



Artigo

Bancada didática para controle de nível e temperatura: Integração do CLP FX3U com o Elipse E3 SCADA

João Victor da Silva Fernandes ^[1], Caio Henrique Vieira Alves ^[2], Geronimo Barbosa Alexandre ^[3]

^[1] Instituto Federal da Paraíba; Graduando em Engenharia de Controle e Automação; jv.xpll@gmail.com

^[2] Instituto Federal da Paraíba; Graduando em Engenharia de Controle e Automação; caio.vieira@academico.ifpb.edu.br

^[3] Instituto Federal da Paraíba; Prof. EBTT; M. Sc. Engenharia Elétrica; geronimo.alexandre@ifpb.edu.br

Recebido: 31/10/2025;

Aceito: 31/10/2025;

Publicado: 22/12/2025;

Resumo: Este artigo visa o desenvolvimento e a implementação de uma plataforma didática de baixo custo para o controle de nível e temperatura em um sistema de tanques acoplados, aplicável a processos industriais comuns nos setores de petróleo, gás e alimentício. A metodologia abrange a montagem do protótipo com o CLP FX3U, o projeto e a validação do controle liga-desliga de nível com o aquecimento temporizado, além da construção do sistema de supervisão e operação da bancada. O diferencial do trabalho está no baixo custo, na supervisão local dos dados e na replicabilidade do protótipo por outras instituições de ensino. A estratégia de controle liga-desliga implementada conseguiu gerenciar o nível do tanque, comandando as bombas de encher e esvaziar por meio dos sensores. O sistema de monitoramento local mostrou-se confiável e eficiente nas medições, permitindo a supervisão das variáveis do processo em tempo real pela aplicação SCADA, com uma baixa taxa de latência (4 segundos), adequada em comparação com a dinâmica do processo que se desenrola em minutos, foram desenvolvidas três telas, cadastro de usuários, geração de alarmes e exportação dos dados operacionais em formato de planilhas para melhor operação do processo.

Palavras-chave: processos térmicos; controle liga-desliga; controle PID; instrumentação; bancada didática.

Didactic platform for level and temperature control: Integration of the FX3U PLC with the SCADA Elipse E3

Abstract: This paper aims at the development and implementation of a low-cost didactic platform for level and temperature control in a coupled tank system, applicable to common industrial processes in the petroleum, gas, and food sectors. The methodology encompasses the prototype assembly with the FX3U PLC, the design and validation of the on-off level control with timed heating, in addition to the construction of the supervision and operation system for the bench. The project's differential lies in its low cost, the local data supervision, and the replicability of the prototype by other educational institutions. The implemented on-off control strategy successfully managed the tank level, commanding the fill and empty pumps via sensors. The local monitoring system proved to be reliable and efficient in measurements, allowing for the real-time supervision of the process variables through the SCADA application, with a low latency rate (4 seconds), which is adequate when compared to the process dynamics that unfold over minutes. Three screens were developed: user registration, alarm generation, and the export of operational data in spreadsheet format for better process operation.

Keywords: thermal processes; on-off control; PID control; instrumentation; educational platform.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de controle bem projetados podem ajudar a evitar paradas inesperadas, acidentes e diminuir o tempo de *startup* (tempo necessário para colocar a planta em operação, após uma parada) do processo. Deste modo, desenvolver sistemas de controle automático, traz ganhos econômicos, sociais e ambientais contribuindo para a chamada operação e manutenção inteligente da planta industrial [1].

O gerenciamento das variáveis de processo torna-se uma atividade indispensável para a operação e manutenção da planta industrial, trazendo ganhos econômicos consideráveis, melhoria da estabilidade dinâmica, redução do consumo de energia e da emissão de substâncias tóxicas [2]. Neste contexto destacam-se os sistemas de comando e supervisão local e remoto, existindo inúmeros *softwares* tanto comerciais (Eclipse SCADA, Elipse E3, CX-Supervisor, SIMATIC WinCC, FactoryTalk View) e livres (ScadaBR, SCADA LAquis, VTScada LIGHT, Haiwell Cloud SCADA) que irão auxiliar na qualidade, na redução de custos e em um maior desempenho da produção.

A integração entre o Controlador Lógico Programável (CLP) e o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) possibilita o monitoramento em tempo real, a coleta de dados operacionais e ajustes dinâmicos dos parâmetros de controle, o que resulta em maior eficiência e controle sobre o processo [3] e [4]. Os sistemas SCADA são essenciais para o monitoramento e controle em tempo real de processos industriais, facilitando a automação e garantindo a eficiência dos processos, bem como a detecção precoce de falhas [5].

Assim, instituições de ensino de Engenharia vêm buscando desenvolver plantas pilotos com o objetivo de familiarizar seus estudantes com os diversos tipos de sistemas de controles e supervisão encontrados no meio industrial. Contudo, a excelência na formação de engenheiros e técnicos na área de Automação Industrial enfrenta um desafio prático: o alto custo das plantas didáticas de escala industrial disponíveis no mercado.

Esta limitação restringe a experiência prática dos estudantes, impactando diretamente na qualificação da mão de obra. Em resposta a esta problemática, a comunidade científica tem dedicado esforços consideráveis ao desenvolvimento de bancadas didáticas de baixo custo e alta replicabilidade, buscando simular em escala laboratorial os processos industriais para fins educacionais, a exemplo dos trabalhos [6], [7] e [8].

Neste cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento e a implementação de uma plataforma didática de baixo custo para o controle de nível e temperatura em tanques acoplados, integrando *hardware* de cunho industrial e *software* de supervisão. O diferencial metodológico reside na combinação de características que buscam superar as limitações das bancadas didáticas tradicionais. Em contraste com soluções que utilizam microcontroladores para simplificar o custo, como sugerido em [6] e [7], optou-se pela utilização do CLP Mitsubishi FX3U, conferindo à bancada uma autenticidade industrial inegável e alinhando a experiência de aprendizado com os equipamentos de chão de fábrica [9].

A validação inicial da bancada focou na estratégia de controle liga-desliga (ON/OFF) para o nível e o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo) para a malha de temperatura. Essa etapa demonstrou a capacidade do sistema em gerenciar o nível e temperatura do tanque de forma eficaz. Além disso, a arquitetura de supervisão foi construída sobre uma aplicação SCADA, utilizando o Elipse E3 DEMO. Ao contrário de plataformas que oferecem apenas monitoramento básico, o sistema desenvolvido aqui apresenta uma funcionalidade robusta que inclui cadastro de usuários, geração de alarmes e, crucialmente, a exportação de dados operacionais em formato de planilhas. A implementação de uma *interface* SCADA rica em recursos e com uma baixa taxa de latência (4 segundos), validada para a dinâmica lenta do processo, posiciona o trabalho para futuras análises de desempenho e otimização de processo, conforme preconizado pelas tendências de integração de dados na indústria [4].

Por fim, as principais contribuições deste artigo para o ensino da Automação Industrial e o avanço da pesquisa são: (1) A confecção de uma bancada didática de nível e temperatura de baixo custo com alta replicabilidade; (2) A integração bem-sucedida de um CLP industrial (FX3U) em uma solução educacional, elevando o realismo do aprendizado; e (3) A implementação e validação de um sistema de supervisão SCADA local eficiente, com recursos de análise de dados essenciais para o avanço das atividades de ensino e pesquisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados a metodologia usada no trabalho, os materiais usados para a confecção do protótipo didático, o diagrama elétrico do CLP e a lógica *Ladder* implementada para as estratégias de controle usadas no processo de nível e temperatura.

2.1. Metodologia

A pesquisa a ser realizada é do tipo pesquisa de campo com natureza exploratória e descritiva com abordagem qualitativa. A pesquisa de campo, “consiste na observação de fatos e fenômenos tal como ocorrem

espontaneamente, na coleta de dados a eles referentes e no registro de variáveis que se presume relevantes, para analisá-los” [10].

