



Análise comparativa de controladores aplicados ao controle de nível em planta didática

Bruno Spinelli Cava

bruno.cava@aluno.ifsp.edu.br

Graduando em Engenharia de Controle e Automação
Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Salto, SP, Brasil

José William Rodrigues Pereira

jose.pereira@ifsp.edu.br

Professor Orientador
Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Salto, SP, Brasil

D.O.I.:

RESUMO: Na indústria, o sistema de controle de nível é um dos mais comuns e relevantes, assim como sua presença no aspecto didático do controle de processos. Diversos são os controladores possíveis de efetuar um adequado ajuste em malhas de controle de nível, e compreender, implementar e comparar os diversos modelos é essencial para a formação técnica do profissional de engenharia de controle. O objetivo deste trabalho é implementar controladores em uma planta didática de nível, porém sem dados prévios, para criar um ambiente de aplicação dos conceitos de controle *On/Off*, Proporcional e Proporcional-Integrador, estudados conceitualmente, replicando uma situação mais próxima de um ambiente real de trabalho. Para atingir o objetivo, avaliar uma arquitetura de controle, escolhendo dispositivos e se adaptar aos elementos já presentes na planta de teste foi necessário, assim como planejar e implementar os controladores e elaborar um teste que permita a comparação dos resultados, proporcionando uma vivência da tomada de decisão do desenvolvedor de sistemas de automação e controle. Uma visão ampla do processo e dos resultados, permitiu avaliar os resultados dos controladores e as possíveis melhorias e caminhos para a aquisição de competências na área de controle de processos industriais.

PALAVRAS-CHAVE: Automação Industrial. Ziegler-Nichols. PWM. Histerese. Sintonia de Malhas.

Comparative analysis of controllers applied to level control in a didactic plant

ABSTRACT: In industry, level control systems are among the most common and relevant, as is their presence in the didactic aspect of process control. Several controllers are possible for making adequate adjustments in level control loops, and

understanding, implementing, and comparing the various models is essential for the technical training of control engineering professionals. The objective of this work is to implement controllers in a didactic level plant, but without prior data, to create an application environment for the concepts of On/Off, Proportional, and Proportional-Integrator control, studied conceptually, replicating a situation closer to a real work environment. To achieve this objective, it was necessary to evaluate a control architecture, choosing devices and adapting them to the elements already present in the test plant, as well as planning and implementing the controllers and developing a test that allows for the comparison of results, providing experience in the decision-making process of an automation and control systems developer. A broad view of the process and results allowed for the evaluation of the controllers' performance and possible improvements and paths for acquiring competencies in the area of industrial process control.

KEYWORDS: Industrial Automation. Ziegler-Nichols. PWM. Hysteresis. Loop Tuning.

INTRODUÇÃO

Uma planta de nível industrial é um sistema físico no qual tem como princípio controlar o nível de um tanque reservatório, majoritariamente para líquidos, de modo que o volume deste líquido se mantenha constante e alimente o processo a qual ele pertence de maneira uniforme, como em sistemas de dosagem por ação gravimétrica, em que a vazão é extremamente importante na composição de misturas de medicamentos, bebidas, ou outros processos, principalmente químicos.

As plantas de nível industrial têm em comum uma tubulação de entrada, o reservatório, uma tubulação de saída e ambas as tubulações possuem uma bomba ou uma válvula para o controle do nível no reservatório, dando a vazão necessária conforme o uso. Os tanques nessas plantas de nível, possuem formatos diversos, desde esféricos, cilíndricos verticais com base reta, cônica ou em formato “U” e até retangulares. A variedade deles se dá para o tipo de uso do reservatório, para líquidos com maior viscosidade, pequenos grãos e pós diversos, geralmente são empregados os de base cônica para facilitar o escoamento dos materiais e impedindo a formação de sedimentos no fundo do tanque, para gases a vantagem do esférico é pela distribuição uniforme da pressão interna, mas também são encontrados tanques

cilíndricos horizontais para transportes. Para líquidos de baixa viscosidade, são muito utilizados tanques retangulares, onde seu escoamento tende a ter maior uniformidade.

Os tanques são encontrados em diversos materiais, sendo o aço inox amplamente utilizado por conta da sua versatilidade, durabilidade e resistência à corrosão, assim, a manutenção não é algo constante em tanques deste tipo. Outro material também utilizado é o plástico reforçado, comum em caixas d'água residenciais, da mesma forma que o inox, não enferruja, mas é de fácil acesso em vista do custo e não exige manutenções complexas. Há também tanques em polietileno, que são utilizados para químicos corrosivos e possuem alta resistência a impactos.

Esses reservatórios possuíam o controle de volume ou do seu nível através de acionamentos manuais, avançando para controladores eletromecânicos até chegar nos controladores eletrônicos com sistemas mais robustos e complexos para realizar essa tarefa. Junto ao avanço tecnológico nas últimas décadas, houve um aumento significativo na diversidade de controladores disponíveis para aplicações industriais. Desde os primeiros controladores que abriam e fechavam a entrada e saída do reservatório de forma rudimentar, ocasionando desperdícios se o tempo de resposta fosse demorado ou tardio. Com o desenvolvendo progressivo de novas tecnologias, existem hoje desde controladores clássicos, como os controladores liga-desliga (*On/Off*), controladores proporcionais e proporcionais-integrativos, até métodos mais avançados, como controladores baseados em lógica *fuzzy*, controladores preditivos ou outras técnicas de controle inteligente. Esse avanço tecnológico, embora traga benefícios em termos de precisão e desempenho, também pode dificultar a escolha do controlador mais adequado para uma determinada aplicação, especialmente quando diferentes soluções apresentam características e níveis de complexidade distintos. Atualmente, é possível utilizar de diversas formas de controle para estabilizar os parâmetros do líquido dentro do tanque, sejam eles, volume, pressão, temperatura e outras variáveis que possam ser úteis de acordo com a aplicação do líquido do reservatório, como por exemplo acidez em uma empresa de saneamento ou até a viscosidade para as petroquímicas. Os processos de medição se tornaram parametrizados quando o volume ou a altura da coluna de líquido do reservatório é a variável desejada a ser controlada.

