

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
*CAMPUS CAJAZEIRAS*

GIUSEPPE MANOEL DANTAS MELO  
HERILIANY IASMIM DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA SISTEMAS DE  
AUTOMAÇÃO E CONTROLE EM PROCESSOS TÉRMICOS**

Cajazeiras-PB  
2025

GIUSEPPE MANOEL DANTAS MELO  
HERILIANY IASMIM DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA SISTEMAS DE  
AUTOMAÇÃO E CONTROLE EM PROCESSOS TÉRMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação, sob Orientação do Prof. Me. Geronimo Barbosa Alexandre.

Cajazeiras-PB  
2025

IFPB / Campus Cajazeiras  
Coordenação de Biblioteca  
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva  
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

M528d Melo, Giuseppe Manoel Dantas.  
Desenvolvimento de bancada didática para sistemas de automação e controle em processos térmicos / Giuseppe Manoel Dantas Melo, Heriliany Iasmim de Sousa.– 2025.  
74f. : il.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2025.  
Orientador(a): Prof. Me. Geronimo Barbosa Alexandre.  
1. Controle automático. 2. Automação industrial. 3. Bancada didática. 4. Processo térmico. I. Sousa, Heriliany Iasmim de. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

IFPB/CZ

CDU: 681.5(043.2)

GIUSEPPE MANOEL DANTAS MELO  
HERILIANY IASMIM DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA SISTEMAS DE  
AUTOMAÇÃO E CONTROLE EM PROCESSOS TÉRMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso Engenharia de  
Controle e Automação do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,  
*Campus* Cajazeiras, como parte dos  
requisitos para a obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia de Controle e  
Automação.

Aprovado em 26 de Agosto de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **Geronimo Barbosa Alexandre**  
Data: 01/09/2025 11:54:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

M. Sc. Geronimo Barbosa Alexandre – IFPB-*Campus* Cajazeiras  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 **EMANOEL RAIMUNDO QUEIROZ CHAVES JUNIOR**  
Data: 02/09/2025 00:20:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

D. Sc. Emanuel Raimundo Queiroz Chaves Junior– IFPB-*Campus* Cajazeiras  
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente  
 **Manoel Alves Cordeiro Neto**  
Data: 01/09/2025 19:27:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Esp. Manoel Alves Cordeiro Neto– IFPE-*Campus* Garanhuns  
Examinador Externo

Dedicamos este trabalho, primeiramente a Deus, que em sua infinita providência, nos guiou, fortaleceu e sustentou em cada etapa desta jornada. Aos nossos familiares, pelo apoio constante, pelas palavras de encorajamento e por estarem presentes em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Por Giuseppe Manoel Dantas Melo

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e força para perseverar até a conclusão desta etapa tão importante da minha vida. Sua presença foi meu alicerce e inspiração em todos os momentos desta caminhada.

Aos meus pais, Manoel José Neto e Bianca Estrela Dantas Melo, pelo amor incondicional, apoio constante, conselhos e incentivo, que foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui.

Estendo minha gratidão aos meus irmãos, avós, tios, padrinhos e a todos os familiares e amigos, que sempre estiveram presentes com palavras de apoio, gestos de carinho e compreensão nos momentos de ausência.

À minha parceira de TCC, Heriliany Iasmim de Sousa, agradeço por cada momento de risada e descontração, que tornaram mais leves as fases de dificuldade. Desde o início desta jornada, compartilhando desafios, conquistas e aprendizados, apoiando-nos mutuamente em cada etapa.

Ao meu orientador, Geronimo Barbosa, pela dedicação, paciência, orientação e por compartilhar seus conhecimentos de forma tão clara e construtiva, contribuindo de maneira fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço à Instituição Federal da Paraíba Campus Cajazeiras, a todos os professores, ao corpo docente e aos colegas de curso, pelo ambiente de aprendizado e pela troca de experiências que foram indispensáveis para minha formação acadêmica e pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Por Heriliany Iasmim de Sousa

Primeiramente, agradeço a Deus, que sempre foi a minha fortaleza. Sua graça e providência sustentaram cada passo da minha caminhada, e foi n'Ele que encontrei forças nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais, Francinaldo e Geneglauca, sou profundamente grata pelo apoio incondicional, pelo amor constante e por nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Aos meus irmãos, Henrique e Mathias, pelo carinho, parceria e por sempre estarem ao meu lado ao longo dessa caminhada.

Aos meus avós, Francisco e Floriza, por acreditarem no meu potencial e por sempre me incentivarem com palavras de apoio. Às minhas avós, Eva e Perpétua *in memoriam*, que, com sabedoria, sempre destacaram a importância da educação como caminho para o crescimento.

Ao meu namorado, Vandeilson, que esteve ao meu lado com paciência, carinho e companheirismo, seu apoio fez toda a diferença.

Aos amigos que fiz ao longo desses anos, levo comigo cada laço construído com carinho e gratidão. Em especial, agradeço a Giuseppe Manoel, pela parceria, incentivo e amizade constante em todas as etapas desta jornada.

Ao meu orientador, professor Gerônimo Barbosa, agradeço pela dedicação, paciência e comprometimento ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Suas orientações foram fundamentais para o crescimento deste projeto e da minha trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal da Paraíba Campus Cajazeiras, a todos os professores e servidores, pelo compromisso com a educação e por contribuírem para um ambiente de aprendizado, apoio e crescimento que marcaram minha formação pessoal e profissional.

“Nada na vida acontece por acaso; em tudo,  
Deus tem um propósito.” (*Autor desconhecido*)

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada didática para o estudo de sistemas de automação e controle aplicados a processos térmicos, criada para aproximar a prática acadêmica das aplicações industriais por meio da integração de *hardware* e *software*. A proposta englobou a seleção e integração de componentes industriais (lâmpada como atuador térmico, sensor PT100 com transmissor 4–20 mA, relé de estado sólido, CLP Mitsubishi FX3U-MT, IHM Samkoon e supervisor VTScada) com comunicação via Modbus, modelagem simplificada da planta térmica e validação experimental por meio de ensaios comparativos entre estratégias de controle. Os testes demonstraram a repetibilidade e a confiabilidade das leituras e da comunicação, evidenciando diferenças claras de comportamento entre os modos avaliados: o controle liga-desliga apresentou oscilações periódicas em torno do *setpoint*, enquanto o controle PID destacou-se por maior capacidade de estabilização, redução do erro em regime permanente e melhor resposta a perturbações. Além disso, a solução mostrou-se de baixo custo e de fácil replicação, ampliando seu potencial de adoção em contextos laboratoriais.

**Palavras-chave:** automação industrial; bancada didática; controle; processos térmicos.

## ABSTRACT

This work presents the development of a didactic bench for the study of automation and control systems applied to thermal processes, designed to bring academic practice closer to industrial applications through the integration of hardware and software. The proposal encompassed the selection and integration of industrial components (a lamp as a thermal actuator, PT100 sensor with 4–20 mA transmitter, solid-state relay, Mitsubishi FX3U-MT PLC, Samkoon HMI and VTScada supervisory system) with communication via Modbus, simplified modeling of the thermal plant and experimental validation through comparative tests of control strategies. The tests demonstrated the repeatability and reliability of measurements and communication, revealing clear behavioral differences among the evaluated modes: on–off control exhibited periodic oscillations around the setpoint, while PID control stood out for its greater stabilization capability, reduction of steady-state error and improved response to disturbances. In addition, the solution proved to be low-cost and easily replicable, increasing its potential for adoption in laboratory contexts.

**Keywords:** industrial automation; didactic bench; control; thermal processes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bloco PID em <i>ladder</i> no CLP da linha FX3 Mitsubishi.....	21
Figura 2 – Escala de ajuste dos parâmetros no CLP da linha FX3 Mitsubishi. ....	21
Figura 3 – Estrutura e funcionamento dos sensores de temperatura RTD e termopar.....	22
Figura 4 – Funcionamento básico de um SSR.....	23
Figura 5 – Esquema de controle em malha aberta .....	26
Figura 6 – Esquema de controle em malha fechada .....	26
Figura 7 – Controle <i>on-off</i> com banda de histerese .....	27
Figura 8 – Resposta em malha aberta de um processo de primeira ordem.....	29
Figura 9 – Fluxograma de etapas do TCC .....	31
Figura 10 – Lâmpada incandescente de 100W .....	34
Figura 11 – Sensor de temperatura PT100.....	35
Figura 12 – Transmissor 4-20 mA.....	35
Figura 13 – Relé de estado sólido (SSR) utilizado no controle da lâmpada.....	36
Figura 14 – Relé acoplador de <i>interface</i> .....	37
Figura 15 – Ventoinhas utilizadas para o resfriamento do sistema.....	37
Figura 16 – CLP Mitsubishi FX3U-MT instalado na bancada .....	38
Figura 17 – IHM Samkoon utilizada para visualização e controle. ....	39
Figura 18 – Botões e indicadores luminosos da bancada .....	39
Figura 19 – Fonte 220V <sub>CA</sub> / 24 V <sub>DC</sub> utilizada para alimentação. ....	40
Figura 20 – Conversor USB para RS-485 utilizado no projeto. ....	41
Figura 21 – Modelagem 3D da bancada realizada no <i>software</i> SketchUp. ....	42
Figura 22 – Esquemático elétrico da bancada .....	44
Figura 23 – Implementação em <i>ladder</i> para conversão de sinal analógico em temperatura (°C). .....	46
Figura 24 – Topologia de comunicação do sistema.....	47
Figura 25 – Código em <i>ladder</i> para comunicação modbus .....	48
Figura 26 – Configuração dos parâmetros de comunicação no VTScada .....	48
Figura 27 – Tag's criadas no supervisório. ....	49
Figura 28 – Tela final desenvolvida no VTScada.....	49
Figura 29 – Seleção do <i>driver</i> Mitsubishi FX3U no <i>software</i> SATOOL 6.2. ....	50
Figura 30 – Configuração dos parâmetros de comunicação .....	50

Figura 31 – Tela inicial da IHM com opções de seleção do modo de controle.....	51
Figura 32 – Interface da IHM para controle PID.....	51
Figura 33 – <i>Interface</i> da IHM para controle ON/OFF.....	52
Figura 34 – Tela gráfica da IHM com monitoramento em tempo real da curva da temperatura .....	52
Figura 35 – Curva experimental da resposta térmica ao degrau.....	53
Figura 36 – Estrutura física da bancada didática montada .....	57
Figura 37 – Gráfico de temperatura no modo <i>On-Off</i> (IHM Samkoon).....	58
Figura 38 – Gráfico de temperatura no modo PID (IHM Samkoon).....	59
Figura 39 – Gráfico de temperatura no modo <i>On-Off</i> (VTScada).....	59
Figura 40 – Gráfico de temperatura no modo PID (VTScada).....	60
Figura 41 – Diagrama de blocos para as simulações no Scilab.....	61
Figura 42 – Resposta do sistema para o controlador P do método Ziegler Nichols.....	62
Figura 43 – Resposta do sistema para o controlador PI do método Ziegler Nichols.....	62
Figura 44 – Resposta do sistema para o controlador PID do método Ziegler Nichols.....	63
Figura 45 – Resposta experimental com controle <i>On-Off</i> .....	64
Figura 46 – Resposta experimental com controle P .....	66
Figura 47 – Resposta experimental com controle PI.....	67
Figura 48 – Resposta experimental com controle PID .....	68
Figura 49 – Resposta experimental com perturbação.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols. ....	29
Tabela 2 – Materiais utilizados na construção da bancada didática .....	42
Tabela 3 – Dados coletados de corrente e sinal analógico.....	46
Tabela 4 – Lógica de atuação do controle ON/OFF com banda de histerese .....	55
Tabela 5 – Valores calculados pelo método Ziegler-Nichols. ....	56
Tabela 6 – Parâmetros de desempenho obtidos nas simulações. ....	63
Tabela 7 – Parâmetros observado no controle <i>On-Off</i> .....	65
Tabela 8 – Parâmetros de desempenho (Controle P, valores experimentais). ....	66
Tabela 9 – Parâmetros de desempenho (Controle PI, valores experimentais). ....	67
Tabela 10 – Parâmetros de desempenho (Controle PID, valores experimentais). ....	68
Tabela 11 – Comparação entre os valores obtidos simulados e experimentalmente .....	70

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
3.1	PROCESSOS TÉRMICOS .....	19
3.2	EDUCAÇÃO E BANCADAS DIDÁTICAS EM AUTOMAÇÃO .....	19
3.2.1	<i>Papel das Bancadas Experimentais no Ensino de Engenharia.....</i>	20
3.3	CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS (CLP).....	20
3.3.1	<i>Implementação de Controle PID em CLP's Industriais .....</i>	21
3.4	SENSORES E ATUADORES EM AUTOMAÇÃO TÉRMICA.....	21
3.4.1	<i>Sensores de Temperatura .....</i>	22
3.4.2	<i>Atuadores Térmicos.....</i>	22
3.5	SISTEMA SCADA .....	23
3.6	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM).....	24
3.7	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO .....	24
3.7.1	<i>Protocolo Modbus .....</i>	24
3.8	SISTEMAS DE CONTROLE .....	25
3.8.1	<i>Estruturas de Malha Aberta e Malha Fechada.....</i>	25
3.8.2	<i>Resposta Transitória e Regime Permanente .....</i>	26
3.9	CONTROLADORES CLÁSSICOS.....	26
3.9.1	<i>Controle Liga-Desliga (on-off) .....</i>	26
3.9.2	<i>Controle PID: ação proporcional, integral e derivativa .....</i>	27
3.9.3	<i>Método da Curva de Reação de Ziegler–Nichols.....</i>	29

<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
4.1	COMPONENTES E FUNCIONALIDADES.....	33
4.1.1	<i>Lâmpada Incandescente de 100 Watts (W)</i> .....	33
4.1.2	<i>Sensor de Temperatura PT100</i> .....	34
4.1.3	<i>Transmissor de Corrente 4–20 mA</i> .....	35
4.1.4	<i>Relé de Estado Sólido (SSR)</i> .....	35
4.1.5	<i>Relé Acoplador de Interface</i> .....	36
4.1.6	<i>Ventoinhas de Resfriamento</i> .....	37
4.1.7	<i>CLP Mitsubishi FX3U-MT</i> .....	38
4.1.8	<i>Interface Homem-Máquina (IHM) Samkoon EA-043</i> .....	38
4.1.9	<i>Botões de Comando e Indicadores</i> .....	39
4.1.10	<i>Fonte de Alimentação 24 V</i> .....	40
4.1.11	<i>Conversor USB para RS-485</i> .....	40
4.2	DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DA BANCADA DIDÁTICA.....	41
4.2.1	<i>Modelagem 3D da Bancada</i> .....	41
4.2.2	<i>Aquisição de Materiais e Custo do Protótipo</i> .....	42
4.2.3	<i>Diagrama Elétrico da Bancada Didática</i> .....	43
4.3	MODULAÇÃO PWM E CONTROLE DA POTÊNCIA TÉRMICA.....	44
4.4	CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA PT100.....	45
4.5	INTEGRAÇÃO COM SUPERVISÓRIO E IHM.....	47
4.5.1	<i>Configuração do VTScada</i> .....	47
4.5.2	<i>Configuração da IHM Samkoon</i> .....	49
4.6	MODELAGEM DA PLANTA.....	52
4.7	PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES.....	54
4.7.1	<i>Método de Controle Liga-Desliga (On-Off)</i> .....	54
4.7.2	<i>Método de Sintonia de Ziegler-Nichols</i> .....	55

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>57</b>
5.1	BANCADA MONTADA E TESTE DE FUNCIONAMENTO .....	57
5.1.1	<i>Análise Gráfica das Interface de Operação .....</i>	<i>58</i>
5.2	VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES PROJETADOS .....	60
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	63
5.3.1	<i>Resultados Experimentais do Controle On-Off.....</i>	<i>64</i>
5.3.2	<i>Resultados Experimentais dos Controles P, PI e PID.....</i>	<i>65</i>
5.3.3	<i>Resultado Experimental do Controle PID com perturbação .....</i>	<i>69</i>
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS.....	69
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO LADDER.....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A automação industrial tem se consolidado como um dos principais pilares da modernização dos processos produtivos, promovendo ganhos significativos em produtividade, segurança, padronização e eficiência energética (Groover, 2010). Com o uso de sensores, atuadores, controladores lógicos programáveis (CLPs), *interface* homem-máquina (IHM) e sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), os sistemas industriais tornaram-se mais autônomos, integrados e precisos.

Nesse cenário, destaca-se o controle de variáveis físicas como temperatura, pressão, nível e vazão, essenciais para garantir qualidade dos produtos e a segurança operacional. Em especial, os processos térmicos assumem um papel estratégico em setores como o alimentício, farmacêutico, químico, petroquímico e de refrigeração, exigindo controle rigoroso para assegurar a integridade dos materiais, otimizar recursos e reduzir desperdícios (Franchi, 2018). Isso tem impulsionado a demanda por soluções de controle térmico cada vez mais eficazes e por profissionais qualificados para desenvolver, operar e aprimorar esses sistemas automatizados.

Dentre os diversos tipos de processos automatizados, os processos térmicos ocupam lugar de destaque por envolverem o controle de temperatura em aplicações industriais diversas, como aquecimento e resfriamento de materiais, equipamentos ou ambientes. A regulação eficiente dessa variável é determinante para a integridade do produto, a estabilidade do processo e o consumo energético.

De acordo com Ogata (2010), o controle de sistemas térmicos apresenta desafios específicos devido às suas características dinâmicas, frequentemente não lineares, e à presença de atrasos no tempo de resposta. Para lidar com essas particularidades, são aplicadas diferentes estratégias de controle, entre as quais se destacam o controle liga-desliga (*on-off*), de atuação binária e simples implementação, e o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), em geral, o mais eficiente por ajustar continuamente a saída com base no erro entre a variável medida e o valor de referência.

Diante dos desafios impostos pelo controle de processos térmicos na indústria e da crescente necessidade de domínio prático sobre sistemas automatizados, o ambiente educacional tem buscado estratégias que favoreçam a aprendizagem ativa e contextualizada. As bancadas didáticas despontam como uma ferramenta relevante nesse cenário, por permitirem a simulação e a análise de variáveis em tempo real, aproximando o ensino da realidade dos sistemas industriais.

A utilização de recursos experimentais contribui para a compreensão de conceitos complexos, como a sintonia de controladores, o comportamento dinâmico de sistemas e suas respostas a perturbações, além de favorecer o desenvolvimento de competências práticas essenciais, como instrumentação, automação, análise de sinais e interpretação de processos. Nesse sentido, como destaca Bortolo (2006), aplicar o conteúdo teórico na prática, por meio de processos didáticos bem estruturados, é essencial para minimizar as dificuldades de aprendizagem e promover a construção efetiva do conhecimento.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma bancada didática voltada ao ensino e à experimentação de sistemas de automação e controle térmico, integrando tecnologias industriais reais. A bancada proposta é composta por uma planta térmica experimental, onde uma lâmpada incandescente atua como elemento de aquecimento, e um sensor PT100 realiza a medição da temperatura no interior de uma câmara térmica feita em acrílico. O sistema conta ainda com duas ventoinhas responsáveis pelo resfriamento da planta. O controle do processo é realizado por meio de um Controlador Lógico Programável (CLP), que pode operar tanto em modo *on-off*, quanto em modo PID, selecionável por meio de um botão seletor. Complementando a interface de operação, a bancada é equipada com uma *Interface Homem-Máquina* (IHM) e um sistema supervisório SCADA, oferecendo ao usuário uma experiência próxima da realidade industrial.