As abordagens do problema nas pesquisas científicas são caracterizadas por dois tipos: a pesquisa quantitativa e pesquisa qualitativa. Nesta pesquisa, optou-se por uma abordagem qualitativa, pois segundo [11] "esse tipo de abordagem proporciona melhor visão e compreensão do problema". A pesquisa buscou a confecção de um produto, integrando teoria e prática, em que os alunos-pesquisadores são os protagonistas do processo de desenvolvimento.

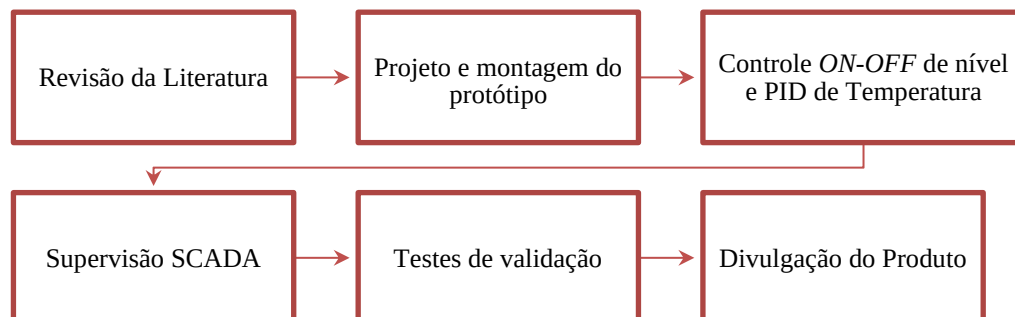


FIGURA 1. Processo metodológico da pesquisa (autoria própria).

Os passos metodológicos implementados para alcançar os objetivos estão dispostos no fluxograma da Figura 1. Inicialmente foi feita a revisão bibliográfica nas seguintes plataformas acadêmicas: *IEEE Explorer Digital Library*, *ScienceDirect*, *ResearchGate*, Periódico Capes e Google Acadêmico, dessa pesquisa foram escolhidos alguns artigos que serviram de base do projeto [2], [12] e [13]. Desta forma o trabalho trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa com apresentação de um produto.

Após a revisão do estado da arte, foram elaborados os desenhos 2D e 3D do protótipo, bem como a lista de material com o respectivo orçamento. O projeto estrutural, hidráulico e elétrico do sistema de tanques acoplados foi idealizado a partir dos protótipos desenvolvidos em [2], [12] e [13], bem como no processo de aquecimento e controle de nível de um laticínio local, mapeado durante visitas técnicas as unidades fabris do sertão paraibano.

Na sequência foi confeccionada a bancada de aquecimento, instalação da instrumentação e desenvolvimento dos sistemas supervisórios. Com o produto confeccionado foram feitos os testes de avaliação do controle liga-desliga experimental.

2.2. Materiais Usados na Confeção do Protótipo Didático

Os materiais utilizados para confecção do protótipo experimental estão dispostos na Tabela 1. O custo total do protótipo foi baixo (R\$ 727,15) quando comparado a uma bancada didática comercial similar (R\$ 15.000,00).

TABELA 1. Materiais utilizados no protótipo V1.0 e orçamento (autoria própria).

Equipamento	Quantidade	Valor* (Varejo)
Sensor de nível	2	R\$ 54,00
Tanques de acrílico 5L	2	R\$ 50,00
CLP FX3U24MR	1	R\$ 250,00
Mangueira 1/2	2m	R\$ 10,00
Bomba d'água 24V 19W	1	R\$ 107,00
Bomba d'água 12V	2	R\$ 64,90
Resistência elétrica de 800W	1	R\$ 30,00
Relé de interface 24V/220V	1	R\$ 24,30
Conversor RS485 para USB	1	R\$ 20,00
Sensor PT-100 + Transmissor 4-20mA	1	R\$ 84,70
Relé de Estado Sólido	1	R\$ 32,25
Total		R\$ 727,15

*Cotação feita em 2025.

Para viabilizar o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo), foi adicionada a placa Arduino UNO R3, um relé de estado sólido (SSR - 40A) conectado ao ebulidor, permitindo a variação contínua da temperatura através da saída analógica de 0-10V do CLP, além do sensor de temperatura PT 100 e o seu transmissor.

Os materiais foram adquiridos em lojas físicas da região do sertão paraibano, bem como em lojas virtuais. O CLP FX3U-24MR (saída a relé) foi escolhido por dois motivos: (1) por apresentar baixo custo em comparação com outros fabricantes e (2) por apresentar seis entradas analógicas (sendo três de tensão 0-10V e três a corrente 4-20mA) e duas saídas analógicas de 0-10V o que facilita o controle em malha fechada.

2.3. Diagrama Elétrico e Lógica de Programação do CLP FX3U

O CLP FX3U funciona como o cérebro do processo recebendo as medições dos sensores, que informam o estado do processo e atua fornecendo energia para o comando das bombas (atuadores elétricos). Para organizar a integração entre o controlador e os componentes de campo, foi definida uma alocação de endereços de *hardware*. A Tabela 2 detalha as entradas e saídas digitais do CLP.

TABELA 2. Entradas e saídas digitais do CLP (autoria própria).

Componente	Entrada	Componente	Saída
Sensor Boia (Alto)	X0	Bomba e Sinaleiro (Esvaziar)	Y0
Sensor Boia (Baixo)	X1	Bombas (Encher)	Y4
Botão Liga	X2	Ebulidor	Y3
Botão desliga	X3	Sinaleiro (Encher)	Y1

Para a implementação do PID utilizamos as mesmas entradas, o diferencial está na utilização das entradas e saídas analógicas conforme descrito na Tabela 3.

TABELA 3. Entradas e saídas Analógicas do CLP (autoria própria).

Componente	Entrada	Componente	Saída
Transmissor de Temperatura	AD3	Arduino Uno	DA0

A Figura 2 ilustra o diagrama de ligações das entradas e saídas do CLP para o controle liga-desliga de nível e o controle PID de temperatura.

