritmos de controle preditivo baseado em modelos para lidar com o atraso de transporte.

Agradecimentos

Ao IFPB Campus Cajazeiras pela disponibilização da estrutura laboratorial durante a condução dos experimentos.

Referências

FREITAS, B. S. *Controle de nível de dois tanques acoplados com implementação de controle proporcional e integral em controladores lógicos programáveis*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2019.

CHONG, G. C. Y.; ANG, K. H.; LI, Y. PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 26, n. 1, p. 32–41, 2006.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Moderno*. 8ª Edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.

FERNANDES, J. V. S. et al. *Bancada didática para controle de nível e temperatura: Integração do CLP*

FX3U com o Elipse E3 SCADA. Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica (R4EM), v.7, n. 2, p. 12-25, Mossoró-RN, 2025.

HOTZ, J. S. *Bancada didática para controle de nível e temperatura*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo-PR, 2014.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5ª Edição, Editora Pearson, 2010.

SERAPHIM, A. L. *Modelagem e Controle de Nível em um Sistema de Dois Tanques Acoplados*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade São Francisco, 2008.