

CAPÍTULO 5

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADOR PI EM TEMPO DISCRETO PARA CONTROLE DE TEMPERATURA DE ESTUFA



<https://doi.org/10.22533/at.ed.5832531035>

Data de aceite: 20/05/2025

Flavia Macedo Pontim

Graduanda do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

João Matheus Simm de Oliveira

Graduando do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

Flávio Luiz Rossini

Docente do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil
Lattes: 8616413126997528

RESUMO: O trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estufa caseira feita com componentes acessíveis, com o objetivo de monitorar e controlar a temperatura interna, para diversas aplicações, como estufa, chocadeira, forno etc. Projetou-se um controlador do tipo proporcional-integral (PI) para acionar uma *FAN* de resfriamento e estabilizar a temperatura em um valor predefinido. Realizaram-se o monitoramento e a implementação do controlador com o uso de ferramentas do *MATLAB®*. Os resultados demonstram a viabilidade da

abordagem adotada, com um sistema que responde adequadamente às variações de temperatura. Apesar de um tempo de estabelecimento elevado, o sistema apresentou desempenho satisfatório.

PALAVRAS-CHAVE: Controle PI. Estufa. Setpoint.

PROJECT AND IMPLEMENTATION OF A DISCRETE-TIME PI CONTROLLER FOR GREENHOUSE TEMPERATURE CONTROL

ABSTRACT: This work presents the development of a homemade incubator built with accessible components, aimed at monitoring and controlling internal temperature for various applications, such as greenhouses, hatcheries, ovens, etc. A proportional-integral (PI) controller was designed to activate a cooling FAN and stabilize the temperature at a predefined value. The monitoring and implementation of the controller were carried out using MATLAB® tools. The results demonstrate the feasibility of the proposed approach, with a system that responds adequately to temperature variations. Despite a relatively long settling time, the system showed satisfactory performance.

KEYWORDS: PI Control. Greenhouse. Setpoint.

INTRODUÇÃO

A criação de estufas controladas representa uma estratégia eficaz para o estudo de sistemas térmicos em aplicações acadêmicas e industriais. Neste artigo, apresenta-se a construção de uma estufa de pequeno porte com materiais acessíveis e a implementação de um sistema de controle de temperatura, com o objetivo de estabilizar o ambiente interno em torno de um valor predefinido.

Sistemas térmicos têm papel central em processos industriais como secagem, fundição, processamento químico e trocas de calor (Bejan, 2013; Incropera et al., 2007). A compreensão e o controle preciso desses sistemas são essenciais para a segurança, eficiência energética e qualidade do produto (Pawelski, Rossini, Brolin; 2022).

O controle de temperatura, por sua vez, é um requisito crítico em diversas aplicações industriais, como fornos, reatores, câmaras climáticas e processos de fermentação, onde pequenas variações podem comprometer o resultado (Cristofoli, Rossini, Monteiro; 2025). Controladores como o PID ou abordagens baseadas em espaço de estados são amplamente empregados devido à sua precisão e robustez (Åström, Hägglund; 2006).

Este artigo está organizado da seguinte forma: apresentação da planta desenvolvida, modelagem dos componentes do sistema, resultados práticos do sistema ao operar em malha aberta, resultados teóricos em malha fechada e, por fim, resultados práticos do sistema em malha fechada.

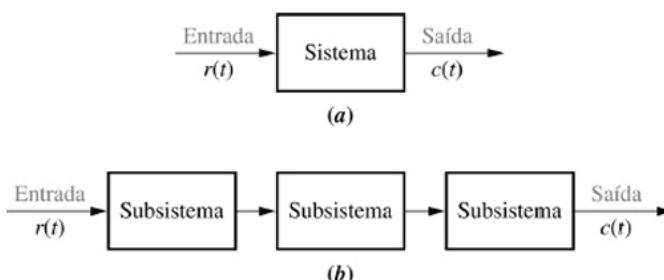
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Transformada de Laplace é uma ferramenta matemática usada para transformar equações diferenciais no domínio do tempo em equações algébricas no domínio da frequência (Silva, Pontim, Oliveira, Rossini; 2023).

A Transformada de Laplace é definida como

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_{0-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1)$$

em que $s = \sigma + j\omega$ é uma variável complexa. Desse modo, $F(s)$ é a transformada de Laplace de $f(t)$ quando aplicada a integral da Equação (1) (Andrade, Silva, Rossini; 2023) (Seifert, Rossini; 2023).



Nota: a entrada, $r(t)$, representa a *entrada de referência*

Figura 1 - a. Representação em diagrama de blocos de um sistema; b. Representação em diagrama de blocos de uma interconexão de subsistemas.

Fonte: (NISE, 2013).

