v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA COMPARAR DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROLE DE TEMPERATURA

DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO COMPARE DIFFERENT TEMPERATURE CONTROL TECHNIQUES

DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA COMPARAR DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROL DE TEMPERATURA

Angelo Gabriel Pimenta[1], Augusto Perez de Andrade[2]

e7109296
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9296

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, a modelagem e a avaliação experimental de uma planta térmica de aquecimento de água para comparar três estratégias de controle de temperatura: liga-desliga, proporcional (P) e proporcional-integral (PI). O sistema foi constituído por um recipiente de alumínio com 1 L de água, uma resistência elétrica de 1.000 W/127 V, um sensor DS18B20, um relé de estado sólido e um Arduino Uno, utilizando referência de 80 °C. A identificação dinâmica do sensor e da planta foi realizada por meio de respostas ao degrau e ajuste de modelos no MATLAB, resultando em modelos de primeira ordem com constantes de tempo de aproximadamente 6,67 s e 1.053 s, respectivamente. Nos ensaios, o controle liga-desliga alcançou a referência e apresentou oscilações entre 79 °C e 83 °C, encerrando em 82 °C. O controlador P, com Kp = 4, atingiu 74 °C, com desvio final de −6 °C. O controlador PI, com Kp = 4 e Ti = 600 s, encerrou em 82 °C, com desvio final de +2 °C, reduzindo a diferença final em relação ao controle proporcional. Os resultados evidenciaram comportamentos distintos de aquecimento e acionamento, sem estabelecer superioridade geral de uma estratégia. A ausência de registros dos instantes de cada leitura limitou a determinação de indicadores temporais, mas permitiu a análise das temperaturas e oscilações observadas.

PALAVRAS-CHAVE: Arduino. Controle de temperatura. Controle liga-desliga. Controle PI. Controle proporcional. Planta térmica.

ABSTRACT

This study presents the development, modeling, and experimental evaluation of a water-heating thermal plant to compare three temperature control strategies: on-off, proportional (P), and proportional-integral (PI). The system consisted of an aluminum container with 1 L of water, a 1,000 W/127 V electric heating element, a DS18B20 sensor, a solid-state relay, and an Arduino Uno, using a setpoint of 80 °C. Dynamic identification of the sensor and thermal plant was performed using step responses and model fitting in MATLAB, yielding first-order models with time constants of approximately 6.67 s and 1,053 s, respectively. In the experiments, the on-off controller reached the setpoint and exhibited oscillations between 79 °C and 83 °C, ending at 82 °C. The P controller, with Kp = 4, reached 74 °C, with a final deviation of −6 °C. The PI controller, with Kp = 4 and Ti = 600 s, ended at 82 °C, with a final deviation of +2 °C, reducing the final deviation compared with proportional control. The results showed distinct heating and actuation behaviors without establishing the overall superiority of any strategy. The lack of time stamps for individual readings limited the determination of time-based performance indicators, but allowed the analysis of the recorded temperatures and oscillations.

[1] UNIARA, graduando.
[2] Universidade Federal de Uberlândia – UFU, especialista.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

KEYWORDS: *Arduino. On-off control. PI control. Proportional control. Temperature control. Thermal plant.*

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo, el modelado y la evaluación experimental de una planta térmica de calentamiento de agua para comparar tres estrategias de control de temperatura: todo-nada, proporcional (P) y proporcional-integral (PI). El sistema estuvo compuesto por un recipiente de aluminio con 1 L de agua, una resistencia eléctrica de 1000 W/127 V, un sensor DS18B20, un relé de estado sólido y un Arduino Uno, utilizando una referencia de 80 °C. La identificación dinámica del sensor y de la planta se realizó mediante respuestas al escalón y ajuste de modelos en MATLAB, obteniéndose modelos de primer orden con constantes de tiempo de aproximadamente 6,67 s y 1053 s, respectivamente. En los ensayos, el control todo-nada alcanzó la referencia y presentó oscilaciones entre 79 °C y 83 °C, finalizando en 82 °C. El controlador P, con Kp = 4, alcanzó 74 °C, con una desviación final de −6 °C. El controlador PI, con Kp = 4 y Ti = 600 s, finalizó en 82 °C, con una desviación final de +2 °C, reduciendo la diferencia final respecto al control proporcional. Los resultados evidenciaron comportamientos distintos de calentamiento y accionamiento, sin establecer la superioridad general de una estrategia. La ausencia de marcas de tiempo para cada lectura limitó la determinación de indicadores temporales, pero permitió analizar las temperaturas y oscilaciones registradas.

PALABRAS CLAVE: *Arduino. Control de temperatura. Control encendido-apagado. Control PI. Control proporcional. Planta térmica.*

INTRODUÇÃO

O controle automático integra sistemas de manufatura, robótica e processos industriais nos quais grandezas como temperatura, pressão e vazão devem permanecer dentro de faixas operacionais estabelecidas. A realimentação permite ajustar a variável manipulada em função do desvio entre o valor medido e a referência definida para o processo (OGATA, 2010).

A evolução dos microcontroladores e dos dispositivos de instrumentação ampliou as possibilidades de implementação de algoritmos de controle em sistemas de pequena escala. Em aplicações laboratoriais, essa integração permite adquirir sinais de sensores, processar os erros de controle e comandar atuadores durante a realização dos ensaios.

Nos processos térmicos, a escolha da estratégia de controle influencia diretamente o comportamento da temperatura durante o aquecimento. O tempo necessário para alcançar a referência, as oscilações próximas ao valor desejado e o erro observado ao término do experimento são características relevantes para a comparação entre controladores.

