

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

ANTÔNIO MONTEIRO DA SILVA NETO
NATHAN ADRIAN DOS SANTOS

**SISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO DE DADOS EM UMA ESTUFA
DIDÁTICA**

Cajazeiras-PB
2024

ANTÔNIO MONTEIRO DA SILVA NETO
NATHAN ADRIAN DOS SANTOS

**SISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO DE DADOS EM UMA ESTUFA
DIDÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em 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. Gerônimo Barbosa Alexandre.

Cajazeiras-PB
2024

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

S586s Silva Neto, Antônio Monteiro da.
Sistemas de controle e supervisão de dados em uma estufa didática /
Antônio Monteiro da Silva Neto, Nathan Adrian dos Santos. – 2024.

21. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de
Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2024.

Orientador(a): Prof. Me. Gerônimo Barbosa Alexandre.

1. Controle automático. 2. Instrumentação e controle. 3. Estufa. 4.
Controle de temperatura. I. Santos, Nathan Adrian dos. II. Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

ANTÔNIO MONTEIRO DA SILVA NETO
NATHAN ADRIAN DOS SANTOS

**SISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO DE DADOS EM UMA ESTUFA
DIDÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em 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 07 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **Gerônimo Barbosa Alexandre**
Data: 20/08/2024 11:35:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gerônimo Barbosa Alexandre – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **EMANOEL RAIMUNDO QUEIROZ CHAVES JUNIOR**
Data: 26/08/2024 11:42:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Emanuel Raimundo Queiroz Chaves Junior – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 **RAPHAELL MACIEL DE SOUSA**
Data: 29/08/2024 10:07:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raphaell Maciel de Sousa – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 2

Documento assinado digitalmente
 **Manoel Alves Cordeiro Neto**
Data: 23/08/2024 08:47:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Manoel Alves Cordeiro Neto – IFPE-*Campus* Garanhuns
Examinador 3

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação

SISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO DE DADOS EM UMA ESTUFA DIDÁTICA

ANTÔNIO MONTEIRO DA SILVA NETO

monteiro.antonio@academico.ifpb.edu.br

NATHAN ADRIAN DOS SANTOS

nathan.adrian@academico.ifpb.edu.br

GERONIMO BARBOSA ALEXANDRE

geronimo.alexandre@ifpb.edu.br

RESUMO

O objetivo do trabalho é a montagem de um processo de aquecimento e a avaliação do desempenho dinâmico em malha fechada dos controladores PID tradicional e liga-desliga, quando aplicados na gestão da temperatura no interior da estufa. O *hardware* do protótipo didático é dividido em três partes: os atuadores que são a lâmpada e o *cooler*, os sensores de temperatura modelo DS18B20 e a placa Arduino UNO R3. Já a parte de *software* é composta pela aplicação SCADA local e a tela do Excel gerado pelo PLX-DAQ. A metodologia usada foi: (a) revisão da literatura, (b) projeto e montagem do protótipo, (c) projeto dos controladores, (d) desenvolvimento e avaliação da supervisão e (e) testes experimentais do controle e da supervisão integrados. Os dados medidos são enviados para o computador onde são gerados em tempo real os gráficos das variáveis de decisão. O controle liga-desliga de temperatura experimental, apresentou boa precisão e operacionalidade na gestão térmica. O diferencial do trabalho está no baixo custo quando comparado a bancadas didáticas comerciais, na supervisão local dos dados e na replicabilidade do protótipo por outras instituições de ensino.

Palavras-Chave: protótipo; temperatura; instrumentação; controle; supervisão.

ABSTRACT

The objective of the work is to set up a heating process and evaluate the dynamic performance in a closed loop of traditional PID and on-off controllers when applied to temperature management inside a greenhouse. The hardware of the didactic prototype is divided into three parts: the actuators, which are the lamp and the cooler; the DS18B20 temperature sensors; and the Arduino UNO R3 board. The software part consists of the local SCADA application and the Excel screen generated by PLX-DAQ. The methodology used was: (a) literature review, (b) prototype design and assembly, (c) controller design, (d) development and evaluation of supervision, and (e) experimental testing of integrated control and supervision. The measured data are sent to the computer where real-time decision variable graphs are generated. The experimental on-off temperature control showed good precision and operability in thermal management. The differential of the work lies in its low cost compared to commercial didactic benches, local data supervision, and the replicability of the prototype by other educational institutions.

Keywords: prototype; temperature; instrumentation; control; supervision.

1 INTRODUÇÃO

Em diversos processos industriais, como caldeiras, fornos elétricos e estufas, o controle preciso da temperatura é fundamental para condições operacionais específicas. Esses sistemas de controle térmico desempenham um papel fundamental em diversos setores da indústria. Na agricultura, por

exemplo, as estufas têm aplicações vitais, proporcionando aos agricultores uma proteção essencial contra variações climáticas (Fernandes, 2023). No contexto da automação e controle, o avanço contínuo exige a busca incessante por soluções inovadoras e eficientes. A abordagem proposta concentra-se no desenvolvimento de estufas que representam ambientes controlados, nos quais a temperatura do ar é artificialmente controlada, oferecendo um contributo significativo para a eficácia e a estabilidade operacional.

Seguindo a perspectiva de Fernandes (2016), o desenvolvimento de um sistema para o controle de temperatura requer a aplicação de uma variedade de ferramentas computacionais, técnicas e uma fundamentação teórica robusta. O uso de ferramentas computacionais possibilita a simulação e o monitoramento do processo em um ambiente virtual, permitindo o ajuste dos parâmetros do controlador sem a necessidade de recorrer ao processo real. Após a fase de projeto, o controlador é então implementado e validado no contexto do processo real.

De acordo com a abordagem de Ogata (2010), um controlador automático estabelece uma comparação entre a saída da planta e a entrada de referência, buscando reduzir o desvio para zero ou um valor mínimo através da ação de controle. Esse processo inclui a detecção do sinal de erro, sua amplificação e a alimentação de um atuador para intervir no processo. Os sensores, situados no elo de retroação do sistema de malha fechada, converte a variável de saída em uma forma adequada para a comparação com o sinal de referência. Conforme orientações de Ogata (2010), o ponto de ajuste do compensador deve ser convertido em um sinal de referência, mantendo as mesmas unidades que o sinal proveniente do sensor.

Neste contexto o objetivo do trabalho é apresentar a montagem de uma estufa didática, o sistema de controle, a instrumentação e as *interfaces* de comando/supervisão local do processo em escala laboratorial.

O trabalho desenvolvido utiliza uma plataforma de prototipagem eletrônica *open source* baseada no microcontrolador ATMEL ATmega328P de 8 bits de arquitetura *RISC* avançada e no *software* de supervisão Eclipse SCADA na versão demonstrativa. De modo que seja possível ligar, desligar, mudar parâmetros, monitorar as variáveis de controle e gerar relatórios de forma rápida e segura da planta didática.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

a. Controle Liga-desliga

O controle liga-desliga (do inglês, *on-off*), também classificado por controle de duas posições, pois o método, na maior parte dos casos, apresenta apenas duas posições fixas para o sinal de resposta que são nível máximo (primeira posição - *on*) ou nível mínimo (segunda posição - *off*), dentro da faixa de operação. Como forma de exemplificar tal característica pode-se imaginar o controle de nível de um tanque controlada por um relé com duas posições, se o relé estiver normalmente aberto, permitindo a passagem de corrente para a bomba, a vazão da bomba irá operar em sua capacidade máxima; já caso o relé esteja normalmente fechado, não permitindo a passagem de corrente, a vazão será zero, Ogata (2010).

b. Controle PID

Um controlador PID é um controlador que se utiliza da união de três termos principais para obter uma resposta desejada para a resposta do sistema. O mais comum é que estes termos sejam conectados linearmente para que a resposta do sistema atenda às especificações no melhor tempo possível. Os três termos bem como suas funções são os seguintes: Proporcional (P), este interage diretamente com o erro e proporciona uma ação de controle que é proporcional a magnitude do erro; Integrativo (I), que tem o objetivo de eliminar o erro em regime permanente (o erro que se acumula ao longo do tempo); e Derivativo (D), este antecipa as mudanças futuras de erro diminuindo assim o regime transitório e evitando oscilações e taxas de *overshoot* acima do esperado (Ogata, 2010). Considerando o erro, $e(t)$, como a entrada do controlador PID, então a saída do controlador, $u(t)$, define-se de acordo com a Equação 1.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

No domínio da frequência, a função de transferência do controlador é dada pela Equação 2.