A Transformada Z é definida como a representação de uma sequência temporal discreta $x[k]$ por meio de uma função $X(z)$ no domínio complexo z . Ela é análoga à Transformada de Laplace para sistemas contínuos (OGATA, 1995).

$$X(z) = \mathbb{Z}\{x(t)\} = \mathbb{Z}\{x(kT)\} = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) z^{-k} \quad (2)$$

Para uma sequência de números $x(k)$, a transformada z é definida por

$$X(z) = \mathbb{Z}\{x(k)\} = \sum_{k=0}^{\infty} x(k) z^{-k} \quad (3)$$

A transformada Z definida pelas Equações (2) e (3) é chamada de transformada Z unilateral, da forma

$$\begin{cases} x(t) = 0 \text{ para } t < 0; \\ x(k) = 0 \text{ para } k < 0; \end{cases}$$

No projeto de sistemas digitais de controle, especialmente aqueles implementados por microcontroladores, é essencial compreender como a função de transferência do sistema em malha fechada (Franklin et al., 1998), (Pawelski, Rossini, Coldebella; 2022). Nesse contexto, a função de transferência total de um sistema com realimentação negativa simples pode ser expressa como (Figueiredo, Souza, Oliveira, Rossini; 2023).

$$H(z) = \frac{G(z)}{1 + G(z) \cdot H(z)} \quad (4)$$

onde $G(z)$ representa o sistema, controlador e planta, e $H(z)$ é o caminho de realimentação (Coldebella, Rossini; 2023), (Canhan, Brolin, Rossini; 2023).

PLANTA

A planta constitui-se de uma estufa térmica construída com uma caixa de isopor revestida com papel alumínio. Posicionou-se uma lâmpada incandescente de 40 W ao centro como fonte de calor. Utilizou-se um sensor LM35 no canto esquerdo para medição da temperatura e uma ventoinha na lateral direita para resfriamento. O sistema incluiu cinco furos opostos a *FAN* para a circulação de ar. Essa configuração simples e econômica proporcionou um ambiente controlado para o estudo efetivo de controle térmico.

Na Tabela 1, apresentam-se os componentes utilizados no projeto, os quais foram integrados conforme o esquema representado na Figura 2.

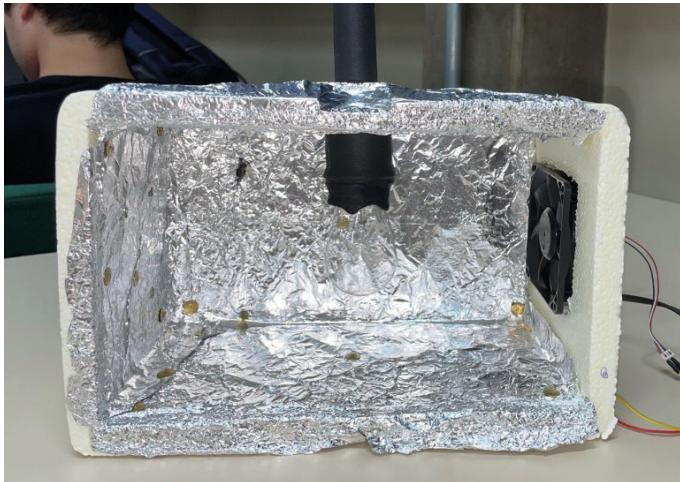


Figura 2 - Interior da Estufa.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 1, listam-se todos os equipamentos utilizados no projeto.

Componente	Quantidade
Arduino Uno	1
Optoacoplador 4N25	1
Sensor de temperatura LM35	1
TBJ BC547	1
TBJ BC557	1
Mosfet IRF540N	1
Led Vermelho	1
Diodo 1N4007	1
Resistores	4
Caixa de Isopor	1
FAN 24 DC 0,13	1
Papel Alumínio	1
Protoboard	1
Lâmpada Incandescente 40 W	1
Soquete	1

Tabela 1 - Lista dos equipamentos usados

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3, mostra-se o circuito completo para leitura da temperatura, acionamento e exibição da temperatura.

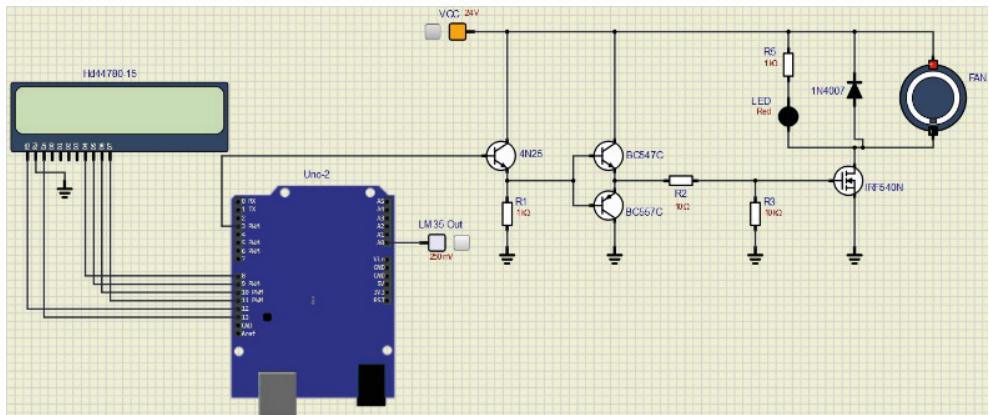


Figura 3 – Esquemático do sistema de controle completo. Fonte: Autoria própria (2024).