O controle de temperatura é empregado em fornos, reatores, aquecedores, estufas e sistemas de climatização. BEZERRA (2007) destaca a importância dessa variável para as condições de operação e para a qualidade dos produtos submetidos a processos térmicos. Essas aplicações exigem que a resposta do controlador seja avaliada em conjunto com as características físicas da planta.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Ensaios realizados em sistemas térmicos instrumentados permitem confrontar o comportamento previsto pelos algoritmos de controle com a resposta efetivamente medida. BALLERINI et al. (2024) investigaram o controle PID de um aquecedor elétrico com Arduino em uma aplicação de climatização. LARA e HERRERA (2026), por sua vez, compararam estratégias liga-desliga e PID digital em um elemento de alumínio aquecido eletricamente. Embora utilizem configurações diferentes da adotada neste trabalho, os dois estudos apresentam procedimentos experimentais relevantes para a avaliação de sistemas de controle de temperatura.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma planta térmica experimental e comparar três estratégias de controle de temperatura: liga-desliga, proporcional (P) e proporcional-integral (PI). Os ensaios foram conduzidos com referência de 80 °C, considerando a evolução da temperatura medida e o sinal de acionamento do elemento de aquecimento.

O sistema experimental foi constituído por um recipiente de alumínio com 1 L de água, uma resistência elétrica de potência nominal de 1.000 W alimentada em 127 V, um sensor de temperatura e um Arduino Uno responsável pela execução dos controladores. A mesma configuração física foi utilizada para examinar as diferenças de resposta entre as estratégias propostas.

Além dos ensaios com os controladores, foram realizadas a identificação e a modelagem matemática do sensor de temperatura e da planta térmica. Para isso, foram analisadas as respostas experimentais a sinais de entrada em degrau, permitindo obter modelos matemáticos que representam o comportamento dinâmico desses elementos.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

A dinâmica de um processo térmico resulta do balanço entre a potência fornecida ao aquecedor, a energia armazenada nos componentes e as perdas de calor para o ambiente. A capacidade térmica e as condições de transferência de calor influenciam a velocidade da resposta e a continuidade do aquecimento após alterações no sinal de comando. Esses efeitos devem ser considerados na modelagem e na avaliação de controladores de temperatura.

Em um estudo de controle da temperatura da água em uma planta industrial com trocador de calor, LAGE (2018) realizou a identificação dinâmica do processo para obter um modelo matemático representativo. O autor descreveu o comportamento relativamente lento dos sistemas térmicos e a importância das constantes de tempo na definição da estratégia de controle.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sistemas térmicos podem ser representados por modelos matemáticos de primeira ordem, dependendo das características do processo. Nesses modelos, a constante de tempo é um parâmetro que descreve a velocidade da resposta às variações de entrada. Para uma resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem estável, a constante de tempo corresponde ao instante em que a saída atinge aproximadamente 63,2% da variação total. Esse procedimento permite estimar a dinâmica do sistema a partir dos dados experimentais e obter uma função de transferência que represente seu comportamento (OGATA, 2010).

LAGE (2018) também examinou alternativas para melhorar a resposta a perturbações, utilizando ferramentas computacionais, entre elas o MATLAB, para identificação e ajuste dos controladores. Os resultados do estudo evidenciaram que o modelo matemático constitui uma aproximação do processo físico e que diferenças entre as respostas calculadas e experimentais devem ser consideradas durante a validação.

A identificação de processos de aquecimento permanece relevante em pesquisas recentes. HUA et al. (2024) investigaram um método de identificação associado ao controle preditivo de temperatura em processos sem resfriamento ativo. Nessa classe de sistemas, a dissipação de calor depende das condições térmicas do processo, o que pode limitar a correção de elevações de temperatura após a redução da potência aplicada. Tal característica também deve ser considerada na interpretação do comportamento transitório da planta utilizada neste trabalho.

Outra possibilidade discutida por LAGE (2018) é a utilização de estruturas de controle em cascata, nas quais variáveis adicionais do processo podem contribuir para a rejeição de perturbações. A adoção dessas estruturas depende, entretanto, da instrumentação disponível, das características da planta e dos requisitos operacionais. No presente estudo, optou-se pela avaliação de três controladores de estrutura mais simples, implementados na mesma configuração experimental.

BEZERRA (2007) estudou o controle de temperatura de um forno industrial com controladores P, PI e PID, analisando diferentes ajustes dos parâmetros de controle. O trabalho mostrou que alterações nos ganhos interferem no comportamento transitório, incluindo a rapidez da resposta e a ocorrência de sobressinal. Por esse motivo, a comparação de estratégias de controle deve apresentar os parâmetros empregados em cada ensaio.

O ajuste dos parâmetros é determinante para a resposta do controlador. BEZERRA (2007) abordou métodos de sintonia, entre eles o de Ziegler–Nichols, e discutiu a relação entre a configuração do PID e o comportamento térmico do processo. A escolha de um método

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

específico deve considerar as condições de operação e as informações disponíveis sobre a planta.

No mesmo trabalho, BEZERRA (2007) utilizou MATLAB e Simulink para examinar previamente a influência dos ajustes sobre a resposta do processo. Essa abordagem permite comparar tendências previstas pelo modelo, mas não substitui a verificação experimental, sobretudo quando a planta apresenta perdas térmicas e restrições de atuação não representadas integralmente na simulação.

As três estratégias consideradas apresentam leis de controle distintas. No liga-desliga, o comando assume os estados de acionamento e desligamento conforme o sinal do erro. No proporcional, a ação de controle é determinada pelo ganho Kp multiplicado pelo erro instantâneo entre referência e temperatura medida. O PI acrescenta uma parcela associada à integração temporal do erro, cuja intensidade depende do tempo integral Ti. Essas diferenças justificam a comparação das respostas em uma mesma planta (OGATA, 2010).

O controlador proporcional determina a ação de controle a partir do erro entre a temperatura de referência e a temperatura medida. Sua expressão matemática é apresentada na Equação (1):

$$u_P(t) = K_p\, e(t)$$

Em que uP(t) representa a ação proporcional, Kp é o ganho proporcional e e(t) corresponde ao erro de controle.