A proposta desta bancada visa não apenas o desenvolvimento de uma planta de controle térmico, mas também a criação de um recurso didático que promova a integração entre teoria e prática, permitindo aos estudantes a experimentação de diferentes estratégias de controle em um ambiente seguro, controlado e representativo da realidade industrial. Espera-se, assim, contribuir para a formação de profissionais mais qualificados, capazes de compreender o comportamento dinâmico de sistemas térmicos, interpretar variáveis de processo, aplicar técnicas de automação e realizar a sintonia de controladores. Além disso, a bancada pode servir como ferramenta de apoio para disciplinas voltadas ao controle de processos, instrumentação e automação industrial, ampliando o potencial de aprendizagem e a inserção prática dos alunos nos desafios enfrentados pelo setor produtivo.

## 2 OBJETIVOS

Nesse capítulo delinea-se os objetivos do Trabalho de Conclusão do Curso.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma bancada didática voltada ao estudo de sistemas de controle e automação aplicados a um processo térmico, proporcionando uma ferramenta prática de apoio ao ensino que possibilite o aprofundamento do aprendizado por meio da experimentação e da aplicação de conceitos teóricos em situações reais de controle.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- realizar levantamento bibliográfico e documental acerca dos fundamentos de sistemas de controle, automação industrial, modelagem de processos térmicos, sintonia de controladores, protocolos de comunicação e ferramentas de supervisão;
- projetar e dimensionar a bancada didática, definindo sua estrutura e os componentes de *hardware* e *software* que a compõem, incluindo sensores, atuadores, CLP, e sistemas de supervisão;
- desenvolver o *software* de controle e supervisão, integrando os componentes para possibilitar a experimentação prática e a visualização dos dados;
- implementar o protocolo de comunicação industrial Modbus, garantindo a interoperabilidade entre os dispositivos locais do sistema para a coleta eficiente de dados;
- validar e testar a bancada didática por meio de experimentos que avaliem o desempenho dos métodos de controle aplicados, com ênfase na sintonia do controlador PID;
- analisar os resultados obtidos e propor melhorias, destacando os pontos fortes e as limitações da solução desenvolvida.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, são apresentados os principais conceitos teóricos que fundamentam o desenvolvimento do presente trabalho. A revisão de literatura busca contextualizar os temas relacionados aos processos térmicos e à aplicação da automação industrial em ambientes didáticos, com ênfase no uso de controladores lógicos programáveis (CLPs), sensores, atuadores, sistemas de controle e supervisão. Também são abordados os princípios das *interfaces* homem-máquina (IHMs) e dos protocolos de comunicação utilizados na integração dos dispositivos da bancada. Por fim, explora-se a importância da modelagem da planta térmica e a aplicação de diferentes estratégias de controle, com foco na análise do comportamento dinâmico do sistema e na avaliação de desempenho dos controladores utilizados, contribuindo para a compreensão e otimização dos processos envolvidos.

#### 3.1 PROCESSOS TÉRMICOS

Os processos térmicos são amplamente utilizados na indústria para transformar materiais e controlar propriedades físicas por meio da manipulação de temperatura, estando presentes em sistemas como estufas, fornos, trocadores de calor, caldeiras e equipamentos de refrigeração. A temperatura, nesses contextos, é uma variável crítica que influencia diretamente a eficiência, a segurança e a qualidade do produto final. Controlar adequadamente a temperatura em processos térmicos é essencial para manter condições operacionais estáveis e evitar perdas energéticas ou danos a materiais sensíveis.

De acordo com Çengel e Turner (2012), o controle térmico adequado permite não apenas a otimização do consumo energético, mas também a padronização de processos produtivos, garantindo que os parâmetros de fabricação estejam dentro das especificações técnicas. Em sistemas automatizados, a aplicação de controladores como *on-off*, ou PID, integrados a sensores de temperatura, viabiliza uma resposta rápida às variações térmicas e melhora significativamente o desempenho operacional.

#### 3.2 EDUCAÇÃO E BANCADAS DIDÁTICAS EM AUTOMAÇÃO

As bancadas didáticas têm papel fundamental no ensino de Engenharia, pois permitem ao estudante experimentar conceitos teóricos em situações reais, promovendo a aprendizagem ativa e o desenvolvimento de habilidades práticas essenciais à formação profissional (Fesiel; Rosa, 2005). Por meio de atividades experimentais, os alunos consolidam conhecimentos sobre

instrumentação, análise de sinais e estratégias de controle, além de exercitarem competências como solução de problemas, trabalho em equipe e comunicação técnica. Em cursos de automação, uma bancada que integra CLP, sensores, atuadores e sistemas supervisórios cria um ambiente seguro para testes e validações, reduzindo a barreira entre teoria e prática e aumentando a retenção de conceitos (Surgenor; Firth, 2012).

### 3.2.1 Papel das Bancadas Experimentais no Ensino de Engenharia

No modelo de aprendizagem experiencial de Kolb (1984), o ciclo de experiência concreta, reflexão, conceitualização abstrata e experimentação ativa reforça o processo cognitivo ao envolver o aluno em todas as etapas do conhecimento. As bancadas experimentais viabilizam esse ciclo ao oferecer dados reais para análise, hipóteses para teste e *feedback* imediato, fatores que elevam a motivação e a compreensão dos conteúdos de controle e automação (Feisel; Rosa, 2005). Além disso, o uso de bancadas permite simular falhas e estudar respostas do sistema em condições seguras, preparando o aluno para desafios da indústria moderna, onde a adaptação rápida e o diagnóstico de problemas são cruciais.

### 3.3 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS (CLP)

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) são dispositivos essenciais na automação industrial, substituindo sistemas baseados em relés eletromecânicos por soluções flexíveis e reprogramáveis. Como destacado por Petruzella (2014, p. VII), "O CLP começou como um substituto do sistema de controle a relés, mas foi gradualmente adicionando várias funções de manipulação matemática e lógica. Hoje os CLP's são as melhores opções de controladores para a grande maioria dos processos automatizados.". Essa característica permitiu a adaptação dinâmica a diferentes processos produtivos, reduzindo custos e aumentando a eficiência.

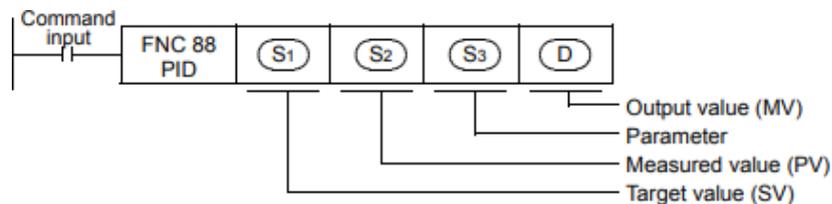
Além disso, os CLP's são programados predominantemente em linguagem *ladder*, uma representação gráfica que simula circuitos elétricos, facilitando a transição para técnicos acostumados com lógica de relés. Conforme Petruzella (2014, p. 68), "A linguagem em diagrama *ladder* é a linguagem mais utilizada para CLP e é projetada para imitar a lógica a relé.". Essa abordagem intuitiva contribui para a popularização dos CLP's em linhas de montagem, controle de máquinas e sistemas de supervisão (SCADA).

### 3.3.1 Implementação de Controle PID em CLP's Industriais

Com o avanço da automação industrial, os Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) passaram a incorporar funções de controle contínuo, como o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo), anteriormente restritas a controladores dedicados. Atualmente, diversos fabricantes disponibilizam instruções específicas para esse tipo de controle, permitindo que processos como temperatura, nível, vazão e pressão sejam regulados com maior precisão diretamente no ambiente do CLP.

Os CLP's da linha FX3 da Mitsubishi possibilitam a implementação de controle PID por meio de instruções específicas na linguagem *ladder*, utilizando um bloco de função denominado PID. Essa funcionalidade permite configurar os parâmetros do controlador diretamente no ambiente de programação, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Bloco PID em *ladder* no CLP da linha FX3 Mitsubishi.



Fonte: Mitsubishi Electric Corporation (2015).

Os parâmetros devem ser ajustados conforme as escalas exigidas pelos registradores internos, obedecendo critérios como unidade de tempo (ms) e porcentagem, estas informações podem ser encontradas no manual do usuário, como demonstra a Figura 2.

Figura 2 – Escala de ajuste dos parâmetros no CLP da linha FX3 Mitsubishi.

Proportional gain (KP)	1 to 32767 (%)	
Integral time (TI)	0 to 32767 ( $\times 100$ ms)	When "0" is set, it is handled as "1" (no integration).
Derivative gain (KD)	0 to 100 (%)	When "0" is set, the derivative gain is not provided.
Derivative time (TD)	0 to 32767 ( $\times 10$ ms)	When "0" is set, the derivative operation is not executed.

Fonte: Mitsubishi Electric Corporation (2015).

## 3.4 SENSORES E ATUADORES EM AUTOMAÇÃO TÉRMICA

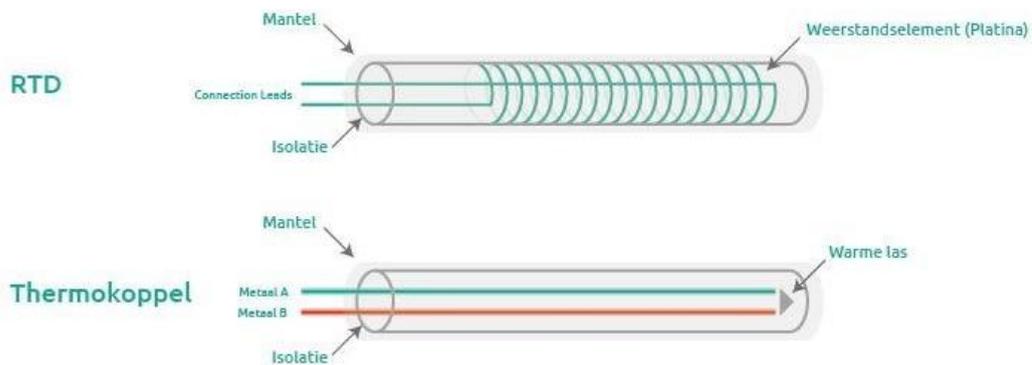
Em sistemas de controle de processos térmicos, a precisão e a confiabilidade dependem diretamente da qualidade dos sensores responsáveis pela medição da temperatura e dos atuadores que realizam a variação da energia térmica. A escolha adequada desses dispositivos é fundamental para garantir desempenho, segurança e robustez do sistema.

### 3.4.1 Sensores de Temperatura

Os sensores mais frequentemente utilizados em automação térmica são os termopares e os RTD's (*Resistance Temperature Detectors*).

Os termopares se baseiam na geração de uma tensão termoelétrica que é proporcional à diferença de temperatura entre dois metais distintos unidos entre si em uma junção, como pode ser visto na Figura 3. Eles apresentam uma faixa de trabalho bastante larga (-200 °C a 1800 °C) e uma rápida resposta, porém, sua linearidade é menor e precisão em comparação aos RTD's (Fraden, 2010).

Figura 3 – Estrutura e funcionamento dos sensores de temperatura RTD e termopar.



Fonte: Istecadmin, (2017).

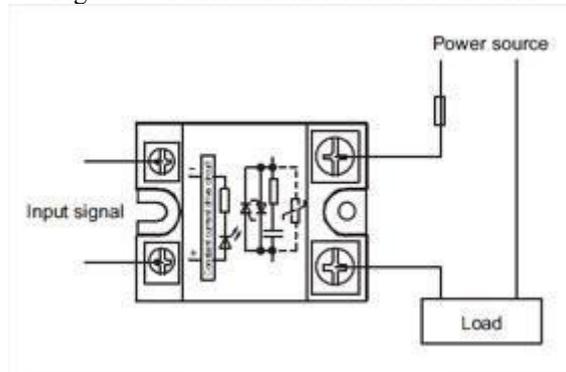
Os RTD's, como o conhecido PT100, se baseiam na variação da resistência elétrica em função da temperatura de um metal (geralmente platina). Embora apresentem faixa de trabalho mais restrita (-200 °C a 850 °C), têm uma melhor precisão ( $\pm 0,1$  °C) e repetibilidade (Petruzella, 2010). Para o tratamento do sinal resistivo com os sistemas de aquisição institucionalizados, utiliza-se habitualmente um conversor 4-20 mA, que transforma o sinal de resistência em corrente normalizada, garantindo maior imunidade ao ruído nos longos trechos de cabeamento.

### 3.4.2 Atuadores Térmicos

Os atuadores convertem o sinal de controle em variação de potência térmica. Elementos resistivos (aquecedores de cartucho ou lâmpadas) são amplamente empregados pela sua simplicidade e facilidade de controle. A regulação pode ser feita de forma discreta liga-desliga via relé acoplador de interface, adequado para aplicações de baixa frequência de comutação, ou de forma contínua, usando Relés de Estado Sólido (SSR, do inglês *Solid State Relay*), que, por meio de sinal analógico ou PWM (*Pulse Width Modulation*), permitem controle mais refinado da potência e evitam desgastes mecânicos (Bolton, 2015). Como mostra a Figura 4, os SSR's

operam ao receber um sinal de controle, acionando o aquecedor de forma precisa, sem partes móveis, o que minimiza o desgaste.

Figura 4 – Funcionamento básico de um SSR.



Fonte: Tei Ingeniería Mexicana (2025).

Sistemas de modulação por largura de pulso (PWM) acoplados a SSR's oferecem excelente resposta dinâmica e precisão na regulação de temperatura, pois ajustam a razão cíclica do sinal de acionamento do aquecedor, mantendo a potência média necessária ao processo (Petruzella, 2010).

### 3.5 SISTEMA SCADA

Os sistemas SCADA são fundamentais na supervisão de processos industriais, permitindo a coleta de dados em tempo real e controle remoto de instalações. Conforme Boyer (2004), SCADA é a tecnologia que permite ao usuário coletar dados de uma ou mais instalações distantes e enviar instruções de controle limitadas para essas instalações. Essa arquitetura é composta por unidades remotas (RTU's), CLP's e *interface* homem-máquina (IHM), conectados por redes industriais como OPC UA (*Open Platform Communications Unified Architecture*) e Modbus.

A evolução dos sistemas SCADA está intimamente ligada à crescente demanda por segurança e confiabilidade dos dados. Como alerta Stouffer et al. (2015), a maior conectividade à internet expõe vulnerabilidades críticas, exigindo protocolos de cibersegurança robustos. Hoje, os SCADA são pilares da Indústria 4.0, integrando *big data* e *cloud computing* e sendo amplamente aplicados em setores como energia e manufatura, com foco em eficiência operacional e redução de custos.

### 3.6 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM)

As *Interfaces* Homem-Máquina (IHMs) são componentes essenciais nos sistemas automatizados, pois permitem a interação entre o operador e os processos industriais. Urbas, Obst e Stöss (2012) descrevem-nas como uma “janela para o processo”, capaz de torná-lo mais ágil, seguro, confiável e produtivo. Por meio de telas gráficas, botões virtuais, indicadores de alarme e gráficos, as IHMs oferecem uma visão clara e em tempo real do funcionamento do sistema, viabilizando a tomada de decisões rápidas e assertivas.

Segundo Hollifield (2012), o estudo e desenvolvimento de sistemas utilizando interface IHM proporcionam uma melhoria no controle, facilitando a execução de testes e monitoramento, resultando em uma redução significativa de custos. Isso torna as IHMs não apenas ferramentas operacionais, mas também elementos estratégicos na implementação de processos eficientes e adaptáveis.

Dessa forma, destaca-se que sua principal característica está na interatividade que proporcionam entre operador e máquina, permitindo que ajustes, comandos e diagnósticos sejam realizados de forma intuitiva, rápida e visualmente orientada. Essa facilidade de uso melhora significativamente a compreensão do processo, reduz a ocorrência de erros operacionais e torna mais ágil a tomada de decisões em ambientes produtivos.

### 3.7 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Os protocolos de comunicação industrial são formatos e regras que possibilitam a troca de informações entre controladores, sensores, atuadores e sistemas de supervisão. Eles garantem interoperabilidade, sincronismo temporal e confiabilidade na transmissão de dados mesmo em ambientes hostis do ponto de vista eletromagnético.

Os mais conhecidos são Modbus, Profibus, DeviceNet, Ethernet/IP e OPC UA, cada um com características de desempenho, de topologia e de custo de implementação.

#### 3.7.1 *Protocolo Modbus*

O protocolo Modbus é um padrão de comunicação amplamente utilizado em sistemas de automação industrial devido à sua simplicidade, interoperabilidade e aceitação consolidada no mercado. Desenvolvido pela empresa Modicon em 1979, o protocolo opera em uma arquitetura cliente-servidor, na qual o dispositivo mestre envia comandos e os dispositivos escravos apenas respondem (Modbus Organization, 2020).

As principais variações do protocolo incluem o Modbus RTU, que opera sobre interfaces seriais como RS-232 e RS-485, sendo estas as tecnologias adotadas no presente projeto. A interface RS-485 é especialmente vantajosa em ambientes industriais por suportar comunicação em longas distâncias e permitir a conexão de múltiplos dispositivos em um barramento compartilhado. Já a RS-232, embora mais limitada em distância e número de dispositivos, também é amplamente utilizada em aplicações ponto a ponto.

A estrutura de dados do Modbus é composta por áreas bem definidas de memória, como bobinas (*coils*), entradas digitais (*discrete inputs*), registradores de entrada (*input registers*) e registradores de retenção (*holding registers*), que podem ser lidos ou escritos por meio de códigos de função padronizados. Essa organização, aliada à arquitetura aberta e ampla documentação técnica, torna o protocolo Modbus uma escolha popular em bancadas didáticas, projetos com CLP's, sensores industriais e sistemas supervisórios como o utilizado neste trabalho favorecendo tanto o aprendizado quanto a aplicação prática em contextos educacionais e industriais.

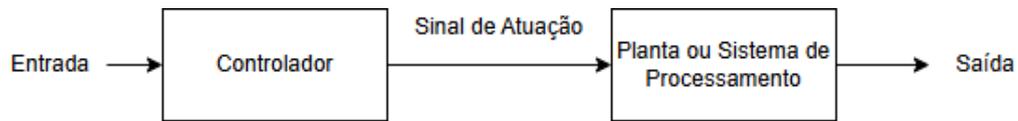
### 3.8 SISTEMAS DE CONTROLE

A teoria de sistemas de controle estuda as formas pelas quais variáveis de um processo podem ser mantidas ou conduzidas a valores desejados, por meio de estratégias que utilizam realimentação (*feedback*) ou não. Nos sistemas de malha aberta, não há correção automática, enquanto na malha fechada a saída influencia diretamente a ação de controle. Além disso, a análise da resposta transitória e do comportamento em regime permanente é fundamental para quantificar a eficiência e a estabilidade do sistema (Nise, 2015).