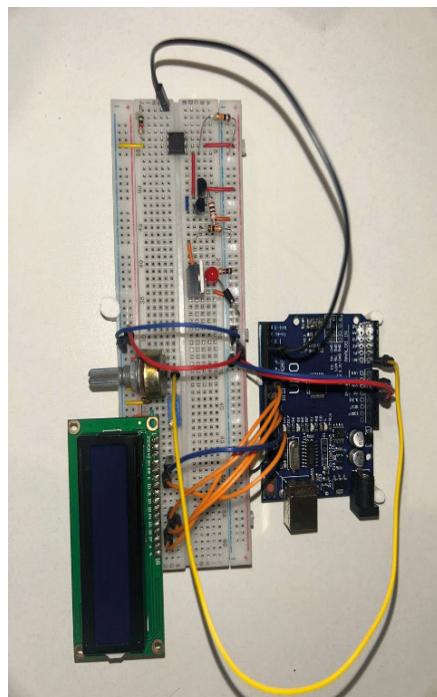


Figura 4 - Montagem do sistema de controle completo.

Fonte: Autoria própria (2024).

Não se utilizou um display LCD para estimativa das funções de transferência, somente para exibição da temperatura em tempo real. Contudo, usou-se posteriormente para exibição do *set point* e temperatura atual.

MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Equipamento para medição e monitoramento das variáveis do sistema

Para realizar a medição e o monitoramento da variável de temperatura no sistema, empregou-se dois dispositivos principais: o sensor de temperatura LM35 e uma placa Arduino Uno. Utilizou-se o LM35 como elemento sensor, devido à sua alta precisão e resposta linear em relação à temperatura, que fornece leituras diretamente em graus Celsius. Instalou-se este sensor em um ponto estratégico da estufa, o que permitiu a coleta eficiente de dados sobre as condições térmicas do ambiente interno.

Realizou-se a captura e o processamento dos dados provenientes do LM35 por meio de uma placa Arduino, que desempenhou o papel de interface entre o sensor e o sistema de controle. O Arduino não apenas registrou os valores medidos pelo sensor, como também permitiu sua transmissão e utilização em algoritmos de controle para garantir a regulação adequada da temperatura na estufa. A combinação desses equipamentos assegurou simplicidade e confiabilidade no monitoramento da variável principal do sistema.

Função de transferência do sensor

Utilizou-se o LM35, que é um sensor de temperatura analógico cuja função de transferência é linear, onde relaciona a temperatura medida com a tensão de saída do sensor. A saída do LM35 é dada pela expressão:

$$V_{out} = 10m \cdot T \quad (5)$$

onde V_{out} é a tensão de saída em mV e T é a temperatura em graus Celsius. Isso significa que para cada grau Celsius de variação na temperatura, a saída do sensor aumenta ou diminui em $10 mV$.

Este sensor é caracterizado pela capacidade de disponibilizar saídas digitais via comunicação I₂C, o que simplifica a obtenção de leituras precisas e a integração no sistema. Por isso, para obter a variação de temperatura necessária para o desenvolvimento de todo o projeto, ligou-se o sensor diretamente ao Arduino, como observado na Figura 5.

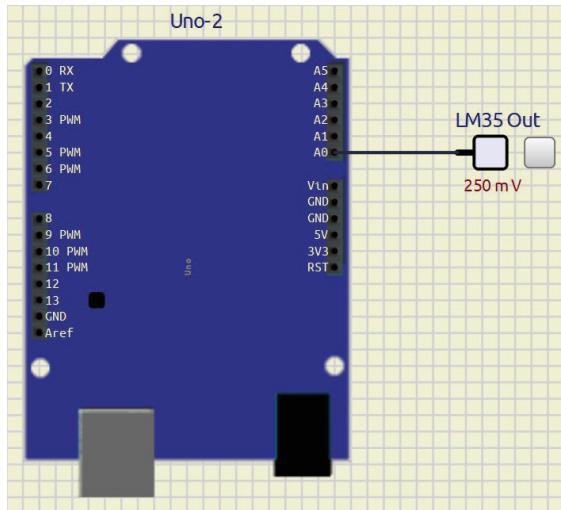


Figura 5 - Conexão do sensor com o Arduino

Fonte: Autoria própria (2024).

Para explicitar, posicionou-se o sensor no canto superior esquerdo, a fim de captar fielmente a temperatura real da estufa. Seu posicionamento pode ser observado na Figura 6.

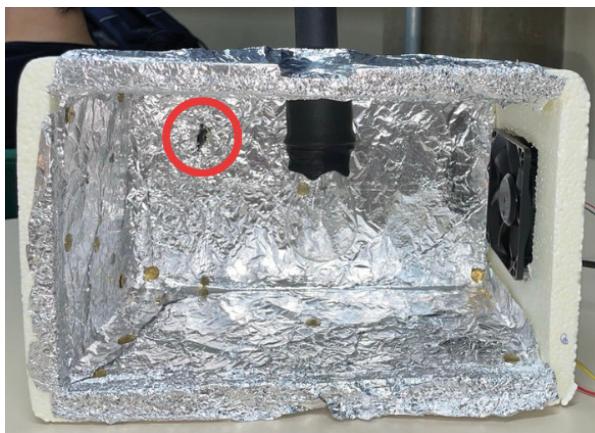


Figura 6 - Posicionamento do sensor na planta (especificado pelo círculo vermelho) Fonte: Autoria própria (2024).

Função de transferência do sensor

Para o *drive* de acionamento do atuador, utilizou-se optoacoplador, um par complementar de TBJ's em configuração *push-pull* e um MOSFET para acionar o atuador.

O optoacoplador 4n25 garante o isolamento galvânico entre o circuito de controle e circuito de potência, que protege o Arduino contra eventuais surtos de tensão e corrente.

