



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Engenharia de Controle e Automação



Leonardo Xavier de Oliveira

Retrofit de uma Planta Didática de Controle de Nível

Ouro Preto, MG
2026

Leonardo Xavier de Oliveira

Retrofit de uma Planta Didática de Controle de Nível

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Caio Fernando Teixeira Portela

Ouro Preto, MG
2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Xavier de Oliveira

Retrofit de uma Planta Didática de Controle de Nível

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 29 de agosto de 2026

Membros da banca

[Doutor] - Caio Fernando Teixeira Portela - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)
[Doutor] - Agnaldo José da Rocha Reis - (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)
[Mestre] - João Carlos Vilela de Castro - (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)

[Dr. Caio Fernando Teixeira Portela], orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Caio Fernando Teixeira Portela, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/08/2026, às 23:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1151678** e o código CRC **BA9B643A**.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me abençoar em todos os meus passos e pela oportunidade de cursar Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Ouro Preto. Agradeço também à minha família, em especial à minha mãe e à minha irmã, que sempre me apoiaram, inspiraram e me deram forças ao longo dessa trajetória.

Agradeço à minha noiva, Luana, por sempre acreditar em mim, por inspirar-me a ser uma pessoa melhor a cada dia, por seu amor incondicional, por ser minha melhor amiga e por estar sempre ao meu lado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Caio Fernando Teixeira Portela por toda a ajuda, pelas orientações recebidas, pelo incentivo à docência e pelo compartilhamento de seus conhecimentos.

Por fim, agradeço aos amigos e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta conquista.

“Se estiver se sentindo desmotivado ou que não é bom o suficiente, incendeie o seu coração... Lembre-se que o fluxo do tempo nunca para...”

Kyojuro Rengoku

Resumo

O controle do nível de líquidos em tanques está presente em diferentes processos industriais e permite manter o sistema operando dentro das condições estabelecidas. Em ambientes de ensino, plantas didáticas possibilitam observar, de forma prática, o comportamento desses processos e a aplicação de estratégias de automação e controle. Apresenta-se neste trabalho o retrofit de uma planta didática portátil composta por dois tanques de acrílico dispostos verticalmente. Antes da intervenção, o funcionamento da planta era baseado principalmente em sensores e acionamentos digitais, limitando a medição contínua do nível e a variação da velocidade da bomba. Para ampliar as possibilidades de utilização do equipamento, foram integrados ao sistema uma sonda hidrostática de nível com saída analógica e um inversor de frequência Altus AD700. A programação foi desenvolvida no software TIA Portal, incluindo a leitura e o escalonamento do sinal analógico, a definição do nível desejado pelo operador em uma IHM, o acompanhamento da variável de processo e o controle da velocidade da bomba. O controle de nível do tanque superior foi implementado em malha fechada por meio de controladores PI e PID, com parâmetros obtidos pelo recurso de autocalibração do CLP. Os testes de calibração relacionaram o sinal recebido pelo controlador à altura da coluna de água. Nos ensaios de funcionamento, o sistema acompanhou as alterações do valor de referência e respondeu às perturbações provocadas pela abertura da válvula de saída, ajustando automaticamente a velocidade da bomba para recuperar o nível estabelecido. A Interface Homem-Máquina também permitiu visualizar o nível medido, o valor de referência e a atuação do sistema de controle. Os resultados demonstram que o retrofit ampliou os recursos da planta didática, permitindo a realização de atividades relacionadas à instrumentação analógica, à programação de controladores, à supervisão de processos e ao estudo experimental de estratégias de controle de nível.

Palavras-chave: Retrofit. Controle de nível. CLP. Instrumentação analógica. PID. Inversor de frequência.

Abstract

Liquid level control in tanks is present in different industrial processes and allows the system to operate within established conditions. In educational environments, didactic plants make it possible to observe, in practice, the behavior of these processes and the application of automation and control strategies. This work presents the retrofit of a portable didactic plant composed of two acrylic tanks arranged vertically. Before the intervention, the plant operation was mainly based on digital sensors and on-off actuations, which limited continuous level measurement and pump speed variation. To expand the equipment's possibilities of use, a hydrostatic level probe with analog output, a Siemens S7-1200 Programmable Logic Controller, an Altus AD700 variable frequency drive, and a Human-Machine Interface were integrated into the system. The program was developed using the TIA Portal software and included analog signal reading and scaling, operator-defined level setpoint, process variable monitoring, and pump speed control. The upper tank level control was implemented in a closed-loop configuration using PI and PID controllers, with parameters initially obtained through the autotuning function and subsequently refined during the experimental tests. The calibration tests established the relationship between the signal received by the controller and the water column height. During the operational tests, the system tracked changes in the setpoint and responded to disturbances caused by the opening of the outlet valve, automatically adjusting the pump speed to restore the established level. The Human-Machine Interface also allowed the visualization of the measured level, the setpoint, and the control system response. The results demonstrate that the retrofit expanded the didactic plant's capabilities, enabling activities related to analog instrumentation, controller programming, process supervision, and the experimental study of level control strategies.

Keywords: Retrofit. Level control. PLC. Analog instrumentation. PID. Variable-frequency drive.

Lista de figuras

Figura 1 – Diagrama de controle em malha fechada	19
Figura 2 – Esquema simplificado de um tanque	20
Figura 3 – Diagrama em blocos do sistema de controle de nível	21
Figura 4 – Desenho esquemático da planta de dois tanques	24
Figura 5 – Arquitetura típica de um controlador PID	26
Figura 6 – Curva de reação do processo pelo método de Ziegler–Nichols.	28
Figura 7 – Arquitetura interna do CLP	30
Figura 8 – Captura de tela do programa em Ladder ou em Blocos Funcionais utilizado no projeto, especialmente a parte de leitura analógica, esca- lamento ou chamada do bloco PID	32
Figura 9 – Diagrama Geral da Arquitetura do Sistema desenvolvido, com a apresen- tação do CLP, do Sensor de Nível, da Bomba, do Inversor de Frequência, do IHM e dos Tanques.	33
Figura 10 – Esquema apresentando o sensor analógico conectado ao módulo de entrada analógica do CLP, com indicação do sinal elétrico transmitido, por exemplo 0–10 V ou 4–20 mA, e da conversão para uma variável de engenharia	34
Figura 11 – Princípio de medição hidrostática	36
Figura 12 – Funcionamento de um inversor de frequência	38
Figura 13 – Funcionamento de um inversor de frequência	39
Figura 14 – Diagrama da malha de controle envolvendo o CLP, o inversor de fre- quência, o motor, a bomba, o tanque, o sensor de nível e a realimentação. Fonte: Kalatec (2024).	41
Figura 15 – Protótipo antes das modificações	43
Figura 16 – Quadro de acionamentos antes do retrofit	44
Figura 17 – KIT didático XC110 da Exsto	45
Figura 18 – Novo quadro de acionamento	46
Figura 19 – Visão da parte traseira do KIT	48
Figura 20 – Trecho do programa implementado no CLP	50
Figura 21 – Trecho do programa implementado no CLP	51
Figura 22 – Interligação dos terminais do inversor ao conector DB25	52
Figura 23 – Conexão dos kits pelo DB50-DB25	54
Figura 24 – Tela da interface homem-máquina	55
Figura 25 – Curva de Calibração do Sistema de Controle de Nível	57
Figura 26 – Resposta do sistema com os parâmetros iniciais	59
Figura 27 – Acompanhamento do ajuste grosso do controlador	60

Figura 28 – Resposta do sistema durante o ajuste fino	62
Figura 29 – Resposta do sistema com os parâmetros iniciais	64
Figura 30 – Comportamento do sistema durante o ajuste fino do controlador PI	64
Figura 31 – Resposta do sistema após o ajuste fino do controlador PI	65
Figura 32 – Resposta do sistema após o novo ajuste fino	66
Figura 33 – Resposta do sistema a um degrau no <i>setpoint</i>	67
Figura 34 – Resposta do sistema à alteração da vazão de saída	69
Figura 35 – Diagrama elétrico das entradas da planta pelo DB25, desenvolvido no CAdE SIMU	79
Figura 36 – Diagrama elétrico do inversor da planta pelo DB25, desenvolvido no CAdE SIMU	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de sintonia pelo primeiro método de Ziegler–Nichols. . . .	28
Tabela 2 – Componentes Principais do Protótipo	42
Tabela 3 – Componentes principais do quadro antigo do protótipo	44
Tabela 4 – Pontos preliminares de calibração da sonda hidrostática	49
Tabela 5 – Principais características e configurações do inversor Altus AD700 . . .	51
Tabela 6 – Elementos da malha de controle PID	53
Tabela 7 – Registro do Acionamento da Bomba por Referência Analógica	58
Tabela 8 – Parâmetros iniciais do controlador PID	59
Tabela 9 – Parâmetros obtidos após o ajuste grosso do controlador	61
Tabela 10 – Parâmetros obtidos após o ajuste fino do controlador	62
Tabela 11 – Parâmetros configurados no controlador PI	65
Tabela 12 – Parâmetros obtidos após o novo ajuste fino do controlador	67
Tabela 13 – Síntese dos principais resultados experimentais	71
Tabela 14 – Lista de conexões do cabo DB25	77

Lista de abreviaturas e siglas

CLP	Controlador Lógico Programável
IHM	Interface Homem-Máquina
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PV	Variável de Processo (<i>Process Variable</i>)
SP	Valor de Referência (<i>Setpoint</i>)
MV	Variável Manipulada (<i>Manipulated Variable</i>)
PN/IE	PROFINET/Industrial Ethernet
VFD	Inversor de Frequência (<i>Variable-Frequency Drive</i>)

Lista de símbolos

h	Altura da coluna de água no tanque superior
$h_{\min}$	Altura mínima utilizada no escalonamento
$h_{\max}$	Altura máxima utilizada no escalonamento
AI	Valor bruto lido pela entrada analógica do CLP
$AI_{\min}$	Valor bruto correspondente ao nível mínimo
$AI_{\max}$	Valor bruto correspondente ao nível máximo
$e(t)$	Erro entre o valor de referência e a variável de processo
$u(t)$	Sinal de saída do controlador
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
K_d	Ganho derivativo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa e relevância	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Metodologia	16
1.4	Organização do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Controle Automático e Sistemas em Malha Fechada	18
2.2	Tanques e Controle de Nível em Tanques	20
2.3	Controlador PID	25
2.4	O Controlador Lógico Programável - CLP e a Automação Industrial	29
2.5	Sensores analógicos e instrumentação	33
2.6	Inversor de Frequência e o Acionamento de Bombas	37
3	DESENVOLVIMENTO	42
3.1	Visão Geral da Arquitetura da Planta Didática	42
3.1.1	Quadro de Acionamento	43
3.1.2	Estrutura Física	45
3.2	Instalação do Novo Quadro de Acionamento	46
3.3	Instalação da Régua de Bornes de Medição e do Inversor de Frequência	47
3.4	Instalação e Calibração da Sonda Hidrostática	48
3.5	Tratamento do Sinal Analógico no TIA Portal	49
3.6	Integração do Inversor de Frequência	50
3.7	Implementação do bloco PID	52
3.8	Desenvolvimento da IHM	54
4	RESULTADOS	57
4.1	Leitura de Nível do Tanque Superior	57
4.2	Validação do Acionamento da Bomba	58
4.3	Ensaio de resposta ao <i>Setpoint</i> utilizando PID	58
4.3.1	Primeiro ensaio com Parâmetros Iniciais	58
4.3.2	Segundo Ensaio com Ajuste Grosso do Controlador (<i>Pré-Tuning</i>)	60
4.3.3	Terceiro Ensaio com Ajuste Fino do Controlador (<i>Fine Tuning</i>)	61

4.4	Ensaio de Resposta ao <i>Setpoint</i> utilizando Controlador PI	63
4.4.1	Primeiro Ensaio com Parâmetros Iniciais	63
4.4.2	Segundo Ensaio com Ajuste Fino do Controlador PI	64
4.4.3	Terceiro Ensaio após Novo Ajuste Fino do Controlador	66
4.5	Teste de Resposta ao Degrau	67
4.6	Teste de Resposta a uma Perturbação	68
4.7	Funcionalidades disponibilizadas pelo Protótipo	69
4.8	Síntese dos Resultados Experimentais	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	74
	Referências	75
	APÊNDICE A – DIAGRAMAS ELÉTRICOS E LISTA DE CONE- XÕES DO CABO DB25	77
	APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO 1 ELABORADO NO CADE SIMU	79
	APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO 2 ELABORADO NO CADE SIMU	80
	APÊNDICE D – DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA	81

1 Introdução

A automação industrial compreende o emprego integrado de instrumentos de medição, de elementos de atuação, de controladores programáveis e de interfaces de operação com o propósito de monitorar e regular processos físicos, com diversos mecanismos de acionamento e movimentação. Nos processos de automação industrial, podem ser empregados os motores, as válvulas solenoides, as eletroválvulas, os mecanismos hidráulicos e pneumáticos. O processo de acionamento na automação industrial possui um conjunto de atividades que objetivam atingir uma meta para criar, inventar, projetar, transformar, produzir, controlar, manter e usar produtos ou sistemas. Os acionamentos elétricos dependem do fornecimento de níveis de tensão e corrente adequados para produzir trabalho. Em sistemas dessa natureza, as grandezas como o nível, a vazão, a pressão, a temperatura e a velocidade precisam ser adquiridas, tratadas e utilizadas de forma coerente pela lógica de controle com a utilização do Controlador Lógico Programável (CLP). O CLP é um instrumento que pode ser programado por meio de uma linguagem de programação, de maneira a executar funções aritméticas, lógicas de temporização e de contagem ([ROGGIA; FUENTES, 2016](#)). O desenvolvimento de atividades práticas com esses elementos contribui para a formação dos profissionais da Engenharia de Controle e Automação, por permitir associar os fundamentos teóricos à implementação de soluções funcionais ([MORAES; CASTRUCCI, 2007](#); [FRANCHI; CAMARGO, 2008](#)). Entre as aplicações recorrentes da automação de processos, destaca-se o controle de nível em reservatórios. O problema consiste em manter a altura de um fluido em uma faixa de operação ou em um valor de referência, considerando as condições de entrada e de saída do sistema. A regulação adequada do nível é relevante para a continuidade operacional, para a segurança do processo e para a compreensão de conceitos associados à dinâmica de sistemas e ao controle em malha fechada ([OGATA, 2010](#); [NISE, 2017](#)). O presente trabalho descreve o retrofit de uma planta didática portátil destinada ao ensino de automação e controle de processos. O protótipo é formado por dois tanques de acrílico dispostos verticalmente. O tanque inferior funciona como um reservatório de recirculação, enquanto o superior constitui o elemento principal do processo controlado. O líquido é transferido do tanque inferior para o superior por meio de uma bomba centrífuga. O retorno ocorre por escoamento gravitacional por intermédio de uma válvula manual de saída instalada entre os reservatórios.

1.1 Justificativa e relevância

A formação na área de Engenharia de Controle e Automação exige contato com sistemas capazes de representar a interação entre sensores, controladores, atuadores e

processos físicos. A utilização de uma bancada de nível permite abordar essa integração de forma visual e experimental, pois a evolução da variável controlada pode ser observada diretamente durante a operação. A relevância do retrofit está associada à incorporação de uma cadeia completa de aquisição e atuação analógica. A sonda hidrostática fornece uma medida contínua da altura do líquido; o CLP recebe e processa essa informação; os blocos de normalização e escalonamento convertem o valor bruto para unidade de engenharia; o bloco PID calcula a ação de controle; o inversor de frequência recebe a referência de velocidade; e a bomba ajusta a vazão de entrada no tanque superior.

O protótipo também possibilita explorar a operação por IHM. Assim, o usuário pode definir a referência de nível, acompanhar a variável de processo e observar a porcentagem da atuação da bomba. A bancada permite desenvolver atividades relacionadas ao acompanhamento de tendências, à análise de perturbações e à interpretação das respostas do sistema. A documentação técnica do retrofit possui relevância adicional por permitir a reutilização da bancada em atividades futuras. A descrição das conexões elétricas e da configuração do acionamento fornece base para a manutenção, a atualização e a elaboração de roteiros experimentais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e documentar o retrofit de uma planta didática de controle de nível, incorporando medição analógica, tratamento de sinais, supervisão por IHM, acionamento de bomba por inversor de frequência e controle PI e PID executados em um CLP Siemens *S7 – 1200*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a estrutura física e funcional do protótipo da planta didática utilizada para a construção do retrofit;
- Integrar a sonda hidrostática ao sistema de aquisição analógica;
- Calibrar a leitura de nível com base nos valores brutos adquiridos pelo CLP e implementar o bloco PID em rotina cíclica;
- Implementar o tratamento do sinal analógico utilizando os blocos `NORM_X` e `SCALE_X`;
- Integrar o Inversor de Frequência Altus AD700 ao sistema de acionamento da bomba centrífuga;
- Configurar a definição do valor de referência por meio da IHM;

- Registrar dados de nível, erro e sinal de controle ao longo do tempo.

1.3 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho é de caráter experimental, com o desenvolvimento organizado em cinco etapas:

- O levantamento da arquitetura física;
- A instalação e a calibração da instrumentação analógica;
- A integração elétrica dos componentes;
- A implementação da lógica de controle e realização de ensaios de validação.

Na primeira etapa, foram identificados os elementos constitutivos da bancada: os tanques, as tubulações, a bomba, a válvula, os sensores, os conectores, o CLP e a IHM e foram registrados os pontos de conexão necessários à documentação do protótipo. Para a segunda etapa, instalou-se a sonda hidrostática no tanque superior. A calibração foi realizada mediante associação entre a altura física da água e o valor bruto adquirido pelo CLP. Para o nível vazio, observou-se leitura aproximada de 50 unidades digitais. Para o nível próximo de 25cm, observou-se leitura aproximada de 2200 unidades digitais.

A terceira etapa trata-se da implementação e das conexões elétricas entre o kit, o CLP, o sensor, o inversor de frequência da instalação e a parametrização para os comandos digitais e as referências analógicas de velocidade. A integração incluiu a adaptação de cabeamento DB50 para DB25 e a elaboração de diagrama no software CAdE SIMU. As funções foram programadas para o tratamento do sinal, a supervisão e o controle. O bloco NORM_X foi utilizado para normalização da leitura bruta e o bloco SCALE_X para conversão do resultado em porcentagem de altura de fluido. O controlador PID foi implementado em bloco cíclico, utilizando como valor de referência a porcentagem definida na IHM, como variável de processo a altura medida pela sonda e como saída a porcentagem de velocidade da bomba.

A última etapa do processo metodológico definiu os ensaios para o registro do nível, do erro e do sinal de controle ao longo do tempo. Também foram previstas alterações na abertura da válvula de saída com o objetivo de introduzir perturbações e observar a resposta da malha de controle.

1.4 Organização do trabalho

Além desta introdução, o trabalho está estruturado em quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos necessários à compreensão da bancada, seus componentes e o uso do sistema de controle. O Capítulo 3 descreve a implementação do protótipo, suas conexões, sua programação e sua operação. O Capítulo 4 reúne os resultados preliminares e define a forma de apresentação dos ensaios experimentais. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e as possibilidades de continuidade do projeto.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Controle Automático e Sistemas em Malha Fechada

O controle automático é uma área responsável pelo estudo, projeto e implementação de sistemas capazes de regular automaticamente o comportamento de processos dinâmicos. Nos processos industriais, o controle automático visa garantir a estabilidade operacional, a segurança, a repetibilidade e a eficiência. Variáveis trabalhadas nestes sistemas como o nível, a vazão, a pressão, a temperatura, a velocidade e a posição frequentemente precisam ser mantidas dentro de faixas específicas de operação, evitando instabilidades, perdas de produção, desperdícios de energia ou riscos ao equipamento [Dorf e Bishop \(2017\)](#). Um sistema de controle pode ser compreendido como a interconexão entre componentes físicos, elétricos, eletrônicos ou computacionais destinados a comandar, regular ou modificar a resposta de uma planta, de forma que determinada variável de saída apresente comportamento compatível com uma referência previamente estabelecida [Ogata \(2010\)](#). Nesse contexto, o sistema de controle atua continuamente sobre uma variável manipulada, buscando reduzir os desvios entre o comportamento real do processo e o comportamento desejado.

Os sistemas de controle podem ser classificados em sistemas de malha aberta e em sistemas de malha fechada. Em um sistema de malha aberta, a ação de controle é aplicada ao processo sem que haja medição da saída para correção automática do resultado. Assim, o controlador atua apenas com base em uma entrada previamente definida, sem considerar eventuais perturbações, variações paramétricas ou diferenças entre a saída real e a saída desejada. Embora esse tipo de sistema apresente simplicidade de implementação, sua eficiência depende fortemente da previsibilidade do processo e da ausência de perturbações significativas [Nise \(2017\)](#). Por outro lado, os sistemas de controle em malha fechada utilizam realimentação da variável de saída, como mostrado na Figura 1. Nesse tipo de configuração, a saída do processo é medida por sensores e comparada com um valor de referência, denominado *setpoint*. A diferença entre o valor desejado e o valor medido corresponde ao erro do sistema, que é utilizado pelo controlador para ajustar a ação de controle. Dessa forma, o sistema passa a responder dinamicamente às alterações do processo, compensando perturbações externas e variações nas condições de operação [Ogata \(2010\)](#).

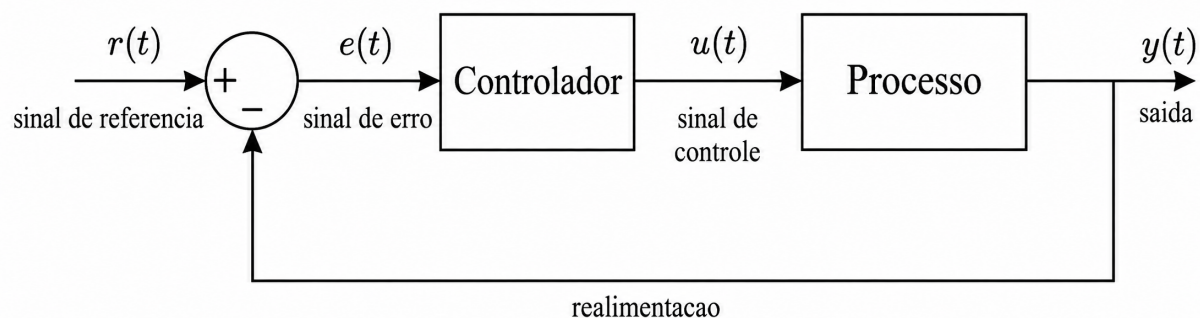


Figura 1 – Diagrama de controle em malha fechada.
Fonte: Silva (2000).

A estrutura básica de um sistema em malha fechada é composta pela referência, pelo controlador, pelo atuador, pela planta, pelo sensor e pelo elemento de realimentação. A referência representa o valor desejado para a variável controlada; o controlador processa o erro e determina a ação de controle; o atuador converte o sinal de controle em uma ação física sobre o processo; a planta corresponde ao sistema físico controlado; e o sensor realiza a medição da variável de saída. A realimentação permite que o sistema corrija continuamente sua resposta, tornando-o mais robusto em relação a incertezas e perturbações. Em aplicações industriais, a utilização de sistemas em malha fechada é especialmente importante quando a variável controlada está sujeita a alterações externas ou quando se exige maior precisão no comportamento do processo. No caso do controle de nível, por exemplo, variações na vazão de saída, alterações na abertura de válvulas ou mudanças no regime de bombeamento podem modificar a altura do fluido no tanque. A realimentação do nível medido permite que o controlador ajuste automaticamente a atuação sobre a bomba ou outro elemento final de controle, buscando manter o nível próximo ao valor de referência. Além da capacidade de correção automática, os sistemas em malha fechada possibilitam a análise de critérios importantes de desempenho, como estabilidade, tempo de subida, tempo de acomodação, sobressinal e erro em regime permanente. Esses parâmetros permitem avaliar se o sistema responde de maneira rápida, precisa e segura às variações de referência ou às perturbações. Para que o controle seja adequado, é necessário que o sistema apresente estabilidade e que sua resposta dinâmica seja compatível com os requisitos do processo [Nise \(2017\)](#) e [Dorf e Bishop \(2017\)](#).