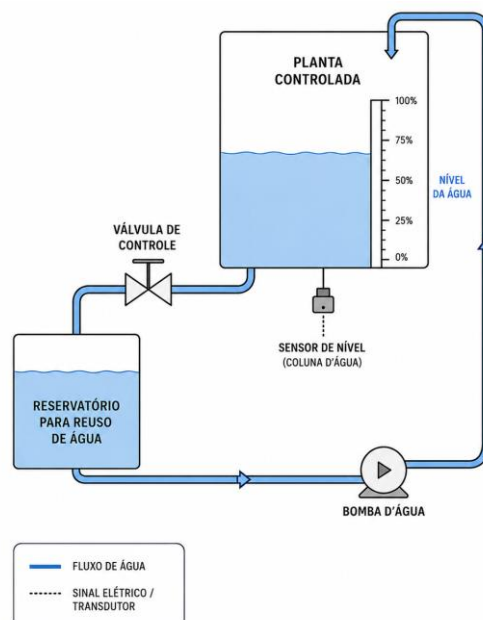
O objetivo deste trabalho é apresentar a aquisição de dados de uma planta de nível didática real, comparar os resultados da implementação de controladores com

valores simulados desta mesma planta. Durante o processo, abordar aspectos de metrologia nas repetidas medições a fim de minimizar erros de repetibilidade. Trabalhar o aspecto comparativo no que se refere às estratégias de implementação de controladores, aspecto valioso na formação do senso crítico para uma abordagem ampla de ferramentas de resolução de problemas na indústria. Com a execução da aquisição de dados, implementação de controladores, execução de simulações e análises comparativas, pretende-se gerar uma capacidade crítica de elaboração e uso de ferramentas do projeto, visão sistêmica no tratamento dos dados e tomada de decisão.

A PLANTA DE NÍVEL

A planta de nível é composta por dois reservatórios deslocados verticalmente um do outro, onde no reservatório superior é realizado o controle do nível e o reservatório inferior tem a função de armazenamento para reuso da água. Do reservatório superior para o inferior há uma tubulação com um registro, válvula de controle, manual, e para a elevação uma bomba d'água é acionada, transferindo o líquido para encher o reservatório superior. A Figura 1 mostra de forma ilustrativa a planta de nível.

Figura 1 — Planta de nível

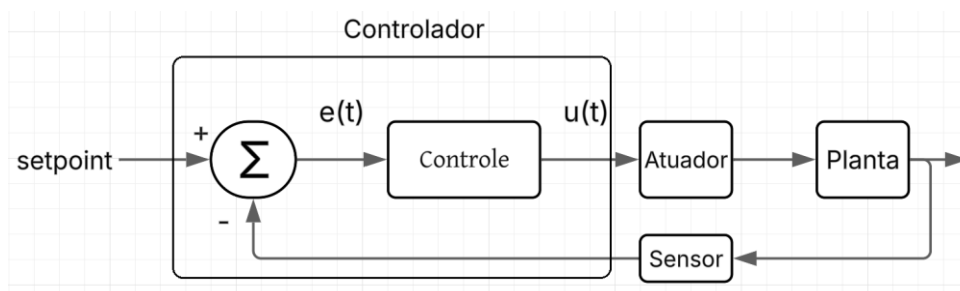


Fonte: autor (2026)

OS CONTROLADORES

O controle de processo pode ser realizado em sistemas de malha aberta ou fechada, sendo que o segundo possui um sensor que mensura o valor da variável controlada e seu sinal realimenta o controlador, que realiza sucessivas correções até atingir o valor desejado. Neste trabalho são abordados apenas sistemas de malha fechada conforme o diagrama de blocos da Figura 2.

Figura 2 — Controlador de malha fechada genérico



Fonte: autor (2026)

Em sistemas de controle, os controladores são os responsáveis por tomar as ações de controle mediante variáveis de entrada e um conjunto de regras bem estabelecidas, sendo os mais comuns por ação de Liga/Desliga e PID.

CONTROLADOR ON-OFF

O controlador do tipo *On/Off*, ou Liga/Desliga, é o tipo mais simples de controle que podemos realizar, e possui como ação de controle uma saída binária, que pode estar ligada ou desligada, não havendo estado intermediário.

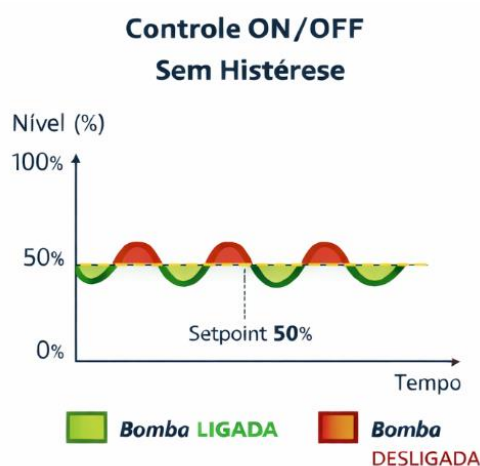
O controlador *On/Off* se baseia na comparação de duas entradas para executar o comando de liga ou desliga. Uma das entradas é o valor desejado (*setpoint*) e a outra é o valor lido por um sensor, chaveando o atuador de saída para executar o comando de liga e desliga, até que a variável que se está controlando possua o valor desejado (AMARAL, 2023).

