v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA ELETROMECÂNICO PARA CONTROLE DA TEMPERATURA EM SECADOR DE BANDEJAS

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM FOR TEMPERATURE CONTROL IN A TRAY DRYER

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ELECTROMECÁNICO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN UN SECADOR DE BANDEJAS

Guilherme de Figueiredo Furtado[1], Philipe dos Santos[2], Mayara de Souza Queirós[3], Alexandre Gonçalves Porto[4], Thiago Cavalheiro Montebugnoli[5], Amabilis Rayana Del Vechio De Campos[6], Bianca Moreira Vicente[7], Jose Rafel Franco[8], Geraldo de Nardi Junior[9], Victor Crespo de Oliveira[10]

e7109140
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9140

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

O controle da temperatura do ar é importante em processos de secagem para manter condições térmicas consistentes durante a operação. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e realizar uma avaliação experimental preliminar de um controlador automático para a temperatura do ar em um secador de bandejas em escala de bancada. O sistema, denominado Controlador e Indicador de Temperatura (CIT 1.0), foi desenvolvido utilizando sensor LM35, microcontrolador baseado no PIC16F628, servo posicional e circuito de controle de potência com TRIAC. O controlador foi avaliado utilizando temperaturas de referência (set points) de 40, 50 e 60 °C, com uma série temporal de 200 min para cada condição, sem repetições experimentais independentes. Para a caracterização quantitativa, foram considerados os registros obtidos a partir de 30 min de operação, sendo calculados a temperatura média, o desvio-padrão, o erro absoluto médio (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE). As temperaturas médias observadas foram de 40,21 ± 1,61, 50,22 ± 0,70 e 60,02 ± 1,32 °C para os set points de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. No ensaio realizado a 50 °C foram observados os menores valores de dispersão, MAE (0,55 °C) e RMSE (0,71 °C) entre as três séries temporais avaliadas. Os resultados permitiram caracterizar preliminarmente o funcionamento do CIT 1.0 e sua capacidade de automatizar a regulagem da potência do secador, mantendo, nas séries avaliadas, as temperaturas médias próximas aos respectivos valores de referência. Entretanto, devido à ausência de repetições experimentais independentes e de calibração do sensor com instrumento de referência, os resultados devem ser interpretados de forma descritiva, não permitindo estabelecer superioridade de desempenho entre as condições avaliadas.

PALAVRAS-CHAVE: Automação. Controle de temperatura. Secagem. Instrumentação. Microcontrolador.

[1] Doutor em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de São Carlos, Buri-SP.
[2] Doutor em Engenharia de Alimentos, Universidade do Estado de Mato Grosso, Barra do Bugres-MT.
[3] Doutora em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de São Carlos, Buri-SP.
[4] Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade do Estado de Mato Grosso, Barra do Bugres-MT.
[5] Informática com ênfase em gestão de negócios, Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Botucatu-SP.
[6] Engenharia Agronômica, Uneduvale Avaré, Avaré-SP.
[7] Graduada em Administração, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.
[8] Doutor em Engenharia Agrícola, Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Botucatu-SP.
[9] Professor Dr. do curso de Tecnologia em Agronegócio da Faculdade de Tecnologia de Botucatu-SP.
[10] Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de São Carlos, Buri-SP.

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

ABSTRACT
Air temperature control is important in drying processes to maintain consistent thermal conditions during operation. This study aimed to develop and conduct a preliminary experimental evaluation of an automatic air temperature controller for a bench-scale tray dryer. The system, named the Temperature Controller and Indicator (CIT 1.0), was developed using an LM35 sensor, a PIC16F628-based microcontroller, a positional servo motor, and a TRIAC-based power control circuit. The controller was evaluated at temperature set points of 40, 50, and 60 °C, using one 200-min time series for each condition, without independent experimental replicates. For quantitative characterization, data recorded after 30 min of operation were considered, and the mean temperature, standard deviation, mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE) were calculated. The mean temperatures observed were 40.21 ± 1.61, 50.22 ± 0.70, and 60.02 ± 1.32 °C for set points of 40, 50, and 60 °C, respectively. In the test conducted at 50 °C, the lowest values of dispersion, MAE (0.55 °C), and RMSE (0.71 °C) were observed among the three time series evaluated. The results provided a preliminary characterization of the operation of the CIT 1.0 and its ability to automate the dryer power adjustment, maintaining, in the evaluated time series, mean temperatures close to their respective set points. However, due to the absence of independent experimental replicates and sensor calibration against a reference instrument, the results should be interpreted descriptively and do not allow conclusions regarding superior performance among the evaluated conditions.