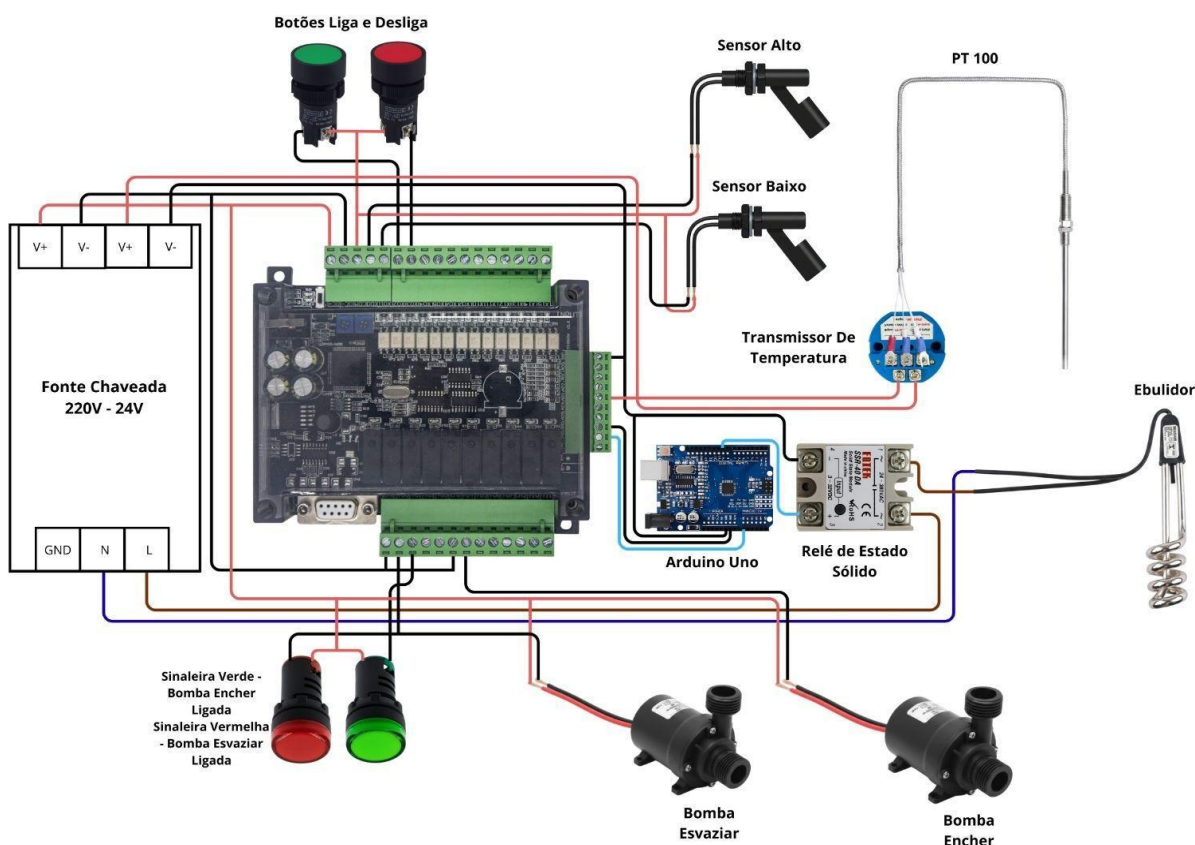


FIGURA 2. Diagrama elétrico do CLP para o ON-OFF de nível e o PID de temperatura (autoria própria).

O controle de temperatura é feito por meio da regulação da potência elétrica entregue pelo ebulidor, este está conectado ao relé de estado sólido, já o relé de estado sólido está conectado a saída Y3 e a saída a PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) da placa Arduino (pino 9). A placa Arduino UNO R3 foi usada para a gestão do PWM que varia a tensão entregue ao relé de estado sólido. Desta forma o sinal de 0-10V do CLP é convertido em um sinal PWM.

A modulação por largura de pulsos é usada para controlar a tensão aplicada ao relé de estado de sólido (SCR, do inglês, *Silicon Controlled Rectifier*), desta forma controlando a potência elétrica da lâmpada. Devido o CLP ser de saída a relé, este não possui saída analógica a PWM, para contornar este problema foi usado um divisor de tensão que alimenta a porta A0 do Arduino UNO R3, este mapeia o nível de tensão e aciona o PWM (pino 9), este está ligado ao relé de estado sólido.

As entradas (botões e sensores) são endereçadas por X e as saídas (sinaleiros, bombas e ebulidor) são endereçadas por Y, conforme norma IEC 61131-3 (padronizar as linguagens de programação utilizadas em CLP's). Para alimentar o CLP foi utilizada uma fonte chaveada 220V/24V/10A protegida por um disjuntor de 10A. Para a comunicação RS232 do CLP com o computador foi utilizado um cabo DB9 macho-USB (*Universal Serial Bus*), com instalação do *driver* CH340. A partir do *software* GX Works2 seleciona-se a porta USB do computador que está conectado o CLP FX3U, feita a programação ladder, na sequência faz-se o *upload* do código para a memória do CLP.

O código Ladder implementado no GX Works 2 foi estruturado em etapas. Inicialmente, foi realizada a configuração do protocolo de comunicação *Modbus RTU (Remote Terminal Unit)*, definindo o CLP para operar no modo "*Slave*" (escravo). A taxa de transmissão dos dados usada na CPU do CLP FX3U foi de 38,4 Kbps na comunicação serial, já o "*Baud Rate*" definido no Elipse E3 foi de 19.200 sem *bit* de paridade. Esta configuração é crucial para permitir que o sistema de comando e supervisão, atuando como "*Master*" (mestre), possa ler e escrever nos registradores e memórias do controlador em tempo real.

A lógica de operação para o ON-OFF é iniciada por três condições que podem ativar o sistema: (1) a memória M8, que funciona como um "selo" para manter o ciclo perpétuo após o primeiro ciclo (encher e esvaziar) operacional; (2) a memória M1, que representa o botão virtual 'LIGA', é acionado remotamente pelo supervisório; (3) a entrada física X2, correspondente à botoeira 'LIGA' no painel da bancada.

Estas condições de partida (início do processo) possuem um intertravamento de segurança feito por um contato da entrada X1 (sensor de nível baixo), garantindo que o ciclo de enchimento só possa começar se o tanque 1 estiver efetivamente vazio. Uma vez que uma das condições de partida é satisfeita e o tanque está vazio, o CLP ativa a saída Y4 (ligando as bombas de enchimento) e a saída Y1 (sinalizando o enchimento).

O processo de enchimento continua até que o nível da água atinja o sensor de nível alto, ativando a entrada X0. O sinal de X0 desliga imediatamente as bombas (Y4) e a sinaleira de enchimento (Y1). Simultaneamente, o CLP ativa a saída Y3, que aciona o relé de *interface* do ebulidor, iniciando o aquecimento. Um temporizador (T0) é disparado e configurado para 60 segundos.

Após a contagem de 60 segundos, o contato do temporizador T0 desliga o ebulidor (Y3). Em seguida, com o intertravamento do sensor X0 (garantindo que o tanque está cheio), o sistema ativa a saída Y0 (bomba de esvaziamento) e a sinaleira de esvaziamento.

A bomba Y0 permanece ligada, esvaziando o tanque, até que o nível caia abaixo do sensor de nível baixo (X1). No programa, um contato normalmente fechado (NF) de X1 é usado para desativar a saída Y0 assim que o sensor indica que o tanque está vazio. A desativação de X1 encerra esta etapa e, para garantir o ciclo automático, a ativação da saída Y0 também "seta" a memória M8, preparando o sistema para reiniciar o ciclo assim que as condições de partida forem satisfeitas novamente, porém para isso X1 tem que estar desativado, ou seja, o tanque 1 já tem que estar vazio.

A implementação do controle PID para a temperatura substitui o ciclo temporizado fixo por uma atuação em malha fechada. O CLP regula o processo com base na comparação contínua entre a temperatura medida (PV) e o *setpoint* (SP) definido via *interface* SCADA, sendo os parâmetros de sintonia armazenados em registradores dedicados junto da medição de temperatura (Tabela 4). A lógica de atuação foi estruturada a partir de comparadores:

1. Aquecimento ($SP > PV$): Ativa-se a memória auxiliar M8, que habilita a modulação PWM do ebulidor para elevar a temperatura;
2. Resfriamento ($SP < PV$): Acionam-se simultaneamente as bombas de enchimento e esvaziamento, gerando um fluxo contínuo de circulação para reduzir a temperatura do fluido;
3. Estabilidade ($SP = PV$): Ativa-se a memória M7, responsável pelo intertravamento do sistema quando o alvo é atingido.

TABELA 4. Mapeamento dos registradores no CLP (autoria própria).

Parâmetros	Registrador
<i>Setpoint</i>	D20
Temperatura	D14
Kp	D21
Ki	D24
Kd	D25

Para otimizar a comunicação com o Elipse E3, foram utilizadas memórias internas (M) como "espelhos" das variáveis de processo (*status* de bombas, sensores e botões virtuais). Esta abordagem facilita o gerenciamento de dados pelo supervisor desenvolvido no Elipse E3, associando as “Tags” aos respectivos endereços de memórias para as entradas e saídas, conforme detalhado na Tabela 5.