No controlador proporcional-integral, além da parcela proporcional, é considerada a integral do erro ao longo do tempo. A Equação (2) apresenta a expressão do controlador PI:

$$u_{PI}(t) = K_p\, e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e\,(\tau)\, d\tau$$

Nessa expressão, Ti representa o tempo integral. A parcela integral permite corrigir erros persistentes entre a referência e a variável controlada, enquanto a parcela proporcional atua diretamente sobre o erro instantâneo (OGATA, 2010).

A comparação experimental deve ser sustentada por critérios quantitativos compatíveis com os dados adquiridos. MEJÍA, SALAZAR e CAMACHO (2022) utilizaram índices de erro, sobressinal, tempo de acomodação e esforço de controle para avaliar estratégias aplicadas a um processo térmico. Cada indicador descreve uma característica da resposta, razão pela qual a proximidade da temperatura final em relação à referência, isoladamente, não é suficiente para estabelecer uma classificação geral de desempenho.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A influência da sintonia também é discutida por BORASE et al. (2021), que apresentam uma revisão de métodos de ajuste de controladores PID. Em uma aplicação de controle de temperatura com Arduino e MATLAB/Simulink, BASKORO et al. (2024) analisaram o comportamento do sistema diante de diferentes parâmetros de controle. Esses estudos fundamentam a necessidade de registrar os valores dos ganhos utilizados e de relacionar a resposta experimental à configuração específica de cada controlador.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho envolve a representação matemática da dinâmica térmica e a realização de ensaios com os controladores liga-desliga, P e PI. A etapa de modelagem foi utilizada para caracterizar a resposta do sensor e da planta; a etapa experimental permitiu registrar a temperatura e o sinal de controle durante o aquecimento da água até a região da referência estabelecida.

A integração entre aquisição de temperatura, processamento do erro e acionamento de um aquecedor por plataforma embarcada tem sido examinada em outros trabalhos. BALLERINI et al. (2024) utilizaram Arduino em um sistema de aquecimento associado a ensaios de climatização, enquanto AKBAR et al. (2024) investigaram a implementação de controle PID para temperatura do ar. Embora as condições físicas sejam distintas do aquecimento de água, essas aplicações oferecem referências para a organização da instrumentação e para a avaliação da resposta dos controladores.

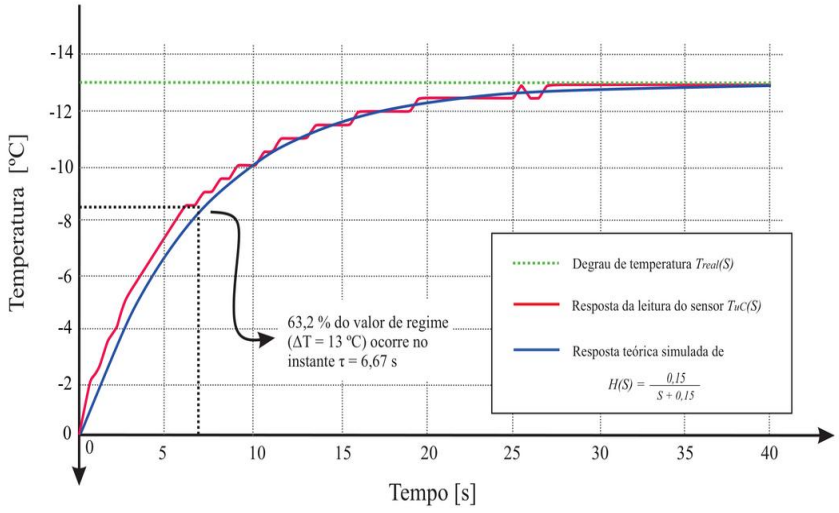
A planta experimental foi constituída por um recipiente de alumínio contendo 1 L de água, aquecido por uma resistência elétrica de potência nominal de 1.000 W, alimentada em 127 V. A temperatura foi medida com um sensor DS18B20, que possui um conversor analógico-digital integrado, responsável por converter a informação de temperatura em um valor digital. Para coletar as medições de temperatura, o sensor foi imerso aproximadamente na metade da coluna de água, sem agitação mecânica. O circuito de acionamento utiliza um relé de estado sólido da marca Metaltex, comandado pelo Arduino Uno.

A identificação do sensor foi realizada por meio de uma variação negativa de temperatura, obtida ao mergulhá-lo em uma garrafa térmica com água gelada. A resposta experimental foi aproximada por um modelo de primeira ordem. Pelo critério de 63,2% da variação total, de aproximadamente 13 °C, determinou-se a constante de tempo $\tau_S \approx 6{,}67$ s. O coeficiente correspondente é $a = 1/\tau_S \approx 0{,}15\ s^{-1}$, com ganho estático unitário. A função de transferência do sensor é apresentada a seguir.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Resposta experimental do sensor e resposta do modelo de primeira ordem

$$H(s) = \frac{0{,}15}{s + 0{,}15}$$



Fonte: Autores, 2026.