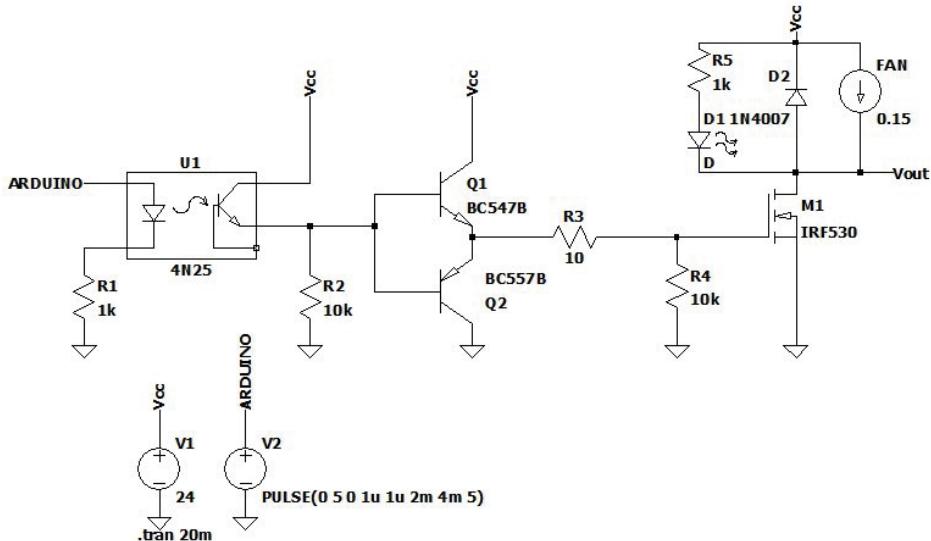


Figura 7 - Driver de acionamento ventoinha.

Fonte: Autoria própria (2024).

Para estimar a função de transferência do *drive* do atuador, aplicou-se 5 diferentes entradas de sinal PWM a uma frequência de 250 Hz no optoacoplador e medida a saída no atuador, que altera o *duty cycle* do sinal, conforme Tabela 2.

Duty Cycle	Entrada	Saída (Vcc, Vout)	FT
20%	1	4,50	4,50
40%	2	9,55	4,78
60%	3	14,50	4,83
80%	4	19,45	4,86
100%	5	23,98	4,80

Tabela 2 - Estimação da Função de Transferência do atuador.

Fonte: Autoria própria (2024).

Cada medição resultou em um valor diferente, o que mostra certa não linearidade do circuito, entretanto, é possível estimar a função de transferência ao calcular a média dos valores obtidos, sendo

$$FT_{atuador} = \frac{4,5 + 4,78 + 4,83 + 4,86 + 4,8}{5} \quad (6)$$

Logo,

$$FT_{atuador} = 4,75 \left[\frac{V}{V} \right] \quad (7)$$

Estimou-se que o valor mínimo de tensão de operação do atuador é de aproximadamente 5V abaixo disso, ele não atua como esperado.

Função de Transferência da Planta (Estufa)

Utilizou-se o Arduino e o sensor de temperatura LM35 para captar os dados ao longo do tempo, por meio do Código 1 e os dados coletados no *MATLAB®* via entrada *Serial*:

```
const int LM35 = A0; // Define o pino que lera a saída do LM35
float temperatura; // Variável que armazenará a temperatura medida
void le_temp();

//Função que será executada uma vez quando ligar ou resetar o Arduino
void setup() {
    Serial.begin(9600); // inicializa a comunicação serial
}
//Função que será executada continuamente
void loop() {
    le_temp();
}
void le_temp(){
    temperatura = float(analogRead(LM35))*5/(1023))/0.01;
    Serial.println(temperatura);
    delay(1000);
}
```

Código 1 - Código para leitura da temperatura.

Fonte: Autoria própria (2024).

Para estimar a função de transferência da planta, aqueceu-se a planta até o ponto de estabilidade, e então, aplicado um degrau de 24V no atuador.

Esperava-se que a temperatura baixasse até se estabilizar novamente, o que realmente aconteceu por volta dos 40 °C, conforme Figura 8.

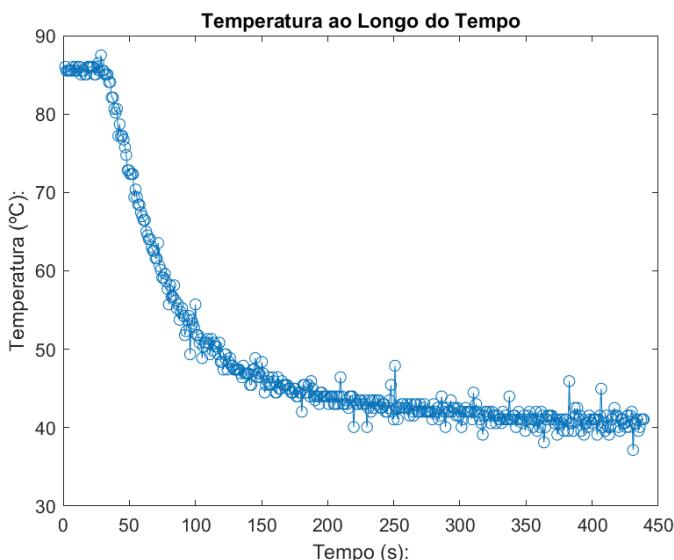


Figura 8 - Dados práticos para estimação da FT da Planta.

