www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/tr03hy39

# Controle automático de nível em malha fechada via Arduino, PID e Modbus TCP

Automatic closed-loop level control via Arduino, PID and Modbus TCP

Davidson Junio Selvo[1]
Emanuel Pereira Gonzaga[2]
Ezio Luiz de Faria[3]
Guilherme Medeiros Soares[4]
Gustavo Pereira Aleixo[5]
Iago Tauan Evangelista dos Santos[6]
Rafael Patrick Siqueira[7]
Raul Avendanha[8]
Silvana Julia da Silveira Diniz (Orientadora)

## RESUMO

Este trabalho desenvolve e avalia um sistema automático de controle de nível em malha fechada, utilizando Arduino Uno, controlador PID e comunicação industrial Modbus TCP e sistema supervisório ScadaBR. A pesquisa caracteriza-se como experimental, quantitativa e aplicada, fundamentada na construção de uma bancada didática composta por dois reservatórios, sensores ultrassônicos, bomba hidráulica acionada por PWM e sistema supervisório ScadaBR. A metodologia compreende a identificação da dinâmica hidráulica, a sintonia do controlador pelo método de Controle por Modelo Interno (IMC) e a realização de ensaios de rastreamento de referência, rejeição de perturbações e comparação com o controle liga/desliga (ON/OFF). Os resultados demonstram que o controlador PID apresenta erro médio absoluto de 0,75 ponto percentual, contra 1,19 do controle ON/OFF, representando uma redução aproximada de 37%. Verifica-se também menor variabilidade do nível, embora o sistema apresente maior frequência de interrupções da bomba. Os ensaios das proteções confirmam o funcionamento dos intertravamentos contra operação sem água e excesso de nível. Conclui-se que a solução permite o controle e a supervisão remota do processo, apresentando desempenho promissor, mas exigindo aperfeiçoamentos na instrumentação e na estabilidade operacional.

**Palavras-chave:** Controle de nível. Controlador PID. Arduino Uno. Modbus TCP. Supervisão industrial.

1 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Cristiano Machado. E-mail: davidson8025@gmail.com.
2 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Conselheiro Lafaiete. E-mail: emanuelpereira.gonzaga@gmail.com.
3 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Conselheiro Lafaiete. E-mail: ezioluiz01@outlook.com.
4 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Cristiano Machado. E-mail: guilhermesoaresmkt01@gmail.com.
5 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Cristiano Machado. E-mail: gustavoopereiraa865@gmail.com.
6 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Conselheiro Lafaiete. E-mail: iago-93-tauan@hotmail.com.
7 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Conselheiro Lafaiete. E-mail: rafaeleletrp@gmail.com.
8 Graduação em Engenharia Elétrica – UNA Cristiano Machado. E-mail: raulav15@hotmail.com.

## ABSTRACT

This work develops and evaluates an automatic closed-loop level control system using an Arduino Uno, a PID controller, Modbus TCP industrial communication and the ScadaBR supervisory system. The research is characterized as experimental, quantitative and applied, based on the construction of a didactic test bench composed of two reservoirs, ultrasonic sensors, a PWM-driven hydraulic pump and the ScadaBR supervisory system. The methodology comprises the identification of the hydraulic dynamics, the tuning of the controller by the Internal Model Control (IMC) method and the performance of reference tracking, disturbance rejection and comparison tests with on/off (ON/OFF) control. The results show that the PID controller presents a mean absolute error of 0.75 percentage point, against 1.19 for the ON/OFF control, representing an approximate reduction of 37%. Lower level variability is also observed, although the system presents a higher frequency of pump interruptions. The protection tests confirm the operation of the interlocks against dry running and excess level. It is concluded that the solution enables the control and remote supervision of the process, showing promising performance but requiring improvements in instrumentation and operational stability.

**Keywords:** Level control. PID controller. Arduino Uno. Modbus TCP. Industrial supervision.

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto da automação industrial moderna, o controle de variáveis de processo como o nível de reservatórios é essencial para garantir eficiência, segurança e qualidade operacional em plantas de tratamento de água, indústrias químicas e do setor alimentício. A evolução das redes industriais e dos sistemas de supervisão (SCADA) permite substituir acionamentos locais por arquiteturas integradas que combinam microcontroladores, protocolos de comunicação e interfaces para monitoramento e telemetria em tempo real.

Os sistemas convencionais de enchimento baseados no acionamento tipo liga/desliga (ON/OFF) fazem a bomba operar apenas em capacidade máxima ou totalmente desligada, o que gera oscilações bruscas no nível, estresse mecânico acelerado e menor eficiência energética. A implementação de uma malha fechada com algoritmo PID e acionamento proporcional por PWM (*Pulse Width Modulation*) via MOSFET permite ajustar continuamente a velocidade da bomba, promovendo estabilidade e aumentando a vida útil do equipamento. Além disso, a integração do Arduino Uno ao ScadaBR via protocolo Modbus TCP poderá viabilizar o monitoramento remoto e a aplicação de proteções de segurança críticas, como o desligamento automático para evitar a operação a seco e a prevenção contra transbordamentos.

O objetivo geral do trabalho é desenvolver e validar um sistema automático de controle de nível de tanques em malha fechada utilizando o algoritmo PID no Arduino Uno e supervisão industrial remota via protocolo Modbus TCP com o software ScadaBR.

Como objetivos específicos, o projeto busca implementar a medição de nível com sensores ultrassônicos HC-SR04, calcular continuamente o erro em malha fechada, aplicar o controle PID para ajuste automático da velocidade da bomba via PWM/MOSFET, configurar o Arduino como servidor Modbus TCP para troca de dados com o ScadaBR e programar rotinas lógicas de proteção contra transbordamento e funcionamento sem água.

# 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os sistemas de controle automático desempenham papel fundamental na automação industrial, permitindo a regulação de variáveis de processo e contribuindo para a estabilidade e a eficiência operacional (Costa *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025). Nesse contexto, o controle de nível de líquidos em reservatórios destaca-se pela aplicação de sistemas em malha fechada, especialmente por meio do controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), utilizado para melhorar a precisão e a estabilidade dos processos (Anggara; Ma'arif; Abu, 2023). A integração entre sensores, microcontroladores e elementos de atuação possibilita o desenvolvimento de soluções automatizadas de baixo custo (Anggara; Ma'arif; Abu, 2023; Ponciano *et al.*, 2025). Além disso, a utilização de protocolos de comunicação industrial, como o Modbus TCP, permite a integração de equipamentos aos sistemas supervisórios, contribuindo para a conectividade e a modernização dos processos industriais (Araujo *et al.*, 2025; Nikolajew; Eichelberger, 2024).

## 2.1 Sistemas Dinâmicos e Controle de Processos Industriais

### 2.1.1 Conceitos Fundamentais e Variáveis de Processo

Um sistema dinâmico apresenta variáveis que se modificam ao longo do tempo em resposta a entradas e perturbações. Em uma malha de controle destacam-se a variável de processo (PV), correspondente ao valor medido; o ponto de ajuste (*setpoint*, SP), que representa a referência; o erro e(t), obtido pela diferença entre referência e medição; e a variável manipulada (MV), por meio da qual se modifica o comportamento do sistema (Buwarda *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025), sendo expresso pela Equação (1):

$$e(t) = SP - SV \quad (1)$$

No controle de nível, a PV corresponde à altura da coluna de líquido ou ao seu percentual em relação à faixa de medição. A MV pode ser a vazão de entrada, alterada pela atuação sobre uma bomba ou uma válvula. O sinal de erro orienta o controlador na

determinação da ação corretiva necessária para aproximar o nível do valor estabelecido (Anggara; Ma'arif; Abu, 2023; Buwarda *et al.*, 2025).

### 2.1.2 Modelagem Física de Reservatórios

A dinâmica de um reservatório pode ser descrita pelo princípio da conservação da massa. Admitindo fluido incompressível, massa específica constante e tanque de seção transversal uniforme, a diferença entre as vazões de entrada e saída corresponde à taxa de acumulação volumétrica no reservatório (Silva *et al.*, 2025), conforme a Equação (2):

$$Q_e(t) - Q_s(t) = A \cdot dh(t)/dt \quad (2)$$

Nessa expressão, $Q_e(t)$ e $Q_s(t)$ são as vazões volumétricas de entrada e saída ($m^3/s$), A representa a área transversal do tanque ($m^2$) e h(t) corresponde à altura do líquido (m). O modelo evidencia que o nível aumenta quando a vazão de entrada supera a de saída e diminui na situação inversa. O comportamento também depende das características do escoamento: em plantas autorregulantes, a vazão de saída pode crescer com a elevação do nível; em determinadas condições de saída praticamente constante, a planta apresenta comportamento integrante (Silva *et al.*, 2025).