#### 3.8.1 Estruturas de Malha Aberta e Malha Fechada

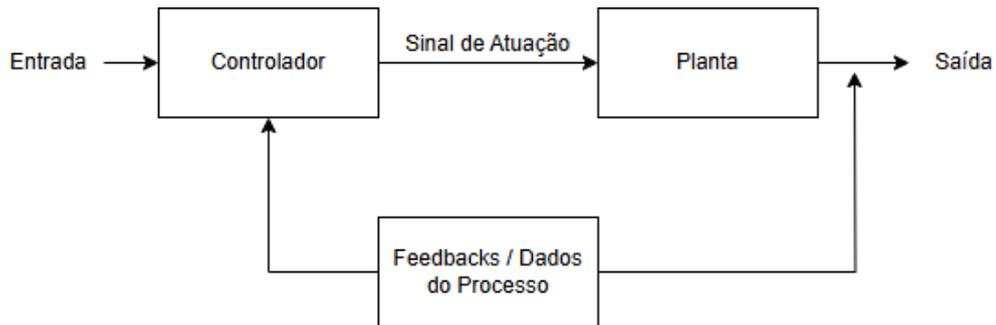
Em sistemas de malha aberta (Figura 5), o controlador age unicamente com base na referência de entrada, sem considerar os efeitos de perturbações ou variações na planta, o que pode levar a erros de seguimento em presença de distúrbios ou alterações nos parâmetros do processo (Ogata, 2010). Já em sistemas de malha fechada ou realimentados (Figura 6), a saída é medida e comparada continuamente com o valor de referência, e o erro resultante alimenta o controlador, que ajusta a ação de controle para reduzir ou eliminar este desvio, conferindo maior robustez e precisão ao sistema (Nise, 2015).

Figura 5 – Esquema de controle em malha aberta.



Fonte: LMLogix Automação (2025).

Figura 6 – Esquema de controle em malha fechada.



Fonte: LMLogix Automação (2025).

### 3.8.2 Resposta Transitória e Regime Permanente

A resposta transitória descreve como o sistema reage a uma mudança de referência ou perturbação antes de atingir um novo estado estacionário, caracterizada por parâmetros como tempo de subida, sobrelevação (*overshoot*) e tempo de acomodação. Esses indicadores são usados para avaliar a rapidez e a estabilidade da resposta inicial (Ogata, 2010). O regime permanente refere-se ao comportamento do sistema após o término da fase transitória, quando as variáveis oscilam em torno de valores fixos; o erro em regime permanente quantifica o desvio entre saída e referência de forma contínua, sendo essencial para aferir a precisão a longo prazo do controlador (Nise, 2015).

## 3.9 CONTROLADORES CLÁSSICOS

Os controladores clássicos são amplamente empregados em processos industriais devido à sua simplicidade de implementação e eficácia em diversas aplicações. Nesta seção, apresentam-se os princípios do controle liga-desliga, o funcionamento do controlador PID e o método de sintonia de Ziegler–Nichols.

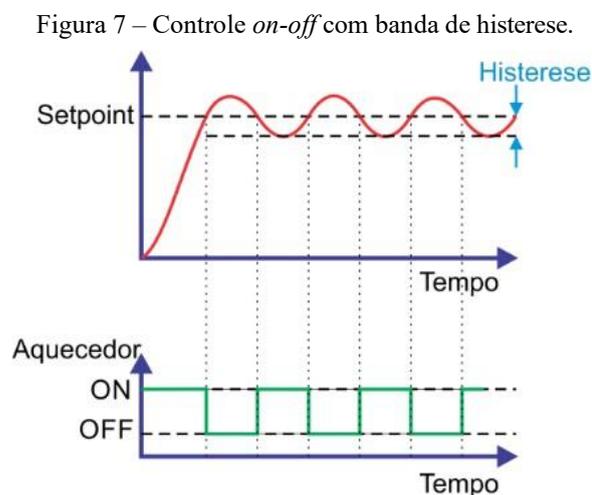
### 3.9.1 Controle Liga-Desliga (*on-off*)

O controle *on-off*, também conhecido como controle de dois estados ou controle de duas posições, consiste em ativar ou desativar um atuador com base na comparação entre a variável de processo e o ponto de ajuste (*setpoint*). Quando a variável medida ultrapassa o *setpoint*

acrescido de uma banda de histerese, o atuador é desligado; quando cai abaixo do *setpoint* diminuído dessa banda, o atuador é ligado novamente (OGATA, 2010).

Conforme descrito por Alfacom (2024), quando o valor do processo está abaixo do ponto de ajuste, a saída é ligada, fornecendo energia ao atuador. Quando o valor do processo ultrapassa o ponto de ajuste, a saída é desligada, interrompendo a alimentação. Assim, o controle ocorre com base em dois estados fixos (ligado/desligado, ou 0% e 100% do controle), sem intermediários, caracterizando-se como uma ação descontínua. Essa operação binária objetiva manter a variável de processo, como a temperatura, dentro de uma faixa aceitável ao redor do *setpoint*.

A Figura 7 ilustra o funcionamento desse tipo de controle: observa-se a oscilação da variável controlada em torno do *setpoint*, causada pela comutação periódica do atuador (no caso, um aquecedor) entre os estados “ligado” e “desligado”, conforme a histerese definida no sistema.



Fonte: Alfacom (2024).

### 3.9.2 Controle PID: ação proporcional, integral e derivativa

O controlador PID (Proporcional–Integral–Derivativo) é amplamente utilizado em sistemas de controle industrial devido à sua robustez e eficácia em uma variedade de aplicações, como controle de temperatura, nível, pressão e vazão. Sua principal função é minimizar o erro entre o valor desejado (*setpoint*) e a saída do processo, conforme definido por:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

Onde  $e(t)$  é o erro,  $r(t)$  é o valor de referência, e  $y(t)$  é a variável controlada.

A saída do controlador é determinada pela combinação de três ações de controle, expressas em:

$$u(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(t) dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Essa estrutura clássica é detalhada por Nise (2015) e Ogata (2010).

Cada termo da Equação (2) representa uma ação com efeito específico sobre o comportamento do sistema, conforme descrito a seguir.

- Ação Proporcional (P), definida por:

$$u(t) = Kp e(t) \quad (3)$$

O termo proporcional produz uma saída diretamente proporcional ao erro instantâneo, acelerando a resposta e reduzindo o tempo de subida. Entretanto, por si só, não elimina o erro em regime permanente (*offset*) e, se  $Kp$  for muito elevado, pode introduzir oscilações ou instabilidade no laço de controle (Nise, 2015).

- Ação Integral (I), dada por:

$$u(t) = Ki \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$

Essa ação acumula o erro ao longo do tempo, contribuindo para a eliminação do erro em regime estacionário. Conforme observado por Dorf e Bishop (2016), o ganho integral ( $Ki$ ) deve ser cuidadosamente ajustado, pois valores excessivos podem causar oscilações, *windup* (acúmulo excessivo do termo integral) e degradação da estabilidade, especialmente quando o sistema possui saturações.

- Ação Derivativa (D), definida por:

$$u(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Essa componente atua com base na taxa de variação do erro, antecipando sua tendência e fornecendo uma ação corretiva que melhora o desempenho em regime transitório.

O controlador PID combina três estratégias complementares proporcional, integral e derivativa que, quando ajustadas adequadamente, proporcionam desempenho estável e preciso ao sistema de controle. A correta sintonia dos ganhos  $Kp$ ,  $Ki$  e  $Kd$  é essencial para o equilíbrio entre rapidez, precisão e robustez em diferentes tipos de processos industriais.

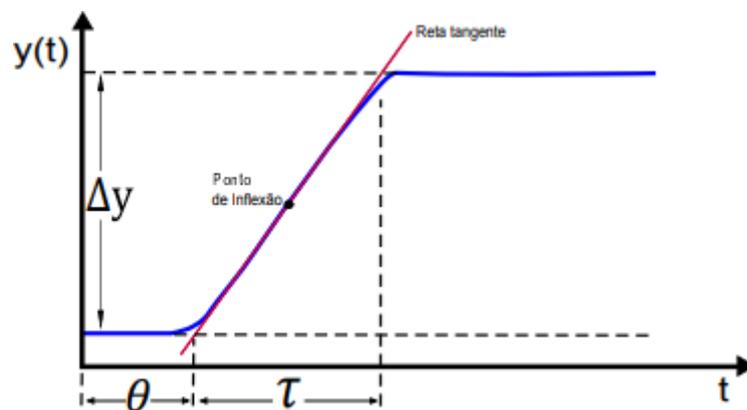
### 3.9.3 Método da Curva de Reação de Ziegler–Nichols

O método da curva de reação de Ziegler-Nichols é uma técnica clássica e prática de sintonização de controladores PID em malha aberta. Ele parte da observação da resposta ao degrau do sistema: um estímulo abrupto aplicado à entrada, cujo comportamento de saída é registrado para análise. A partir dessa resposta, são identificados dois parâmetros essenciais:

- Atraso de Transporte ( $\theta$ ): intervalo de tempo entre a aplicação do degrau e o início da resposta do sistema.
- Constante de Tempo ( $\tau$ ): é o tempo entre o ponto de inflexão e a interseção da reta tangente com o valor final da saída.

A Figura 8 demonstra esse procedimento.

Figura 8 – Resposta em malha aberta de um processo de primeira ordem.



Fonte: Pinto (2014).

Com esses parâmetros, os ganhos do controlador PID são estimados por fórmulas empíricas demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{\tau}{K\theta}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0,9\left(\frac{\tau}{K\theta}\right)$	$3,33 \times \theta$	0
<b>PID</b>	$1,2 \times \left(\frac{\tau}{K\theta}\right)$	$2 \times \theta$	$0,5 \times \theta$

Fonte: Adaptado de Pinto (2014).

Segundo Dorf e Bishop (2016), este método é amplamente utilizado em processos industriais por sua simplicidade e eficácia, mesmo em sistemas não lineares. Ainda assim, por

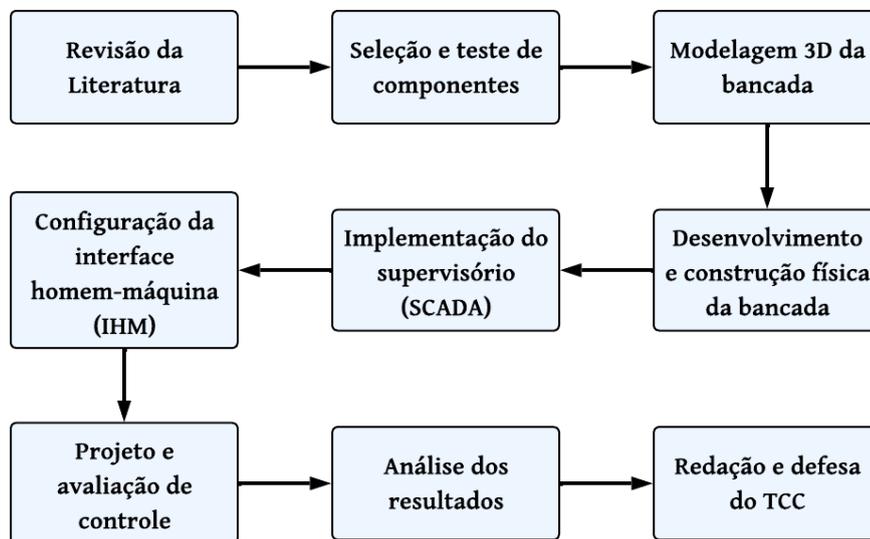
ser uma abordagem empírica, pode demandar ajustes posteriores via refinamentos manuais ou métodos mais avançados, especialmente em sistemas com alta sensibilidade dinâmica ou presença de ruído.

## 4 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem metodológica mista, integrando elementos quantitativos e qualitativos, e é classificada como aplicada, de natureza exploratória e descritiva, conforme os critérios metodológicos definidos por Coelho (2019). Tal abordagem se justifica pela necessidade de embasar teoricamente os conceitos relacionados ao controle de processos térmicos, ao mesmo tempo, em que se busca validar, de maneira experimental, as soluções propostas em bancada.

O método de trabalho contempla as seguintes etapas principais: revisão bibliográfica, projeto e construção de bancada didática, integração com sistemas de *interface* homem-máquina (IHM) e supervisorio (SCADA), e desenvolvimento e avaliação de controladores. A Figura 9 apresenta o fluxograma geral da metodologia, com as etapas interdependentes que norteiam o desenvolvimento do projeto.

Figura 9 – Fluxograma de etapas do TCC.



Fonte: Os autores (2025).

### a) Revisão da literatura

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico em bases de dados científicas, como IEEE Xplore, ScienceDirect, periódicos CAPES, ResearchGate e Google Acadêmico. O objetivo foi reunir fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento do projeto, abordando temas como controle de processos térmicos, controladores *on-off* e PID, automação industrial com CLP's, sensores de temperatura industriais, sistemas supervisorios SCADA, integração de IHMs com CLP's, comunicação serial RS-232 e RS-485, além do protocolo

Modbus. As referências selecionadas forneceram conhecimentos para o dimensionamento dos componentes e o desenvolvimento das estratégias de controle.

b) Seleção e teste de componentes

Com base na fundamentação teórica, foi realizada a escolha dos elementos que compõem a bancada (atuadores, sensores, CLP, fontes, entre outros) com base em critérios de desempenho, custo e compatibilidade.

c) Modelagem 3D da bancada

Após a seleção dos componentes, considerando suas dimensões físicas e características funcionais, foi elaborada a modelagem tridimensional da bancada. Essa etapa permitiu prever a disposição física dos dispositivos, garantindo o melhor aproveitamento do espaço disponível e a organização adequada dos elementos.

d) Desenvolvimento e construção física da bancada

Com base no modelo tridimensional previamente elaborado, foi realizada a montagem física da estrutura da bancada. Nessa etapa, procedeu-se à fixação dos dispositivos, à interligação dos componentes e à organização dos sistemas elétrico e de controle. A montagem seguiu critérios de segurança (NR12), acessibilidade e funcionalidade, assegurando uma disposição lógica dos elementos.

e) Implementação do supervisório (SCADA)

Nesta etapa, foi realizada a criação da aplicação de comando e supervisão utilizando o *software* VTScada da Delta Electronics. O desenvolvimento contemplou a configuração das variáveis do processo, aquisição e monitoramento em tempo real, bem como o registro e histórico dos dados coletados.

f) Configuração da *interface* homem-máquina (IHM)

Paralelamente ao desenvolvimento do supervisório, foi realizada a configuração da Interface da IHM utilizada no processo. A programação teve como objetivo permitir a interação direta do usuário com o sistema, possibilitando o ajuste de parâmetros como o *setpoint*, seleção do modo de controle e visualização em tempo real das variáveis monitoradas. As telas foram projetadas com *layout* intuitivo e indicadores visuais que facilitam a operação e o acompanhamento do comportamento da planta durante os testes.

#### g) Projeto e avaliação de controle

Com a bancada já operacional, procedeu-se à modelagem da planta térmica e à aplicação das estratégias de controle propostas, tanto em ambiente de simulação quanto em testes práticos. Foram implementados os métodos de controle *on-off* com histerese e PID, com os parâmetros ajustados conforme técnicas de sintonia previamente estudadas. Essa etapa teve como objetivo observar o comportamento dinâmico do sistema frente a diferentes condições de operação, possibilitando a coleta de dados para posterior análise comparativa de desempenho entre os controladores.

#### h) Análise dos resultados

Com os dados coletados em simulação e nos testes práticos, foi realizada a análise comparativa do desempenho dos controladores aplicados. A avaliação considerou critérios como tempo de resposta, estabilidade e precisão permitindo identificar as vantagens e limitações de cada método. A interpretação dos resultados seguiu parâmetros técnicos padronizados na literatura de controle, possibilitando uma comparação objetiva e fundamentada entre as estratégias *on-off* e PID, em termos de eficiência no controle térmico da planta.

#### i) Redação e defesa do TCC

Por fim, foi elaborada a versão final do trabalho, reunindo as etapas executadas, os resultados experimentais obtidos e as conclusões referentes ao desempenho do sistema sob diferentes estratégias de controle. O documento apresenta gráficos, tabelas e registros visuais da bancada, além de sugestões para possíveis aprimoramentos em estudos futuros.

### 4.1 COMPONENTES E FUNCIONALIDADES

A bancada didática desenvolvida é composta por diversos componentes eletroeletrônicos integrados que, em conjunto, viabilizam o controle térmico de um ambiente de forma automatizada. Cada elemento foi selecionado com base em critérios como aplicabilidade didática, robustez e compatibilidade com sistemas industriais. Esta seção descreve os principais dispositivos que compõem a bancada, bem como suas respectivas funções no processo de controle e automação.

#### 4.1.1 Lâmpada Incandescente de 100 Watts (W)

A lâmpada incandescente de 100 W atua como o atuador térmico da bancada. Ela é

responsável por gerar calor e elevar a temperatura do ambiente monitorado. A potência dissipada pela lâmpada é controlada indiretamente pelo sinal de saída do CLP, que aciona ou desliga o componente conforme a lógica de controle definida. A lâmpada é alimentada com tensão de 220 V, conectada através do relé de estado sólido. A escolha da lâmpada se baseia na facilidade de aquisição, simplicidade de operação e resposta térmica suficientemente rápida para aplicações didáticas. Sua característica resistiva permite simular uma carga térmica real, tornando o sistema útil para análises de desempenho de controladores, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Lâmpada incandescente de 100W.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.2 Sensor de Temperatura PT100

A medição da temperatura é feita por um sensor do tipo PT100, que é um sensor RTD amplamente utilizado na indústria devido à sua precisão e estabilidade. Ele opera com base na variação da resistência elétrica conforme a temperatura, apresentando 100 ohms a 0 °C. O PT100 é instalado próximo à lâmpada, de modo a captar diretamente a variação térmica provocada pela mesma. Essa medição é fundamental para o controle do processo, pois permite que o sistema monitore a variável controlada com confiabilidade, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Sensor de temperatura PT100.

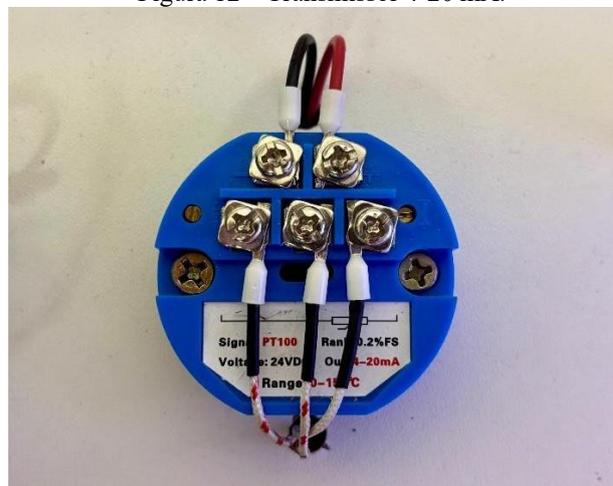


Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.3 Transmissor de Corrente 4–20 mA

O sinal de resistência fornecido pelo PT100 não é diretamente compatível com as entradas analógicas do CLP, sendo necessário o uso de um transmissor. Esse dispositivo converte a variação de resistência do sensor em um sinal de corrente elétrica no padrão industrial de 4 a 20 mA. Essa padronização proporciona maior tolerância a ruídos elétricos e permite a transmissão precisa de dados mesmo em longas distâncias. O transmissor permite a leitura analógica da temperatura pelo CLP, servindo como elo fundamental entre a medição e o controle, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Transmissor 4-20 mA.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.4 Relé de Estado Sólido (SSR)

O Relé de estado sólido (SSR) é utilizado para controlar o acionamento da lâmpada de aquecimento da bancada. Ele atua como um interruptor eletrônico, permitindo a comutação da

carga resistiva de forma silenciosa, rápida e sem desgaste mecânico. O SSR é comandado diretamente pelo CLP, que envia um sinal de controle por modulação por largura de pulso (PWM). Através desse sinal, o CLP ajusta o tempo em que a lâmpada permanece ligada dentro de cada ciclo, controlando assim a potência média dissipada. Esse tipo de acionamento permite um controle mais suave e eficiente da temperatura do sistema, evitando picos térmicos e proporcionando maior precisão na atuação do controlador, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Relé de estado sólido (SSR) utilizado no controle da lâmpada.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.5 Relé Acoplador de Interface

O relé acoplador de *interface* foi utilizado no sistema com a finalidade de realizar a comutação da carga elétrica responsável pelo aquecimento, especificamente a lâmpada utilizada na bancada. Esse componente possui entrada de 24 V em corrente contínua, compatível com a saída do CLP, e comuta uma saída de 220 V em corrente alternada, permitindo o acionamento direto de cargas em corrente alternada. Seu uso proporciona isolamento elétrico entre o circuito de controle e o circuito de potência, garantindo maior segurança e confiabilidade na operação.