TABELA 5. Mapeamento das memórias no CLP (autoria própria).

Componente	Memória
Y0	M6
Y1	M5
Y3	M3
Y4	M4
Botão Liga (virtual)	M1
Botão desliga (virtual)	M2

No Elipse E3 foi configurado o driver “*modbus.dll*” a partir do “*Organizer*”, na sequência foi criado os botões e sinaleiros virtuais, com os respectivos endereços de memória. O “*Organizer*” permite uma visão simples e organizada de toda aplicação, ajudando na edição e configuração de todos os objetos envolvidos através de uma árvore hierárquica de opções.

A escolha pelo Elipse E3 deu-se devido ser uma solução padrão na indústria brasileira, apresentando os seguintes prós: escalabilidade (projetos de pequeno, médio e grande porte), suporte local (a *Elipse Software* é uma empresa brasileira, documentação em português e muitos integradores), altíssima customização e robustez comprovada. Como contras destacamos o custo da licença e a curva de aprendizagem para configurar inicialmente.

3. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os detalhes físicos do protótipo confeccionado, o SCADA local que faz a gestão do processo (comando e supervisão) e os resultados experimentais do controle PID de temperatura implementado no tanque superior.

3.1. A bancada Didática de Nível e Temperatura

As Figuras 3 e 4 ilustram o protótipo didático confeccionado pelos pesquisadores do IFPB Campus Cajazeiras, instalado no Laboratório de Controle e Automação (LCA - IFPB). A estrutura física é composta por dois baldes plásticos que simulam os tanques (Tanque 1 e Tanque 2). O sistema de enchimento do Tanque 1 utiliza um conjunto de duas bombas de 12V ligadas em série, garantindo o fluxo necessário para transferir a água a partir do Tanque 2. O esvaziamento do Tanque 1, com o retorno da água ao Tanque 2, é realizado por uma bomba dedicada de 24V. O monitoramento dos níveis máximo e mínimo é feito por dois sensores de nível tipo boia.

O núcleo do sistema é o Controlador Lógico Programável (CLP) FX3U, que executa toda a lógica de automação e controle. A alimentação dos componentes (bombas e sensores) é fornecida por uma fonte chaveada que converte a tensão CA (corrente alternada) da rede para 24V CC (corrente contínua). Para o controle da malha de temperatura, um ebulidor é utilizado como atuador de aquecimento. Dado que o ebulidor opera com tensão da rede (CA), foi implementado um relé de *interface*, permitindo que a saída digital de tensão CC do CLP possa acionar esta carga de potência com total segurança.

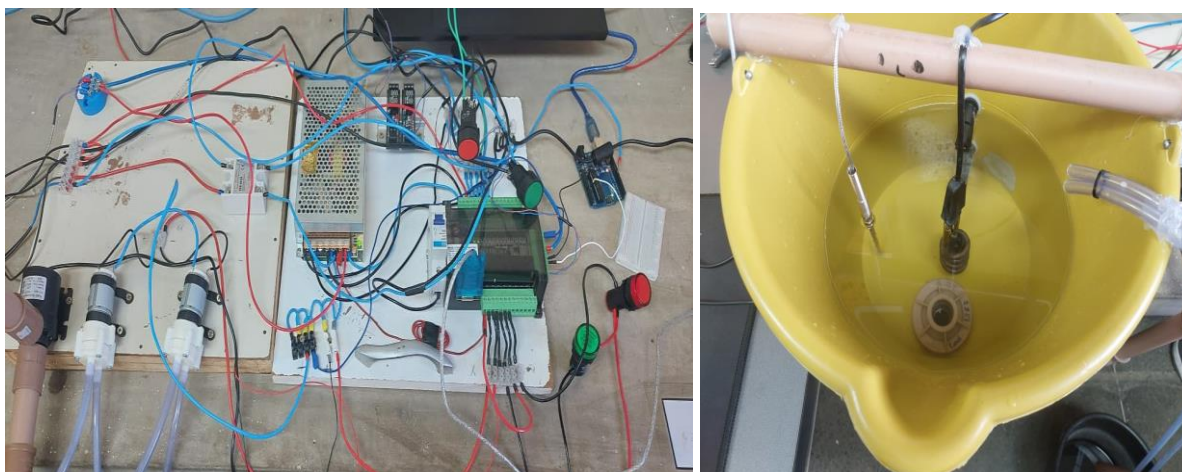


FIGURA 3. Detalhes dos sistemas de bombeamento, nível e aquecimento (autoria própria).

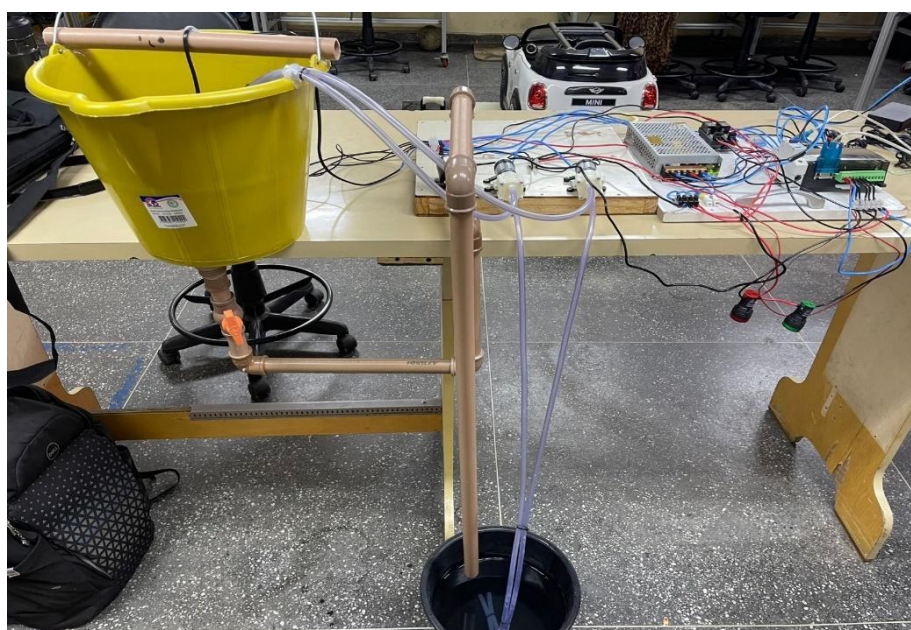


FIGURA 4. Visão geral da bancada (autoria própria).

A operação manual foi implementada com duas botoeiras (Liga/Desliga) e duas sinaleiras visuais. Estas sinaleiras fornecem *feedback* imediato ao operador, indicando quando as bombas de enchimento estão ativas e quando a bomba de esvaziamento está em funcionamento.

3.2. Interface SCADA de Comando e Supervisão

Além da lógica de controle no CLP, foi desenvolvido o sistema de supervisão e operação remota, cumprindo um dos objetivos específicos do projeto. A plataforma utilizada foi o *software* Elipse E3, que atua como mestre da rede *modbus*.

O sistema supervisor é iniciado por uma tela de *menu* (Figura 5), que apresenta as informações da instituição e dos elaboradores do projeto. Esta tela também gerencia o controle de acesso de usuários (cadastro e acesso), permitindo as funções de “Login” e “Logout”, indicando o operador logado no momento e possuindo um botão para fechar a aplicação com segurança.

Para gerenciar o acesso ao SCADA, o cadastro de novos operadores é realizado através da janela “Adicionar Usuário” conforme ilustrado na Figura 6(a). Esta é uma função nativa de administração do próprio Elipse E3. Nela, o administrador define o “Nome” (utilizado para o *login*), o “Nome completo” e a “Senha” do operador. O “Tipo de autenticação” é mantido como “Autenticação do Elipse E3”, indicando que o próprio supervisor é responsável pela validação.