KEYWORDS: *Automation. Temperature control. Drying. Instrumentation. Microcontroller.*

RESUMEN
El control de la temperatura del aire es importante en los procesos de secado para mantener condiciones térmicas consistentes durante la operación. Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar y realizar una evaluación experimental preliminar de un controlador automático de la temperatura del aire en un secador de bandejas a escala de laboratorio. El sistema, denominado Controlador e Indicador de Temperatura (CIT 1.0), fue desarrollado utilizando un sensor LM35, un microcontrolador basado en el PIC16F628, un servomotor posicional y un circuito de control de potencia con TRIAC. El controlador fue evaluado utilizando temperaturas de referencia (set points) de 40, 50 y 60 °C, con una serie temporal de 200 min para cada condición, sin repeticiones experimentales independientes. Para la caracterización cuantitativa, se consideraron los registros obtenidos a partir de los 30 min de operación y se calcularon la temperatura media, la desviación estándar, el error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Las temperaturas medias observadas fueron de 40,21 ± 1,61, 50,22 ± 0,70 y 60,02 ± 1,32 °C para los set points de 40, 50 y 60 °C, respectivamente. En el ensayo realizado a 50 °C se observaron los menores valores de dispersión, MAE (0,55 °C) y RMSE (0,71 °C) entre las tres series temporales evaluadas. Los resultados permitieron caracterizar preliminarmente el funcionamiento del CIT 1.0 y su capacidad para automatizar la regulación de la potencia del secador, manteniendo, en las series evaluadas, las temperaturas medias próximas a sus respectivos valores de referencia. Sin embargo, debido a la ausencia de repeticiones experimentales independientes y de calibración del sensor con un instrumento de referencia, los resultados deben interpretarse de forma descriptiva y no permiten establecer superioridad de desempeño entre las condiciones evaluadas.

PALABRAS CLAVE*: Automatización. Control de temperatura. Secado. Instrumentación. Microcontrolador.*

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

1. INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação amplamente empregada no processamento e na conservação de produtos agrícolas e alimentícios, permitindo reduzir o teor de água dos materiais e favorecer sua estabilidade durante o armazenamento. O processo envolve fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa, nos quais a energia fornecida ao produto promove a evaporação da água, enquanto a umidade é transferida do material para o meio de secagem (JIMOH *et al*., 2023; ADNOUNI *et al*., 2023).

Entre as variáveis que influenciam o processo de secagem, a temperatura do ar desempenha papel relevante, uma vez que interfere na transferência de calor e massa, na taxa de remoção de água e, consequentemente, no tempo necessário para atingir o teor de água desejado. O aumento da temperatura pode acelerar a secagem, porém condições térmicas inadequadas também podem promover alterações nas propriedades físicas, químicas e nos atributos de qualidade do produto (AMER; AZAM; SAAD, 2023; SHAUKAT; FALLICO; NAZIR, 2024). Dessa forma, o monitoramento e o controle da temperatura constituem etapas importantes para a manutenção de condições adequadas durante o processo.

Em secadores experimentais, a manutenção da temperatura próxima ao valor de referência contribui para estabelecer condições térmicas consistentes durante os ensaios. Nesse contexto, sistemas de controle automático possibilitam o monitoramento contínuo da temperatura e a atuação sobre o sistema de aquecimento em resposta aos desvios em relação à temperatura de referência (set point), contribuindo para reduzir as oscilações térmicas durante a operação. Estudos recentes têm empregado sistemas automatizados de controle da temperatura em diferentes configurações de secadores, demonstrando a aplicabilidade dessas tecnologias no acompanhamento e ajuste das condições de secagem (YANG *et al*., 2023; JUSRAN; MUHLIS; DANIAL, 2025).

