

CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE ESTUFA E USO DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DISCRETO PARA CONTROLE DE TEMPERATURA

CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE GREENHOUSE AND USE OF DISCRETE PROCESSING TECHNIQUES FOR TEMPERATURE CONTROL

CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERNADERO Y UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DISCRETO PARA EL CONTROL DE LA TEMPERATURA



10.56238/edimpacto2025.023-005

Ivo Chirolí Neto

Discente em Engenharia de Eletrônica pela UTFPR-CM.
E-mail: ivoneto@alunos.utfpr.edu.br

Matheus Eduardo dos Santos Maran

Discente em Engenharia de Eletrônica pela UTFPR-CM.
E-mail: matheusmaran@alunos.utfpr.edu.br

Walter Gabriel Lopes Pradela

Discente em Engenharia de Eletrônica pela UTFPR-CM.
E-mail: wpradela@alunos.utfpr.edu.br

Flávio Luiz Rossini

Docente do curso de Engenharia Eletrônica.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil.
E-mail: flrossini@utfpr.edu.br
ID Lattes: 8616413126997528.

RESUMO

Este artigo apresenta a construção um protótipo de estufa e o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura experimental como aplicação do controle discreto de um sistema térmico. A geração e o controle de temperatura se encontra presente no ambiente industrial, onde há vários níveis de complexidade para uso satisfatório da energia térmica. A estrutura é composta por uma caixa de madeira, uma lâmpada de 60 W como fonte de calor e um *cooler* para resfriamento. Realizou-se a medição da temperatura por meio de um sensor termopar, sendo os dados processados por um *Arduino*. Empregou-se o Método dos Mínimos Quadrados para estimativa da caixa cinza do sistema de temperatura na forma de função de transferência em tempo discreto. Determinou-se a conversão de temperatura em tensão do sensor por meio de expressões matemáticas, que permitiu a calibração do sistema. Os resultados se mostraram promissores, uma vez que se trata de uma planta térmica de primeira ordem com histerese e o controlador ser de cunho genérico. Contudo, a análise experimental do controle de temperatura se mostrou desafiadora. O principal fator de desafio no projeto foi a existência da histerese intrínseca neste tipo de sistema. Observou-se sua presença clara em temperaturas mais altas, além da diferença entre a velocidade de aquecimento da lâmpada e a resposta do cooler. Mesmo assim, o

sistema mantém a temperatura dentro dos parâmetros especificados. Uma proposta de melhoria é a implementação de um controle de potência para a lâmpada, para proporcionar um aquecimento mais gradual.

Palavras-chave: Estufa. Controle discreto. Sistema térmico.

ABSTRACT

This article presents the construction of a prototype greenhouse and the development of an experimental temperature control system as an application of discrete control of a thermal system. The generation and control of temperature is present in the industrial environment, where there are various levels of complexity for the satisfactory use of thermal energy. The structure consists of a wooden box, a 60 W light bulb as a heat source and a cooler for cooling. The temperature was measured using a thermocouple sensor and the data was processed by an Arduino. The Least Squares Method was used to estimate the gray box of the temperature system in the form of a discrete-time transfer function. The conversion of temperature into sensor voltage was determined using mathematical expressions, which allowed the system to be calibrated. The results were promising, since this is a first-order thermal plant with hysteresis and the controller is generic. However, the experimental analysis of the temperature control proved challenging. The main challenge in the project was the existence of intrinsic hysteresis in this type of system. Its clear presence was observed at higher temperatures, as well as the difference between the lamp's heating speed and the cooler's response. Even so, the system maintained the temperature within the specified parameters. One proposal for improvement is to implement a power control for the lamp, to provide more gradual heating.

Keywords: Greenhouse. Discrete control. Thermal system.

RESUMEN

Este artículo presenta la construcción de un prototipo de invernadero y el desarrollo de un sistema experimental de control de temperatura como aplicación del control discreto de un sistema térmico. La generación y control de temperatura está presente en el entorno industrial, donde existen varios niveles de complejidad para el aprovechamiento satisfactorio de la energía térmica. La estructura consiste en una caja de madera, una bombilla de 60 W como fuente de calor y un refrigerador para enfriar. La temperatura se midió con un sensor termopar y los datos se procesaron con un Arduino. Se utilizó el método de los mínimos cuadrados para estimar la caja gris del sistema de temperatura en forma de función de transferencia en tiempo discreto. La conversión de la temperatura en tensión del sensor se determinó mediante expresiones matemáticas, lo que permitió calibrar el sistema. Los resultados fueron prometedores, dado que se trata de una central térmica de primer orden con histéresis y que el controlador es genérico. Sin embargo, el análisis experimental del control de la temperatura resultó todo un reto. El principal reto del proyecto fue la existencia de histéresis intrínseca en este tipo de sistemas. Se observó su clara presencia a temperaturas más elevadas, así como la diferencia entre la velocidad de calentamiento de la lámpara y la respuesta del refrigerador. Aun así, el sistema mantuvo la temperatura dentro de los parámetros especificados. Una propuesta de mejora es la implantación de un control de potencia de la lámpara, para proporcionar un calentamiento más gradual.

Palabras clave: Invernadero. Control discreto. Sistema térmico.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de temperatura desempenham um papel fundamental na indústria e são essenciais para garantir a qualidade, segurança e eficiência dos processos de produção. O controle da temperatura é crucial em diversas áreas, como na fabricação de produtos químicos, alimentos e medicamentos, onde pequenas variações podem comprometer a integridade do produto final (Pawelski, Rossini, Brolin; 2022). Em setores como o automotivo e o eletrônico, o controle térmico é necessário para evitar o superaquecimento de componentes sensíveis e garantir o bom funcionamento e a segurança dos produtos. Portanto, o estudo e a implementação de sistemas de temperatura otimizam os processos industriais, além de contribuir para a sustentabilidade e redução de custos operacionais (Cristofoli, Rossini, Monteiro; 2024).

Utilizou-se o método dos mínimos quadrados para estimar os parâmetros da planta (Rossini, 2020). A estimação é de suma importância devido a dificuldade de encontrar um modelo matemático de todos os componentes de um sistema (Pradela, Maran, Rossini, 2023). Um sistema se divide em três grupos, caixa branca onde conhece-se todos os componentes do sistema, caixa cinza que se conhece alguns componentes do sistema e caixa preta onde só se tem acesso as entradas e saídas (Ljung, 1999). Devido a estas limitações muitas vezes presentes em termos reais (caixa cinza e caixa preta) a estimação da planta permite a aproximação de um modelo real completo de não linearidades com um modelo teórico estudado a fundo nas graduações (Pawelski, Rossini, Coldebella; 2022), (Takeno, Rossini, Correa; 2022). Com as informações da estimação da planta, implementa-se um controlador adequado para cada caso (Coldebella, Rossini; 2022a, 2022b, 2023a, 2023b) (Canhan, Brolin, Rossini; 2022a, 2022b, 2023a, 2023b).