Dessa forma, o estudo dos sistemas de controle automático em malha fechada é indispensável para o desenvolvimento de aplicações voltadas ao controle de nível em tanques. A partir da medição contínua da variável controlada e da correção automática do erro, torna-se possível implementar estratégias de controle capazes de manter o processo dentro de condições operacionais desejadas. Essa base conceitual fundamenta a aplicação de controladores clássicos, como o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID),

amplamente utilizado em sistemas industriais devido à sua simplicidade, flexibilidade e eficiência em diferentes tipos de processos.

2.2 Tanques e Controle de Nível em Tanques

Os sistemas de tanques são utilizados em processos industriais que envolvem o armazenamento, a transferência, a mistura, a dosagem ou o tratamento de fluidos. Em diferentes setores, como as indústrias químicas, as petroquímicas, as alimentícias, as farmacêuticas, de saneamento e de geração de energia, a manutenção adequada do nível de líquidos buscam garantir a continuidade operacional, a segurança do processo e a qualidade do produto final. Do ponto de vista dinâmico, um tanque pode ser compreendido como um sistema no qual a variável de interesse é a altura do fluido armazenado. Essa altura varia em função da diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída. Quando a vazão de entrada é maior que a vazão de saída, o nível tende a aumentar; quando a vazão de saída é maior que a vazão de entrada, o nível tende a diminuir. A representação dessas vazões podem ser observadas na [Figura 2](#). Assim, o comportamento do sistema pode ser descrito a partir do princípio da conservação de massa, que estabelece uma relação direta entre o acúmulo de fluido no reservatório e o balanço das vazões envolvidas [Bequette \(2003\)](#), [Seborg et al. \(2011\)](#).

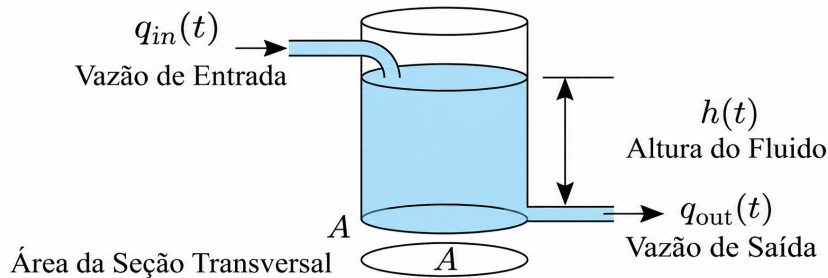


Figura 2 – Esquema simplificado de um tanque com indicação da vazão de entrada $q_{in}(t)$, da vazão de saída $q_{out}(t)$, da área da seção transversal A e da altura do fluido $h(t)$.

Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa (2026).

Considerando um tanque de seção transversal constante, preenchido por um fluido incompressível, a dinâmica básica do nível pode ser representada pela equação de balanço de massa:

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t), \quad (2.1)$$

em que A representa a área da seção transversal do tanque, $h(t)$ corresponde ao nível do fluido, $q_{in}(t)$ é a vazão de entrada e $q_{out}(t)$ é a vazão de saída.

Essa equação demonstra que a taxa de variação do nível depende diretamente do desequilíbrio entre as vazões que entram e saem do reservatório. Quando as duas vazões se igualam, a derivada do nível tende a zero e o sistema atinge uma condição de regime permanente [Ogata \(2010\)](#). Em muitos sistemas reais, a vazão de saída não é constante, mas depende da altura da coluna de líquido no tanque. Quando o escoamento ocorre pela parte inferior do reservatório, a vazão pode ser aproximada pela equação de Torricelli, segundo a qual a velocidade de saída do fluido está relacionada à raiz quadrada da altura da coluna líquida. Nesse caso, a vazão de saída pode ser expressa por:

$$q_{out}(t) = C_d A_s \sqrt{2gh(t)}, \quad (2.2)$$

em que C_d é o coeficiente de descarga, A_s representa a área da seção de saída, g é a aceleração da gravidade e $h(t)$ é o nível do fluido.

Essa relação evidencia o caráter não linear do sistema, uma vez que a vazão de saída depende da raiz quadrada do nível. Portanto, embora os tanques sejam sistemas aparentemente simples, seu comportamento dinâmico pode apresentar não linearidades relevantes para o projeto do controlador [Bequette \(2003\)](#).

No controle de nível, o objetivo principal é manter a altura do fluido próxima a um valor de referência previamente definido, denominado *setpoint*. Para isso, utiliza-se uma estrutura de controle em malha fechada, como mostrado na Figura 3, na qual o nível é medido continuamente por um sensor e comparado ao valor desejado. A diferença entre o nível medido e o valor de referência gera um erro, que é processado pelo controlador. A partir desse erro, o controlador determina a ação necessária sobre o elemento atuador, que pode ser uma bomba, uma válvula proporcional ou outro dispositivo capaz de alterar a vazão do sistema [Dorf e Bishop \(2017\)](#).

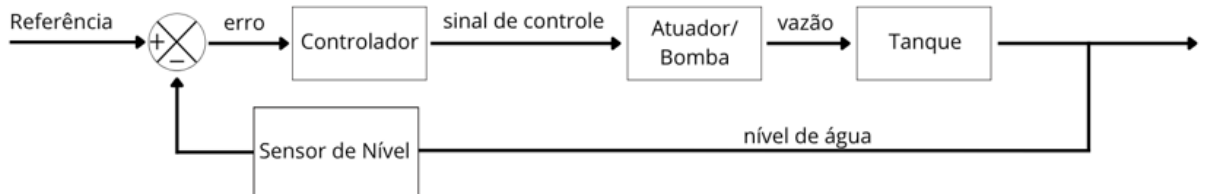


Figura 3 – Diagrama em blocos do sistema de controle de nível implementado na planta didática. Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de IA generativa (OpenAI/ChatGPT, 2026).

Em sistemas de tanques, a variável controlada normalmente é o nível do fluido, enquanto a variável manipulada pode ser a vazão de entrada ou a vazão de saída. Quando a atuação ocorre sobre a vazão de entrada, por meio de uma bomba acionada por inversor de frequência, o controlador modifica a velocidade do conjunto motor-bomba e, consequentemente, a quantidade de líquido fornecida ao reservatório. Essa estratégia permite ajustar diretamente o volume admitido no tanque, mas seu desempenho fica condicionado aos limites de operação da bomba, à faixa de frequência do inversor e ao consumo de energia associado ao acionamento. Além disso, variações excessivamente rápidas no comando podem provocar oscilações de vazão e maior solicitação do conjunto eletromecânico.

Quando a atuação ocorre sobre a vazão de saída, o controlador altera o grau de abertura de uma válvula, modificando a resistência hidráulica do escoamento. Nessa configuração, a redução da abertura tende a elevar o nível, enquanto o aumento da abertura favorece o esvaziamento do tanque. Embora essa estratégia possa ser de implementação simples, parte da energia do fluido é dissipada na própria válvula, o que pode reduzir a eficiência do processo. A relação entre a abertura da válvula e a vazão também pode apresentar comportamento não linear, dificultando a obtenção de uma resposta uniforme em toda a faixa de operação. Além disso, a manipulação da saída interfere diretamente na vazão disponibilizada às etapas posteriores do processo.

Assim, a escolha entre atuar na entrada ou na saída depende das características da planta e dos objetivos de operação. O controle pela vazão de entrada tende a ser mais adequado quando se deseja regular o abastecimento do tanque e preservar a vazão de saída do processo. Já o controle pela vazão de saída pode ser empregado quando a alimentação é aproximadamente constante e existe disponibilidade para modificar o escoamento a jusante. Em ambos os casos, o controlador busca reduzir a diferença entre o nível de referência e o nível medido, mas cada estratégia produz efeitos distintos sobre o consumo energético, a dinâmica do sistema e as demais variáveis do processo.

A resposta dinâmica de um tanque depende de suas características físicas, como área da seção transversal, a geometria, o diâmetro das tubulações, as características da bomba, a abertura das válvulas e as perdas de carga no escoamento. Os tanques transversais com áreas maiores tendem a apresentar variações de nível mais lentas para uma mesma variação de vazão, enquanto tanques menores respondem de forma mais rápida. Essa característica é importante para o projeto do sistema de controle, pois influencia diretamente em parâmetros como o tempo de resposta, a estabilidade e o erro em regime permanente. Quando dois tanques são interligados, o sistema passa a apresentar dinâmica mais complexa. A vazão de saída de um tanque pode atuar como vazão de entrada do outro, criando uma relação de dependência entre os níveis. Nessa configuração, o comportamento do sistema pode ser descrito por equações diferenciais acopladas, nas quais a variação do nível de cada tanque depende das vazões de entrada, de saída e de transferência entre

os reservatórios. Esse tipo de planta é frequentemente utilizado em estudos acadêmicos por permitir a aplicação prática de conceitos de modelagem matemática, identificação de sistemas, análise dinâmica e controle em malha fechada [Seborg *et al.* \(2011\)](#), [Deka e Mathew \(2012\)](#) e [Fellani e Gabaj \(2016\)](#).

No caso de sistemas de dois tanques, a depender da forma de interligação, é possível que o comportamento ocorra de primeira ou de segunda ordem, além dos efeitos do acoplamento entre as variáveis. Se o controle for realizado sobre o nível do tanque superior, por exemplo, a bomba pode ser utilizada para transferir fluido do reservatório inferior para o superior, enquanto a saída ocorre por gravidade. Nessa situação, alterações na vazão de bombeamento modificam diretamente o nível do tanque controlado, ao passo que perturbações na saída, como mudanças na abertura de uma válvula, podem provocar desvios em relação ao valor de referência. Os sistemas de tanques possuem relevância industrial por apresentarem dinâmica visualmente perceptível e relativamente simples de instrumentar. Estes sistemas permitem observar de forma prática conceitos como o regime transitório, o regime permanente, a resposta ao degrau, o atraso (do inglês, *delay*), a constante de tempo, a estabilidade e a ação de controle. Dessa forma, a utilização de uma planta de tanques possibilita a integração entre teoria e prática dos fundamentos matemáticos e computacionais do controle automático em um processo físico real. A Figura 4 representa uma planta (sistema) com dois tanques, sendo um tanque inferior e outro superior.

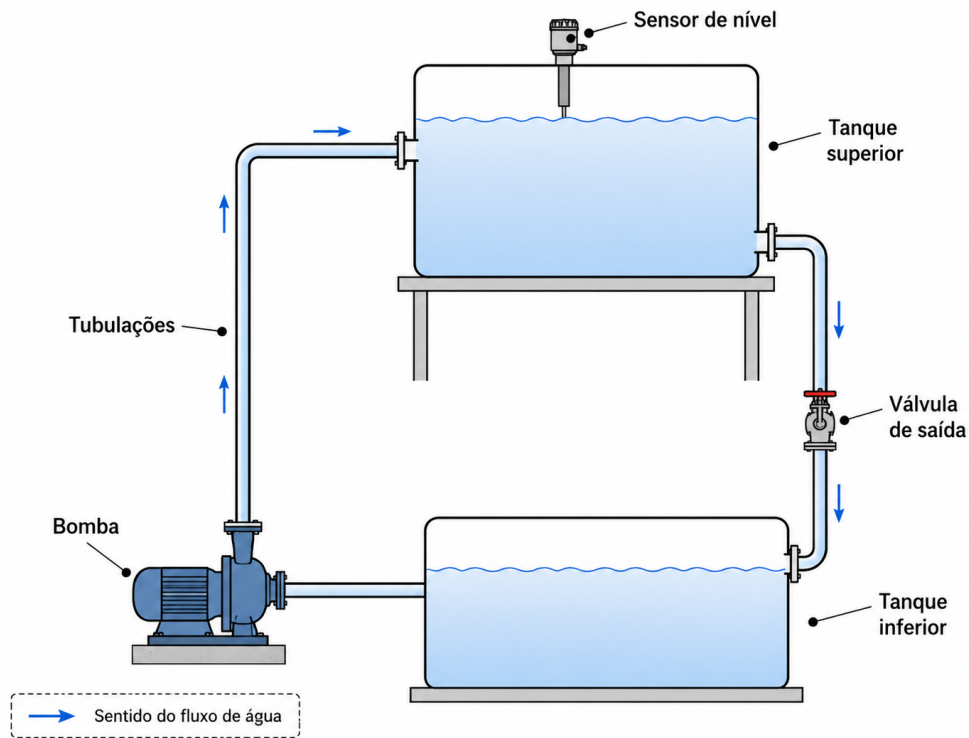


Figura 4 – Desenho esquemático da planta de dois tanques utilizada no trabalho, com indicação do tanque superior, tanque inferior, bomba, tubulações, válvula de saída, sensor de nível e sentido do fluxo de água. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A presença de perturbações é um dos principais motivos para a utilização do controle em malha fechada em sistemas de nível. Variações na abertura de válvulas, mudanças na vazão de saída, oscilações no desempenho da bomba ou ruídos de medição podem alterar o nível do fluido ao longo do tempo. Com a realimentação, o controlador passa a corrigir automaticamente esses desvios, ajustando a ação de controle para manter o processo próximo à condição desejada. Essa característica torna o controle de nível uma aplicação adequada para demonstrar, em ambiente didático, direcionado ao ensino da automação industrial, a importância da medição, da atuação e da realimentação em sistemas automatizados.

Portanto, o estudo de tanques e do controle de nível fornece a base necessária para o desenvolvimento de aplicações envolvendo sensores, atuadores, controladores programáveis e algoritmos de controle. A modelagem do sistema permite compreender a relação entre vazão e nível, enquanto a implementação em malha fechada possibilita avaliar o desempenho do controlador diante de variações de referência e perturbações no processo. Essa fundamentação é essencial para o desenvolvimento de plantas didáticas voltadas ao ensino e à aplicação de estratégias clássicas de controle, como o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

2.3 Controlador PID

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo, usualmente denominado controlador PID, é uma das estratégias de controle empregadas em aplicações industriais devido à sua simplicidade estrutural, a sua facilidade de implementação e o bom desempenho em diferentes processos. Mesmo com o avanço de técnicas modernas de controle, o PID permanece amplamente utilizado em sistemas industriais por apresentar uma formulação relativamente simples e por permitir ajustes práticos capazes de atender a diferentes requisitos de desempenho. O objetivo principal do controlador PID é reduzir o erro entre o valor desejado para a variável controlada e o valor efetivamente medido pelo sistema. Esse erro é calculado pela diferença entre o *setpoint* e a variável de processo. A partir desse erro, o controlador gera um sinal de controle destinado ao atuador, buscando conduzir a saída do sistema para o valor de referência. Em um sistema de controle de nível, por exemplo, o erro corresponde à diferença entre o nível desejado e o nível medido no tanque, enquanto o sinal de controle pode atuar sobre a velocidade de uma bomba ou sobre a abertura de uma válvula [Astrom e Hagglund \(2006\)](#), [Seborg *et al.* \(2011\)](#) [Deka e Mathew \(2012\)](#) e [Fellani e Gabaj \(2016\)](#).

A lei de controle PID no domínio do tempo pode ser representada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.3)$$

em que $u(t)$ representa o sinal de controle, $e(t)$ é o erro entre a referência e a saída medida, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral e K_d é o ganho derivativo. Cada uma dessas parcelas exerce influência específica sobre a resposta dinâmica do sistema, sendo a combinação adequada entre elas responsável pelo desempenho global do controlador [Ogata \(2010\)](#) e [Nise \(2015\)](#).

A ação proporcional é responsável por produzir uma resposta de controle diretamente proporcional ao erro instantâneo. Quanto maior o erro, maior será a ação de controle aplicada ao processo. O aumento do ganho proporcional tende a reduzir o erro e tornar a resposta mais rápida; entretanto, valores excessivos podem provocar oscilações, sobressinal elevado ou até instabilidade. Dessa forma, o ajuste do ganho proporcional deve considerar o compromisso entre a rapidez de resposta e a estabilidade do sistema [Nise \(2015\)](#) e [Ogata \(2010\)](#).

A ação integral atua sobre o erro acumulado ao longo do tempo. Sua principal função é eliminar ou reduzir o erro em regime permanente, isto é, a diferença residual que pode permanecer entre a saída do sistema e o valor de referência quando se utiliza apenas a ação proporcional. Em sistemas de nível, essa característica é especialmente importante, pois pequenas diferenças persistentes entre vazões de entrada e saída podem manter o nível estabilizado em um valor diferente do desejado. A ação integral corrige esse desvio

acumulado, ajustando continuamente o sinal de controle até que o erro seja minimizado [Seborg et al. \(2011\)](#).

Apesar de sua importância, a ação integral deve ser utilizada com cautela. Ganhos integrais elevados podem tornar o sistema mais lento para se estabilizar ou gerar oscilações indesejadas. Além disso, em sistemas sujeitos à saturação do atuador, pode ocorrer o fenômeno conhecido como *windup* integral, no qual o termo integral continua acumulando o erro mesmo quando o atuador já atingiu seu limite físico de operação. Esse efeito pode prejudicar a resposta transitória do sistema, tornando necessária a adoção de estratégias de limitação ou anti-*windup* em implementações práticas [Astrom e Hagglund \(2006\)](#).

A ação derivativa, por sua vez, está relacionada à taxa de variação do erro. Ela atua de maneira antecipatória, considerando a tendência de crescimento ou redução do erro ao longo do tempo. Em termos práticos, a ação derivativa pode contribuir para reduzir oscilações e melhorar o amortecimento da resposta, especialmente em sistemas que apresentam tendência a sobressinal. No entanto, como essa parcela depende da derivada do erro, ela pode amplificar ruídos de medição, exigindo cuidados na implementação e, em muitos casos, o uso de filtros no termo derivativo [Dorf e Bishop \(2017\)](#).

Essas três ações do controlador PID operam em conjunto, como mostrado na Figura 5, que apresenta a estrutura básica de atuação deste controlador.

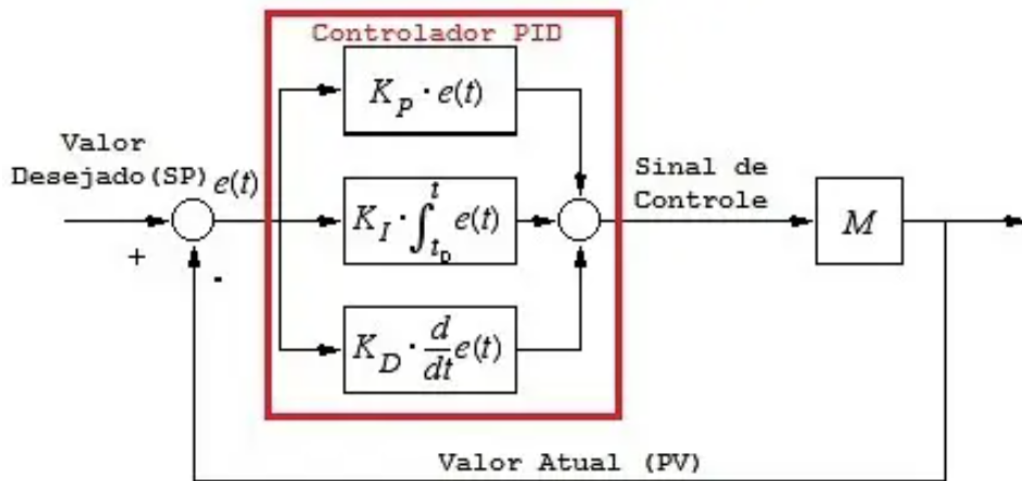


Figura 5 – Arquitetura típica de um controlador PID digital. Fonte: Puhlmann (2014).

No domínio de Laplace, a função de transferência ideal de um controlador PID pode ser expressa por:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (2.4)$$

Essa representação evidencia a contribuição de cada ação no domínio da frequência. O termo proporcional atua como ganho direto, o termo integral introduz um polo na origem e aumenta a capacidade de eliminação do erro estacionário, enquanto o termo derivativo introduz uma ação dependente da frequência, associada à variação do erro. Em aplicações reais, entretanto, o termo derivativo ideal normalmente é modificado por meio de filtros, de modo a reduzir a sensibilidade a ruídos de medição [Ogata \(2010\)](#) e [Jia et al. \(2023\)](#).

A sintonia do controlador PID consiste na determinação adequada dos parâmetros K_p , K_i e K_d , de forma que o sistema apresente desempenho satisfatório em termos de estabilidade, tempo de resposta, sobressinal e erro em regime permanente. Existem diferentes métodos de sintonia, desde procedimentos empíricos até técnicas baseadas em modelos matemáticos do processo. Entre os métodos clássicos, destacam-se as regras de Ziegler-Nichols, que propõem ajustes a partir da resposta do sistema em malha aberta ou a partir do ganho crítico e do período crítico obtidos em malha fechada [Jia et al. \(2023\)](#).

De acordo com [Patel \(2020\)](#), o primeiro método de sintonia de Ziegler-Nichols é aplicável a processos cuja resposta ao degrau apresenta comportamento aproximadamente sigmoide, isto é, uma curva em formato de “S”. Essa resposta é caracterizada por dois parâmetros principais: o tempo de atraso aparente, representado por L , e a constante de tempo do processo, representada por T .

A determinação desses parâmetros é realizada por meio do traçado de uma reta tangente à curva no ponto de inflexão, conforme ilustrado na Figura 6. O tempo de atraso L corresponde ao instante em que a reta tangente intercepta o eixo do tempo. A constante de tempo T , por sua vez, é determinada a partir do intervalo compreendido entre essa interseção e o ponto em que a reta tangente alcança o valor final da resposta do processo, representado por $c(t) = K$ ([PATEL, 2020](#)).

Com base nos valores identificados para L e T , Ziegler e Nichols propuseram relações empíricas para o cálculo do ganho proporcional K_p , do tempo de ação integral T_i e do tempo de ação derivativa T_d , conforme apresentado na Tabela 1 ([PATEL, 2020](#)).

Além dos métodos clássicos, controladores industriais e controladores programáveis modernos podem disponibilizar recursos de sintonia automática ou assistida. Esses recursos realizam testes controlados no processo, identificam características dinâmicas da planta e calculam parâmetros iniciais para o controlador. Ainda assim, a análise do comportamento do sistema permanece necessária, pois a sintonia adequada depende dos

Tabela 1 – Parâmetros de sintonia pelo primeiro método de Ziegler–Nichols.

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: Adaptado de Patel (2020).

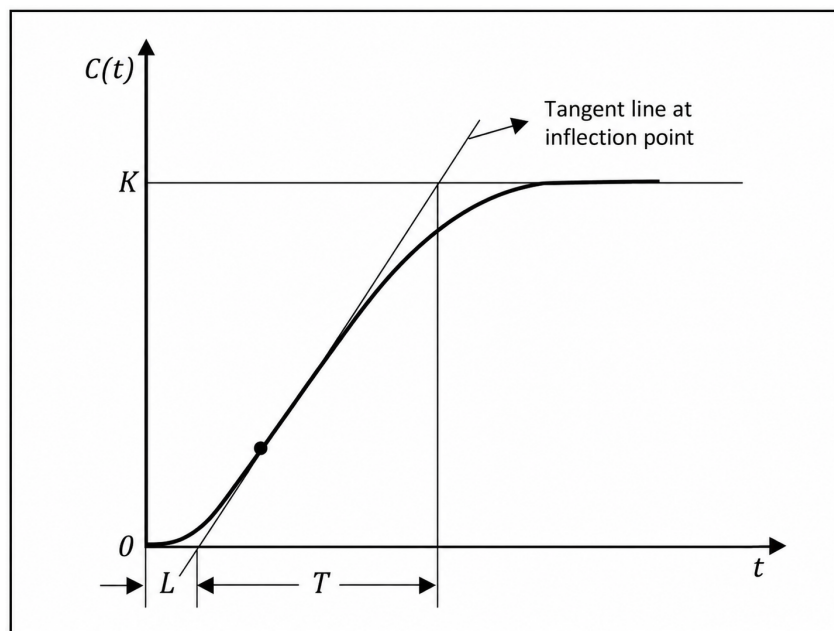


Figura 6 – Resposta ao degrau em formato sigmoidal e reta tangente traçada no ponto de inflexão para a determinação do tempo de atraso L e da constante de tempo T .