Para controlarmos a vazão de entrada em um tanque, a saída liga quando o nível medido pelo sensor estiver abaixo do (*setpoint*), fazendo o reservatório encher. Quando o nível atinge o valor igual ou superior ao (*setpoint*) ele desativa a saída. Se a saída do reservatório não estiver fechada, que é o mais comum, rapidamente o nível fica abaixo do valor alvo, o que força novamente o acionamento da saída do

controlador, gerando assim um ciclo muito rápido de liga e desliga no dispositivo de acionamento, causando estresse mecânico dos componentes como contadores, que são costumeiramente usados como o ponto de chaveamento entre o controlador e a bomba que alimenta a entrada do sistema (LEITE; DRASZEWSKI; ABAIDE, 2019).

Para reduzir esse desgaste intenso dos elementos de chaveamento, é aplicada uma histerese no conjunto de regras do controlador, que é uma faixa do qual o reservatório pode atuar que o sistema não será acionado ou desacionado. As Figuras 3 e 4 mostram a diferença entre o controlador sem histerese (*setpoint* de 50%) e com histerese (*setpoint* em 50% limiares 45% e 55%).

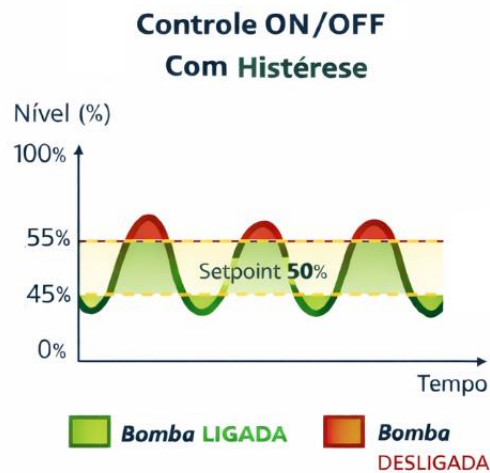
Figura 3 — controlador *On/Off*



Fonte: autor (2026)

O (*setpoint*) foi definido para 50% do nível do reservatório, com a histerese podemos assumir faixas limiares de +/- 10%, sendo o limiar inferior de 45% o superior de 55% do nível do tanque. Fazendo assim com que ao reduzir dos 45%, acione o sistema e o mantenha-o acionado até chegar aos 55%.

Figura 4 — controlador *On/Off* com histerese



Fonte: autor (2026)

Assumindo que um sistema de controle de nível possui variação lenta no nível, o controlador *On/Off* com Histerese trabalha com um estresse mecânico muito inferior nos equipamentos como relés ou bombas quando comparado ao *On/Off* tradicional, sendo este inviável para ser implementado principalmente com chaveadores eletromecânicos, e aquele usado tipicamente nas implementações.

CONTROLADOR PID

O controlador PID é amplamente utilizado em sistemas de controle industrial devido à sua simplicidade de implementação e eficiência. A equação típica que representa um sistema PID é:

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

Onde:

$u(t)$: Sinal de controle

$e(t)$: Erro

K_p : Ganho proporcional

K_i : Ganho integral

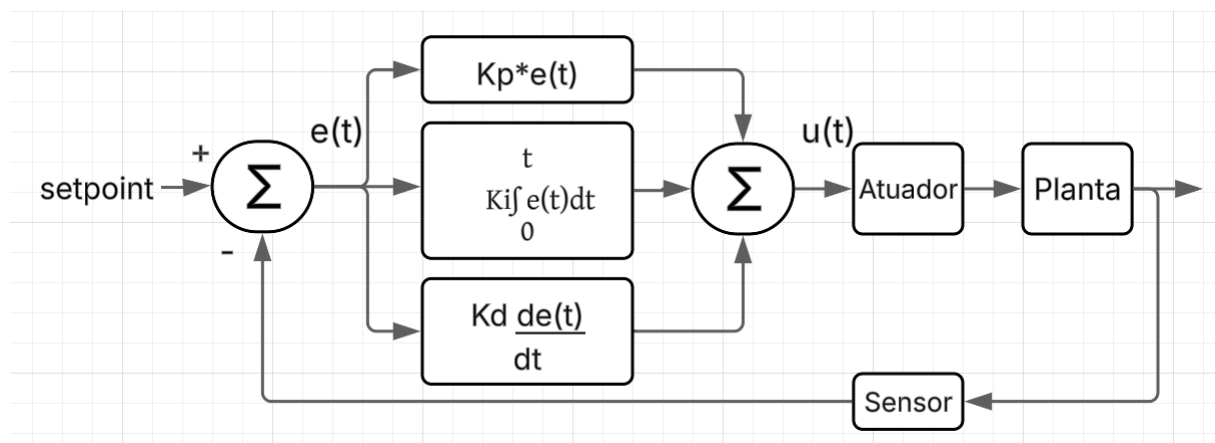
K_d : Ganho derivativo

Para uma aplicação cuja planta é o sistema de controle de nível, temos o sensor de nível que mede a coluna d'água e o enchimento é realizado por uma bomba com um acionamento do tipo PWM (*Pulse Width Modulator*).

O controlador PID, como apresentado na Figura 5, para correta aplicação de suas regras mediante uma planta específica, deve ser ajustado através dos parâmetros K_p , K_i e K_d :

- K_p : é o valor do ganho proporcional do controlador, o principal reagente ao erro atual, aumentando a velocidade de resposta do controlador.
- K_i : é o termo do ganho integral da base de controle, onde é eliminado o erro em regime permanente porém acumula erros ao decorrer do tempo, se não for bem ajustado o controlador pode não funcionar da maneira desejada.
- K_d : é o ganho derivativo, responsável por reagir às variações da variável controlada, tendo ótima funcionalidade a fim de alcançar o setpoint com maior velocidade. Porém, caso este ganho não esteja bem ajustado pode gerar um sobre sinal (*overshoot*) muito grande e, em casos extremos, produzir muita instabilidade por uma compensação muito elevada do sistema.