No presente projeto, o relé foi empregado exclusivamente para a implementação do controle do tipo *on-off*, onde sua função é ligar ou desligar a lâmpada de acordo com a lógica programada no CLP. Essa aplicação é essencial para simular o comportamento de sistemas térmicos que utilizam controle binário em ambientes didáticos. A estrutura física do componente pode ser observada na Figura 14, que mostra o modelo utilizado na montagem do sistema.

Figura 14 – Relé acoplador de *interface*.

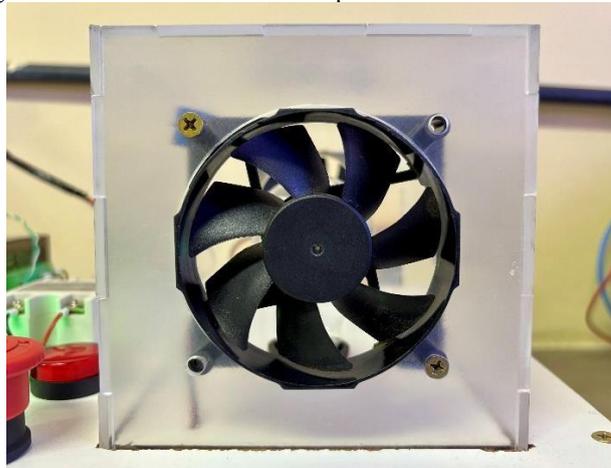
Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.6 Ventoinhas de Resfriamento

As ventoinhas instaladas na bancada têm como função promover o resfriamento ativo do sistema, auxiliando na dissipação rápida do calor gerado pela lâmpada de aquecimento. O acionamento é realizado de forma automática por meio de uma lógica de histerese implementada no CLP, configurada para ligar as ventoinhas somente quando a temperatura medida excede o *setpoint* em 5 °C. O desligamento ocorre quando a temperatura retorna para um valor igual ou inferior a essa margem, evitando acionamentos intermitentes e preservando a vida útil dos componentes.

Embora esse recurso contribua para a estabilidade térmica, seu uso durante os ensaios experimentais foi limitado, de forma a não interferir significativamente na resposta dos controladores. Assim, a atuação das ventoinhas foi empregada principalmente em situações específicas, como sobrelevação excessiva ou para a execução de ensaios de perturbação, simulando condições de distúrbio térmico semelhantes às encontradas em processos industriais. A Figura 15 mostra a instalação das ventoinhas na bancada.

Figura 15 – Ventoinhas utilizadas para o resfriamento do sistema.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.7 CLP Mitsubishi FX3U-MT

O Controlador Lógico Programável (CLP) Mitsubishi FX3U-MT é um equipamento compacto e de baixo custo, ideal para aplicações didáticas e sistemas industriais de pequeno porte, ilustrado na Figura 16. Por ser um modelo com saídas a transistor, oferece comutação mais rápida e suave em comparação aos modelos com saídas a relé, o que o torna especialmente eficiente para aplicações que exigem respostas dinâmicas.

Figura 16 – CLP Mitsubishi FX3U-MT instalado na bancada.



Fonte: Os autores (2025).

A programação é realizada por meio do *software* GX Works2, que permite o desenvolvimento de lógicas de controle utilizando a linguagem *ladder*, disponível no Apêndice A. Neste projeto, o CLP é responsável pela leitura do sinal analógico proveniente do sensor de temperatura, execução das rotinas de controle (PID ou *on-off*), acionamento da lâmpada e das ventoinhas, além de realizar a comunicação com os sistemas de *interface*.

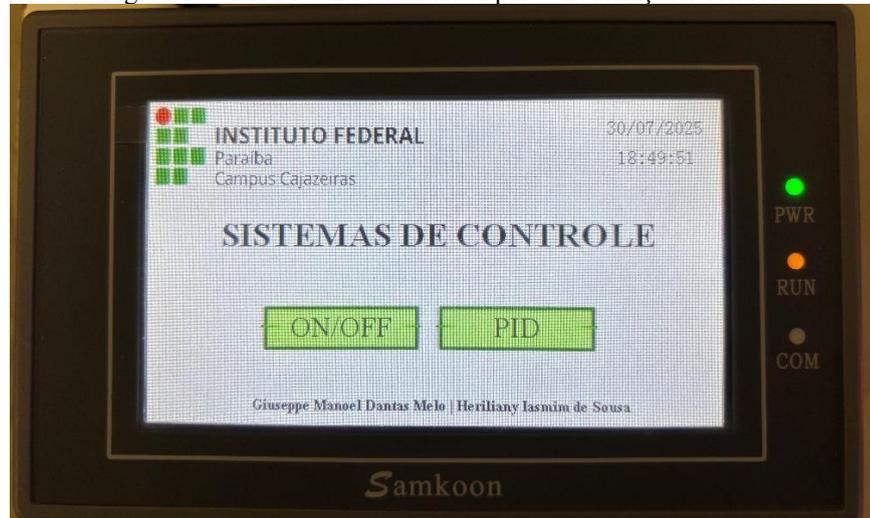
A comunicação com a *Interface* Homem-Máquina (IHM) é realizada via porta serial RS-232, enquanto a integração com o sistema supervisor (SCADA) ocorre por meio da interface RS-485, utilizando o protocolo Modbus RTU. Essa configuração garante uma troca de dados eficiente, confiável e em tempo real.

#### 4.1.8 Interface Homem-Máquina (IHM) Samkoon EA-043

A *interface* homem-máquina utilizada é do fabricante Samkoon modelo EA-04A, sendo conectada ao CLP por meio de comunicação serial. A IHM desempenha papel fundamental na operação da bancada, pois permite ao usuário visualizar variáveis em tempo real, como a temperatura atual, e ajustar parâmetros como o valor de referência (*setpoint*), modo de controle e estado dos atuadores. A tela da IHM foi configurada com menus intuitivos e indicadores

visuais que facilitam a operação e o acompanhamento do sistema, proporcionando uma experiência didática acessível e interativa, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – IHM Samkoon utilizada para visualização e controle.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.9 Botões de Comando e Indicadores

A bancada é equipada com um conjunto de botões físicos que proporcionam controle manual e segurança operacional. O botão de emergência interrompe imediatamente toda a alimentação da bancada por segurança. O botão de ligar ativa o funcionamento do sistema, enquanto o botão de desligar realiza sua desativação de forma controlada. O botão seletor permite alternar entre os modos de controle PID e *on-off*. Além disso, há dois indicadores luminosos: o LED (*Light Emitting Diode*) verde indica que a bancada está ligada e o LED vermelho sinaliza que está desligada. A Figura 18 mostra a disposição desses componentes no painel da bancada.

Figura 18 – Botões e indicadores luminosos da bancada.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.10 Fonte de Alimentação 24 V

A fonte de alimentação utilizada na bancada fornece tensão contínua de 24 V, necessária para alimentar o CLP e demais componentes de controle. Essa fonte é conectada diretamente à rede elétrica e converte a tensão alternada para contínua com estabilidade e proteção contra sobrecarga. A utilização de 24 V é padrão em automação industrial, garantindo compatibilidade e segurança nas conexões. A Figura 19 apresenta a fonte fixada no interior da bancada.

Figura 19 – Fonte 220V<sub>CA</sub> / 24 V<sub>DC</sub> utilizada para alimentação.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.1.11 Conversor USB para RS-485

O conversor USB (*Universal Serial Bus*) para RS-485 (*Recommended Standard 485*) é um dispositivo utilizado para estabelecer comunicação entre o CLP e o sistema supervisório VTScada, por meio do protocolo Modbus RTU. Ele atua como uma interface de conversão entre o sinal USB do computador e o padrão de comunicação diferencial RS-485.

No contexto deste projeto, o conversor tem papel fundamental na etapa de aquisição de dados, permitindo que o VTScada monitore e controle variáveis do processo em tempo real. A conexão física é realizada diretamente nos terminais de comunicação do CLP, sendo o terminal A conectado ao pino A do conversor, e o terminal B ao pino B, respeitando a polaridade exigida pelo padrão RS-485.

Além disso, o conversor é compatível com os principais *drivers* utilizados pelo sistema operacional, facilitando sua integração com a plataforma supervisória. A Figura 20 ilustra o modelo de conversor utilizado neste projeto, evidenciando sua simplicidade e praticidade de conexão.

Figura 20 – Conversor USB para RS-485 utilizado no projeto.



Fonte: Os autores (2025).

## 4.2 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DA BANCADA DIDÁTICA

A bancada didática foi projetada para ser uma plataforma prática para o estudo e experimentação de sistemas de automação e controle térmico. Sua concepção priorizou baixo custo, fácil montagem e acesso visual aos componentes principais, permitindo a compreensão clara do funcionamento de cada parte do sistema.

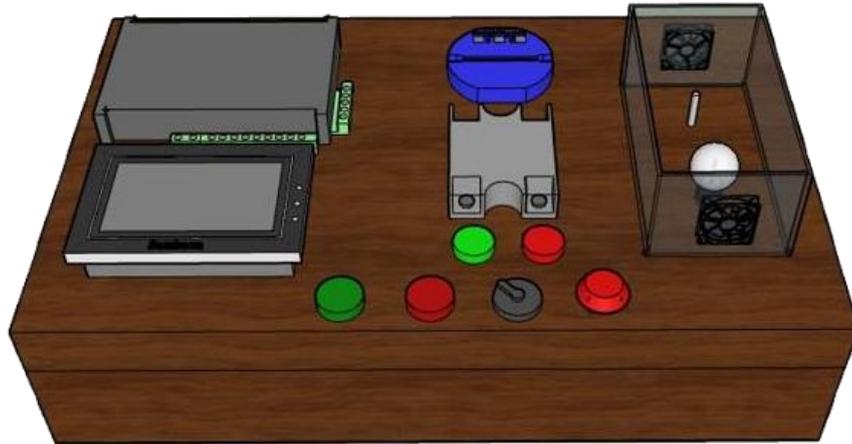
A estrutura integra elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos organizados de forma funcional, simulando um processo térmico real controlado automaticamente. A seguir, são apresentados os detalhes da modelagem 3D da bancada e, em seguida, sua versão física montada.

### 4.2.1 Modelagem 3D da Bancada

Antes da construção, a bancada foi modelada em ambiente virtual utilizando o *software* SketchUp, que permitiu uma visualização tridimensional precisa do layout e da disposição dos componentes. Esse processo foi essencial para validar o espaço disponível, prever interferências físicas e ajustar a posição de cada elemento com base na funcionalidade e acessibilidade.

A modelagem incluiu todos os elementos principais da bancada, como o compartimento térmico em acrílico, a base de madeira, a lâmpada, o sensor PT100, as ventoinhas, o CLP, a IHM e os dispositivos de comando. A Figura 21 apresenta a visualização 3D da bancada.

Figura 21 – Modelagem 3D da bancada realizada no *software* SketchUp.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.2.2 Aquisição de Materiais e Custo do Protótipo

A aquisição dos materiais foi planejada com o objetivo de construir uma bancada didática funcional, segura e de baixo custo. O foco na economia não comprometeu a qualidade dos elementos utilizados, que atendem aos requisitos técnicos do sistema proposto. Essa estratégia permitiu o desenvolvimento de um protótipo acessível, com potencial de replicação em instituições de ensino que possuam restrições orçamentárias, mas que buscam soluções práticas para o ensino de automação e controle.

A Tabela 2 apresenta os materiais utilizados na confecção da bancada, com as respectivas quantidades, preços unitários e totais. O investimento total para a construção do protótipo foi de R\$ 1.055,65, evidenciando o caráter acessível do projeto e demonstrando que é possível desenvolver recursos didáticos eficazes com investimento reduzido, sem comprometer a funcionalidade nem a qualidade técnica da aplicação.

Tabela 2 – Materiais utilizados na construção da bancada didática.

Material	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
CLP-FX3U24MT	1	250,00	250,00
Sensor PT-100	1	45,80	45,80
Conversor 4-20mA	1	38,90	38,90
Relé de Estado Sólido	1	32,25	32,25
Relé de Interface	1	29,62	29,62
IHM Samkoon	1	320,00	320,00
Lâmpada 100W	1	21,99	21,99
Fios e cabos	1	20,00	20,00

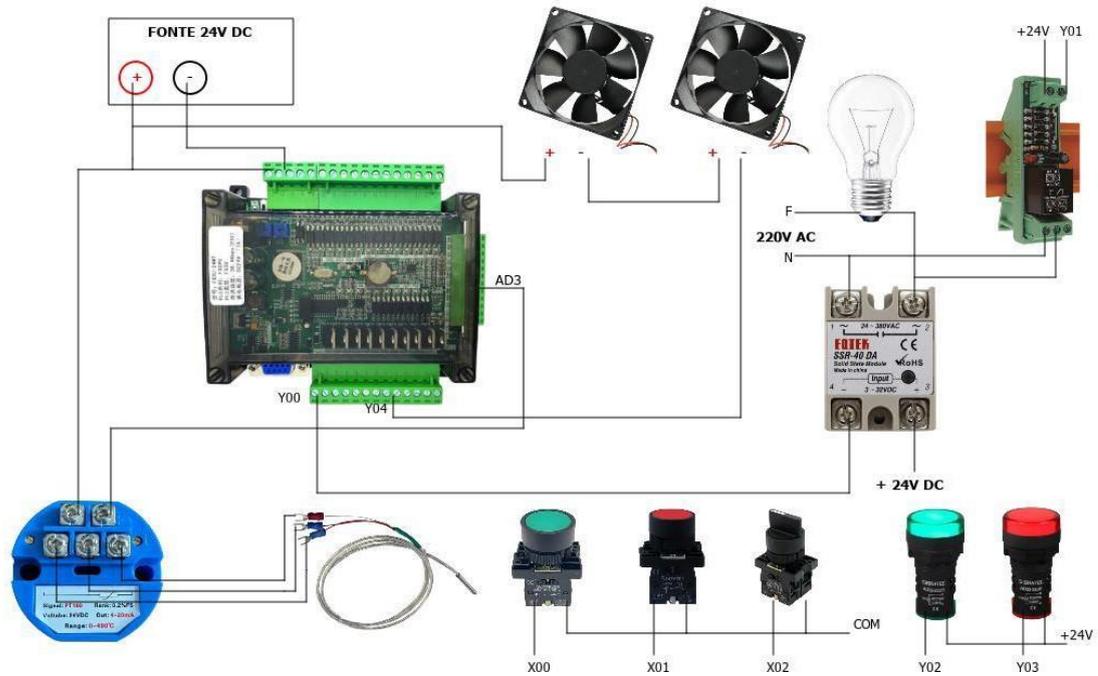
<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Unitário (R\$)</b>	<b>Preço Total (R\$)</b>
Ventoinha 12V	2	32,00	64,00
Fonte 24V/10A	1	37,05	37,05
Conversor RS485 para USB	1	29,90	29,90
Madeira MDF	0,5 m <sup>2</sup>	60,00 (por m <sup>2</sup> )	30,00
Botão de emergência	1	19,35	19,35
Botão seletor (2 posições)	1	20,49	20,49
Botão liga (NA)	1	14,14	14,14
Botão desliga (NF)	1	14,14	14,14
Sinaleiras de LED	2	12,99	26,00
Acrílico	-	42,00	42,00
<b>Preço Total</b>	-	-	<b>1.055,65</b>

Fonte: Os autores (2025).

#### 4.2.3 Diagrama Elétrico da Bancada Didática

A Figura 22 apresenta o esquema elétrico da bancada didática, ilustrando a interligação entre os principais componentes do sistema. O circuito contempla a fonte de alimentação 24 V<sub>DC</sub>, o CLP Mitsubishi FX3U-MT, os dispositivos de entrada (botões de comando), os atuadores (ventoinhas e lâmpada), o sensor de temperatura PT100 com transmissor 4–20 mA, o relé de estado sólido (SSR) e os terminais de comunicação.

Figura 22 – Esquemático elétrico da bancada.



Fonte: Os autores (2025).

A alimentação principal dos circuitos de controle é fornecida por uma fonte de 24 V<sub>DC</sub>, responsável por energizar o CLP e os periféricos conectados. As saídas digitais do CLP (Y00, Y01 e Y04) são utilizadas para acionar, respectivamente: o relé de estado sólido (SSR) que controla a lâmpada incandescente por meio de modulação por largura de pulso (PWM), o relé de interface responsável pelo acionamento da lâmpada no modo de controle *on-off*, e as ventoinhas de resfriamento do sistema. A medição da temperatura é realizada por meio de um sensor PT100, conectado a um transmissor que converte o sinal resistivo em corrente padrão de 4–20 mA, sendo lido pelo CLP através da entrada analógica AD3.

Os botões de comando *start* (X00), *stop* (X01) e seletor de modo (X02) permitem a interação manual com o sistema. O relé de estado sólido (SSR) comuta diretamente a carga resistiva da lâmpada em 220 V em corrente alternada, permitindo controle proporcional via sinal PWM gerado pelo CLP.

O esquema foi elaborado para garantir a separação lógica entre circuitos de potência e de controle, promovendo maior segurança, confiabilidade e facilidade na identificação dos elementos durante a montagem e manutenção.

### 4.3 MODULAÇÃO PWM E CONTROLE DA POTÊNCIA TÉRMICA

Para o controle contínuo da temperatura da planta térmica, foi empregada a técnica de

modulação por largura de pulso (PWM), aplicada à lâmpada incandescente por meio do relé de estado sólido (SSR) controlado pelo CLP Mitsubishi FX3U-MT. A utilização de PWM permitiu ajustar a potência térmica dissipada pela lâmpada de forma proporcional ao sinal de controle, resultando em um aquecimento mais suave, estável e eficiente em comparação ao acionamento do tipo liga/desliga (*on-off*).

No CLP, o sinal PWM foi gerado utilizando a função PLSV (*Pulse Output with Variable Speed*), que permite a emissão de pulsos em uma frequência programável, variando de 5 Hz até 32 kHz. Contudo, para garantir a compatibilidade com o SSR e evitar o visível piscar da lâmpada (*flicker*), foram realizados testes experimentais com diferentes faixas de frequência.

Durante os testes de bancada, verificou-se que a lâmpada atingia seu brilho e potência máximos de forma estável a partir da frequência de aproximadamente 1,8 kHz. Frequências superiores a esse valor não resultaram em aumento perceptível de luminosidade ou potência, indicando a saturação da resposta térmica do sistema. Com base nesses resultados, foi definida a faixa operacional de frequência PWM entre 5 Hz e 1,8 kHz, onde:

- 5 Hz corresponde à menor potência (ciclo de trabalho reduzido),
- 1,8 kHz corresponde à potência máxima dissipada.