Fonte: adaptado de Patel (2020).

requisitos específicos da aplicação, com maior rapidez, menor sobressinal, menor oscilação ou maior robustez diante de perturbações. Em sistemas de controle de nível, o controlador PID apresenta aplicação bastante recorrente Seborg *et al.* (2011) e Jia *et al.* (2023).

A dinâmica de tanques geralmente possui um comportamento lento e pode ser aproximada, em determinadas condições, por modelos de primeira ou segunda ordem. Esse tipo de característica favorece a aplicação de controladores clássicos, desde que os parâmetros sejam ajustados de forma compatível com a resposta do processo. A ação proporcional contribui para corrigir desvios imediatos do nível, a ação integral elimina erros persistentes e a ação derivativa pode auxiliar no amortecimento da resposta, quando necessária. No controle de nível de tanques, a escolha dos parâmetros do PID deve considerar as limitações físicas do sistema, como a capacidade da bomba, os limites de vazão, a faixa de medição do sensor, o volume útil do reservatório e a presença de perturbações na saída. A adoção de ganhos elevados pode provocar oscilações no nível ou variações bruscas no

atuador, enquanto um controlador excessivamente conservador pode resultar em resposta lenta e dificuldade de acompanhar mudanças no valor de referência. Assim, a sintonia deve buscar equilíbrio entre estabilidade, precisão e suavidade da ação de controle [Seborg *et al.* \(2011\)](#), [Jia *et al.* \(2023\)](#) e [Astrom e Hagglund \(2006\)](#).

Também é importante considerar que sistemas de nível podem apresentar não linearidades, especialmente quando a vazão de saída depende da altura da coluna de líquido ou quando há variações significativas na abertura de válvulas. Nesses casos, a sintonia obtida para um determinado ponto de operação pode não apresentar o mesmo desempenho em toda a faixa de funcionamento. Por essa razão, a avaliação experimental da resposta do sistema é fundamental para verificar se o controlador mantém desempenho adequado diante das condições reais de operação. Portanto, o controlador PID constitui uma ferramenta essencial para o controle automático de processos industriais e didáticos. Sua aplicação em sistemas de nível permite demonstrar, de forma prática, conceitos fundamentais de realimentação, de erro, de estabilidade, de resposta transitória e de erro em regime permanente [Ogata \(2010\)](#), [Nise \(2015\)](#) e [Astrom e Hagglund \(2006\)](#).

No contexto de plantas didáticas de tanques, o PID possibilita a integração entre modelagem matemática, instrumentação, atuação e programação de controladores, contribuindo para a compreensão aplicada dos princípios da Engenharia de Controle e Automação.

2.4 O Controlador Lógico Programável - CLP e a Automação Industrial

A automação industrial está relacionada à utilização de dispositivos, de sistemas de controle e de tecnologias computacionais para monitorar, comandar e otimizar processos produtivos. Seu objetivo é reduzir a intervenção manual direta, aumentar a repetibilidade das operações, melhorar a segurança, elevar a eficiência e permitir maior controle sobre as variáveis envolvidas no processo. Em ambientes industriais, a automação está presente em linhas de produção, sistemas de bombeamento, controle de temperatura, controle de nível, dosagem de materiais, acionamentos elétricos, supervisão de processos e integração entre equipamentos de campo e sistemas de gerenciamento [Bolton \(2015\)](#). Nesse contexto, o Controlador Lógico Programável, denominado CLP, constitui um dos principais equipamentos utilizados em sistemas de automação industrial. O CLP é um dispositivo eletrônico digital projetado para operar em ambientes industriais, recebendo sinais provenientes de sensores e dispositivos de entrada, processando essas informações de acordo com uma lógica de controle previamente programada e acionando saídas conectadas a atuadores, relés, contadores, inversores de frequência, válvulas, motores ou outros elementos finais de controle [Petruszella \(2017\)](#).

Em consideração aos sistemas de controle baseados exclusivamente em circuitos eletromecânicos, o CLP possibilita flexibilidade operacional, a partir da lógica de programação para organizar e determinar o funcionamento. Essa característica propicia ao CLP aplicações tanto industriais quanto ao ensino, nas quais diferentes estratégias de controle podem ser testadas, modificadas e avaliadas de maneira prática. A estrutura básica de um CLP é composta por unidade central de processamento, por uma fonte de alimentação, por módulos de entrada, por módulos de saída, pela memória e pelas interfaces de comunicação. A unidade central de processamento (CPU) executa o programa de controle armazenado em memória e realiza o processamento lógico e matemático das variáveis. Os módulos de entrada recebem sinais provenientes de sensores, botoeiras, chaves, transmissores e outros dispositivos de campo. Os módulos de saída, por sua vez, enviam comandos para atuadores e equipamentos responsáveis pela ação física sobre o processo [Bolton \(2015\)](#). A Figura 7 ilustra a arquitetura e a estrutura de um controlador lógico programável.

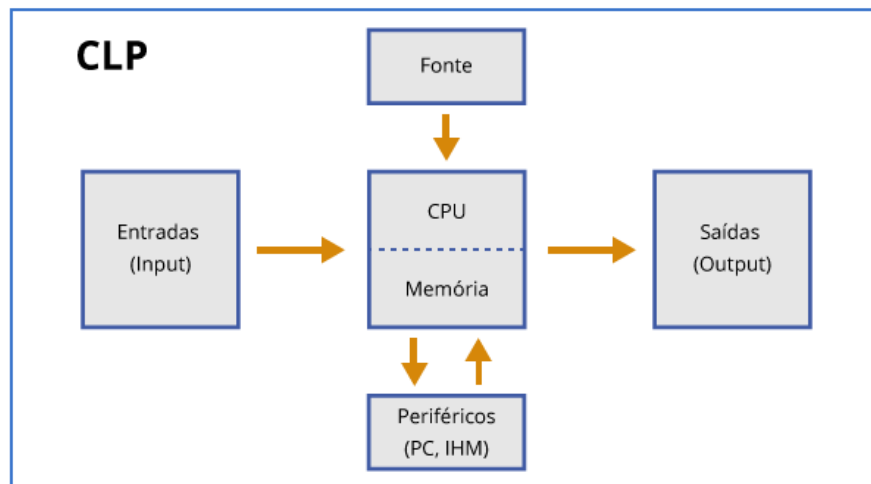


Figura 7 – Arquitetura interna de um Controlador Lógico Programável. Fonte: Instituto Metrópole Digital/UFRN (s.d.).

Autor: Imagem construída em uma IA Generativa

Os sinais processados por um CLP podem ser classificados, de forma geral, em digitais e analógicos. Os sinais digitais assumem estados discretos, normalmente associados às condições ligado/desligado, aberto/fechado ou verdadeiro/falso. São exemplos de dispositivos digitais as botoeiras, chaves fim de curso, sensores de presença e relés. Já os sinais analógicos representam grandezas contínuas, como nível, pressão, vazão, temperatura, velocidade ou posição. Esses sinais são geralmente transmitidos por padrões elétricos, como tensão ou corrente, e precisam ser convertidos para valores numéricos internos no controlador. No caso de aplicações envolvendo controle de nível, a utilização de sinais analógicos, como a utilização do CLP, permite medir a variável de processo. Um sensor de nível, por exemplo, pode fornecer ao controlador um sinal proporcional à altura do fluido no tanque. Esse sinal é lido pelo módulo analógico do CLP e convertido para uma faixa

numérica interna. Posteriormente, por meio de blocos de normalização e escalonamento, o valor bruto de leitura pode ser convertido para uma unidade de engenharia, como centímetros, porcentagem de nível ou volume estimado. O controlador realiza repetidamente uma sequência de operações conhecida como ciclo de varredura, ou *scan cycle*. Nesse ciclo, o CLP lê os estados das entradas, executa o programa de controle, atualiza as saídas e realiza tarefas de comunicação e diagnóstico. A repetição contínua desse ciclo permite que o sistema responda às alterações do processo em tempo adequado, desde que o tempo de varredura seja compatível com a dinâmica da planta controlada [Petruszella \(2017\)](#).

A leitura e o tratamento de sinais analógicos permitem que o CLP deixe de atuar apenas em lógicas discretas de acionamento e passe a executar funções de controle contínuo. Dessa forma, torna-se possível implementar estratégias como controle proporcional, controle PI ou controle PID, nas quais o valor medido da variável de processo é comparado continuamente com uma referência definida pelo operador. A partir dessa comparação, o controlador calcula uma ação de controle proporcional ao erro e envia um comando ao atuador responsável por corrigir o comportamento do sistema [Bolton \(2015\)](#) e [Petruszella \(2017\)](#).

A programação de CLPs é normalmente realizada por linguagens padronizadas, entre as quais se destacam a linguagem Ladder, os Diagramas de Blocos Funcionais e o Texto Estruturado. A linguagem Ladder é utilizada por sua semelhança com diagramas elétricos de comandos, tornando-se adequada para lógicas sequenciais, intertravamentos e acionamentos discretos. Já os blocos funcionais são frequentemente empregados em aplicações que envolvem funções matemáticas, temporizadores, contadores, controle PID, escalonamento de sinais e comunicação entre dispositivos. O Texto Estruturado, por sua vez, permite a implementação de algoritmos mais complexos por meio de uma linguagem textual semelhante às linguagens de programação convencionais [International Electrotechnical Commission \(2013\)](#).

A comunicação entre CLP, inversor, sensores e interface de operação pode ocorrer por sinais elétricos diretos ou por redes industriais. Em sistemas mais simples, o comando ao inversor pode ser realizado por entradas digitais, sinais analógicos ou parâmetros configurados localmente. Em sistemas mais integrados, protocolos industriais permitem a troca de dados entre os equipamentos, facilitando supervisão, diagnóstico e ajuste de parâmetros. A escolha da forma de comunicação depende da complexidade da aplicação, dos recursos disponíveis nos equipamentos e dos requisitos de controle [Altus \(2025\)](#). A Figura 8 ilustra a tela do programa em Ladder utilizado no projeto.

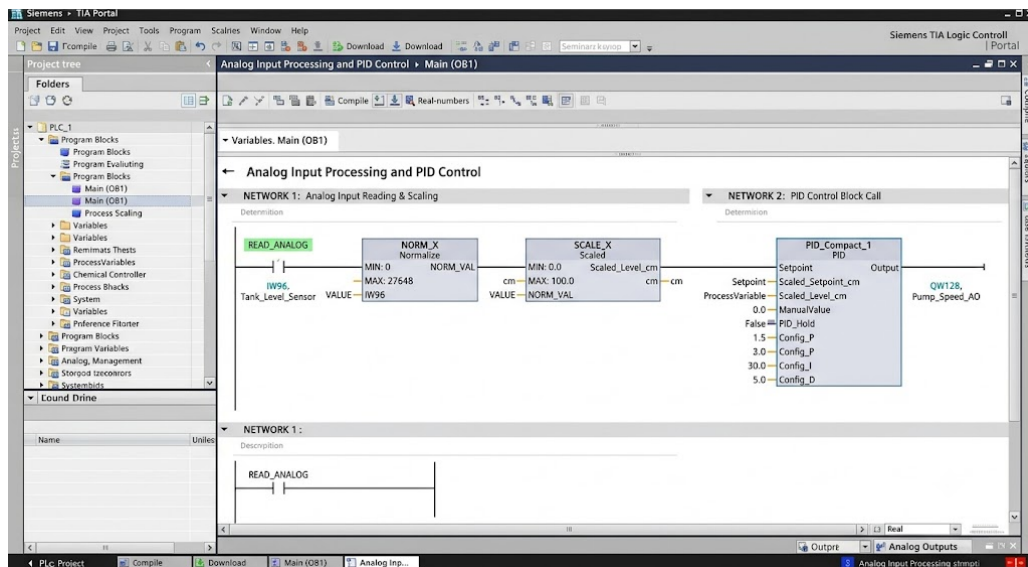


Figura 8 – Captura de tela do programa em Ladder ou em Blocos Funcionais utilizado no projeto, especialmente a parte de leitura analógica, escalonamento ou chamada do bloco PID

No controle de nível em tanques, a integração entre CLP, sensor de nível, inversor de frequência, bomba e IHM permite a construção de uma malha de controle completa. O sensor mede continuamente o nível do fluido; o CLP processa a leitura analógica e compara o valor medido com o *setpoint*; o algoritmo de controle calcula a ação necessária; o inversor ajusta a velocidade da bomba; e a IHM disponibiliza as informações ao operador. Essa arquitetura representa uma aplicação típica da automação industrial em malha fechada, na qual medição, processamento, atuação e supervisão operam de forma integrada. A Figura 9 ilustra o Diagrama Geral da Arquitetura do Sistema.

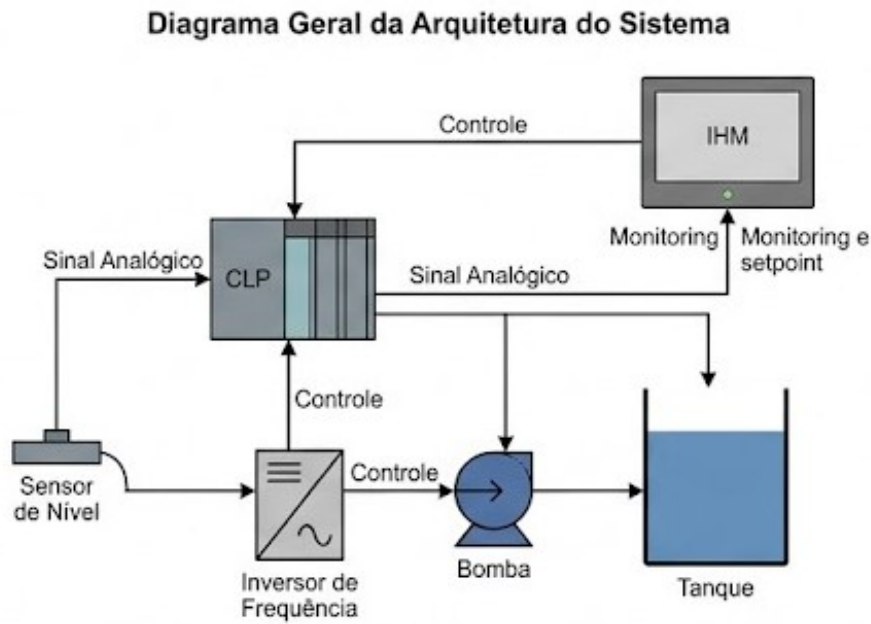


Figura 9 – Diagrama Geral da Arquitetura do Sistema desenvolvido, com a apresentação do CLP, do Sensor de Nível, da Bomba, do Inversor de Frequência, do IHM e dos Tanques.

Autor: Imagem construída em uma IA Generativa

2.5 Sensores analógicos e instrumentação

A instrumentação industrial compreende o conjunto de dispositivos, técnicas e procedimentos utilizados para medir, transmitir, condicionar e interpretar variáveis físicas presentes em processos industriais. Grandezas como nível, pressão, vazão, temperatura, velocidade, posição e força precisam ser monitoradas de forma contínua para que o sistema de controle possa atuar adequadamente sobre o processo. Nesse contexto, os sensores e transmissores exercem a ação responsável por converter uma grandeza física em um sinal elétrico em um sistema compatível com os dispositivos de controle e supervisão [Doebelin e Manik \(2011\)](#). Em sistemas automatizados, a qualidade da medição influencia diretamente o desempenho da malha de controle. Um controlador somente pode corrigir adequadamente o erro do processo se a variável medida representar, com precisão suficiente, o estado real da planta. Dessa forma, aspectos como faixa de medição, sensibilidade, resolução, repetibilidade, linearidade, histerese, tempo de resposta e imunidade a ruídos devem ser considerados na escolha e na aplicação de sensores industriais [Fraden \(2016\)](#).

Os sensores podem fornecer sinais digitais ou analógicos. Sensores digitais indicam estados discretos, como ligado ou desligado, presença ou ausência, nível alto ou nível baixo e os sensores analógicos fornecem sinais proporcionais à variação contínua da grandeza medida. Em aplicações de controle de nível, o uso de sensores analógicos permite acompanhar continuamente a altura do fluido no reservatório, possibilitando a implementação

de estratégias de controle em malha fechada, como o controle proporcional, PI ou PID. Os sinais analógicos industriais são normalmente transmitidos por padrões elétricos de tensão ou corrente. Entre os padrões mais comuns estão os sinais de tensão, como 0-10 V, e os sinais de corrente, como 04-20 mA. O sinal em corrente é amplamente utilizado em ambientes industriais por apresentar maior robustez em relação a perdas em cabos longos e interferências eletromagnéticas. Além disso, o padrão 04-20 mA possui a vantagem do chamado zero vivo, pois o valor de 4 mA representa o limite inferior da escala de medição, permitindo diferenciar uma leitura mínima de uma falha de circuito aberto [Liptak \(2003\)](#) e [Fraden \(2016\)](#). A Figura 10 ilustra o sensor analógico do CLP apresentando o sinal elétrico transmitido.

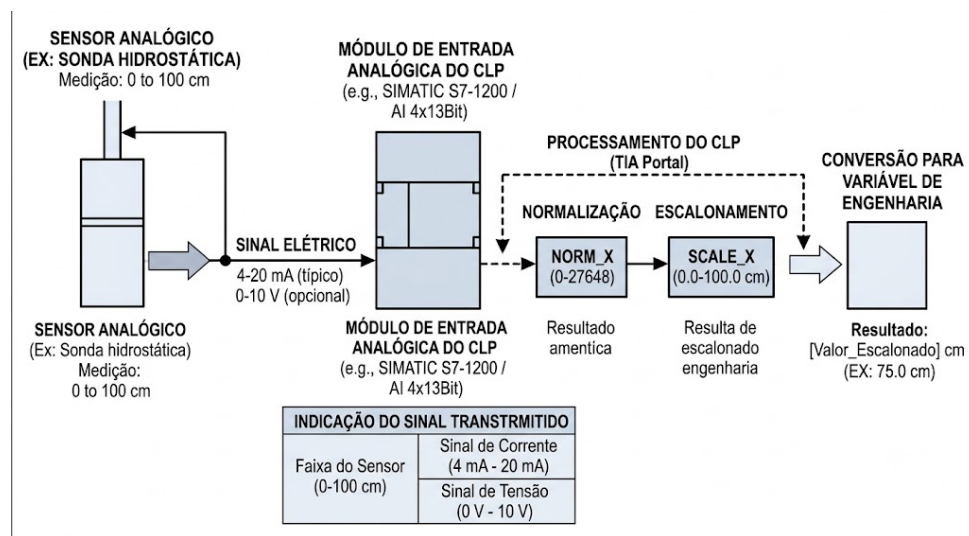


Figura 10 – Esquema apresentando o sensor analógico conectado ao módulo de entrada analógica do CLP, com indicação do sinal elétrico transmitido, por exemplo 0–10 V ou 4–20 mA, e da conversão para uma variável de engenharia

No contexto dos controladores lógicos programáveis, os sinais analógicos recebidos pelos módulos de entrada passam por um processo de conversão analógico-digital. Nessa etapa, o sinal elétrico contínuo proveniente do sensor é convertido em um valor numérico interno, que pode ser processado pelo programa do CLP. Esse valor bruto, entretanto, geralmente não corresponde diretamente à unidade física da variável medida. Por essa razão, é necessário realizar o escalonamento do sinal, convertendo a faixa numérica lida pelo controlador para uma unidade de engenharia, como centímetros, metros, litros, porcentagem de nível ou outra unidade adequada à aplicação.

De forma geral, o escalonamento linear de um sinal analógico pode ser representado por:

$$y = y_{min} + \frac{(x - x_{min})(y_{max} - y_{min})}{x_{max} - x_{min}}, \quad (2.5)$$

em que x representa o valor bruto lido pelo controlador, x_{min} e x_{max} correspondem aos limites inferior e superior da faixa de leitura, y é o valor convertido para unidade de engenharia, e y_{min} e y_{max} representam os limites físicos da variável medida. Esse procedimento é essencial para que o programa de controle utilize valores coerentes com a realidade do processo (FRADEN, 2016; LIPTAK, 2003).

Em sistemas de medição de nível, diferentes tecnologias podem ser empregadas. Sensores de boia são dispositivos simples e podem operar de forma discreta ou contínua, dependendo da construção. Sensores ultrassônicos medem o nível a partir do tempo de propagação de uma onda sonora refletida pela superfície do líquido. Sensores capacitivos detectam variações na capacitância associadas à presença ou à altura do fluido. Sensores de pressão hidrostática, por sua vez, estimam o nível a partir da pressão exercida pela coluna de líquido sobre o ponto de medição Fraden (2016) e Deka e Mathew (2012). No caso dos sensores baseados em pressão hidrostática, a relação entre pressão e altura do fluido pode ser expressa por:

$$P = \rho gh, \quad (2.6)$$

em que P representa a pressão hidrostática, ρ é a massa específica do fluido, g é a aceleração da gravidade e h corresponde à altura da coluna de líquido. Essa relação representa o Princípio de Pascal aplicado à Lei da Hidrostática (também conhecida como Teorema de Stevin). Ela demonstra que a pressão exercida por um fluido em repouso e homogêneo depende diretamente da densidade do fluido (ρ), da aceleração da gravidade local (g) e da altura da coluna de líquido (h) acima do ponto de medição e indica que, para um fluido de densidade aproximadamente constante, a pressão medida é proporcional ao nível. Assim, a partir da pressão no fundo ou em determinado ponto do reservatório, é possível estimar a altura do fluido no tanque Doebelin e Manik (2011). A Figura 11 ilustra o Princípio de Pascal em um fluido (líquido).

A automação e o controle de processos têm essa relação física como a base para a medição de nível por pressão hidrostática. Como a densidade da água (ρ) e a gravidade (g) são constantes conhecidas, os transmissores de nível instalam um sensor de pressão no fundo do tanque. Ao medir a pressão (P), o CLP consegue calcular facilmente a altura exata do fluido (h) isolando a variável:

$$h = \frac{P}{\rho g}$$

Isso permite converter um sinal elétrico bruto (como 4–20 mA) em uma variável de engenharia legível (como centímetros ou metros).