Figura 5 — Diagrama de blocos do controlador PID



Fonte: autor (2026)

CONTROLADOR PI

A retirada da componente derivativa do PID, produzindo um controlador PI, pode ser interessante na medida em que o controlador é simplificado devido a não necessidade de ajustes à mudanças bruscas, como é o caso de sistemas de controle

de nível, em que a variável controlada muda seu valor de forma bem lenta (ALMEIDA, 2024).

Este controlador é menos complexo de se empregar. Um ótimo exemplo de aplicação onde a oscilação natural não teria impacto significativo no processo é no aquecimento de um forno industrial, onde o controlador funciona na atuação de manter determinada temperatura no forno, ajustando a alimentação para as resistências do forno. Naturalmente o forno perde calor para o ambiente, com isso o PID seria empregado de forma muito similar ao PI, uma vez que não há mudanças bruscas na temperatura do processo de exemplo.

AQUISIÇÃO DOS DADOS DA PLANTA DE NÍVEL

A aquisição de dados da planta é uma fase muito importante para o desenvolvimento do sistema de controle, e a etapa inicial geralmente é a modelagem do sistema controlado, com aquisição de grandezas físicas envolvidas no processo.

Para chegar no valor da vazão do tanque, foi utilizado a fórmula da vazão volumétrica que é definida como o volume derivado ao longo do tempo (MELO, 2007) e (BANSAL, 2005):

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Onde:

dV: Derivada da vazão no tempo

Considerando que o tanque tem seção transversal constante, podemos assumir que:

$$V = A * h \quad (3)$$

Onde:

V: Volume

A: Área

h: Altura

Fazendo manipulações algébricas derivativas temos a expressão:

$$Q = A * \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

Onde:

A: Área

dh: Derivada da altura no tempo

A medição do tempo de vazão foi calculada medindo o tempo entre cada centímetro, logo a taxa de variação 'dh' será a própria área do tanque em relação ao tempo, relacionando diretamente a vazão com a taxa de variação do nível (altura). Onde foi possível estimar a vazão média de entrada do tanque em 9,44 segundos, sendo esse valor aproximadamente constante por ser a bomba ligada de forma ininterrupta, já a vazão de saída teve uma média de 9,19 segundos, tendo apenas uma válvula aberta, a vazão de saída tende a ser maior quando o tanque está cheio e menor quando está quase vazio, pelo fator da pressão da água. Com isso podemos estimar os valores de vazão conforme as medições realizadas.

MATERIAIS

A planta de nível utilizada para o desenvolvimento deste trabalho possui aproximadamente 245 mm de largura, 208 mm de comprimento e de altura entre 450 a 500 mm. O armazenamento da saída de água no tanque superior no tanque inferior garante que sempre haja líquido disponível para ser bombeado ao nível superior, impedindo a queima da bomba e gerando o sistema de controle contínuo para o tanque da malha de controle.

Para a vazão de entrada temos uma mangueira de Poliuretano de (6 mm) conectando a saída do reservatório inferior até a bomba e da bomba para o reservatório superior, que é a entrada do líquido na planta de nível.

Para a vazão de saída temos por uma tubulação de ½" (meia polegada) com uma válvula esférica saindo do tanque superior (tanque de controle) e entrando no tanque de armazenamento da água.

O sensor de nível mede a coluna de água pela diferença de pressão entre dois pontos, ambas partes estão localizadas na parte superior do sensor, na porta 1 do sensor, é a pressão positiva que está ligada ao tanque e a porta 2 tem a medição feita pelo vácuo interno, gerando os dados da leitura que é enviado pelo pino 1 na parte inferior do sensor, os pinos 2 e 3 são para energizar o sensor, GND e VCC respectivamente. As Figuras 6 mostram como o sensor está instalado na parte inferior da planta de nível.

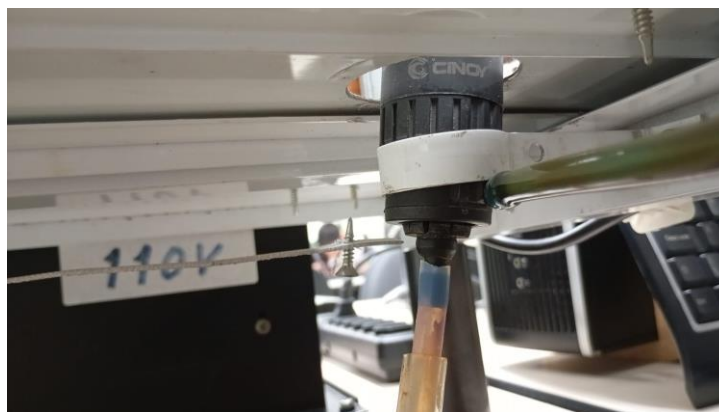
Figura 6 — Conexão do sensor na parte inferior da planta



Fonte: autor (2026)

O atuador responsável por bombear a água do reservatório inferior ao superior é uma bomba de aplicação em aquário, adaptada para uso na planta de nível, como ilustrado na Figura 7.

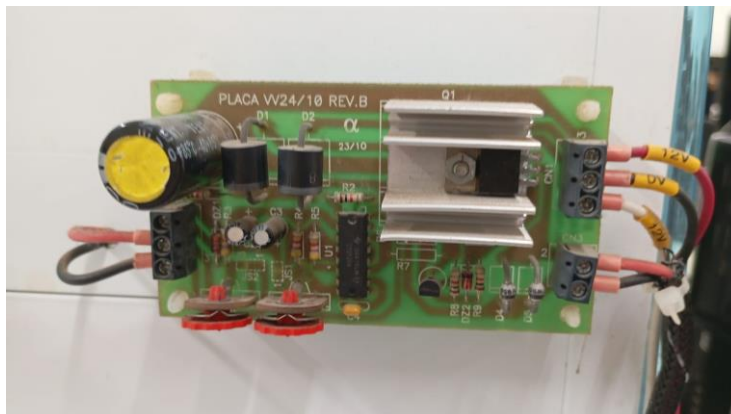
Figura 7 — Bomba de água conectada no sistema da planta de nível



Fonte: autor (2026)

Para o acionamento preciso da bomba, foi utilizado um drive PWM para modular a tensão aplicada à bomba, que produz um acionamento controlado no fluxo de água transportado para o reservatório superior. A Figura 8 mostra o circuito que recebe o sinal de controle e produz alimentação de potência para a bomba.