A automação desses equipamentos pode ser realizada por meio da integração entre sensores de temperatura, microcontroladores e dispositivos eletrônicos de acionamento. Prates *et al*. (2011), por exemplo, utilizaram sensores LM35, microcontrolador PIC16F877A e TRIAC no desenvolvimento de um sistema para controle da temperatura e da velocidade do ar em um secador de plantas medicinais. A integração desses componentes possibilita reunir aquisição, processamento e atuação em um mesmo sistema, constituindo uma alternativa para a instrumentação e automação de equipamentos experimentais de secagem.

Embora diferentes soluções de controle automático tenham sido aplicadas a secadores, a modernização de equipamentos existentes por meio de retrofit constitui uma alternativa para

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

incorporar novas tecnologias de monitoramento e controle sem a substituição integral da estrutura previamente instalada. Essa abordagem permite integrar sensores, dispositivos de processamento e sistemas de atuação a equipamentos legados, preservando componentes ainda funcionais e possibilitando sua adaptação a novas condições de operação (LINS *et al*., 2022; MENDONÇA *et al*., 2024). Nesse contexto, mecanismos eletromecânicos podem ser empregados para automatizar funções originalmente realizadas de forma manual, como estratégia de adaptação do sistema de controle à configuração existente do equipamento.

Além do desenvolvimento do controlador, sua avaliação experimental é necessária para verificar a capacidade do sistema em conduzir e manter a temperatura próxima ao valor de referência e caracterizar as oscilações ocorridas durante a operação. Baldeón *et al*. (2024), ao avaliarem um sistema PID em um secador convectivo de bandejas, utilizaram o erro do sinal de temperatura e sua estabilidade em relação à temperatura de referência para caracterizar o desempenho do controle. Dessa forma, a análise da resposta térmica associada a indicadores de erro permite quantificar o comportamento do controlador sob diferentes condições de operação.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e realizar uma avaliação experimental preliminar do desempenho de um controlador automático para a temperatura do ar em um secador de bandejas em escala de bancada, considerando temperaturas de referência (set points) de 40, 50 e 60 °C. A solução proposta foi desenvolvida como uma estratégia de adaptação do equipamento existente, integrando medição de temperatura, processamento e atuação eletromecânica sobre o sistema de regulagem de potência anteriormente operado de forma manual.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do secador experimental

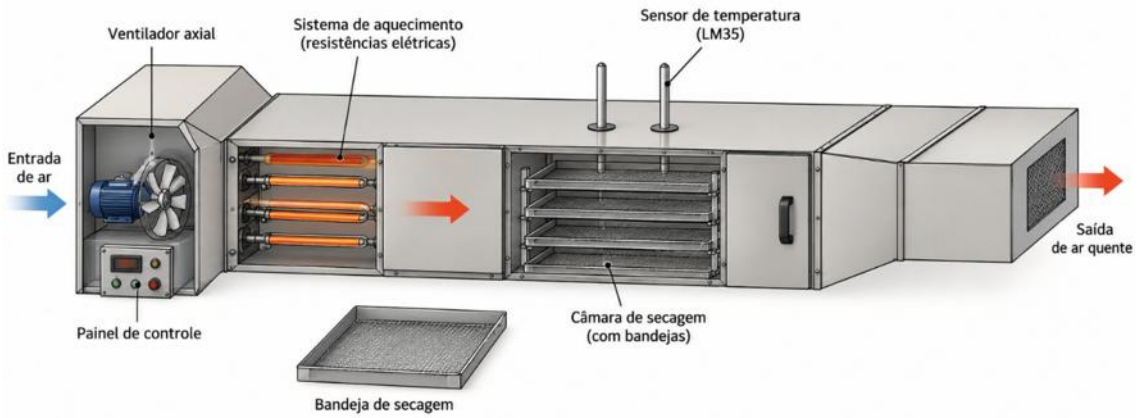
O estudo foi realizado no Laboratório de Engenharia e Processamento Agroindustrial e no Laboratório de Física Experimental da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Campus Universitário localizado no município de Barra do Bugres, Mato Grosso.