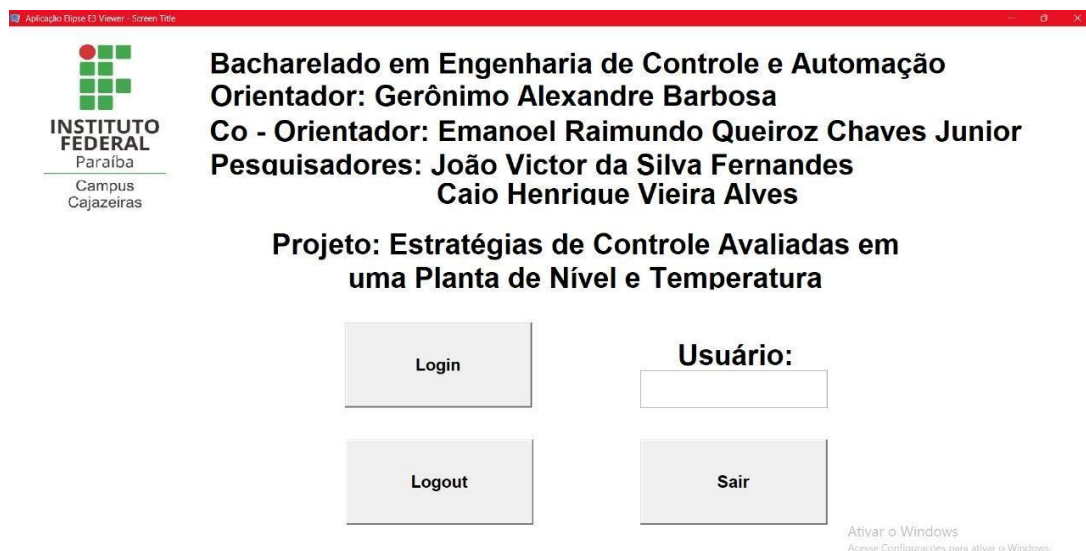


FIGURA 5. Tela de *menu* do SCADA (autoria própria).

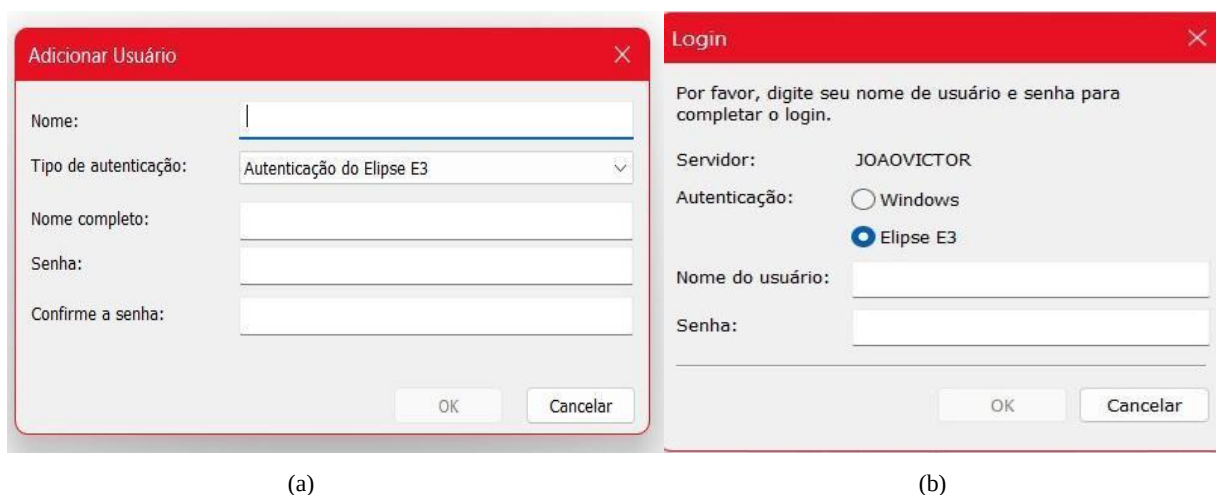


FIGURA 6. (a) Tela para adicionar usuário. (b) Tela para efetuar o “login” (autoria própria).

Diferente dos dados de processo, que podem ser armazenados em bancos de dados externos, as credenciais de usuário são salvas de forma segura diretamente no arquivo de configuração do domínio da aplicação. Posteriormente, o operador utiliza essas credenciais ao clicar no botão “Login” da Figura 5, sendo direcionado para a janela ilustrada na Figura 6(b), onde insere seu “Nome do usuário” e “Senha”, selecionando a “Autenticação: Elipse E3” para acessar o sistema.

Após o “Login” ser efetuado, o operador é direcionado à tela de comandos, supervisão e alarmes (Figura 7) do processo. Nesta tela, é possível monitorar todo o processo de forma gráfica, visualizando o estado de cada atuador (bombas e ebulidor) e o *status* dos sensores (indicando se estão ativos ou não). A tela também exibe o temporizador referente ao tempo de aquecimento do ebulidor e disponibiliza os botões virtuais ‘LIGA’ (M1) e ‘DESLIGA’ (M2), que permitem o acionamento e a parada remota do ciclo. Nesta mesma tela ainda é possível retornar a tela de “Menu”.

Na interface SCADA da Figura 7 o usuário pode alterar os parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador PID de temperatura, bem como o valor de *setpoint* de temperatura em tempo real. Na Tela é possível visualizar o gráfico da temperatura e o valor instantâneo. Outras funcionalidades inseridas na interface SCADA, são: (a) a gestão de alarmes (aba inferior ao gráfico da temperatura), para informar ao operador qualquer anormalidade no processo e (b) a criação de relatórios e exportação do histórico operacional em formatos compatível com Excel, PDF e TXT.

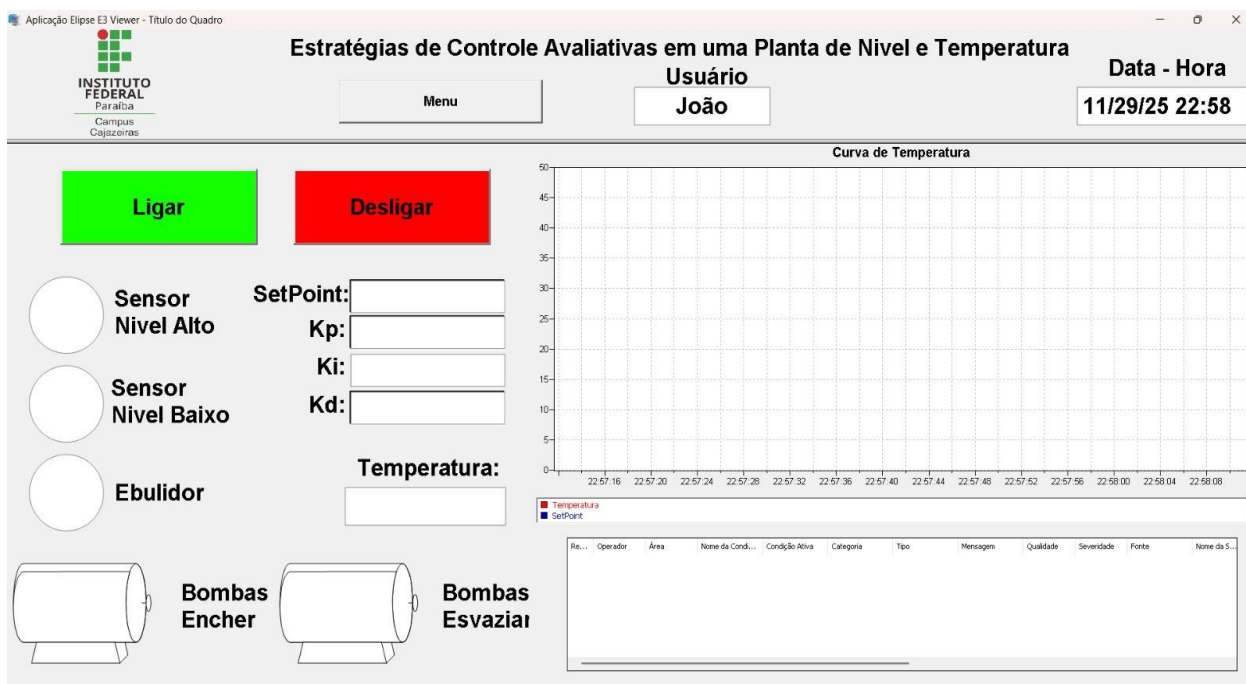


FIGURA 7. Tela comado, supervisão e alarmes do processo (autoria própria).

