



**INSTITUTO
FEDERAL**

Paraíba

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAIBA

CAMPUS CAJAZEIRAS

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

JARDEL KARLOS PEIXOTO PINHEIRO

**CONTROLE LIGA-DESLIGA DE TEMPERATURA E SUPERVISÃO DE DADOS EM
UMA ESTUFA DIDÁTICA**

Cajazeiras - PB

2023

JARDEL KARLOS PEIXOTO PINHEIRO

**CONTROLE LIGA-DESLIGA DE TEMPERATURA E SUPERVISÃO DE DADOS EM
UMA ESTUFA DIDÁTICA**

Trabalho de conclusão de curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba- Campus Cajazeiras, como requisitos para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial.

Orientador: Prof. M. Sc. Gerônimo Barbosa Alexandre.

Cajazeiras - PB

2023

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva

Catálogo na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

P654c Pinheiro, Jardel Karlos Peixoto.
Controle liga-desliga de temperatura e supervisão de dados em uma estufa didática / Jardel Karlos Peixoto Pinheiro. – 2023.

36f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação Industrial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

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

1. Desenvolvimento de sistemas. 2. Estufa didática. 3. Controle automático de temperatura. 4. Sistema de controle industrial. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II.

Título.

IFPB/CZ

CDU: 681.5

CONTROLE LIGA-DESLIGA DE TEMPERATURA E SUPERVISÃO DE DADOS EM UMA ESTUFA DIDÁTICA

Trabalho aprovado em 24 de março de 2023



Documento assinado digitalmente

Geronimo Barbosa Alexandre

Data: 17/04/2023 12:32:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. M. Sc. Gerônimo Barbosa Alexandre – (Orientador)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB-CZ



Documento assinado digitalmente

EMANOEL RAIMUNDO QUEIROZ CHAVES JU

Data: 17/04/2023 18:50:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emanuel Raimundo Chaves Júnior – (Avaliador Interno)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB-CZ



Documento assinado digitalmente

GEMIERSON VALOIS DA MOTA CANDIDO

Data: 17/04/2023 22:28:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gemierison Valois da Mota Candido – (Avaliador Interno)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB-CZ

Cajazeiras-PB

2023

Dedico este trabalho a minha mãe, Francisca Peixoto Pinheiro que foi a responsável da não desistência desse curso por causa de uma promessa que lhe fiz. “Nunca desistirei, vou até o fim”.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me concedido a vida e a oportunidade de estudar, aprender e me formar em uma excelente instituição de ensino.

Ao Instituto Federal da Paraíba, Campus Cajazeiras, e em especial a todos os professores que contribuíram para minha formação profissional.

Também agradeço a todos os colaboradores do IFPB-CZ por todo apoio durante minha longa formação profissional.

De maneira especial também quero agradecer ao meu orientador Gerônimo Barbosa Alexandre, que me auxiliou, instruiu e me fez acreditar que era possível a realização desse sonho.

*“Aceite o que você não pode mudar e
mude o que você não pode aceitar!”
(Lucas Maia Carril)*

RESUMO

O objetivo do trabalho é apresentar a montagem de uma estufa didática, a validação experimental do sistema de supervisão e a avaliação do desempenho do controle liga-desliga na gestão da temperatura, fazendo que a estufa opere na faixa de 26°C a 27°C. O protótipo é dividido em duas partes, o hardware, composto pelo microcontrolador Arduino, pelo sensor de temperatura e pelos atuadores elétricos (lâmpada e cooler); e o software de supervisão local (plotter serial). A metodologia utilizada foi: (a) projeto e montagem do protótipo, (b) desenvolvimento e avaliação da supervisão e (c) testes experimentais do controle e da supervisão integrados. A arquitetura mostrou-se confiável e eficiente na aquisição e na apresentação dos dados mensurados. O controle liga-desliga de temperatura, apresentando boa precisão e operacionalidade. O diferencial do produto confeccionado está no baixo custo, na replicabilidade por outras instituições de ensino e na qualidade das medições das variáveis de processo, sendo uma ferramenta fundamental no processo de ensino-aprendizagem.

Palavras-chave: Protótipo didático. Instrumentação. Controle liga-desliga. Temperatura.

ABSTRACT

The objective of the study is to present the assembly of a didactic prototype thermal, the experimental validation of the supervision system and the evaluation of the performance of the on-off control in the management of the temperature, making the stove operate in the range of 26°C to 27°C. The prototype is divided into two parts, the hardware, consisting of the Arduino microcontroller, the temperature sensor and the electrical actuators (light bulb and cooler); and the supervision software (plotter serial). The methodology used was: (a) prototype design and assembly, (b) supervision development and evaluation and (c) experimental testing of integrated control and supervision. The architecture proved to be reliable and efficient in the acquisition and presentation of the measured data. The temperature control on-off, featuring good accuracy and operability. The differential of this work is in the low cost, in the remote supervision of the data and in the replicability of the prototype by other educational institutions and the measurements of the process variables, being a fundamental tool in the teaching-learning process.

Keywords: Didactic prototype. Instrumentation. On-off control. Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arquitetura de software da bancada didática.	16
Figura 2 - Vista Frontal da estufa didática no SketchUp	16
Figura 3 - Perspectivas isométricas do lado frontal.	17
Figura 4 - Perspectivas isométricas do lado lateral.	17
Figura 5 - Corte na modelagem 3D.	17
Figura 6 – Diagrama elétrico no Tinkercad.....	19
Figura 7 - Fluxograma do Programa.	20
Figura 8 - Medições de temperatura quando aplicado um degrau de tensão.	21
Figura 9 - Diagrama de controle para o sistema em malha fechada.	22
Figura 10 - Sistema em malha fechada com controlador proporcional.	23
Figura 11 - Oscilação sustentada com período crítico.	24
Figura 12 – Estufa didática confeccionada.....	24
Figura 13 - Caixa de térmica usada para montar a estufa.	25
Figura 14 - Interior da estufa.	25
Figura 15 - Ligação do sensor DS18B20 ao Arduino.	26
Figura 16 – Curva da temperatura quando a lâmpada ligada e o cooler desligado. .	26
Figura 17 – Curva da temperatura quando a lâmpada desligada e o cooler ligado. .	27
Figura 18 – Resultado de simulação para o controlador PI de temperatura.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de materiais e orçamento para a estufa didática.....	18
Tabela 2 - Tabela de sintonia pelo método do relé.	24
Tabela 3 - Dados de desempenho e robustez do controlador PI.	28

LISTA DE ABREVIATURAS

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
CZ	Cajazeiras
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
LCD	Liquid Crystal Display
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PI	Controlador Proporcional e Integral
PID	Controlador Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
3D	Três dimensões
2D	Duas dimensões
Mbps	Megabits por segundo
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
GE	General Electric
LED	Light emitter diode
USB	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
4 METODOLOGIA	15
4.1 Construção da Bancada Didática	15
4.2 Modelagem da Planta	21
4.3 Projeto do Controlador PI	22
4.4 Método de Ziegler & Nichols em malha fechada	23
5 RESULTADOS e DISCUSSÕES	24
6 CONCLUSÕES	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
Anexo 1 – Link do Funcionamento do protótipo	32
Anexo 2 – Código da IDE Arduino	33

1 INTRODUÇÃO

O processo de ensino-aprendizagem na engenharia está diretamente relacionado a utilização de vários recursos didáticos. A atividade prática é uma importante ferramenta de ensino no meio acadêmico, especialmente na engenharia visto que pode proporcionar ao aluno um melhor entendimento da teoria e aproximá-lo de instrumentos e processos específicos que estão relacionados à futura atuação profissional (HOTZ, 2014).