Para uma representação simplificada, admitindo vazão de saída proporcional ao nível, $Q_s(t) = h(t)/R$, em que R representa uma resistência hidráulica equivalente, obtém-se, sob condições iniciais nulas, a função de transferência de primeira ordem (Silva *et al.*, 2025) apresentada na Equação (3):

$$G(s) = H(s)/Q_e(s) = R/(RAs + 1) \quad (3)$$

Nesse modelo, o ganho estático do processo corresponde a K = R, enquanto a constante de tempo é dada por $\tau = RA$. Essa representação permite analisar a resposta dinâmica do nível em função das variações na vazão de entrada, contribuindo para o desenvolvimento e a sintonia de estratégias de controle (Silva *et al.*, 2025).

### 2.1.3 Estruturas de Controle: Malha Aberta, Malha Fechada, ON/OFF

Na malha aberta, a ação sobre o processo não utiliza diretamente a medição de sua saída. Na malha fechada, a PV é medida e comparada ao SP, permitindo que a atuação seja corrigida em função do erro. O controle liga/desliga (ON/OFF) pode constituir uma estratégia em malha fechada quando utiliza a medição do nível para ligar e desligar a bomba entre limites definidos. Já a atuação variável permite modular a intensidade do comando, por

exemplo, por PWM, oferecendo uma alternativa para o controle da vazão (Buwarda *et al.*, 2025; Gomes; Minhoni, 2023; Anggara; Ma'arif; Abu, 2023).

A adoção do PID não implica, por si só, menor consumo energético. Gomes e Minhoni (2023), ao compararem estratégias de controle em um sistema de bombeamento, observaram maior consumo no cenário PID investigado devido ao funcionamento prolongado da motobomba. Assim, estabilidade, erro, tempo de resposta e consumo devem ser considerados conjuntamente na avaliação do desempenho.

## 2.2 Algoritmo e Estratégias de Controle PID

### 2.2.1 Fundamentação Matemática do Controlador PID

O controlador PID determina a ação corretiva combinando três contribuições calculadas a partir do erro: proporcional, integral e derivativa. Na representação paralela ideal, em tempo contínuo, a saída do controlador é definida pela Equação (4) (Silva *et al.*, 2026; Anggara; Ma'arif; Abu, 2023):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{4}$$

Em que u(t) é o comando do controlador, $K_p$ é o ganho proporcional, $K_i$ é o ganho integral e Kd representa o ganho derivativo. A ação proporcional responde ao erro instantâneo e pode acelerar a resposta; entretanto, ganhos excessivos podem aumentar oscilações e sobressinal. Dependendo da planta, a atuação exclusivamente proporcional pode manter um desvio em regime permanente (Anggara; Ma'arif; Abu, 2023; Silva *et al.*, 2025).

A parcela integral acumula o erro ao longo do tempo e pode eliminar desvios persistentes em condições estáveis e com capacidade suficiente do atuador. Porém, seu ajuste excessivo pode elevar o sobressinal e provocar acúmulo da integração durante a saturação do atuador, fenômeno denominado *windup*. A parcela derivativa reage à taxa de variação do erro e pode amortecer oscilações, mas também amplifica a influência de ruídos rápidos de medição, tornando relevante o tratamento dos sinais provenientes de sensores ultrassônicos (Silva *et al.*, 2025; Anggara; Ma'arif; Abu, 2023).

### 2.2.2 Implementação digital em microcontroladores

Na implementação embarcada, as medições são obtidas em instantes discretos, definidos por um período de amostragem $T_s$. Uma possibilidade de discretização consiste no cálculo da ação proporcional a partir do erro atual, na atualização do acumulador integral por

uma aproximação retangular e na estimativa da derivada pela diferença entre erros consecutivos. Assim, a saída pode ser representada conforme Equação (5) (Silva *et al.*, 2025; Anggara; Ma'arif; Abu, 2023):

$$u[n] = K_p e[n] + I[n-1] + K_i e[n] T_s + K_d \frac{e[n] - e[n-1]}{T_s} \quad (5)$$

Nessa formulação, I[n−1] representa o valor acumulado da parcela integral no instante anterior. A escolha do período de amostragem deve levar em conta a dinâmica do reservatório, a atualização do sensor e a capacidade de processamento da plataforma. O comando calculado pode ser aplicado a uma bomba por meio de um estágio eletrônico compatível com PWM, respeitando a faixa de operação do atuador e as condições de saturação (Anggara; Ma'arif; Abu, 2023).

### 2.2.4 Sintonia do controlador PID

A sintonia consiste na escolha dos ganhos $K_P$, $K_i$ e Kd para equilibrar o tempo de subida, o sobressinal, o tempo de acomodação e o erro em regime permanente. Uma das estratégias citadas na literatura é o método de Ziegler-Nichols pela curva de reação, que utiliza a resposta a um degrau para estimar parâmetros de um modelo de primeira ordem com tempo morto (FOPDT), quando esse modelo representa adequadamente a planta (Souza; Massagrande; Rosa Junior, 2025; Silva *et al.*, 2026).

Para a forma ideal do PID, a regra clássica associa os parâmetros do processo ao ganho proporcional $K_P = 1{,}2T/(KL)$, ao tempo integral $T_i = 2L$ e ao tempo derivativo Td = 0,5L, em que K é o ganho estático, T é a constante de tempo e L é o tempo morto. Esses valores constituem estimativas iniciais, devendo ser avaliados diante da resposta real do sistema; plantas sem atraso identificável ou com comportamento integrante podem exigir outros procedimentos.

No ajuste empírico, observa-se inicialmente o efeito do ganho proporcional; em seguida, a parcela integral pode ser introduzida para reduzir o erro estacionário e, quando necessário, a derivativa pode ser empregada para melhorar o amortecimento. Os resultados dependem das condições hidráulicas, da qualidade das medições e dos limites da bomba, não havendo garantia de desempenho superior para uma única combinação de parâmetros (Anggara; Ma'arif; Abu, 2023).

## 2.3 Instrumentação, Eletrônica De Potência e Plataformas Embarcadas

### 2.3.1 Sensoriamento ultrassônico de nível

O HC-SR04 mede distância pelo princípio do tempo de voo (*Time of Flight* — ToF). O dispositivo emite ondas ultrassônicas de frequência nominal de 40 kHz, iniciadas por um pulso de disparo no terminal *Trigger*, e informa no terminal *Echo* um intervalo temporal associado ao percurso de ida e retorno do som. A distância entre o sensor e a superfície do líquido é calculada pela Equação (6) (Nascimento; Cichaczewski, 2021; Ponciano *et al.*, 2025):

$$d = \frac{v_{\text{som}}\, t_{\text{echo}}}{2} \tag{6}$$

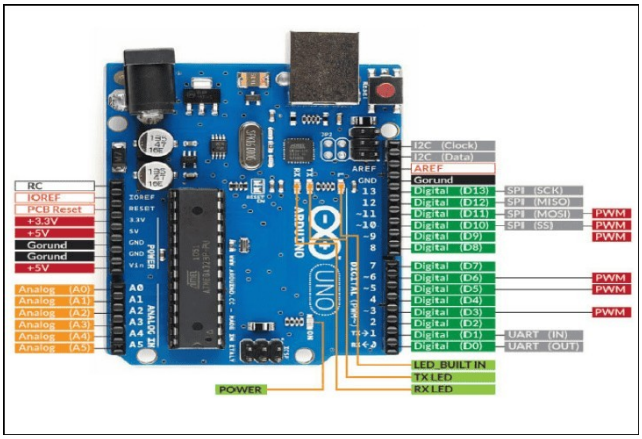
A velocidade do som pode ser aproximada por 340 m/s em condições ambientais usuais. Conhecendo-se a distância Href entre o sensor e a referência de nível zero do tanque, calcula-se a altura da coluna de líquido por h = Href − d. O percentual pode ser determinado pela razão entre essa altura e a faixa útil Hútil: Nível (%) = 100h/Hútil (Nascimento; Cichaczewski, 2021).