Figura 8 — Placa de driver para energizar a bomba com o PWM



Fonte: autor (2026)

Como controlador na planta de nível, foi utilizado o kit Training box Duo TB131 onde o PLC Altus DUO é o responsável por ler os dados no sensor e enviar comandos de atuação mediante as regras de controle programadas.

O sistema utilizado para a aquisição de dados foi o ScadaBR, software de código aberto voltado para automação, aquisição de dados e controle supervisão (SCADA). Com este sistema é possível criar uma interface com o controlador realizando o monitoramento e supervisão do processo via rede com protocolo Modbus.

MÉTODOS

A execução deste trabalho foi realizada com uma abordagem simplificada do ponto de vista da aplicação do embasamento teórico matemático, porém com aplicação conceitual desenvolvida ao longo do curso de engenharia, testando conceitos de forma prática e elucidando aspectos teóricos agora aplicados em um sistema físico.

Com a liberação de uso da planta de nível disponível no laboratório de Controle de Processos, foi definido o controlador utilizado para realizar o trabalho. A escolha do PLC se deu devido a familiaridade de uso, por ter sido empregado nas disciplinas de PLC e Redes Industriais e Sistemas Supervisórios, assim como o uso do ScadaBr como ferramenta de aquisição de dados e exibição dos gráficos.

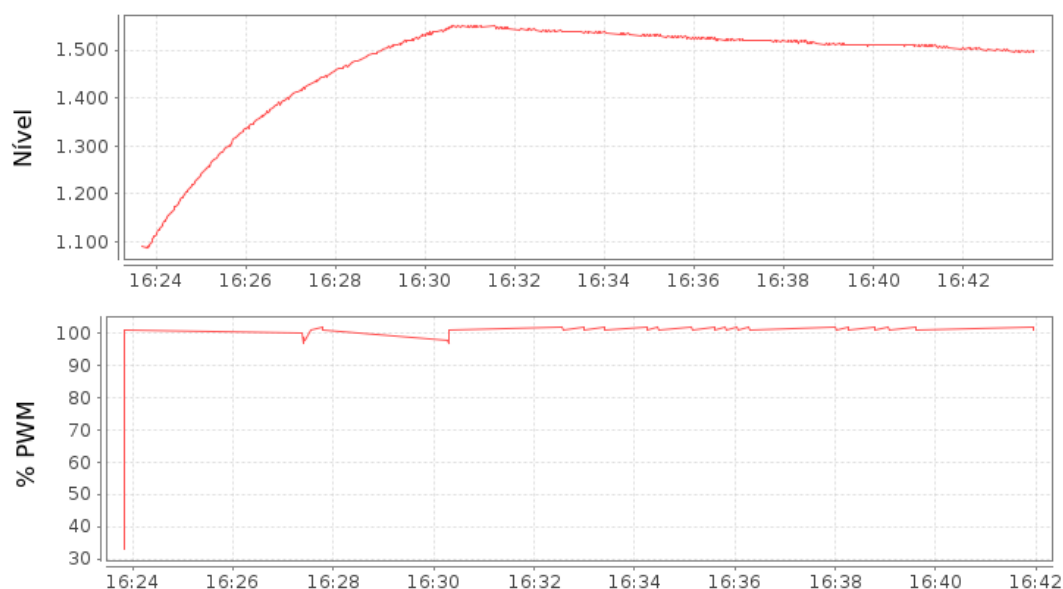
Após o sistema definido, foi o momento de fazer as conexões e realizar testes de funcionamento, do sensor e da bomba d'água, assim como as conexões do PLC com o sistema supervisor.

Com a etapa de testes da infraestrutura realizada, foi o momento de realizar a identificação dos parâmetros de controle da planta. A pergunta inicial era: Qual é o intervalo, altura da coluna d'água, útil para realização do controle nesta planta? Sabemos que se a geometria do reservatório for alterada ou o elemento de acionamento, a bomba, que realiza o enchimento do tanque, forem alterados, o intervalo útil para realizar o controle é alterado também.

Para verificar o ponto de equilíbrio estático do sistema, foi realizado um programa de teste no PLC que copiava uma entrada analógica disponível via potenciômetro para a saída de referência do PWM que aciona a bomba.

Com o reservatório vazio, a vazão de saída liberada ao máximo, foi acionada a vazão de entrada também ao máximo. Inicialmente a entrada ganha da saída, mas após algum tempo há o equilíbrio, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 — Equilíbrio estático do nível no reservatório



Fonte: Autor (2026)