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

Onde K_p , $K_i = K_p/T_i$ e $K_d = K_p/T_d$ são os ganhos do controlador. Logo, o projeto consiste em determinar os valores dos ganhos da lei de controle.

c. O Microcontrolador ATmega328P

O Arduíno, com o controlador ATmega328P, apesar de ser conhecido como um microcontrolador, pode ser definido como um pequeno computador em que o usuário tem total liberdade para programar as entradas e saídas que estão conectadas a dispositivos externos, a fim de obter a resposta desejada. De modo geral o Arduíno é uma plataforma embarcada, ou circuito embarcado, que é capaz de controlar o *hardware* para interagir com o ambiente, utilizando para isso um *software* (McRoberts, 2011).

Como forma de interação com o ambiente em que está inserido o Arduino possui uma série de bibliotecas com funções que são utilizadas para o controle de diversos dispositivos conectados a ele, tais como Servomotores, LCD, Células de Carga, Termopares, Sensores de Ultrassom, Sensor PIR, entre outros. Neste trabalho duas das bibliotecas usadas foram “*OneWire.h*” e “*DallasTemperature.h*” para comunicação e aquisição de dados do sensor DS18B20, respectivamente “*SimpleModbusSlave.h*” para viabilizar a comunicação Modbus entre o controlador e o supervisor, e “*math.h*” com o objetivo de realizar algumas operações matemáticas para viabilizar a comunicação entre o supervisor e o *hardware*.

d. O Sensor de Temperatura

Este dispositivo é um sensor do tipo sonda amplamente utilizado em aplicações que exijam valores precisos e um baixo custo. O sensor DS18B20 tem impermeabilização à prova d’água e opera em uma faixa de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, com um erro de $0,5^{\circ}\text{C}$ em uma faixa de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$ e opera com uma precisão de $0,0625^{\circ}\text{C}$; possui uma escala de tensão de $+10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ (Koestoer *et al.*, 2019). Seguindo as recomendações do fabricante foi usado um resistor de $4\text{K}7\Omega$ entre o cabo de alimentação $3,3 \text{ V}$ (cabo vermelho) e o cabo de transmissão de dados (cabo amarelo). Foram usados dois sensores com intuito de avaliar a distribuição de temperatura no interior da estufa.

e. O Sistema de Supervisão

Para análise de dados de sistemas físicos, muitas vezes se torna inviável a aferição local dos dados, com esta perspectiva foram criados os sistemas supervisórios com o objetivo de monitorar remotamente o processo que deseja. Para este trabalho foi escolhido um *software* do tipo SCADA, do inglês, *Supervisory Control and Data Aquisition*, segundo Moraes e Castrucci (2007), este tipo de *software* foi desenvolvido para o monitoramento de elevadas quantidades de variáveis analógicas e digitais.

A implementação de softwares do tipo SCADA vem sendo largamente utilizada, tanto na área civil quando em aplicações industriais, visando a integridade física das pessoas, equipamentos e condições de produção, o monitoramento permite que o operador possa identificar de forma mais rápida e eficiente o aparecimento de falhas envolvidas no processo físico (Moraes; Castrucci, 2007). Em alguns sistemas supervisórios, há a possibilidade de alterar os sinais enviados aos sistemas físicos, tornando mais fácil a operação dos sistemas em tarefas menos complexas, podendo realizá-las sem parar a planta e atrasar a produção. Neste trabalho foi usado o *software* Eclipse SCADA DEMO como plataforma para desenvolvimento da aplicação de gestão da operação do protótipo didático.

f. A Rede Industrial

Publicado pela *Modicon Company* em 1979 o protocolo Modbus foi criado para ser utilizado como interface de comunicação entre diferentes dispositivos e vem sendo bastante usado como

protocolo de comunicação industrial graças à operação e manutenção. Em relação ao seu funcionamento o protocolo funciona como sendo do tipo Mestre-Escravo e pode atualmente tem suas versões RTU (*Remote Terminal Unit*), ASCII e Ethernet TCP/IP, funciona da seguinte forma: o mestre envia uma solicitação para o escravo que tem o papel de processar a solicitação e responder a solicitação do mestre, com o que foi solicitado ou uma mensagem de erro; a solicitação é feita funciona através de quatro dados com as seguintes informações *Slave ID*, *Function code*, *Data* e *Error Code* (Anjos, 2022).

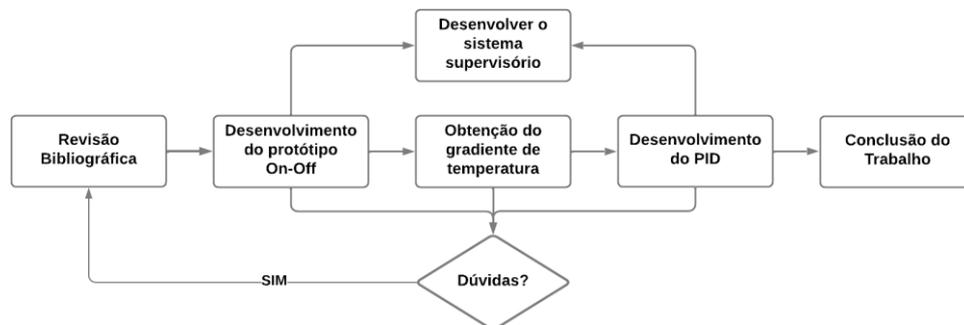
Dos tipos de protocolos Modbus expostos, o selecionado para a comunicação entre o *hardware* e o supervisor neste trabalho foi o Modbus RTU conectado via cabo USB serial do Arduino, com 253 *bytes* de tamanho máximo de bloco de dados. O RTU é um protocolo implementado para estabelecer a comunicação Mestre-Escravo entre dispositivos inteligentes e desde a sua criação é um dos protocolos Modbus mais utilizados atualmente em CLP's (Lião; Coutinho, 2021).

3 MÉTODO DA PESQUISA

A pesquisa realizada é do tipo pesquisa de campo com natureza exploratória e descritiva com abordagem qualitativa. A pesquisa exploratória de acordo com Vergara (2014), propicia um entendimento melhor da problemática da pesquisa, melhorando a compreensão acerca do fenômeno. As abordagens do problema nas pesquisas científicas são caracterizadas por dois tipos: a pesquisa quantitativa e pesquisa qualitativa.

Os passos metodológicos implementados para consecução dos objetivos estão dispostos na Figura 1. Inicialmente foi feita a revisão bibliográfica nas seguintes plataformas acadêmicas: *IEEE Explorer Digital Library*, *ScienceDirect*, *Researchgate*, Periódico Capes e Google Acadêmico, dessa pesquisa foram escolhidos alguns artigos que serviram de base do projeto: Alexandre (2022), Pinheiro (2023), Hotz (2014) e Albuquerque Neto *et al.*, (2019). Desta forma o trabalho trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa com apresentação de um produto.

Figura 1 – Processo metodológico da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2024).

Após a revisão do estado da arte, foi elaborado os desenhos 2D e 3D do protótipo, bem como a lista de material com o respectivo orçamento. Na sequência foi confeccionada a bancada de aquecimento, instalação da instrumentação e desenvolvimento dos sistemas supervisorios.