Fonte: Autoria própria (2024).

Em seguida, utilizou-se a *System Identification Toolbox* no MATLAB afim de estimar os parâmetros da função de transferência da planta. Utilizou-se também o Código 2 para estimação:

```
load('temperatura_24_voltos.mat');
u = 24 * ones(1, length(y));
Ts = 1;
data = iddata(y', u', Ts);
np = 1;
nz = 1;
sys = tfest(data, np, nz);
figure;
compare(data, sys);
disp('Função de transferência estimada:');
sys
figure;
step(sys);
figure;
bode(sys);
```

Código 2 - Identificação da FT da Planta

Fonte: Autoria Própria (2024).

A função *tfest(data, np, nz)* possibilita estimar a função de transferência de acordo com o número de polos e número de zeros do sistema, a fim de comparar o sistema com a maior similaridade de estimação. Testou-se os seguintes valores, de acordo com a Tabela 2.

Zeros	Polos	Validação
1	1	88,60%
1	2	88,66%
2	2	55,81%
1	3	88,72%
2	3	89,92%
3	3	90,35%
1	4	88,69%
2	4	81,41%

Tabela 3 - Validação da função de transferência da planta.

Fonte: Autoria Própria (2024).

Escolheu-se a função de transferência de 1 zero e 1 polo, devido ao critério de validação e ao menor número de zeros e polos, resultado em:

$$FT_{planta} = \frac{3,661s + 0,03454}{s + 0,01997} \left[\frac{V}{^{\circ}C} \right] \quad (8)$$

RESULTADOS TEÓRICOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA ABERTA

Ao obter a função de transferência da planta, simulou-se no Simulink todo o sistema em malha aberta com uma entrada em degrau de 24V. De acordo com a Figura 9.

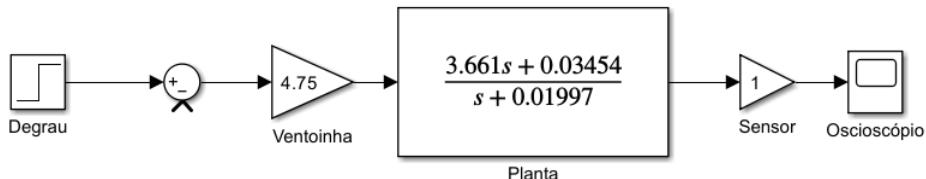


Figura 9 - Simulação em malha aberta Simulink.

Fonte: Autoria Própria (2024)

Em seguida, simulou-se o resultado na seguinte resposta em malha aberta, conforme Figura 10.

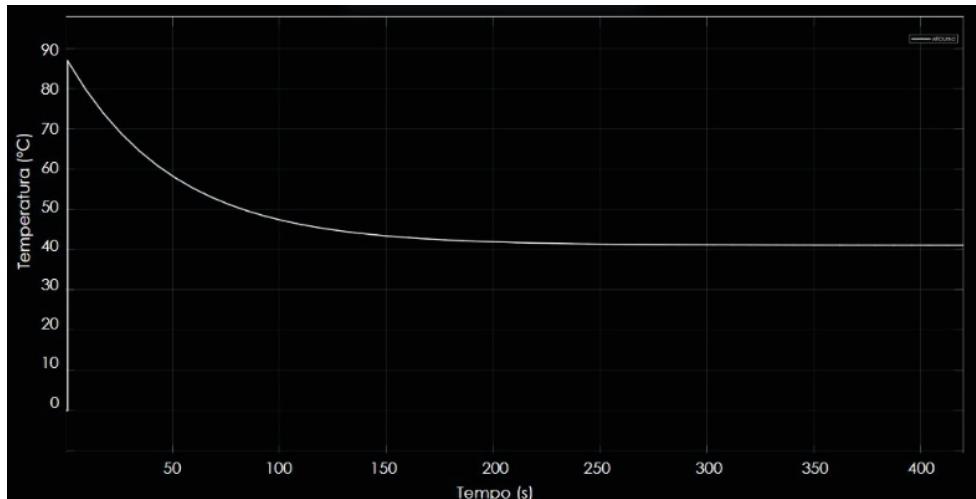


Figura 10 - Resposta do sistema em malha aberta no Simulink.

Fonte: Autoria Própria (2024)

RESULTADOS PRÁTICOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA ABERTA

Além do teste inicial, Figura 8, para levantamento da função de transferência da planta, realizou-se um segundo teste com um degrau de 50% do valor da primeira entrada, ou seja, uma tensão de 12V, conforme Figura 11. Pôde-se perceber que o tempo de estabelecimento se aproximou do teste com degrau de 24V, mas, a temperatura estabilizou-se em cerca de 10 °C a mais.

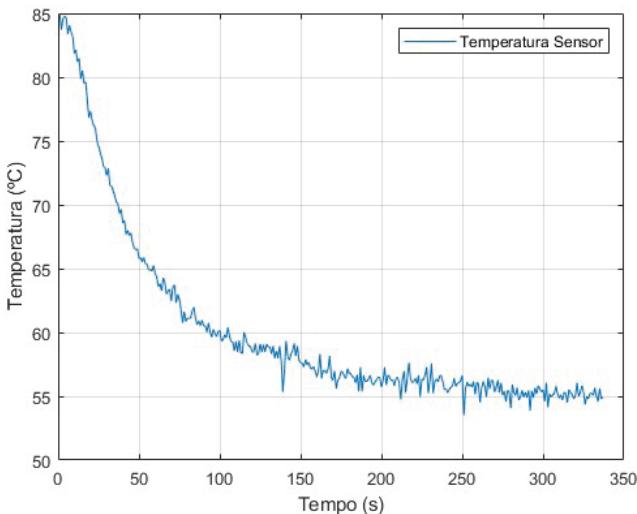


Figura 11 – Resposta da planta para uma entrada de 12V.