O registro de alertas/alarmes funciona como um histórico de eventos, registrando em tempo real todas as ações relevantes do processo, como o momento em que um processo é ativado, o estado de um atuador, e a data e hora exata de cada ocorrência.

Durante os testes experimentais de validação da aplicação SCADA na operação do processo didático foi observado um atraso (latência) no envio / recebimento dos dados de aproximadamente 4 segundos, sendo um tempo insignificante quando comparado com a dinâmica de encher e esvaziar dar-se em minutos.

3.3. Resultados Experimentais do Controle PID de Temperatura

O controle de temperatura da bancada foi implementado utilizando o algoritmo PID interno do CLP FX3U. O experimento consistiu na aplicação de degraus de referência (*setpoint*) para avaliar a resposta transitória e estacionária do sistema. Inicialmente, o sistema partiu da temperatura ambiente (25°C) com *setpoint* ajustado para 30°C. Após a estabilização, aplicou-se um segundo degrau para 35°C.

Os dados operacionais foram registrados através do sistema supervísório Elipse E3 e exportados para um arquivo CSV (*Comma-Separated Values*). O registro no arquivo ocorreu em intervalos de 1 segundo. As Figuras 8 e 9 ilustram as curvas de resposta da temperatura em relação aos *setpoints* definidos. Na Figura 10 é ilustrado o comportamento da temperatura ao sair de 25°C para 35°C (os dois degraus aplicados) ao longo do tempo.

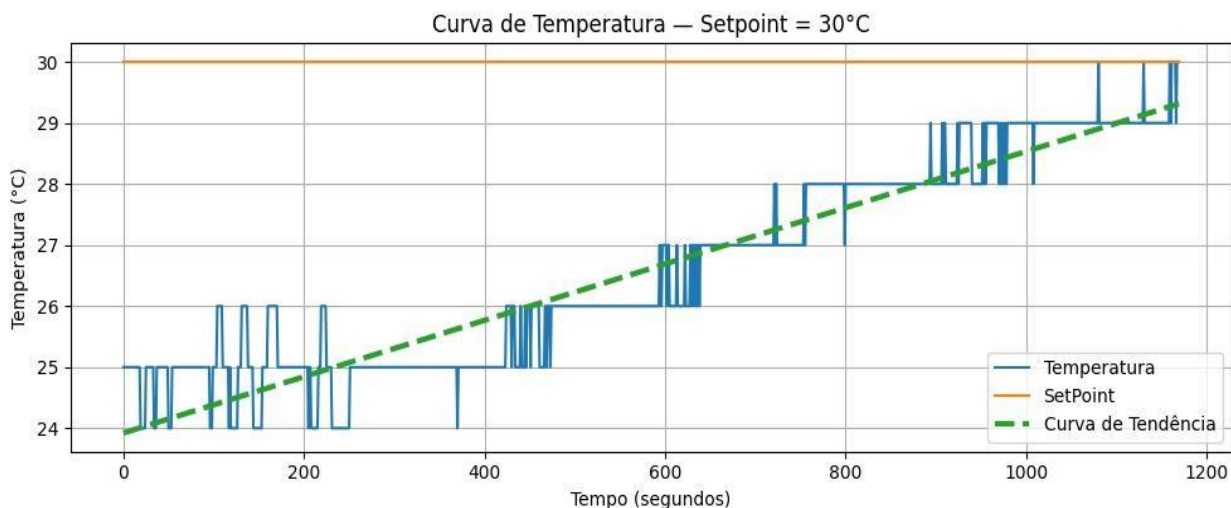


FIGURA 8. Curva da temperatura para um setpoint de 30°C (autoria própria).

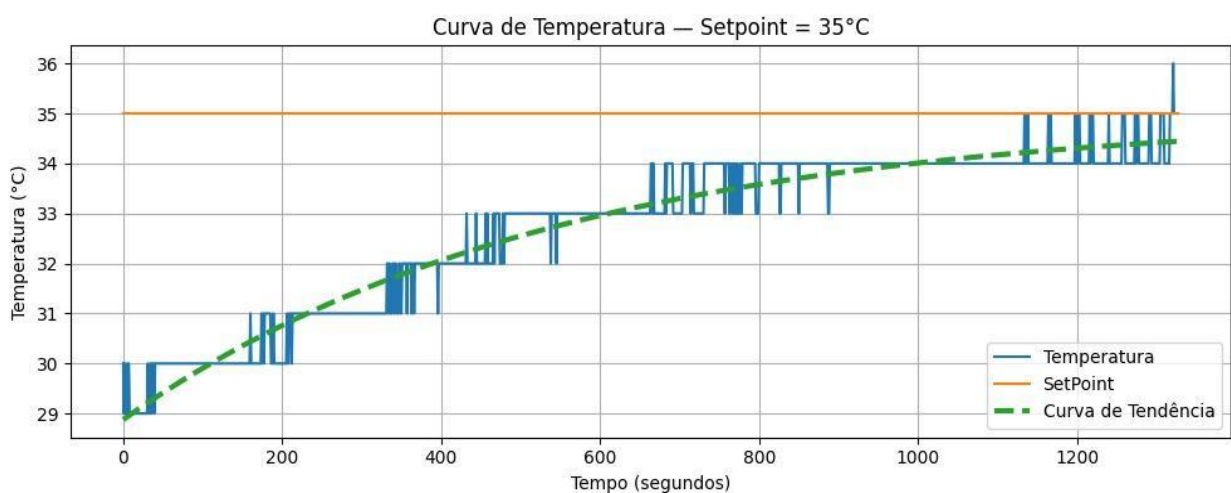


FIGURA 9. Curva da temperatura para um setpoint ajustado em 35°C (autoria própria).

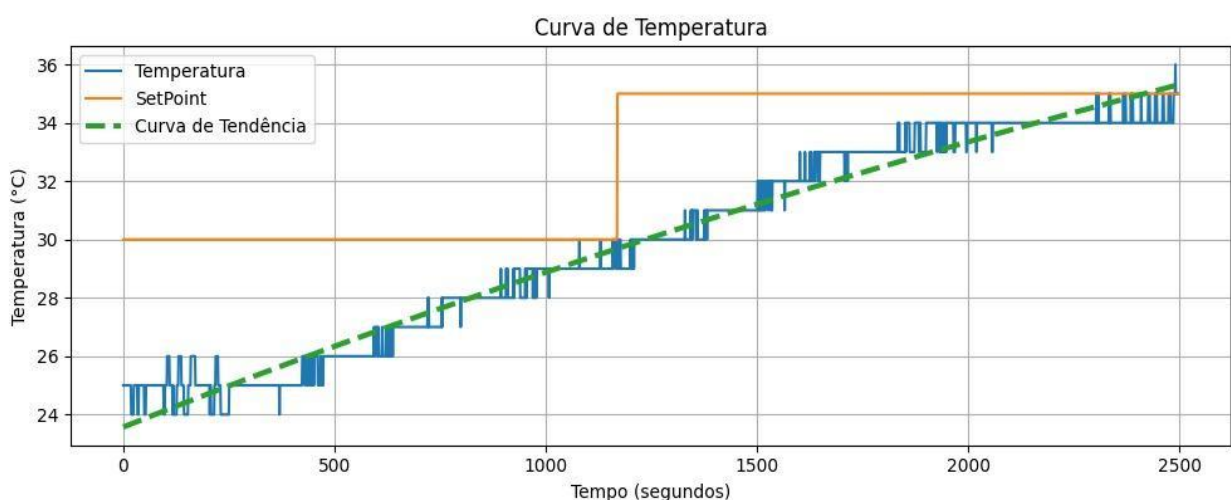


FIGURA 10. Curva da temperatura ao sair de 25°C para 30°C e depois de 30°C para 35°C (autoria própria).