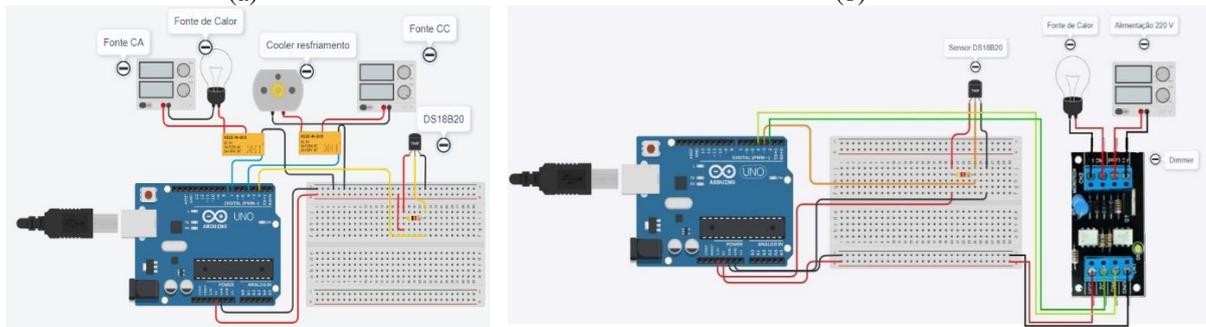
Para o controle Liga-Desliga o processo de aquecimento pode ser dividido em três partes: os atuadores, os sensores e o microcontrolador. Os atuadores consistem na lâmpada incandescente e no *cooler*, os dois sensores de temperatura modelo DS18B20 a prova d'água (blindado), onde é feita a média das medições, o módulo relé, onde o canal 1 é usado para comandar a lâmpada CA (0-220 V) e o canal 2 é usado para comandar o *cooler* CC (0-12 V), por fim o controlador liga-desliga que foi implementado em linhas de código no IDE Arduino, usando a programação em linguagem C. Para o monitoramento das variáveis de processo foi desenvolvido uma aplicação SCADA no *software* Elipse SCADA onde o usuário escolhe os limites operacionais de temperatura da estufa (superior e inferior).

Para o controle PID os componentes usados serão os mesmos, exceto o módulo relé e o *cooler*. O processo de controle de temperatura se dá de forma contínua, o dimmer recebe a tensão alternada da rede urbana (220 V) e fornece tensão a fonte de calor da seguinte forma: para o caso do *setpoint* (Valor de referência) ser de 35°C e o valor no interior da estufa seja de 30°C por exemplo, inicialmente o

dimmer irá fornecer o valor máximo de tensão para a fonte de calor; à medida que a temperatura se aproxima da referência a tensão fornecida irá diminuindo proporcionalmente até o valor ZERO quando a temperatura atinge o valor desejado; quando o sistema volta a resfriar o dimmer segue controlando a tensão de alimentação para manter a temperatura sempre o mais próximo possível do valor do *setpoint*.

Na Figura 2(a) é ilustrado o diagrama elétrico (ligações) da planta de controle de temperatura feito no *Tinkercad*, já na Figura 2(b) é ilustrado as ligações físicas dos sensores e atuadores ao microcontrolador.

Figura 2 – (a) Diagrama de ligação do *on-off* no *Tinkercad*. (b) Diagrama de ligação do PID no *Tinkercad*.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os materiais utilizados para confecção do protótipo experimental estão dispostos na Tabela 1. O custo total do protótipo foi baixo (R\$ 442,70) quando comparado a uma bancada didática comercial similar (R\$ 10.000,00).

Tabela 1 – Materiais utilizados no protótipo e orçamento.

Material	Unidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Arduino Uno ATmega328P + USB	01	75,00	75,00
Cabos Jumper	15	0,40	6,00
Papel alumínio	01	5,00	5,00
Módulo Relé com 2 canais 5/250 V _{CA}	01	15,00	15,00
Lâmpada incandescente 40 W	01	10,00	10,00
Cabos 1,5 mm ²	3,0m	5,00	15,00
Bocal Plafon	01	5,00	5,00
Ventilador <i>Cooler</i> (80 x 80 x 25) mm 12 V	01	35,00	35,00
Sensor de temperatura DS18B20	02	12,50	25,00
Protoboard 830 furos	01	15,00	15,00
Módulo dimmer DM02A	01	65,90	65,90
Dobradiças	02	11,90	23,80
Parafusos	04	2,00	8,00
Plug Macho 2 pinos	01	2,00	2,00
Caixa Térmica de EPS	01	11,00	11,00
Fonte CC 12 V	01	10,00	10,00
Caixa para Fixação	01	100,00	100,00
Spray Aerossol Preto Fosco de 350 ml/250 g	01	16,00	16,00

Total: R\$ 442,70

Fonte: Autoria própria (2024).

4 RESULTADOS DA PESQUISA

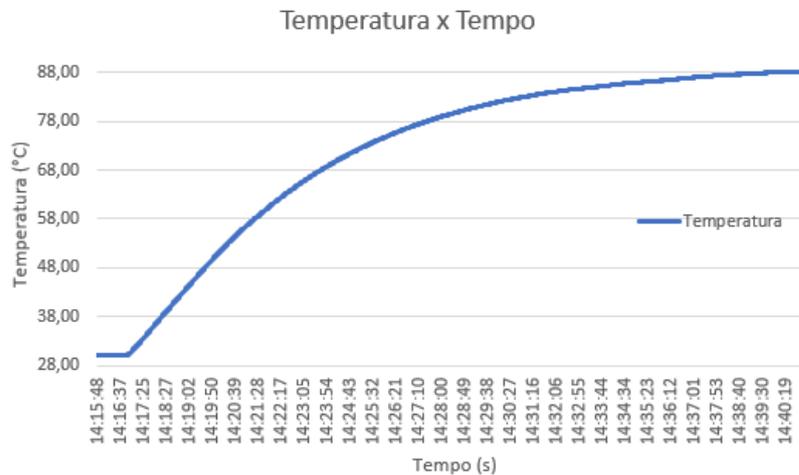
Nesta seção serão apresentados os resultados de simulação e experimentais das estratégias de controle implementadas para gerenciar a malha de temperatura no interior da estufa.

a. Modelagem do Processo

Com o intuito de levantar o modelo em função de transferência do processo térmico, foi feito o experimento em malha aberta para obtenção da curva de aquecimento no interior do protótipo. Inicialmente os sensores coletam a temperatura ambiente (sem a ação do exaustor e da fonte de calor), um minuto em seguida é ligado a fonte de calor e o sistema começa a aquecer sem nenhuma ação externa ou interna até atingir a estabilização que ocorreu em 88,2°C, levando um tempo de vinte e três minutos. Após a estabilização, o sistema continuou ligado por mais um minuto para garantir que o regime permanente tenha sido atingido.

Por meio da integração Arduino e o *software* PLX-DAQ da empresa Parallax, os dados de temperatura (média das leituras dos dois sensores) são plotados em tempo real na planilha MS Excel. A curva experimental da temperatura média é ilustrada na Figura 3.

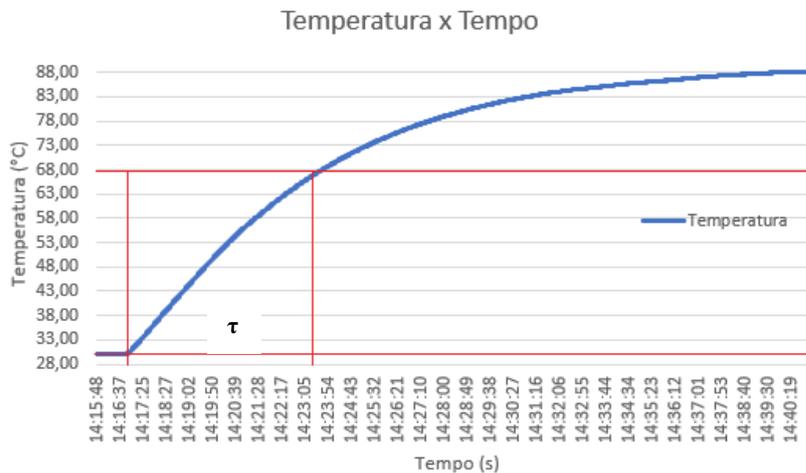
Figura 3 – Curva da temperatura no interior da câmara térmica.