Sendo assim, instituições de ensino simulam em laboratórios fenômenos que auxiliam na construção e consolidação do conhecimento teórico aprendido (BORTOLO, 2006). No contexto da automação de processos, a ação de controle e a supervisão dos dados mensurados em campo são ferramentas indispensáveis nas indústrias e podem ser replicáveis em laboratórios, elas são duas partes importantes de qualquer planta industrial e que ambas interagem na operação estável e na otimização do produto (COSTA, 2014; DAGA, 2020).

Dentre os mais variados tipos de controle existentes, podemos destacar o controle liga-desliga (on-off) e o controle PID, sendo os mais utilizados na indústria, devido a simplicidade funcional e ao seu desempenho robusto, respectivamente (OGATA, 2015).

Em relação aos sistemas de comando/supervisão, existe inúmeros softwares tanto comerciais (Eclipse SCADA, CX-Supervisor, Supervisório LAquis, GE iFIX, Wonderware InduSoft Web Studio, Citect SCADA AVEVA, Schneider Vijeo Citect) e livres (ScadaBR, Reliance SCADA e PROCESSING) que irão auxiliar na qualidade, na redução de custos e em um maior desempenho da produção.

Neste cenário sistemas de controle bem projetados podem ajudar a evitar paradas inesperadas, acidentes e diminuir o tempo de startup (tempo necessário para colocar a planta em operação, após uma parada) do processo. Deste modo, desenvolver sistemas de controle automático de falhas, traz ganhos econômicos, sociais e ambientais contribuindo para a chamada operação e manutenção inteligente da planta industrial (OGATA, 2015).

Logo o objetivo do trabalho é projetar e confeccionar uma estufa didática com seu respectivo sistema de controle liga-desliga da temperatura no seu interior, com os dados mensurados sendo plotados em tempo real no serial plotter para o operador.

2 OBJETIVOS

O objetivo do Trabalho é apresentar o protótipo um processo industrial de controle de temperatura projetado, montado e validado de em escala laboratorial, sendo de baixo custo e de fácil replicabilidade por outras instituições de ensino.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Projetar e montar uma estufa didática;
- Projetar e validar a ação de controle de liga-desliga de temperatura no interior da estufa;
- Projetar e validar os sistemas de comando da bancada didática;
- Avaliar todas as partes constituintes da bancada (comissionamento);
- Disponibilizar o projeto da estrutura, da ação do controle e do sistema de comando para que sirva de ferramenta de replicação;
- Disponibilizar (doar) a bancada didática para o IFPB-CZ, para que sirva de ferramenta didática nas aulas práticas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De modo geral um sistema de controle industrial é constituído de múltiplas malhas de controle de processos e de equipamentos (instrumentação) que compõem a planta industrial. No caso do setor de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (P&G&B) há estudos conclusivos demonstrando que o ajuste da sintonia dos controladores associados ao ajuste do ponto de operação da planta resulta em ganhos econômicos consideráveis e melhoria da estabilidade, bem como garantir a redução do consumo de energia e da emissão de substâncias tóxicas (ALEXANDRE, LIMA & NETO, 2011).

Processos de controle de nível e temperatura na indústria é comumente utilizado em caldeiras, plataformas de petróleo e gás ou situações onde se precisa o controle eficiente de uma determinada variável em relação ao tempo (ALEXANDRE & LIMA, 2013).

Controladores PID trabalham bem em processos lineares, onde uma mudança na entrada do processo gera uma mudança proporcional na saída do processo. Se a relação de entrada e saída do processo for levemente não linear, ajustes periódicos dos parâmetros do controlador são necessários. Há diversos métodos de sintonia do PID, como Ziegler- Nichols e Cohen-Coon, dentre outros. Entretanto, no caso de processos altamente não-lineares ou quando são usados na malha de realimentação elementos de controle ou atuadores não lineares, ou quando a modelagem matemática do processo encontra dificuldades devido a conhecimento insuficiente ou complexidade da planta em geral, controladores PID tem um desempenho pobre. Nesses casos, o recurso é usar ou tipo de estratégia de controle ou utilizar operadores humanos especializados (ALEXANDRE & LIMA, 2012).

Os supervisórios SCADA são sistemas que utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar e realizar o monitoramento e o controle de inúmeros processos industriais. Estes sistemas são integrados na maioria dos ambientes industriais complexos ou de grandes escalas, na medida em que podem coletar, com rapidez e eficiência, dados de uma quantidade grande de fontes, para em seguida serem apresentados ao operador de uma forma amigável. Os sistemas SCADA melhoram a eficácia do processo de monitoramento e controle, fornecendo a informação oportuna para tomada de decisões operacionais apropriadas (PINHEIRO, 2006 apud MOSTI, 2017).

Com o aumento da automação nos processos industriais existe a necessidade de gerenciamento das informações geradas pelo processo, é neste contexto que os sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, ou abreviadamente SCADA surgem. Dessa forma, com o advento da Internet of Things (IoT), novas tecnologias e protocolos de comunicação sem fio surgem de forma crescente e impulsionam ainda mais as formas de comunicação e controle. Neste cenário a tecnologia Bluetooth é uma das mais difundidas, por permitir uma conexão sem fio de baixo custo, baixa potência e curta distância (FERREIRA, *et al*, 2005). Com taxa de transferência de dados atualmente na faixa de 1 MBPS, atuando em um raio que varia de 10 m até 100 m, utilizando uma frequência de 2,4 GHz (IEEE 802.15.4, 2006).

Sendo assim, os sistemas de supervisão local e remotos são de grande utilidade, tendo em vista que seu funcionamento consiste no modelo mestre-escravo, onde um dispositivo da malha conectada é considerado o principal e os demais seguem seu padrão de configuração (GALINDO, *et al*, 2019). Dessa forma, os sistemas de supervisão, sejam eles locais ou remotos, caracterizam-se por serem implementados com baixo custo, por fornecerem dados confiáveis e serem de fácil instalação

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como teórico-experimental. Inicialmente, na fase teórica, realizou-se a revisão bibliográfica por meio de livros, artigos e sites acadêmicos e especializados para compreensão do problema e paralelamente foram feitas consultas de protótipos já desenvolvidos (academicamente) e produtos já comercializados, a nível nacional e internacional. Por meio desta pesquisa foi possível avaliar erros e acertos em projetos semelhantes e dessa forma modificar alguns detalhes no trabalho.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento da bancada didática se baseou nas seguintes etapas:

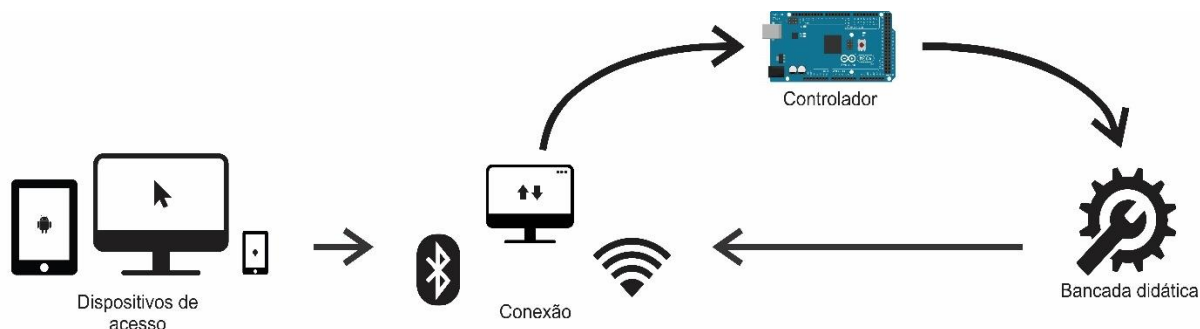
- Revisão bibliográfica em plataformas acadêmica (IEEE Explorer Digital Library, ScienceDirect, Researchgate, Periódico Capes e Google Acadêmico) visando construir um arcabouço teórico fundamental para o desenvolvimento da pesquisa;
- Planejamento da estrutura física através da elaboração de desenhos 2D e 3D do protótipo;
- Planejamento da estrutura de controle com respectiva simulação;
- Elaboração da relação de materiais a serem utilizados, orçamento e aquisição de equipamentos;
- Montagem e instalação dos equipamentos na estrutura física;
- Testes de funcionamento;
- Entrega e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

4.1 Construção da Bancada Didática

Após a revisão bibliográfica e o estudo dos tipos de controle que seriam implementados, foi dado início ao processo de construção da bancada didática de aquecimento, para fins de controle de temperatura no interior da estufa. O Arduino UNO R3, é um microcontrolador de hardware livre baseado em linguagem C++, e é o principal componente da bancada, caracterizando-se como componente mestre, da configuração mestre-escravo. Dessa forma, os sensores e atuadores (componentes

escravos) são conectados ao Arduino UNO e executam as ações pré-definidas no ambiente de programação do mesmo, a partir dos comandos enviados através do sistema supervisor ou do aplicativo mobile e dos dados recebidos dos sensores, como ilustra a Figura 1.

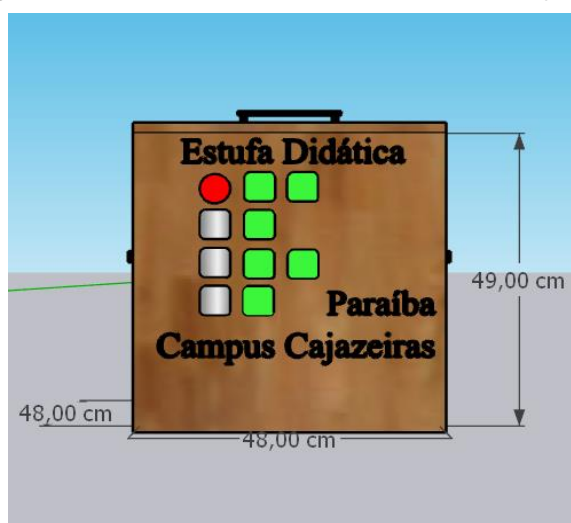
Figura 1 - Arquitetura de software da bancada didática.



Previamente, após instalação dos softwares necessários, foram feitas as conexões dos sensores e atuadores a serem utilizados na bancada didática e foram realizados testes com componentes físicos, como os *push buttons*, para acionamento dos atuadores, escolha dos melhores componentes para tal aplicação, e a validação do código estruturado no ambiente de programação. Vale ressaltar que o Arduino UNO R3, se comportou de forma satisfatória se mostrando um controlador eficiente no processamento de dados e para desenvolvimento do projeto.

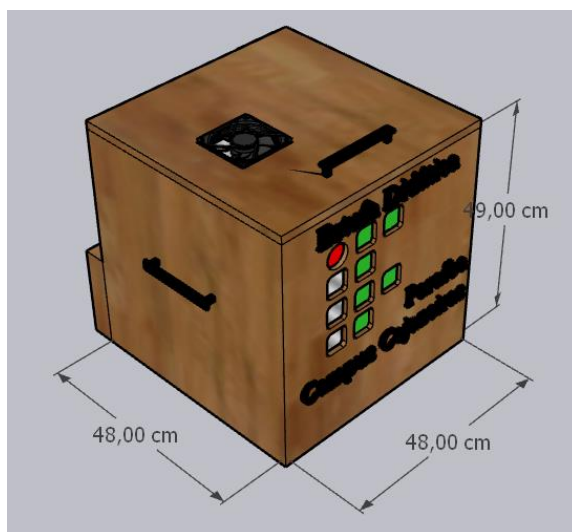
Com o auxílio do software SketchUp foram feitos os desenhos 2D e 3D da estufa didática. Na Figura 2 é ilustrado o desenho 3D frontal, nas Figuras 3 e 4 representam as perspectivas isométricas e na Figura 5 corte no desenho 3D.

Figura 2 - Vista Frontal da estufa didática no SketchUp



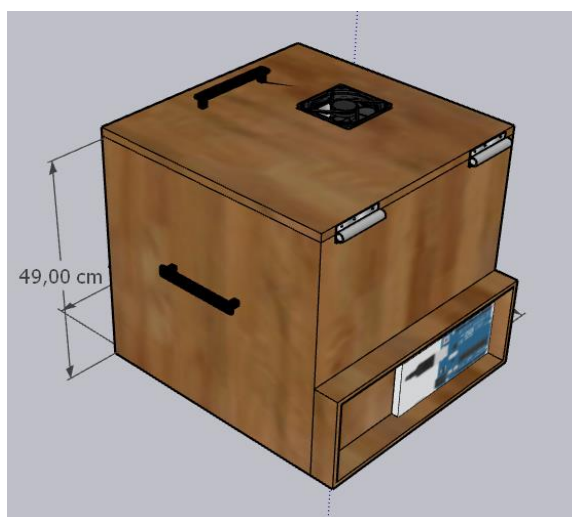
Fonte: Autor, 2023.

Figura 3 - Perspectivas isométricas do lado frontal.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 4 - Perspectivas isométricas do lado lateral.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 5 - Corte na modelagem 3D.



Fonte: Autor, 2023.

Os materiais utilizados para confecção do protótipo experimental estão dispostos na Tabela 1. O custo total do protótipo foi baixo (R\$ 433,00) quando comparado a uma bancada didática comercial similar (bancada da Exsto custa R\$ 10.000,00).

Tabela 1 - Relação de materiais e orçamento para a estufa didática.