Para o desenvolvimento e a avaliação do sistema de controle de temperatura, foi utilizado um secador descontínuo de bandejas em escala de bancada (Figura 1). O equipamento é constituído por um sistema de ventilação, composto por um ventilador axial instalado no interior do secador, e por um sistema de aquecimento formado por seis resistências elétricas de 500 W cada, conectadas em paralelo, totalizando 3.000 W de potência nominal instalada.

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

O sistema de aquecimento foi integrado ao controlador desenvolvido, permitindo a variação da potência fornecida às resistências em função da temperatura do ar medida no interior do secador. Essa configuração possibilitou a realização dos ensaios utilizando diferentes temperaturas de referência para avaliação do desempenho do sistema de controle.

Figura 1. Secador de bandejas em escala de bancada utilizado para avaliação do sistema de controle de temperatura



Fonte: Elaborado pelos autores e adaptado com auxílio de inteligência artificial generativa (ChatGPT, OpenAI, 2026).

2.2. Desenvolvimento do sistema de controle de potência

Para o controle da potência elétrica fornecida ao sistema de aquecimento do secador, foi utilizado um circuito eletrônico baseado na variação do ângulo de condução de um TRIAC BTA41. O circuito foi conectado ao conjunto de seis resistências elétricas de 500 W, instaladas em paralelo, totalizando 3.000 W de potência nominal. A variação da potência foi realizada por meio da alteração da posição de um potenciômetro, permitindo modificar a intensidade do aquecimento produzido pelo sistema.

O circuito de controle de potência foi constituído por uma dupla etapa defasadora, composta pelos capacitores C1, C2 e C3, resistores R1 e R2, potenciômetro, DIAC, TRIAC BTA41 e reator XRF (Figura 2). Durante o funcionamento, o carregamento dos capacitores determina o instante de disparo do DIAC. Quando a tensão no capacitor C3 atinge o nível necessário para sua condução, o DIAC é acionado e promove o disparo do TRIAC, permitindo a condução de corrente elétrica para o conjunto de resistências do secador.

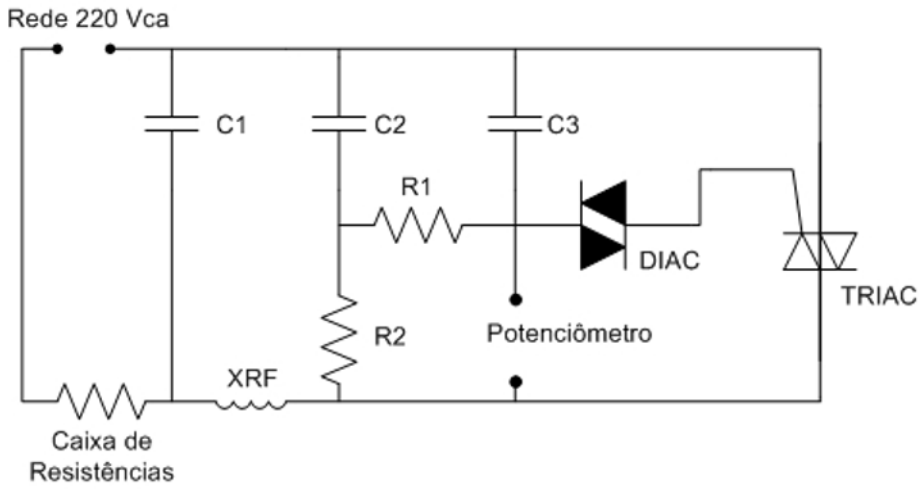
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A alteração da posição do potenciômetro modifica o instante de disparo do TRIAC em relação à passagem da tensão alternada da rede elétrica pelo valor zero. Consequentemente, ocorre a variação do ângulo de condução do TRIAC e da potência elétrica fornecida às resistências, possibilitando o ajuste da energia destinada ao aquecimento do ar no interior do secador. Dessa forma, o potenciômetro constitui o elemento de ajuste do circuito sobre o qual atua o sistema eletromecânico descrito na Seção 2.3.