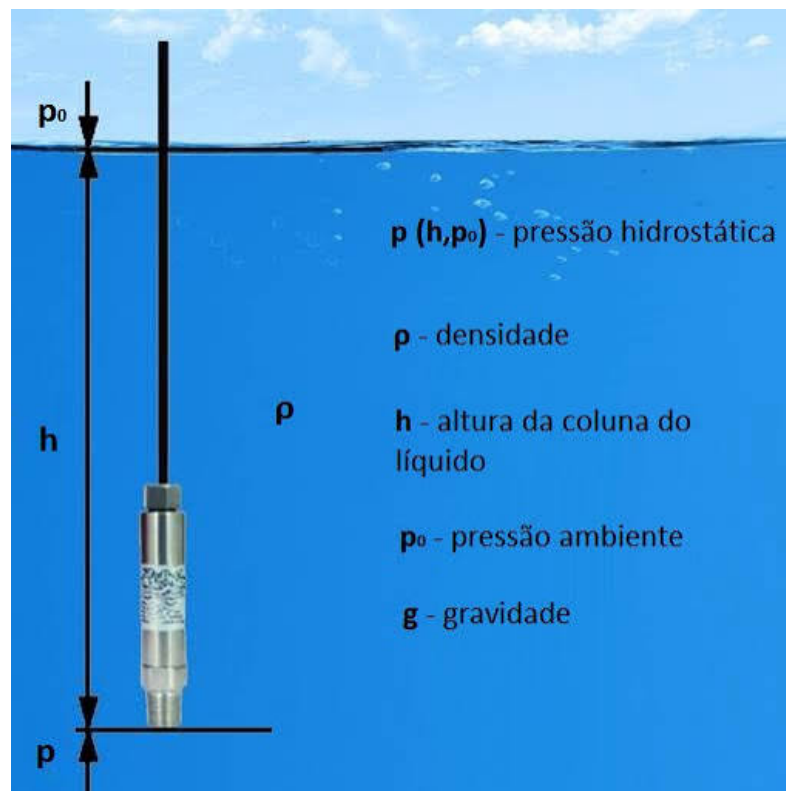


Figura 11 – Princípio de medição utilizado em transmissores de nível hidrostático. Fonte: New Range (s.d.).

A seleção do sensor adequado depende das características do processo e das condições de operação. Deve-se considerar o tipo de fluido, a faixa de nível a ser medida, a presença de turbulência, espuma, vapores, variações de temperatura, geometria do tanque, necessidade de contato direto com o líquido e precisão requerida. Em plantas didáticas, a escolha do sensor também deve considerar facilidade de instalação, custo, segurança, compatibilidade elétrica com o CLP e a clareza didática na observação da variável medida. Além da seleção do sensor, a calibração é uma etapa essencial da instrumentação. A calibração consiste em comparar a resposta do instrumento com valores de referência conhecidos, verificando se a leitura fornecida está compatível com a grandeza real medida. Em sistemas de nível, esse procedimento pode ser realizado por meio da comparação entre a leitura do sensor e alturas conhecidas do fluido no tanque. A partir dessa comparação, podem ser definidos os limites de medição, os fatores de escala e eventuais correções necessárias para reduzir desvios entre a leitura elétrica e o valor físico da variável (DOEBELIN; MANIK, 2011; FELLANI; GABAJ, 2016).

Outro aspecto importante é o condicionamento do sinal. Em aplicações de controle, o tratamento inadequado do sinal pode gerar oscilações na variável medida e comprometer a atuação do controlador. A dinâmica do sensor também deve ser considerada no projeto da malha de controle. Embora muitas vezes seja tratado como elemento ideal, o sensor pode apresentar atraso e limitações de resposta. Em processos lentos, como sistemas de

nível em tanques, esses efeitos podem ser menos críticos, mas ainda assim influenciam a qualidade da medição e a estabilidade da malha. De forma simplificada, a dinâmica de um sensor pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem, no qual a saída medida não acompanha instantaneamente a variação real da grandeza física. Em uma malha de controle de nível, o sensor analógico é o elemento responsável pela realimentação da variável controlada. O valor medido é enviado ao CLP, convertido para uma unidade de engenharia e comparado com o valor de referência definido pelo operador. A partir dessa comparação, o controlador calcula o erro e determina a ação de controle necessária sobre o atuador. Dessa forma, a confiabilidade da medição é indispensável para que o sistema mantenha o nível próximo ao valor desejado. A integração entre sensores analógicos e CLPs permite que variáveis contínuas sejam utilizadas em lógicas de controle mais sofisticadas. Além de simplesmente ligar ou desligar equipamentos, o controlador passa a interpretar a evolução da variável medida ao longo do tempo, possibilitando ações proporcionais à condição real do processo. Essa característica é essencial para aplicações que exigem controle automático, estabilidade e acompanhamento contínuo da variável de processo [Liptak \(2003\)](#) e [Fellani e Gabaj \(2016\)](#).

Portanto, os sensores analógicos e a instrumentação constituem elementos fundamentais para o controle de nível em tanques. A correta medição da altura do fluido, o tratamento adequado do sinal, o escalonamento para unidades de engenharia e a integração com o CLP são etapas indispensáveis para a implementação de uma malha de controle eficiente. Em plantas didáticas, esses elementos também possuem importância pedagógica, pois permitem visualizar a relação entre a grandeza física, o sinal elétrico, o processamento digital e a atuação automática do sistema de controle.

2.6 Inversor de Frequência e o Acionamento de Bombas

O acionamento de motores elétricos é realizado em aplicações que envolvem transporte de fluidos, bombeamento, ventilação, dosagem e controle de vazão. Em sistemas de controle de nível, a bomba exerce a função de atuador, sendo responsável por transferir fluido entre os reservatórios ou alimentar determinado tanque do processo. Dessa forma, o desempenho do sistema de controle depende não apenas da estratégia implementada no controlador, mas também da forma como o motor da bomba é acionado e regulado. Tradicionalmente, motores elétricos podem ser acionados por partida direta, partida estrela-triângulo, soft-starters ou inversores de frequência. A partida direta é simples, porém não permite controle contínuo de velocidade e provoca correntes elevadas no instante do acionamento. Já os inversores de frequência possibilitam controlar a velocidade de motores de corrente alternada por meio da variação da frequência e da tensão fornecidas ao motor, permitindo uma atuação mais precisa, gradual e adequada às necessidades do processo [Hughes e Drury \(2019\)](#) e [Kalatec \(2024\)](#). O inversor de frequência, também chamado de

conversor de frequência ou *do inglês, Variable Frequency Drive (VFD)*, é um equipamento eletrônico de potência utilizado para controlar a velocidade e o torque de motores elétricos de corrente alternada. Seu funcionamento básico consiste em converter a tensão alternada da rede elétrica em tensão contínua por meio de um retificador, armazenar essa energia em um barramento CC e, posteriormente, sintetizar uma nova tensão alternada de frequência e amplitude controladas por meio de um estágio inversor. Essa modulação permite ajustar a velocidade do motor de acordo com o sinal de comando recebido [Bose \(2002\)](#).

A Figura 12 apresenta, de forma esquemática, estas etapas de funcionamento.

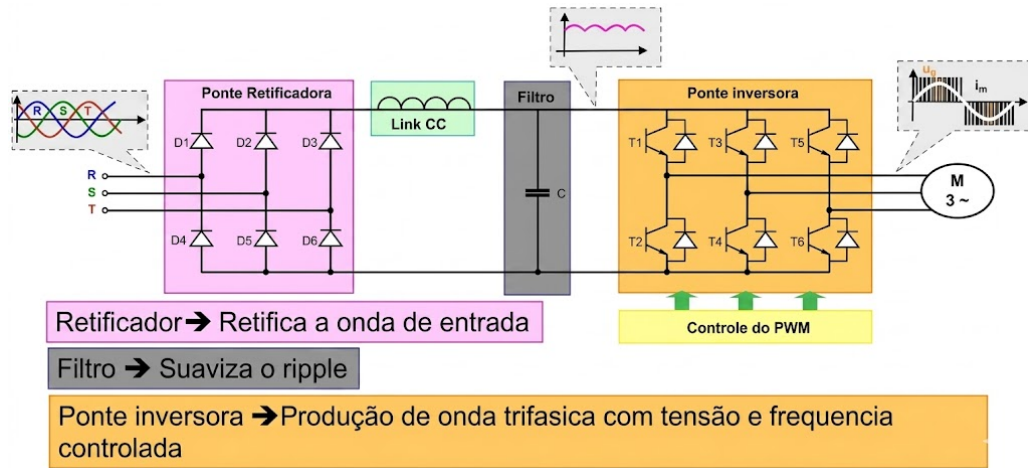


Figura 12 – Etapas de funcionamento de um inversor de frequência. Fonte: Kalatec (2024).

Em motores de indução, a velocidade síncrona está diretamente relacionada à frequência elétrica de alimentação, conforme a expressão:

$$n_s = \frac{120f}{p}, \quad (2.7)$$

em que n_s representa a velocidade síncrona em rotações por minuto, f é a frequência da rede em hertz e p corresponde ao número de polos do motor. A partir dessa relação, observa-se que a redução ou elevação da frequência aplicada ao motor altera sua velocidade de rotação. Embora a velocidade real do motor de indução seja ligeiramente inferior à velocidade síncrona devido ao escorregamento, o controle da frequência continua sendo o princípio básico para o ajuste de velocidade [Chapman \(2013\)](#).

A utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento apresenta vantagens relevantes. Como a vazão fornecida por uma bomba centrífuga relacionada à sua velocidade de rotação, o controle da velocidade do motor permite ajustar a vazão de forma contínua, sem depender exclusivamente de válvulas de estrangulamento. Isso possibilita uma operação mais eficiente, reduz esforços mecânicos, suaviza partidas e paradas, diminui oscilações hidráulicas e permite que o sistema responda de maneira mais adequada às exigências do controle automático [Karassik et al. \(2008\)](#). Em bombas centrífugas, as

chamadas leis de afinidade relacionam velocidade, vazão, altura manométrica e potência. De forma simplificada, considerando uma mesma bomba operando com o mesmo fluido, a vazão é aproximadamente proporcional à velocidade de rotação, a altura manométrica é proporcional ao quadrado da velocidade e a potência requerida é proporcional ao cubo da velocidade:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (2.8)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2, \quad (2.9)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3, \quad (2.10)$$

em que Q representa a vazão, H a altura manométrica, P a potência e N a velocidade de rotação. Essas relações demonstram a importância do controle de velocidade em sistemas de bombeamento, pois pequenas alterações na rotação podem provocar mudanças significativas na potência consumida e no comportamento hidráulico da bomba [Karassik *et al.* \(2008\)](#).

A Figura 13 apresenta, o diagrama das leis de afinidade de bombas, relacionando a rotação, a vazão, a altura manométrica e a potência. Essa figura ajuda a justificar tecnicamente o uso do inversor no controle de nível.

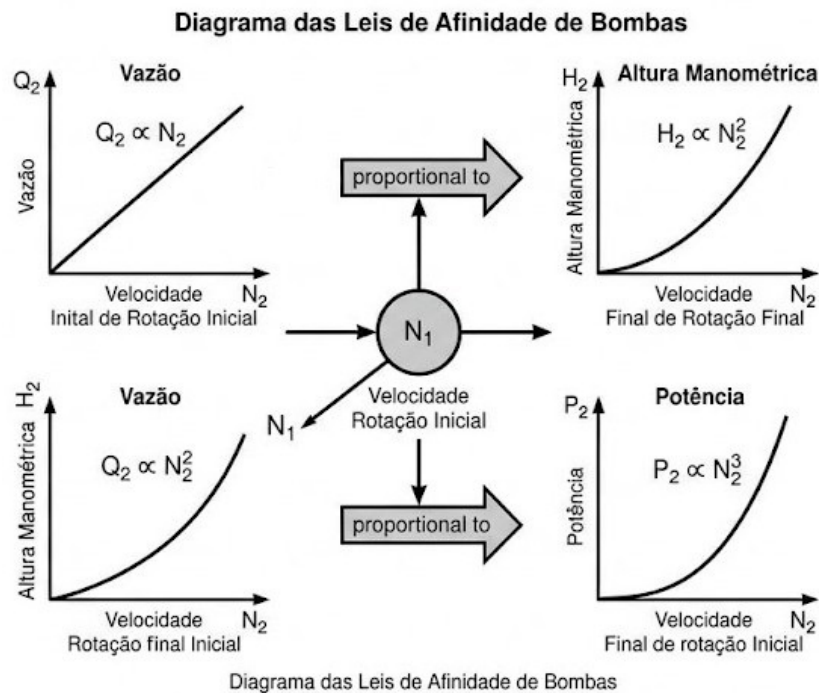


Figura 13 – Diagrama das Leis de Afinidade de Bombas. Fonte: Kalatec (2024).

No contexto do controle de nível em tanques, o inversor de frequência pode ser utilizado para ajustar a velocidade da bomba responsável pela vazão de entrada do reservatório. Nesse caso, o controlador calcula o sinal de controle a partir do erro entre o nível desejado e o nível medido, e esse sinal é convertido em uma referência de velocidade para o inversor. Ao variar a rotação do motor, o inversor altera a vazão fornecida pela bomba, permitindo que o nível do tanque seja conduzido ao valor de referência. A integração entre o CLP e o inversor de frequência pode ocorrer de diferentes formas, dependendo dos recursos disponíveis nos equipamentos e dos requisitos da aplicação. Em sistemas industriais, por exemplo, é comum o uso de sinais digitais para comandos básicos, como habilitar, partir, parar ou inverter o sentido de rotação do motor. Para o controle contínuo de velocidade, podem ser utilizados sinais analógicos, como 0-10 V ou 4-20 mA, ou ainda redes de comunicação industrial, como Modbus, Profibus, Profinet ou outros protocolos compatíveis com os dispositivos empregados [Petruzella \(2017\)](#). Em uma malha de controle de nível, a variável controlada é o nível do fluido, enquanto a variável manipulada pode ser a vazão de entrada produzida pela bomba. O CLP recebe o sinal do sensor de nível, realiza o escalonamento da leitura para uma unidade de engenharia e compara o valor medido com o *setpoint*. O erro resultante é processado pelo algoritmo de controle, que gera uma saída correspondente ao percentual de atuação desejado. Esse valor pode ser enviado ao inversor como referência de velocidade, fazendo com que a bomba aumente ou reduza sua rotação conforme a necessidade do processo.

A utilização do inversor também contribui para a suavização da operação do sistema. Por meio de rampas de aceleração e desaceleração, o motor pode partir e parar gradualmente, evitando variações bruscas de vazão. Em sistemas hidráulicos, essa característica pode reduzir oscilações, impactos mecânicos, ruídos e perturbações repentinas no nível do tanque. Além disso, o inversor pode disponibilizar recursos de proteção e diagnóstico, como monitoramento de corrente, tensão, frequência, sobrecarga, falhas de comunicação e condições anormais de operação. Do ponto de vista do controle automático, é importante que o sinal enviado ao inversor seja compatível com a faixa de operação da bomba e com os limites físicos do processo. Um comando muito baixo pode não ser suficiente para vencer perdas de carga e iniciar o escoamento, enquanto um comando muito elevado pode provocar o enchimento rápido, as oscilações ou a aproximação dos limites superiores do tanque. Portanto, a parametrização do inversor deve considerar frequência mínima, frequência máxima, tempo de aceleração, tempo de desaceleração, sentido de rotação, modo de controle e forma de recebimento da referência [Altus \(2025\)](#).

Em sistemas didáticos, o uso do inversor de frequência apresenta grande relevância pedagógica, pois permite visualizar a relação entre sinal de controle, a velocidade do motor, a vazão da bomba e a variação do nível do tanque. Essa integração evidencia a função do atuador dentro da malha de controle, demonstrando que o controlador não atua diretamente sobre o nível, mas sobre uma variável manipulada capaz de alterar o

comportamento do processo físico. Assim, o inversor se torna o elo entre o sinal lógico ou analógico calculado pelo CLP e a ação mecânica efetivamente realizada pela bomba. A escolha e a configuração do inversor devem considerar as características elétricas do motor, como a tensão nominal, a corrente nominal, a potência, a frequência, o fator de serviço e o tipo de carga acionada.

Também devem ser observadas as características da bomba, a faixa de vazão desejada e as condições hidráulicas da planta. A correta parametrização do conjunto inversor-motor-bomba contribui para a segurança, para a estabilidade e para a eficiência da aplicação. Além disso, a implementação de um sistema de bombeamento controlado por inversor permite avaliar o comportamento do processo em diferentes condições de operação. As alterações no valor de referência, as variações na abertura de válvulas ou as perturbações na vazão de saída podem ser compensadas por ajustes automáticos na rotação da bomba. Dessa forma, o sistema torna-se adequado para demonstrar experimentalmente conceitos como variável manipulada, variável controlada, atuador, perturbação, resposta transitória e regime permanente.

A Figura 14 apresenta, o Diagrama da malha de controle envolvendo o CLP, o inversor de frequência, o motor, a bomba, o tanque, o sensor de nível e a realimentação.

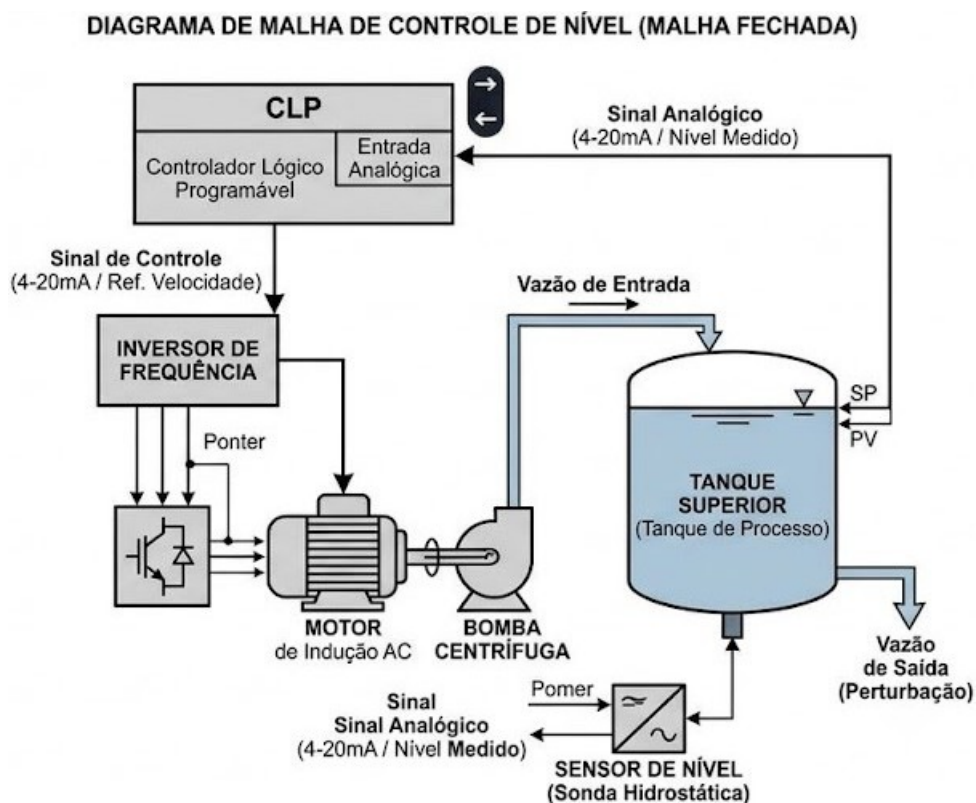


Figura 14 – Diagrama da malha de controle envolvendo o CLP, o inversor de frequência, o motor, a bomba, o tanque, o sensor de nível e a realimentação. Fonte: Kalatec (2024).

3 Desenvolvimento

3.1 Visão Geral da Arquitetura da Planta Didática

A planta didática portátil destinada ao controle de nível é constituída por dois tanques de acrílico, uma bomba centrífuga, sensores digitais de nível, uma válvula manual de saída e um quadro elétrico de acionamento.

A disposição física dos tanques e da bomba, bem como o posicionamento das tubulações utilizadas para o recalque e o retorno da água, pode ser observada na Figura 15.

Os principais componentes que integravam a configuração original do protótipo, bem como suas respectivas funções, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Componentes Principais do Protótipo

Componente	Função no sistema
Tanque inferior de acrílico	Reservatório de recirculação da água.
Tanque superior de acrílico	Reservatório cuja altura de água constitui a variável controlada.
Bomba centrífuga	Transferência de água do tanque inferior para o tanque superior.
Válvula de saída Manual	Ajuste da vazão gravitacional entre o tanque superior e o tanque inferior.
Quadro de acionamento	Acionamento do motor através de contadores e relés de acionamento
Cabo adaptado DB50–DB25	Interligação entre o kit e os pontos de entrada e saída utilizados no sistema.

A configuração física da planta apresenta os tanques dispostos verticalmente, permitindo que a água escoe do tanque superior para o tanque inferior por ação da gravidade. A bomba centrífuga promove a circulação no sentido oposto, retirando a água armazenada no reservatório inferior e conduzindo-a novamente ao tanque superior, estabelecendo, assim, um circuito fechado de recirculação. Na configuração original, cada tanque possuía dois sensores de nível do tipo boia, responsáveis pela geração de sinais digitais associados a níveis predeterminados. Esses dispositivos permitiam apenas a identificação de estados discretos do nível, não possibilitando a medição contínua da altura da coluna de água no interior dos reservatórios.



Figura 15 – Protótipo didático antes das modificações realizadas para implementação da leitura analógica de nível e do controle PID. Fonte: Acervo do autor (2026).

3.1.1 Quadro de Acionamento

A planta didática possui um quadro elétrico responsável pelo acionamento direto da bomba centrífuga e pela proteção do circuito. Os principais componentes presentes nessa configuração, bem como suas respectivas funções, são apresentados na Tabela 3.

A disposição física desses elementos pode ser observada na Figura 16.

Tabela 3 – Componentes principais do quadro antigo do protótipo

Componente	Função no acionamento
Disjuntor	Proteção contra curto-circuito.
Interruptor diferencial Residual	Proteção contra fuga de corrente a partir de 30 mA.
Contator	Acionamento direto da bomba.
Relé de interface 24V	Acionamento do contator AC através do sinal DC do CLP.

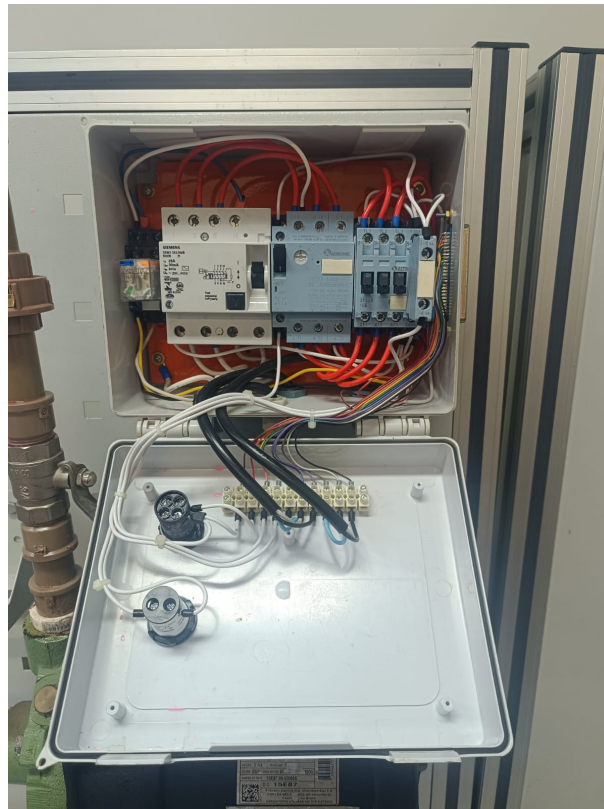


Figura 16 – Quadro de acionamentos antes das modificações realizadas para implementação da IHM. Fonte: Acervo do autor (2026).

Na configuração original, a bomba é acionada de forma direta por meio do contator instalado no quadro elétrico. O comando era proveniente de uma saída digital do CLP, cuja tensão é de 24 V em corrente contínua, aplicada ao relé de interface. O relé realiza o acionamento da bobina do contator, fornecendo a energia elétrica ao motor da bomba. Dessa forma, o sistema possibilitava apenas os estados de bomba ligada ou desligada, sem permitir a variação contínua de sua velocidade. O controle da planta era realizado por meio do kit didático *XC110*, fabricado pela Exsto, interligado ao protótipo pelo cabo adaptado *DB50 – DB25*. Essa conexão permitia a comunicação entre os sensores e atuadores da planta e os pontos de entrada e saída do controlador.