Fonte: Autoria própria (2024).

Tomando como referência os dados da curva S da Figura 3, foi possível encontrar a função de transferência do processo térmico. No momento inicial do processo, a temperatura ambiente no interior da estufa era de 30°C, ao iniciar o experimento às 14 h:16 min:50 s e o momento em que a temperatura estabilizou em 88,2°C foi em 14 h:39 min:50 s, conforme marcações ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Curva S com a marcação temporal para 63% da temperatura final.



Fonte: Autoria própria (2024).

De posse destes dados, o próximo passo foi calcular o valor das constantes L , τ e K , onde L é o equivalente a um atraso real do sistema, τ a diferença de tempo entre o tempo para alcançar 63% da variação e o tempo inicial e K o valor do ganho estático do sistema, (Figura 4) para obter os valores necessários para ter um sistema de primeira ordem com atraso, descrito na Equação 3.

$$P(s) = \frac{\Delta T(s)}{D(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (3)$$

A primeira constante a ser calculada no sistema é K , que nada mais é que a diferença entre a temperatura em regime permanente (T_{ss}) e a temperatura inicial (T_0), assim tem-se que K é igual a $58,2^\circ\text{C}$.

O passo seguinte é determinar a temperatura correspondente a 63% da temperatura em regime permanente, dado pela Equação 4.

$$T_{63\%} = [0,63 * (T_{ss} - T_0)]^\circ\text{C} + T_0^\circ\text{C} \rightarrow T_{63\%} = [0,63 * (88,2 - 30)]^\circ\text{C} + 30^\circ\text{C} \quad (4)$$

Usando a Equação 4, pode-se encontrar o valor de $T_{63\%}$ como sendo igual a $66,67^\circ\text{C}$. De posse deste valor, e com auxílio do gráfico da Figura 5, o passo seguinte é determinar o valor do tempo, em segundos em que a média de temperatura da estufa atingiu de $66,67^\circ\text{C}$. Na Figura 5 é necessário traçar duas retas no gráfico, uma delas partindo do ponto em que a temperatura é de $66,67^\circ\text{C}$, e a outra no início que a fonte de calor foi ligada. A variação temporal do inicial do aquecimento até 63% do tempo final (estabilização do processo), é o valor da constante τ .

A partir dos valores de intersecção das retas com os eixos, pode-se encontrar o valor de τ como sendo aproximadamente 390 segundos, tendo em vista que a linha traçada toca no gráfico no eixo X quando o tempo registrado é de aproximadamente 14 h:23 min:20 s. Assim, substituindo os valores de τ e K na Equação 3, tem-se o modelo em função de transferência do processo térmico, descrito na Equação 5.

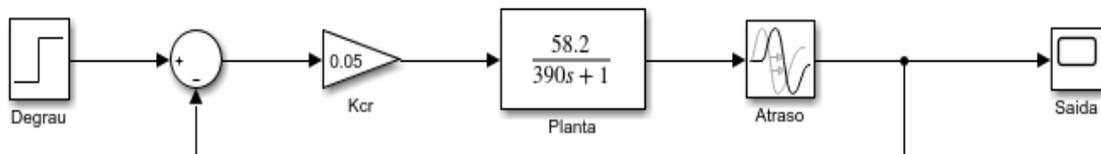
$$P(s) = \frac{58,2 e^{-290s}}{390s + 1} ^\circ\text{C} \quad (5)$$

A partir de Equação 3, percebe-se que o modelo da planta apresenta um atraso L de 290 segundos, uma constante de tempo de 390 segundos e ganho estático de 58,2.

b. Resultados de Simulação e Sintonia do controlador PID

Com o modelo da planta satisfatoriamente concluída, a sintonia do controle PID pode ser realizada. Utilizou-se, neste projeto, o segundo método de sintonia de Ziegler & Nichols (método do ganho crítico). Este método é baseado na resposta em malha fechada do sistema de controle mostrado na Figura 5, considerando, inicialmente, somente a ação proporcional K_p para levar o sistema à condição de oscilação sustentada.

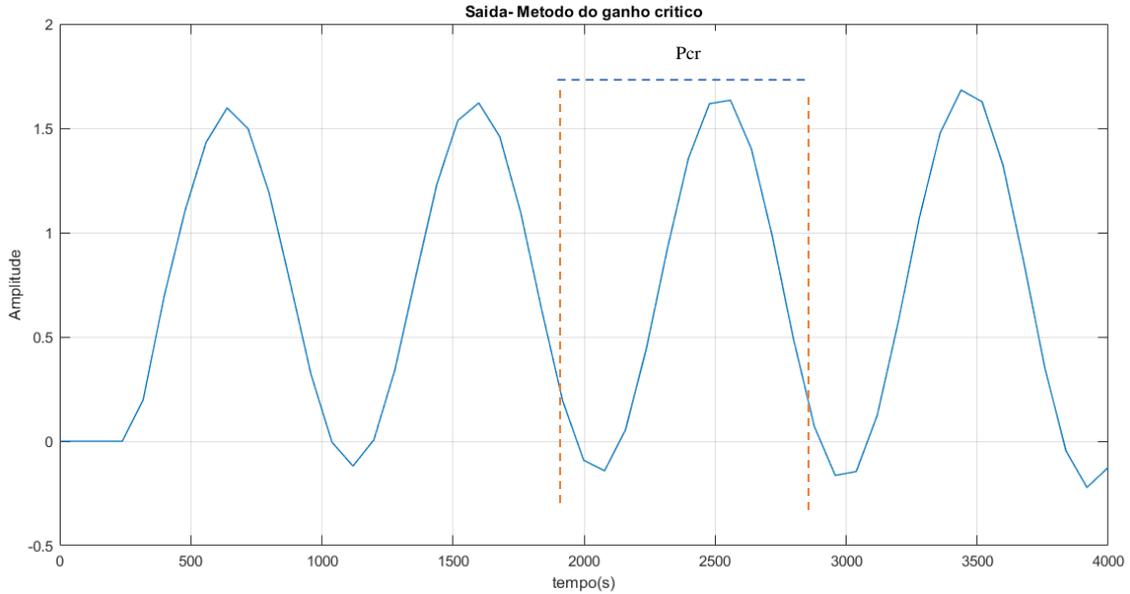
Figura 5 – Sistema em malha fechada com controlador proporcional.



Fonte: Autoria própria (2024).

Inicialmente, assume-se $T_i = 1$ e $T_d = 0$. Utilizando apenas a ação proporcional, aumenta-se o K_p de 0 a K_{cr} , no qual a saída atingiu uma oscilação sustentada, ou seja, o sistema equivalente torne-se marginalmente estável. Em seguida determina-se a frequência de oscilação e o período de oscilação conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Oscilação sustentada com período crítico.



Fonte: Autoria própria (2024).

Da Figura 6 tem-se o ganho crítico de 0,05 e do gráfico da Figura 7, tem-se que o período crítico é de 941s ($P_{cr} = 3000 - 2059s$). Uma vez determinados os valores de P_{cr} e K_{cr} , pode-se utilizar a Tabela 2 para sintonizar o PID. Este método considera um máximo sobressalto (*overshoot*) de 25%.

Tabela 2 - Tabela de sintonia pelo método do ganho crítico.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Autoria própria (2024).