O circuito também foi equipado com um reator XRF associado à redução das interferências elétricas decorrentes da comutação do sistema de potência. O componente foi confeccionado com 40 espiras de fio de cobre esmaltado de 1 mm de diâmetro, distribuídas em duas camadas de 20 espiras e enroladas sobre um bastão de ferrita de 6,3 mm (1/4") de diâmetro.

A configuração dos componentes e suas respectivas conexões no circuito de controle de potência são apresentadas na Figura 2.

Figura 2. Circuito esquemático do sistema de controle de potência das resistências elétricas do secador



Fonte: Autores (2026).

2.3. Sistema de atuação e controle

Para automatizar o ajuste da potência fornecida às resistências elétricas, foi desenvolvido um sistema de atuação mecânica responsável pelo posicionamento do potenciômetro do circuito de controle de potência. O sistema foi constituído por um servo

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

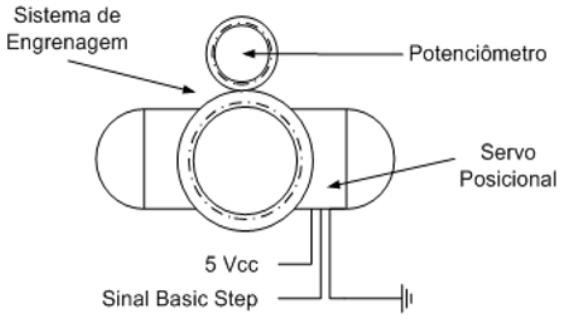
posicional acoplado a um conjunto de duas engrenagens, com diâmetros de 30 e 15 mm (Figura 3).

A engrenagem de 30 mm foi acoplada ao eixo do servo posicional, enquanto a engrenagem de 15 mm foi conectada ao eixo do potenciômetro. Dessa forma, o movimento angular produzido pelo servo foi transmitido mecanicamente ao potenciômetro, permitindo alterar sua posição e, consequentemente, o ângulo de condução do TRIAC e a potência elétrica fornecida ao sistema de aquecimento.

O acionamento do servo foi realizado por meio do microcontrolador Basic Step 1, baseado no PIC16F628. O dispositivo integra, em uma única placa, o microcontrolador, memória com interpretador PBASIC e regulador de tensão, além de disponibilizar oito portas configuráveis como entrada ou saída. No sistema desenvolvido, o microcontrolador foi responsável por processar o sinal proveniente do sistema de medição de temperatura e comandar o posicionamento do servo de acordo com a lógica de controle estabelecida.

A integração entre o microcontrolador, o servo posicional e o conjunto de engrenagens possibilitou a atuação automática sobre o potenciômetro do circuito de potência, substituindo o ajuste manual anteriormente empregado no secador. Assim, a potência aplicada às resistências pôde ser modificada em resposta às condições de temperatura detectadas durante o funcionamento do equipamento.

Figura 3. Sistema de atuação mecânica utilizado para o posicionamento do potenciômetro do circuito de controle de potência



Fonte: Autores (2026).