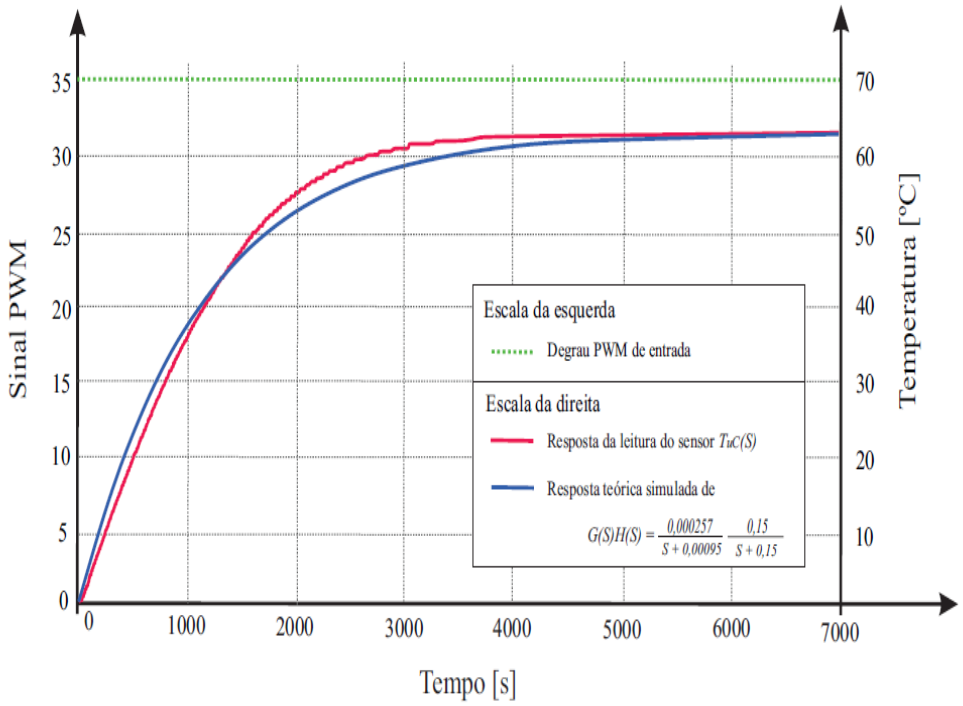
Para identificar a planta térmica, composta pelo circuito de acionamento, pela resistência e pela água, aplicou-se um degrau PWM de 35 unidades, em uma escala digital de 0 a 255 (13,7%). A curva de temperatura medida foi comparada à resposta simulada no MATLAB, com ajuste dos coeficientes do modelo por tentativa e erro, conforme o procedimento de modelagem realizado. Nesse ajuste, considerou-se a resposta conjunta da planta e do sensor, representada por G(s)H(s). O modelo obtido para a planta é expresso por:

$$G(s) = \frac{0{,}000257}{s + 0{,}00095}$$

O denominador do modelo indica uma constante de tempo da planta τp = 1/0,00095 ≈ 1.053 s. A curva de identificação está apresentada na Figura 2. O valor de 13,7% corresponde à escala do comando digital e não representa, isoladamente, uma medição direta da potência elétrica dissipada.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Resposta ao degrau PWM e curva simulada do conjunto planta e sensor



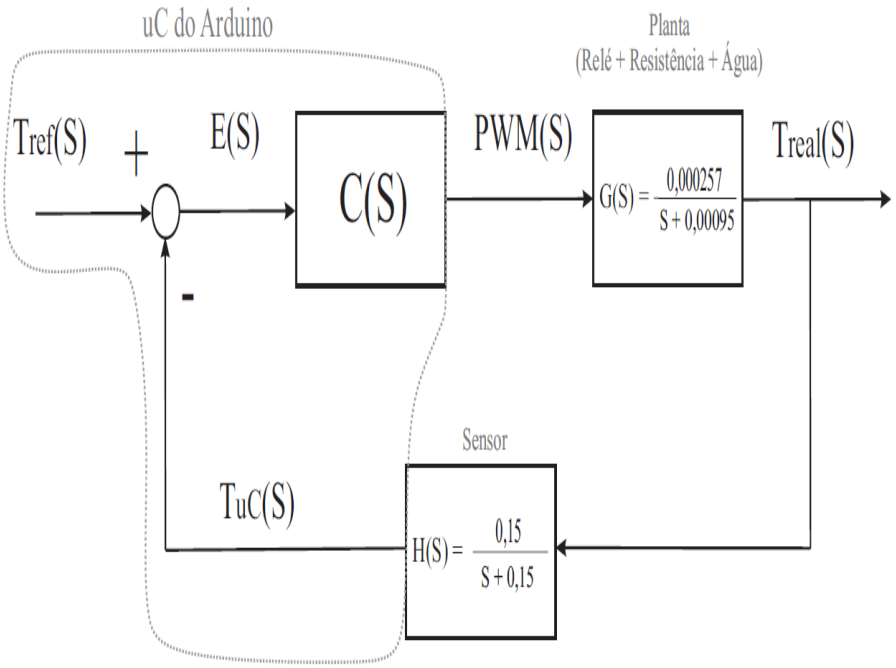
Fonte: Autores, 2026.

As constantes de tempo do sensor e da planta foram estimadas em aproximadamente 6,67 s e 1.053 s, respectivamente. Assim, a dinâmica da planta é cerca de 158 vezes mais lenta. As respostas observadas se aproximaram da estabilização após cerca de 40 s para o sensor e 6.000 s para a planta. Essa diferença justificou considerar a dinâmica do sensor aproximadamente unitária na análise da resposta térmica lenta, embora o sensor físico continue apresentando tempo de resposta próprio.

No diagrama de blocos da Figura 3, a temperatura de referência Tref(s) é comparada à temperatura medida, originando o erro E(s). O controlador C(s) processa esse erro e determina o comando aplicado ao circuito de acionamento da resistência, enquanto a temperatura medida retorna à entrada de realimentação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Diagrama de blocos



Fonte: Autores, 2026.