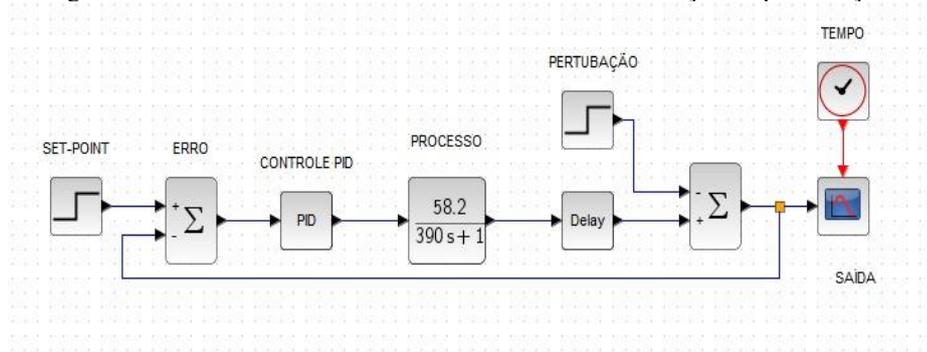
Após os cálculos, foram encontrados os seguintes valores: $K_p = 0,012$; $K_i = 2,6 * 10^{-6}$ e $K_d = 0,02$. Tomando a função de transferência do controlador PID na Equação 2, tem-se a Equação 6.

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_p s = 0,03 + \frac{3,3 * 10^{-5}}{s} + 0,675s \quad (6)$$

Na Figura 7 é ilustrado o diagrama de blocos em malha fechada para o controlador PID projetado implementada no *software* Scilab, considerando um *setpoint* de 88,2°C e uma perturbação do tipo degrau no processo de -10°C (abertura da estufa), inserida após 3.000 segundos de operação, com um tempo de simulação total de 6.000 segundos, a análise algébrica integro-diferencial foi usado o método de Runge-Kutta com passo de integração fixo.

Da Figura 7, o bloco “Delay” é usado para representar o atraso da planta de 290 segundos, a perturbação entra no diagrama como um distúrbio aditivo.

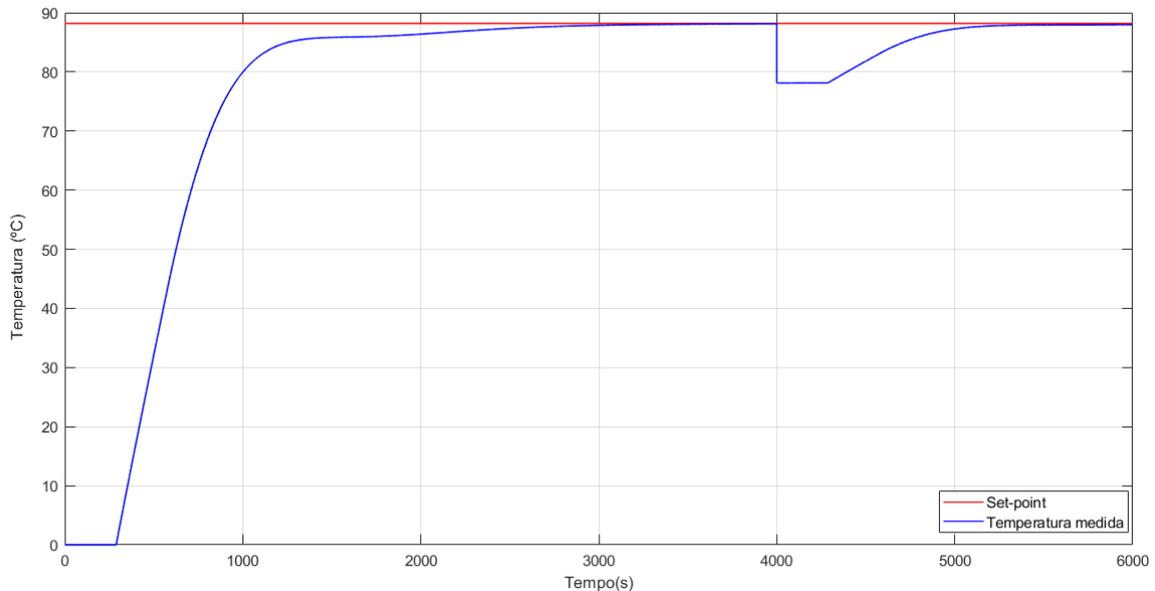
Figura 7 – Sistema de controle em malha fechada com inserção da perturbação.



Fonte: Autoria própria (2024).

Considerando o diagrama de blocos em malha fechada da Figura 8, onde foi inserido uma perturbação do tipo degrau unitário de -10°C aos 4.000 segundos, simbolizando uma abertura da tampa da estufa (distúrbio externo). Os resultados da resposta do controlador PID sintonizado para a planta térmica (Equação 5) pelo método do ganho crítico para este cenário é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Resposta do controlador PID frente a perturbação externa.



Fonte: Autoria própria (2024).

Percebe-se do gráfico da Figura 8 que o controlador consegue acomodar a perturbação, restabelecendo a saída de controle aos valores do *setpoint*. Essa capacidade de resposta do controlador é crucial para garantir a estabilidade e o desempenho do sistema em condições operacionais variáveis.

Na Tabela 3 é ilustrado os parâmetros de desempenho para o controlador PID projetado e validado em simulações. O *setpoint* de temperatura foi de $88,2^{\circ}\text{C}$ e a perturbação de -10°C . Percebe-se que o sistema é estável em malha fechada, com margem de fase de 46 graus e margem de ganho de 0,184 dB abaixo de uma década (3dB), frente a margem de fase de 132 graus e margem de ganho de 0,449 dB em malha aberta.

Tabela 3 - Dados de desempenho e robustez.

Parâmetro	Projetado
Tempo de subida	922 s
<i>Overshoot</i>	0,5%
Malha-fechada	Estável
Margem de fase	46° @ 0.15 rad/s
Ganho Ki	2.6x10 ⁻⁶
Tempo de acomodação	2509 s
Pico	1,07
Margem de ganho	0.184dB @ 0.157rad/s
Ganho Kp	0,012
Ganho Kd	0,02

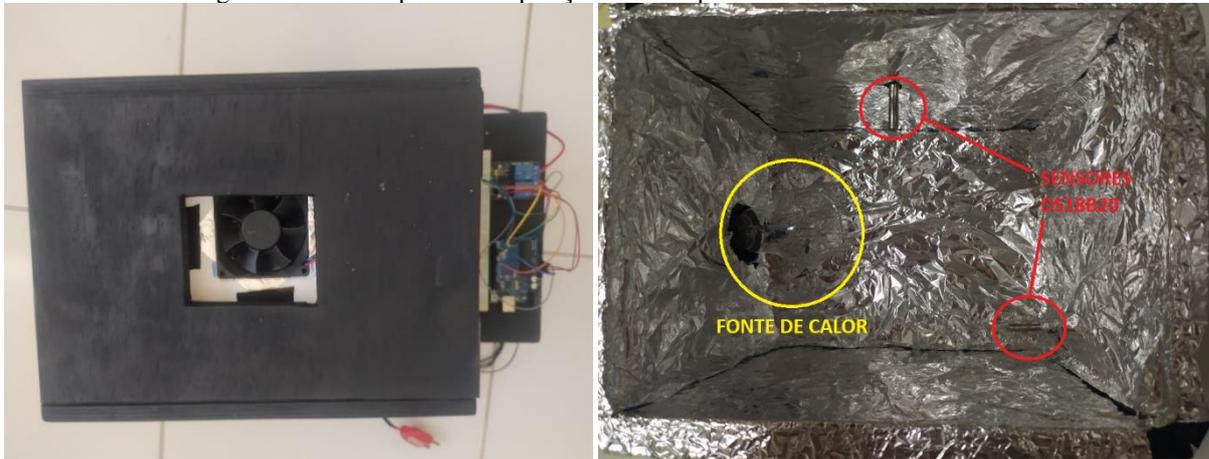
Fonte: Autoria própria (2024).