2.4. Medição e aquisição da temperatura

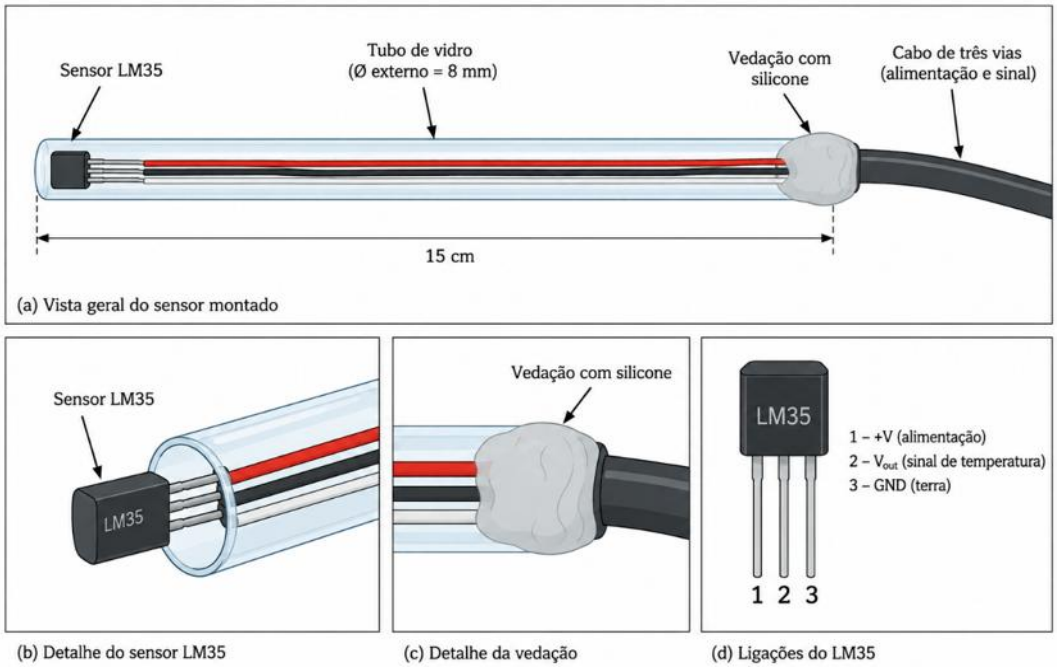
A temperatura do ar no interior do secador foi monitorada por meio de um sensor LM35, cuja saída analógica de tensão apresenta relação linear com a temperatura, com sensibilidade nominal de 10 mV $°C^{-1}$. Essa característica permite relacionar o sinal elétrico fornecido pelo

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

sensor à temperatura expressa em graus Celsius e utilizar a medida como variável de entrada do sistema de controle.

Para sua instalação no secador, o LM35 foi posicionado em uma das extremidades de um tubo de vidro com 8 mm de diâmetro externo e 15 cm de comprimento, mantendo o elemento sensor exposto ao ar de secagem. Os condutores destinados à alimentação e à transmissão do sinal foram dispostos no interior do tubo, e a extremidade de saída do cabo foi vedada com silicone. A configuração utilizada para montagem e proteção do sensor, bem como os detalhes de sua instalação e conexões elétricas, são apresentados na Figura 4.

Figura 4. Representação esquemática da montagem do sensor LM35 utilizado para medição da temperatura do ar no secador: (a) configuração geral do sensor instalado no tubo de vidro; (b) detalhe do posicionamento do LM35; (c) detalhe da vedação com silicone; e (d) representação das conexões do sensor



Fonte: Elaborado pelos autores e adaptado com auxílio de inteligência artificial generativa (ChatGPT, OpenAI, 2026).

O sensor LM35 utilizado no sistema não foi submetido a procedimento de calibração independente com instrumento de referência antes da realização dos ensaios. Dessa forma, a conversão do sinal elétrico em temperatura foi realizada considerando a relação nominal de 10 mV $°C^{-1}$ do sensor. Consequentemente, os valores de temperatura apresentados neste estudo

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

correspondem às medições fornecidas pelo sistema desenvolvido, não tendo sido determinada experimentalmente a incerteza associada à medição de temperatura.

O sinal analógico produzido pelo LM35 foi adquirido pelo sistema de controle e convertido em temperatura para utilização pelo algoritmo. O valor obtido foi empregado como variável de entrada para comparação com a temperatura de referência (set point) e determinação da atuação sobre o sistema de aquecimento.

Para acompanhamento das medições durante o funcionamento do controlador, foi utilizado um display de cristal líquido LCD 16 × 2, com capacidade para apresentação de 32 caracteres distribuídos em duas linhas. O dispositivo permitiu a visualização da temperatura medida pelo sensor durante os ensaios.

2.5. Desenvolvimento do algoritmo de controle

O algoritmo de controle da temperatura foi desenvolvido para o microcontrolador Basic Step 1, utilizando o ambiente de programação Basic Step SP-1. A rotina foi estruturada para operar continuamente durante o funcionamento do secador, integrando a aquisição da temperatura e o acionamento do sistema eletromecânico responsável pelo ajuste da potência fornecida às resistências elétricas.

Após a inicialização do sistema, a temperatura medida pelo sensor LM35 era utilizada como variável de entrada do algoritmo. O valor adquirido era comparado com os limiares de temperatura estabelecidos na programação, correspondentes a 40, 50 e 60 °C, conforme representado no fluxograma da Figura 5. A partir dessas comparações, o algoritmo determinava a condição de atuação do servo posicional responsável pelo ajuste mecânico do potenciômetro do circuito de potência.