Fonte: Autoria Própria (2025)

RESULTADOS TEÓRICOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA FECHADA

Sintonia do controlador

Para o projeto, usou-se um controlador proporcional integrativo (PI) devido à sua simplicidade, eficácia e estabilidade. Ele elimina erros estáticos por meio da ação integrativa, o que assegura que a temperatura se mantenha no *setpoint*. Além disso, proporciona respostas suaves a variações ambientais e é adequado para sistemas térmicos lentos, onde evita oscilações excessivas.

Portanto, para determinar a função do controlador, utilizou-se a função *pidtune()* no MATLAB®. Para isso, primeiro, representou-se todo o modelo já descrito, com a entrada, a FAN e a planta.

```
s=tf('s');
% Entrada
degrau = 5;
Fan = 4.75;
entrada = degrau*Fan;
%% Planta
zeros = -0.0094;
polos = -0.01997;
k = 3.661; G = zpk(zeros, polos, k);
% Resposta ao degrau
G_serie = series(G,entrada);
G_mf = feedback(G_serie,1);
step(G_serie), grid on, hold on
set(gcf,'color',[1 1 1])
hold off
```

Código 3 - Definição do sistema.

Fonte: Autoria Própria (2025)

Por conseguinte, implementou-se o código para determinar o controlador e discretizá-lo pelo método do segurador de ordem zero (ZOH) (Maran, Pradela, Rossini; 2023).

```
% Malha Fechada
% Controlador PI
[C_pi_fast,info1] = pidtune(G_serie,'PI',1.0);
T_pi_fast = feedback(series(G,C_pi_fast),1);
% Discretização
T = 1;
T_pi_fast_Z = c2d(T_pi_fast, T, 'zoh');
Gz_mf = feedback(T_pi_fast_Z,1);
% Plot
step(T_pi_fast,T_pi_fast_Z);
legend('G_mf(s)','PI,fast')
```

Código 4 - Projeto do controlador.

Fonte: Autoria Própria (2025)

Por fim, chegou-se ao seguinte controlador:

$$C(z) = \frac{A(z - B)}{(z - C)(z - D)} \quad (9)$$

Sendo

$$\begin{cases} A = 0,4102 \\ B = 0,9906 \\ C = 0,9928 \\ D = 0,9466 \end{cases} \quad (10)$$

e os parâmetros de $K_i = 0,0115$ e $K_p = 0$.

Após obter a função de transferência do controlador no domínio da frequência, construiu-se o diagrama de blocos da planta, Figura 12.

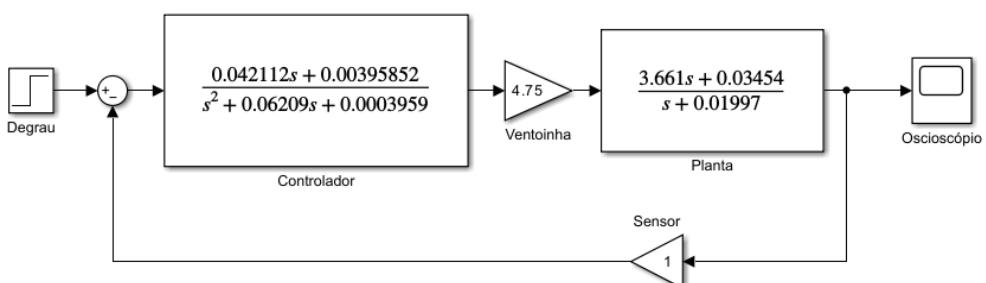


Figura 12 - Diagrama de blocos da planta

Fonte: Autoria Própria (2025)

Implementação da lei de controle no microcontrolador

Com o controlador descrito no tópico anterior, aplicou-se a lei de controle:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{A(z - B)}{(z - C)(z - D)} = \frac{Az - AB}{z^2 - z(C + D) + CD} \quad (11)$$

ao expandi-la

$$U(z)z^2 - U(z)(C + D)z + U(z)CD = E(z)Az - E(z)AB \quad (12)$$

e multiplicá-la por z^{12} , chega-se a

$$U(z) - U(z)(C + D)z^{-1} + U(z)CDz^{-2} = E(z)Az^{-1} - E(z)AB^{-2} \quad (13)$$