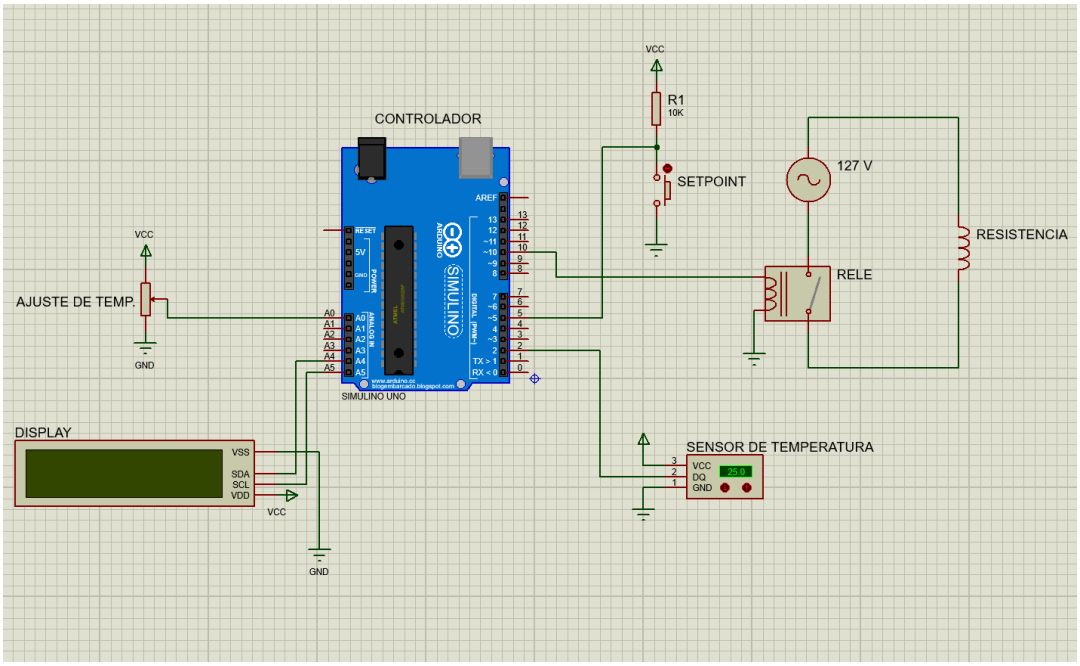
A planta de controle corresponde ao conjunto físico cuja variável de saída deve ser regulada. No presente sistema, a variável controlada é a temperatura da água, e a entrada manipulada é o comando de acionamento do elemento resistivo. A resposta observada depende tanto da potência de aquecimento quanto da transferência e da dissipação de calor.

Durante o aquecimento, a energia térmica é transferida da resistência para a água e para o recipiente de alumínio. A capacidade térmica desses elementos e as trocas de calor com o ambiente influenciam a elevação de temperatura e sua evolução após a redução ou interrupção do acionamento.

A Figura 4 apresenta as interligações elétricas e os principais componentes utilizados na instrumentação e no acionamento da planta experimental.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Diagrama elétrico do sistema experimental



Fonte: Autores, 2026.

A montagem experimental reuniu o elemento de aquecimento (Figura 5), o sensor de temperatura (Figura 6), o circuito de acionamento (Figura 7) e o controlador Arduino Uno (Figura 8). A interface de operação foi composta pelo display de visualização (Figura 9), pelo potenciômetro de ajuste (Figura 10) e pela chave de confirmação da referência (Figura 11).

a) Elemento de aquecimento

Figura 5. Resistência elétrica de 1.000 W/127 V para aquecimento



Fonte: imagem ilustrativa gerada por IA, 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A resistência elétrica realiza a conversão de energia elétrica em calor, transferido à água contida no recipiente. O comando gerado pelo controlador atua sobre o circuito de acionamento e modifica a energia fornecida ao sistema ao longo do ensaio.

b) Sensor de temperatura

Figura 6. Sensor de temperatura DS18B20 à prova d'água utilizado na aquisição de dados térmicos



Fonte: imagem ilustrativa gerada por IA, 2026.

O sensor DS18B20 fornece as leituras de temperatura utilizadas na realimentação do sistema.

c) Circuito de acionamento

Figura 7. Relé de estado sólido METALTEX TZC-40AF



Fonte: Autores, 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O circuito de acionamento utiliza um relé de estado sólido para comandar a alimentação da resistência a partir do sinal fornecido pelo Arduino. A compatibilidade entre o tipo de saída do relé e a estratégia de modulação deve ser considerada ao interpretar a relação entre o valor do comando e a potência efetivamente aplicada.

d) Controlador

Figura 8. Arduino Uno R3



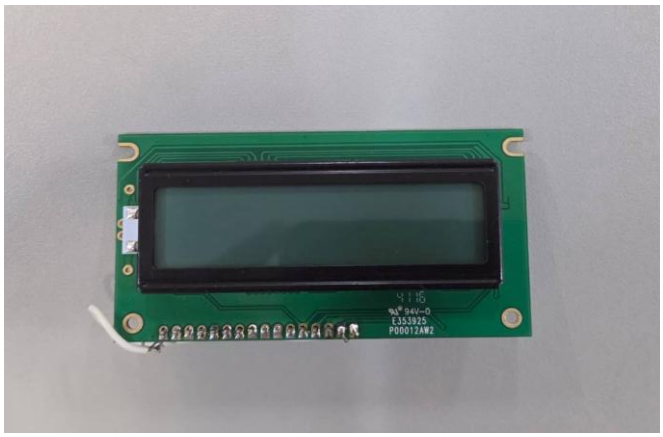
Fonte: Autores, 2026.

O Arduino Uno executa as rotinas dos controladores liga-desliga, proporcional e proporcional-integral, processando a temperatura medida e gerando o sinal de comando do circuito de acionamento.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

e) Visualização

Figura 9. Display LCD 16x2 com módulo I2C

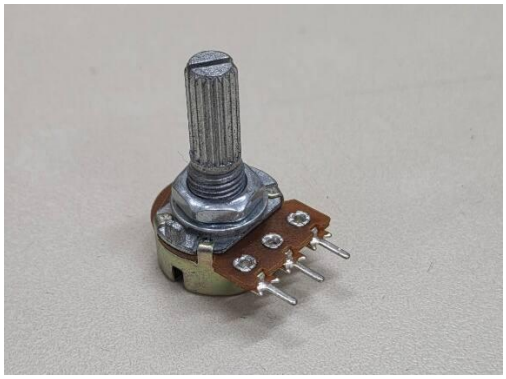


Fonte: Autores, 2026.