A faixa nominal de medição do HC-SR04 é de aproximadamente 2 a 400 cm, com precisão de referência de 3 mm informada pelo fabricante; contudo, esses valores não representam garantia de desempenho em todas as condições. Temperatura, umidade, posicionamento e inclinação do sensor afetam as leituras. Ponciano *et al.* (2025) constataram desvios associados à inclinação e destacaram a necessidade de instalação perpendicular e calibração. Em reservatórios, movimentação da superfície e reflexões indesejadas também justificam o emprego de tratamento digital, como média móvel ou mediana, antes da utilização da medição pelo PID (Anggara; Ma’arif; Abu, 2023).

### 2.3.2 Arduino Uno e atuação por PWM

O Arduino Uno mostrado na Figura 1 é uma plataforma embarcada aberta empregada na integração de sensores, execução de rotinas de controle e comando de atuadores. A versão R3 utiliza o ATmega328P, de 8 bits, com clock de 16 MHz, 32 KB de memória Flash e 2 KB de SRAM. Dispõe de 14 pinos digitais, seis com capacidade PWM, e seis entradas analógicas associadas a um conversor de 10 bits (Spohn; Chabatura Neto; Fassini, 2019).

**Figura 1 –** Placa Arduino Uno




Fonte: Components101 (2023).

No controle de nível, o microcontrolador pode receber medições dos sensores ultrassônicos, calcular o erro em relação ao SP, executar o PID e gerar um sinal PWM para regular a atuação da bomba por meio de um circuito de potência. O PWM modifica a proporção de tempo em que o acionamento permanece ativo em cada período, possibilitando variar a tensão média aplicada à carga. Anggara, Ma'arif e Abu (2023) descrevem uma aplicação com Arduino Uno, HC-SR04 e driver L298N para o comando da bomba, demonstrando a associação entre medição e atuação variável.

A plataforma também pode ser conectada a módulos Ethernet para disponibilizar as variáveis do sistema a um supervisório. Na arquitetura discutida no documento de origem, o nível do reservatório superior é utilizado como variável controlada, enquanto a medição do reservatório inferior oferece informação para proteção contra falta de água. Os detalhes de conexão conforme Apêndice A, a implementação do acionamento e o comportamento obtido devem ser verificados na etapa experimental.

## 2.4 Redes De Comunicação Industrial e Supervisão (Scada)

### 2.4.1 Arquitetura Modbus e organização dos dados

O Modbus é um protocolo de comunicação desenvolvido em 1979 e empregado em equipamentos industriais por sua estrutura padronizada e facilidade de integração. Nas variantes seriais e TCP, a troca de informações é organizada segundo uma arquitetura cliente/servidor: o cliente inicia a requisição e o servidor responde com os dados ou com a confirmação de uma operação (Nikolajew; Eichelberger, 2024; Araujo Ochoa *et al.*, 2025).

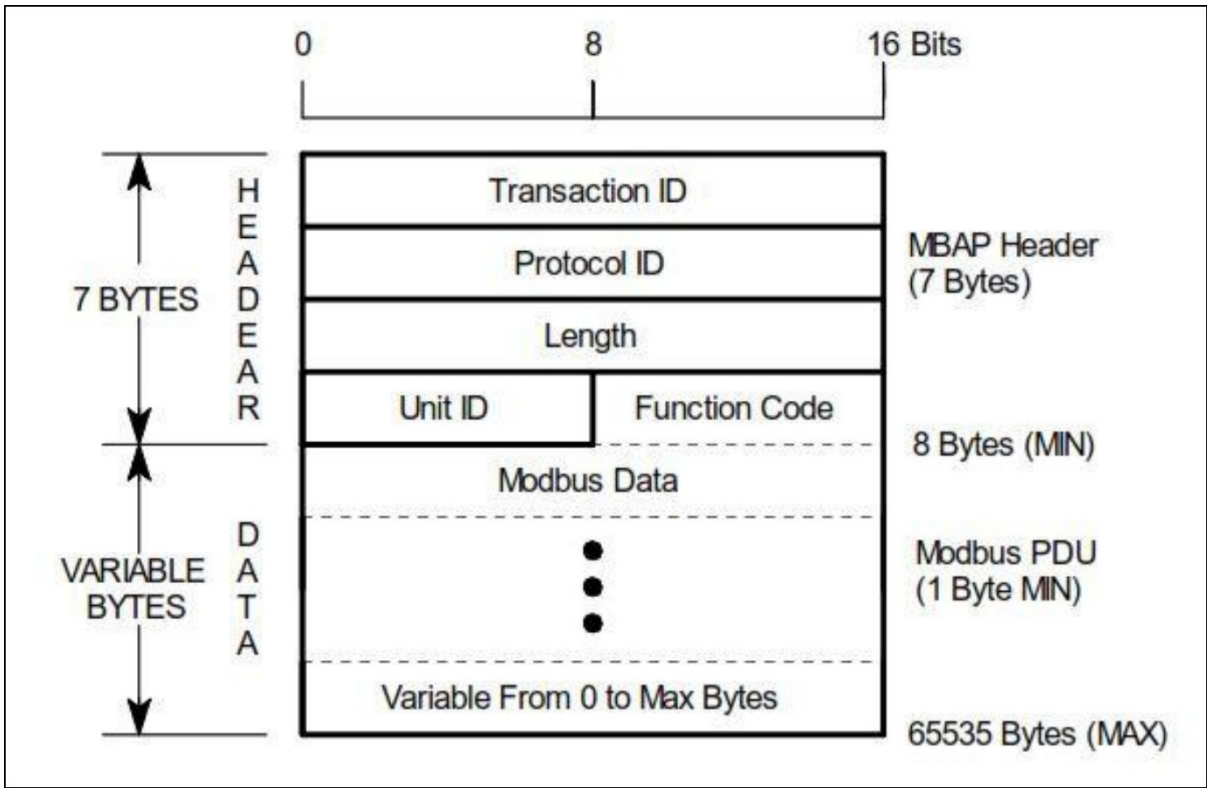
O protocolo utiliza quatro áreas lógicas: *coils*, variáveis discretas de leitura e escrita; *discrete inputs*, estados binários somente de leitura; *input registers*, registros de 16 bits para

leitura de valores; e *holding registers*, registros de 16 bits que admitem leitura e escrita. O mapeamento dessas áreas depende da aplicação. Valores que exigem mais de 16 bits, como determinados números em ponto flutuante, podem ocupar registradores consecutivos e demandar acordo sobre a ordem de bytes e palavras (Nikolajew; Eichelberger, 2024).

### 2.4.2 Modbus TCP e integração Ethernet

O Modbus TCP transporta requisições Modbus em conexões TCP/IP, normalmente pela porta 502. Sua unidade de dados de aplicação (ADU) mostrada na Figura 2 contém o cabeçalho MBAP, de sete bytes, seguido da PDU, formada por código de função e dados. A versão RTU acrescenta um CRC-16 ao quadro serial, enquanto o Modbus TCP utiliza os mecanismos de verificação e entrega das camadas de rede e transporte, sem incorporar o CRC-16 à sua ADU. Esses mecanismos não equivalem, por si sós, a autenticação ou criptografia (Nikolajew; Eichelberger, 2024; Araujo Ochoa *et al.*, 2025).

**Figura 2 –** Unidade de Dados de Aplicação (ADU) Modbus TCP/IP




Fonte: SCADA Protocols (2026).

No sistema descrito, a conectividade Ethernet é prevista por meio de um módulo W5100 associado ao Arduino, permitindo disponibilizar dados de nível, referências e parâmetros de controle. A definição do servidor e do cliente, assim como o mapa efetivo de

registradores, deve corresponder ao programa implementado e ser confirmada nos testes de comunicação.

### 2.4.3 Supervisão por sistemas SCADA

Os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) reúnem funções de aquisição e apresentação de variáveis, registro histórico, gráficos de tendência, parametrização e alarmes. Araujo Ochoa *et al.* (2025) demonstram a integração de dispositivos a um sistema supervisório por Modbus TCP, incluindo consultas periódicas a registros e alterações de parâmetros. Esses recursos contribuem para acompanhar o processo e analisar suas condições de operação.

Para a aplicação de controle de nível, o documento analisado considera o ScadaBR como ferramenta de supervisão, com possibilidade de apresentar os níveis dos reservatórios, o SP, a saída do PID e os estados da bomba. Mediante comunicação adequada, também podem ser disponibilizados ajustes remotos dos ganhos do controlador e informações históricas para avaliação do tempo de acomodação, do sobressinal e do erro estacionário.