Para executar a ação de controle utilizou um *Arduino Uno R3*, logo, a implementação do controlador se deu de forma discreta (Pradela, Maran, Rossini; 2023). A discretização facilita a implementação de um controlador robusto e devido a grande quantidade de sensores com integração para microcontroladores é possível realizar a implementação com poucos componentes se comparado com o controle analógico (Figueiredo, Souza, Oliveira, Rossini; 2023) (Cristofoli, Rossini, Monteiro; 2024).

As Seções II e III, descrevem-se os princípios de funcionamento do sistema e as imagens presentes, respectivamente. Na Seção III, demonstram-se a construção do sistema. Na Seção IV, apresenta-se a modelagem do sistema e cada um de seus componentes. Nas Seções V e VI, demonstram-se os resultados obtidos em malha aberta do modelo e da planta, respectivamente. Nas Seções VII e VIII, ilustram-se os resultados teóricos e práticos obtidos em malha fechada. E na Seção IX, expõe-se a conclusão obtida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS TÉRMICOS

Os sistemas térmicos no ambiente de controle são sistemas dinâmicos que envolvem a regulação de variáveis térmicas, como temperatura, fluxo de calor e pressão, por meio de técnicas de controle. Esses sistemas desempenham um papel crucial em diversas aplicações industriais e comerciais, como climatização, processos químicos, refrigeração e geração de energia. O controle eficiente desses sistemas não apenas garante a qualidade do processo, mas também contribui para a eficiência energética e a redução de custos (Ogata, 2010).

Um sistema térmico de controle é composto por três elementos principais: o **sensor**, o **controlador** e o **atuador**. O sensor realiza medição da variável controlada, como a temperatura, e envia essa informação ao controlador. O controlador compara o valor medido com o *setpoint* e promove ação de controle necessária. Por fim, o atuador aplica essa ação, que pode ser o acionamento de uma resistência elétrica para aquecimento ou a abertura de uma válvula para resfriamento.

A dinâmica de um sistema térmico é governada por princípios de transferência de calor e termodinâmica. A temperatura é a variável mais comum a ser controlada, e sua variação ao longo do tempo pode ser descrita por equações diferenciais baseadas em balanços de energia.

Um sistema térmico possui algumas dificuldades significativas como o atraso de tempo, eficiência energética e não linearidades devido ao comportamento dos materiais sofrerem mudanças à temperaturas diferentes (Ogata, 2010). Ao longo deste artigo tratou-se de algumas dessas dificuldades, identificadas nas próximas seções.

2.2 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS E DISCRETIZAÇÃO

Para a estimativa utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados (Rossini, 2020). Este método é frequentemente utilizado para modelos matemáticos e análise de dados (Luiz Rossini, Santos Martins, Paulo Silva Gonçalves, Giesbrecht; 2018). O Método dos Mínimos Quadrados baseia-se em um conjunto de dados, esse pode ser *online* ou *offline* (Takeno, Rossini, Correa; 2022). O algoritmo busca os parâmetros ótimos para diminuir a soma dos quadrados dos resíduos (Montgomery, Peck, Vining; 2021), onde tais resíduos são a diferença (erro) entre o valor observado e o valor previsto pelo modelo. Desta maneira o algoritmo necessita de um modelo para aproximar os dados com os devidos parâmetros (Haykin; 2014). Na Seção IV, tratou-se do código utilizado para implementação do algoritmo.

A discretização tornou-se essencial com o avanço da tecnologia de semicondutores, em ênfase as de *CPUs*, com a facilidade e custo baixo de adquirir um microcontrolador, diversas técnicas previamente analógicas, migraram para o mundo discreto para serem executadas sistemas embarcados. Na área de controle e de processamento de sinais, a discretização e a forma que ela é empregada em um

sinal ou sistema define quão próximo é em relação ao sinal analógico. Alguns métodos de discretização conhecidos são: discretização de Euler, discretização por diferenciação progressiva ou regressiva, discretização de Tustin (bilinear), entre outros. Neste artigo abordou-se a discretização de Tustin na Seção IV devido sua precisão e estabilidade (Ogata, 1995).

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle são fundamentais em diversas áreas da engenharia e tecnologia, o qual permite que processos dinâmicos operem de forma automática, precisa e estável. Eles podem ser classificados em duas categorias principais: sistemas de controle em malha aberta e sistemas de controle em malha fechada.

Em malha aberta, a saída do sistema não interfere na ação de controle, ou seja, não há *feedback*. Esses sistemas são simples, mas podem ser imprecisos devido à falta de correção de erros causados por perturbações externas. Exemplos incluem máquinas de lavar roupa ou sistemas de temporização. Já os sistemas em malha fechada utilizam realimentação para comparar a saída com o valor desejado (*setpoint*) e ajustar o controle conforme necessário. Isso garante maior precisão, estabilidade e rejeição a distúrbios.

Os controladores mais comuns em malha fechada são do tipo proporcional (P), integral (I) e derivativo (D), ou suas combinações (PI, PD, PID). O controlador PID é amplamente utilizado devido à sua capacidade de minimizar erros em regime permanente (ação integral) e melhorar a resposta transitória (ação derivativa).

Matematicamente, sistemas de controle são modelados por funções de transferência ou equações diferenciais, e representam a relação entre entrada e saída. Técnicas como o lugar das raízes e a análise de frequência são usadas para projetar e analisar a estabilidade e desempenho do sistema.

3 PLANTA

A planta utilizada neste sistema de controle tem como base em uma caixa de madeira de dimensões 20 x 22 cm e altura de 17 cm. Revestiu-se a parte interna da caixa com papel alumínio para melhorar o isolamento térmico e otimizar o controle da temperatura. Além disso, a planta conta com uma tampa de madeira articulada por dobradiças, que permite fácil acesso ao interior do sistema.