O display LCD apresenta a temperatura medida pelo sensor e a temperatura de referência selecionada para o ensaio.

f) Ajuste de temperatura

Figura 10. Potenciômetro linear de 10 kΩ



Fonte: Autores, 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O potenciômetro permite selecionar o valor da temperatura de referência que será utilizado pelo algoritmo de controle.

g) Definição de setpoint

Figura 11. Chave tátil push button



Fonte: Autores, 2026.

A chave tátil confirma o valor de referência ajustado pelo operador, habilitando sua utilização na rotina de controle.

Para o controle proporcional, foi utilizado ganho Kp = 4. No proporcional-integral, os parâmetros informados para os ensaios foram Kp = 4 e Ti = 600 s, correspondendo a Ki = Kp/Ti ≈ 0,00667 s^{-1} na forma adotada. No liga-desliga, não foi programada banda de histerese: o aquecedor permanecia acionado abaixo da referência e era desligado ao alcançá-la. Nos algoritmos P e PI, a ação calculada era limitada à faixa digital de 0 a 255.

O comando do relé foi realizado por modulação temporal. O programa estabelece uma janela nominal de 500 ms, durante a qual a saída digital permanece acionada por uma fração proporcional ao valor de controle dividido por 255 e desligada no restante da janela. Dessa forma, a escala PWM corresponde ao tempo relativo de acionamento da resistência, não à medição

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

direta da potência fornecida. A leitura do sensor ocorre a cada iteração do programa e acrescenta tempo ao ciclo de execução.

A temperatura de referência de 80 °C foi selecionada pelo potenciômetro, confirmada pela chave tátil e exibida no display LCD. Foram realizados dois ensaios para cada estratégia de controle. Nas séries registradas, as temperaturas iniciais eram de aproximadamente 28 °C para o liga-desliga, 25 °C para o P e 26 °C para o PI. O Arduino enviava ao monitor serial, em sequência, a referência, a temperatura medida e a ação de controle.

Embora o programa utilize um período nominal de acionamento de 500 ms, esse valor não corresponde necessariamente ao intervalo exato entre as medições, pois o sensor DS18B20 também necessita de um tempo para realizar a leitura da temperatura. Além disso, os dados foram coletados pelo Monitor Serial do Arduino e posteriormente copiados para arquivos .txt, sem o registro dos instantes de cada medição. Os ensaios foram encerrados após a observação da estabilização da temperatura, sem uma duração previamente definida. Dessa forma, não foi possível determinar com precisão o intervalo entre as amostras, o que limita o cálculo de parâmetros temporais, como o tempo de subida e o tempo de acomodação.

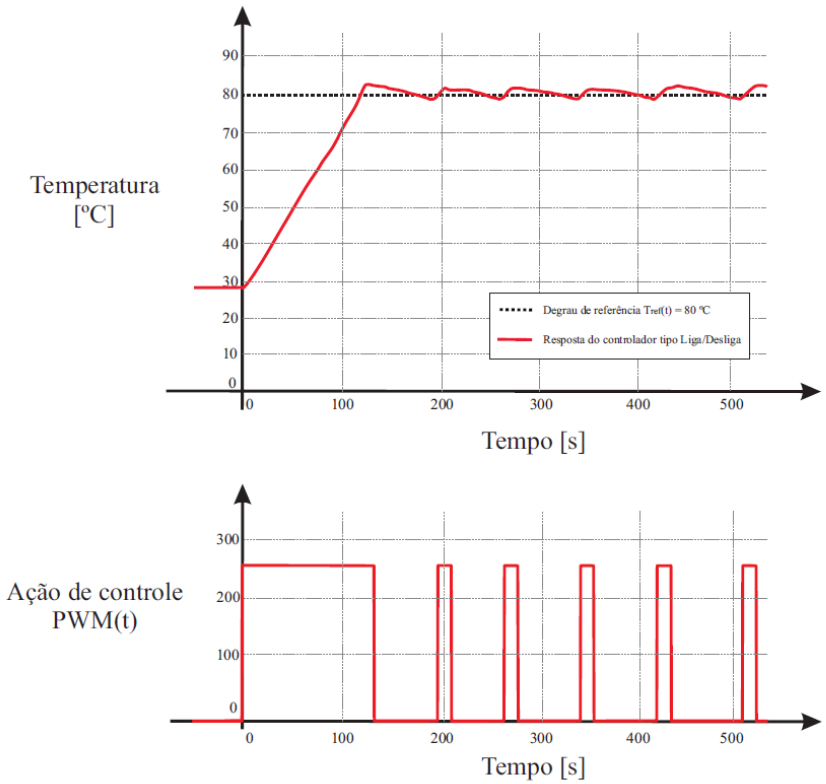
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A identificação matemática do sistema indicou constante de tempo de aproximadamente 6,67 s para o sensor de temperatura e de 1.053 s para a planta térmica. A dinâmica da planta foi, portanto, cerca de 158 vezes mais lenta que a do sensor, conforme os modelos apresentados na Metodologia. Essa diferença ajuda a compreender a resposta gradual ao aquecimento e a continuidade da transferência de calor mesmo após a redução do comando. As curvas experimentais e simuladas foram comparadas visualmente no MATLAB, mas não foi determinado um índice numérico de qualidade do ajuste; assim, os modelos são utilizados para caracterização dinâmica, sem afirmação de validação quantitativa completa.

No ensaio com controle liga-desliga (Figura 12), a temperatura inicial foi de aproximadamente 28 °C e a referência de 80 °C foi alcançada durante o aquecimento. Após o primeiro alcance da referência, os valores registrados variaram entre 79 °C e 83 °C, com temperatura máxima 3 °C acima do valor desejado. O ensaio terminou com leitura de 82 °C e comando de acionamento igual a zero na escala digital de 0 a 255. As oscilações acompanham a alternância entre ligar e desligar a resistência, sem banda de histerese programada. A elevação de temperatura após o desligamento é compatível com a inércia térmica da resistência, do recipiente e da água.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 12. Resposta da temperatura e sinal PWM para o controle liga-desliga



Fonte: Autores, 2026.