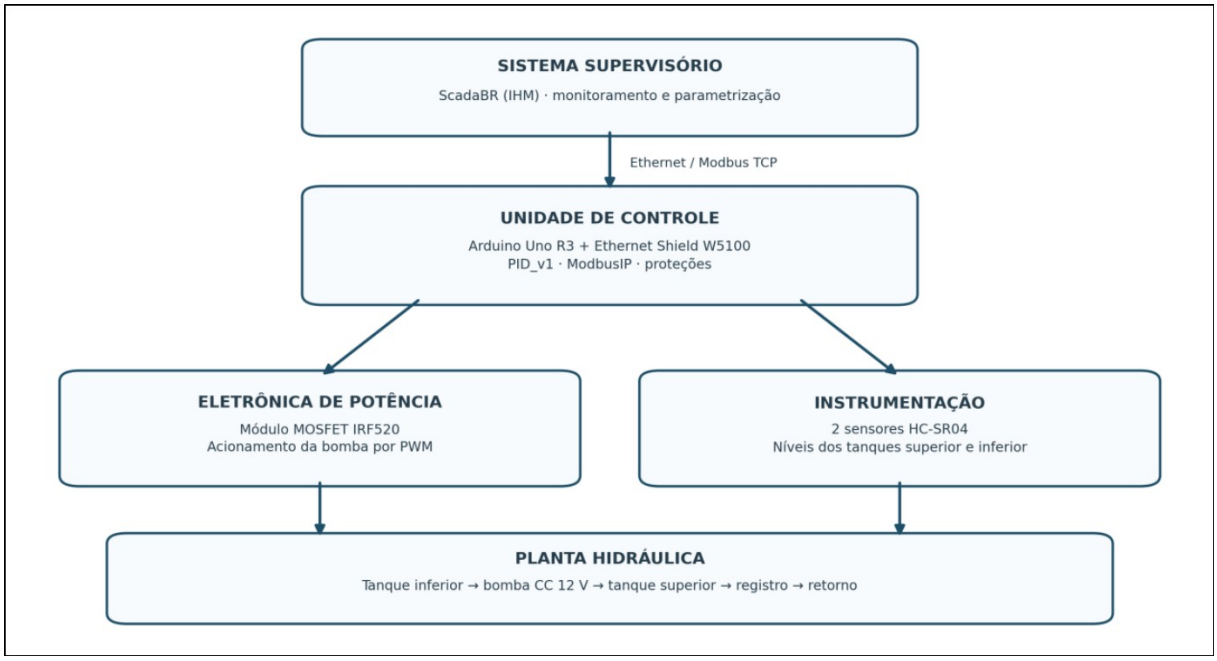
As medições podem subsidiar alarmes de nível elevado e de falta de água no reservatório de alimentação. As proteções que exigem resposta local devem permanecer sob responsabilidade do controle embarcado, independentemente da disponibilidade do ScadaBR ou da rede, enquanto o supervisório acompanha as variáveis e os eventos do processo.

## 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada caracteriza-se como experimental, quantitativa e aplicada. A pesquisa é classificada como experimental, pois envolve a construção de uma bancada de controle de nível, na qual são realizados ensaios mediante a alteração de parâmetros operacionais, como o setpoint e os ganhos do controlador PID, permitindo observar e avaliar o comportamento dinâmico do sistema. Possui abordagem quantitativa, uma vez que a avaliação do desempenho é fundamentada em dados numéricos, obtidos por meio da medição dos níveis dos reservatórios, do monitoramento das variáveis de processo e da análise dos desvios em relação aos valores de referência. Quanto à natureza aplicada, o estudo busca desenvolver e validar uma solução prática de automação para o controle de nível de reservatórios, utilizando componentes físicos e tecnologias de supervisão e comunicação industrial.

O procedimento metodológico compreende o dimensionamento físico da planta, a montagem das conexões elétricas e hidráulicas, o desenvolvimento do firmware embarcado no microcontrolador Arduino, a implementação do algoritmo de controle PID e a integração da comunicação Modbus TCP com o software supervisório ScadaBR, conforme a arquitetura apresentada na Figura 3.

**Figura 3 –** Arquitetura geral do sistema de controle de nível



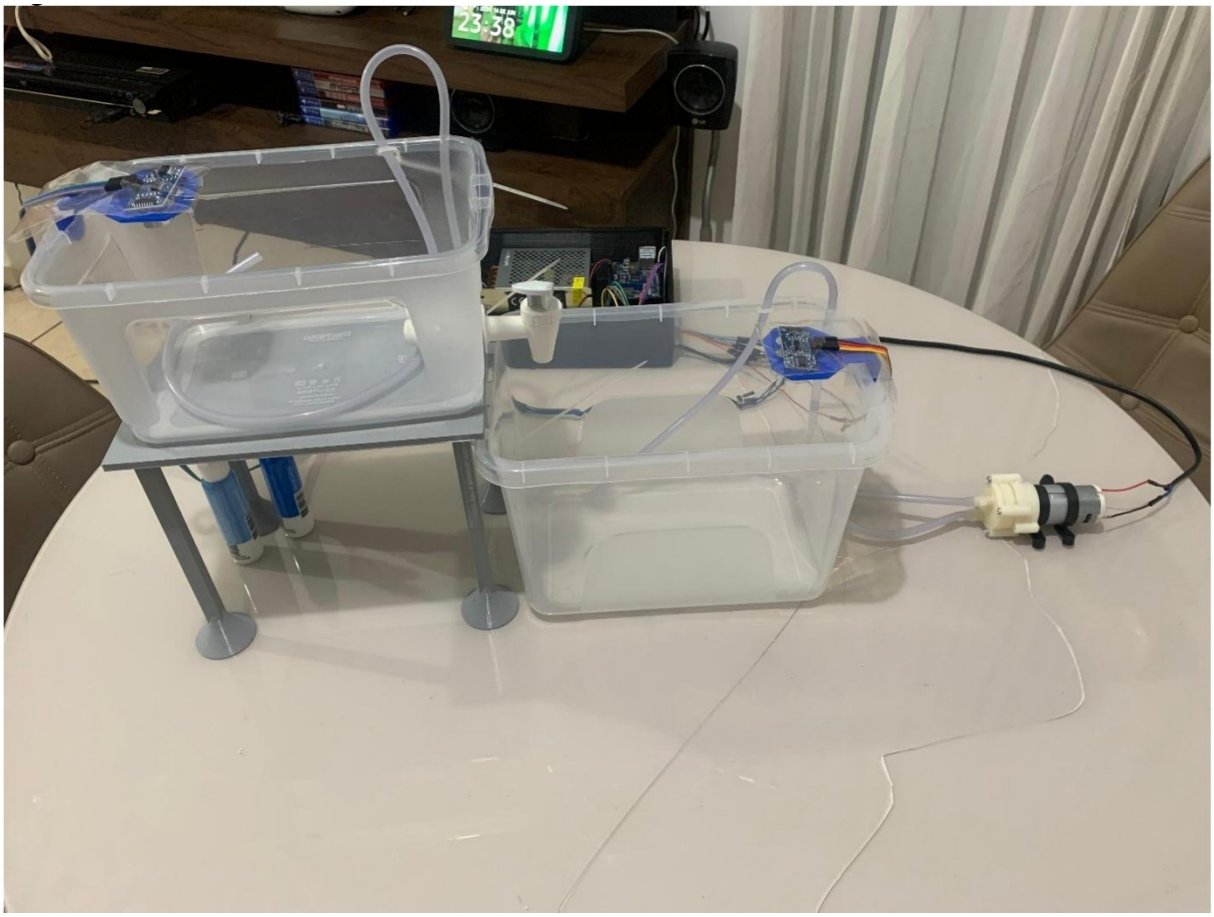

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

## 3.1 Sistemas Dinâmicos e Controle de Processos Industriais

A bancada hidráulica Figura 4 foi projetada em uma estrutura vertical composta por dois reservatórios cilíndricos transparentes dispostos em desnível e interligados por tubulações de PVC flexível, de modo a permitir a recirculação contínua da água durante os ensaios. O reservatório inferior atua como tanque de armazenamento e sucção da bomba, enquanto o reservatório superior constitui a planta cujo nível é controlado.

A bomba de corrente contínua, alimentada em 12 V, transfere água do reservatório inferior ao superior. O tanque superior possui uma tubulação de saída equipada com válvula manual (registro de carga), cuja abertura pode ser alterada para simular diferentes condições de consumo. A água retorna ao reservatório inferior, permitindo introduzir perturbações hidráulicas e avaliar a capacidade de rejeição de distúrbios da malha de controle.