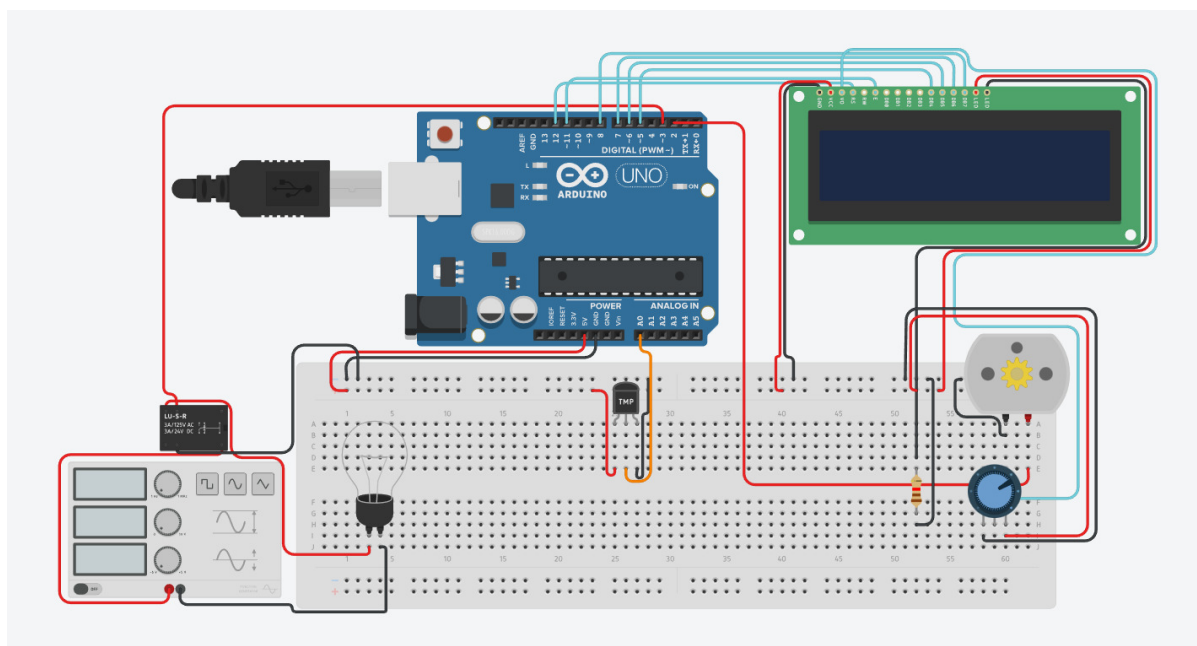
Material	Unidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Folha de madeira compensado - 1 x 1m	02	55,00	110,00
Verniz Spray	01	22,00	22,00
Papel alumínio	01	5,00	5,00
Arduino Uno R3 + Cabo USB	01	110,00	110,00
Placa circuito - 2,5 x 6 cm	01	10,00	10,00
Cabos 1,5mm ²	1,0m	5,00	5,00
Módulo dimmer 8A, com Zero Cross	01	65,90	65,90
Puxador para Móveis	03	8,00	24,00
Ventilador Cooler 40mm 5V	01	24,90	24,90
Sensor de temperatura DS18B20	01	17,90	17,90
Plug Macho 2 pinos	01	2,00	2,00
Bocal Plafon	01	5,00	5,00
Lâmpada incandescente de 60W	01	5,00	5,00
Cantoneira	02	3,00	6,00
Dobradiças	02	6,00	12,00
Parafusos	08	1,00	8,00
Total: R\$ 432,70*			
*Cotação feita em março de 2023			

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 6 é ilustrado o diagrama elétrico de ligação dos componentes ao Arduino no software online Tinkercad.

Neste diagrama é possível visualizar os equipamentos dispostos na planta didática, sendo eles: placa Arduino Uno R3, a lâmpada incandescente, o cooler (motor CC), o display LCD, o potenciômetro de ajuste, o sensor de temperatura LM35 e as medições de tensão e corrente consumidas pela carga.

Figura 6 – Diagrama elétrico no Tinkercad



Fonte: Autor, 2023.

O produto didático confeccionado usa a placa Arduino Uno R3 como hardware de aquisição e controle, onde o microcontrolador recebe as leituras dos sensores, em seguida executa a lógica de controle e por fim manda a ação de controle para os atuadores instalados. O sensor utilizado foi o sensor de temperatura DS18B20, os atuadores utilizados foram a lâmpada CA e o cooler que funcionam como aquecedor e exaustor respectivamente, e por fim, a lógica de controle que foi implementada no computador na IDE Arduino.

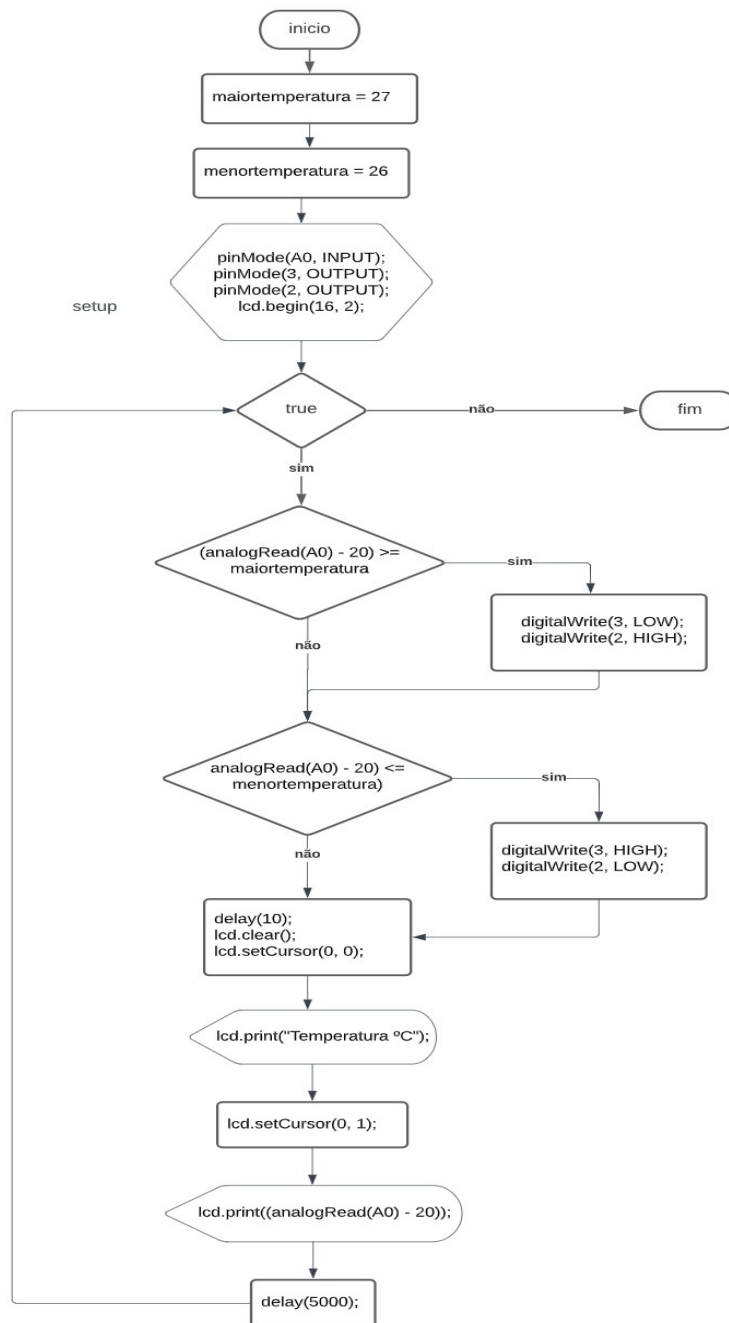
A lógica de controle on-off (liga-desliga) implementada funciona da seguinte maneira: Se a temperatura for menor ou igual que 26°C então a lâmpada será ligada e desligado o cooler; se a temperatura for maior ou igual que 27°C então o cooler será ligado e a lâmpada desligada. Nesta lógica a lâmpada incandescente funciona como a fonte de calor e o cooler como o atuador de resfriamento do interior da estufa. Na Figura 7 é ilustrada o fluxograma da lógica de programação.