O kit *XC110* é equipado com um CLP Siemens *S7–1200*, modelo CPU *1214C DC/DC/DC*,

e uma Interface Homem-Máquina *KTP600 Basic Color PN*, com tela de 6 polegadas. Além desses dispositivos, o conjunto possui botões normalmente abertos e normalmente fechados, chaves seletoras, potenciômetros, relés, motores de 24 Vcc com encoders, voltímetro, amperímetro, fonte de alimentação de 24 Vcc e uma conexão *DB25* destinada à interligação com outros kits e plantas didáticas. A disposição dos componentes do conjunto pode ser observada na Figura 17.

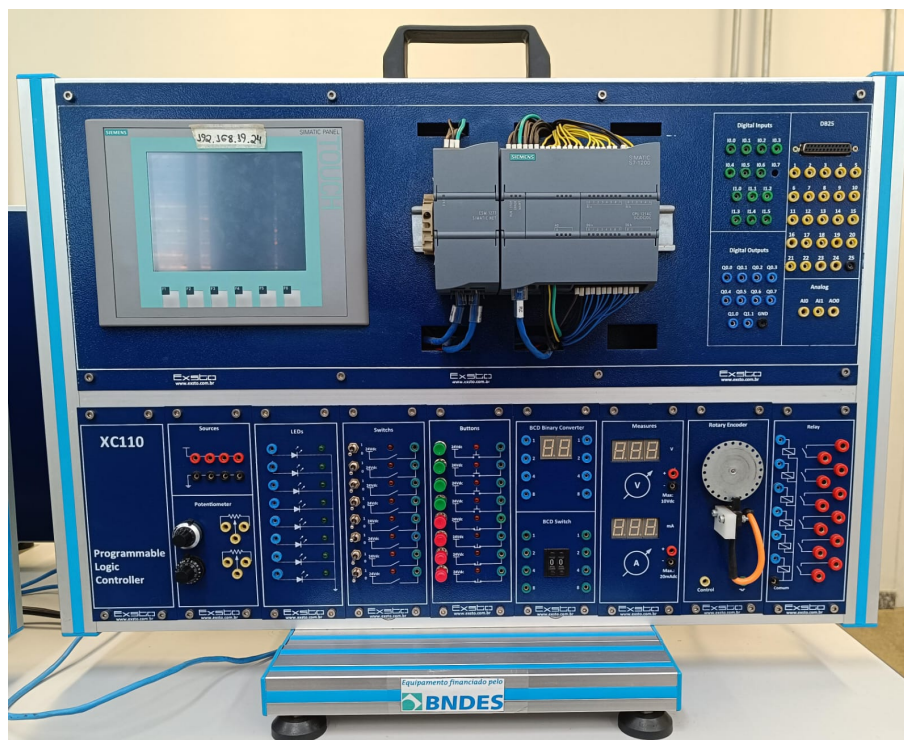


Figura 17 – KIT didático da Exsto XC110 para acionamentos e lógica de controle com CLP. Fonte: Acervo do autor (2026).

3.1.2 Estrutura Física

Os dois tanques que compõem a planta didática são fabricados em acrílico e possuem formato retangular, com seção transversal constante. Cada tanque apresenta, aproximadamente, 22 cm de largura, 13 cm de comprimento e 30 cm de altura total, resultando em um volume geométrico, aproximadamente de, 8,58 L. A bomba centrífuga encontra-se instalada na estrutura da bancada, entre os dois reservatórios, sendo responsável pela transferência da água do tanque inferior para o tanque superior. Para isso, a tubulação de recalque conduz o fluido até a parte superior da planta. O retorno da água ao reservatório inferior ocorre por meio de uma abertura localizada na parte inferior do tanque superior, permitindo o escoamento por ação da gravidade. A tubulação utilizada no sistema possui diâmetro interno nominal de 3/4 de polegada. A bancada apresenta dimensões totais aproximadas de 97 cm de altura, 71 cm de largura e 76 cm de profundidade. Embora sua estrutura permita o transporte entre diferentes ambientes, sua movimentação deve ser

realizada com cuidado, devido à massa aproximada de 35 kg e à presença conjunta de componentes elétricos, hidráulicos e mecânicos.

3.2 Instalação do Novo Quadro de Acionamento

Para a adequação da planta didática à nova arquitetura de controle, foi instalado um quadro de material de PVC destinado a abrigar os componentes de proteção e acionamento do sistema. A tampa do quadro foi recortada para possibilitar a fixação da interface de operação do inversor de frequência, instalada em uma etapa posterior do desenvolvimento. O disjuntor e o interruptor diferencial residual são instalados no interior do novo quadro e a permanência desses dispositivos teve como objetivo preservar as proteções elétricas da bancada, especialmente contra sobrecorrentes, curtos-circuitos e correntes de fuga, contribuindo para a segurança durante a operação e a realização de atividades práticas. Também foi instalada, na lateral do quadro, uma conexão fêmea DB50. Essa conexão permite a interligação da planta ao kit didático XC110 da Exsto, no qual se encontra o CLP responsável pela execução da lógica de controle. Além disso, a padronização dessa interface possibilita a conexão da bancada a outros equipamentos e plantas disponíveis no laboratório.

A Figura 18 ilustra a instalação deste quadro e seus componentes supracitados.



Figura 18 – Novo quadro de acionamento com a IHM do inversor. Fonte: Acervo do autor (2026).

3.3 Instalação da Régua de Bornes de Medição e do Inversor de Frequência

Em razão do espaço disponível no interior do novo quadro de acionamento, o inversor de frequência e a régua de bornes de passagem foram instalados na parte traseira da planta didática. Essa disposição permitiu melhor aproveitamento da estrutura da bancada e facilitou a organização das conexões elétricas entre os diferentes componentes. A régua de bornes foi adicionada para concentrar e organizar os pontos de conexão do circuito. Sua utilização facilita a realização de medições elétricas, atividades de manutenção e identificação dos condutores, além de permitir futuras ampliações ou a instalação de novos dispositivos sem a necessidade de alterações significativas na fiação existente. O inversor de frequência foi posicionado na região oposta ao quadro de acionamento, de modo a reduzir o percurso dos condutores e facilitar sua conexão com os componentes instalados no painel.

A disposição do inversor, da régua de bornes e dos demais elementos localizados na parte traseira da planta pode ser observada na Figura 19.



Figura 19 – Vista traseira do Kit com o inversor de frequência e o barramento de bornes.
Fonte: Acervo do autor (2026).

3.4 Instalação e Calibração da Sonda Hidrostática

A sonda hidrostática foi instalada no tanque superior com a finalidade de realizar a medição contínua da altura da coluna de água, correspondente à variável de processo controlada pelo sistema. Diferentemente dos sensores digitais do tipo boia presentes na configuração original, a sonda fornece um sinal analógico proporcional ao nível, permitindo o acompanhamento das variações da quantidade de água no reservatório ao longo do tempo. A calibração preliminar foi realizada por meio da leitura dos valores brutos disponibilizados pela entrada analógica do CLP, considerando diferentes alturas da coluna de água. No ambiente de programação TIA Portal, da Siemens, o sinal da altura de coluna d'água possui uma representação digital nominal de uma entrada analógica com variações de 0

a 27648, conforme a configuração e o tipo de sinal utilizado. Sendo assim, como a sonda escolhida possui uma faixa de medição de 0 a 10 m, ela converte essa medida em um valor de 0 a 10 V para o CLP e o CLP trabalha internamente com um valor bruto adimensional de 0 a 27658. Inicialmente, foram registradas as leituras correspondentes ao tanque vazio, ao nível intermediário e ao nível próximo do limite útil de operação. Com o tanque vazio, foi observado um valor bruto aproximado de 50. Para uma altura de aproximadamente 15 cm, correspondente à metade do reservatório, obteve-se o valor bruto de 1287. Por sua vez, com a coluna de água próxima de 28 cm, foi registrada uma leitura aproximada de 2200.

Os valores obtidos para a calibração são apresentados na Tabela 4. Esses pontos foram utilizados como referência inicial para estabelecer a relação entre o sinal bruto adquirido pelo CLP e a altura da coluna de água no tanque superior.

Tabela 4 – Pontos preliminares de calibração da sonda hidrostática

Condição	Altura aproximada	Valor bruto no CLP
Tanque vazio	0 cm	50
Tanque na metade	15 cm	1126
Nível próximo ao limite útil	28 cm	2200

3.5 Tratamento do Sinal Analógico no TIA Portal

O valor bruto adquirido pela entrada analógica do CLP é convertido em altura da coluna de água por meio dos blocos **NORM_X** e **SCALE_X**, disponíveis no ambiente de programação TIA Portal. Esse procedimento é necessário para transformar o sinal lido em uma variável expressa em unidade de engenharia, adequada ao monitoramento e ao controle do nível no tanque superior. Inicialmente, o bloco **NORM_X** foi utilizado para normalizar o valor bruto proveniente da sonda hidrostática. Para isso, foram adotados como limites preliminares os valores de 50 e 2200, correspondentes, respectivamente, às condições de tanque vazio e nível próximo ao limite útil de operação.

Em seguida, o valor normalizado é aplicado ao bloco **SCALE_X**, responsável por converter essa faixa para a altura útil do tanque superior. Para essa conversão, foram definidos como limites de saída os valores de 0 cm e 28 cm, permitindo que o sinal analógico passe a representar diretamente a altura da coluna de água no reservatório. Esse tratamento do sinal é fundamental para a implementação da estratégia de controle, pois permite que a variável medida seja utilizada de forma compatível com o valor de referência definido para o sistema, além de facilitar a visualização do nível em unidades físicas compreensíveis ao operador. A implementação dos blocos citadas acima é apresentada na Figura 20.

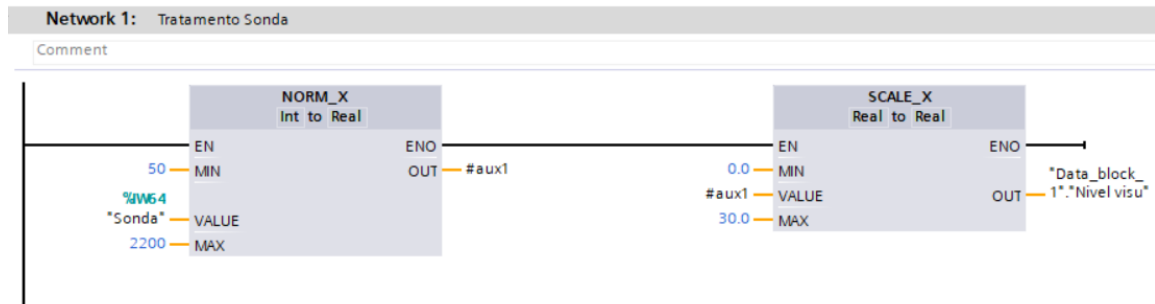


Figura 20 – Trecho do programa implementado no CLP, contendo a leitura do sinal analógico, o escalonamento da variável de nível e a chamada do bloco de controle PID. Fonte: Elaborado pelo autor no TIA Portal (2026).

3.6 Integração do Inversor de Frequência

O inversor de frequência, que de acordo com a fabricante Altus *AD700*, modelo *4T – 2.2GB*, possui potência nominal de 2,2 kW, foi integrado à planta didática com a finalidade de controlar a velocidade de rotação da bomba centrífuga. Com essa modificação, o acionamento da bomba deixou de ocorrer apenas nos estados ligado e desligado, tornando-se possível variar sua velocidade e, conseqüentemente, a vazão de água fornecida ao tanque superior. A operação do inversor utiliza sinais digitais e analógicos provenientes do sistema de controle. O sinal digital, conectado à entrada *DI1*, é responsável pela habilitação do inversor, enquanto o sinal analógico, aplicado à entrada *AI1*, define a referência de velocidade da bomba. Dessa forma, a atuação da bomba depende tanto da autorização fornecida pelo comando digital quanto do valor da referência analógica enviada pelo controlador.

A referência analógica foi configurada na faixa de 0 a 10 V, estabelecendo-se uma relação linear entre a tensão de comando e a frequência de saída do inversor. Nessa configuração, o valor de 0 V corresponde à frequência de 0 Hz, enquanto o valor de 10 V corresponde à frequência máxima de 60 Hz. Assim, os valores intermediários de tensão produzem frequências proporcionais dentro dessa faixa de operação. Durante os testes experimentais, verificou-se que, para frequências inferiores a aproximadamente 10,85 Hz, a bomba permanecia em funcionamento, porém sem produzir vazão suficiente para transportar a água até o tanque superior. Para evitar a operação do conjunto motor-bomba nessa região ineficaz, foi implementada que a referência da porcentagem enviada pelo controlador, de 0 a 100%, fosse a referência para a velocidade variar de 10,85 a 60 Hz. Além disso, foi implementado uma lógica para toda vez que a velocidade fosse 0%, para que não houvesse bombeamento de água, já que 0% equivale a 10,85 Hz, fosse enviado 0 na escala de 0 a 27648 ao inversor, permitindo que ele não girasse.

A Tabela 5 apresenta as principais características e configurações adotadas para a integração do inversor de frequência ao sistema.

Tabela 5 – Principais características e configurações do inversor Altus AD700

Parâmetro	Valor configurado
Modelo do inversor	4T-2.2GB
Potência nominal	2,2 kW
Tensão de alimentação	220 V
Corrente nominal	9 A
Faixa da referência analógica	0–10 V
Frequência mínima configurada	0 Hz
Limite operacional mínimo da bomba	10,85 Hz
Frequência máxima configurada	60 Hz
Tempo de aceleração	0,5 s
Tempo de desaceleração	0,5 s
Entrada digital de habilitação	DI1
Entrada analógica de referência	AI1

A Figura 21 apresenta os blocos NORM_X e SCALE_X tratando o sinal do inversor de frequência.

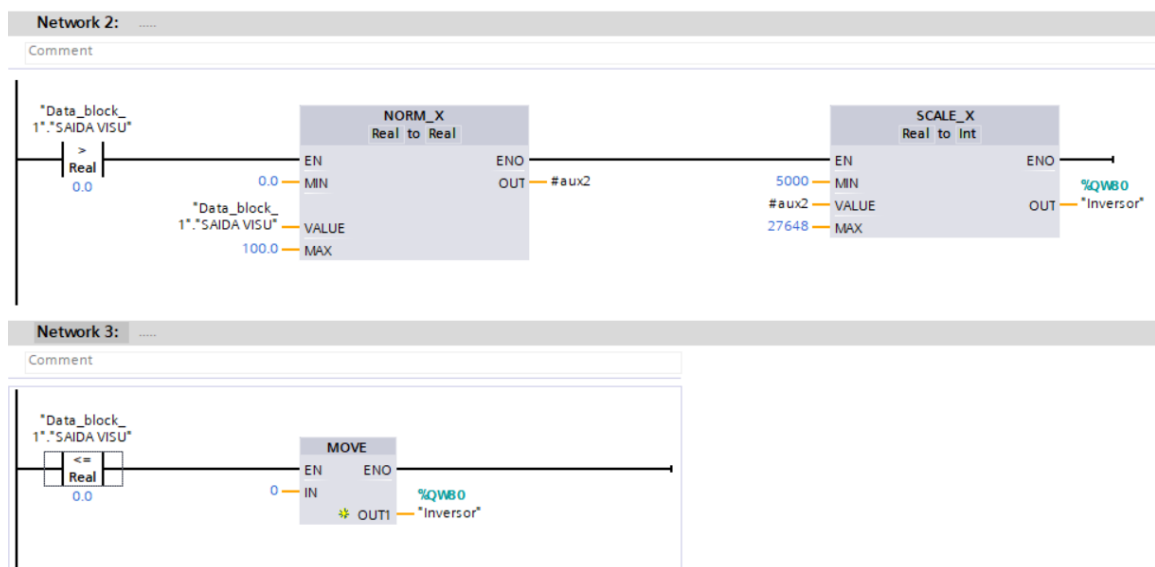


Figura 21 – Trecho do programa implementado no CLP, contendo o controle de referência da velocidade enviada ao inversor. Fonte: Elaborado pelo autor no TIA Portal (2026).

A interligação elétrica foi realizada por meio do conector *DB25* da planta, que conduz os sinais provenientes do kit didático XC110 até os terminais de controle do inversor. O diagrama das conexões entre os terminais do inversor e os respectivos pinos do conector *DB25* é apresentado na Figura 22.

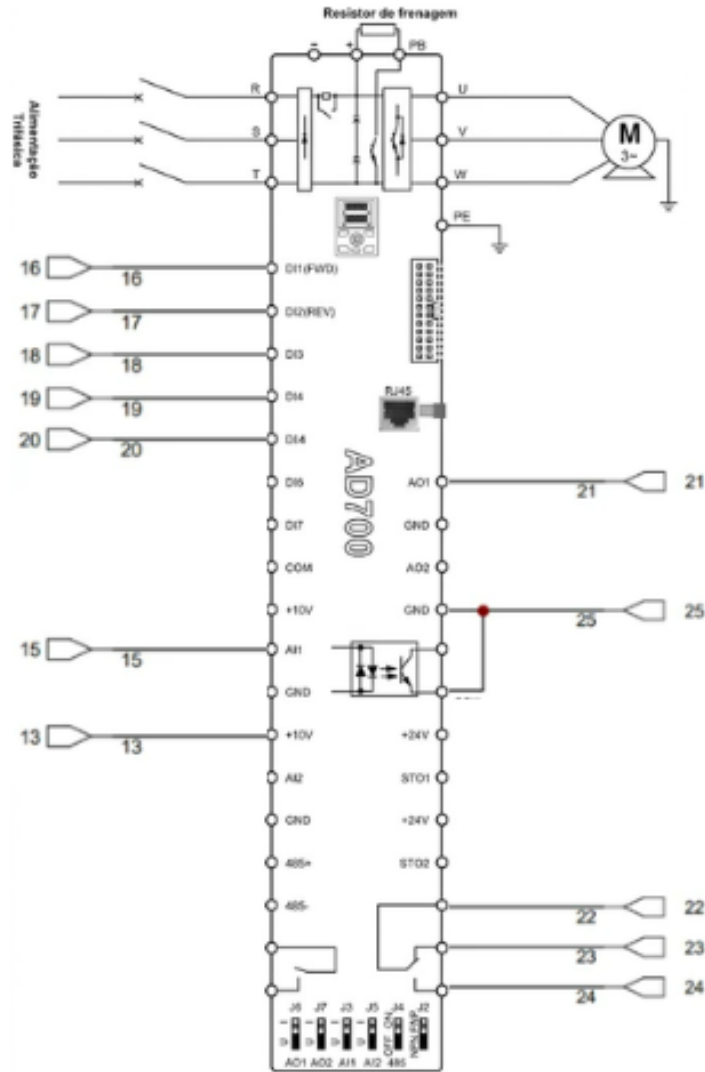


Figura 22 – Diagrama de interligação dos terminais de controle do inversor de frequência aos pinos do conector DB25 da planta didática. Fonte: Acervo do autor (2026).

3.7 Implementação do bloco PID

O controle de nível foi implementado no ambiente TIA Portal V12, utilizando o CLP Siemens *S7 – 1200* em uma rotina cíclica de execução. Para essa finalidade, foi empregado o bloco tecnológico **PID Compact**, responsável por realizar automaticamente o cálculo da ação de controle a partir da comparação entre o valor desejado e o valor medido da variável de processo. O funcionamento do controlador baseia-se em três informações principais. A primeira corresponde ao valor de referência (*setpoint*), definido pelo operador como a altura desejada da água no tanque superior. A segunda é a variável de processo, obtida a partir da leitura da sonda hidrostática após o tratamento e o escalonamento do sinal analógico. A terceira é a variável manipulada, correspondente ao sinal de saída do controlador, utilizado para definir a velocidade de operação da bomba por meio do inversor de frequência. A partir da diferença entre o valor de referência e a variável de

processo, o bloco **PID Compact** calcula o erro de controle e determina a saída necessária para reduzir esse erro ao longo do tempo. No protótipo desenvolvido, essa saída é expressa em porcentagem e posteriormente associada ao comando de velocidade enviado ao inversor de frequência, que atua diretamente sobre a bomba centrífuga.

A estrutura funcional da malha de controle implementada é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Elementos da malha de controle PID

Elemento	Definição no protótipo
Valor de referência (SP)	Altura desejada da água no tanque superior, em cm.
Variável de processo (PV)	Altura medida pela sonda hidrostática após o escalonamento, em cm.
Erro	Diferença entre SP e PV.
Saída do controlador (MV)	Porcentagem de velocidade destinada ao acionamento da bomba.
Atuador	Inversor de frequência Altus AD700 e bomba centrífuga.
Processo	Variação do nível de água no tanque superior.
Perturbação	Alteração da vazão de saída provocada pela atuação manual na válvula.

Durante a implementação, o bloco PID foi configurado para receber a variável medida em unidade de engenharia, isto é, em centímetros de coluna de água, o que facilita tanto a parametrização do controlador quanto a interpretação dos resultados pelo operador. Além disso, os parâmetros do controlador puderam ser ajustados com o auxílio do recurso de autotuning disponível no próprio ambiente do TIA Portal, permitindo uma sintonia inicial compatível com a dinâmica da planta.

A conexão entre os kits feita pelo *DB50 – DB25* é apresentada na Figura 23.



Figura 23 – Conexão do kit XC110 com a planta de controle de nível. Fonte: Acervo do autor (2026).

3.8 Desenvolvimento da IHM

A Interface Homem-Máquina (IHM) foi desenvolvida com o objetivo de reunir, em uma única tela, as principais informações e comandos necessários para a operação da planta didática. Essa interface permite ao usuário acompanhar o comportamento do sistema em tempo real e interagir com as variáveis mais relevantes do processo de controle de nível. Entre os elementos disponibilizados na tela, destaca-se o campo de *setpoint*, no qual o operador pode inserir a altura desejada da água no tanque superior. A variável de processo é apresentada por meio de um indicador de nível, que exibe em tempo real a altura medida pela sonda hidrostática. Além disso, a interface contém um indicador de velocidade, responsável por informar a porcentagem de acionamento aplicada à bomba centrífuga pelo controlador. A tela também dispõe de um comando associado à válvula, permitindo ao operador alterar a condição de saída da água do tanque e, consequentemente, introduzir diferentes condições de operação no sistema. Dessa forma, a IHM contribui tanto para a supervisão do processo quanto para a realização de testes e análises experimentais da malha de controle.

A Figura 24 apresenta a tela de interface IHM desenvolvida no sistema de controle de nível.