**Figura 4 –** Bancada hidráulica



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

## 3.2 Componentes e Especificações do Hardware

Os principais materiais previstos para a construção do protótipo e suas respectivas funções estão relacionados na Tabela 1.

**Tabela 1 –** Relação de hardware e componentes da planta piloto

| Componente | Modelo / especificação | Função na planta piloto |
|---|---|---|
| Microcontrolador | Arduino Uno | Leitura de sensores, execução do PID e proteções. |
| Interface de rede | Ethernet Shield W5100 | Conectividade Ethernet e comunicação Modbus TCP. |
| Sensores de nível | 2 sensores HC-SR04 (5 V) | Medição de nível nos reservatórios superior e inferior. |
| Acionamento de potência | Módulo MOSFET IRF520 | Chaveamento PWM para comando da bomba CC. |
| Elemento final | Bomba hidráulica CC 12 V | Transferência de água ao tanque superior. |
| Alimentação | Fonte chaveada 12 V / 2 A | Alimentação do conjunto de acionamento. |
| Software supervisório | ScadaBR (Java/Tomcat) | Supervisão, parametrização e alarmes. |

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

## 3.3 Esquema Elétrico e Pinagem de Conexão

O circuito eletrônico contempla a ligação dos dois sensores ultrassônicos e do módulo MOSFET ao Arduino Uno. O Ethernet Shield W5100 é acoplado à plataforma e utiliza o barramento SPI para a comunicação. O mapeamento previsto das entradas e saídas digitais está apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 –** Mapeamento previsto de pinos do Arduino Uno

| Dispositivo | Sinal | Pino Arduino | Tipo |
|---|---|---|---|
| Sensor superior | TRIG | D2 | Saída digital |
| Sensor superior | ECHO | D3 | Entrada digital |
| Sensor inferior | TRIG | D4 | Saída digital |
| Sensor inferior | ECHO | D5 | Entrada digital |
| Módulo MOSFET | SIG / PWM | D9 | Saída PWM |
| Ethernet W5100 | SS / CS (SPI) | D10 | Seleção SPI |

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

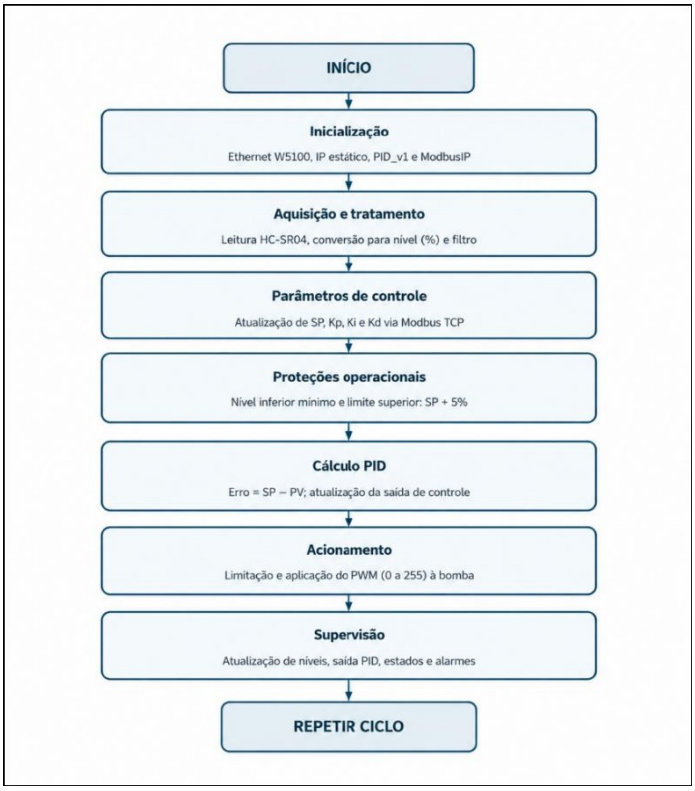
## 3.4 Arquitetura do Firmware e Algoritmo de Controle

O firmware foi concebido em linguagem C/C++, no ambiente Arduino IDE, para executar ciclicamente as rotinas de aquisição, cálculo, supervisão e proteção. Após a inicialização do módulo de comunicação e das bibliotecas PID_v1 e ModbusIP, o programa obtém as medições dos sensores HC-SR04, converte as distâncias em percentuais de nível e aplica o tratamento digital previsto para as leituras.

Em seguida, o programa consulta os parâmetros disponibilizados pela comunicação Modbus TCP, verifica os limites operacionais e, quando a operação está autorizada, calcula a ação do PID a partir da diferença entre o setpoint (SP) e o nível medido no reservatório superior (PV). O comando resultante é limitado e aplicado ao estágio de potência por PWM. A Figura 4 representa a sequência de operação prevista para o firmware.

A biblioteca PID_v1 é utilizada para o cálculo do controlador discreto. A faixa da saída é configurada entre 0 e 255 por meio de *Set Output Limits* (0, 255), compatível com a representação convencional de PWM de 8 bits do Arduino. As rotinas de intertravamento devem ter prioridade sobre o comando de controle, de modo que a bomba permaneça desligada quando uma condição de proteção for identificada.

**Figura 5 –** Fluxograma das rotinas de aquisição, controle e proteção




Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

## 3.5 Comunicação Modbus TCP e Mapeamento de Registradores

A arquitetura proposta prevê o Arduino Uno conectado à rede local por meio do Ethernet Shield W5100, utilizando endereço IP fixo e a porta TCP 502. Por meio da biblioteca ModbusIP, o microcontrolador atua como servidor Modbus TCP, enquanto o ScadaBR atua como cliente para consulta e escrita das variáveis autorizadas. A atualização periódica do sistema supervisório foi prevista com intervalo de 1.000 ms.

O mapa de dados indicado na Tabela 3 utiliza registradores de retenção (*Holding Registers*) de 16 bits para o intercâmbio de medições, parâmetros e estados.

**Tabela 3 –** Mapa de registradores Modbus TCP previsto para o sistema

| Endereço | Variável | Permissão | Faixa / representação |
|---|---|---|---|
| 40001 (REG 0) | Nível tanque superior (PV) | Leitura | 0 a 100% |
| 40002 (REG 1) | Nível tanque inferior | Leitura | 0 a 100% |
| 40003 (REG 2) | Setpoint (SP) | Leitura / escrita | 0 a 100% |
| 40004 (REG 3) | Ganho proporcional (Kp) | Leitura / escrita | Inteiro escalonado |
| 40005 (REG 4) | Ganho integral (Ki) | Leitura / escrita | Inteiro escalonado |
| 40006 (REG 5) | Ganho derivativo (Kd) | Leitura / escrita | Inteiro escalonado |
| 40007 (REG 6) | Saída do PID (MV) | Leitura | 0 a 255 |
| 40008 (REG 7) | Status de alarmes | Leitura | Código inteiro |

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

## 3.6 Lógicas de Segurança e Proteções Operacionais

As proteções operacionais foram concebidas para execução local no microcontrolador, sem dependência da disponibilidade do supervisório. O intertravamento contra funcionamento sem água utiliza o nível medido no reservatório inferior: ao identificar valor inferior ao limite mínimo configurado, a lógica bloqueia o acionamento da bomba e registra uma condição de alarme.

A proteção contra transbordamento considera o nível do reservatório superior. Conforme a lógica descrita para o protótipo, quando a medição ultrapassa o setpoint acrescido de cinco pontos percentuais durante mais de três segundos consecutivos, a ação da bomba é interrompida e uma sinalização de alarme é disponibilizada ao sistema supervisório. O limite também deve respeitar a capacidade física do reservatório.

## 3.7 Procedimentos de Ensaio e Validação Experimental

Os ensaios foram realizados em uma única bancada didática, em sequência, com registro dos dados por exportação de históricos do software ScadaBR.

O nível de cada reservatório foi obtido a partir da distância medida pelo sensor HC-SR04, convertida linearmente para a faixa percentual e suavizada por mediana de cinco leituras seguida de filtro exponencial.

Na identificação, aplicou-se ao sistema um comando de PWM em degrau, sem realimentação, e registrou-se a resposta do nível até a estabilização. A curva de reação foi aproximada por um modelo de primeira ordem com tempo morto.

Os ganhos do controlador PID foram calculados pelo método do Controle por Modelo Interno, a partir do modelo identificado, com parâmetro de projeto escolhido para uma resposta conservadora. A parcela derivativa foi mantida nula nos ensaios.