Após a montagem física da planta foram validadas as ações de controle ON-OFF para a malha de controle de temperatura. Em seguida foi feito o experimento de identificação de parâmetros da planta didática.

O experimento de identificação paramétrica consistiu em aplicar uma tensão de 220 Vca para alimentar a lâmpada (a lâmpada opera em condições nominais – Brilho maximizado), em seguida, medir a temperatura no interior da estufa. A partir do

experimento de identificação da planta foi levantado o modelo matemático da planta didática, sendo representado por uma função de transferência, para tal tarefa foi utilizado o toolbox system identification.

Figura 7 - Fluxograma do Programa.



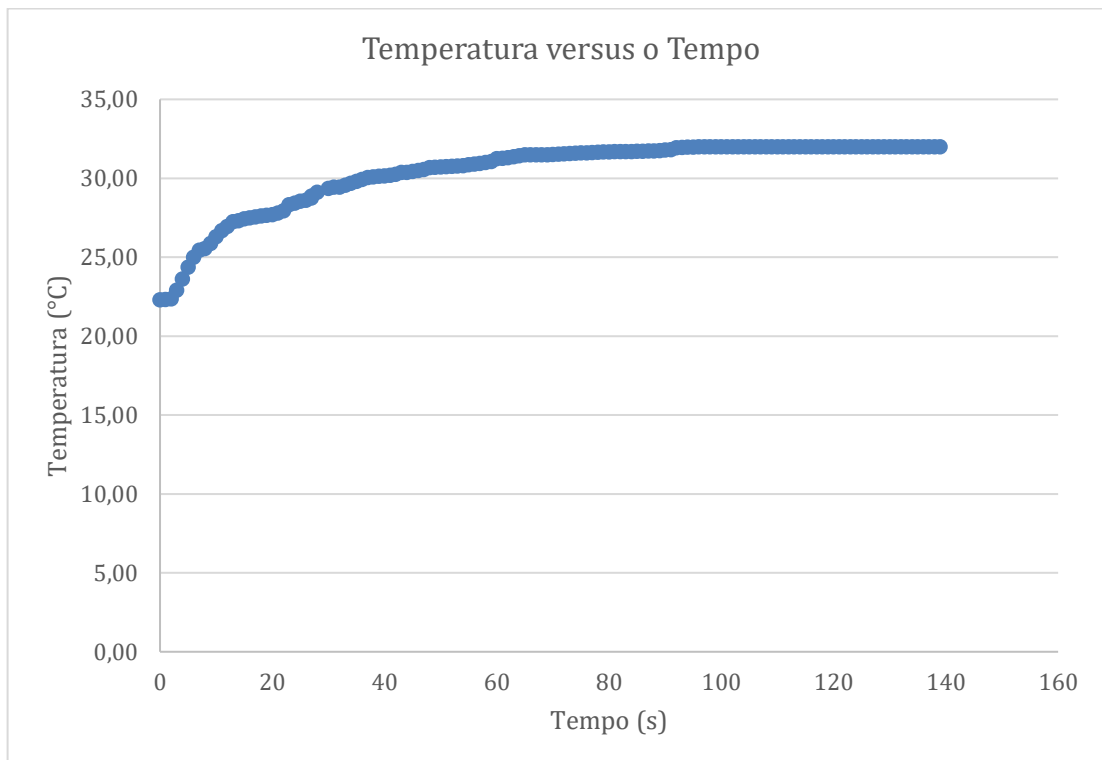
Fonte: Autor, 2023.

O modelo matemático da planta foi usado para o projeto do controlador PI, este foi sintonizado usando método de Ziegler e Nichols.

4.2 Modelagem da Planta

A modelagem em função de transferência para a malha de temperatura foi realizada baseado no ensaio em malha aberta, onde foi definido um degrau de tensão (aplicou-se 220 V aos terminais da lâmpada) e mediu-se a temperatura no interior da estufa, logo a temperatura é a variável de saída. Na Figura 8 é ilustrado a curva de temperatura medida.

Figura 8 - Medições de temperatura quando aplicado um degrau de tensão.



O exame dos dados registrados indica que a dinâmica térmica do ebulidor é aproximadamente de primeira ordem. Portanto, ajustamos uma função de transferência aos dados medidos, conforme expressão (1), onde K é o ganho DC do sistema e τ é a constante de tempo do sistema.

$$P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Para o sistema térmico da estufa, considerou-se a entrada como a porcentagem de tempo em que a lâmpada está ligada (isto é, o ciclo de trabalho), $D(s)$, e considerou-se que a saída é o desvio da temperatura T no interior da estufa em relação a temperatura ambiente T_0 , $\Delta T(s)$. Escolhemos a saída como ΔT em vez de

simplesmente T , com o intuito de termos um modelo linear. Recordando a definição de um sistema linear, a saída deve ser linearmente proporcional à entrada. Isso significa que uma entrada 0 deve gerar uma saída de 0.

A partir da inspeção dos dados de resposta a degrau (Figura 8), a temperatura ambiente (temperatura inicial da lâmpada) é aproximadamente 22,31 graus °C, enquanto a temperatura constante do ebulidor é de 32 graus °C. Como a entrada é igual a 1 (100% ciclo de trabalho), e a saída é ΔT , isso significa que o ganho CC, K , do sistema é de aproximadamente 9,7 graus °C (32,0 – 22,3). Recordando a definição de constante de tempo como o tempo necessário para a resposta do sistema atingir 63% de sua alteração total [$T = (0,63 \cdot 97) + 22,3 = 28,4$ °C], para este valor de temperatura a constante de tempo é de aproximadamente 21 (24-3) segundos.

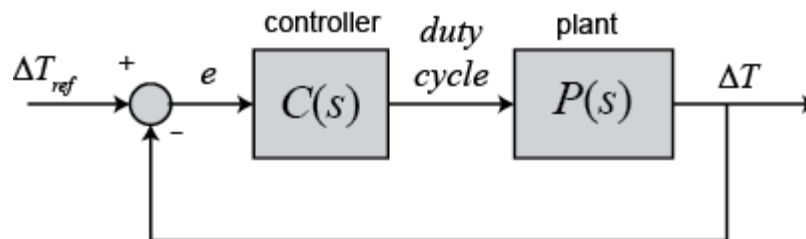
Com base na identificação de parâmetros acima, o modelo estimado da dinâmica térmica da lâmpada é o seguinte,

$$P(s) = \frac{\Delta T(s)}{D(s)} = \frac{9,7}{21,5s + 1} \text{ °C} \quad (2)$$

4.3 Projeto do Controlador PI

O diagrama de controle em malha fechada é ilustrado na Figura 9, o esforço de controle é usado para gerenciar o ciclo de trabalho (duty cycle) do sinal PWM.

Figura 9 - Diagrama de controle para o sistema em malha fechada.