Além da disponibilização das variáveis e dos comandos, o desenvolvimento da interface considerou aspectos relacionados à usabilidade, à eficiência e à eficácia da operação. A usabilidade diz respeito à facilidade com que o usuário compreende a organização da

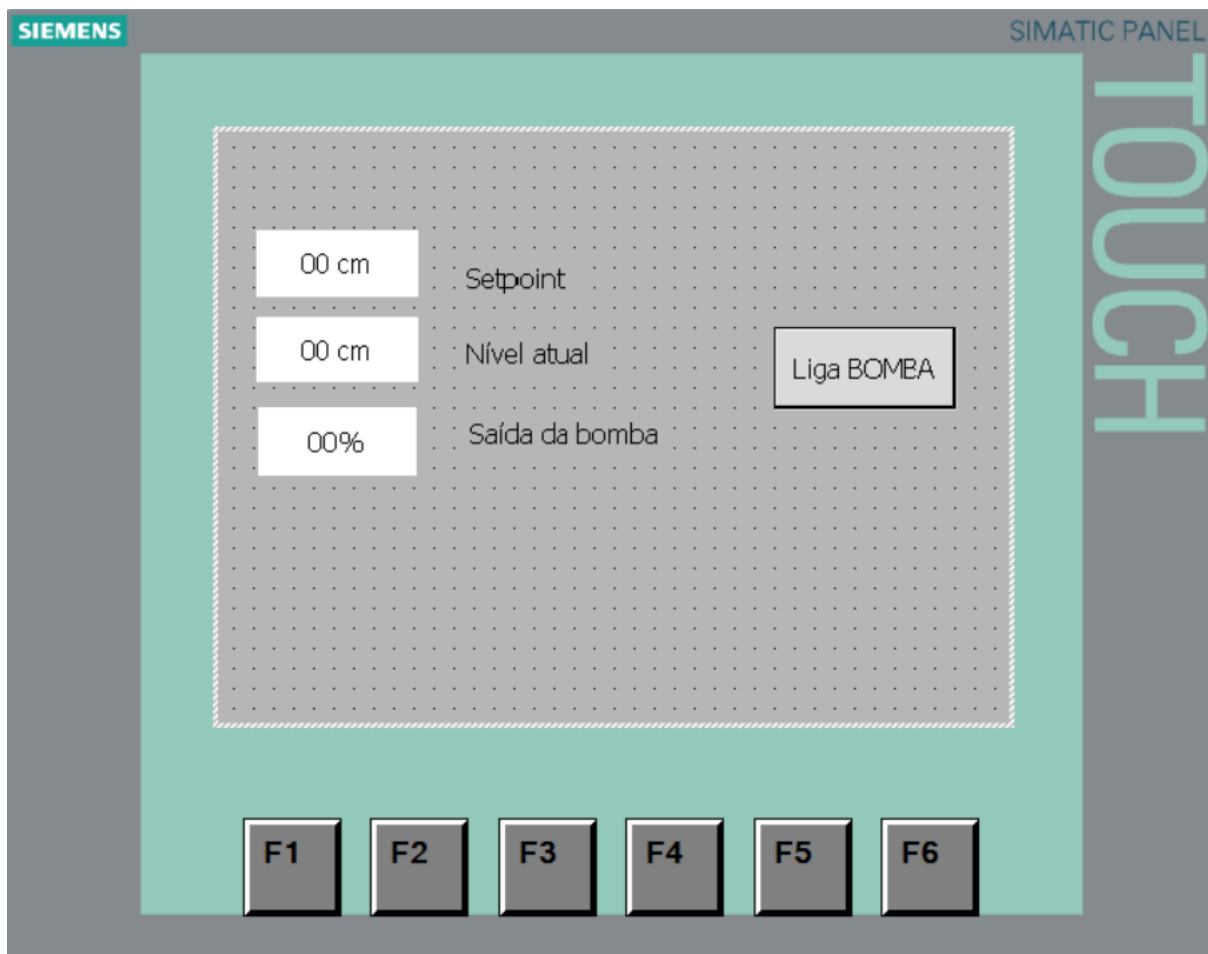


Figura 24 – Tela da interface homem-máquina desenvolvida para supervisão e operação do sistema de controle de nível. Fonte: Elaborado pelo autor no TIA Portal (2026).

tela, identifica as informações apresentadas e executa as ações necessárias. Nesse sentido, buscou-se apresentar os elementos de forma direta, com identificação clara das variáveis e concentração das principais funções em uma única tela. Essa organização reduz a necessidade de navegação entre diferentes páginas e facilita a utilização da planta por usuários que ainda estejam em processo de familiarização com sistemas de automação.

A eficácia da interface está relacionada à capacidade de permitir que o operador realize corretamente as tarefas previstas. No sistema desenvolvido, isso significa possibilitar a definição do valor de referência, o acompanhamento do nível medido, a observação da atuação da bomba e a modificação da condição da válvula de saída. A apresentação simultânea dessas informações permite verificar se o processo está respondendo de acordo com o comando inserido e se o controlador está atuando para reduzir a diferença entre o nível desejado e o nível medido.

A eficiência, por sua vez, está associada ao tempo e ao esforço necessários para executar as operações. A utilização de uma única tela principal reduz a quantidade de

comandos exigidos para configurar e acompanhar os ensaios. O operador pode inserir o valor de referência e, na mesma interface, observar o comportamento da variável de processo e a porcentagem de acionamento da bomba. Essa disposição contribui para uma análise mais rápida da resposta do sistema, principalmente durante os testes de variação do setpoint e de aplicação de perturbações.

A proximidade visual entre o valor de referência e o indicador do nível medido também favorece a interpretação da malha de controle. Ao comparar essas duas informações, o usuário pode identificar a existência de erro, acompanhar sua redução ao longo do tempo e observar eventuais ocorrências de sobressinal ou oscilação. Da mesma forma, a indicação da porcentagem de velocidade da bomba permite relacionar a atuação do controlador ao comportamento do nível, evidenciando como o sinal de controle modifica a vazão de entrada no tanque superior.

A organização da IHM também foi orientada por princípios presentes na norma ANSI/ISA-101, relacionada ao desenvolvimento de interfaces para sistemas de automação de processos. Entre esses princípios, destacam-se a priorização das informações operacionais, a consistência na apresentação dos elementos, a facilidade de navegação e a redução de componentes visuais que não contribuam para a compreensão do processo. Embora a interface desenvolvida possua estrutura simplificada, em razão do caráter didático e da dimensão da planta, essas orientações foram consideradas na disposição das informações e dos comandos.

4 Resultados

4.1 Leitura de Nível do Tanque Superior

Após a execução do programa no CLP, foram realizados testes para verificar a resposta da sonda hidrostática durante o preenchimento do tanque superior. Na condição de reservatório vazio, o valor bruto registrado pela entrada analógica foi de aproximadamente 50. À medida que o tanque foi preenchido manualmente, observou-se o aumento progressivo do valor bruto fornecido pelo sensor. Para uma altura de coluna de água próxima de 28 cm, correspondente ao limite útil adotado para a operação do reservatório, foi obtida uma leitura aproximada de 2200. No intervalo analisado, o sinal apresentou comportamento aproximadamente linear em relação à altura da coluna de água. Esse resultado permitiu utilizar os valores de 50 e 2200 como limites preliminares para a normalização do sinal no bloco **NORM_X** e sua posterior conversão para a faixa de 0 a 28 cm pelo bloco **SCALE_X**. A leitura obtida confirmou que a sonda hidrostática foi capaz de acompanhar continuamente as variações de nível do tanque superior, fornecendo ao sistema de controle uma variável de processo analógica, em substituição à identificação exclusivamente discreta anteriormente realizada pelos sensores do tipo boia.

A Figura 25 apresenta a curva de calibração desenvolvida no sistema de controle de nível.

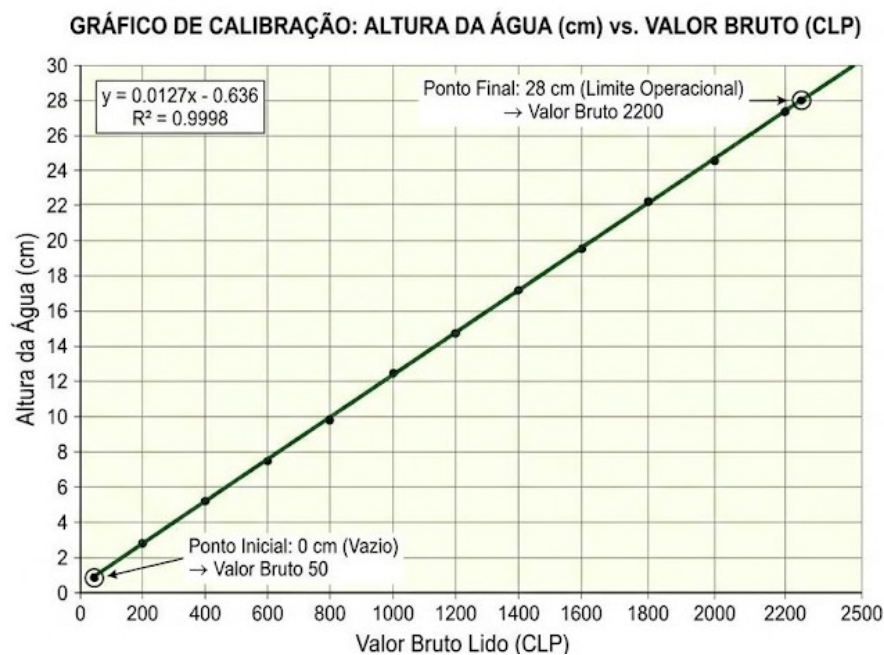


Figura 25 – Curva de Calibração do Sistema de Controle de Nível. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2 Validação do Acionamento da Bomba

Por meio da avaliação do controlador PID, foi realizado um ensaio para verificar o funcionamento do inversor de frequência e sua resposta ao sinal analógico de referência. Para esse teste, utilizou-se um potenciômetro capaz de fornecer uma tensão variável na faixa de 0 a 10 V à entrada analógica do inversor. O inversor foi configurado para operar em modo remoto, utilizando o sinal aplicado ao terminal analógico como referência de frequência. Nessa configuração, a faixa de 0 a 10 V foi convertida proporcionalmente em uma frequência de saída entre 0 e 60 Hz. Dessa forma, o aumento da tensão fornecida pelo potenciômetro resultou no aumento da frequência aplicada ao motor e, conseqüentemente, da velocidade de rotação da bomba centrífuga. Durante o ensaio, foram aplicados cinco valores de referência, correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da faixa de comando. Para cada condição, foram registradas a tensão medida na entrada analógica e a frequência de saída indicada pelo inversor. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Registro do Acionamento da Bomba por Referência Analógica

Referência (%)	Tensão (V)	Frequência (Hz)
0	0,07	0
25	2,48	14,9
50	4,99	30,0
75	7,49	45,0
100	9,97	60,0

Os valores registrados demonstraram uma relação aproximadamente linear entre a tensão de referência e a frequência de saída do inversor. Para uma referência de 50%, por exemplo, foi medida uma tensão de 4,99 V e obtida uma frequência de 30 Hz, valores próximos à metade das respectivas faixas configuradas. De modo semelhante, a referência de 100% resultou em 9,97 V e 60 Hz. As pequenas diferenças observadas entre as tensões teóricas e os valores medidos podem estar associadas às tolerâncias do potenciômetro, do instrumento de medição e do circuito de geração do sinal analógico. Ainda assim, os resultados confirmaram o funcionamento adequado da entrada analógica e a correta conversão do sinal de 0 a 10 V para a faixa de frequência de 0 a 60 Hz, validando o acionamento variável da bomba antes da integração com a saída do controlador PID.

4.3 Ensaio de resposta ao *Setpoint* utilizando PID

4.3.1 Primeiro ensaio com Parâmetros Iniciais

O primeiro ensaio de resposta ao *setpoint* foi realizado com o tanque superior inicialmente vazio e o valor de referência definido em 60% da altura útil do reservatório. Considerando a faixa de medição adotada, compreendida entre 0 e 28 cm, esse valor

correspondeu a uma altura desejada de aproximadamente 16,8 cm. Inicialmente, o bloco PID_Compact foi executado com os parâmetros previamente configurados no TIA Portal. Os valores utilizados nessa etapa são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros iniciais do controlador PID

Parâmetro	Valor inicial
Ganho proporcional	1
Tempo de ação integral	20 s
Tempo de ação derivativa	20 s
Coefficiente de atraso da ação derivativa	0
Ponderação da ação proporcional	0,0
Ponderação da ação derivativa	0,0
Tempo de amostragem do algoritmo PID	1,0 s

Com essa parametrização, o bloco PID_Compact foi colocado em operação e o comportamento da malha de controle foi registrado por meio da ferramenta de monitoramento do TIA Portal. A resposta obtida durante o primeiro ensaio é apresentada na Figura 26.

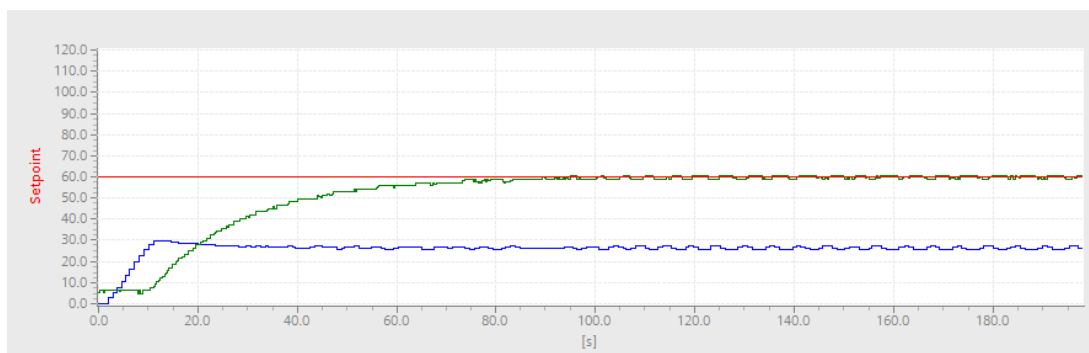


Figura 26 – Resposta do sistema de controle de nível durante o primeiro ensaio com os parâmetros iniciais do bloco PID_Compact. A linha vermelha representa o *setpoint*, a linha verde corresponde ao nível atual do tanque e a linha azul indica a saída do controlador aplicada à bomba. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

Conforme observado na Figura 26, a variável de processo apresentou crescimento progressivo até se aproximar do valor de referência estabelecido. A linha vermelha representa o *setpoint*, expresso como porcentagem da altura útil do tanque; a linha verde indica o nível atual medido pela sonda hidrostática; e a linha azul representa a porcentagem de saída do controlador destinada ao acionamento da bomba. Após atingir a região próxima ao *setpoint*, o nível permaneceu dentro de uma faixa aproximada de $\pm 2\%$ em relação ao valor de referência, indicando baixo erro em regime permanente. Entretanto, o sistema demandou aproximadamente 90 segundos para alcançar uma condição considerada estável, evidenciando um tempo de acomodação relativamente elevado.

Após a estabilização do nível, a saída do controlador permaneceu próxima de 25% de sua faixa máxima. Considerando que a referência de 100% corresponde à frequência de 60 Hz, esse valor equivale a uma frequência de aproximadamente 15 Hz aplicada ao conjunto motor-bomba. Essa condição foi suficiente para compensar a vazão de saída do tanque e manter o nível próximo ao valor de referência estabelecido. Os resultados demonstraram que, mesmo com os parâmetros iniciais, o controlador foi capaz de conduzir o nível ao *setpoint* e mantê-lo com pequena variação. Contudo, o tempo necessário para a estabilização indicou a possibilidade de aprimoramento da resposta dinâmica por meio da sintonia dos parâmetros do controlador.

4.3.2 Segundo Ensaio com Ajuste Grosso do Controlador (*Pré-Tuning*)

Com o intuito de melhorar a resposta do controlador, foi realizado o procedimento de sintonia automática do bloco PID_Compact, por meio do ajuste grosso (*pre-tuning*). Nessa etapa, o controlador avalia a dinâmica básica do sistema a partir da aplicação de pequenas variações no atuador, observando a forma como a variável de processo responde ao acionamento da bomba. O acompanhamento desse procedimento foi realizado por meio do PID_Compact do TIA Portal, que monitora as variáveis utilizadas em seu ambiente. A Figura 27 apresenta o comportamento do sistema durante e após essa etapa de sintonia. Pode-se observar que o controlador alterna o acionamento do motor da bomba, promovendo um comportamento semelhante a ciclos de liga e desliga, com o objetivo de identificar a resposta dinâmica da planta.

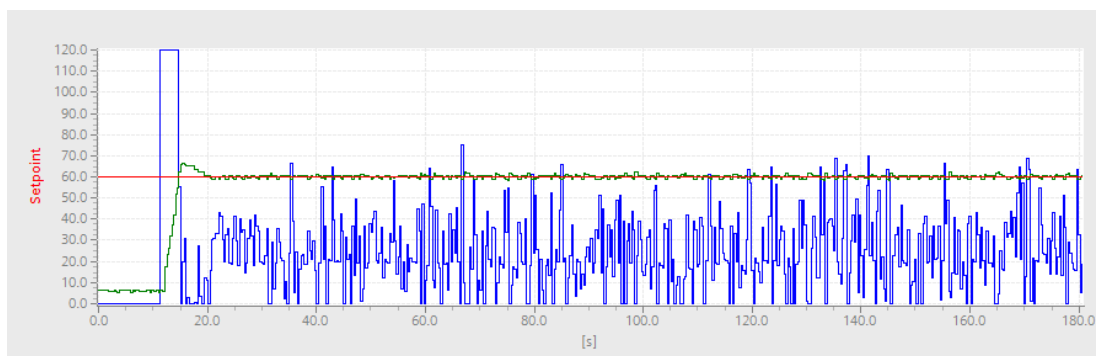


Figura 27 – Monitoramento do procedimento de ajuste grosso (*pre-tuning*) do bloco PID_Compact no TIA Portal. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no software (2026).

Mesmo durante a execução desse procedimento de sintonia, o controlador conseguiu manter o nível do tanque relativamente próximo ao valor de referência, apresentando variações de aproximadamente 3% acima e abaixo do *setpoint*. Esse comportamento indica que, embora o sistema ainda estivesse em fase de identificação e ajuste, a malha de controle já apresentava capacidade de manter a variável de processo em uma faixa próxima do

valor desejado. Ao final do procedimento, o TIA Portal forneceu novos valores para os parâmetros do controlador, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros obtidos após o ajuste grosso do controlador

Parâmetro	Valor obtido
Ganho proporcional	7,759925
Tempo de ação integral	1,305434 s
Tempo de ação derivativa	0,2284509 s
Coeficiente de atraso da ação derivativa	0,1
Ponderação da ação proporcional	0,8
Ponderação da ação derivativa	0,0
Tempo de amostragem do algoritmo PID	0,09999515 s

Os parâmetros obtidos após o ajuste grosso indicam uma sintonia mais compatível com a dinâmica da planta em comparação com a configuração inicial, especialmente pela elevação do ganho proporcional e pela redução significativa dos tempos das ações integral e derivativa. Esses novos valores passaram a servir como base para os ensaios subsequentes de resposta do sistema.

4.3.3 Terceiro Ensaio com Ajuste Fino do Controlador (*Fine Tuning*)

Com o objetivo de melhorar o tempo de resposta do sistema após o ajuste grosso, foi realizado o procedimento de ajuste fino (*fine tuning*) do bloco PID_Compact. Nessa etapa, o controlador provoca pequenas oscilações da variável de processo em torno do *setpoint*, avaliando a resposta dinâmica da planta para estimar parâmetros mais adequados às condições de operação próximas do regime permanente. A Figura 28 apresenta o comportamento do sistema após o procedimento de ajuste fino. Após o ensaio, foram observados diversos picos na saída do controlador, os quais resultaram em variações rápidas na referência de frequência enviada ao inversor e, conseqüentemente, na velocidade da bomba centrífuga.

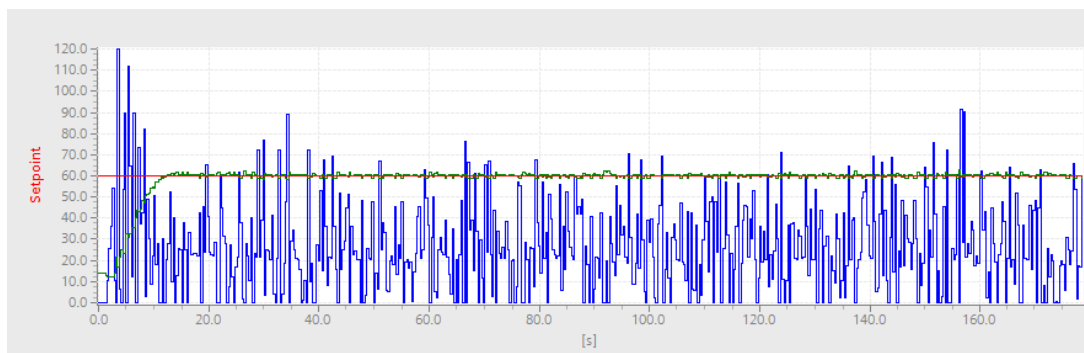


Figura 28 – Comportamento da variável de processo, do *setpoint* e da saída do controlador durante e após o procedimento de ajuste fino do bloco PID_Compact. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

Conforme observado na Figura 28, a saída do controlador apresentou oscilações e picos sucessivos, sem alcançar uma condição estável durante o período analisado. Isso ocorreu em razão da ação derivativa do controlador PID, que responde à taxa de variação do erro e antecipa tendências de mudança na variável de processo. Com base nessa variação, o controlador ajusta a variável manipulada para reduzir o desvio entre o valor medido e o valor de referência. Ao final do procedimento, o TIA Portal apresentou os parâmetros de sintonia indicados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos após o ajuste fino do controlador

Parâmetro	Valor obtido
Ganho proporcional	3,688756
Tempo de ação integral	4,079322 s
Tempo de ação derivativa	1,035871 s
Coeficiente de atraso da ação derivativa	0,1
Ponderação da ação proporcional	0,2517205
Ponderação da ação derivativa	0,0
Tempo de amostragem do algoritmo PID	0,09999944 s
Estrutura do controlador	PID

Mesmo com as oscilações verificadas na saída do controlador, o nível permaneceu dentro de uma faixa aproximada de $\pm 3\%$ em relação ao *setpoint*. Isso demonstra que a variável controlada se manteve próxima ao valor desejado, apesar da atuação irregular observada na bomba. Entretanto, como a saída do controlador não apresentou estabilização e manteve variações frequentes na referência de frequência, os parâmetros obtidos nesse procedimento não foram adotados como configuração definitiva. Diante desse resultado, foram avaliadas outras abordagens de parametrização e operação no ensaio seguinte, buscando reduzir as oscilações da variável manipulada e obter uma atuação mais estável do conjunto motor-bomba.

4.4 Ensaio de Resposta ao *Setpoint* utilizando Controlador PI

4.4.1 Primeiro Ensaio com Parâmetros Iniciais

Com o objetivo de melhorar a resposta do sistema às variações de *setpoint* e reduzir as oscilações observadas na saída do controlador, foram realizadas algumas alterações na configuração da aplicação no Tia Portal. Inicialmente, a variável de processo passou a ser apresentada em centímetros, em vez de porcentagem da capacidade total do tanque, permitindo uma visualização mais direta e intuitiva do nível real do líquido. Além disso, os tempos de aceleração e desaceleração configurados no inversor de frequência foram ajustados para 0 s. Essa alteração teve como finalidade reduzir os atrasos introduzidos pelo acionamento da bomba, permitindo que as variações determinadas pelo controlador fossem aplicadas de maneira mais rápida ao processo. Dessa forma, buscou-se aumentar a velocidade de resposta da variável manipulada diante das correções calculadas pelo controlador.

Também foi retirada a parcela derivativa do controlador, passando-se a utilizar uma estrutura PI. A ação derivativa atua com base na taxa de variação do erro e, por esse motivo, apresenta maior sensibilidade a ruídos, pequenas oscilações e variações no sinal proveniente do sensor de nível. Como o processo analisado possui dinâmica relativamente lenta e comportamento predominantemente integrativo, característico de sistemas de controle de nível, a utilização da parcela derivativa não apresentou benefícios significativos para a resposta do sistema. Ao contrário, sua atuação poderia provocar variações rápidas e indesejadas na frequência da bomba. Assim, optou-se pela utilização do controlador PI, cuja ação proporcional proporciona uma resposta imediata ao erro, enquanto a ação integral contribui para a eliminação do erro em regime permanente.

Após a realização dessas modificações, foram novamente inseridos no controlador os parâmetros iniciais apresentados na Tabela 8. A resposta obtida nesse ensaio é apresentada na Figura 29.