Escolheu-se cada parte da planta com base na funcionalidade e na eficiência necessária para o controle da temperatura. A integração entre os elementos permite que o sistema realize medições precisas, promova aquecimento e resfriamento conforme demandado o que garante o equilíbrio da temperatura interna. A lista de materiais empregados na construção da planta e no funcionamento do sistema é apresentada por meio da Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais utilizados na construção da planta.

Materiais:	Quantidade / Dimensões:
Caixa de Madeira	20 x 22 x 17 cm
Papel alumínio	Revestimento interno
Lâmpada incandescente (60W) com soquete	1
<i>Cooler</i> (12 V)	1
Sensor Termopar	1

Fonte: Autoria própria.

A lâmpada incandescente é utilizada como a fonte de calor da planta, portanto ela é responsável por aumentar a temperatura interna do sistema. Fixou-se a lâmpada no centro da base interna da caixa, posicionada estrategicamente para distribuir o calor de forma uniforme em todo o espaço. Escolheu-se uma potência de 60 Watts, pois fornece uma quantidade de calor suficiente para atingir e manter a temperatura desejada de forma controlada. É possível visualizá-la por meio da Figura 1.

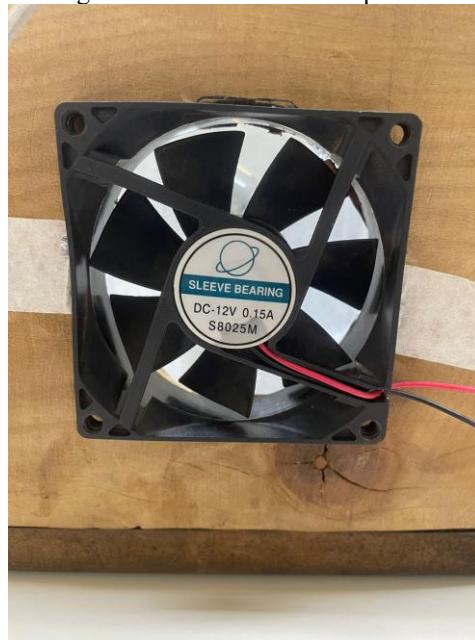
Figura 1 - Lâmpada e soquete inseridos na planta.



Fonte: Autoria própria.

O *cooler*, instalado em uma das laterais da caixa, desempenha a função de resfriamento. Ele entra em operação quando a temperatura interna excede os limites estabelecidos e promove a troca de ar interno com o ambiente externo. Esse componente é essencial para garantir que a temperatura da planta seja reduzida rapidamente e evita o superaquecimento, além de manter o equilíbrio térmico do sistema. O *cooler* já inserido na planta é apresentado na **Figura 2**.

Figura 2: *Cooler* inserido na planta.



Fonte: Autoria própria.

Com todos os componentes integrados, a planta apresenta uma configuração funcional e eficiente. A lâmpada, o cooler e o sensor termopar foram devidamente posicionados no interior da caixa de madeira, enquanto o papel alumínio cobriu as superfícies internas para melhorar o isolamento térmico. Essa estrutura garante o funcionamento correto do sistema e pode ser visualizada na **Figura 3**.

Figura 3: Planta completa.



Fonte: Autoria própria.

Além dos componentes principais, também foram realizados furos nas laterais da caixa com uma parafusadeira. Os furos têm a função de permitir a circulação de ar dentro da planta quando o *cooler* for acionado, o que facilita o processo de troca térmica e acelera a redução da temperatura interna.

Essa modificação estrutural melhora a eficiência do resfriamento, o que garante um fluxo de ar adequado. Esses detalhes também podem ser observados na **Figura 3**, que mostra a planta finalizada com todos os componentes instalados.

4 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA

4.1 EQUIPAMENTO PARA MEDAÇÃO E MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA

Para o monitoramento e controle das variáveis do sistema, utilizou-se um conjunto de equipamentos que possibilitam a medição precisa e o registro das informações em tempo real. O principal elemento responsável pela coleta e processamento dos dados é o *Arduino Uno R3*, que realiza a leitura das medições do sensor termopar e controla os demais componentes do sistema.

O sensor termopar é o dispositivo encarregado de medir a temperatura interna da estufa. Ele converte a variação de temperatura em sinais elétricos, que são enviados ao Arduino para digitalização e interpretação. Com base nesses dados, o Arduino toma decisões sobre o acionamento da lâmpada e do cooler, o que garante que a temperatura interna permaneça dentro dos limites predefinidos.

O *Arduino Uno R3* escolhido devido à sua versatilidade, compatibilidade com o sensor e simplicidade de programação, e permite a integração eficiente dos componentes e a execução das tarefas de controle e monitoramento. Na **Figura 4**, pode-se observar o Arduino utilizado no projeto.

Figura 4 – *Arduino Uno R3*

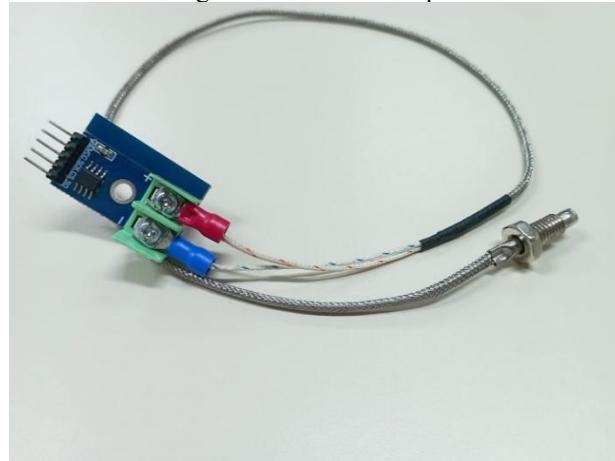


Fonte: Autoria própria

4.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO SENSOR

O sensor utilizado é um termopar do tipo k com um circuito integrado MAX6675, este é responsável por fazer a compensação da junta fria e disponibilizar bits para comunicação com um microcontrolador devido ao seu ADC de 12 bits.