Na prática, o período do sinal PWM é pequeno (frequência grande) em comparação com a dinâmica do sistema que está sendo controlado, para que não haja tempo, para a saída aumentar ou diminuir. Portanto, a modulação do ciclo de trabalho de uma entrada PWM pode nos levar a uma saída que muda aproximadamente suavemente. O sinal PWM gerado chaveia o módulo Dimmer ligado a lâmpada. A função de transferência do controlador PI (proporcional-integral) é dada

por: $C(s) = K_p + K_i/s$. Esse controlador torna o sistema de controle em malha do tipo 1 (apresenta dois graus de liberdade). Como a inserção do controlador PI a função de transferência em malha fechada é:

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} = \frac{9.7(K_p s + K_i)}{21.5s^2 + (1 + 9.7K_p)s + 9.7K_i} \quad (3)$$

Para esta função de transferência em malha fechada, o ganho CC é $1(G_{cl}(0)=1)$. Portanto, teremos de fato o erro em regime estacionário nulo para uma referência constante (entrada degrau). Quanto maior o valor K_i , mais rapidamente o erro em estado estacionário será levado a zero.

Os requisitos específicos do controlador para o projeto via lugar das raízes são:

- 2% no tempo de acomodação, menor que 2 segundo;
- Tempo de subida inferior a 30 segundos;
- Máximo sobressalto (*overshoot*) inferior a 10%;
- Máximo esforço de controle menor que 5 Volts.

4.4 Método de Ziegler & Nichols em malha fechada

Este método é baseado na resposta em malha fechada do sistema de controle (Figura 10), considerando, inicialmente, somente a ação proporcional K_p para levar o sistema à condição de oscilação sustentada.

- Inicialmente, assumimos, $T_i = 1$ e $T_d = 0$.
- Utilizando apenas a ação proporcional, aumentamos 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 determinamos a frequência de oscilação e o período de oscilação.

Figura 10 - Sistema em malha fechada com controlador proporcional.

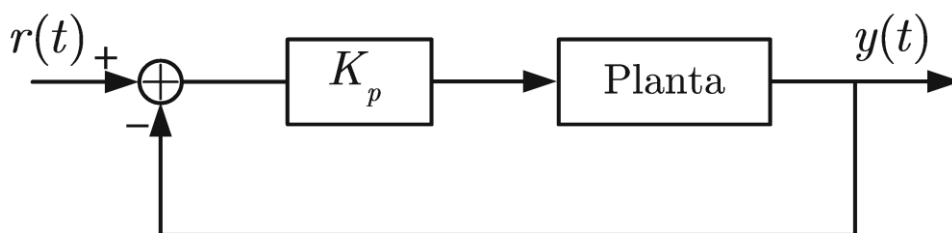
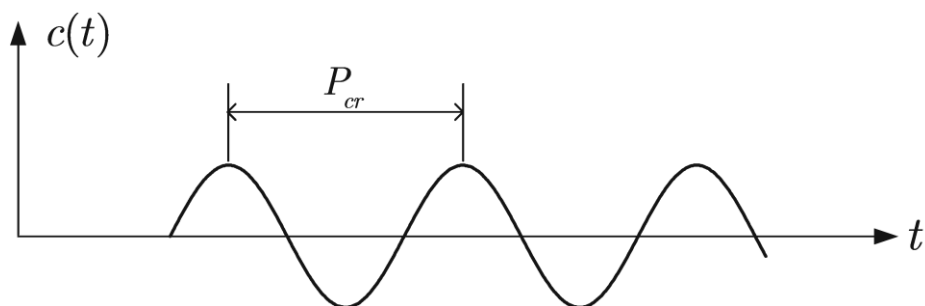


Figura 11 - Oscilação sustentada com período crítico.



Uma vez determinados os valores de P_{cr} e K_{cr} , podemos 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 relé.

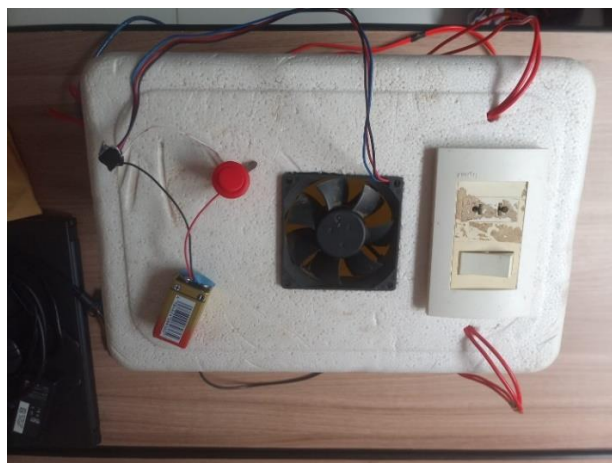
Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Aplicando o método do relé ao modelo da planta térmica determinou-se os seguintes valores para os ganhos do controlador PI: $K_p=0.55$ e $K_i=0.052$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo definido os materiais que farão parte da bancada didática e escolhida a estratégia de controle a ser utilizada, uma análise do comportamento do sensor e atuadores foi necessária para a integração de todos os comportamentos do processo.

Figura 12 – Estufa didática confeccionada.



Fonte: Autor, 2023

A bancada experimental para fins de controle de temperatura foi instalada no Laboratório de Eletrônica/Eletricidade do IFPB Campus Cajazeiras. Na Figura 12 é ilustrada o protótipo confeccionado.

A bancada foi construída usando a estrutura de uma caixa térmica de isopor com capacidade de 12 litros, conforme Figura 13.

Figura 13 - Caixa de térmica usada para montar a estufa.



Fonte: Autor, 2023.

O interior da caixa térmica (Figura 14) de isopor abriga o sensor DS18B20 que monitora a variação de temperatura, e a lâmpada incandescente de 40W que funciona como fonte de calor. Na parte superior (tampa do isopor) foi adicionado um ventilador cooler 40mm 5V que atua promovendo o resfriamento do interior da estrutura.

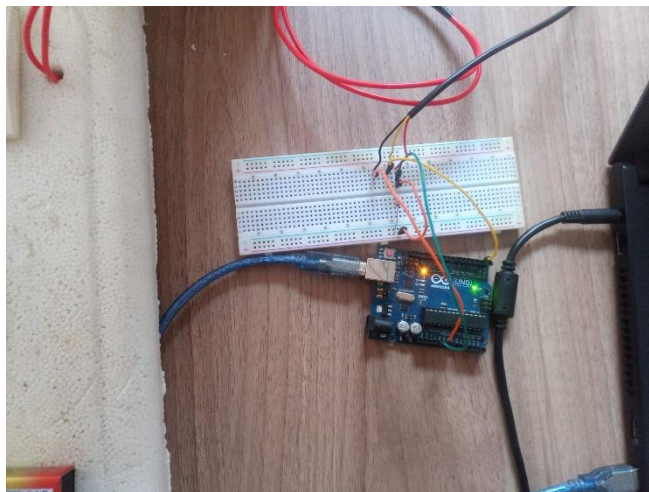
Figura 14 - Interior da estufa.



Fonte: Autor, 2023.

O sensor inserido na estrutura foi interligado ao Arduino (Figura 15), para a lâmpada incandescente usou-se um interruptor para o controle liga-desliga, já para o ventilador (cooler) utilizou-se uma chave liga-desliga conectado a uma bateria.

Figura 15 - Ligação do sensor DS18B20 ao Arduino.



Fonte: Autor, 2023

O controle experimental de temperatura implementado caracteriza-se como um controle em malha aberta que é de fácil implementação e consiste em aplicar um sinal de nível lógico baixo ou alto (ON/OFF) na entrada do sistema, esperando-se que na saída a variável controlada consiga atingir uma determinada temperatura e apresente um determinado comportamento desejado.

Figura 16 – Curva da temperatura quando a lâmpada ligada e o cooler desligado.