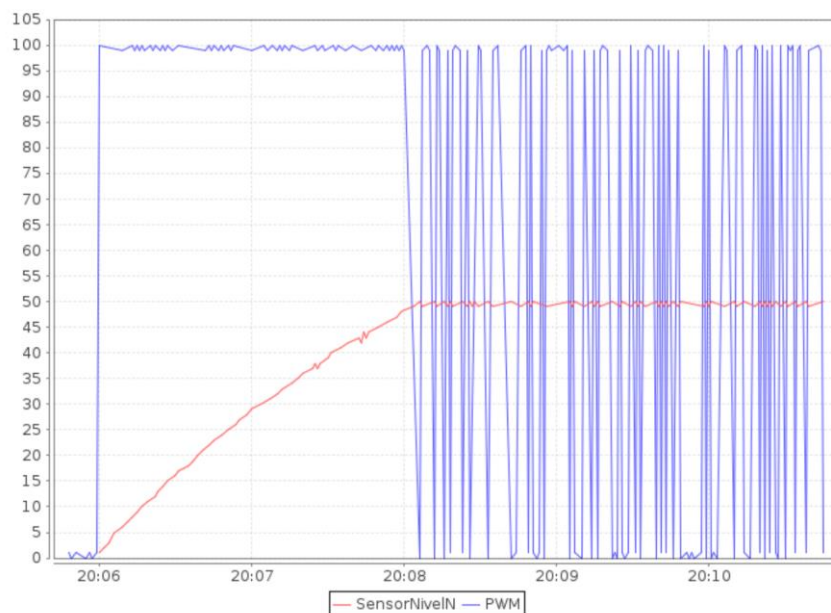
Após o nível alcançar o valor máximo, ele cai suavemente, mesmo não havendo alteração do estímulo de entrada. A hipótese levantada mais plausível que

chegamos foi de que a bomba, devido a desgastes por tempo de uso, apresenta queda de rendimento ao chegar no seu limite de esforço.

Como normalização dos dados, foram usados os valores lidos pelo sensor de nível quando o tanque apresentou este regime estacionário como sendo 100% e a liberação total do líquido como sendo o 0%. Desta forma tanto para a variável de entrada quanto para a variável de saída da planta, foi usada a escala de 0 a 100%.

No primeiro teste com controlador, foi utilizado o modelo *On/Off* sem histerese com um (*setpoint*) em 50% da escala de nível, obtida anteriormente. O sensor de nível realiza a leitura a cada 1 segundo e o controlador ajusta a saída PWM para 0% ou 100%, equivalente ao estado *OFF* e ao *ON*, respectivamente. É possível visualizar na Figura 10 o funcionamento excessivo de liga e desliga gerado nas linhas azuis verticais. Com isso podemos ver que para o nosso uso, o *On/Off* consegue estabilizar a planta no nível desejado, porém com um chaveamento excessivo no elemento atuador.

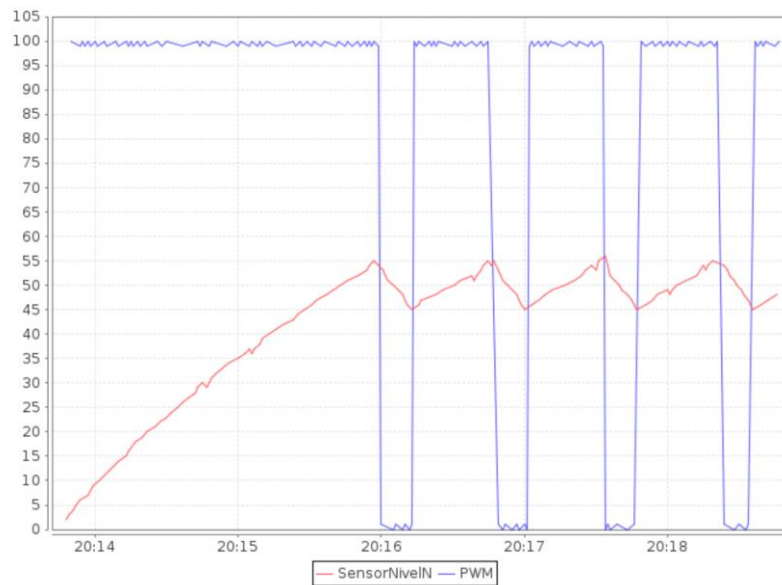
Figura 10 — Leitura controle *On/Off* sem histerese, sensor de nível e PWM



Fonte: autor (2026)

Em seguida, ao controlador *On/Off* foi implementada a histerese de $\pm 10\%$, para um (*setpoint*) em 50% no nível total da planta. Agora vemos, na Figura 11, que o nível lido oscila entre os limiares estabelecidos, 45% e 55%. Também é possível ver os pontos de liga e desliga da bomba, agora com uma frequência muito menor que o controlador *On/Off* sem histerese.

Figura 11 — Leitura controle *On/Off* com histerese, sensor de nível e PWM



Fonte: autor (2026)

Os valores de limiares foram escolhidos de forma genérica em torno de $\pm 10\%$ do setpoint, porém, podem ser definidos intervalos menores ou maiores, ou ainda valores assimétricos, a depender da necessidade apresentada pelo sistema controlado.

Agora partindo para uma outra classe de controladores, o PID, optou-se por uma abordagem parcial e incremental, em que foi implementado apenas o aspecto proporcional e em seguida adicionado o integrador.

Para obtenção dos parâmetros iniciais do PID, foi considerado que o sistema é de primeira ordem, como se assemelha na Figura 9, e foi utilizado o método de Ziegler-Nichols na figura 12 para determinação dos valores iniciais aproximados dos coeficientes K_p , K_i e K_d .

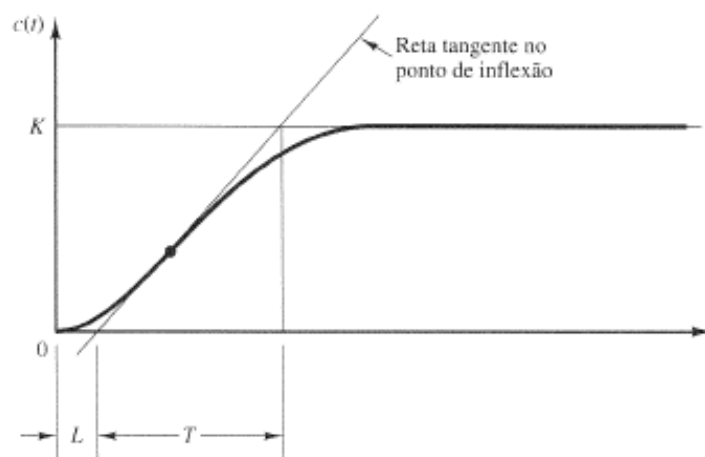
Figura 12 — Equilíbrio estático do nível com método de Ziegler-Nichols aplicado