A quantificação do desempenho da malha de controle baseou-se nos critérios clássicos de engenharia de controle, conforme definido em [14]: tempo de subida, tempo de acomodação, sobressinal (*overshoot*) e erro em regime permanente (*offset*). A Tabela 6 sumariza os resultados obtidos para os dois pontos de operação.

TABELA 6. Parâmetros de desempenho do controlador PID (autoria própria).

Setpoint	Tempo de Subida	Tempo de Acomodação	Overshoot	Offset
30°C	790s	1169s	0%	1.04°C
35°C	504s	1327s	2.9%	0.85°C

Os ganhos do controlador sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols (e refinados experimentalmente) e avaliados no cenário da Figura 10, foram $K_P=5000$, $K_I=1$ e $K_D=100$, percebe-se que o sistema é estável e bem comportado em malha fechada, mostrando que a lei de controle consegue levar a saída controlada (temperatura) a seguir as referências de controle, com erro em regime permanente nulo.

A Figura 11 ilustra o sinal do erro para os cenários de degraus de temperatura descritos na Figura 10 (de 25°C para 30°C e, posteriormente, para 35°C). O erro é definido como a diferença entre o *setpoint* (referência) e o valor medido da temperatura. Nas regiões de transição, é possível observar que ocorre um pico de erro positivo (6,0°C), na variação de 25°C para 30°C, neste intervalo o PID interno do CLP, está otimizando (ajustando a frequência e amplitude) o sinal PWM entregue ao relé de estado sólido.

Após cada transição, o erro decresce exponencialmente e converge para próximo de zero, demonstrando a eficiência do controlador PID em estabilizar a temperatura no valor desejado. Em estado estacionário, o erro residual é mínimo, com oscilações inferiores a 1,3°C, evidenciando a precisão e a robustez do sistema no controle da temperatura.

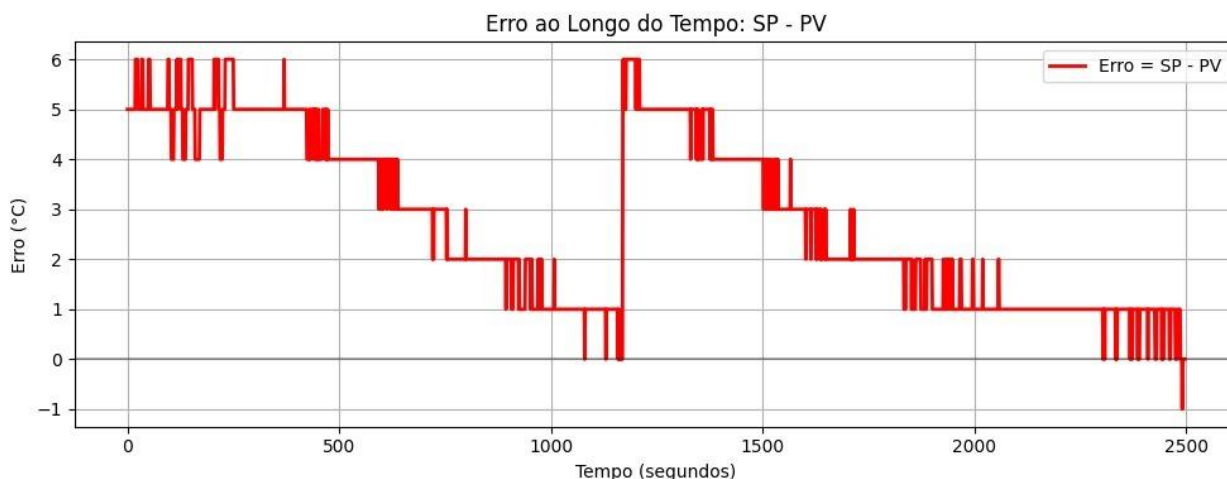


FIGURA 11. Gráfico do sinal de erro frente as mudanças operacionais no processo.

Os parâmetros de desempenho do controlador podem ser avaliados na ótica do tempo (Tabela 6), bem como na ótica do erro. Para isso, são utilizados critérios de desempenho baseados em integrais de erro, que quantificam a qualidade da resposta do sistema ao longo do tempo. Entre os principais critérios, estão o ISE (*Integral of Squared Error*), ITAE (*Integral of Time-weighted Absolute Error*), IAE (*Integral of Absolute Error*) e ITSE (*Integral of Time-weighted Squared Error*).

Conforme [15], os critérios de desempenho ISE, ITAE, IAE e ITSE são métricas que avaliam a resposta do sistema em termos do erro entre o valor desejado (setpoint) e o valor atual da variável controlada. Eles são calculados como integrais ao longo do tempo, ponderando o erro de diferentes maneiras para enfatizar aspectos específicos do desempenho, como a magnitude do erro, a duração do erro ou a influência do tempo.

Na Figura 12 é ilustrado os parâmetros de desempenho do controlador na ótica da integral do erro (ISE, ITAE, IAE e ITSE) para o cenário de degraus de temperatura. Percebe-se que o erro converge para zero em regime permanente em todos os cenários, mostrando a eficácia da ação integral.

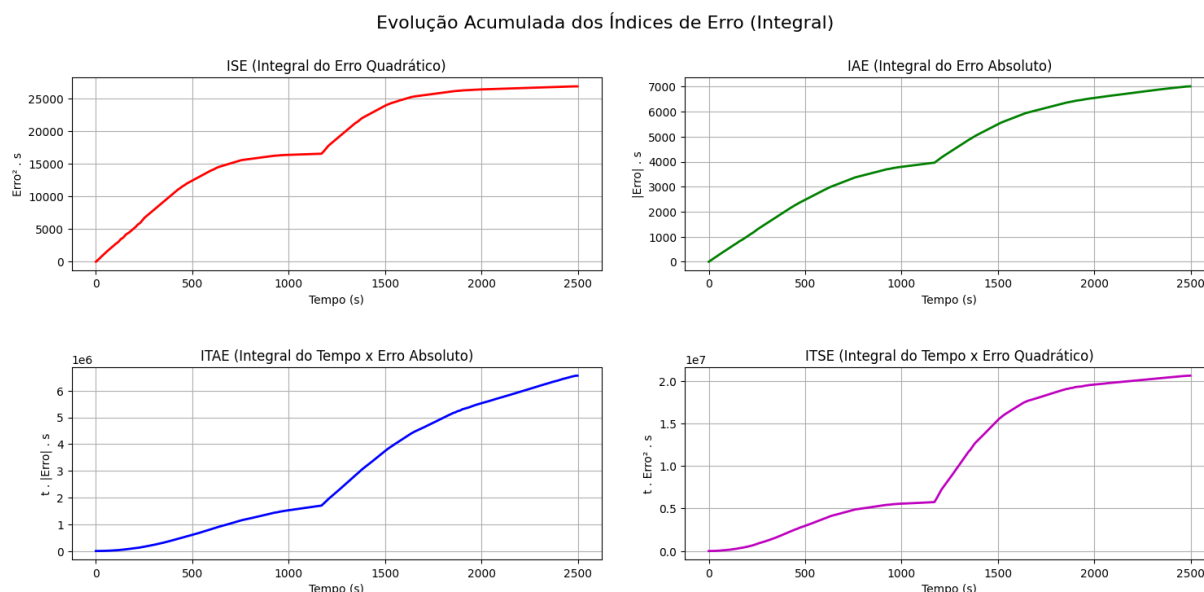


FIGURA 12. Evolução dos índices de desempenho na ótica do erro.