Figura 5: Sensor Termopar



Fonte: Autoria própria

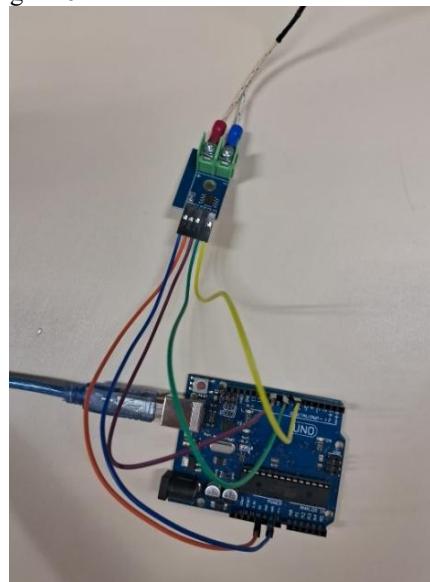
A **Figura 5** demonstra o sensor com o módulo MAX6675 com comunicação por SPI. Devido à estrutura interna do CI, pode-se representar a função transferência do sensor pela **Eq. 1**.

$$FT_{sensor} = \frac{1}{1} \frac{V}{C^\circ} \quad Eq. 1$$

A Função transferência do sensor pode ser considerada 1 pelo fato do processamento dos dados e as compensações de não linearidade são feitas pelo módulo, logo, não há impacto do sensor na planta.

A **Figura 6** mostra as devidas ligações do sensor com a placa *Arduino Uno R3* para a amostragem da temperatura da planta.

Figura 6 – Interface com o microcontrolador



Fonte: Autoria própria

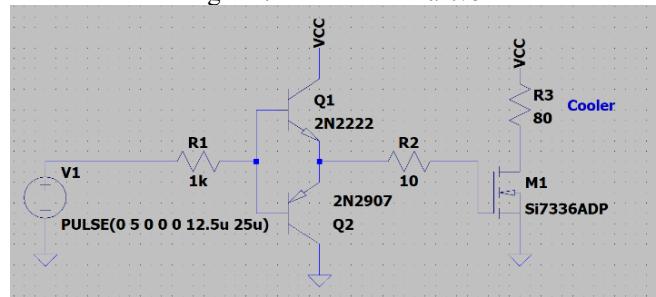
4.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO ATUADOR

Para o atuador utilizou-se um *cooler* (Figura 2) de computador que age como exaustor. O atuador apresenta uma relação de não linearidade devido a tensão mínima para seu acionamento.

Devido à falta de equipamentos e estrutura para conseguir coletar dados do atuador, optou-se por considerar o mesmo como parte da planta, logo sua função de transferência estará embutida na função de transferência da planta.

Para o acionamento do atuador utilizou-se um circuito de *driver* para modular a tensão aplicada ao *cooler*. A Figura 7 demonstra o *driver*.

Figura 7 – Circuito de *driver*



Fonte: Autoria própria

O circuito de acionamento consiste em uma configuração de transistores *Push-pull* para fornecer carga ao capacitor de *Gate* intrínseco do Mosfet M1. A fonte de tensão V1 refere-se ao sinal *PWM* (*Pulse Width Modulation*) proveniente do controlador digital.

O Quadro 1 demonstra o código em C++ utilizado para configurar a frequência do *PWM* em 40kHz.

Quadro 1 – Código do *PWM*

```
void setup()
{
    //Define PB1 (pino 9 UNO) como saída
    DDRB |= (1 << PB1);

    //Zera registradores
    TCCR1A = 0;
    TCCR1B = 0;
    TCNT1=0;

    //Configura Registradores de PWM
    TCCR1B |= (1<<WGM13) | (1<<WGM12) | (1<<CS10); //Seta o preescaler de 1
    TCCR1A |= (1<<WGM11) | (1<<COM1A1) ; //Seta o modo que zera OCR1A (PB1 / pino 9)

    ICR1 = (399); //Valor de TOP, conta de zero até aqui
    OCR1A = (199); //Valor de comparação, define o duty cycle (0-ICR1)
}
```

Fonte: Autoria própria



A função de transferência (FT) do driver é caracterizada pela relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada, dado uma modulação por largura de pulso (*PWM*) aplicada. O driver opera com uma tensão de entrada modulada em *PWM*, e sua saída também é modulada por *PWM*, pois corresponde a uma variação proporcional à entrada.

No caso da tensão máxima, que corresponde a um ciclo de 100% do *PWM*, a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é expressa pela razão:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{12V}{5V} = 2,4 \quad Eq. 2$$

Essa razão implica que, quando o *PWM* atinge 100%, a saída será 2,4 vezes maior do que a tensão de entrada. Essa função de transferência é crucial para o controle preciso da tensão fornecida à estufa-resistência, uma vez que permite ajustar a potência fornecida ao sistema de forma eficiente por meio do *PWM*.

4.4 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA PLANTA (ESTUFA)

Para a coleta de dados referentes a planta, ligou-se a lâmpada de 60 W sem o atuador com o intuito de atingir o regime permanente da planta. Em seguida acionou-se o *cooler* em sua tensão nominal e definiu-se um tempo de amostragem de 1 segundo devido a dinâmica lenta da planta, verificou-se após alguns ensaios que este tempo é satisfatório. Realizou-se os ensaios com aproximadamente 15 minutos. O **Quadro 2** explica o código em C++, que utiliza interrupção para realizar a coleta de dados no *Arduino Uno R3*.

Quadro 2 – Código em C++ para coleta de dados

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <max6675.h>

/* Definições: GPIOs do Arduino utilizado na
comunicação com o MAX6675 */
#define GPIO_SO    7
#define GPIO_CS    8
#define GPIO_CLK   10

//Seta o baudrate
#define BAUDRATE_SERIAL_MONITOR 38400

//Cria objeto MAX6675
MAX6675 termopar(GPIO_CLK, GPIO_CS,
GPIO_SO);

//Armazena valor
volatile float temperatura = 0.0;

//Flag
```

```

volatile bool leutemp = false;

    //Contador
    uint8_t contador=0;

    void setup()
    {
        //Inicia comunicação serial
        Serial.begin(BAUDRATE_SERIAL_MONITOR);

        //Zera registradores
        TCCR2A= 0;
        TCCR2B= 0;

        //Configura Registradores Timer 2 OVF
        TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21); //Seta o moto
        OVF com preescaler de 256

        //Habilita mascara de interrupção para o timer 2
        TIMSK2 |= (1 << TOIE2); //Habilita OVF do timer 2

        sei();
    }

    ISR(TIMER2_OVF_vect)
    {
        //Incrementa contador até chegar em 24 (1s)
        contador++;

        if(contador == 245)
        {

            contador=0;

            //Reseta flag
            leutemp=true;
        }
    }

    void loop()
    {
        if(leutemp)
        {

            //Lê temperatura
            temperatura=termopar.readCelsius();
            //Printa no serial
            Serial.println(temperatura);