A estratégia de controle implementada conseguiu rastrear/mapear com eficácia a referência (*setpoint*) frente a saída controlada com bom desempenho dinâmico e estabilidade em malha fechada, em termos das mudanças operacionais de funcionamento da planta, bem como no compromisso da estratégia de controle na redução de tempo e na qualidade do produto.

c. Resultados Experimentais do Controle Liga-Desliga

A Figura 9 ilustra o protótipo didático confeccionado pelos pesquisadores do IFPB-*Campus* Cajazeiras. O protótipo foi montado em uma estrutura de madeira revestida de papel alumínio para simular um ambiente fechado, minimizando as interferências externas e perturbações ao sistema, para um melhor desempenho da malha de controle.

Figura 9 – Vista superior e disposição dos componentes no interior da estufa.



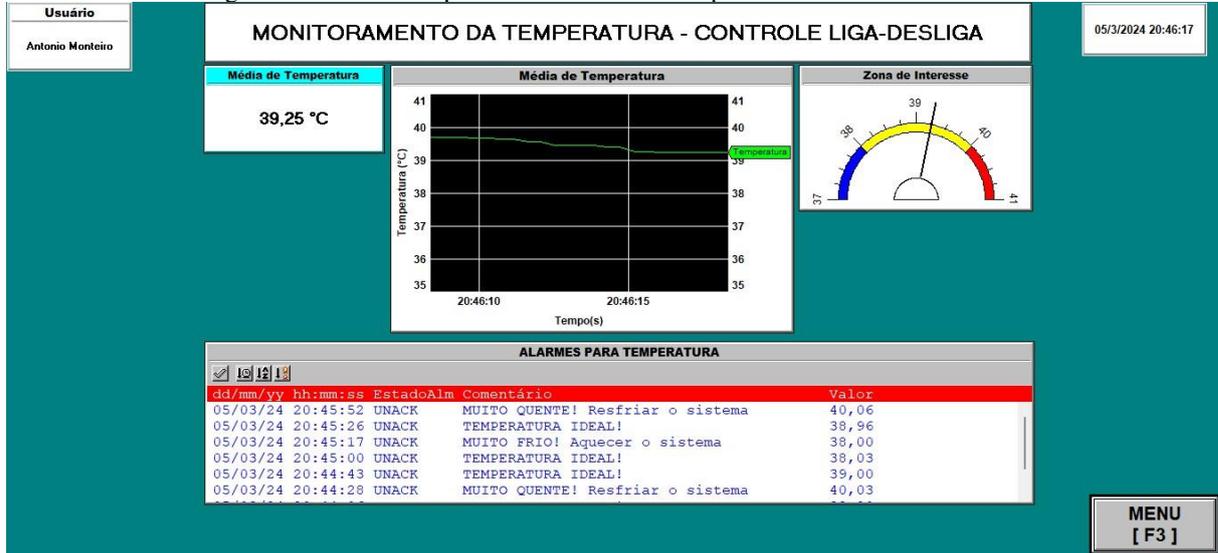
Fonte: Autoria própria (2024).

No interior da estufa foram instalados dois sensores de temperatura, o primeiro posicionado na parte central de uma das laterais adjacentes à lateral da fonte de calor, onde são atingidas as temperaturas mais elevadas, e o segundo foi posicionado na face oposta à fonte de calor, onde se atingem as temperaturas mais baixas. Desta forma, a média entre os dois valores coletados representa de maneira fidedigna, os valores médios de temperatura no interior da estufa.

Após a montagem física da planta foi validada a ação de controle liga-desliga para a temperatura no interior da estufa, sendo executada a seguinte lógica de controle: se a temperatura for menor que 38°C então liga a lâmpada e desliga o *cooler*; se a temperatura for maior que 40°C então liga o *cooler* e desliga a lâmpada. Nesta lógica a lâmpada fluorescente funciona como a fonte de calor e o *cooler* como o atuador de resfriamento do interior da estufa.

A Figura 10 ilustra a aplicação SCADA desenvolvida para monitorar o comportamento da temperatura no interior da estufa ao longo da operação do processo frente a lei de controle liga/desliga. Nesta aplicação o usuário os valores das medições dos dois sensores e o gráfico da média das leituras da temperatura, bem como foi configurado a tela de alarmes, para caso aconteça alguma normalidade no processo, é acionado os alarmes e uma mensagem é informada ao operador do protótipo.

Figura 10 – Tela de supervisão SCADA da temperatura no interior da estufa.



Fonte: Autoria própria (2024).

Vale salientar que toda as ações de comando estão sendo executadas pelo microcontrolador. Este funciona como o cérebro do processo recebendo as medições do sensor, que informa o estado do processo e atua fornecendo energia para o comando da lâmpada (gerenciada pelo módulo dimmer), ou o comando do *cooler*.

Visando dispor de um histórico operacional do processo, por meio de uma planilha, foi feita a integração microcontrolador ATmega328P e o MS Excel, usando o PLX-DAQ da Parallax. Todos os dados mensurados em tempo real (leituras dos sensores) são condicionados na plataforma Arduino e enviados para um banco de dados no MS Excel. O gráfico experimental da temperatura frente a estratégia liga-desliga para quatro ciclos operacionais é ilustrado na Figura 11, cada ciclo operacional é comandado pelo módulo relé ao acionar a lâmpada (aquecedor) ou o *cooler* (exaustor).

Figura 11 – Comportamento da temperatura frente ao controle liga-desliga.



Fonte: Autoria própria (2024).

Observando o gráfico da Figura 11, percebe-se que a temperatura começa nos 32°C acionando

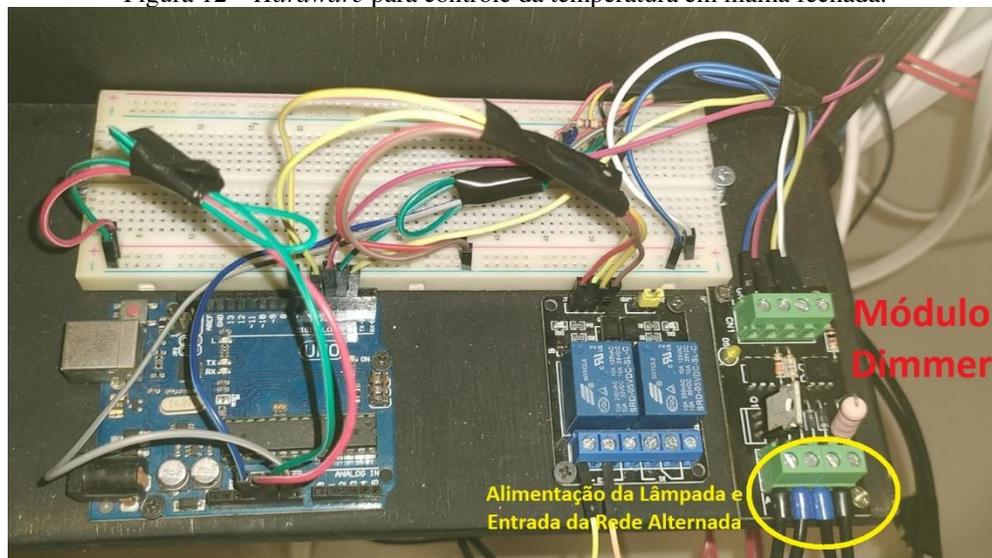
o aquecedor até atingir o range superior de controle (40°C), em seguida a lâmpada é desligada e acionado o *cooler*, para resfriar o ambiente, atingido o limite inferior (38°C), o *cooler* é desligado e a lâmpada ligada, reiniciando o ciclo. Estes ciclos operacionais demonstram a eficácia do controle liga-desliga projetado. O processo levou 4 minutos para sair de 32°C para 40°C e 2 minutos para cada ciclo de aquecimento-resfriamento, totalizando quatro ciclos, num total de tempo de 12 minutos de experimento conforme ilustrado na Figura 11.