por fim, aplicou-se a Transformada Z inversa, tem-se

$$u(k) = u(k - 1)(C + D) - u(k - 2)CD + e(k - 1)A - e(k - 2)AB \quad (14)$$

no qual, implementou-se o Código 5 no Arduino:

```
// Setpoint de temperatura desejado
int Setpoint; // Em °C
int pwm_signal;
// Variáveis do controlador
double u_k = 0, u_k1 = 0, u_k2 = 0;// Saídas u(k), u(k-1), u(k-2)
double e_k = 0, e_k1 = 0, e_k2 = 0; // Erros e(k), e(k-1), e(k-2)
// Coeficientes do controlador
const double a1 = 1.9394, a2 = -0.93978;
const double b1 = 0.41022, b2 = -0.40636;
void lei_de_controle() {
    // Cálculo do erro
    e_k = temperatura - Setpoint;
    // Aplicação da equação de controle
    u_k = u_k1 * a1 + u_k2 * a2 + e_k1 * b1 + e_k2 * b2;
    // Atualização das variáveis de iteração
    u_k2 = u_k1; u_k1 = u_k; e_k2 = e_k1; e_k1 = e_k;
    // Limitação da saída para 0-24V (escala para PWM de 0-255)
    u_k = constrain(u_k, 0, 24);
    pwm_signal = map(u_k, 0, 24, 0, 100);
    // Aplicação do PWM na FAN
    setPWM(pwm_signal);
    // Debug no Serial Monitor
    delay(500); // Atualiza a cada 500ms
}
```

Código 5 - Controlador aplicado no arduino.

Fonte: Autoria Própria (2025)

RESULTADOS PRÁTICOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA FECHADA

Realizaram-se dois diferentes testes no sistema em malha fechada, a fim de verificar a ação do controlador quando alterado o ponto de temperatura desejado *setpoint* ao longo do tempo.

No primeiro teste (Figura 13), configurou-se o *setpoint*, que, a priori, estava em 35 °C, para um *setpoint* de 55 °C. É possível observar que o sistema busca se ajustar aos 55 °C, mas com algumas variações.

Essas oscilações são atribuídas ao tempo de estabelecimento do controlador, bem como à natureza da variável controlada, que é a temperatura. No entanto, o gráfico mostra que essa variação tende a se estabilizar com o passar do tempo.

Ao analisar a relação entre o erro e o sinal de controle (PWM), nota-se uma proporcionalidade direta: quanto maior o erro, maior a atuação do PWM. Isso indica que, ao detectar que a temperatura interna está acima do *setpoint*, o sistema aciona a FAN com mais intensidade.

Esse comportamento confirma que o controlador responde de maneira coerente ao desvio de temperatura, aumentando a ação de resfriamento sempre que necessário para reduzir o erro e estabilizar a estufa.

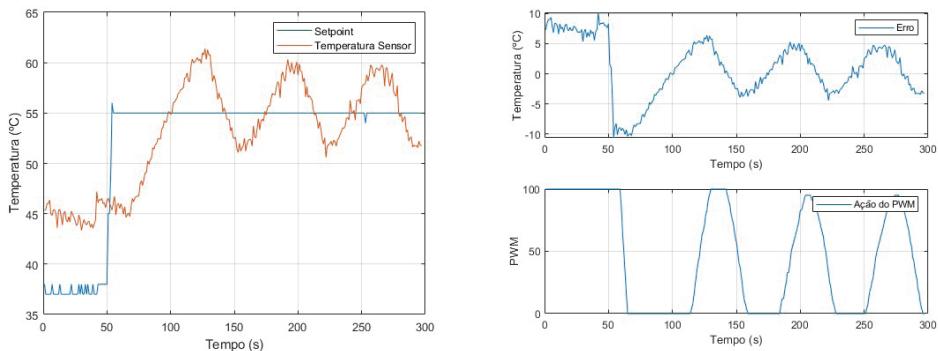


Figura 13 - Primeiro teste, comportamento da temperatura, PMW e erro em função do setpoint em 55 °C.

Fonte: Autoria Própria (2025)

Outra observação válida é que o sistema tenta se ajustar aos 35°C no começo, mas como a estufa já estava em sua temperatura mínima (próxima a 45°C), o erro não pôde atingir o seu mínimo, o que resulta em o PWM permanecer sempre ligado.

No segundo teste, ao contrário do primeiro, definiu-se o *setpoint* para valores menores que a temperatura dentro da estufa e executou-se a alteração do *setpoint* quatro vezes: em 82°C em 70°C, em 60°C e em 50°C. Portanto, o tempo da coleta dos dados foi maior.

Ao observar o gráfico, nota-se que houve oscilações na temperatura do sensor em comparação com o *setpoint*, o que se observou no primeiro teste também, mas como esse ficou exposto à um tempo maior, evidenciou-se ainda mais a tendência em diminuir essa variação.

Já a comparação do erro com a ação do PWM, fica ainda mais claro como comportamento do gráfico de ambos se comportam da mesma maneira.

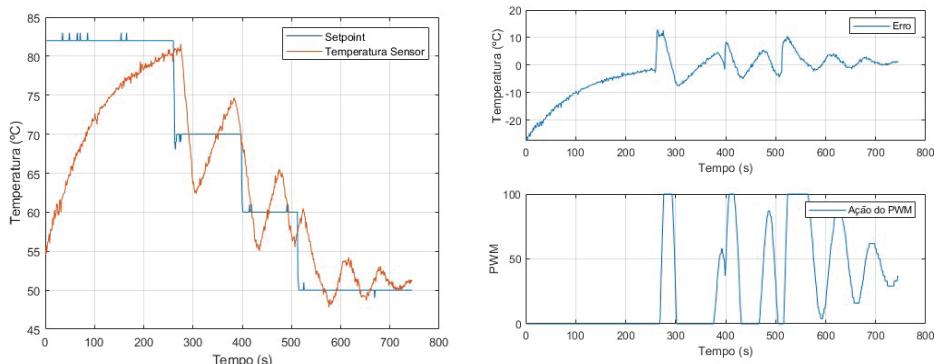


Figura 14 - Segundo teste, comportamento da temperatura, PWM e erro em função do setpoint variável.