Em malha fechada, foram realizados dois ensaios: alteração da referência de 40% para 45% e rejeição de perturbação, com abertura manual da válvula de saída. A abertura não foi quantificada em vazão.

Para a comparação com o controle liga/desliga, ambas as estratégias tiveram referência de 40%. Foram selecionados recortes de cinco minutos de cada execução, com a válvula de saída mantida constante. Os indicadores foram o erro médio absoluto, a amplitude pico a pico, o desvio-padrão e o número de desligamentos da bomba.

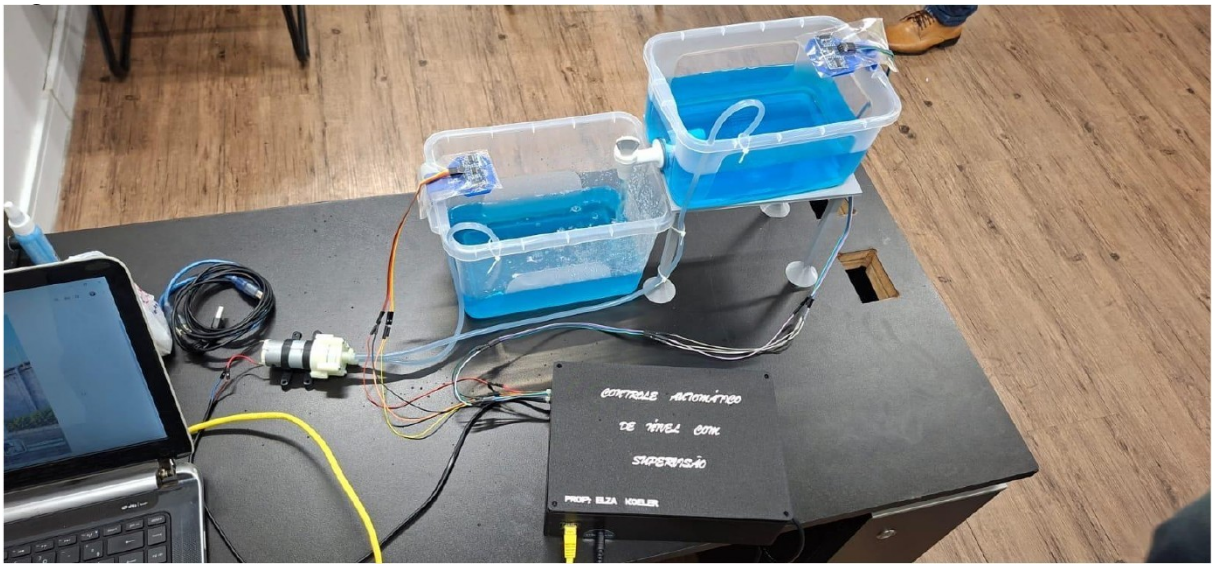
A supervisão foi verificada pela leitura dos registradores Modbus TCP no ScadaBR, com atualização de 1.000 ms. As proteções locais foram avaliadas em dois cenários: funcionamento sem água e transbordamento.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos na bancada didática de controle de nível conforme Figura 6, formada por dois reservatórios, bomba de corrente contínua acionada por modulação por largura de pulso (PWM), microcontrolador Arduino Uno, shield Ethernet W5100, sensores ultrassônicos e supervisório ScadaBR, com comunicação por Modbus TCP.

Os ensaios foram realizados em uma única bancada, em sequência, e não constituem amostragem representativa de instalações industriais. A análise baseia-se nos históricos exportados do ScadaBR e contempla a identificação preliminar da planta, o rastreamento de referência, a rejeição de perturbação, a comparação entre os controles PID e liga/desliga (ON/OFF).

**Figura 6 –** Bancada didática de controle de nível




Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

## 4.1 Identificação Preliminar da Planta e Sintonia do Controlador

A identificação da dinâmica hidráulica foi realizada por ensaio em malha aberta, com alteração do comando PWM da bomba e registro da resposta do nível. A curva de reação foi aproximada por um modelo de primeira ordem com tempo morto (FOPDT), resultando em

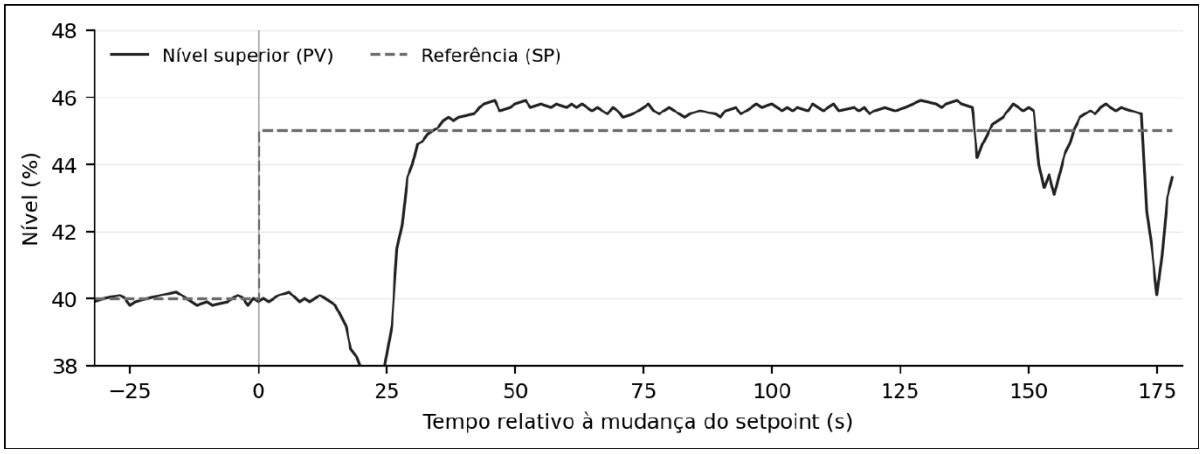
ganho global K ≈ 0,222 ponto percentual por contagem de PWM, constante de tempo τ ≈ 59,9s e tempo morto θ ≈ 5,1s.

Dessa forma, adotou-se a sintonia por Controle Modelo Interno (IMC), com parâmetro de projeto λ=180s, escolhido para uma resposta conservadora. Os ganhos resultantes foram Kp = 1,46, Ki = 0,0243 $s^{-1}$ e Kd = 0, na representação paralela da biblioteca PID_v1. A parcela derivativa foi mantida nula nos ensaios analisados. A escolha privilegiou uma ação integral moderada, com o objetivo de reduzir oscilações.

## 4.2 Rastreamento da referência

No ensaio de rastreamento, a referência do tanque superior foi alterada de 40% para 45%, mantendo-se os ganhos da sintonia IMC. O primeiro valor registrado igual ou superior a 45% ocorreu 35s após a alteração. O maior nível observado foi de 45,9%, o que corresponde a um sobressinal de 0,9 ponto percentual, equivalente a 18% da amplitude do degrau de 5 pontos percentuais mostrados na Figura 7.

**Figura 7 –** Rastreamento de referência de 40% para 45%



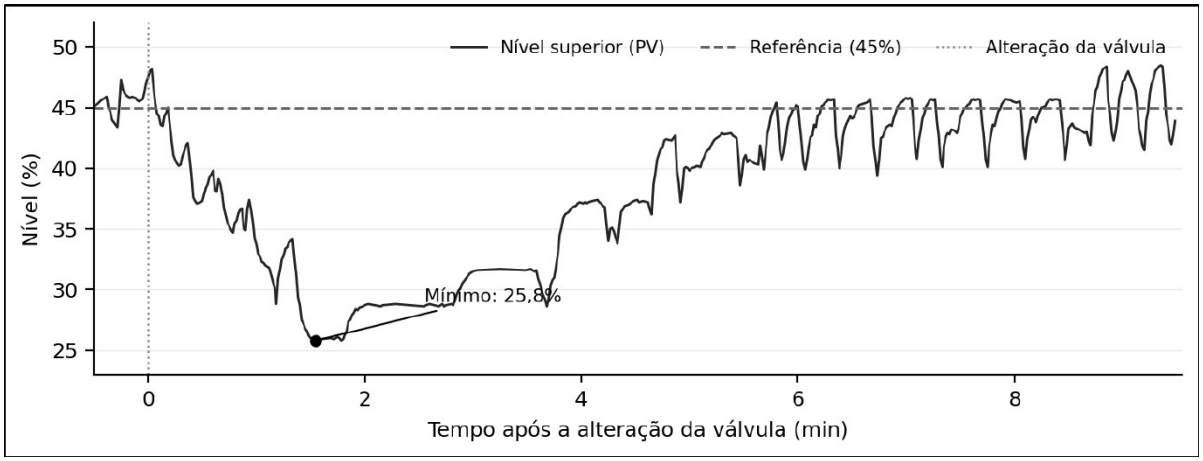

Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos registros exportados do ScadaBR (2026).