A variação da frequência foi diretamente relacionada à saída do controle PID implementado no CLP, permitindo um ajuste contínuo da potência térmica em função do erro de temperatura. Essa abordagem favoreceu o desempenho dinâmico do sistema, evitando sobreaquecimentos abruptos e proporcionando maior precisão na manutenção do *setpoint*.

#### 4.4 CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA PT100

Para garantir a confiabilidade da leitura da variável de processo, foi realizada a calibração da entrada analógica do CLP responsável por receber o sinal do sensor de temperatura. O sensor utilizado é um PT100, conectado a um transmissor de corrente com saída de 4–20 mA, representando a faixa de 0 °C a 150 °C.

O CLP Mitsubishi FX3U-MT possui entradas analógicas com resolução de 12 bits, convertendo a corrente recebida em um valor numérico entre 0 e 4095, correspondente à faixa de 0 a 20 mA. Como o transmissor inicia em 4 mA, valores abaixo desse patamar são desprezados no processamento da temperatura. A calibração foi realizada utilizando uma fonte de corrente de bancada, conectada diretamente ao pino AD3 do CLP. Correntes específicas foram aplicadas (de 4 a 20 mA), e os respectivos valores lidos pelo CLP foram registrados. A Tabela 3 mostra os principais dados coletados.

Tabela 3 – Dados coletados de corrente e sinal analógico.

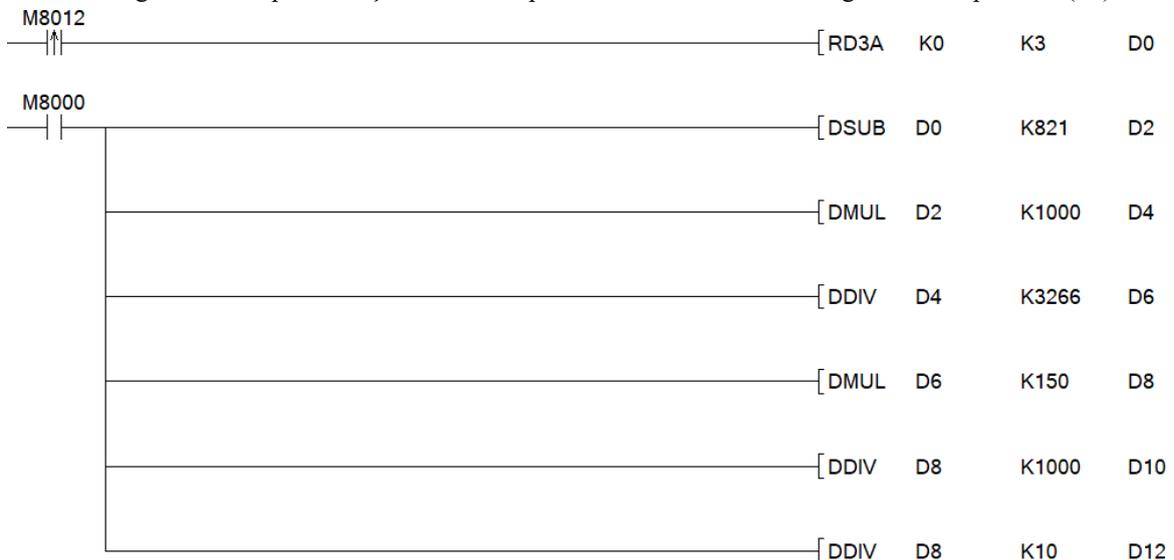
Corrente (mA)	Valor Lido (0–4095)
4	821
8	1637
10	2045
12	2455
16	3272
20	4087

Fonte: Os autores (2025).

Com base nesses dados, foi possível determinar a relação entre o valor lido na entrada analógica e a temperatura real, utilizando o método de interpolação linear. Sabendo que 4 mA equivale a 0 °C e 20 mA equivale a 150 °C, e que os valores correspondentes lidos foram 821 e 4087, conversão foi estabelecida pela Equação (6).

$$Temperatura (^{\circ}C) = \frac{(AD3 - 821) \times 150}{4087 - 821} = \frac{(AD3 - 821) \times 150}{3266} \quad (6)$$

Essa equação pode ser implementada diretamente no programa do CLP, convertendo o valor bruto da entrada analógica para temperatura em graus Celsius, como demonstrado na Figura 23 a implementação feita em *ladder*.

Figura 23 – Implementação em *ladder* para conversão de sinal analógico em temperatura (°C).

Fonte: Os autores (2025).

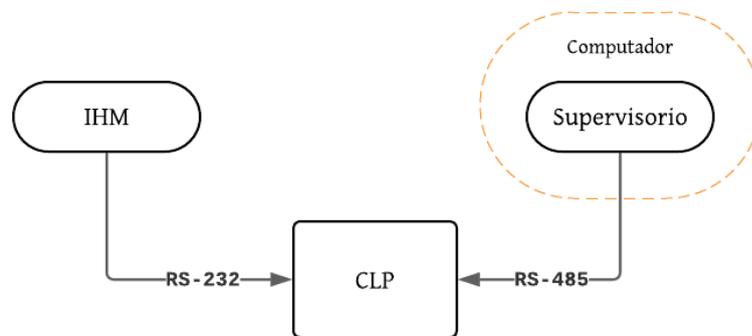
Embora o conversor analógico-digital do CLP Mitsubishi FX3U-MT, com 12 bits, ofereça uma resolução teórica de aproximadamente 0,0366°C por incremento, a resolução observada no sistema é de 0,15°C devido ao processo de conversão no código *Ladder*. Esse

valor decorre da forma como o sinal analógico é mapeado para a faixa de temperatura, refletindo a discretização do sinal. Essa limitação deve ser considerada nas análises experimentais, pois pequenas variações observadas no regime estacionário podem estar relacionadas à discretização do sinal e não a mudanças reais na temperatura.

#### 4.5 INTEGRAÇÃO COM SUPERVISÓRIO E IHM

Neste capítulo, é apresentada a integração do CLP modelo FX3U-MT com a IHM Samkoon e o *software* supervisório VTScada. A comunicação com os dispositivos foi realizada utilizando diferentes portas seriais: a conexão com a IHM foi feita por meio da porta RS-232, enquanto a comunicação com o supervisório VTScada foi estabelecida via RS-485, utilizando um conversor USB-RS485 conectado ao computador. A Figura 24 ilustra a topologia de comunicação adotada no sistema.

Figura 24 – Topologia de comunicação do sistema.

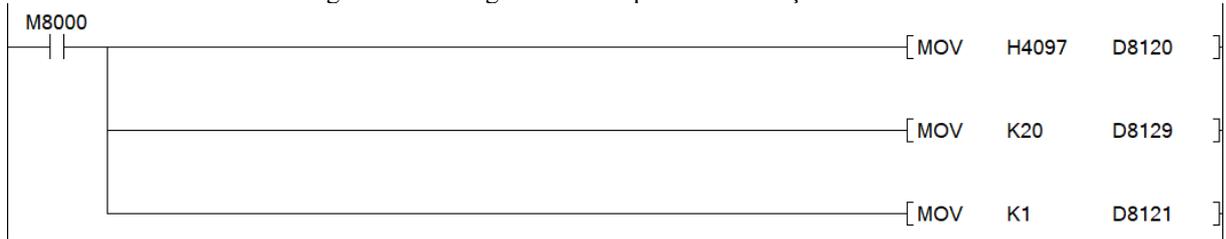


Fonte: Os autores (2025).

Para garantir o funcionamento adequado da comunicação, foram configuradas as taxas de transmissão (*baud rate*), os endereços escravos e os parâmetros do protocolo Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) em cada equipamento. A seguir, serão detalhadas as etapas de configuração de cada sistema.

##### 4.5.1 Configuração do VTScada

Para estabelecer a comunicação entre o CLP FX3U-MT e o *software* supervisório VTScada, foi implementado um trecho no programa *ladder*, como pode ser observado na Figura 25, responsável por configurar os parâmetros da porta serial RS-485, utilizada para comunicação via protocolo Modbus RTU. Esse trecho, executado continuamente sob a condição do *bit* especial M8000, envia valores específicos para registradores especiais do CLP, de modo a definir o modo de comunicação.

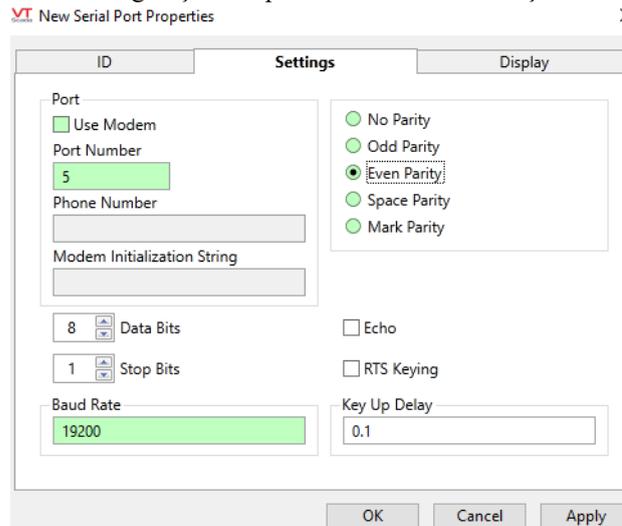
Figura 25 – Código em *ladder* para comunicação modbus

Fonte: Os autores (2025).

O registrador D8120 recebe o valor H4097, que configura a porta para operar como mestre Modbus RTU com paridade do tipo even. Em seguida, o valor K20 é movido para o registrador D8129, definindo a taxa de transmissão como 19200 bps, padrão utilizado para garantir compatibilidade com o VTScada. Por fim, o registrador D8121 recebe o valor K1, estabelecendo um pequeno tempo de atraso entre as transmissões, o que contribui para a estabilidade da comunicação na rede.

Em seguida, no *software* de supervisão, foi realizada a configuração da comunicação, na qual se define a porta correspondente ao conversor USB para RS-485 conectada ao computador. Após essa definição, procede-se com a adição do *driver* Modbus e a inserção dos respectivos parâmetros de comunicação, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Configuração dos parâmetros de comunicação no VTScada.



Fonte: Os autores (2025).

Posteriormente, foram criadas as “tags” correspondentes a cada registrador utilizado no código do CLP. Por exemplo, para a variável de temperatura armazenada no registrador D12, foi associada no VTScada à “tag” de endereço 40013, considerando a convenção Modbus em que o *offset* inicia em 1. Da mesma forma, variáveis digitais como a memória M1 foram associadas ao endereço 0002. Esse processo foi repetido para todas as variáveis necessárias à supervisão e controle do sistema, conforme ilustrado na Figura 27.

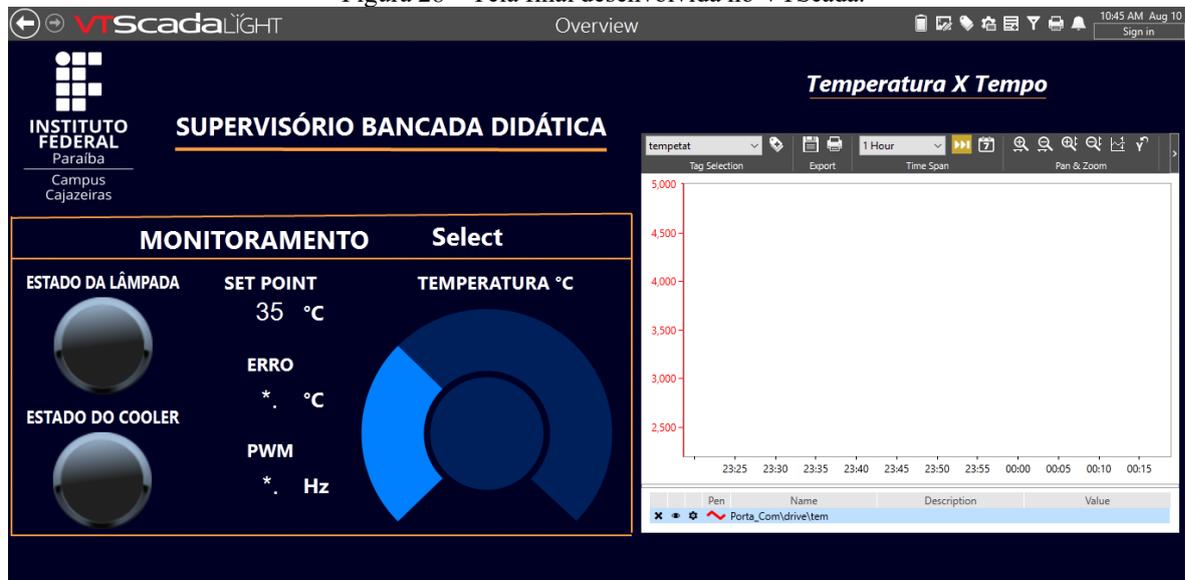
Figura 27 – Tag’s criadas no supervisório.

	Name	Description	Type	Equipment Type	Address	Value
+	Erro		Analog [In]		40027	
+	Saida_PWM		Analog [In]		40021	
+	SetPoint		Analog [In]		40041	
+	Temperatura		Analog [In]		40013	
+	Estado_Lampada		Digital [In]		0031	?
+	Estado_Sistema		Digital [In]		0002	?
+	Estado_Ventoinhas		Digital [In]		0036	?
+	Tipo_Controlo		Digital [In]		0005	?

Fonte: Os autores (2025).

Por fim, a Figura 28 apresenta a tela desenvolvida no *software* supervisório, composta por indicadores do tipo “*gauge*” e “*displays*” LCD (*Liquid Crystal Display*) para visualização em tempo real de variáveis como temperatura, *setpoint* e sinal PWM erro de temperatura, indicadores para verificar o estado da lâmpada e ventoinha. Além disso, a tela inclui um gráfico que possibilita o monitoramento da curva Temperatura x *Setpoint* ao longo do tempo, com a funcionalidade de exportação dos dados em formato CSV (planilha), permitindo posterior análise e tratamento das informações coletadas.

Figura 28 – Tela final desenvolvida no VTScada.



Fonte: Os autores (2025).

#### 4.5.2 Configuração da IHM Samkoon

A programação da IHM Samkoon foi realizada utilizando o *software* SATOOL 6.2, compatível com o modelo utilizado no projeto. Para a comunicação com o CLP, foi adotada a *interface* serial RS232, utilizando o *driver* Mitsubishi FX3U, disponível no próprio *software*, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Seleção do *driver* Mitsubishi FX3U no *software* SATOOL 6.2.

The screenshot shows the 'Parameter' tab of the SATOOL 6.2 software. The configuration is as follows:

- Link ID: 1
- Link Name: COM 1
- Link Type: Direct Connection (Serial Port)
- Device/Server: MITSUBISHI, FX-3U CPU Port
- Link Port: COM1
- PLC contiguous address interval: 1
- Communication port: RS232

Buttons: OK, Cancelar, Ajuda

Fonte: Os autores (2025).

Na etapa de configuração, foram definidos os principais parâmetros de comunicação, como taxa de transmissão de 38400 bps, paridade EVEN, 7 *bits* de dados, e 1 *bit* de parada, conforme ilustrado na Figura 30.

The screenshot shows the 'Parameter' tab of the SATOOL 6.2 software, specifically the 'Communication port attributes' dialog. The configuration is as follows:

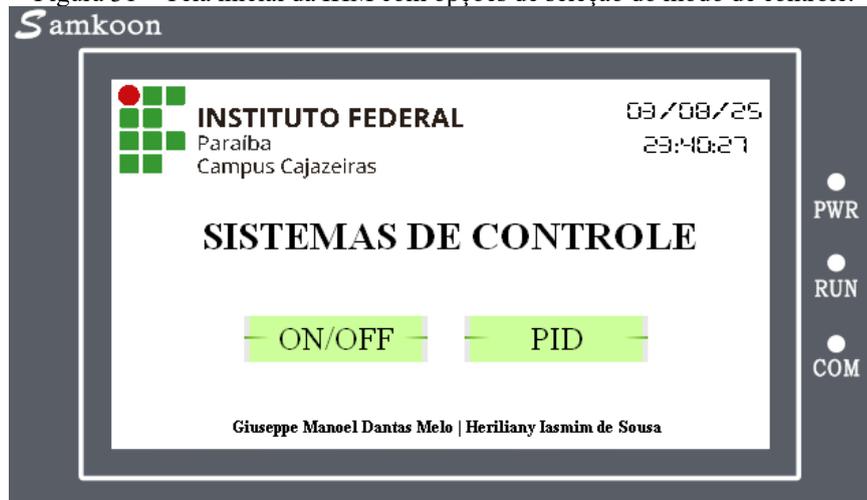
- Communication Parameters:**
  - Baud rate: 38400
  - Data bits: 7
  - Check: EVEN
  - Stop Bits: 1
- Other:**
  - HMI Address: 0
  - PLC Address: 1
  - Communication Time: 20 (ms)
  - Retry: 0
  - Address Model: Standard Mode

Buttons: OK, Cancelar, Ajuda

Fonte: Os autores (2025).

Após a configuração dos parâmetros de comunicação, foi desenvolvido o *layout* gráfico da IHM utilizando o *software* SATOOL 6.2. A *interface* inicial exibe duas opções de controle *ON-OFF* e PID permitindo ao usuário selecionar qual estratégia deseja utilizar, como mostrado na Figura 31.

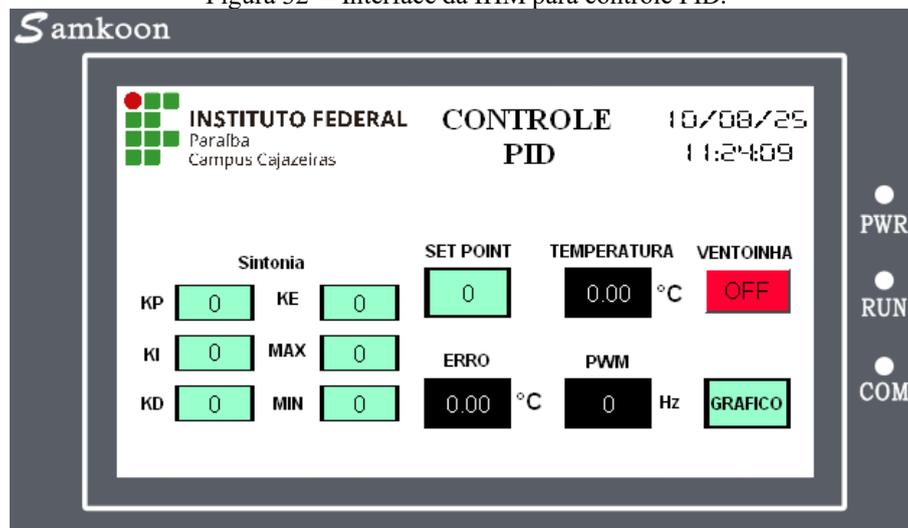
Figura 31 – Tela inicial da IHM com opções de seleção do modo de controle.



Fonte: Os autores (2025).

Cada tela apresenta elementos visuais e interativos específicos. Na *interface* de controle PID (Figura 32), é possível definir diretamente os valores dos parâmetros de sintonia  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , além do *setpoint*, bem como visualizar em tempo real as variáveis de processo como temperatura, erro, frequência PWM e o estado da ventoinha.

Figura 32 – Interface da IHM para controle PID.



Fonte: Os autores (2025).

Já na *interface* de controle *on-off*, exibida na Figura 33, são mostradas as variáveis essenciais como *setpoint*, temperatura, erro, e o acionamento dos atuadores, como lâmpada e ventoinha, com botões intuitivos para operação do sistema.