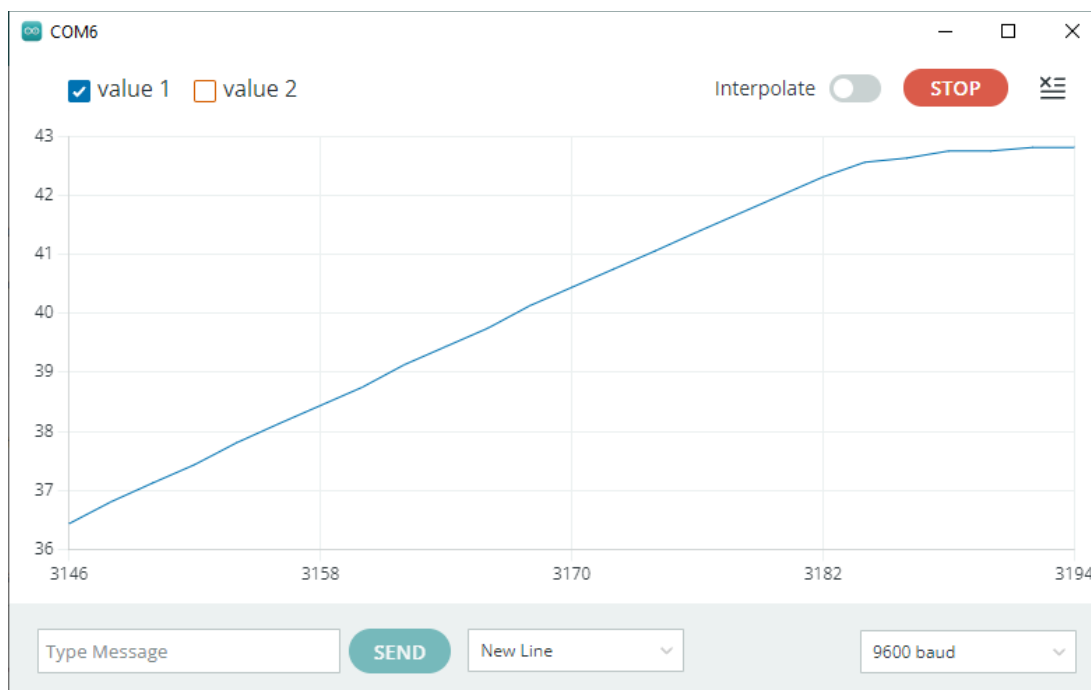
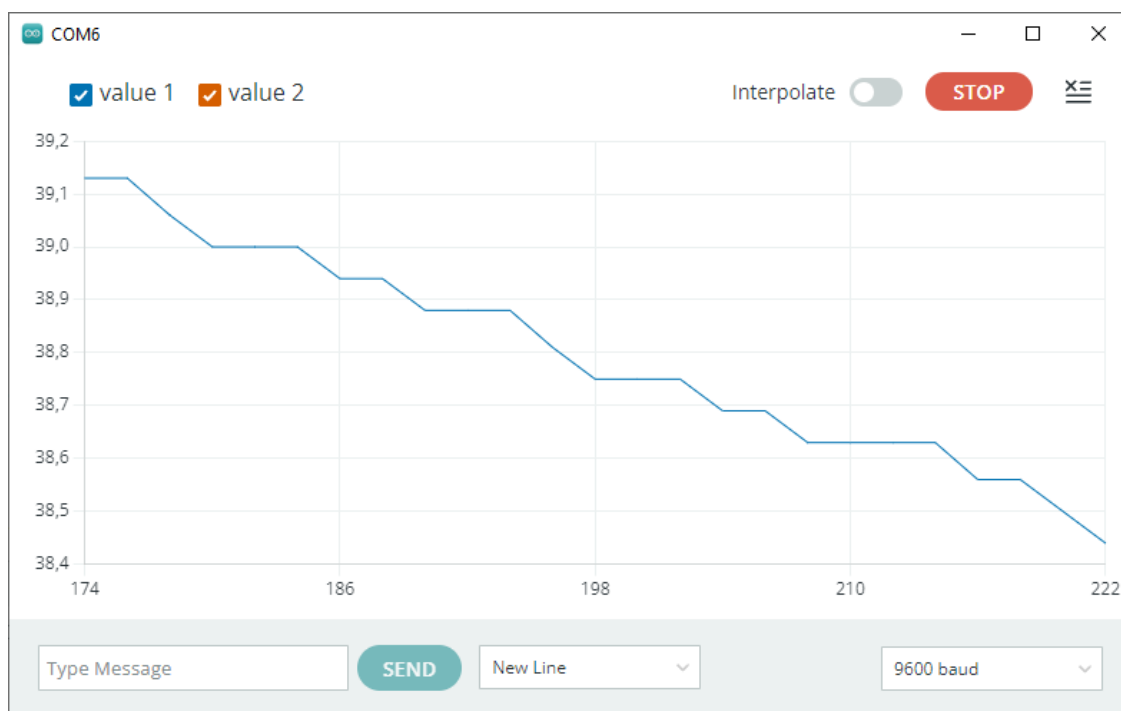


Figura 17 – Curva da temperatura quando a lâmpada desligada e o cooler ligado.



As Figuras 16 e 17 demonstram a ação da lei de controle liga-desliga na gestão da temperatura, o gráfico da Figura 16 ilustra o aquecimento no interior da estufa, já o gráfico da Figura 17 ilustra quando a ação do cooler no resfriamento do ambiente térmico.

Considerando o projeto e sintonia do controlador PI quando aplicado ao modelo da planta, foi feita a simulação em software dedicado do sistema em malha fechada, levando em conta os requisitos de projeto apresentados na Seção 3.3.

Neste cenário os resultados de simulação são apresentados na Figura 18, onde o controlador PI foi sintonizado usando o método do relé (Ziegler & Nichols em malha fechada).

Na Tabela 3 é ilustrado os parâmetros de desempenho para o controlador PI projetado e validado em simulações. O set-point de temperatura usado foi de 32 °C.

A estratégia de controle implementada conseguiu rastrear/mapear com eficácia a referência (set-point) 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 final.

Figura 18 – Resultado de simulação para o controlador PI de temperatura.