Durante os testes experimentais de validação da aplicação SCADA na operação do processo didático foi observado um atraso (latência) no envio/recebimento dos dados de aproximadamente 2 segundos, sendo um tempo insignificante quando comparado com a dinâmica da planta térmica.

d. Resultados Experimentais do Controle PID

Na Figura 12 é ilustrado um circuito em malha fechada para controle da temperatura emanada por uma lâmpada fluorescente; para a construção do controle de temperatura é usado os seguintes componentes: sensor de temperatura DS18B20, uma lâmpada incandescente (220 Vca); módulo Dimmer (PIC MC-8A) e a placa UNO R3 Arduino.

Figura 12 – *Hardware* para controle da temperatura em malha fechada.



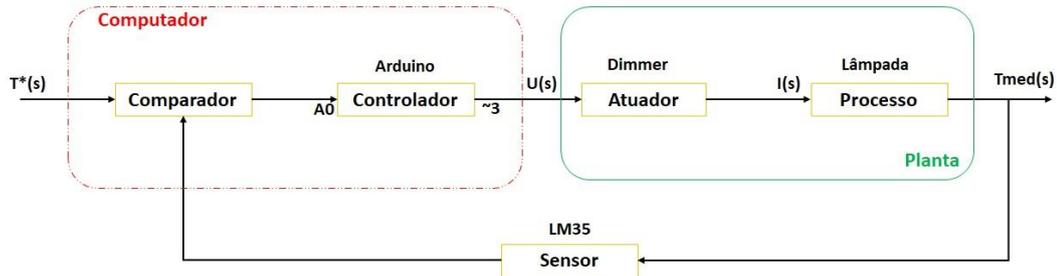
Fonte: Autoria própria (2024).

Todo o sistema de controle funciona da seguinte maneira: o calor gerado pela lâmpada é medido pelo DS18B20, que proporciona um sinal de tensão ao Arduino através da entrada analógica A0. O programa executado no Arduino é responsável por comparar o valor de temperatura medido ao *setpoint* que será estabelecido. A diferença entre os valores é aplicada ao controlador PID que foi implementado no IDE Arduino.

Quando a temperatura medida for menor do que a temperatura de *setpoint*, o sinal de controle (esforço de controle) aumentará sua saída através do sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), assim, proporcionando mais calor através da lâmpada. Quando a temperatura medida for maior do que a estabelecida, o sinal de controle diminuirá, assim, reduzindo a intensidade luminosa da lâmpada.

Para o acionamento do módulo Dimmer pode ser utilizado qualquer porta PWM do Arduino (saídas digitais indicadas por ~), essas portas fornecem um sinal de saída pseudo-analógica, uma vez que dependendo da placa utilizada não estará disponível uma saída analógica real. Na Figura 13 é ilustrado diagrama de blocos da malha fechada com realimentação negativa para o controle PID de temperatura no interior da estufa.

Figura 13 – Diagrama de controle da temperatura em malha fechada.



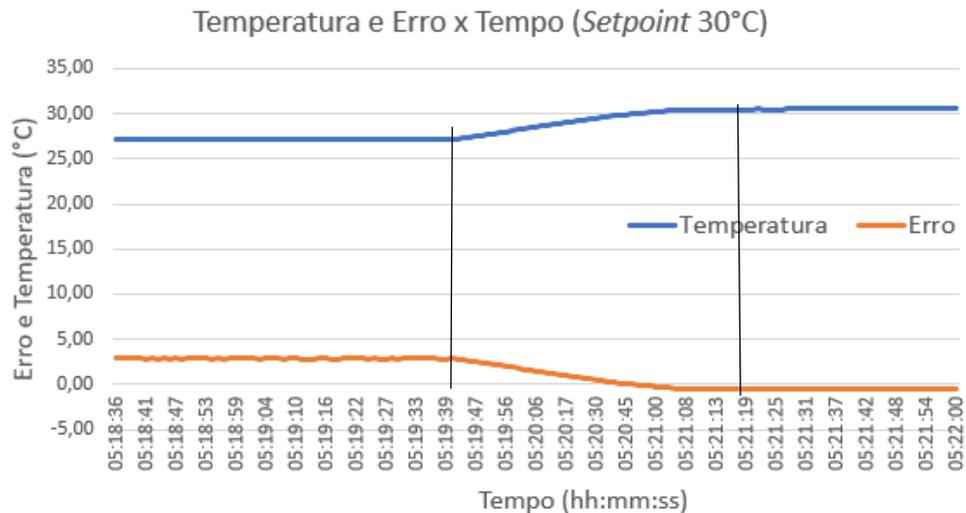
Fonte: Autoria própria (2024).

Visando avaliar o desempenho do controlador PID no ajuste da temperatura, foram definidos três cenários para o valor do *setpoint*:

- Cenário 1 - temperatura inicial de 28°C e *setpoint* de 30°C;
- Cenário 2 - temperatura inicial de 31°C e *setpoint* de 35°C;
- Cenário 3 - temperatura inicial de 28°C e *setpoint* de 40°C.

O valor de referência para temperatura (*setpoint*) é definido manualmente pelo operador. Nas Figuras 14 a 16 são ilustradas a resposta da ação de controle na gestão da temperatura no interior da câmara térmica.

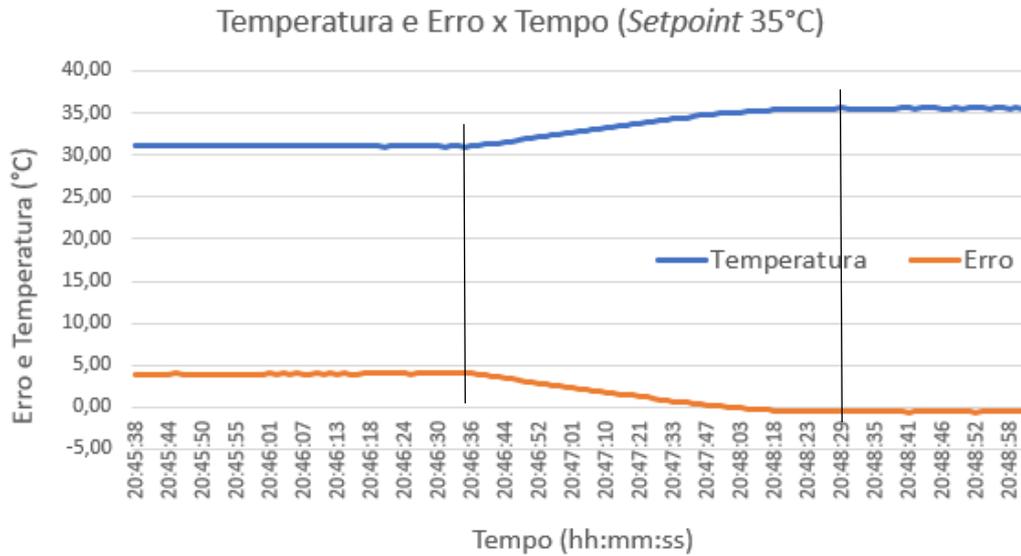
Figura 14 – Resposta do controlador PID para um *setpoint* de 30°C.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os testes experimentais referentes aos cenários 1 e 3 foram feitos no final da tarde, já o cenário 2 foi executado no período da noite. Do gráfico da Figura 14, percebe-se que o controlador consegue mapear a saída frente ao *setpoint*, com uma resposta estável e rápida com tempo de acomodação de 2min40s (05:21:19-05:19:39). Vale salientar que a câmara já estava aquecida e a variação de temperatura foi pequena ($\Delta T=30-28=2^{\circ}\text{C}$). Devido a ação do ganho integral o erro converge para zero.