Figura 33 – Interface da IHM para controle ON/OFF.



Fonte: Os autores (2025).

Por fim, foi desenvolvida uma tela de monitoramento gráfico, ilustrada na Figura 34, onde é possível acompanhar em tempo real a curva da variável controlada (temperatura) em comparação ao *setpoint*, facilitando a análise visual do desempenho do sistema. Essa funcionalidade também permite o armazenamento dos dados, proporcionando recursos para análises posteriores.

Figura 34 – Tela gráfica da IHM com monitoramento em tempo real da curva da temperatura



Fonte: Os autores (2025).

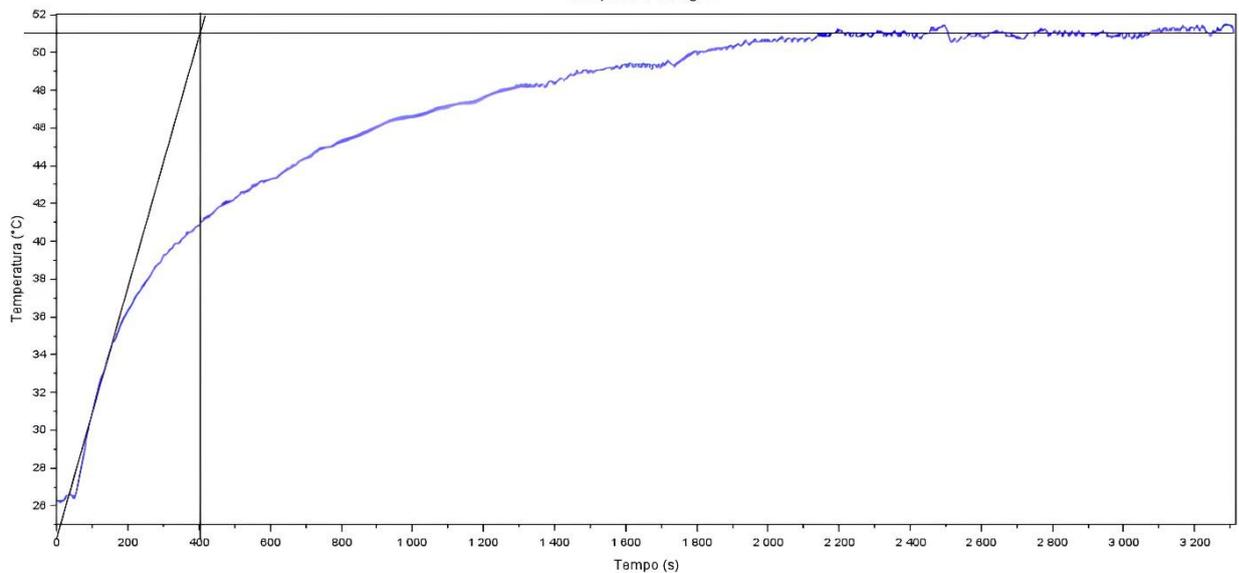
#### 4.6 MODELAGEM DA PLANTA

Inicialmente, foi aplicado um degrau de tensão no atuador (resistência elétrica), por meio de controle de potência utilizando modulação por largura de pulso (PWM) com frequência de 1800 Hz e ciclo de trabalho fixo em 100%. Nesse regime, o relé de estado sólido (SSR) permaneceu continuamente conduzindo, permitindo a aplicação da tensão máxima de 220 V

em corrente alternada, à lâmpada incandescente. A resposta térmica do sistema foi monitorada ao longo do tempo utilizando o sensor de temperatura, permitindo a análise do comportamento dinâmico da planta.

A aquisição dos dados foi realizada por meio de um sistema supervisor SCADA, com registro contínuo das variáveis em planilhas eletrônicas para posterior análise. A curva resultante, representada na Figura 35, apresenta um comportamento típico de um sistema de primeira ordem com atraso, evidenciado pela resposta lenta e suave da temperatura ao degrau aplicado.

Figura 35 – Curva experimental da resposta térmica ao degrau.  
Resposta ao Degrau



Fonte: Os autores (2025).

O experimento teve início com a planta em temperatura ambiente, cerca de 26 °C. A lâmpada permaneceu energizada por aproximadamente uma hora, atingindo uma temperatura máxima de 51 °C. Assim, a variação total da temperatura da planta foi de  $\Delta T \approx 25$  °C.

A partir da análise da curva de resposta ao degrau, foi possível estimar os seguintes parâmetros:

- atraso de transporte ( $\theta$ ): aproximadamente 7 segundos;
- a constante de tempo ( $\tau$ ) foi estimada em 393 segundos, resultante da diferença 400s – 7s.

A identificação do ganho estático K foi realizada com base na razão entre a variação da saída térmica ( $\Delta T$ ) e a variação da entrada, considerada de forma normalizada, com amplitude unitária (PWM = 1, correspondente a 220 V<sub>CA</sub>). Portanto, tem-se a expressão (7).

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta u} = \frac{25}{1} = 25 \quad (7)$$

Com base nesses parâmetros, o sistema pôde ser representado por uma função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte, conforme a equação geral (8).

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (8)$$

Substituindo os valores experimentais obtidos, a função de transferência identificada para a planta é expressada por (9).

$$G(s) = \frac{25}{393s + 1} e^{-7s} \quad (9)$$

Essa modelagem fornece uma base sólida para a aplicação de técnicas de controle, como será explorado nas seções seguintes deste trabalho.

#### 4.7 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES.

Nesta seção, são descritas as estratégias de controle aplicadas à planta térmica. Inicialmente, foi implementado o controle do tipo *on-off* como forma de comparação com os métodos contínuos. Em seguida, com base na modelagem dinâmica do sistema, foram projetados controladores P, PI e PID utilizando o método de sintonia de Ziegler-Nichols. A implementação e análise de desempenho de cada técnica são detalhadas nos subtópicos a seguir.

##### 4.7.1 Método de Controle Liga-Desliga (*On-Off*)

O controle *On-Off* é uma estratégia de atuação binária que alterna o sinal de controle entre dois estados, ligado (100% de potência) e desligado (0% de potência). Amplamente utilizada em sistemas térmicos de baixa complexidade, devido à sua simplicidade, confiabilidade e baixo custo de implementação. Na bancada didática desenvolvida, essa técnica foi aplicada para o controle de temperatura com base em um *setpoint* e uma banda de histerese, configurada para evitar comutações frequentes do atuador em função de pequenas oscilações da variável de processo.

A histerese foi definida de forma simétrica em torno do *setpoint*, sendo delimitada por um valor  $h$ , correspondente à metade da banda total. O controle liga a carga térmica quando  $T < T_{set} - h$ , desliga quando  $T > T_{set} + h$ , e mantém o estado anterior dentro dessa faixa. Nessa equação,  $T_{set}$  representa a temperatura de referência da planta, enquanto  $T$  é a temperatura atual do sistema. Essa lógica contribui para a estabilidade térmica do sistema e para a preservação do relé de interface eletromecânico, utilizado como atuador.

Essa lógica foi implementada no CLP Mitsubishi FX3U, por meio de programação

*ladder*. A leitura da variável de processo é realizada pelo sensor de temperatura. A saída do CLP aciona diretamente um relé eletromecânico, que liga ou desliga a lâmpada utilizada como elemento de aquecimento da planta térmica. A lógica adotada no controle *On-Off* pode ser visualizada na Tabela 4.

Tabela 4 – Lógica de atuação do controle ON/OFF com banda de histerese.

Condição da Temperatura	Descrição
$T < Tset - h$	A carga térmica é acionada para elevar a temperatura.
$T > Tset + h$	A carga térmica é desligada para evitar superaquecimento.
$Tset - h \leq T \leq Tset + h$	O sistema permanece no estado anterior dentro da faixa de histerese.

Fonte: Os autores (2025).

#### 4.7.2 Método de Sintonia de Ziegler-Nichols

Com base nos parâmetros obtidos na etapa de identificação do modelo da planta, foram aplicadas as fórmulas do método de sintonia de Ziegler-Nichols, visto na Tabela 1 da Seção 3.9.3.

Substituindo os valores nas equações empíricas utilizadas para o cálculo dos parâmetros do controlador P, PI e PID, tem-se:

- Para controlador P:

$$Kp = \frac{\tau}{K\theta} = \frac{393}{25 \times 7} = 2,24$$

- Para o controlador PI:

$$Kp = 0,9 \left( \frac{\tau}{K\theta} \right) = 0,9 \left( \frac{393}{25 \times 7} \right) = 2,01$$

$$Ti = 3,33 \times \theta = 3,33 \times 7 = 23,31$$

- Para o controlador PID:

$$Kp = 1,2 \times \left( \frac{\tau}{K\theta} \right) = 1,2 \times \left( \frac{393}{25 \times 7} \right) = 2,68$$

$$Ti = 2 \times \theta = 2 \times 7 = 14$$

$$Td = 0,5 \times \theta = 0,5 \times 7 = 3,5$$

Os parâmetros finais do controlador PID segundo Ziegler-Nichols estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores calculados pelo método Ziegler-Nichols.

<b>Tipo de controlador</b>	<b>Kp</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
<b>P</b>	2,24	0	0
<b>PI</b>	2,01	23,31	0
<b>PID</b>	2,68	14	3,5

Fonte: Os autores (2025).

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da montagem da bancada didática, testes de funcionamento do sistema de controle térmico, simulações computacionais e ensaios experimentais. São discutidas as respostas dinâmicas sob diferentes estratégias de controle (*On-Off*, P, PI e PID), bem como a comparação entre os dados simulados e os experimentais, visando validar o desempenho e a robustez do sistema proposto.

### 5.1 BANCADA MONTADA E TESTE DE FUNCIONAMENTO

Com base na modelagem tridimensional previamente desenvolvida, a bancada didática foi construída utilizando *Medium Density Fiberboard* (MDF) como material estrutural principal, devido à sua boa trabalhabilidade, baixo custo e acabamento uniforme. A bancada possui dimensões aproximadas de 45 cm de comprimento, 30 cm de largura e 12 cm de altura, resultando em uma estrutura compacta, estável e apropriada para aplicações didáticas.

A parte superior da bancada abriga uma câmara térmica confeccionada em acrílico transparente, que abriga a lâmpada incandescente de 100 W e o sensor de temperatura PT100. Essa estrutura garante o isolamento térmico, segurança e visibilidade do sistema em funcionamento. O resfriamento é feito por duas ventoinhas: uma injeta ar frio e a outra extrai o ar quente, promovendo circulação forçada e aumentando a eficiência do resfriamento. Os componentes eletrônicos como CLP Mitsubishi FX3U-MT, IHM Samkoon, relé SSR, botões, indicadores e fonte 24 VDC estão organizados sobre a bancada de MDF, com disposição que facilita a operação e a compreensão do sistema. A Figura 36 apresenta a bancada montada e finalizada.

Figura 36 – Estrutura física da bancada didática montada.



Fonte: Os autores (2025).

Após a montagem, foram realizados testes práticos de funcionamento, com o objetivo de verificar a correta operação de todos os subsistemas e sua integração em um ambiente de controle térmico. Os ensaios incluíram testes individuais de cada componente (aquecimento, leitura de temperatura, resfriamento, interação via IHM e comunicação com o sistema supervisor) e, em seguida, testes integrados, nos quais o sistema operou de forma contínua sob diferentes condições de controle.

De modo geral, os testes confirmaram o bom desempenho da bancada, demonstrando a funcionalidade do sistema de automação térmica, a confiabilidade da leitura de variáveis, a atuação eficiente dos sistemas de controle e resfriamento, e a efetiva comunicação entre CLP, IHM e supervisor. A estrutura demonstrou ser adequada tanto do ponto de vista técnico quanto didático, cumprindo os objetivos propostos neste trabalho.

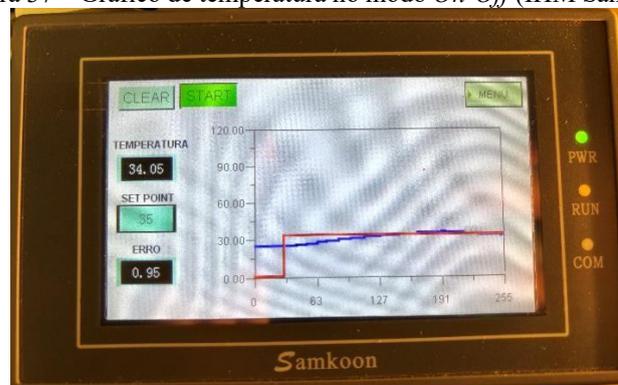
### 5.1.1 Análise Gráfica das Interface de Operação

Para complementar os testes de funcionamento descritos anteriormente, foram realizadas capturas das telas de operação do sistema, tanto na IHM quanto no supervisor VTScada, com os modos de controle *On-Off* e PID. A seguir, são apresentados os gráficos registrados, acompanhados de comentários sobre o comportamento, limitações e ajustes do sistema.

#### a) Monitoramento e Registro na IHM Samkoon: Desempenho dos Modos *On-Off* e PID

A Figura 37 mostra o gráfico de temperatura registrado na IHM Samkoon durante operação no modo *On-Off*. É possível observar a oscilação térmica em torno do *setpoint*, causada pelo acionamento/desligamento cíclico da lâmpada, conforme os limites de histerese configurados. Esse comportamento, embora esperado, pode gerar oscilações significativas dependendo da inércia térmica da câmara.

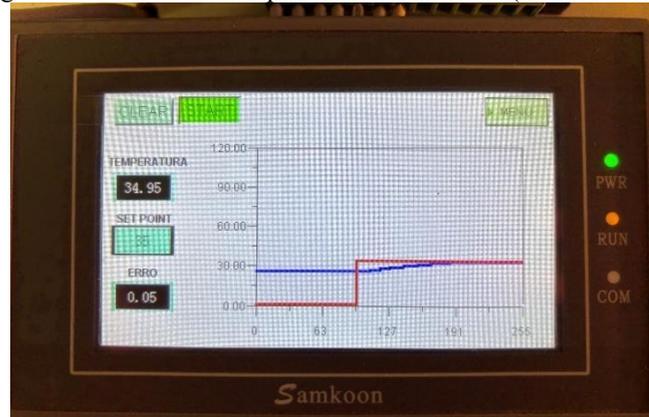
Figura 37 – Gráfico de temperatura no modo *On-Off* (IHM Samkoon).



Fonte: Os autores (2025).

Na Figura 38, o gráfico da IHM mostra o comportamento do sistema com controle PID. A curva apresenta uma aproximação mais suave ao *setpoint*, com menos sobreoscilação, resultado do ajuste adequado dos parâmetros de ganho proporcional ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) e derivativo ( $K_d$ ).

Figura 38 – Gráfico de temperatura no modo PID (IHM Samkoon).



Fonte: Os autores (2025).

Uma limitação importante da IHM é o número máximo de pontos que o gráfico pode exibir, de até 255 registros, ou seja, 255 segundos. Isso impede a visualização completa de testes mais longos, dificultando análises detalhadas ou históricas.

#### b) Monitoramento e Registro no VTScada: Desempenho dos Modos *On-Off* e PID

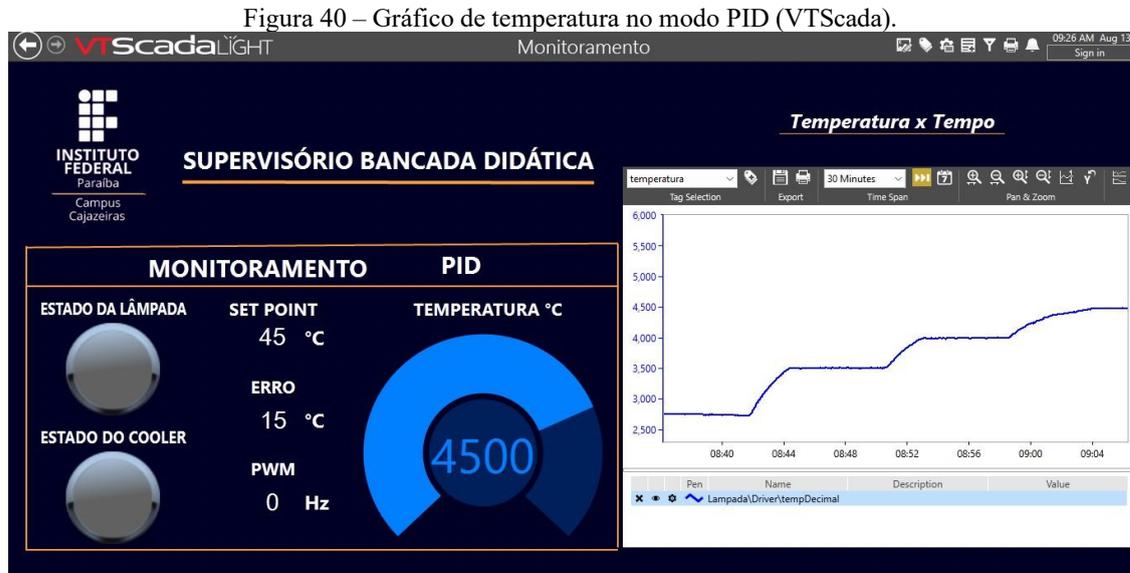
A Figura 39 apresenta o gráfico obtido no VTScada com o sistema operando no modo *On-Off*. A visualização é mais rica e precisa, permitindo acompanhar oscilações de temperatura ao longo do tempo com maior clareza. O supervisor registra os dados continuamente, possibilitando a análise de todo o ciclo de controle sem as limitações da IHM.

Figura 39 – Gráfico de temperatura no modo *On-Off* (VTScada).



Fonte: Os autores (2025).

A Figura 40 mostra o comportamento do sistema com o controle PID ativo. O gráfico evidencia uma curva de aquecimento mais controlada, com resposta mais rápida e menor oscilação em comparação ao *On-Off*.



Fonte: Os autores (2025).

Diferentemente da IHM, o VTScada não possui limitação de registros visíveis, permitindo o acompanhamento completo de testes de longa duração. Além disso, oferece a funcionalidade de exportação dos dados registrados, o que viabiliza análises mais aprofundadas em softwares externos (como Excel, Scilab, etc.). Essa característica é especialmente útil para estudos comparativos e validação de desempenho do controle.

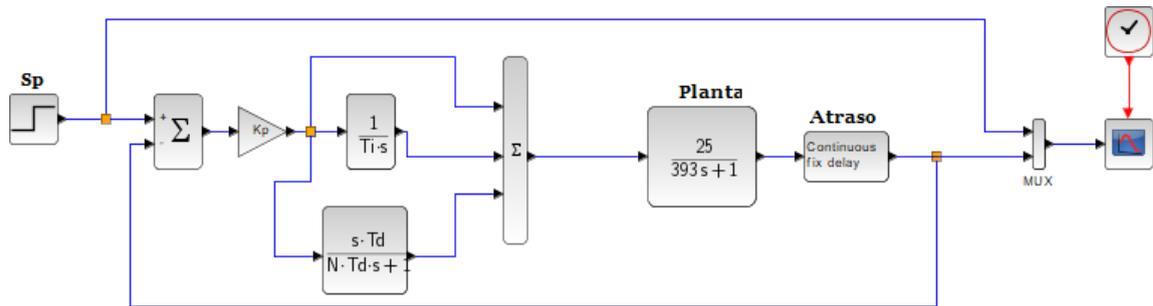
## 5.2 VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES PROJETADOS

Para a validação inicial das técnicas de controle desenvolvidas, foram realizadas simulações computacionais utilizando o *software* Scilab, ferramenta amplamente empregada em aplicações de análise e projeto de sistemas de controle.