## 4.3 Rejeição de perturbação

Para avaliar a rejeição de perturbações, a abertura da válvula de saída foi alterada manualmente, com referência mantida em 45%. O nível mínimo de 25,8% foi registrado 93s após a intervenção, o que corresponde a um afastamento máximo de 19,2 pontos percentuais em relação ao setpoint. A primeira recuperação da referência ocorreu 347s após a perturbação e 254s após o nível mínimo conforme Figura 8.

Durante a recuperação, o comando PWM elevou-se para valores próximos ao limite superior da escala, o que indica elevado esforço de controle para suprir a condição hidráulica estabelecida.

**Figura 8 –** Resposta do nível à alteração da vazão de saída




Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos registros exportados do ScadaBR (2026).

## 4.4 Comparação entre os controles PID e ON/OFF

O controle ON/OFF foi implementado com referência de 40%, histerese de ±2 pontos percentuais e PWM fixo de 200 contagens quando acionado. Dessa forma, a bomba era ligada quando o nível atingia 38% ou menos e desligada quando alcançava 42% ou mais, respeitados os intertravamentos de proteção. Para a comparação, foram selecionados recortes de cinco minutos para o ON/OFF e para o PID. A abertura da válvula de saída foi mantida constante nos dois ensaios.

Adotaram-se como indicadores o erro médio absoluto (EAM), que mede a proximidade entre o nível medido (PV) e a referência (SP), e a amplitude pico a pico e o desvio-padrão, que descrevem a variabilidade do processo conforme demonstrados na Tabela 4.

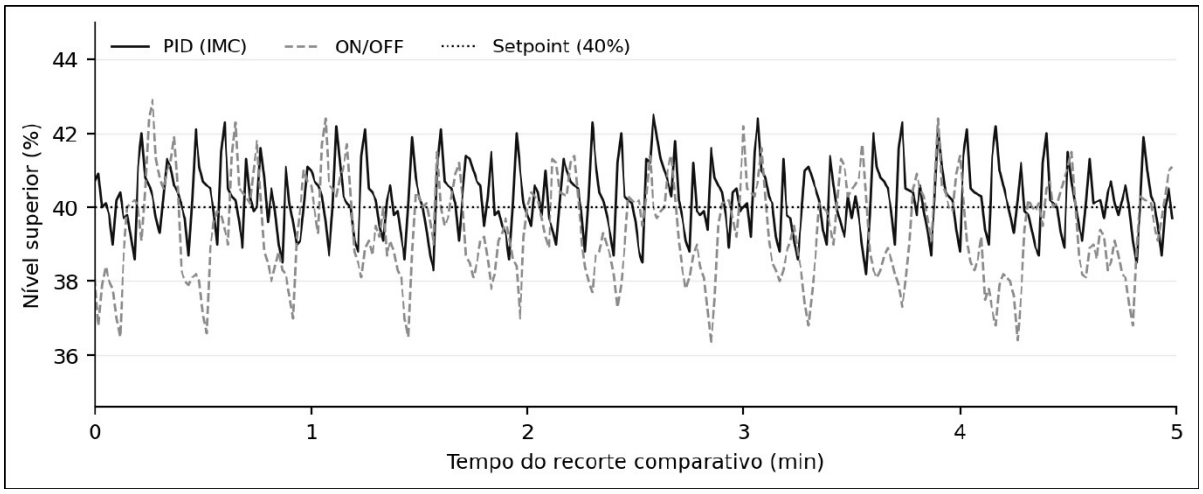
No intervalo considerado, o PID apresentou EAM de 0,75 ponto percentual, inferior aos 1,19 pontos percentuais obtidos com o ON/OFF, o que corresponde a uma redução relativa de aproximadamente 37%. A amplitude pico a pico e o desvio-padrão também foram menores no PID. Esses resultados são coerentes com a característica do acionamento contínuo por PWM, que ajusta a vazão de forma gradual, em contraste com o acionamento de máxima potência ou desligado do ON/OFF, que gera variações mais bruscas do nível conforme podem ser observadas na Figura 9.

**Tabela 4 –** Indicadores experimentais comparativos para recortes de cinco minutos

| Indicador | PID (IMC) | ON/OFF |
|---|---|---|
| Número de amostras de nível | 289 | 285 |
| Nível médio (%) | 40,23 | 39,35 |
| Nível mínimo (%) | 38,2 | 36,3 |
| Nível máximo (%) | 42,5 | 42,9 |
| Amplitude pico a pico (p.p.) | 4,3 | 6,6 |
| Erro médio absoluto (p.p.) | 0,75 | 1,19 |
| Desvio-padrão (p.p.) | 0,92 | 1,31 |
| Transições registradas para bomba desligada | 45 | 11 |

Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos históricos do ScadaBR (2026).

**Figura 9 –** Evolução do nível nos intervalos comparativos PID e ON/OFF

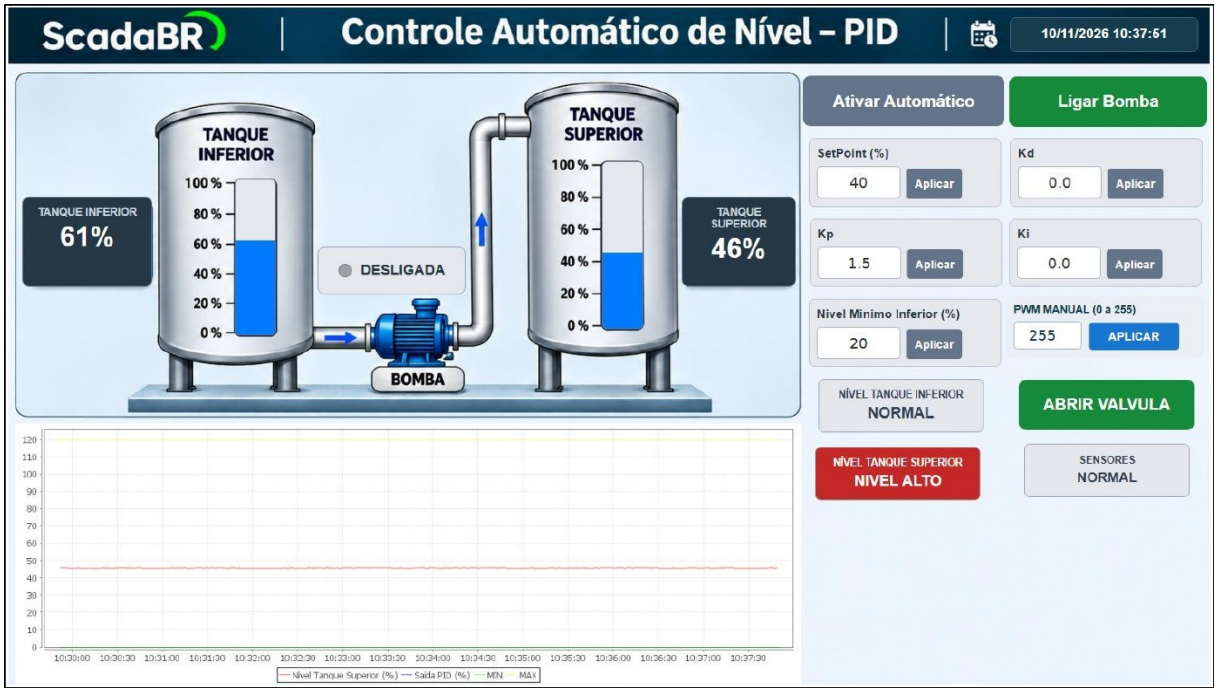



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos registros exportados do ScadaBR (2026).

## 4.5 Lógicas de proteção

As lógicas de proteção foram avaliadas em dois cenários. No primeiro, simulou-se a condição de funcionamento sem água, reduzindo-se o nível do reservatório inferior abaixo do limite mínimo configurado. Nesse caso, a bomba foi desligada e o alarme foi registrado no supervisório. No segundo cenário, simulou-se o transbordamento, com o nível superior ultrapassando o setpoint acrescido de 5 pontos percentuais por mais de três segundos. A bomba foi interrompida, conforme a Figura 10.