A atuação do sistema foi estruturada em posições predeterminadas do servo, representadas no algoritmo por N1, N2 e N3. O movimento do servo era transmitido mecanicamente ao potenciômetro por meio do conjunto de engrenagens, modificando sua posição e, consequentemente, o ajuste da potência fornecida às resistências elétricas do secador.

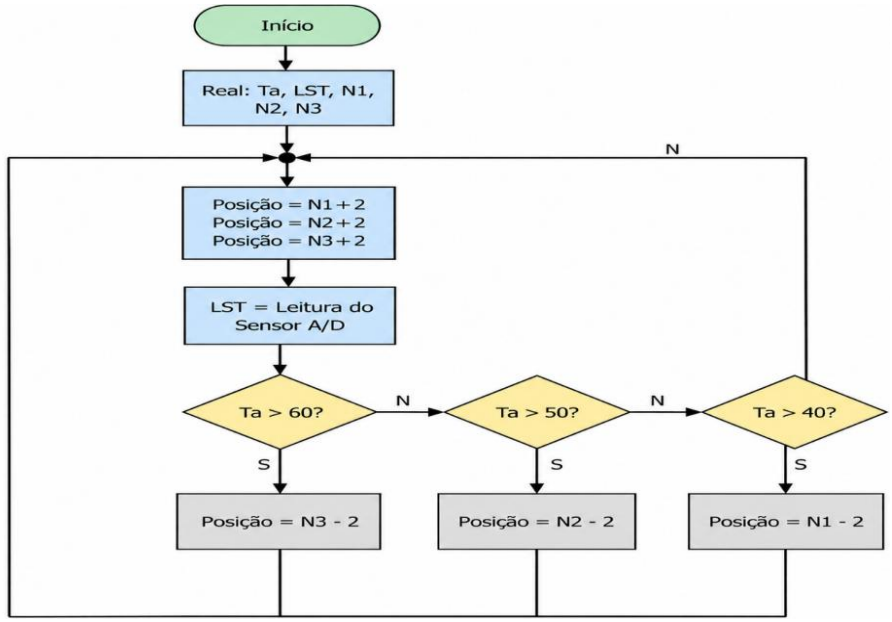
A rotina era executada de maneira cíclica, compreendendo a aquisição da temperatura, sua comparação com os limiares definidos na programação e a determinação da posição de atuação do servo. Após o posicionamento do atuador e o consequente ajuste do potenciômetro, uma nova leitura da temperatura era realizada, repetindo-se o procedimento durante o funcionamento do equipamento. Dessa forma, a temperatura medida era utilizada como sinal de realimentação para a atuação sobre o sistema de aquecimento.

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

A estratégia implementada foi baseada, portanto, em uma lógica discreta de atuação, na qual diferentes condições de temperatura determinavam posições predeterminadas do servo, não correspondendo à implementação de um controlador proporcional-integral-derivativo (PID). Os valores específicos correspondentes às posições de atuação do servo representadas por N1, N2 e N3 na programação original não foram recuperados para a presente avaliação. Dessa forma, embora seja possível descrever a lógica geral de funcionamento a partir do fluxograma disponível, essa ausência constitui uma limitação para a reprodução integral do algoritmo de controle.

O fluxo geral da rotina empregada para aquisição da temperatura, comparação com os limiares estabelecidos e atuação sobre o sistema de regulagem da potência é apresentado na Figura 5.

Figura 5. Fluxograma do algoritmo desenvolvido para aquisição e controle da temperatura do ar no secador de bandejas



Fonte: Autores (2026).

2.6. Avaliação experimental do controlador

A avaliação experimental do sistema desenvolvido foi realizada com o objetivo de caracterizar preliminarmente seu comportamento no controle da temperatura do ar do secador. Foram consideradas três temperaturas de referência (set points): 40, 50 e 60 °C.