Observa-se que o controlador foi capaz de conduzir o nível do tanque até o valor de referência estabelecido, demonstrando que a estratégia de controle adotada apresentou funcionamento satisfatório. Entretanto, o sistema levou aproximadamente 100 s para atingir o nível desejado, evidenciando uma resposta ainda relativamente lenta. Esse resultado indicou a necessidade de novos ajustes nos parâmetros proporcional e integral, com o objetivo de reduzir o tempo de subida e melhorar o desempenho transitório do controlador, sem comprometer a estabilidade do sistema.

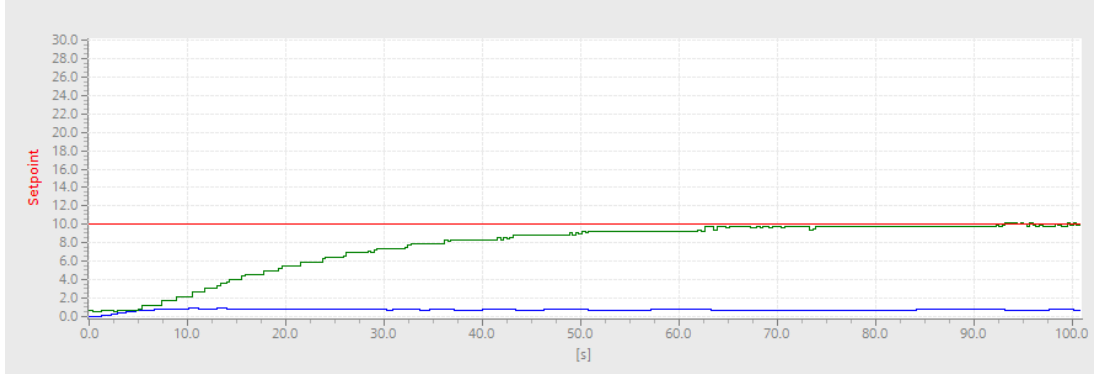


Figura 29 – Comportamento da variável de processo, do *setpoint* e da saída do controlador durante o primeiro teste utilizando apenas o controlador PI. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

4.4.2 Segundo Ensaio com Ajuste Fino do Controlador PI

Após o primeiro ensaio foi realizado um novo procedimento de ajuste fino do controlador. Durante o procedimento de ajuste fino, o controlador realizou variações controladas na variável manipulada, alterando a frequência de acionamento da bomba para avaliar a resposta dinâmica do nível do tanque. A partir do comportamento observado, o bloco de controle determinou novos parâmetros para a atuação proporcional e integral. O comportamento do sistema durante esse procedimento é apresentado na Figura 30.

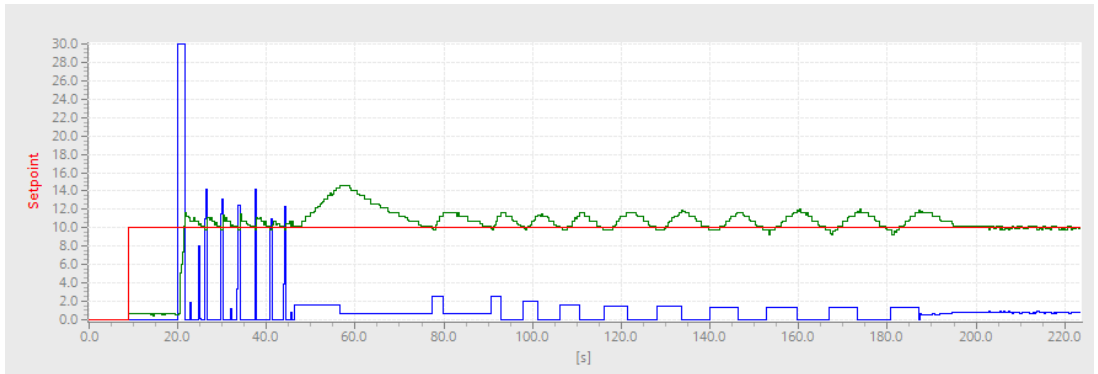


Figura 30 – Comportamento da variável de processo, do *setpoint* e da saída do controlador durante o procedimento de ajuste fino utilizando a estrutura PI. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

Após a conclusão do procedimento, foi obtido um ganho proporcional de $K_p = 7,896196$ e um tempo de ação integral de $T_i = 1,32338$ s. O tempo de amostragem do algoritmo de controle foi mantido em aproximadamente 0,1 s, enquanto a ponderação da ação proporcional permaneceu configurada em 0,8. Como a estrutura utilizada nesse ensaio foi a PI, os parâmetros relacionados à parcela derivativa não foram considerados na atuação efetiva do controlador. Os valores adquiridos foram sintetizados na Tabela 11.

Os novos parâmetros foram, então, aplicados ao sistema para avaliar sua resposta

Tabela 11 – Parâmetros configurados no controlador PI

Parâmetro	Símbolo	Valor
Ganho proporcional	K_p	7,896196
Tempo de ação integral	T_i	1,32338 s
Tempo de ação derivativa	T_d	0,2315915 s
Coefficiente de atraso da ação derivativa	a	0,1
Ponderação da ação proporcional	b	0,8
Ponderação da ação derivativa	c	0,0
Tempo de amostragem do algoritmo PID	T_s	0,1000003 s

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

diante do *setpoint* estabelecido. O comportamento obtido após o ajuste fino é apresentado na Figura 31.

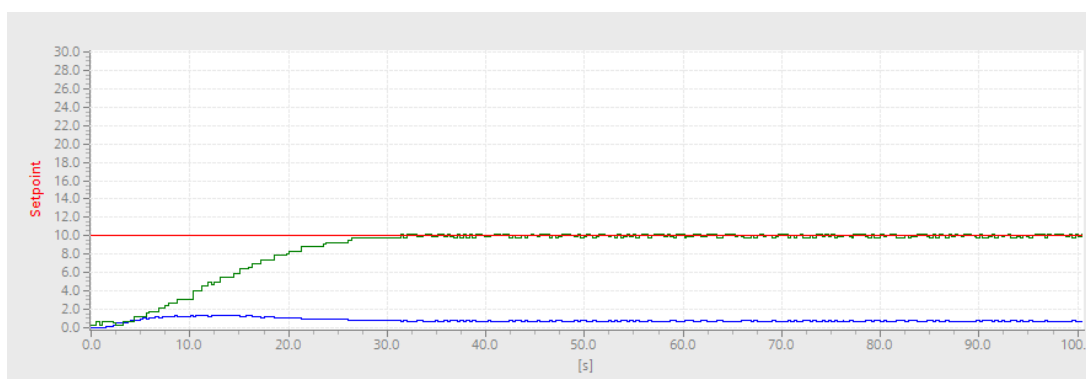


Figura 31 – Comportamento da variável de processo, do *setpoint* e da saída do controlador após a aplicação dos parâmetros obtidos no ajuste fino do controlador PI. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

Conforme apresentado na Figura 31, o controlador conduziu o nível do tanque até o valor de referência de maneira satisfatória, apresentando uma resposta consideravelmente mais rápida do que aquela observada no primeiro ensaio. O nível desejado foi atingido em pouco mais de 30 segundos, enquanto, com os parâmetros iniciais, o sistema havia levado aproximadamente 100 segundos para alcançar o mesmo valor. Além da redução do tempo de resposta, verificou-se que a variável de processo permaneceu estável nas proximidades do *setpoint*, sem a ocorrência de oscilações significativas. Dessa forma, o ajuste fino dos parâmetros proporcional e integral proporcionou uma melhoria expressiva no desempenho transitório do sistema, confirmando a adequação da estrutura PI para o controle de nível da bancada experimental.

4.4.3 Terceiro Ensaio após Novo Ajuste Fino do Controlador

Após o resultado obtido no ensaio anterior, realizou-se um novo procedimento de ajuste fino do bloco `PID_Compact`, com o objetivo de verificar se uma nova identificação da dinâmica da planta poderia reduzir as oscilações da saída e melhorar o tempo de resposta do sistema. Concluída a nova etapa de sintonia, realizou-se outro ensaio de resposta ao *setpoint*, mantendo-se as condições de operação utilizadas nos testes anteriores. O comportamento da variável de processo, do valor de referência e da saída do controlador após a aplicação dos novos parâmetros é apresentado na Figura 32.

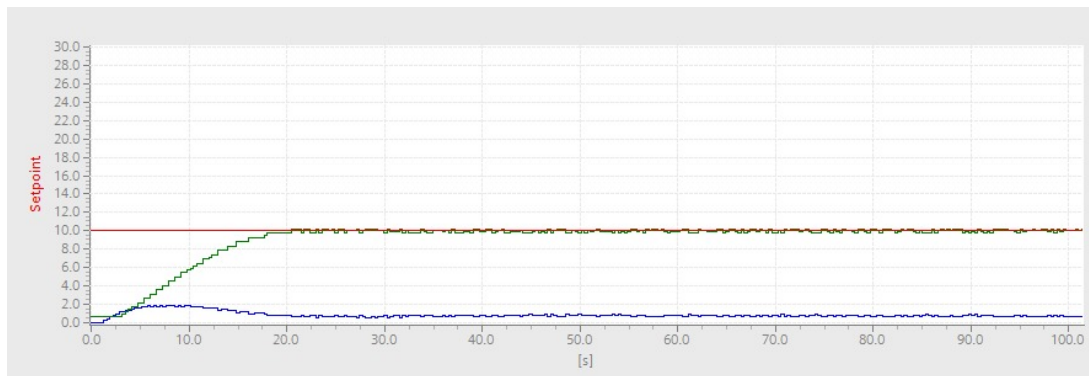


Figura 32 – Comportamento da variável de processo, do *setpoint* e da saída do controlador após a realização de um novo ajuste fino do bloco `PID_Compact`. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

Conforme observado na Figura 32, o sistema apresentou uma resposta mais rápida em comparação com os ensaios anteriores. A variável de processo alcançou o valor de referência e atingiu uma condição estável em aproximadamente 20 segundos, demonstrando uma redução significativa do tempo de acomodação. Além da maior rapidez, verificou-se que o controlador foi capaz de conduzir o nível até o *setpoint* sem manter as oscilações persistentes observadas nos primeiros ajustes. Após a estabilização, a variável de processo permaneceu próxima ao valor desejado, indicando maior compatibilidade entre os parâmetros calculados e a dinâmica do sistema.

Os parâmetros fornecidos pelo TIA Portal após esse novo ajuste fino são apresentados na Tabela 12.

Em relação aos parâmetros obtidos no ajuste fino anterior, verificou-se uma redução do ganho proporcional, de 7,896196 para 3,201254, assim como um aumento de 1,32338 para 3,898111 no tempo de ação integral. A ponderação da ação proporcional permaneceu próxima ao valor anteriormente calculado, enquanto o tempo de amostragem foi mantido em aproximadamente 0,1 segundos. O resultado experimental demonstrou que o novo conjunto de parâmetros proporcionou uma resposta mais satisfatória para a planta, especialmente pela redução do tempo necessário para alcançar e estabilizar o nível no valor de referência.

Tabela 12 – Parâmetros obtidos após o novo ajuste fino do controlador

Parâmetro	Valor obtido
Ganho proporcional	3,201254
Tempo de ação integral	3,898111 s
Tempo de ação derivativa	0,9897239 s
Coefficiente de atraso da ação derivativa	0,1
Ponderação da ação proporcional	0,2519165
Ponderação da ação derivativa	0,0
Tempo de amostragem do algoritmo PID	0,1000002 s
Estrutura do controlador	PID

Dessa forma, essa parametrização apresentou melhor desempenho entre as configurações PID testadas até essa etapa do trabalho.

4.5 Teste de Resposta ao Degrau

Com o objetivo de avaliar o comportamento dinâmico da malha de controle frente a uma variação brusca no valor de referência, foi realizado um ensaio de resposta ao degrau. Nesse teste, o sistema já se encontrava em operação, controlando o nível do tanque superior em aproximadamente 10 cm. A partir dessa condição inicial, aplicou-se um degrau no *setpoint*, elevando-o para 20 cm. A Figura 33 apresenta o comportamento do sistema durante esse ensaio. Observa-se que, após a alteração do valor de referência, a variável de processo respondeu de forma rápida, atingindo a nova faixa de operação em pouco mais de 20 segundos. Esse resultado indica que o controlador foi capaz de conduzir o sistema ao novo ponto de operação com tempo de acomodação relativamente baixo.

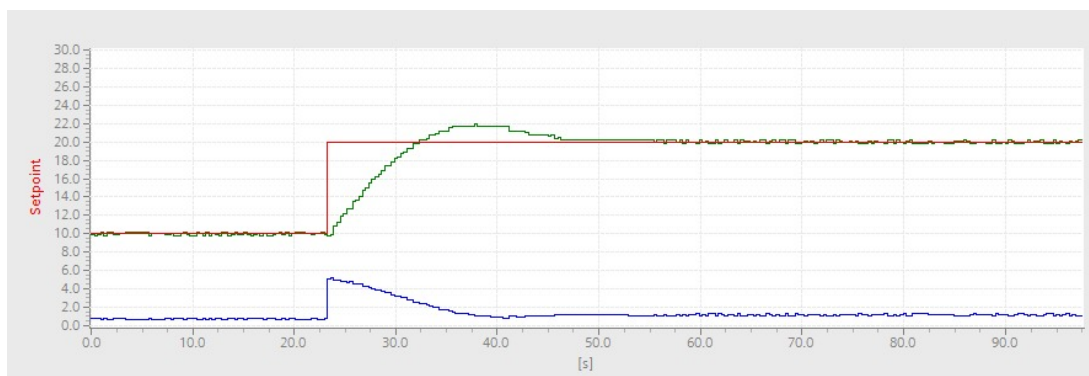


Figura 33 – Resposta do sistema a um degrau aplicado no *setpoint*, com variação de 10 cm para 20 cm. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

Durante a transição, verificou-se a ocorrência de sobressinal, uma vez que o nível ultrapassou temporariamente o valor de referência de 20 cm, atingindo aproximadamente 22 cm antes de retornar. Esse comportamento corresponde a um sobressinal de cerca de 10% em relação ao valor final desejado, o que é compatível com a resposta de sistemas de controle que privilegiam rapidez de atuação.

Após esse pico inicial, a variável de processo retornou e se estabilizou adequadamente em torno do novo *setpoint*, sem apresentar oscilações persistentes. Dessa forma, o ensaio demonstrou que o controlador implementado apresentou desempenho satisfatório frente a uma mudança abrupta na referência, combinando tempo de resposta reduzido com boa capacidade de estabilização.

De maneira geral, os resultados do teste de resposta ao degrau indicam que a malha de controle foi capaz de acompanhar adequadamente a mudança de referência, embora com a presença de um pequeno sobressinal. Esse comportamento evidencia um compromisso entre rapidez e amortecimento, considerado aceitável para a aplicação desenvolvida na planta didática.

4.6 Teste de Resposta a uma Perturbação

Com o objetivo de avaliar a capacidade da malha de controle de rejeitar perturbações externas, foi realizado um ensaio mediante a alteração da vazão de saída do tanque superior. Antes da aplicação da perturbação, o sistema encontrava-se em regime permanente, mantendo o nível da água próximo ao *setpoint* de 20 cm, com a válvula de saída ajustada em aproximadamente 50% de sua abertura total. A perturbação foi introduzida por meio da abertura completa da válvula de saída. Essa alteração aumentou a vazão de água retirada do tanque superior, modificando o equilíbrio previamente estabelecido entre as vazões de entrada e de saída. O valor de referência permaneceu constante em 20 cm durante todo o ensaio, de modo que a resposta observada resultou exclusivamente da atuação do controlador diante da perturbação aplicada.

A Figura 34 apresenta o comportamento da variável de processo, do *setpoint* e da saída do controlador durante o teste.

Conforme observado na Figura 34, o aumento da vazão de saída provocou uma tendência de redução do nível do tanque superior. O controlador identificou imediatamente o afastamento da variável de processo em relação ao *setpoint* e aumentou a ação de controle aplicada à bomba, buscando compensar a maior retirada de água do reservatório.

Antes da aplicação da perturbação, a saída do controlador permanecia estabilizada em aproximadamente 4% de sua faixa máxima. Após a abertura completa da válvula, essa saída aumentou e passou a operar próxima de 9%, indicando a necessidade de maior vazão

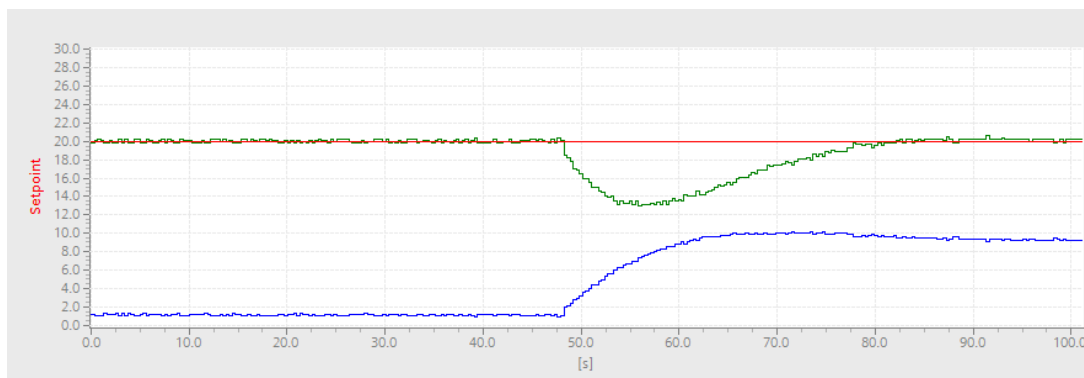


Figura 34 – Resposta da malha de controle à perturbação provocada pela abertura completa da válvula de saída do tanque superior. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados registrados no TIA Portal (2026).

de entrada para restabelecer o equilíbrio do processo. Essa alteração corresponde a um acréscimo de aproximadamente 05 pontos percentuais na ação de controle.

Após a atuação inicial do controlador, o sistema necessitou de aproximadamente 30 s para retornar a uma condição estável em torno do *setpoint* de 20 cm. A estabilização em um novo valor de saída demonstra que a alteração da abertura da válvula modificou permanentemente a condição de operação da planta, exigindo maior atuação da bomba para manter o mesmo nível de referência.

O ensaio demonstrou que a malha de controle foi capaz de rejeitar adequadamente a perturbação aplicada, uma vez que compensou o aumento da vazão de saída sem a necessidade de alteração do *setpoint*. Embora a variável manipulada tenha assumido um novo valor em regime permanente, o nível retornou ao valor desejado, evidenciando a atuação da parcela integral do controlador na eliminação do erro permanente.

4.7 Funcionalidades disponibilizadas pelo Protótipo

Após a realização do retrofit, a planta didática passou a disponibilizar recursos de instrumentação, acionamento, controle e supervisão que não estavam presentes em sua configuração original. A adição da medição por uma sonda hidrostática permitiu o acompanhamento contínuo do nível da água no tanque superior, tornando possível a utilização dessa variável em uma estratégia de controle em malha fechada. O tratamento do sinal analógico no CLP possibilitou a conversão do valor bruto fornecido pela entrada analógica em uma variável expressa em centímetros. Dessa forma, tanto o valor de referência quanto a variável de processo passaram a ser apresentados em uma unidade de engenharia diretamente relacionada à grandeza física controlada.

A integração do inversor de frequência permitiu substituir o acionamento exclusivamente direto da bomba por um comando contínuo de velocidade. O sinal analógico de

0 a 10 V passou a definir a frequência de saída do inversor dentro da faixa configurada de 10,85 a 60 Hz, enquanto o sinal digital foi utilizado para habilitar ou desabilitar o equipamento. Essa arquitetura permitiu que a vazão de entrada do tanque fosse ajustada de acordo com a ação calculada pelo controlador. A IHM desenvolvida disponibilizou ao operador as principais informações necessárias à operação da planta, incluindo o valor de referência, o nível medido e a porcentagem de saída do controlador. A interface também contribuiu para a realização dos ensaios, permitindo acompanhar o comportamento do sistema em diferentes condições de operação.

A planta passou, portanto, a permitir a realização de atividades didáticas relacionadas à calibração de sensores analógicos, ao escalonamento de sinais, ao acionamento de motores por inversor de frequência, à implementação de controladores PI e PID, à sintonia automática, à análise de resposta ao degrau e à avaliação da rejeição de perturbações.

4.8 Síntese dos Resultados Experimentais

Os ensaios realizados permitiram avaliar progressivamente o funcionamento da instrumentação, do sistema de acionamento e da malha de controle. Inicialmente, verificou-se que a sonda hidrostática forneceu uma leitura crescente e aproximadamente linear em relação à altura da coluna de água. Para o intervalo útil adotado, foram registrados valores brutos aproximados de 50 para o tanque vazio e de 2200 para o nível de 28 cm. O ensaio do inversor de frequência demonstrou uma relação aproximadamente proporcional entre a tensão analógica aplicada e a frequência de saída. Para tensões próximas de 0, 2, 5, 5, 0, 7, 5 e 10 V, foram obtidas frequências próximas de 0, 15, 30, 45 e 60 Hz, respectivamente. Esse resultado confirmou o funcionamento da cadeia de comando utilizada para a variação da velocidade da bomba.

Nos primeiros ensaios com a estrutura PID, o sistema foi capaz de conduzir o nível ao valor de referência, porém apresentou tempo de estabilização elevado ou oscilações frequentes na saída do controlador. A atuação derivativa mostrou-se sensível às variações do sinal e provocou alterações rápidas na referência enviada ao inversor, sem produzir benefício proporcional na resposta do nível. Diante desse comportamento, optou-se pela utilização da estrutura PI, mais adequada à dinâmica observada na planta. Com os parâmetros iniciais, o sistema levou aproximadamente 100 s para atingir o valor de referência. Após a realização do ajuste fino, esse tempo foi reduzido para valores próximos de 30 s. Em um novo procedimento de sintonia, a variável de processo alcançou o *setpoint* e estabilizou-se em aproximadamente 20 s.

A Tabela 13 apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos durante os ensaios.

No ensaio de resposta ao degrau, a alteração do *setpoint* de 10 para 20 cm resultou

Tabela 13 – Síntese dos principais resultados experimentais

Ensaio	Resultado principal	Interpretação
Calibração da sonda	Faixa aproximada de 50 a 2200 para 0 a 28 cm	A leitura analógica acompanhou continuamente a variação do nível.
Validação do inversor	Conversão aproximada de 0–10 V para 10,85–60 Hz	O acionamento variável da bomba foi validado.
Controlador com parâmetros iniciais	Estabilização em aproximadamente 90 a 100 s	O controle funcionou, porém apresentou resposta lenta.
Ajustes com estrutura PID	Oscilações na saída do controlador	A parcela derivativa não apresentou contribuição satisfatória nas condições avaliadas.
Ajuste fino do controlador PI	Estabilização em pouco mais de 30 s	Houve redução significativa do tempo de resposta.
Novo ajuste fino	Estabilização em aproximadamente 20 s	Melhor resposta obtida entre as configurações avaliadas.
Resposta ao degrau	Alteração de 10 para 20 cm em pouco mais de 20 s	O sistema acompanhou a nova referência, com sobressinal aproximado de 10%.
Resposta à perturbação	Recuperação em aproximadamente 30 s	A malha compensou o aumento permanente da vazão de saída.

em um tempo de acomodação pouco superior a 20 s. A variável de processo atingiu aproximadamente 22 cm antes de retornar ao valor desejado, caracterizando um sobressinal de cerca de 10%. Apesar dessa ultrapassagem temporária, o nível estabilizou-se adequadamente, sem apresentar oscilações persistentes.

No teste de rejeição de perturbação, a abertura da válvula de saída foi alterada de aproximadamente 50% para 100%. O controlador reagiu imediatamente ao aumento da vazão de saída e elevou a atuação sobre a bomba. O sistema retornou ao nível de referência de 20 cm em aproximadamente 30 s, demonstrando capacidade de compensar a nova condição hidráulica da planta.