As simulações tiveram como objetivo analisar o comportamento da planta modelada frente à aplicação de controladores do tipo P, PI e PID, todos projetados a partir dos parâmetros obtidos por meio do método de sintonia de Ziegler-Nichols, conforme descrito na Seção 4.7.2.

O ambiente de simulação foi construído com base no modelo matemático obtido anteriormente, visto na Seção 4.6, representado por um sistema de primeira ordem com atraso, e estruturado em um diagrama de blocos conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Diagrama de blocos para as simulações no Scilab.



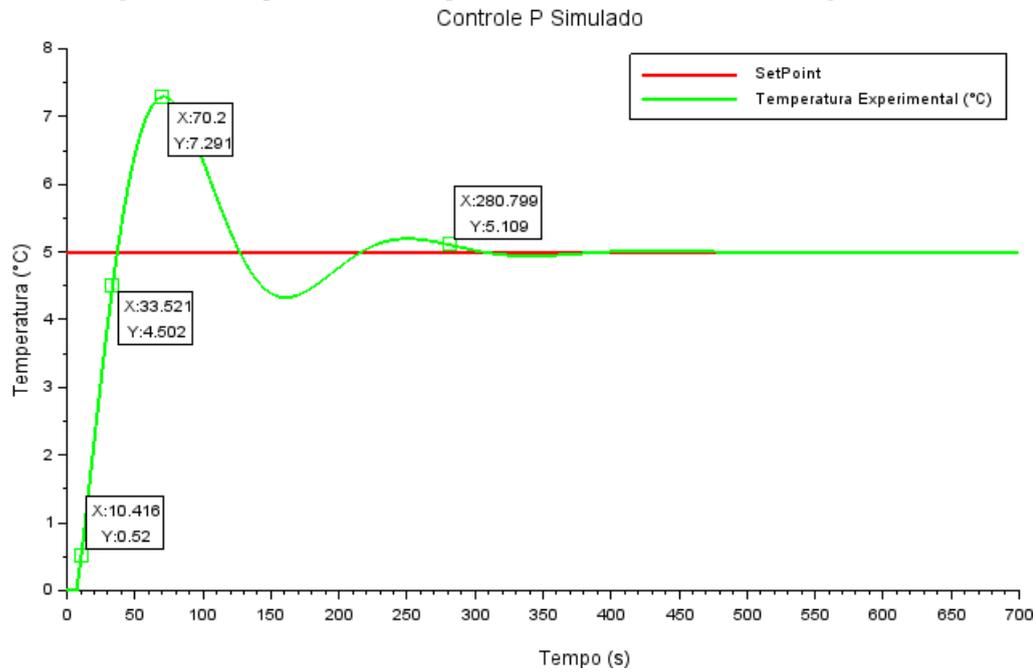
Fonte: Os autores (2025).

Apesar de fornecer uma base inicial eficaz, o método de Ziegler-Nichols tende a gerar respostas com *overshoot* elevado e oscilações. Por isso, foram realizados ajustes finos nos parâmetros obtidos, a fim de melhorar a resposta do sistema simulado. Esses ajustes, feitos de forma empírica, visam reduzir oscilações e tornar o controle mais estável. Como afirma Solihin (2017), os métodos clássicos de sintonia fornecem apenas um ponto de partida, sendo comum a necessidade de ajustes manuais posteriores.

Para a realização das simulações, foi adotado um valor de variação de 5 °C como referência de *setpoint*, correspondendo a uma transição da variável controlada de 30 °C para 35°C nas condições experimentais. Essa escolha foi motivada pelo fato de que, no ambiente de simulação, não foi possível inicializar diretamente o sistema a 30 °C, sendo necessário ajustar a escala para trabalhar de 0 °C a 5 °C. Dessa forma, a análise manteve a mesma variação de temperatura observada nos testes práticos, garantindo a observação entre os resultados simulados e experimentais.

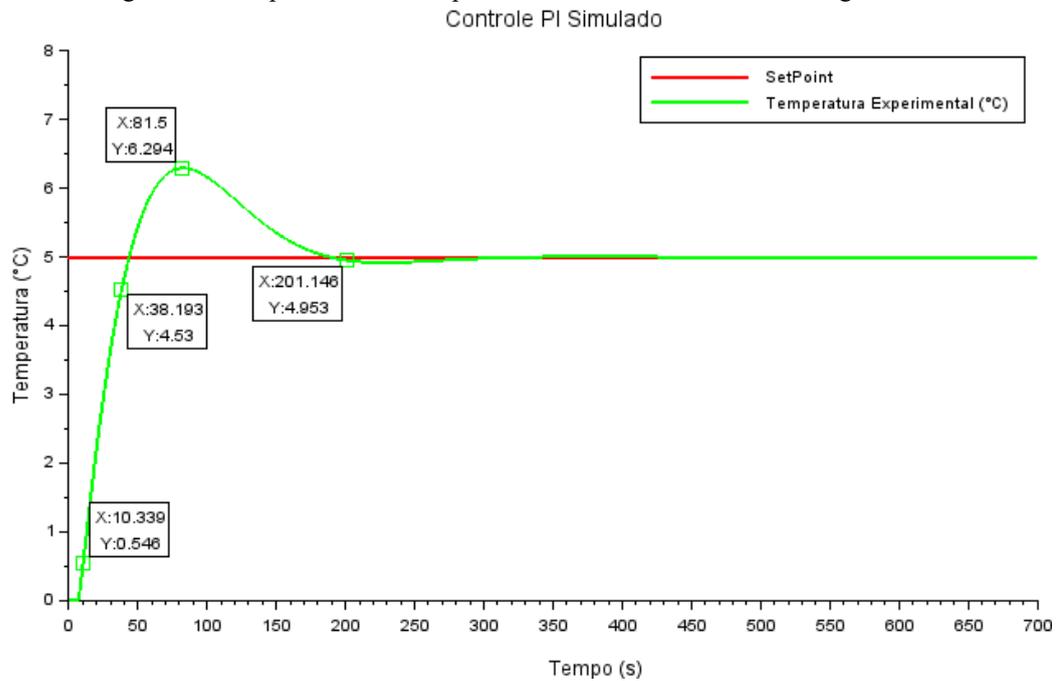
As Figuras 42, 43 e 44 apresentam, respectivamente, as respostas do sistema para os controladores P, PI e PID após os ajustes.

Figura 42 – Resposta do sistema para o controlador P do método Ziegler Nichols.



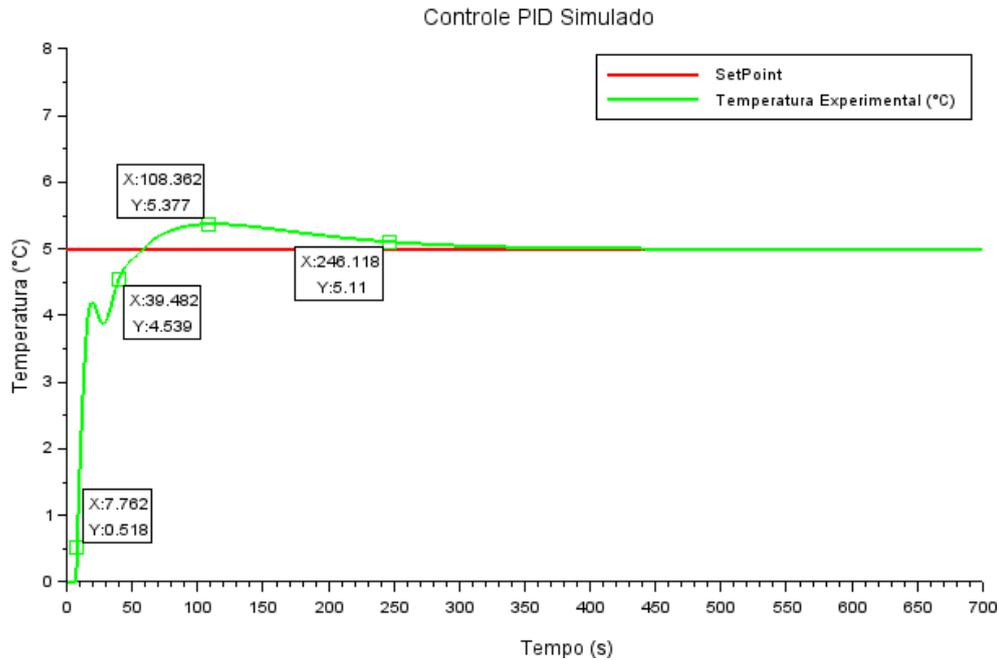
Fonte: Os autores (2025).

Figura 43 – Resposta do sistema para o controlador PI do método Ziegler Nichols.



Fonte: Os autores (2025).

Figura 44 – Resposta do sistema para o controlador PID do método Ziegler Nichols.



Os parâmetros de desempenho de um sistema de controle, como tempo de acomodação  $T_s$ , tempo de subida  $T_r$  e sobressinal, são fundamentais para avaliar sua resposta dinâmica. O tempo de acomodação indica o tempo necessário para que a saída se estabilize dentro de uma faixa de erro aceitável de  $\pm 2\%$  ou  $\pm 5\%$ , enquanto o tempo de subida mede o intervalo em que a saída atinge de 10% a 90% do valor final. O sobressinal é a ultrapassagem máxima do valor final antes da estabilização. Como destacado por Ogata (2010), a performance de um sistema de controle é frequentemente avaliada através de parâmetros como o tempo de acomodação, o tempo de subida e o sobressinal, que fornecem uma visão clara da eficácia do controle e da resposta dinâmica do sistema. A Tabela 6 apresenta esses parâmetros obtidos a partir das simulações dos controladores P, PI e PID.

Tabela 6 – Parâmetros de desempenho obtidos nas simulações.

Controlador	%UP	$T_s$ (s)	$T_r$ (s)
P	45,8	280,79	23,11
PI	25,8	201,14	23,89
PID	7,4	246,11	31,72

Fonte: Os autores (2025).

### 5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios

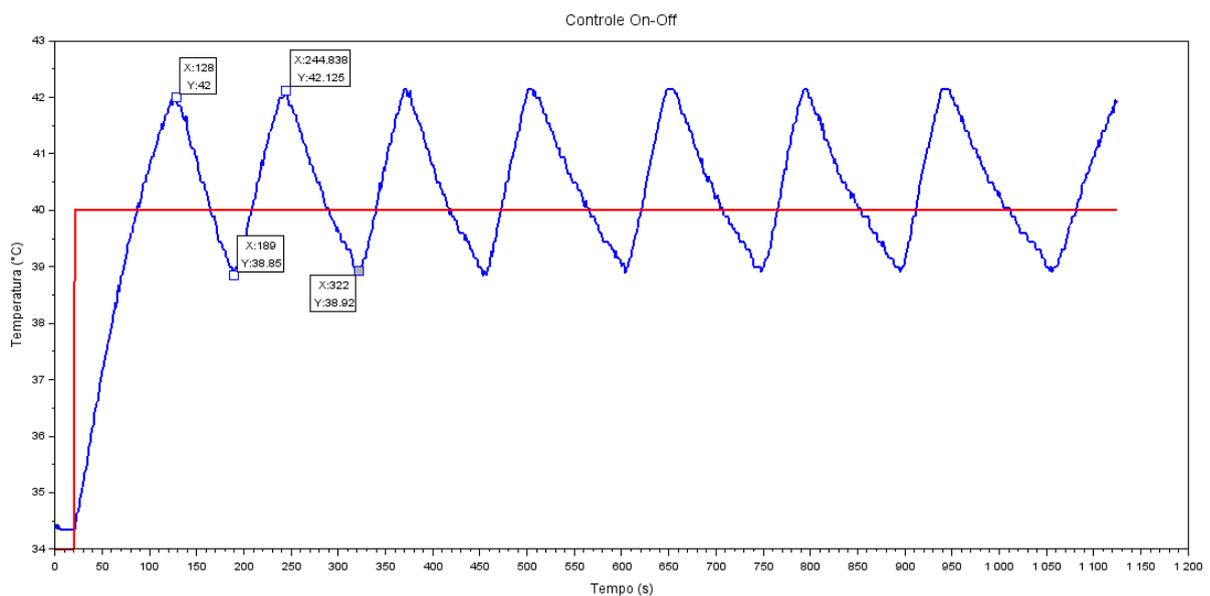
experimentais realizados na bancada didática para os diferentes controladores implementados: *On-Off*, Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI) e proporcional-Integral-Derivativo (PID). Os testes visaram avaliar o comportamento dinâmico do sistema frente a diferentes *setpoints*, permitindo comparar o desempenho prático de cada estratégia de controle.

### 5.3.1 Resultados Experimentais do Controle *On-Off*

O ensaio experimental com controle *On-Off* foi realizado na bancada didática utilizando como *setpoint* a temperatura de 40 °C, com banda de histerese simétrica configurada em  $\pm 2$  °C. Como previsto na teoria, a variável de processo apresentou oscilações periódicas em torno do ponto de ajuste, consequência direta da comutação entre os estados de “ligado” e “desligado” do atuador térmico.

Na Figura 45, observa-se que a temperatura inicia próxima a 34 °C e, ao atingir 42 °C, o sistema desliga a carga térmica. Em seguida, a temperatura decresce até aproximadamente 38,85 °C, ponto no qual o aquecimento é novamente ativado. Esse ciclo de aquecimento e resfriamento se repete de forma estável ao longo do tempo, caracterizando a ação descontínua do controlador.

Figura 45 – Resposta experimental com controle *On-Off*.



Fonte: Os autores (2025).

Os parâmetros de desempenho observados indicam um comportamento típico de sistemas controlados por *On-Off* que é justamente a ausência de regime permanente exato no *setpoint* e a manutenção da variável controlada dentro da banda de histerese. Embora essa estratégia seja simples e eficiente para aplicações de baixa complexidade, a amplitude de

oscilação depende diretamente da inércia térmica do sistema e da largura da banda definida.

A Tabela 7 apresenta os principais parâmetros medidos durante o teste, considerando o primeiro ciclo completo após a estabilização inicial.

Tabela 7 – Parâmetros observado no controle *On-Off*.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor Obtido</b>
<i>Setpoint</i>	40 °C
Temperatura máxima	42,125 °C
Temperatura mínima	38,85 °C
Amplitude de oscilação	3,275 °C
Período médio do ciclo	122 s
Erro médio em relação ao SP	± 2,04 °C

Fonte: Os autores (2025).

### 5.3.2 Resultados Experimentais dos Controles P, PI e PID

Em todos os ensaios experimentais a planta iniciou a partir de temperatura ambiente (~30 °C) e os *setpoints* aplicados foram, sucessivamente, 35 °C, 40 °C e 45 °C, conforme indicado nas figuras das medições. As curvas experimentais foram registradas pelo sistema SCADA e exportadas para análise.

#### a) Controle Proporcional (P).

A Figura 46 ilustra o comportamento do controle proporcional (P), enquanto a Tabela 8 apresenta os parâmetros de desempenho obtidos nas curvas para cada *setpoint*.

O controlador proporcional apresentou resposta inicial relativamente rápida, porém com *overshoots* de (44–47%) em todos os degraus. O tempo de acomodação e de subida aumentou significativamente para *setpoints* mais altos, evidenciando maior dificuldade de convergência em faixas de temperatura mais elevadas devido à inércia térmica da planta.

Figura 46 – Resposta experimental com controle P.

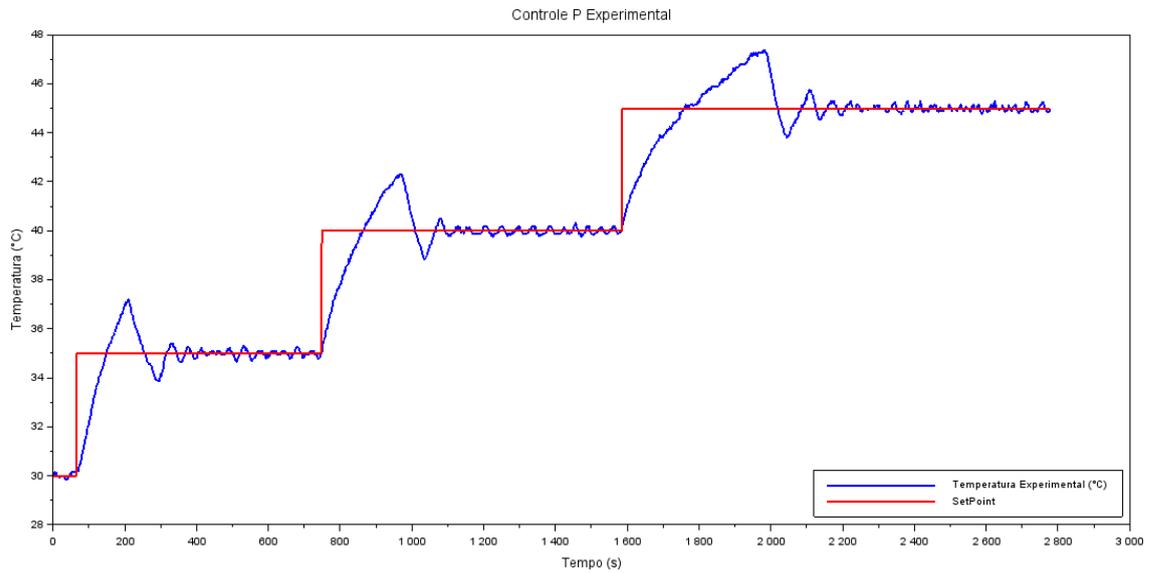


Tabela 8 – Parâmetros de desempenho (Controle P, valores experimentais).

<b>Controle P</b>			
<i>Setpoint</i> (°C)	%UP	Ts (s)	Tr (s)
35	44	318	61,44
40	46	403,64	92,32
45	47,6	660,25	146,63

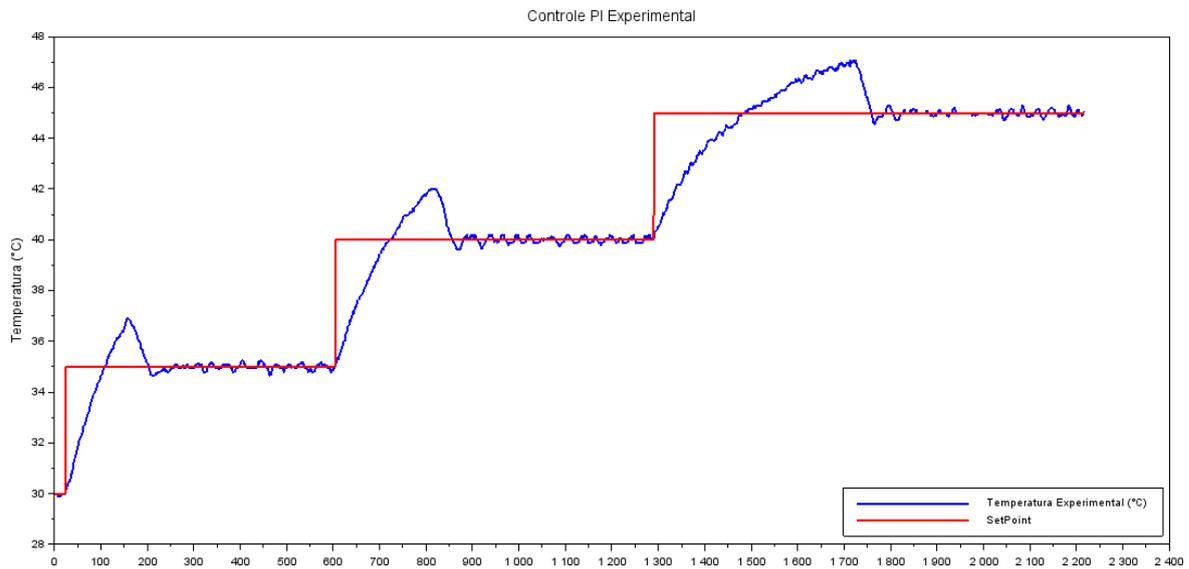
Fonte: Os autores (2025).