            //limpa flag
            leutemp=false;
        }
    }
}

```

Fonte: Autoria própria

As informações coletadas estão em tempo discreto e com quais, temperatura e seus respectivos tempos de amostragem, utilizou-se o *toolbox system identification* do *Matlab®* para realizar a estimativa dos parâmetros e assim plotar a resposta. No **Quadro 3** está exposto a sintaxe utilizada para obter a resposta simulada.

Quadro 3 – Sintaxe do matlab

```

close all;
clear all;
clc;

% Defini-se os vetores de entrada e saída
y_vetor = readtable("MA3_vent.txt"); % saída
tamanho = height(y_vetor); % Obtém o tamanho do
vetor de dados
u_vetor = 12*ones(tamanho,1); % entrada
y_vetor = table2array(y_vetor);

% Vetor de Regressores: psi = [y(k-1) u(k)]
% Pré-alcando as variáveis para os valores de y1, u1
y1 = y_vetor(1:tamanho-1); % y(k-1)
u1 = u_vetor(2:tamanho); % u(k)

% Construção da matriz X
X = [y1 u1];

% Vetor Y com os valores de y(k) a partir de k=2 em
diante
Y = y_vetor(2:tamanho);
teta = inv(X'*X)*X'*Y % define a matriz teta, aqui está a
estimação de parâmetros

y(1) = y_vetor(1); % Condição inicial
for k=2:tamanho
    u(k)=u_vetor(k);
    y(k)=teta(1)*y(k-1) + teta(2)*u(k);
end
% Plota as respostas
t = 1:1:tamanho;
plot(t(:,y(:))), grid on % Modelo obtido
hold on
plot (t(:,y_vetor(:))) % Dados reais
erro = sum(abs(y'-y_vetor));
erro_medio = erro/tamanho % Calculo do erro médio
entre as curvas.

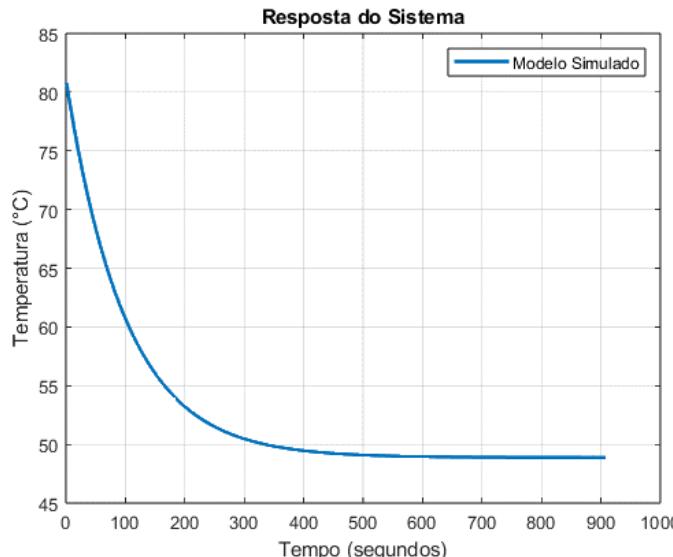
```

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS TEÓRICOS DO SISTEMA EM MALHA ABERTA

Para validar os dados teóricos do sistema, utilizou-se o software Matlab® para determinar a função de transferência da planta. A **Figura 8** apresenta o gráfico da função de transferência obtida.

Figura 8 - Gráfico simulado



Fonte: Autoria própria

A estimativa realizada emprega método dos mínimos quadrados, o qual utiliza a equação a diferenças apresentada na **Eq. 3**.

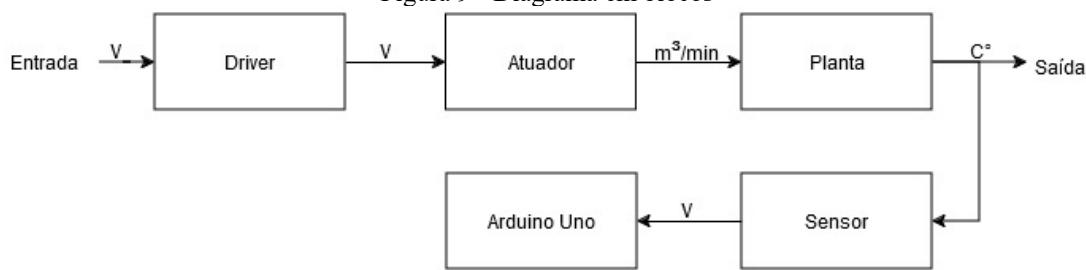
$$y(k) = \text{teta}(1)y(k-1) + \text{teta}(2)u(k) \quad \text{Eq. 3}$$

Posteriormente, utilizou-se essa mesma equação de forma inversa para encontrar a **Eq. 4**, que representa a função de transferência no domínio Z.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0,0406z}{z - 0,99} \quad \text{Eq. 4}$$

Para uma compreensão mais clara do comportamento do sistema, a **Figura 9** exibe o diagrama de blocos do sistema em malha aberta, onde ilustra-se as interações entre os componentes e a planta.

Figura 9 - Diagrama em blocos



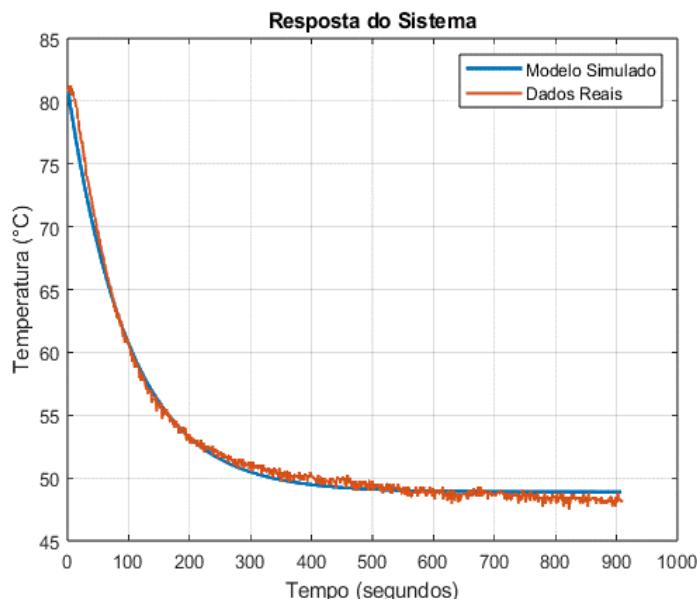
Fonte: Autoria própria

A partir do diagrama de blocos apresentado, é possível visualizar como as variáveis do sistema se inter-relacionam em malha aberta. Essa configuração permite analisar a resposta da planta sem a interferência de um controlador e fornece informações cruciais sobre o comportamento dinâmico do sistema, como sua estabilidade e tempos de resposta.