**Figura 10 –** Tela Supervisório ScadaBR




Fonte: Elaborado pelos autores a partir do software ScadaBR (2026).

Os resultados demonstram que a lógica executada localmente cumpriu sua função de intertravamento. Destaca-se que essa característica é importante em sistemas industriais, nos quais a segurança do processo não deve depender exclusivamente da comunicação com o supervisório. A separação entre proteção local e supervisão remota está de acordo com a prática recomendada para sistemas de automação, em que as funções de segurança precisam operar de forma autônoma.

## 4.6 Discussão geral e síntese dos resultados

Os experimentos indicam que o controlador PID, com parcela derivativa nula e sintonizado a partir do modelo FOPDT pelo procedimento IMC, acompanha alterações de referência e compensa uma mudança imposta na vazão de saída. No confronto com o controle ON/OFF, o PID apresentou menores indicadores de erro e de dispersão do nível, porém registrou maior frequência de interrupções da bomba. A associação temporal dessas interrupções com a proteção de nível máximo indica que a instrumentação e o diagnóstico devem preceder qualquer nova alteração dos ganhos.

Embora a sintonia por Ziegler-Nichols seja uma alternativa a ser investigada, os resultados apresentados não permitem concluir que sua adoção corrigiria as interrupções observadas. Antes da comparação entre métodos de sintonia, recomenda-se examinar os sinais

bruto e filtrado e o comportamento não linear da bomba na faixa de PWM empregada, que apresenta zona de baixa atuação. Essa não linearidade decorre do limiar de 170 contagens, abaixo do qual o comando é convertido em desligamento completo da bomba.

Em síntese, o protótipo demonstrou capacidade de supervisão remota e de regulação do nível em malha fechada. Os registros permitiram quantificar características relevantes de desempenho e identificar uma limitação operacional, a frequência de interrupções da bomba no PID, que deverá ser investigada em trabalhos futuros. A validação dos intertravamentos de proteção e de eventuais melhorias de instrumentação constitui etapa necessária para consolidar a confiabilidade do controle antes de extrapolar os resultados para aplicações de maior exigência.

# 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema automático de controle de nível em malha fechada, utilizando o microcontrolador Arduino Uno, o algoritmo PID e a comunicação Modbus TCP integrada ao software supervisório ScadaBR. Os resultados experimentais demonstraram a viabilidade da arquitetura proposta para o monitoramento, a regulação e a supervisão remota do nível de reservatórios, permitindo a aquisição de variáveis de processo, o ajuste de parâmetros operacionais e a implementação de intertravamentos de proteção.

A identificação experimental da dinâmica hidráulica possibilitou a obtenção de um modelo aproximado do processo, utilizado como referência para a sintonia do controlador pelo método de Controle por Modelo Interno (IMC). Nos ensaios de rastreamento, o sistema acompanhou a alteração do setpoint de 40% para 45%, apresentando sobressinal de 0,9 ponto percentual. Na avaliação de rejeição de perturbações, verificou-se a capacidade de recuperação do nível após uma alteração na vazão de saída, embora o tempo de recuperação tenha evidenciado limitações na resposta dinâmica do conjunto.

A comparação entre as estratégias PID e liga/desliga (ON/OFF) evidenciou desempenho superior do controlador PID nos indicadores de precisão e estabilidade do nível. O erro médio absoluto foi reduzido de 1,19 para 0,75 ponto percentual, correspondendo a uma melhoria aproximada de 37%. A amplitude de oscilação também apresentou redução, passando de 6,6 para 4,3 pontos percentuais. Entretanto, observou-se maior frequência de interrupções da bomba durante a operação com PID, indicando a necessidade de investigar a

influência das medições dos sensores, das condições de acionamento e das lógicas de proteção sobre o comportamento do sistema.

Os testes dos intertravamentos demonstraram o funcionamento das proteções contra operação sem água no reservatório inferior e excesso de nível no reservatório superior. A execução dessas lógicas diretamente no microcontrolador constitui uma característica importante da arquitetura, pois permite que as ações de proteção sejam realizadas independentemente da disponibilidade da comunicação com o supervisório.

Conclui-se que os objetivos propostos foram atendidos no âmbito da bancada experimental, demonstrando a aplicação integrada de instrumentação, controle automático e comunicação industrial. Entretanto, os resultados estão limitados às condições dos ensaios realizados e não permitem generalização direta para instalações industriais. Como possibilidades de trabalhos futuros, recomendam-se o aperfeiçoamento da calibração e filtragem das medições ultrassônicas, a investigação das interrupções da bomba, a avaliação de diferentes estratégias de sintonia e a realização de ensaios adicionais para verificar a robustez e a confiabilidade operacional do sistema.

## REFERÊNCIAS


ANGGARA, B. P.; MA'ARIF, A.; ABU, N. S. Design of a liquid tank filling control system using PID. **Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro**, v. 5, n. 3, p. 367-375, 2023. DOI: https://doi.org/10.12928/biste.v5i3.8915.

ARAUJO OCHOA, S. I. *et al.* Development of a protocol converter from SMA data to Modbus TCP for SCADA integration. **Revista Tecnológica ESPOL**, v. 37, n. E1, p. 12-24, 2025. DOI: https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1360.

BUWARDA, S. *et al.* Design and implementation of a mini plant water level controller using PID with LabVIEW integration and Arduino Uno. **Inspiration: Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi**, v. 15, n. 1, p. 26-36, 2025. DOI: https://doi.org/10.35585/inspir.v15i1.87.

GOMES, V. M.; MINHONI, D. C. R. Análise comparativa de eficiência energética entre um sistema de bombeamento de recalque em linha com controle PID e um sistema liga/desliga tradicional. **Revista FT**, n. 128, 2023. Disponível em: https://revistaft.com.br/analise-comparativa-de-eficiencia-energetica-entre-um-sistema-de-bombeamento-de-recalque-em-linha-com-controle-pid-e-um-sistema-liga-desliga-tradicional/. Acesso em: 12 out. 2026.

NASCIMENTO, J. F. do; CICHACZEWSKI, E. Internet das coisas (IoT) aplicada ao monitoramento do nível de água em reservatórios domésticos. **Caderno Progressus**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 34-48, 2021.

NIKOLAJEW, C.; EICHELBERGER, H. Industry 4.0 connectors: a performance experiment with Modbus/TCP. **arXiv**, arXiv:2410.15813, 2024. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2410.15813. Acesso em: 12 out. 2026.

PONCIANO, I. de M. *et al.* An open-source and low-cost data acquisition system for surface water monitoring: analysis of measurement uncertainty. **Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 23, p. 1-17, 2025. DOI: https://doi.org/10.28998/rca.23.17805.

SILVA, P. L. da *et al.* Implementação de um controle PID para estabilização de nível em tanques de água. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 17, n. 1, p. 1-11, 2025. Disponível em: https://revistas.uepg.br/index.php/ret/es/article/view/24715. Acesso em: 12 out. 2026.

SILVA, V. B. da *et al.* Implementação de sistema de instrumentação e controle em um protótipo de torre de resfriamento com plataforma Arduino. **Revista Interdisciplinar Cajuína**, v. 11, n. 6, e2996, 2026. DOI: https://doi.org/10.52641/cadcajv11i6.2996.

SOUZA, J. J. de; MASSAGRANDE, J. C. S.; ROSA JUNIOR, O. Análise de diferentes setpoints e seu impacto na auto-sintonia em um controlador PID usando um CLP Siemens SIMATIC S7-1500. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 25, n. 1, e-5332, 2025. DOI: https://doi.org/10.14488/1676-1901.v25i1.5332.

SPOHN, M. A.; CHABATURA NETO, F.; FASSINI, L. T. Uma avaliação do sistema operacional FreeRTOS na plataforma Arduino Uno. **Revista de Sistemas e Computação**, Salvador, v. 9, n. 2, p. 252-263, 2019. Disponível em: https://revistas.unifacs.br/index.php/rsc/article/view/6016. Acesso em: 12 out. 2026.

# APÊNDICE A — DIAGRAMA DE INTERLIGAÇÃO ELÉTRICA DO PROTÓTIPO

Este apêndice apresenta o diagrama de interligação dos componentes utilizados na bancada experimental de controle de nível, incluindo o Arduino Uno, os sensores ultrassônicos, o módulo MOSFET e a interface Ethernet W5100.