De maneira geral, os resultados confirmaram a integração adequada entre a sonda hidrostática, o CLP, o inversor de frequência, a bomba centrífuga e a IHM. A configuração PI apresentou o melhor compromisso entre rapidez, estabilidade e suavidade da variável manipulada entre as estratégias analisadas. Os ensaios também demonstraram que a bancada pode ser utilizada para o estudo prático de instrumentação analógica, controle em malha fechada, sintonia de controladores e análise da resposta dinâmica de processos.

5 Considerações finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação experimental do retrofit de uma planta didática destinada ao controle de nível. A bancada, originalmente baseada em sensores digitais e no acionamento direto da bomba centrífuga, foi modificada para permitir também a medição contínua do nível, a variação da velocidade da bomba, a supervisão do processo por IHM e a implementação de estratégias de controle em malha fechada. A nova arquitetura integrou uma sonda hidrostática, um CLP Siemens *S7 – 1200*, um inversor de frequência Altus *AD700*, uma bomba centrífuga e uma Interface Homem-Máquina. Também foram realizadas alterações no quadro elétrico, na organização das conexões e na disposição dos componentes, incluindo a instalação de uma régua de bornes destinada a facilitar medições, manutenções e futuras ampliações da bancada.

A instalação da sonda hidrostática permitiu acrescentar a identificação exclusivamente discreta do nível por uma medição analógica contínua. Os valores brutos adquiridos pelo CLP foram tratados no TIA Portal por meio dos blocos `NORM_X` e `SCALE_X`, possibilitando a conversão da leitura para centímetros de coluna de água. Nos ensaios realizados, foram observados valores aproximados de 50 para o tanque vazio e de 2200 para o nível próximo de 28 cm.

A integração do inversor de frequência possibilitou controlar continuamente a velocidade da bomba. O ensaio com referência analógica confirmou a relação aproximadamente proporcional entre a faixa de 0 a 10 V e a frequência de saída de 10,85 a 60 Hz. A utilização conjunta de um comando digital de habilitação e de uma referência analógica permitiu evitar a operação da bomba em uma faixa na qual não havia vazão suficiente para alimentar o tanque superior. A implementação inicial do controlador PID demonstrou que a malha era capaz de conduzir o nível ao valor de referência. Entretanto, os ensaios evidenciaram que determinadas sintonias produziam oscilações frequentes na saída aplicada à bomba. A parcela derivativa não apresentou benefícios suficientes para justificar sua permanência na estrutura de controle, especialmente diante das variações observadas no sinal de medição e da dinâmica lenta do processo.

A adoção de uma estrutura PI proporcionou uma atuação mais estável e compatível com o comportamento da planta. Com os parâmetros iniciais, o sistema atingiu o valor de referência em aproximadamente 100 s. Após a realização de procedimentos de ajuste fino, esse tempo foi reduzido inicialmente para pouco mais de 30 s e, posteriormente, para aproximadamente 20 s. Esses resultados demonstram que a sintonia exerceu influência significativa sobre o desempenho transitório do sistema. O ensaio de resposta ao degrau confirmou a capacidade da malha de acompanhar alterações no valor de referência. Para

uma mudança de 10 para 20 cm, o sistema atingiu a nova condição em pouco mais de 20 s. Durante a transição, foi observado um sobressinal de aproximadamente 10%, uma vez que o nível alcançou cerca de 22 cm antes de retornar ao valor desejado. Apesar dessa ultrapassagem, o sistema estabilizou-se sem oscilações persistentes.

No ensaio de rejeição de perturbação, a abertura da válvula de saída foi alterada de aproximadamente 50% para 100%, aumentando a retirada de água do tanque superior. O controlador reagiu imediatamente, elevando a atuação sobre a bomba e restabelecendo o nível de 20 cm em aproximadamente 30 s. Esse comportamento demonstrou que a malha foi capaz de compensar uma modificação permanente na vazão de saída e eliminar o erro em regime permanente.

A utilização de CLPs em plantas didáticas apresenta relevância para a formação em áreas correlatas à Engenharia de Controle e Automação, pois aproxima o ambiente acadêmico das práticas industriais. Por meio desses sistemas, é possível aplicar conceitos de instrumentação, lógica de programação, tratamento de sinais analógicos, acionamento de motores, controle em malha fechada e supervisão de processos. Além disso, a utilização de equipamentos industriais reais contribui para o desenvolvimento de competências técnicas relacionadas à configuração, programação, testes e diagnóstico de sistemas automatizados.

Portanto, o CLP constitui o elemento central de muitos sistemas de automação industrial, atuando como unidade responsável pela aquisição de dados, processamento da lógica de controle e comando dos atuadores. Em aplicações de controle de nível, sua utilização permite integrar sensores analógicos, algoritmos de controle PID, inversores de frequência e interfaces de operação, resultando em uma solução robusta e flexível para o controle automático do processo. Essa fundamentação é essencial para compreender a implementação de plantas didáticas automatizadas e sua contribuição para o estudo prático dos sistemas de controle.

A Interface Homem-Máquina (IHM), também exerce papel importante nos sistemas automatizados. Por meio dela, o operador pode visualizar variáveis do processo, alterar valores de referência, acompanhar alarmes, verificar estados de operação e interagir com o sistema de forma segura e organizada. Em plantas didáticas, a IHM contribui para a compreensão do comportamento do processo, pois permite observar em tempo real variáveis como valor de referência, nível medido, percentual de atuação do controlador e estado dos dispositivos de campo.

Os resultados obtidos indicam que o objetivo geral do trabalho foi alcançado. A planta passou a permitir a aquisição contínua do nível, o tratamento do sinal em unidade de engenharia, a definição do *setpoint* pelo operador, o acionamento variável da bomba e a execução de controle automático em malha fechada. Além disso, os ensaios realizados permitiram avaliar a resposta do sistema diante de diferentes condições de referência e perturbação.

Do ponto de vista didático, o retrofit ampliou as possibilidades de utilização da bancada. O sistema pode ser empregado em atividades relacionadas à instrumentação industrial, calibração de sensores, programação de CLPs, tratamento de sinais analógicos, acionamento de motores por inversores de frequência, desenvolvimento de interfaces de operação e análise experimental de controladores PI e PID.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade do projeto, recomenda-se exportar os dados registrados no TIA Portal para ferramentas de análise numérica. Esse procedimento permitirá calcular, de maneira mais precisa, indicadores como tempo de subida, tempo de acomodação, sobressinal, erro em regime permanente, integral do erro absoluto e esforço total de controle.

Outra possibilidade consiste em comparar diferentes estratégias de controle sob as mesmas condições experimentais. Poderão ser avaliados controladores proporcional, PI e PID, além de técnicas como controle por faixas, escalonamento de ganhos, controle preditivo ou estratégias baseadas em lógica nebulosa.

A implementação de filtros digitais no sinal da sonda também poderá ser estudada, principalmente para avaliar sua influência sobre a estabilidade da variável manipulada. Poderão ser testados filtros de primeira ordem, médias móveis e diferentes tempos de amostragem.

Recomenda-se, ainda, analisar mecanismos de limitação da saída, zona morta, histerese e proteção contra saturação da ação integral. Esses recursos podem reduzir acionamentos excessivamente frequentes e melhorar a conservação do conjunto formado pelo inversor, pelo motor e pela bomba.

Como aprimoramento da bancada, poderá ser instalado um sensor de vazão na tubulação de recalque ou na saída do tanque superior. Essa medição possibilitará relacionar diretamente a velocidade da bomba, a vazão fornecida e a dinâmica do nível, contribuindo para a identificação matemática da planta. Além disso, outra possibilidade é a instalação de uma válvula de abertura proporcional, que permitirá o controle do fluxo de água que sai do reservatório superior, através do CLP, deixando de ser manual.

Por fim, sugere-se elaborar roteiros experimentais destinados às disciplinas de controle de processos, instrumentação e automação industrial. Esses roteiros poderão incluir procedimentos de calibração, testes em malha aberta, sintonia de controladores, resposta ao degrau, rejeição de perturbações e análise comparativa entre diferentes configurações de controle.

Referências

ALTUS. *AD700: Guia de Aplicação Rápida*. 2025. Citado 2 vezes nas páginas [31](#), [40](#).

ASTROM, Karl Johan; HAGGLUND, Tore. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2. ed. Research Triangle Park: ISA – The Instrumentation, Systems, e Automation Society, 2006. Citado 4 vezes nas páginas [25](#), [26](#), [29](#).

BEQUETTE, B. Wayne. *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003. Citado 2 vezes nas páginas [20](#), [21](#).

BOLTON, William. *Programmable Logic Controllers*. 6. ed. Oxford: Newnes, 2015. Citado 3 vezes nas páginas [29–31](#).

BOSE, Bimal K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. Citado 1 vez na página [38](#).

CHAPMAN, Stephen J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. Citado 1 vez na página [38](#).

DEKA, Nayanmani; MATHEW, Lini. PID Controller for Nonlinear Interacting Two Tank Liquid Level Control. *International Journal of Engineering Research and Development*, v. 4, n. 3, p. 23–28, 2012. Citado 3 vezes nas páginas [23](#), [25](#), [35](#).

DOEBELIN, Ernest O.; MANIK, Dhanesh N. *Measurement Systems: Application and Design*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2011. Citado 3 vezes nas páginas [33](#), [35](#), [36](#).

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. *Sistemas de Controle Modernos*. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Citado 4 vezes nas páginas [18](#), [19](#), [21](#), [26](#).

FELLANI, Mostafa Abdul; GABAJ, Aboubaker M. PID Controller Design for Two Tanks Liquid Level Control System Using MATLAB. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 6, n. 3, p. 1321–1328, 2016. Citado 4 vezes nas páginas [23](#), [25](#), [36](#), [37](#).

FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 5. ed. Cham: Springer, 2016. Citado 4 vezes nas páginas [33–35](#).

FRANCHI, Claiton Moro; CAMARGO, Valter Luís Arlindo de. *Controladores Lógicos Programáveis: Sistemas Discretos*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008. Citado 1 vez na página [14](#).

HUGHES, Austin; DRURY, Bill. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. 5. ed. Oxford: Newnes, 2019. Citado 1 vez na página [37](#).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61131-3: Programmable Controllers – Part 3: Programming Languages*. Geneva, 2013. Citado 1 vez na página 31.

JIA, Wenting *et al.* Review of PID control design and tuning methods. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 2649, n. 1, p. 012009, 2023. Citado 4 vezes nas páginas 27–29.

KALATEC. *Inversor de frequência: o que é e como funciona?* 2024. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 16 jun. 2026. Citado 1 vez na página 37.

KARASSIK, Igor J. *et al.* (ed.). *Pump Handbook*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 38, 39.

LIPTAK, Bela G. (ed.). *Instrument Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35, 37.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. *Engenharia de Automação Industrial*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. Citado 1 vez na página 14.

NISE, Norman S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 25, 29.

NISE, Norman S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 14, 18, 19.

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de Controle Moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Citado 8 vezes nas páginas 14, 18, 21, 25, 27, 29.

PATEL, Vishakha Vijay. Ziegler–Nichols Tuning Method: Understanding the PID Controller. *Resonance*, v. 25, n. 10, p. 1385–1397, 2020. DOI: [10.1007/s12045-020-1058-z](https://doi.org/10.1007/s12045-020-1058-z). Citado 3 vezes nas páginas 27, 28.

PETRUZELLA, Frank D. *Programmable Logic Controllers*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 40.

ROGGIA, Leandro; FUENTES, Rodrigo Cardozo. Automação industrial. *Santa Maria: E-tec Brasil*, p. 18, 2016. Citado 1 vez na página 14.

SEBORG, Dale E. *et al.* *Process Dynamics and Control*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 20, 23, 25, 26, 28, 29.

APÊNDICE A – Diagramas elétricos e lista de conexões do cabo DB25

A Tabela 14 apresenta a distribuição dos condutores do cabo DB25 utilizado na interligação dos componentes da planta didática, dos dispositivos de sinalização e dos terminais do inversor de frequência.

Tabela 14 – Lista de conexões do cabo DB25

Pino	Componente ou borne	Descrição da conexão
1	Barramento de alimentação	Alimentação positiva de 24 Vcc dos sensores, do botão de proteção e do transdutor.
2	SNB1	Sinal proveniente do contato normalmente fechado do sensor de nível baixo do tanque 1.
3	SNA1	Sinal proveniente do contato normalmente aberto do sensor de nível alto do tanque 1.
4	SNB2	Sinal proveniente do contato normalmente fechado do sensor de nível baixo do tanque 2.
5	SNA2	Sinal proveniente do contato normalmente aberto do sensor de nível alto do tanque 2.
6	Sinaleiro vermelho	Comando do sinaleiro vermelho de 24 Vcc.
7	Sinaleiro amarelo	Comando do sinaleiro amarelo de 24 Vcc.
8	Sinaleiro verde	Comando do sinaleiro verde de 24 Vcc.
9	C	Sinal proveniente do contato normalmente fechado da chave.
10	Chave seletora	Sinal proveniente do contato normalmente abertoda chave.
11	Saída da sonda hidrostática	Sinal analógico de saída do transdutor instalado na planta.

Continua na próxima página

Tabela 14 – Lista de conexões do cabo DB25 (continuação)

Pino	Componente ou borne	Descrição da conexão
12	Não utilizado	Pino reservado para expansão futura do sistema.
13	Inversor – borne +10 V	Tensão de referência de 10 V fornecida pelo inversor de frequência.
14	Não utilizado	Pino reservado para expansão futura do sistema.
15	Inversor – borne AI1	Entrada analógica 1 do inversor de frequência, utilizada para o sinal de referência de velocidade.
16	Inversor – borne DI1/FWD	Entrada digital 1, associada ao comando de funcionamento no sentido direto.
17	Inversor – borne DI2/REV	Entrada digital 2, associada ao comando de funcionamento no sentido reverso.
18	Inversor – borne DI3	Entrada digital 3 do inversor de frequência.
19	Inversor – borne DI4	Entrada digital 4 do inversor de frequência.
20	Inversor – borne DI5	Entrada digital 5 do inversor de frequência.
21	Inversor – borne AO1	Saída analógica 1 do inversor de frequência.
22	Saída de relé do inversor – contato NF	Terminal correspondente ao contato normalmente fechado da saída a relé do inversor.
23	Saída de relé do inversor – comum	Terminal comum da saída a relé do inversor de frequência.
24	Saída de relé do inversor – contato NA	Terminal correspondente ao contato normalmente aberto da saída a relé do inversor.
25	Barramento de referência/GND	Potencial de referência de 0 Vcc, comum aos sinaleiros, ao transdutor e ao circuito de controle do inversor.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos diagramas desenvolvidos no software CAdE SIMU (2026).

APÊNDICE B – Diagrama elétrico 1 elaborado no CAdE SIMU

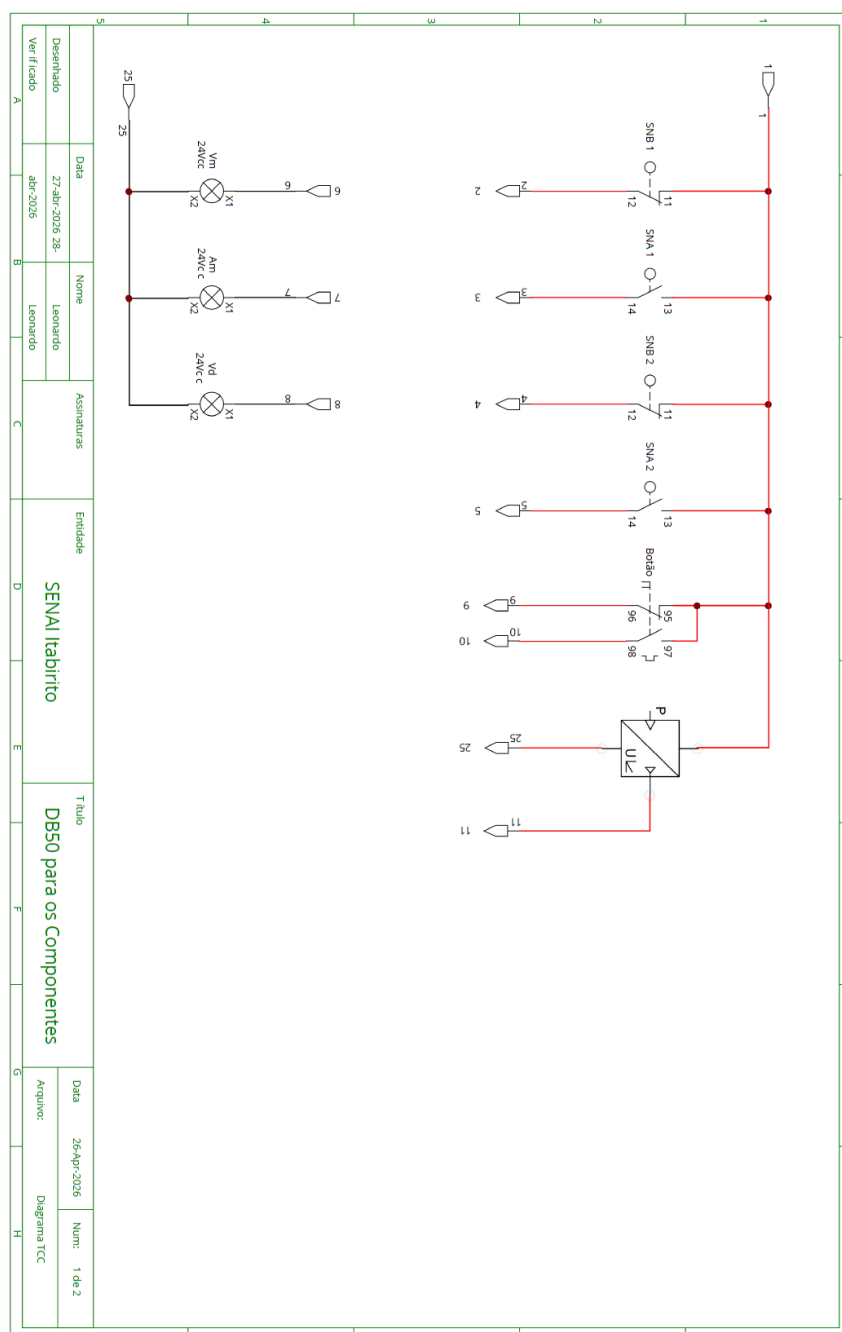


Figura 35 – Diagrama elétrico das entradas da planta pelo DB25, desenvolvido no CAdE SIMU

Fonte: Elaborado pelo autor no software CAdE SIMU (2026).

APÊNDICE C – Diagrama elétrico 2 elaborado no CAdE SIMU

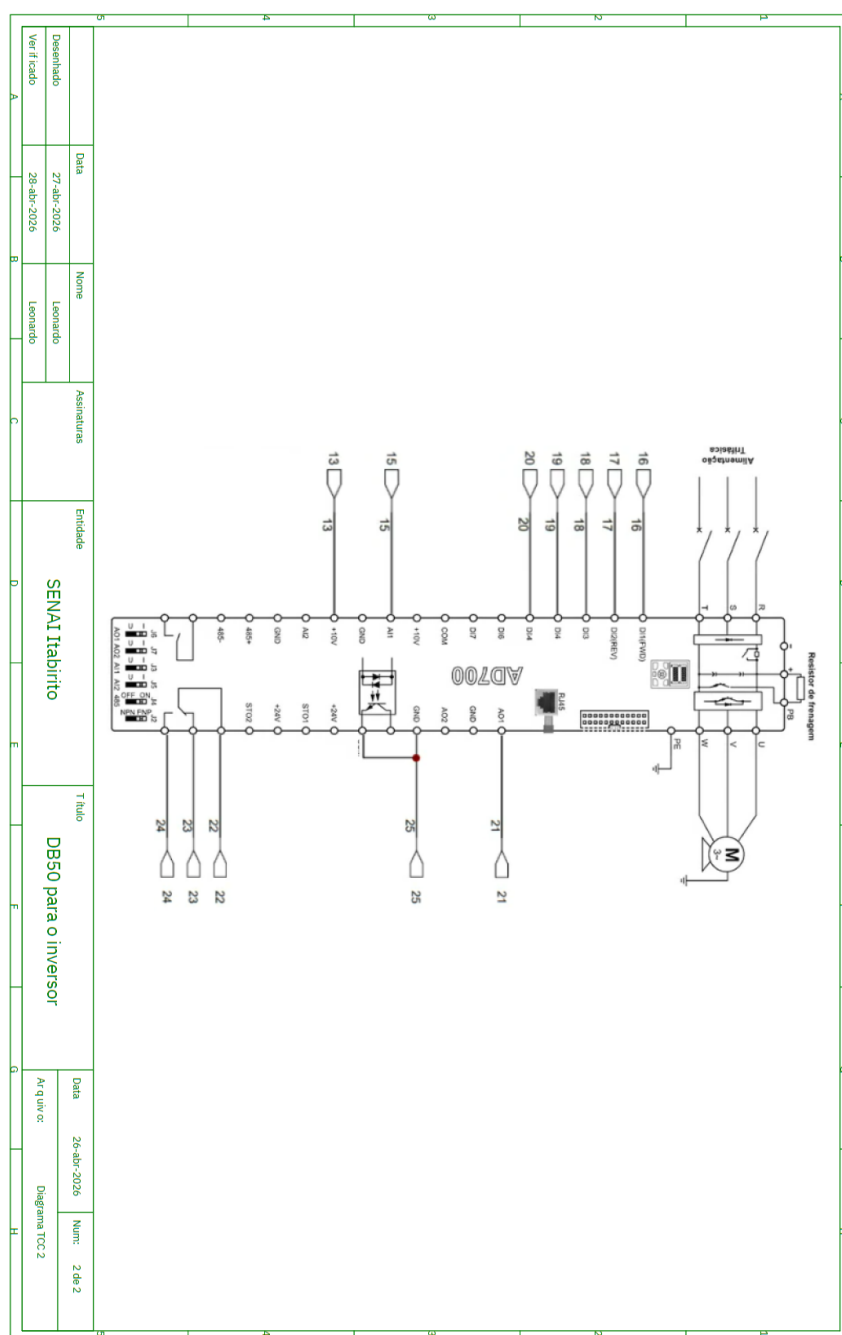


Figura 36 – Diagrama elétrico do inversor da planta pelo DB25, desenvolvido no CAdE SIMU

Fonte: Elaborado pelo autor no software CAdE SIMU (2026).

APÊNDICE D – Declaração de uso de inteligência artificial generativa

Neste trabalho, ferramentas de inteligência artificial generativa foram utilizadas como recurso auxiliar durante as etapas de revisão e apresentação do conteúdo. Seu emprego ocorreu principalmente na revisão gramatical, na melhoria da clareza e da organização de determinados trechos, na sugestão de reformulações textuais e na elaboração ou melhoria visual de algumas figuras e diagramas utilizados para representar conceitos relacionados ao sistema de controle.

A ferramenta não foi utilizada para realizar os ensaios experimentais, obter os dados da planta, definir os parâmetros do controlador ou substituir a análise técnica dos resultados. As decisões relativas ao projeto, à montagem da planta, à programação do Controlador Lógico Programável, à configuração do inversor de frequência, à calibração da sonda hidrostática e à avaliação do desempenho da malha de controle foram realizadas pelo autor.

Entre os recursos utilizados, destaca-se o ChatGPT, desenvolvido pela OpenAI, e o Gemini, desenvolvido pelo Google, empregados como ferramentas de apoio à redação acadêmica e à preparação de elementos gráficos. O uso da inteligência artificial ocorreu de maneira complementar, sem substituir a autoria intelectual, a fundamentação bibliográfica ou a análise crítica desenvolvida ao longo do trabalho.