6 RESULTADOS PRÁTICOS DO SISTEMA EM MALHA ABERTA

Para validar o modelo matemático, plotou-se a função transferência experimental e a função transferência do modelo matemático. A **Figura 10** expressa os dois gráficos no ambiente do *software Matlab®*.

Figura 10 – Validação do modelo



Fonte: Autoria própria.

Desta maneira a equação a diferenças estimada resulta em:

$$y(k) = 0,99y(k-1) + 0,0406u(k) \quad Eq. 5$$

Notou-se que existe um erro entre o simulado e o teórico, para validar além de maneira visual, realizou-se o erro médio dos valores do vetor estimado e o vetor de dados coletados. Obteu-se:

$$Erro_{médio} = 0,4683 \quad Eq. 6$$

Devido ao erro pequeno expresso na **Eq.6**, verificou-se matematicamente que o modelo estimado está próximo o suficiente para utilizar na sintonia do controlador.

7 RESULTADOS TEÓRICOS DO SISTEMA EM MALHA FECHADA

7.1 SINTONIA DO CONTROLADOR

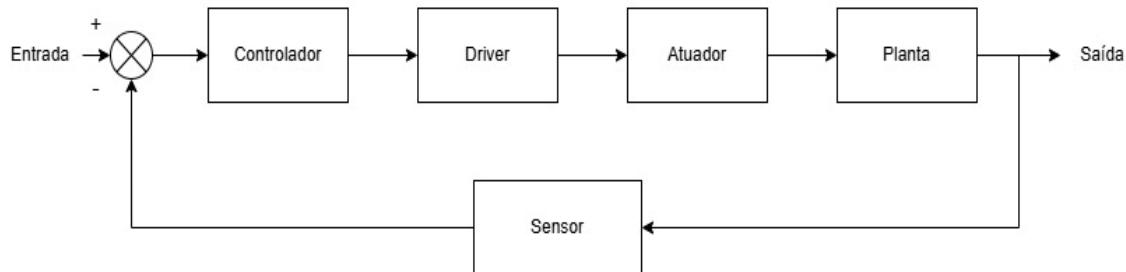
Utilizou-se neste projeto um controlador Proporcional-Integral (PI), pois o objetivo era eliminar o erro em regime permanente do sistema. O controlador PI possui como principais características a ação proporcional, que reage imediatamente às variações do erro, e a ação integral, que acumula o erro ao longo do tempo e ajusta a saída do sistema para minimizar alterações.

Para implementar esse controlador, realizou-se a sua discretização, através do método de Tustin. Esse processo envolveu a análise isolada do erro do sistema, sem a necessidade de um estudo aprofundado da planta. Embora a planta possua influência na resposta final, considerou-se apenas o modelo matemático do erro para realizar o projeto do controlador.

O controlador atua de maneira inversamente proporcional ao erro. Quando o erro é positivo, ou seja, a temperatura medida está acima do valor de referência, o atuador (cooler) é acionado para reduzir a temperatura. Caso o erro seja negativo, indica que a temperatura está abaixo do valor desejado, o atuador é desativado para permitir o aquecimento.

Por meio da **Figura 11**, é possível visualizar o diagrama de blocos do sistema em malha fechada, desenvolvido no software *Flowchart Maker*.

Figura 11 – Diagrama de blocos



Fonte: Autoria própria.

Este diagrama ilustra as principais interações entre os componentes do sistema e inclui o controlador projetado, o driver, o atuador, a planta e o sensor.

7.2 IMPLEMENTAÇÃO DA LEI DE CONTROLE NO MICROCONTROLADOR

Para implementar o controlador PI no microcontrolador, assim como nas outras etapas, desenvolveu-se um código na linguagem C++ que ajusta a ação de controle com base no erro medido. O código contém os cálculos do controlador e a discretização pelo método de Tustin. É possível visualizar esse código no **Quadro 4** descrito abaixo.

Quadro 4 – Código com a implementação do controlador e a lei de controle.