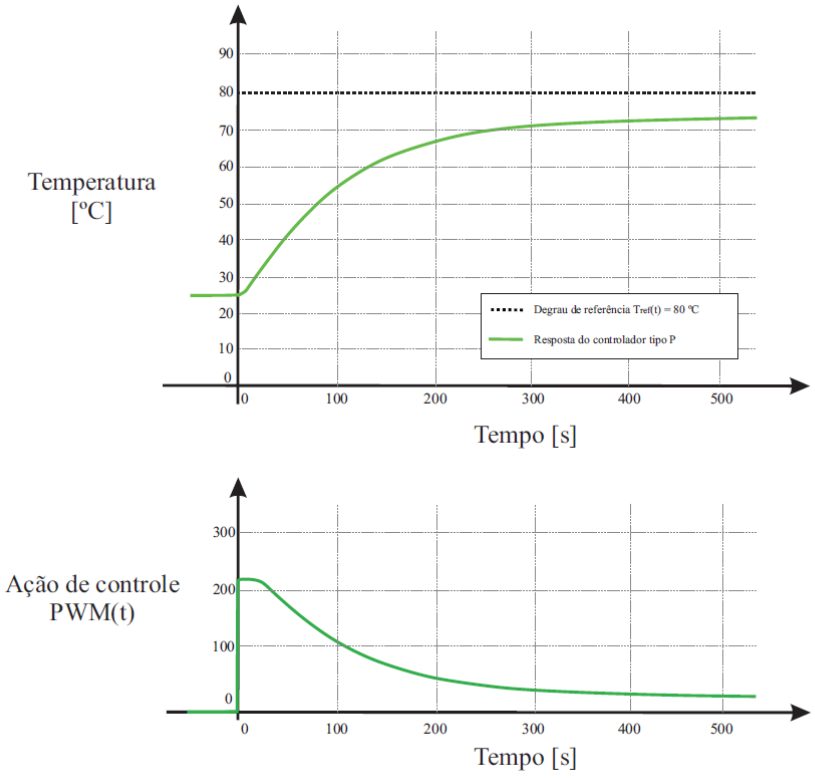
Em estudo experimental com aquecimento resistivo, LARA e HERRERA (2026) também registraram oscilações associadas à estratégia liga-desliga, ao compará-la com um controlador PID digital. Como a planta utilizada pelos autores empregou um elemento de alumínio e condições experimentais próprias, a comparação é qualitativa; ainda assim, os resultados contribuem para contextualizar o comportamento observado na Figura 12.

No ensaio com controlador proporcional (Figura 13), com Kp = 4, a temperatura partiu de aproximadamente 25 °C e aumentou gradualmente até 74 °C. Esse foi também o valor máximo registrado, não havendo ultrapassagem da referência de 80 °C. Ao término da coleta, verificou-se uma diferença de −6 °C em relação ao valor desejado, com comando final de 24 na escala de 0 a 255. A redução progressiva da ação proporcional, à medida que o erro diminuiu, é compatível com a permanência de desvio entre a temperatura medida e a referência na condição

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

observada. Embora as últimas leituras tenham se mantido em 74 °C, esse comportamento não constitui, isoladamente, uma comprovação formal de regime permanente.

Figura 13. Resposta da temperatura e sinal PWM para o controle proporcional (P)

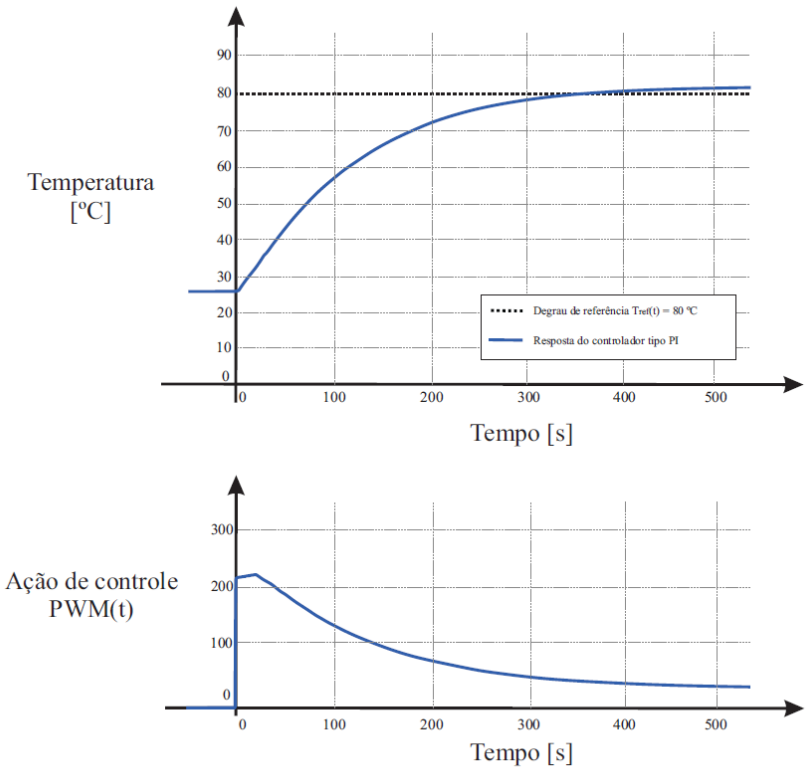


Fonte: Autores, 2026.

No ensaio com controle proporcional-integral (Figura 14), com os parâmetros informados de Kp = 4 e Ti = 600 s, a temperatura inicial foi de aproximadamente 26 °C. O sistema alcançou e ultrapassou a referência de 80 °C, registrando temperatura máxima e final de 82 °C, ou seja, 2 °C acima do setpoint. O comando final registrado foi de 33 na escala de 0 a 255. Em comparação com o controlador P, a inclusão da parcela integral esteve associada à redução da diferença final observada, de 6 °C para 2 °C em módulo. Entretanto, o desvio no encerramento da coleta não permite afirmar que o erro em regime permanente tenha sido eliminado.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 14. Resposta da temperatura e sinal PWM para o controle proporcional-integral (PI)



Fonte: Autores, 2026.