Na Tabela 7 são apresentados os índices de desempenho acumulado na ótica do erro para o cenário de mudanças operacionais na temperatura (degrau de 25°C - 30°C e 30°C - 35°C) da Figura 10.

TABELA 7. Índices de desempenho na ótica do erro (autoria própria).

ISE (°C . s)	IAE (°C² . s)	ITAE (°C . s²)	ITSE (°C² . s²)
26.888,50	7.012,50	6.562.758,00	20.622.316,00

3.4. Discussão dos Resultados

A implementação prática, utilizando o CLP em conjunto com o sistema supervisório SCADA, permitiu o monitoramento em tempo real dos parâmetros do processo. Esse acompanhamento contínuo ofereceu um *feedback* mais imediato e detalhado, possibilitando ajustes rápidos e aprimorando a robustez e a segurança do controle.

A bancada didática confeccionada será útil para as práticas de laboratório das disciplinas da área de controle do Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, destacamos alguns experimentos que serão realizados na bancada: Modelagem matemática do processo, caracterização de sensores e atuadores, linearização da planta em um ponto de operação, projeto e sintonia de controladores PID, projeto de controladores avançados e supervisão local / remota de dados. Para complementar a bancada será desenvolvida uma rede de comunicação remota para comunicar com o sistema supervisório SCADA e com outros processos.

Além do protótipo desenvolvido foi confeccionado um guia (manual) descrevendo o passo-passo da programação e ligação dos sensores ao CLP FX3U para uso por outros alunos e /ou Instituições de Ensino, o guia está disponível na página eletrônica do Orientador do Trabalho.

O Trabalho em tela não é apenas uma repetição de trabalhos existentes; ele representa uma síntese moderna e de alto valor didático das tendências publicadas em artigos e conferências do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) nos últimos 3 anos, disponíveis na *IEEE Xplore digital library*. Destacamos três pontos fundamentais de comparação, a saber:

Vantagem Industrial - O trabalho do IFPB opta por um CLP em vez de um microcontrolador (Arduino ou Raspberry Pi), e por um SCADA industrial em vez de uma *interface web* simples, o que oferece uma formação mais direta para o mercado de trabalho.

Rigor Acadêmico - Aborda um processo MIMO (Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas) complexo (nível-temperatura) e planeja implementar estratégias de controle avançado (cascata) que são temas centrais de conferências recentes do IEEE.

Visão de Futuro - O projeto está posicionado exatamente na transição entre a automação industrial clássica (integração do CLP com o SCADA local) e as tendências emergentes (IIoT – *Industrial Internet of Things*), como *R4EM*, v. 7, n. 2, p. 12-25, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21708/issn27635325.v7n2.a15010.2025>

indicado pela proposta de trabalhos futuros para supervisão remota.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho culminou no desenvolvimento e na implementação bem-sucedida de uma planta didática para controle de nível e temperatura, constituindo uma ferramenta de ensino de automação industrial de baixo custo e alta replicabilidade. A principal contribuição do protótipo reside na sua viabilidade econômica, apresentando um custo total de R\$ 727,15, o que o posiciona como uma alternativa altamente acessível e eficaz em comparação com soluções comerciais similares, que podem alcançar R\$ 15.000,00.

As estratégias de controle implementadas conseguiram rastrear/mapear com eficácia as referências frente às saídas controladas com bom desempenho dinâmico e estabilidade em malha fechada, em termos das mudanças operacionais de funcionamento da planta, bem como no compromisso da estratégia de controle na redução de tempo e na qualidade do produto final.

O diferencial metodológico foi alcançado pela integração do CLP industrial FX3U com o sistema SCADA Elipse E3, elevando o realismo do aprendizado. Tal arquitetura permitiu a supervisão local dos dados e a realização de medições em tempo real das variáveis de processo. Com isso, a bancada didática se estabelece como um recurso pedagógico valioso e essencial para as práticas de laboratório das disciplinas de Controle do Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação.

Como trabalhos futuros sugere-se: (a) Construir uma *interface* da supervisão remota dos dados via *web site*; (b) Realizar a sintonia e validação dos controles PID para a malha de nível; (c) Desenvolver e validar uma estratégia de controle em cascata; (d) adicionar um módulo de simulação de falhas (falha no sensor, curto-circuito), ampliando a profundidade didática dos experimentos.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa recebeu apoio financeiro do IFPB para uma bolsa de pesquisa de nível superior e despesas de custeio por meio da Chamada Interconecta IFPB - Edital Nº 01/2025. Agradecimentos ao IFPB Campus Cajazeiras pela disponibilização da estrutura laboratorial durante a condução dos testes de validação da bancada didática.

REFERÊNCIAS

- [1] OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª Edição, Editora Pearson, 2010.
- [2] ALEXANDRE, G. B. Controle liga-desliga e supervisão de dados em uma estufa. **Anais**. Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia. Goiânia – GO, 2022.
- [3] OLIVEIRA, *et al.* Automação nos processos industriais: processo de implementação e o papel do gestor de tecnologia da informação. **Revista Prospectus** - Fatec Itapira, v. 6, n.1, p. 153-203, Jan/Jun, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.12719343.
- [4] ARAÚJO, *et al.* Sistema inteligente de supervisão e controle de capacidade em processos industriais: integração de SCADA, IA e aprendizado de máquina. **ARACÊ**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 16090–16112, 2024. DOI: 10.56238/arev6n4-295.
- [5] SHAW, W. T. **Cybersecurity for industrial SCADA systems**. S.L.: PennWell Books, 2006.
- [6] VIDAL, J. N. **Bancada didática de baixo custo para o ensino de teoria de controle**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.
- [7] MARTINS, A. A.; FIGUEIREDO, B. R.; ROCHA, R. R. Proposta de bancada didática para instrumentação e controle de nível e vazão – P&ID e DCP. **Anais**. 52º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE 2024). Vitória - ES, 2024. DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5091
- [8] VOLZ, A.K.; OLIVEIRA, J.A. Elaboração de uma bancada didática para controle de temperatura e medição de vazão. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 41, p. 373-384, 2022.
- [9] PINESSO, R.G.S. **Desenvolvimento de *function blocks* para implementar datalogger em CLP**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau - SC, 2024.
- [10] MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 5ª edição. São Paulo: Atlas, 2002.
- [11] MALHOTRA, N. **Pesquisa de marketing: foco na decisão**. 3ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2011.
- [12] PINHEIRO, J. K. P. **Controle liga-desliga de temperatura e supervisão de dados em uma estufa didática**. Monografia (Tecnologia em Automação Industrial), Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras-PB, 2023.
- [13] SILVA NETO, A. M; SANTOS, N. A. **Sistemas de controle e supervisão de dados em uma estufa didática**. Monografia (Engenharia de Controle e Automação), Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras-PB, 2024.
- [14] DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 8ª Edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- [15] LI, Y.; ANG, K. H.; CHONG, G.C.Y. PID control system analysis, design, and technology. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. Vol. 13, Issue 4, page 559-576, 2005. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331