#### b) Controle Proporcional–Integral (PI)

A Figura 47 ilustra o comportamento do controle PI, enquanto a Tabela 9 apresenta os parâmetros de desempenho obtidos nas curvas para cada *setpoint*.

O PI apresentou oscilações visíveis durante as transições (algumas pequenas sobressinalizações), mas em geral exibiu melhor amortecimento que o controle P.

Figura 47 – Resposta experimental com controle PI.



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 9 – Parâmetros de desempenho (Controle PI, valores experimentais).

Controle PI			
Setpoint (°C)	%UP	Ts (s)	Tr (s)
35	38	236,61	64,94
40	40	332	89,61
45	41,6	537,76	162

Fonte: Os autores (2025).

### c) Controle Proporcional–Integral–Derivativo (PID)

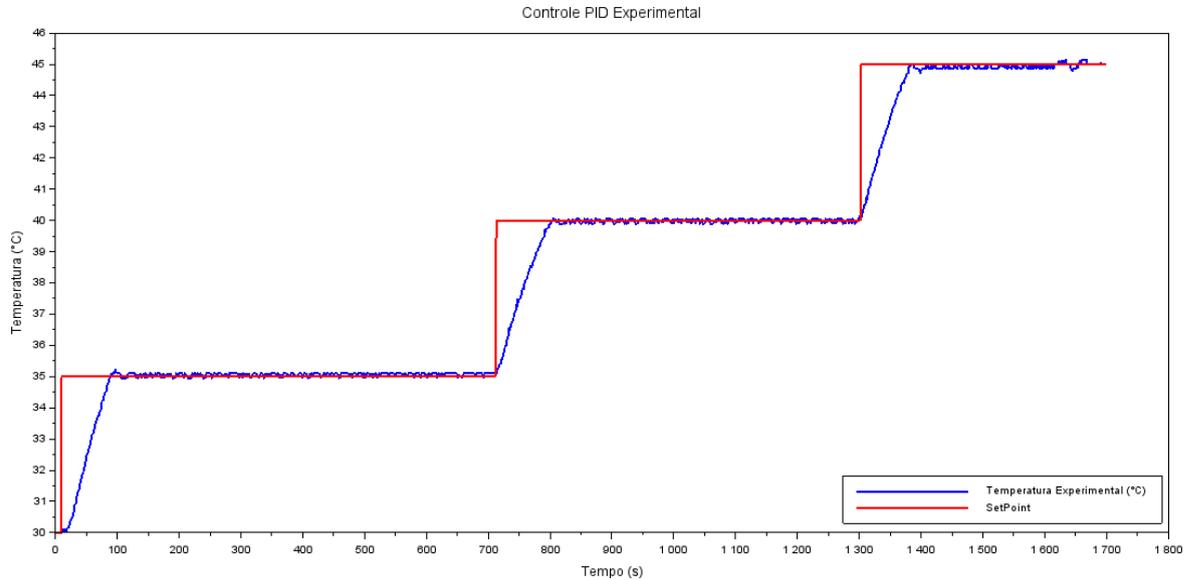
A Figura 48 ilustra o comportamento do controle PID, enquanto a Tabela 10 apresenta os parâmetros de desempenho obtidos nas curvas para cada *setpoint*.

O controle PID apresentou o menor *overshoot* médio entre todos os controladores testados, destacando-se especialmente para os degraus de 40 °C e 45 °C, nos quais não houve sobrelevação. A presença da ação derivativa contribuiu significativamente para o amortecimento das oscilações, resultando em uma resposta mais estável e suave em comparação aos controles P e PI.

Tanto o tempo de subida  $T_r$  quanto o tempo de acomodação  $T_s$  apresentaram desempenho globalmente superior, evidenciando maior rapidez na estabilização da variável controlada. Observa-se ainda que, para os *setpoints* de 40 °C e 45 °C, o tempo de acomodação foi menor do que para 35 °C, indicando que o sistema respondeu de forma mais eficiente nesses

patamares.

Figura 48 – Resposta experimental com controle PID.



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 10 – Parâmetros de desempenho (Controle PID, valores experimentais).

<b>Controle PID</b>			
<i>Setpoint</i> (°C)	%UP	Ts (s)	Tr (s)
35	5	106	52,52
40	0	100	59,27
45	0	104,69	64,89

Fonte: Os autores (2025).

A dinâmica do tempo de subida manteve a tendência observada nos controladores anteriores: quanto maior o *setpoint*, maior o tempo necessário para alcançá-lo. Esse comportamento está associado à maior quantidade de energia requerida para elevar a temperatura a níveis mais altos e à característica térmica inercial do sistema, que demanda um acréscimo proporcional no tempo para vencer a diferença térmica inicial.

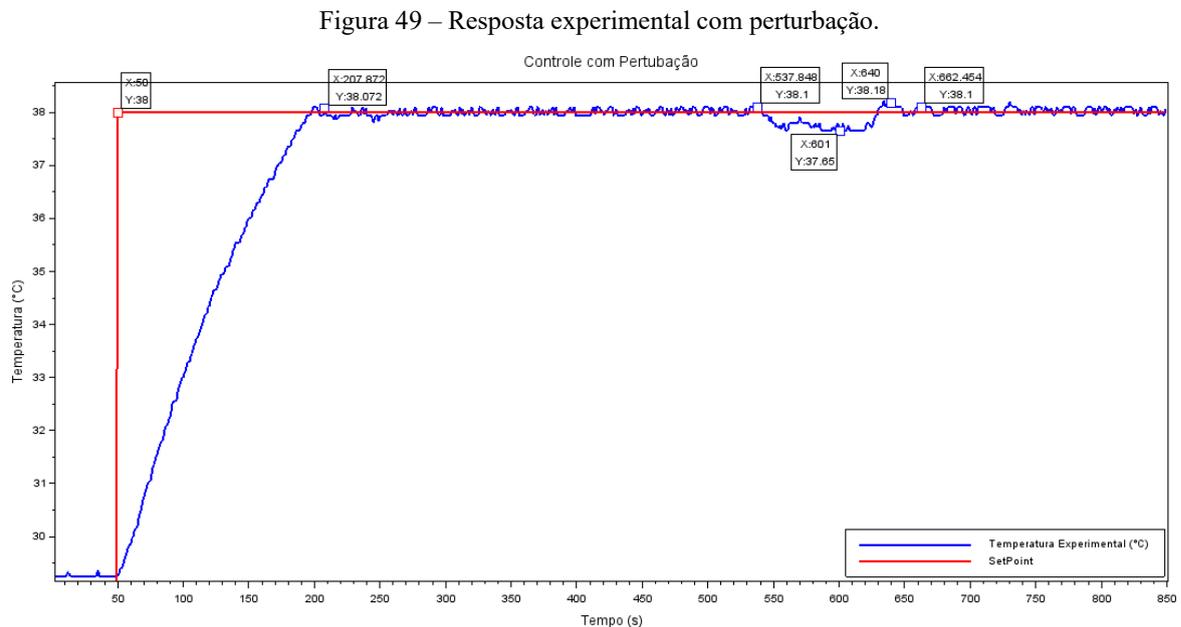
Durante a execução dos ensaios experimentais, foi possível observar a presença de pequenas oscilações e ruídos nos sinais de temperatura registrados. Esses comportamentos podem estar relacionados a interferências elétricas no ambiente, variações naturais do processo térmico e à resolução do sistema de medição. O transmissor de temperatura utilizado, acoplado a um sensor com escala de 0,15 °C, limita a precisão das leituras e pode gerar pequenas variações nos valores exibidos, mesmo em condições de regime permanente. Apesar disso, esses ruídos não comprometeram de forma significativa a análise do desempenho dos

controladores.

### 5.3.3 Resultado Experimental do Controle PID com perturbação

Para avaliar a robustez do sistema de controle frente a distúrbios externos, foi realizado um ensaio experimental no qual o *setpoint* foi ajustado para 38 °C e, em seguida, introduziu-se uma perturbação térmica por meio do acionamento da ventoinha de resfriamento aos 538s de experimento.

Observa-se na Figura 49 que, após a aplicação da perturbação, a temperatura sofreu uma queda momentânea de aproximadamente 0,5 °C, retornando gradualmente ao valor de referência. Essa resposta evidencia a capacidade do controlador de compensar variações externas, restabelecendo o equilíbrio térmico em poucos segundos, sem oscilações significativas.



Fonte: Os autores (2025).

O resultado demonstra que, mesmo diante de um distúrbio abrupto, o sistema manteve um bom desempenho, com erro estacionário desprezível e mínima degradação da estabilidade.

## 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

Para a análise comparativa entre os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios experimentais, considerou-se apenas o *setpoint* de 35 °C. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos, os quais são analisados posteriormente.

Tabela 11 – Comparação entre os valores obtidos simulados e experimentalmente.

Controlador	Simulados			Experimentais		
	%UP	Ts (s)	Tr (s)	%UP	Ts (s)	Tr (s)
P	45,8	280,79	23,11	44	318	61,44
PI	25,8	201,14	23,89	38	236,61	64,94
PID	7,4	246,11	31,72	5	106	52,52

Fonte: Os autores.

No controlador P, a simulação apresentou um %UP de 45,8%, enquanto o valor experimental foi ligeiramente inferior, em 44%. O tempo de acomodação (Ts) obtido experimentalmente foi maior (318 s) em relação ao simulado (280,79 s), e o tempo de subida (Tr) apresentou aumento mais expressivo, passando de 23,11 s na simulação para 61,44 s no experimento.

Para o controlador PI, observou-se um %UP simulado de 25,8%, contra 38% no ensaio experimental, indicando um aumento considerável do sobressinal em condições reais. O tempo de acomodação também apresentou crescimento, de 201,14 s na simulação para 236,61 s no experimento. De modo semelhante, o tempo de subida passou de 23,89 s (simulação) para 64,94 s (experimental), revelando maior lentidão na resposta prática.

O controlador PID manteve comportamento mais próximo entre simulação e prática. O %UP passou de 7,4% na simulação para 5% no ensaio experimental, mostrando coerência com o desempenho esperado de um sistema bem ajustado. Contudo, os tempos de acomodação e subida também se mostraram superiores na prática, passando de 246,11 s para 106 s (Ts) e de 31,72 s para 52,52 s (Tr), o que sugere influência das dinâmicas físicas e de possíveis atrasos no atuador e sensor.

De forma geral, os resultados indicam que, embora as simulações representem de maneira satisfatória o comportamento global do sistema, as condições experimentais tendem a apresentar tempos de resposta mais elevados e, em alguns casos, maior sobressinal. Essas diferenças podem ser atribuídas a simplificações do modelo matemático, que não considerou ruídos, atrasos de transporte e variações de perdas térmicas, interferências elétricas e à resolução limitada do sensor, bem como a condições ambientais não controladas durante os testes.

## 6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado resultou no desenvolvimento de uma bancada didática funcional e bem estruturada para estudos em sistemas de controle e automação de processos térmicos. Desde as etapas iniciais, que envolveram o levantamento teórico sobre fundamentos de controle, automação industrial, modelagem de processos térmicos e integração de sistemas, até a construção e validação prática do protótipo, foi possível consolidar um recurso que une aplicabilidade acadêmica, baixo custo e proximidade com ambientes industriais reais.

A integração dos componentes de *hardware* e *software* foi realizada de forma eficiente, combinando sensores, atuadores, CLP, *interface* homem-máquina e supervisor em uma configuração estável e de fácil operação. A comunicação pelo protocolo Modbus mostrou-se confiável e ágil, possibilitando o monitoramento contínuo das variáveis de processo e a alteração de parâmetros diretamente nas interfaces desenvolvidas. Esse arranjo proporcionou uma experiência de uso intuitiva e, ao mesmo tempo, tecnicamente consistente, permitindo a análise de diferentes estratégias de controle e o acompanhamento de seus efeitos sobre a planta térmica.

Durante os testes experimentais, a bancada apresentou comportamento previsível e repetível, aspectos fundamentais para seu uso didático. O controle liga-desliga, embora simples, demonstrou claramente suas limitações em termos de oscilação em torno do ponto de ajuste, servindo como excelente recurso para a compreensão de conceitos básicos de automação. Já as demais estratégias implementadas apresentaram desempenho superior ao controle liga-desliga, sendo o controle PID o que obteve os melhores resultados. Essa técnica demonstrou elevada capacidade de estabilização do sistema, reduzindo significativamente o erro em regime permanente e minimizando oscilações em torno do ponto de ajuste.

Um aspecto que merece destaque é a viabilidade econômica do projeto. O custo total de R\$ 1.055,65 representa uma fração (10,55%) do valor de bancadas comerciais com funcionalidades semelhantes, que frequentemente ultrapassam os R\$ 10.000,00. Isso demonstra que é possível construir equipamentos didáticos de qualidade com investimento reduzido, tornando a proposta acessível a instituições que buscam ampliar sua infraestrutura laboratorial sem comprometer o orçamento.

Conclui-se, portanto, que a bancada desenvolvida atendeu plenamente à proposta inicial, oferecendo um meio eficiente para unir teoria e prática no ensino de automação e controle térmico. Além de cumprir sua função principal, o projeto abre espaço para futuras expansões, como a incorporação de novos elementos de atuação, a aplicação de técnicas de controle mais

sofisticadas.

Como trabalhos futuros sugere-se: (a) Construção da supervisão remota dos dados (web site); (b) desenvolver um sistema mestre-escravo para integração de outras bancadas didáticas; (c) Sintonia e validação de outras estratégias de controle, a exemplo de PI *Fuzzy*, *Model-Free Control* ou PID adaptativo; (d) implementar nas aplicações SCADA sistema de alarmes caso haja um mal funcionamento operacional.

## REFERÊNCIAS

- ALFACOMP. **Controle de temperatura**. 2024. Disponível em: <https://alfacomp.net/portfolio-item/controle-de-temperatura/>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- BOLTON, W. **Instrumentation and control systems**. 1. ed. Oxford: Newnes, 2004.
- BORTOLO, K. F. Verificação da necessidade de dispositivos didáticos para o ensino na graduação em engenharia mecânica. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA*, 34., 2006, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo: ABENGE, 2006. Disponível em: [http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2006/artigos/1\\_69\\_790.pdf](http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2006/artigos/1_69_790.pdf). Acesso em: 15 set. 2014.
- BOYER, S. A. **SCADA: supervisory control and data acquisition**. 3. ed. Research Triangle Park: ISA, 2004.
- CAMPOS, M. C. M. M. de; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2010.
- ÇENGEL, Y. A.; TURNER, R. H. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2012.
- COELHO, B. **Tipos de pesquisa: abordagem, natureza, objetivos e procedimentos**. Mettzer, 2019. Disponível em: <https://blog.mettzer.com/tipos-de-pesquisa/>. Acesso em: 12 maio 2025.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern control systems**. 13. ed. Londres: Pearson, 2016.
- FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. **Journal of Engineering Education**, v. 94, n. 1, p. 121–130, 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/255619945\\_The\\_Role\\_of\\_Laboratory\\_Work\\_in\\_Engineering\\_Education\\_Student\\_and\\_Staff\\_Perceptions](https://www.researchgate.net/publication/255619945_The_Role_of_Laboratory_Work_in_Engineering_Education_Student_and_Staff_Perceptions). Acesso em: 11 maio 2025.
- FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. 5. ed. Cham: Springer, 2016.
- FRANCHI, Claiton Moro. **Instrumentação de processos industriais: princípios e aplicações**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2018.
- GROOVER, Mikell P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- HOLLIFIELD, B. **A high-performance HMI**. ISA Water & Wastewater and Automatic Controls Symposium. Orlando: [s.n.]. 2012.
- KOLB, D. A. **Experiential learning: experience as the source of learning and development**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1984.
- LMLOGIX AUTOMAÇÃO. **Comparação entre malha fechada e aberta**. 2025. Disponível em: <https://www.lmlogix.com.br/malha-fechada-e-aberta/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. **FX3S/FX3G/FX3GC/FX3U/FX3UC series programmable controllers**: programming manual – basic & applied instruction edition. Tokyo, 2015. Disponível em: [https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/plc\\_fx/jy997d16601/jy997d16601r.pdf](https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/plc_fx/jy997d16601/jy997d16601r.pdf). Acesso em: 1 ago. 2025.

MODBUS ORGANIZATION. **Modbus messaging on TCP/IP implementation guide V1.0b**. 2020. Disponível em: [https://modbus.org/docs/Modbus\\_Messaging\\_Implementation\\_Guide\\_V1\\_0b.pdf](https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf). Acesso em: 5 jun. 2025.

NISE, N. S. **Control systems engineering**. 7. ed. Nova York: Wiley, 2015.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

PETRUZELLA, F. D. **Programmable logic controllers**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

PINTO, J. E. M. G. **Aplicação prática do método de sintonia de controladores PID utilizando o método do relé com histerese**. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SOLIHIN, Y. **Modern control - lecture 06 PID tuning**. Slideshare, 2017. Disponível em: <https://www.slideshare.net/slideshow/modern-control-lec-06-pid-tuning/75532617>. Acesso em: 1 ago. 2025.

STOUFFER, K.; FALCO, J.; SCARFONE, K. **Guide to industrial control systems (ICS) security**. NIST Special Publication 800-82, 2015.

SURGENOR, B. W.; FIRTH, K. W. **The role of the laboratory in design engineering education**. Proceedings of the PCEEA Conference, 2012. Disponível em: <https://ojs.library.queensu.ca/index.php/PCEEA/article/view/3848/3845>. Acesso em: 11 maio 2025.

TEI INGENIERÍA MEXICANA. **Relevadores de estado sólido, SSR**. 2025. Disponível em: <http://www.teii.com.mx/relevadores-estado-solido-ssr.html>. Acesso em: 2 ago. 2025.

URBAS, Leon; OBST, Michael; STÖSS, Markus. Formal models for high performance HMI engineering. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 45, n. 2, p. 854–859, 2012. 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling. ISSN 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00151>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016307844>. Acesso em: 20 jun. 2025.

## APÊNDICE A

### PROGRAMAÇÃO LADDER

Este apêndice disponibiliza o código em *Ladder* desenvolvido no *software* GX Works2 para o CLP Mitsubishi FX3U-MT, responsável pela execução dos controles *On-Off* e PID, e comunicação via Modbus RTU com o VTScada.

O programa completo pode ser acessado por meio do QR Code abaixo, que direciona para o arquivo do projeto em formato compatível com o GX Works2.



	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

## Documento Digitalizado Restrito

### Monografia TCC

<b>Assunto:</b>	Monografia TCC
<b>Assinado por:</b>	Heriliany Sousa
<b>Tipo do Documento:</b>	Dissertação
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Restrito
<b>Hipótese Legal:</b>	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Heriliany Iasmim de Sousa, ALUNO (202012240015) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 03/09/2025 22:15:19.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1596772

Código de Autenticação: a17f3b9e37