Tabela 1. Indicadores registrados na comparação dos controladores (Tref = 80 °C)

Controle	T inicial (°C)	T máx. (°C)	T final (°C)	Excesso no pico	Desvio final (°C)	Comando final (0–255)
Liga-desliga	28	83	82	3 °C (5,8%)	+2	0
P	25	74	74	0 °C (0%)	−6	24
PI	26	82	82	2 °C (3,7%)	+2	33

Fonte: Autores, 2026.

Os indicadores da Tabela 1 mostram diferenças entre as estratégias sob uma referência comum de 80 °C, embora as temperaturas iniciais não tenham sido idênticas. O controle liga-desliga alcançou a referência, porém apresentou variações entre 79 °C e 83 °C após o primeiro

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

alcance. O controlador P não ultrapassou 74 °C e terminou com desvio de −6 °C. O PI ultrapassou a referência em 2 °C e terminou em 82 °C. Portanto, o módulo da diferença final foi de 2 °C tanto para o PI quanto para o liga-desliga, mas as trajetórias e os sinais de acionamento apresentaram comportamentos distintos. Esses resultados não permitem classificar uma estratégia como superior em todos os critérios.

A necessidade de utilizar métricas complementares é discutida por MEJÍA, SALAZAR e CAMACHO (2022), que compararam estratégias de controle térmico por meio de indicadores de erro e de resposta transitória. AKBAR et al. (2024) também examinaram medidas de desempenho em um sistema de controle da temperatura do ar. Neste trabalho foi possível calcular temperaturas máximas, ultrapassagem da referência, diferenças finais e comandos registrados ao encerramento dos ensaios. Entretanto, como os arquivos .txt não contêm os instantes das leituras e o intervalo real de amostragem não foi estabelecido, não foram calculados tempos de subida e acomodação nem os índices integrais do erro IAE e ISE. O encerramento de cada ensaio ocorreu após a percepção visual de estabilização, sem critério temporal uniforme previamente definido. A comparação foi realizada a partir dos registros experimentais disponíveis para cada estratégia, considerando a evolução da temperatura, as oscilações e o desvio final em relação à referência de 80 °C.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios com referência de 80 °C permitiram comparar o comportamento dos controladores liga-desliga, proporcional e proporcional-integral na mesma planta de aquecimento de água. O liga-desliga alcançou 83 °C e apresentou oscilações entre 79 °C e 83 °C após o primeiro alcance da referência, encerrando a coleta em 82 °C. O controle P apresentou resposta sem ultrapassagem do valor desejado, com temperatura máxima e final de 74 °C e desvio de −6 °C. O PI atingiu 82 °C, encerrando o ensaio 2 °C acima da referência. Assim, o PI apresentou diferença final menor que o P, porém igual em módulo à do liga-desliga; as estratégias diferiram principalmente no modo de acionamento e nas oscilações observadas. Os dados não comprovam eliminação do erro estacionário ou superioridade geral de um dos métodos.

O estudo também incluiu a identificação dinâmica do sensor e da planta, representados por modelos de primeira ordem com constantes de tempo de aproximadamente 6,67 s e 1.053 s, respectivamente. Essa diferença ajuda a interpretar a inércia térmica observada nas respostas de aquecimento. Os resultados permitiram identificar diferenças no comportamento das três estratégias de controle, demonstrando a aplicação prática dos métodos em uma planta térmica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

experimental. Para trabalhos futuros, recomenda-se registrar o tempo de cada amostra, adotar critérios definidos de acomodação e condições iniciais mais uniformes, analisar todas as repetições, avaliar métodos de sintonia e a saturação do comando, além de verificar quantitativamente o ajuste dos modelos e o desempenho diante de perturbações.

REFERÊNCIAS

AKBAR, Afindra Hafiedz et al. Implementing PID Control on Arduino Uno for Air Temperature Optimization. *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, v. 6, n. 1, p. 1–13, 2024. DOI: https://doi.org/10.12928/biste.v6i1.9725.

BALLERINI, Vincenzo et al. The Use of Arduino and PID Control Approach for the Experimental Setup of HVAC Temperature Testing. *Journal of Robotics and Control*, v. 5, n. 2, p. 482–489, 2024. DOI: https://doi.org/10.18196/jrc.v5i2.20915.

BASKORO, Farid et al. Temperature Control of Focused Beam Lamp: PID-Controlled Pulse Width Modulation using MATLAB Simulink and Arduino. *JE-Unisla*, v. 9, n. 2, p. 97–109, 2024. DOI: https://doi.org/10.30736/je-unisla.v9i2.1223.

BEZERRA, José Henrique. *Controle de temperatura de um forno industrial utilizando controlador PID*. 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

BORASE, Rakesh P. et al. A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, v. 9, p. 818–827, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4.

HUA, Shan et al. Tracking Differentiator-Based Identification Method for Temperature Predictive Control of Uncooled Heating Processes. *Processes*, v. 12, n. 10, art. 2137, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/pr12102137.

LAGE, Matheus Sales. *Implantação de sistema de controle de temperatura da água utilizando trocador de calor aplicado em uma planta industrial*. 2018. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018.

LARA, Pedro Augusto de Oliveira; HERRERA, Cristhiano da Costa. Implementação Didática de Controle de Temperatura: Comparação entre PID Digital e On-Off. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, art. e026011, 2026. Disponível em: https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/3266. Acesso em: 13 out. 2026.

MEJÍA, Carlos; SALAZAR, Estefanía; CAMACHO, Oscar. A comparative experimental evaluation of various Smith predictor approaches for a thermal process with large dead time. *Alexandria*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Engineering Journal, v. 61, n. 12, p. 9377–9394, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.047.

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de controle moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.