Fonte: Autoria Própria (2025)

CONCLUSÃO

O trabalho atingiu seus objetivos ao construir a estufa, implementar o monitoramento da temperatura e projetar um controlador PI em tempo discreto para acionar uma FAN para o resfriamento.

Adotou-se o controlador do tipo proporcional-integral (PI) e este apresentou desempenho satisfatório ao conseguir estabilizar a temperatura no *setpoint* desejado. No entanto, observou-se um tempo de estabelecimento considerável, o que pode ser aprimorado em futuras implementações.

De modo geral, os resultados demonstraram a viabilidade do sistema proposto para o controle térmico da estufa.

Uma possibilidade para trabalhos futuros é realizar o mesmo desafio, mas utilizar uma abordagem dos espaços de estados e comparar os resultados com os obtidos neste estudo, a fim de avaliar possíveis melhorias no desempenho do controlador.

REFERÊNCIAS

- Andrade, P. A., Silva, L. E. C., & Rossini, F. L. (2023). *Análise de circuito elétrico RLC de três malhas via transformada de Laplace com softwares Matlab® e LTspice®*. In *Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa*. <https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1385-555f8de349bbc8aa7c8bc5fe5621a7bdcf369b3d4e555e681528449d05d62fed.pdf>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control* (1st ed.). ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Bejan, A. (2013). *Convection heat transfer* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Canhan, D. C., Brolin, L. B., & Rossini, F. L. (2023). *Design, simulation and analysis of challenges of parametric estimation algorithms applied to adaptive control by reference model*. In Seven Editora, *Development and its applications in scientific knowledge*. <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-247>

Coldebella, H., & Rossini, F. L. (2023). *Design and simulation of a model reference adaptive control system using the recursive least squares method with forgetting factor for gain adjustment*. In Seven Editora, *Development and its applications in scientific knowledge* (pp. 3499–3515). <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-287>

Cristofoli, C. B., Rossini, F. L., & Monteiro, A. L. R. (2024). *Desenvolvimento de uma estação portátil de crioterapia e hipertermoterapia com o microcontrolador PIC16F874A para controle PID de temperatura*. In H. C. Brito (Ed.), *Ciência, tecnologia e inovação: tendências e desafios para o desenvolvimento científico e tecnológico* (Vol. 2, pp. 107–122). Amplia. <https://doi.org/10.51859/amplia.cti4345-8>

Figueiredo, G., Souza, J. C., Oliveira, P. H. M., & Rossini, F. L. (2023). *Solução e análise das formas de onda de sistema linear, discreto e invariante no tempo*. In *Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa*. <https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1395-73709f521d592983364c94fcf5bc79ed558665009290a70f6f02434daaebf35a.pdf>

Franklin, G. F., Powell, J. D., & Workman, M. L. (1998). *Digital control of dynamic systems* (3rd ed.). Pearson.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Maran, M. E. S., Pradela, W. G. L., & Rossini, F. L. (2023). *Modelagem no domínio do tempo, discretização com segurador de ordem zero e simulação computacional de um circuito passivo*. In *Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa*. <https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/554-15241c3f7833f712d1aef527331266986fdec801538fed9005ecb5bd0b909d2c.pdf>

Nise, N. S. (2013). *Engenharia de sistemas de controle* (6^a ed.). LTC.

Ogata, K. (1995). *Discrete-time control systems* (2nd ed.). Prentice-Hall.

Ogata, K. (2010). *Engenharia de controle moderno* (5^a ed.). Pearson Prentice Hall.

Pawelski, L., Rossini, F. L., & Brolin, L. C. (2022). *Projeto e implementação de um controlador digital aplicado a uma estação de solda com temperatura variável*. In *Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/546233-projeto-e-implementacao-de-um-controlador-digital-aplicado-a-uma-estacao-de-solda-com-temperatura-variavel/>

Pawelski, L., Rossini, F. L., & Coldebella, H. (2022). *Desenvolvimento de um aplicativo estimador não paramétrico de função de transferência de processos industriais (EnPFTPI)*. In *Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. [https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/546232-desenvolvimento-de-um-aplicativo-estimador-nao-parametrico-de-funcao-de-transferencia-de-processos-industriais-\(e/](https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/546232-desenvolvimento-de-um-aplicativo-estimador-nao-parametrico-de-funcao-de-transferencia-de-processos-industriais-(e/)

Seifert, N., & Rossini, F. L. (2023). *Modelagem no domínio do tempo e solução no domínio da frequência de circuito passivo chaveado de três malhas*. In *Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa*. <https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/431-2c8e0637c263042c2cda7279ab9152729265528f16adf19a312676ceb5a58469.pdf>

Shankar, R. (2019). *Fundamentals of physics I: Mechanics, relativity, and thermodynamics* (Expanded ed.). Yale University Press.

Silva, V. A., Pontim, F. M., Oliveira, J. M. S., Oliveira, L., & Rossini, F. L. (2023). *Aplicação da transformada de Laplace para a modelagem e análise de um circuito RLC de três malhas*. In *Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa*. <https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/770-607f58f687b73453929fe56d0ac9d9ac034ab042bc0e64072b8b90768db27802.pdf>