Fonte: autor (2026)

Com o método aplicado na figura, temos três valores distintos para o K_p , K_i e K_d em cada controlador. Mas para ser possível calcular os valores, precisamos extrair os tempos da nossa curva de acordo com a Figura 13. Onde temos: “o tempo de retardo L e a constante de tempo T . O tempo de retardo e a constante de tempo podem ser determinados traçando-se uma reta à curva tangente em forma de S no ponto de inflexão e determinando-se as intersecções com o eixo dos tempos e com a reta $c(t)=K$ ” (OGATA, 2010)

Figura 13 — Curva de resposta em forma de S



Fonte: OGATA (2010)

Com os valores de L e T conseguimos estipular um ganho aproximado para nossa planta. Transformando a linha do tempo da Figura 13 em segundos, temos a parte morta (L) do tanque em aproximadamente 25 segundos e a constante de tempo (T) em aproximadamente 130 segundos. aplicando a fórmula como mostra a Tabela 1, temos para o controlador proporcional um ganho (K_p) de 5,2 com a divisão de T/L . Para o controlador PI temos o K_p de 4,68 e para o PID nosso K_p é 6,24.

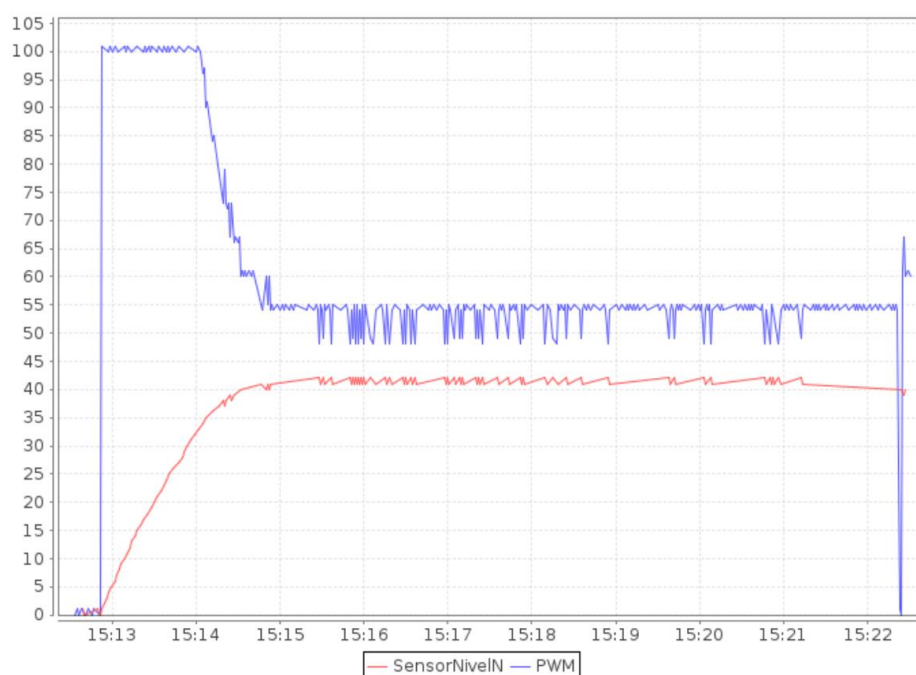
Tabela 1 — Cálculo para encontrar Kp, Ki e Kd segundo Ziegler-Nichols

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: OGATA (2010)

Para melhor adequamento do controlador com o coeficiente, foi utilizado um $K_p = 5$, enquanto os demais, ainda não implementados, mantiveram os valores em zero. A Figura 14 mostra o resultado obtido do controlador proporcional.

Figura 14 — Leitura do sensor de nível e PWM com o controle proporcional.



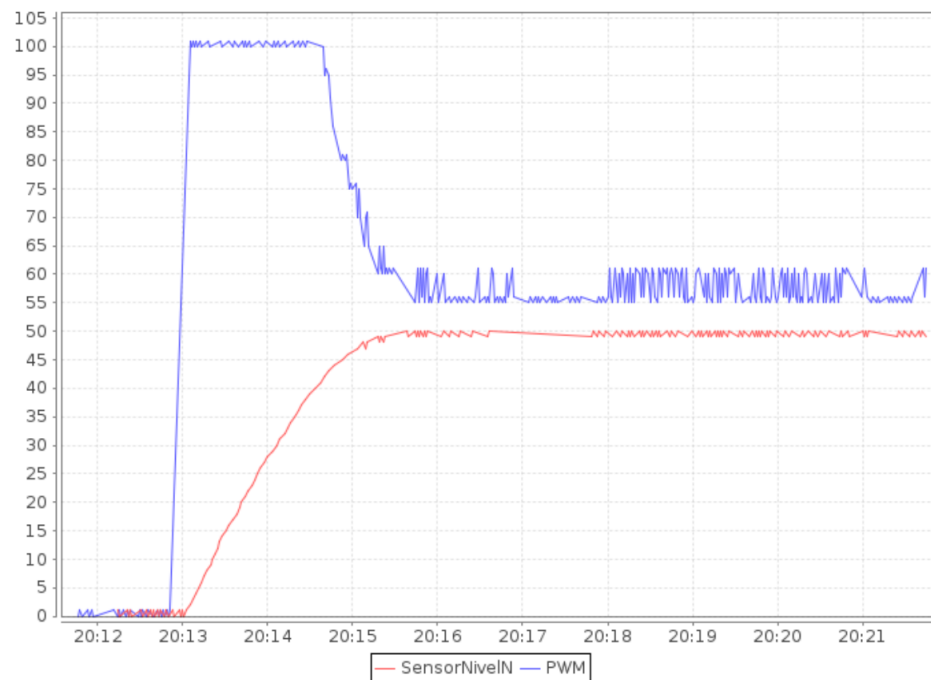
Fonte: autor (2026)

Nota-se que ele gera uma boa aproximação em relação ao (*setpoint*), porém deixa um erro de regime estacionário considerável.