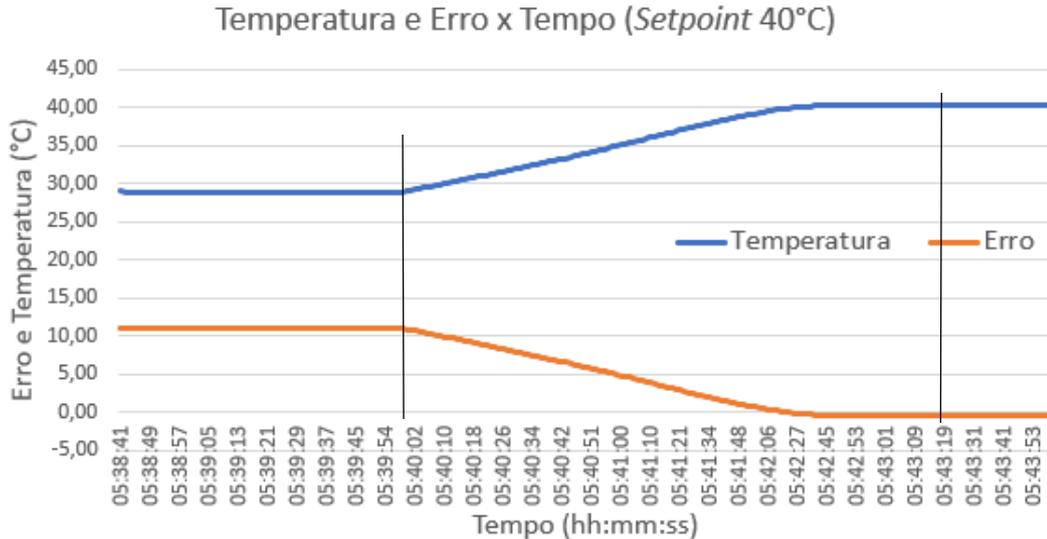
Figura 15 – Resposta do controlador PID para um *setpoint* de 35°C.



Fonte: Autoria própria (2024).

Observando o gráfico da Figura 15, percebe-se que o controlador consegue rastrear a temperatura no interior da estufa frente ao *setpoint*, com uma resposta estável e rápida com tempo de acomodação de 2min48s (20:48:29-20:46:36). Neste cenário a variação de temperatura foi de 4°C ($\Delta T=35-31=4^\circ\text{C}$), contudo a câmara já havia saído da temperatura ambiente (28°C) e aquecido até 31°C, em seguida levada a 35°C.

Figura 16 – Resposta do controlador PID para um *setpoint* de 40°C.



Fonte: Autoria própria (2024).

Observando os gráficos da Figura 16, percebe-se que a ação de controle consegue levar a temperatura da estufa ao valor estabelecido pelo operador, saindo de 28°C e aquecendo até 40°C, apresentando ação estável e com tempo de estabelecimento de 3min 43s (05:43:19-05:40:02) para uma variação de temperatura de 12°C. Na Tabela 4 é apresentado o desempenho do controle PID para os três cenários experimentados.

Tabela 4 – Desempenho experimental do controle PID para os cenários estudados.

Ganhos do Controlador	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
$K_p = 0.012$ $K_i = 0.0000026$ $K_d = 0.02$	Tempo acomodação = 2min40s $\Delta T = 2\text{ }^\circ\text{C}$	Tempo acomodação = 2min48s $\Delta T = 4\text{ }^\circ\text{C}$	Tempo acomodação = 3min43s $\Delta T = 12\text{ }^\circ\text{C}$

Fonte: Autoria própria (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bancada didática de aquecimento avaliada possibilitou explorar conceitos de programação (linguagem C e C++) e de sistemas de supervisão SCADA usados nas indústrias. O protótipo construído e validado apresentou dados confiáveis e precisão nas medições, apesar de serem utilizados sensores de baixo custo; sendo uma ferramenta didática de apoio ao ensino-aprendizagem no ensino da Graduação em Engenharia de Controle e Automação. O diferencial do produto está na operação e supervisão local dos dados medidos e na disponibilidade das medições para qualquer usuário com acesso ao sistema supervisiório. O sistema apresentou baixo custo quando comparado com os modelos comerciais, apresentando boa precisão e robustez.

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

Como trabalhos futuros sugere-se: (a) construção da supervisão remota dos dados; (b) sintonia e validação de outras estratégias de controle, por exemplo: *neuro-fuzzy controller*, *adaptive PID controller*, *model Predictive control*.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE NETO, F. R.; BELÉM, G. da SILVA; ALBUQUERQUE NETO, D. P. de; ALEXANDRE, G. B.; BALTAR, R. de M. S. M. Bancada didática para controle de nível e temperatura. CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2019. **Anais [...]**. Palmas - TO, 2019.

ALEXANDRE, G. B. Controle liga-desliga e supervisão de dados em uma estufa. CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2022. **Anais [...]**. Goiânia - GO, 2022.

ANJOS, L. B. dos. **Integração de sistemas de automação industrial através do protocolo de comunicação modbus, no contexto da indústria 4.0**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Sistemas da Informação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2022.

Elipse Software, 2024. Disponível em: <https://www.elipse.com.br/downloads/>. Acesso em: 20 março de 2024.

FERNANDES, J. P. **Sistema para controle de temperatura em kit educacional, através de interface LabVIEW para Arduino**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio-PR, 2016.

FERNANDES, J. V. A. de. **Metodologia para determinação de temperatura e umidade em estufa agrícola**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, 2023.

HOTZ, J. S. **Bancada didática para controle de nível e temperatura**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo-PR, 2014.

IDE Arduino, 2024. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/donate/>. Acesso em: 19 mar. 2024.

KOESTOER, R. A.; SALEH, Y. A.; ROIHAN, I.; HARINALDI. A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system. *In: AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2019. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2062/1/020006/793222/A-simple-method-for-calibration-of-temperature>. Acesso em: 08 fev. 2024.

LIÃO, J. V. D. M.; COUTINHO, L. S. **Proposta de rede industrial com Arduino utilizando o protocolo modbus**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia-GO, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/2917>. Acesso em: 07 fev. 2024.

MCROBERTS, M. **Arduino básico**. Novatec Editora, 2011. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4287597/mod_resource/content/2/Ardu%C3%ADno%20B%C3%A1sico%20-%20Michael%20McRoberts.pdf. Acesso em: 10 jan. 2024.

MORAES, C. C. de; CASTRUCCI, P. de L. **Engenharia de automação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. Disponível em: <https://doceru.com/doc/1n181xs>. Acesso em: 10 fev. 2024.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, (2010).

PINHEIRO, J. K. P. **Controle liga-desliga de temperatura e supervisão de dados em uma estufa didática**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial) - Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras-PB, 2023.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 15. ed. Atlas, 2014.

MATERIAL COMPLEMENTAR

(1) Pasta Drive do Trabalho (1 – TCC em formato de Artigo; 2 – Apresentação; 3 – Vídeos do controle *on-off* e do Controle PID; 4- Código do controle *on-off* e 5- Código do controle PID).

Link:

https://drive.google.com/drive/folders/1ohMZLG4n6G0PPVEn23TKh1b_gh3yE5j?usp=drive_link



(2) Simulação do controle liga-desliga no Tinkercad.

Link: <https://www.tinkercad.com/things/lf5K9HcBgcX-on-off>



(3) Códigos em linguagem C dos controles liga-desliga e PID.

Link: <https://github.com/monteirobhub/TCC>



	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	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

TCC versão final

Assunto:	TCC versão final
Assinado por:	Antônio Neto
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Antônio Monteiro da Silva Neto, ALUNO (201912240016) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 29/08/2024 20:41:06.

Este documento foi armazenado no SUAP em 29/08/2024. 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: 1234255
Código de Autenticação: d64201ef60