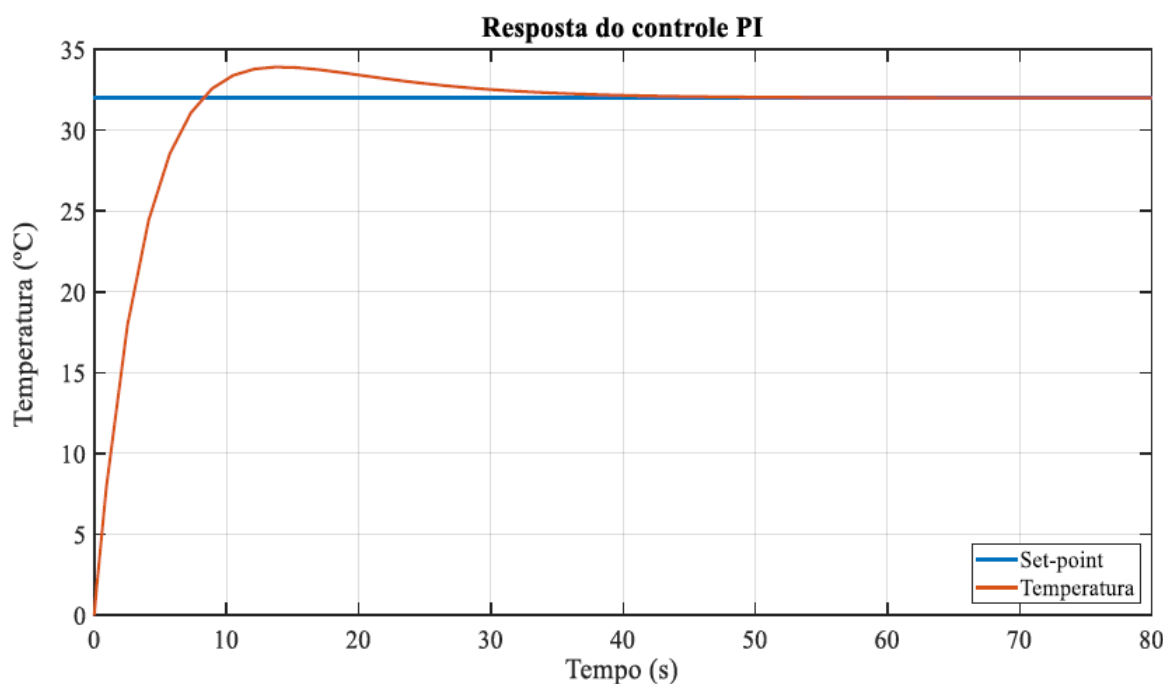


Tabela 3 - Dados de desempenho e robustez do controlador PI.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Tempo de subida	6.38s	Tempo de acomodação	31.2s
Overshoot	6.88%	Pico	1.07
Margem de ganho	Inf DB@ NaN rad/s	Margem de fase	80deg @ 0.262 rad/s
Manha fechada	Estável	Ganho K _p	0.5533
Ganho K _i	0.052	Ganho K _D	0.0

As principais dificuldades encontradas foram: leituras de diagramas elétricos, programação em C para o microcontrolador, dinâmica rápida da lâmpada incandescente, dinâmica lenta da lâmpada LED e conhecimentos em montagens de circuitos eletroeletrônicos.

A bancada didática confeccionada será útil para as práticas de laboratório das disciplinas do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, destacamos alguns experimentos que serão realizados na bancada: Modelagem matemática do processo, caracterização de sensores e atuadores, linearização da planta em um ponto de operação, identificação de sistemas multivariáveis, projeto e sintonia de controladores PID, projeto de controladores avançados, projeto e sintonia de controladores e supervisão local / remota de dados. Para complementar a bancada

será desenvolvida uma rede de comunicação remota para comunicar com o sistema supervisório SCADA e com outros processos.

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

6 CONCLUSÕES

A confecção da bancada didática é uma ferramenta que: (1) Permite medições em tempo real das variáveis de decisão; (2) apresenta custo inferior (433,00 R\$) as bancadas comerciais (10.000,00 R\$ - Exsto); (3) Permite aplicações no processo de ensino-aprendizagem nas disciplinas de Controle do Bacharelado (guia de laboratório). O diferencial do protótipo está na supervisão local dos dados medidos.

As estratégias de controle implementadas conseguiram rastrear/mapear com eficácia as referências (set-points) 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 experimental de outras estratégias de controle, por exemplo: neuro-fuzzy controller, adaptive PID controller, model Predictive control; (d) criação de um banco de dados visando o acompanhamento do histórico operacional do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, *et al.* Bancada didática para controle de nível e temperatura. **Anais**. Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia. Palmas - TO, 2019.

ALEXANDRE, G.B; LIMA, A.M.N; NETO J.S.R. Monitoramento de eventos anormais em processos industriais via análise de componentes principais. **Anais**, Congresso Brasileiro da Automática, 2012, Campina Grande.

ALEXANDRE, G.B; LIMA, A.M.N. Estratégia baseada em modelos para prognóstico de falhas em sistemas industriais. **Anais**, IX Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2011, Campina Grande.

ALEXANDRE, G.B; LIMA, A.M.N. **Diagnose de falhas e gestão de alarmes em sistema de instrumentação e controle industrial**. fls. 115. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

BORTOLO, Karla Fernanda; LINHARES, João Carlos. *Verificação da necessidade de dispositivos didáticos para o ensino na graduação em engenharia mecânica*, 2006. Acesso em: 18 mar. 2023. Disponível em: <https://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/13/artigos/1_69_790.pdf>.

COSTA, *et al.* *Controle de temperatura PID desenvolvido em Labview®*. **Anais**. XI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Rio de Janeiro - RJ, 2014.

DAGA, *et al.* Módulo didático para estudo de controlador PID analógico. **Anais**. IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos. Curitiba-PR, 2020.

FERREIRA, S. A., *et. al.* Projeto Tecnologia Wireless – Bluetooth. **Anais**, II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Rio de Janeiro. 2005.

GALINDO, J. M. S., *et. al.* Experiências de Aprendizagem Baseado em Projetos no Ensino da Graduação em Engenharia Elétrica. **Anais**, XLVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Fortaleza – CE, 2019.

HOTZ, Jéssica dos Santos. **Bancada didática para controle de nível e temperatura**, 2014. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15829/3/TD_COELE_2014_2_%2013.pdf>. Acesso em 18 março de 2023.

IEEE Standards. **IEEE 802.15.4: Bluetooth Technology**. New York, 2006.

JORGE, Alexandre Felipe. **Sistema de irrigação para cultivo urbano**, 2021.

Disponível em: <

<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28027/1/sistemairrigacaocultivourbano.pdf.pdf>>. Acesso em 02 abr. 2023.

MOSTI, L. G. L. **Desenvolvimento de um Sistema Supervisório SCADA para Controle de Processo de uma Graxaria**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Mecatrônica Industrial). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Edição. Pearson. 2015.

ANEXO 1 – LINK DO FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO

No link abaixo o leitor pode conferir o funcionamento em vídeo do protótipo confeccionado.

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1Jgk36JHE9LqJapHjMzHx3JhY5b63QT6C/view?usp=drivesdk>

ANEXO 2 – CÓDIGO DA IDE ARDUINO

Segue o programa em linguagem C do sensor de temperatura DS18B20.

```
#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

// O fio de dados é conectado no pino digital 2 no Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 2
// Prepara uma instância oneWire para comunicar com qualquer outro dispositivo oneWire
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
// Passa uma referência oneWire para a biblioteca DallasTemperature
DallasTemperature sensors(&oneWire);
void setup(void)
{
  sensors.begin(); // Inicia a biblioteca
  Serial.begin(9600);
}
void loop(void)
{
  // Manda comando para ler temperaturas
  sensors.requestTemperatures();
  // Escreve a temperatura em Celsius
  Serial.println("Temperatura: ");
  //Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0));
  Serial.println(" graus");

  delay(500);
}
```

Documento Digitalizado Restrito

Trabalho Conclusão de Curso

Assunto: Trabalho Conclusão de Curso
Assinado por: Jardel Pinheiro
Tipo do Documento: Anexo
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:

- **Jardel Karlos Peixoto Pinheiro, ALUNO (201812030025) DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL - CAJAZEIRAS**, em 18/04/2023 07:56:54.

Este documento foi armazenado no SUAP em 18/04/2023. 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: 808947
Código de Autenticação: 8dc914f889