Adicionando ao controlador a componente integral, mantivemos o valor de K_p e implementamos o termo integrador, responsável por anular o erro de regime estacionário, conforme Ziegler-Nichols, e por limitações de bits de memória do PLC, foi necessário reduzir a escala de tempo de L para microssegundos 0,0025. Agora,

dividindo L por 0,3 temos $K_i = 0,008333...$, onde, como apresentado na Figura 15, ajustamos seu coeficiente K_i para 0,01 para visualizar a diferença entre o proporcional puro e o integrador somado ao controle.

Figura 15 — Leituras com o controlador PI, sensor de nível e PWM



Fonte: autor (2026)

Com a inclusão da componente de integração ao controlador proporcional, obtemos o equivalente ao controlador PI, o que já satisfaz nosso objetivo com este controlador. Vale notar que o erro de regime estacionário é anulado, sem gerar um sobressinal (*overshoot*), o que é sempre desejado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos apresentaram comportamento compatível com o esperado para cada estratégia de controle implementada. O controlador proporcional integrativo (PI) demonstrou melhor capacidade de manter a constância do nível do tanque, reduzindo significativamente o erro estacionário sem provocar esforços excessivos nos componentes mecânicos da planta.

O controlador proporcional (P), implementado como etapa na construção do PI, apresentou comportamento estável e satisfatório, porém mantendo erro em regime permanente, condição característica deste controlador. O controlador PI demonstrou

maior suavidade no acionamento, mantendo o sistema dentro do (*setpoint*) definido. Também apresentou o menor erro estacionário entre os métodos analisados, sendo capaz de manter o nível do tanque praticamente coincidente com o (*setpoint*) quando corretamente ajustado através do método de Ziegler–Nichols, com alterações para refinamento do controlador.

Os controladores *On/Off* também atuaram conforme o esperado, apresentando respostas rápidas ao degrau do *setpoint*. Entretanto, observou-se que o controlador *On/Off* sem histerese realizou elevado número de acionamentos da bomba próximos ao valor de referência, característica que pode contribuir para desgaste prematuro dos componentes eletromecânicos do sistema.

Em contrapartida, o controlador *On/Off* com histerese apresentou vantagem significativa para a planta desenvolvida, reduzindo a frequência de chaveamentos e proporcionando operação mais suave do sistema, fator importante para aumentar a vida útil dos equipamentos.

Durante os testes realizados, não foram observados sobressinais nos controladores implementados, fato associado às limitações físicas da planta, principalmente à vazão de entrada do sistema ser insuficiente para gerar (*overshoot*) em relação ao nível do tanque bem como à vazão de saída do sistema.

CONCLUSÃO

Por meio do desenvolvimento deste trabalho, foi possível verificar que diferentes estratégias de controle aplicadas a uma planta de nível apresentam comportamentos distintos em relação à estabilidade, tempo de resposta, erro estacionário e facilidade de implementação. .

A comparação entre os controladores *On/Off* com e sem histerese, proporcional (P) e proporcional integrativo (PI) permitiu validar experimentalmente as características esperadas de cada técnica de controle frente à resposta ao degrau (*setpoint*).

Além da análise comparativa entre os controladores, o trabalho demonstrou que a planta pode ser utilizada como ferramenta didática para atividades práticas em disciplinas de automação e controle, possibilitando futuras expansões e replicações acadêmicas, bem como experienciar as dificuldades inerentes à implementação e execução de conteúdos vistos majoritariamente de forma teórica, sem um roteiro preestabelecido e com parâmetros bem ajustados, o que acredito, proporcionou um

ganho substancial de experiência e competência ao resgatar e reinterpretar conteúdos teóricos à luz de uma visão global do curso.

Como continuidade do trabalho, sugere-se a implementação de novas estratégias de controle, como controle PID completo, lógica fuzzy e métodos adaptativos, além do aprimoramento da modelagem matemática para ter maior grau de similaridade entre simulação e planta real e da instrumentação da planta.

Outra abordagem interessante é, partindo da modelagem matemática e dos dados obtidos experimentalmente, comparar os comportamentos empíricos com a simulação computacional desenvolvida no MATLAB/Simulink ou Octave ou SciLab/Xcos, ou ainda usando linguagens de programação de livre acesso como python com suas bibliotecas.

REFERÊNCIAS

AMARAL, M. D. S. M. Projeto de controle on-off de nível em uma bancada didática usando Arduino. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 17.; SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO IFSULDEMINAS, 14., 2023. **Anais [...]** IFSULDEMINAS, 2023. v. 15, n. 2.

ALMEIDA, G. D. O. **Interface didática para sintonia de controlador pi em uma planta industrial**. 2024.

BANSAL, R. K. **A textbook of fluid mechanics**. [S. l.]: Firewall Media, 2005.

LEITE, J. C. S.; DRASZEWSKI, C.; ABAIDE, E. Controle de Temperatura em Tanque Através de Arduino Baseado no Controle On/Off. In: SIMPÓSIO PARANAENSE DE MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS, 4., 2019. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2019. p. 136-141. (N. 19).

MELO, F. B. **Avaliação metrológica da incerteza na medição de vazão mássica de gases com tecnologias volumétrica e pressão diferencial**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

OGATA, Katsuhiko. **Modern Control Engineering**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

SILVA, C. R. A. da *et al.* Controle de nível em tanque através da mescla entre Scilab e Arduino baseado no controle PI. In: SIMPÓSIO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS (SIMPROC), 3., 2018. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2018.