```

void loop()
{
    if(leutemp)
    {

        //Lê temperatura
        temperatura=termopar.readCelsius();

        //Printa no serial
        Serial.println(setpoint);
        Serial.println(temperatura);
        Serial.println(Erro);

        //limpa flag
        leutemp=false;
    }

    Erro = setpoint-temperatura;

    //Lei de controle
    u = -(k+k*a/2)*Erro-((a*k)/2)-k)*Erro_k1+u_k1;

    //Trunca resultado
    if(u>399) u=399;

    if(u<=0){
        //Escreve pwm registrador
        OCR1A = (0); //Valor de comparação, define o duty
        cycle (0-ICR1)
        if(u<150) u=-150;
    }

    if(u>0){
        if(u>150){
            //Escreve pwm registrador
            OCR1A = (u); //Valor de comparação, define o duty
            cycle (0-ICR1)
        }
        else OCR1A = (150); //Valor de comparação, define o
        duty cycle (0-ICR1)
    }

    //Atualiza valores passados
    Erro_k1=Erro;
    u_k1=u;
}

```

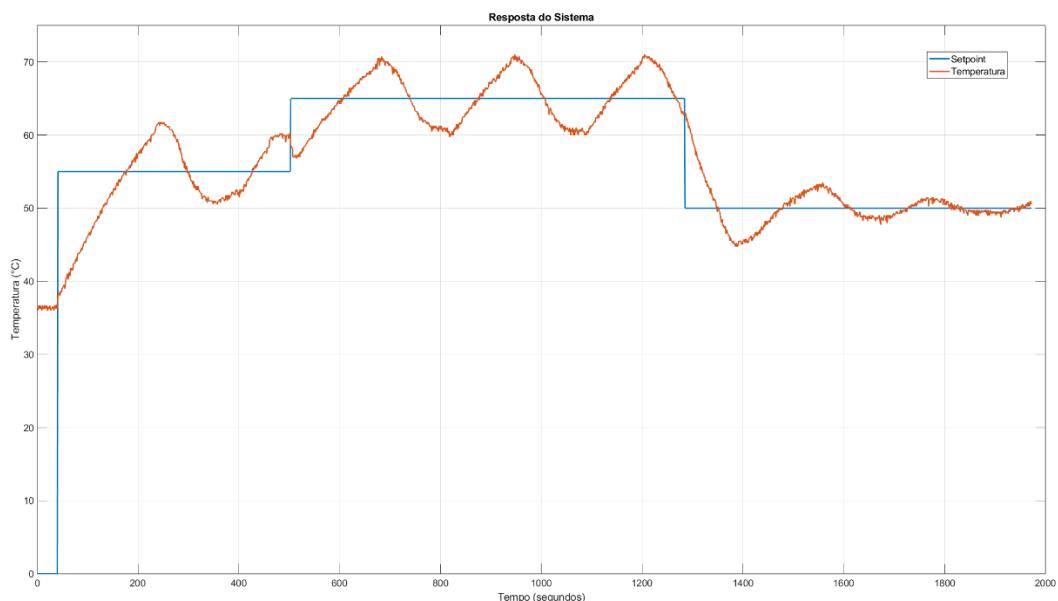
Fonte: Autoria própria.

A solução implementada garante que o controle seja eficiente e estável, o que permite ajustes finos no comportamento do sistema. A validação experimental demonstrou que a resposta em malha fechada atende aos requisitos do projeto, proporciona um controle relativamente preciso da temperatura da estufa.

8 RESULTADOS PRÁTICOS DO SISTEMA EM MALHA FECHADA

Realizou-se um ensaio onde mudou-se o *Setpoint* e registrou-se os valores do controlador e como este acompanhava o sinal de referência. Para este ensaio utilizou-se os seguintes valores de *Setpoint*, 55 °C, 65 °C e 50 °C. Na **Figura 12** está expressa o gráfico referente ao ensaio, o eixo X representa o número de amostras, como dito anteriormente o tempo de amostragem é de 1 segundo.

Figura 12 – Resultados



Fonte: Autoria Própria.

A partir da **Figura 12**, observa-se que o controlador consegue acompanhar o sinal de referência. Entretanto, notou-se que, em temperaturas mais altas, a histerese se torna mais evidente, como no *Setpoint* de 65 °C, que apresentou uma variação de aproximadamente 5 °C. Já em temperaturas de referência menores, a histerese é reduzida, onde o controlador quase se aproxima de um erro nulo, como no caso do *Setpoint* de 50 °C.

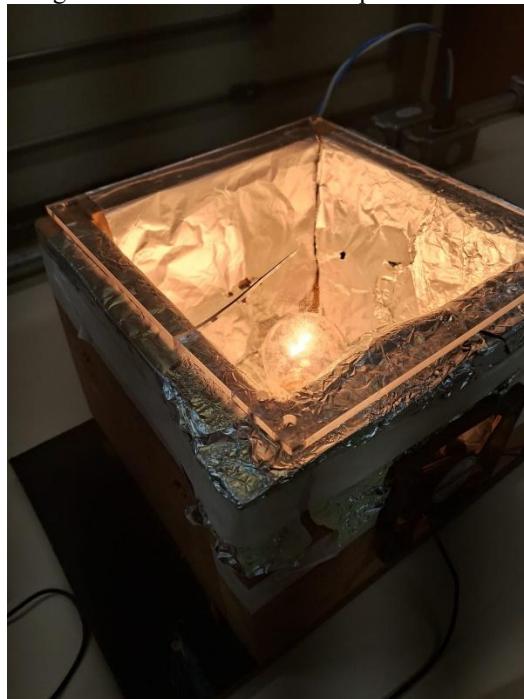
Esse comportamento está diretamente relacionado à atuação do *PWM*. Em temperaturas mais baixas, o controlador consegue trabalhar de forma mais eficiente, pois a variação dentro do *range* de 0 a 399 permite ajustes mais significativos sem saturação. Dessa forma, um *Duty-Cycle* de 40% pode ser suficiente para alcançar o *Setpoint* ou manter a temperatura estável em caso de erro nulo.

Outro fator que influencia a histerese é a diferença entre a velocidade de aquecimento da lâmpada e a resposta do atuador. A lâmpada aquece rapidamente, enquanto o cooler não consegue compensar a variação com a mesma velocidade, o que resulta em oscilações térmicas. Apesar disso, o sistema manteve um desempenho satisfatório dentro dos limites estabelecidos. Uma possível solução para mitigar essa histerese seria controlar a potência da lâmpada, o que permitiria um aquecimento mais gradual. No entanto, essa abordagem alteraria a linearidade do sistema, o que não era o objetivo

inicial do projeto. A solução adotada garantiu que, apesar da histerese observada, o sistema se mantivesse funcional e adequado às exigências do projeto.

Além das questões relacionadas à resposta térmica, observou-se um problema estrutural na tampa da estufa. Inicialmente fabricada em acrílico, a tampa sofreu rachaduras devido à exposição prolongada à alta temperatura. A **Figura 13** ilustra esse dano.

Figura 13 – Rachadura na Tampa de Acrílico



Fonte: Autoria própria.

Embora o dano estrutural não tenha comprometido as medições do sistema, a escolha de um material mais resistente ao calor poderia minimizar esse problema em implementações futuras.

9 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste projeto permitiu a implementação e validação de um sistema de controle de temperatura para uma estufa experimental, com um controlador PI e um microcontrolador *Arduino Uno R3*. O sistema mostrou-se eficiente na regulação térmica e garantiu a manutenção da temperatura dentro dos limites estabelecidos.

A modelagem do sistema ocorreu por meio da obtenção da função de transferência da planta, através o método dos mínimos quadrados. Projetou-se e discretizou-se o controlador pelo método de Tustin, o que possibilitou a implementação digital eficiente do controle. A validação em malha fechada demonstrou que o sistema responde adequadamente às variações de temperatura, mesmo diante das dificuldades encontradas.

Além da eficiência do controle, a análise experimental evidenciou desafios e melhorias potenciais. A histerese observada, especialmente em temperaturas mais altas, ressalta da diferença entre a velocidade de aquecimento da lâmpada e a resposta do cooler. Apesar disso, o sistema pôde manter a temperatura dentro dos parâmetros desejados. Uma possível melhoria futura seria a implementação de um controle de potência para a lâmpada, para proporcionar um aquecimento mais gradual.

Outro ponto importante seria a escolha dos materiais estruturais. A tampa da estufa, feita de acrílico, apresentou rachaduras devido à exposição prolongada ao calor. Embora isso não tenha comprometido o funcionamento do sistema, a substituição por um material mais resistente pode aumentar a durabilidade da estrutura.

Conclui-se que o sistema desenvolvido atendeu aos objetivos propostos, e demonstrou a viabilidade do controle de temperatura em uma estufa por meio de técnicas de controle digital. O projeto pode ser expandido com futuras melhorias, como o refinamento dos métodos de controle e a integração de novos sensores e atuadores, para um desempenho ainda mais preciso.

REFERÊNCIAS

LJUNG, Lennart. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. Prentice Hall, 1999.

CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Aplicação do método do gradiente e do método dos mínimos quadrados recursivo para análise de desempenho do controle adaptativo por modelo de referência. In: DALLAMUTA, J.; HOLZMANN, H. A. Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2. Ponta Grossa: Atena, 2022b. p. 91-100. ISBN 9786525807270. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211118>. Acesso em: 13 jun. 2025.

CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Comparação entre Estimadores Paramétricos Aplicados ao Controle Adaptativo por Modelo de Referência. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022a. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548540-comparacao-entre-estimadores-parametricos-aplicados-ao-controle-adaptativo-por-modelo-de-referencia/>. Acesso em: 06 jun. 2025.

CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. 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. São José dos Pinhais: Seven Editora, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-247>. Acesso em: 13 mai. 2025.

CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Projeto e Análise de Desempenho de Algoritmos de Estimação Paramétrica Aplicados ao Controle Adaptativo por Modelo de Referência. In: SOARES, A. M. Tópicos Especiais em Engenharia: inovações e avanços tecnológicos 6. Ponta Grossa: Aya, 2023b. p. 42-54. ISBN 9786553792555. Disponível em: <https://doi.org/10.47573/aya.5379.2.186.3>. Acesso em: 13 mai. 2025.

COLDEBELLA, H.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Análise de algoritmos de estimação paramétrica aplicados ao projeto de controlador adaptativo por modelo de referência. In: DALLAMUTA, J.; HOLZMANN, H. A. Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2. Ponta Grossa: Atena, 2022b. p. 47-58. ISBN 9786525807270. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114>. Acesso em: 13 jun. 2025.

COLDEBELLA, H.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Comparação entre Algoritmos de Adaptação Paramétrica aplicados ao Projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022a. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548802-comparacao-entre-algoritmos-de-adaptacao-parametrica-aplicados-ao-projeto-de-controlador-adaptativo-por-modelo-de/>. Acesso em: 06 jun. 2025.

COLDEBELLA, H.; ROSSINI, F. L.. Desenvolvimento e Implementação do Método dos MQR-FE Acoplado a um Sistema de CAMR. In: BARBOSA, F. C.. Engenharia de Controle e Automação: estudos fundamentais. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, 2023b. ISBN 9786553672604. Disponível em: <https://doi.org/10.37423/230107095>. Acesso em: 13 jun. 2025.

COLDEBELLA, H.; ROSSINI, F. L.. 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. São José dos Pinhais: Seven Editora, 2023a. p. 3499-3515. ISBN 978-65-84976-28-3. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-287>. Acesso em: 18 mai. 2025.

CRISTOFOLI, C. B.; ROSSINI, F. L.; MONTEIRO, A. L. R.. Desenvolvimento de uma Estação Portátil de Crioterapia e Hipermotterapia com o Microcontrolador PIC16F874A para Controle PID de Temperatura. In: BRITO, H. C. Ciência, tecnologia e inovação: tendências e desafios para o desenvolvimento científico e tecnológico - Vol. 2. Campina Grande: Amplia, 2024. p. 107-122. DOI: 10.51859/amplia.cti4345-8. Disponível em: <https://ampliaeditora.com.br/publicacoes/7001/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

FIGUEIREDO, G.; SOUZA, J. C.; OLIVEIRA, P. H. M.; ROSSINI, F. L.. 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, 2023. Disponível em: <https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1395-73709f521d592983364c94fcf5bc79ed558665009290a70f6f02434daaebf35a.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2025.

HAYKIN, S.. Adaptive Filter Theory. Pearson, 2014.

LUIZ ROSSINI, F.; SANTOS MARTINS, G.; PAULO SILVA GONÇALVES, J.; GIESBRECHT, M.. Recursive identification of continuous time variant dynamical systems with the extended kalman filter and the recursive least squares state-variable filter.

In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATICS IN CONTROL, AUTOMATION AND ROBOTICS, 2018, Porto, Portugal. 15th international conference on informatics in control, automation and robotics. [S. l.]: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018. ISBN 9789897583216. Disponível em: <https://doi.org/10.5220/0006865504680475>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A., VINING, G. G.. Introduction to Linear Regression Analysis. Wiley, 2021.

OGATA, Katsuhiko. Discrete-time control systems. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1995.

OGATA, Katsuhiko. Modern Control Engineering, 4th ed, Pearson Education (Singapore) Pvt. Ltd., New Delhi, 2005.

PAWELSKI, L.; ROSSINI, F. L.; COLDEBELLA, H.. 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. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: [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/). Acesso em: 07 jun. 2025.

PAWELSKI, L.; ROSSINI, F. L.; BROLIN, L. C.. 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. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/546233-projeto-e-implementacao-de-um-controlador-digital-aplicado-a-uma-estacao-de-solda-com-temperatura-variavel/>. Acesso em: 07 jun. 2025.

PRADELA, W. G. L.; MARAN, M. E. S.; ROSSINI, F. L.. Estimação de Parâmetros em Tempo Real Aplicado a um Sistema em Tempo Discreto. In: BARBOSA, F.C.. Engenharia: a máquina que constrói o futuro. 17^a ed. Piracanjuba-GO: Editora Conhecimento Livre, 2023. ISBN 9786553674240. Disponível em: <https://doi.org/10.37423/231208520>. Acesso em: 1 jun. 2025.



ROSSINI, F. L.. Métodos de Filtragem, Estimação e Controle Adaptativo Indireto Aplicados a Sistemas de Teleoperação Bilateral. pt. PhD thesis. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas, 2020, p. 92.

Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_5352e51a243f79505f3fc67ff71075ee. Acesso em: 06 jun. 2025.

TAKEMOTO, V. S.; ROSSINI, F. L.; CORREA, W. J.. Modelagem de um Sistema Caixa-Cinza por meio do Método dos Mínimos Quadrados a partir de Identificação ARX. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/547687-modelagem-de-um-sistema-caixa-cinza-por-meio-do-metodo-dos-minimos-quadrados-a-partir-de-identificacao-ark/>. Acesso em: 07 jun. 2025.