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

Para cada temperatura de referência, foi conduzido um ensaio com duração de 200 min, durante o qual foi registrada a variação da temperatura do ar no interior do secador ao longo do tempo. Dessa forma, foi obtida uma série temporal para cada condição avaliada, não tendo sido realizadas repetições independentes dos ensaios.

Durante cada ensaio, o controlador permaneceu em funcionamento, realizando a aquisição da temperatura e a atuação sobre o sistema de regulagem da potência das resistências elétricas. Os registros obtidos foram utilizados para representar a evolução temporal da temperatura e avaliar sua proximidade em relação ao respectivo valor de referência.

Considerando a ausência de repetições experimentais independentes, a avaliação realizada foi caracterizada como preliminar e descritiva. Assim, os resultados obtidos representam o comportamento observado nas três séries temporais avaliadas e não foram utilizados para estabelecer diferenças estatisticamente significativas entre as temperaturas de referência. Essa condição foi considerada na interpretação dos resultados e nas conclusões do estudo.

2.7. Análise do desempenho do sistema

Os dados de temperatura registrados durante os ensaios foram analisados individualmente para cada temperatura de referência (set point). Inicialmente, as séries temporais foram utilizadas para representar a evolução da temperatura ao longo dos 200 min de funcionamento do sistema.

Para a caracterização quantitativa do comportamento da temperatura em relação ao valor de referência, foram considerados os registros obtidos a partir de 30 min de ensaio. Esse intervalo inicial foi desconsiderado com o objetivo de reduzir a influência da fase inicial de aquecimento sobre os indicadores calculados. O período de 30 min foi adotado como critério operacional comum às três condições avaliadas, não correspondendo a um critério experimentalmente determinado de tempo de estabilização ou de estabelecimento de regime permanente.

A partir dos dados considerados na análise, foram calculados a temperatura média, o desvio-padrão e os valores mínimo e máximo observados. Também foram determinados o erro de cada registro em relação à temperatura de referência, o erro absoluto médio (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE).

O erro associado a cada registro foi determinado pela Equação 1:

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

$$e_i = T_i - T_{sp} \quad (1)$$

em que e_i corresponde ao erro de temperatura no registro i (°C); T_i à temperatura registrada no instante i (°C); e T_{sp} à temperatura de referência estabelecida para o ensaio (°C).

O erro absoluto médio (MAE) foi calculado conforme a Equação 2:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|T_i - T_{SP}| \quad (2)$$

em que n corresponde ao número de registros considerados na análise.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) foi determinada conforme a Equação 3:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_i - T_{SP})^2} \quad (3)$$

Os indicadores MAE e RMSE foram utilizados para caracterizar descritivamente a magnitude dos desvios da temperatura registrada em relação ao respectivo valor de referência. Valores menores desses indicadores representam, dentro de cada série temporal, menores desvios em relação ao set point. Considerando que foi obtida apenas uma série temporal para cada condição experimental, esses indicadores foram empregados para descrição das séries avaliadas, não sendo utilizados para inferência estatística ou para estabelecer superioridade de desempenho entre as temperaturas de referência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Desenvolvimento e funcionamento do sistema de controle

O desenvolvimento do sistema resultou na integração dos componentes de medição, processamento e atuação ao secador de bandejas, possibilitando o ajuste automático da potência fornecida às resistências elétricas a partir da temperatura medida no interior do equipamento. O sistema desenvolvido, denominado CIT 1.0, foi acoplado ao mecanismo de regulagem de potência originalmente existente no secador, permitindo sua atuação sem a substituição integral do circuito de aquecimento.

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

O conjunto foi constituído pelo sensor de temperatura LM35, sistema de processamento baseado no microcontrolador Basic Step 1, servo posicional, conjunto de engrenagens e circuito eletrônico de controle de potência. A integração desses componentes permitiu utilizar a temperatura medida como variável de entrada para a atuação sobre o potenciômetro responsável pelo ajuste da potência fornecida às resistências.

Durante o funcionamento, a temperatura registrada pelo sensor era processada pelo sistema e comparada com a temperatura de referência (set point) definida para o ensaio. A partir dessa comparação, o servo era acionado para uma das posições previamente estabelecidas na programação. O movimento produzido pelo servo era transmitido ao potenciômetro por meio do conjunto de engrenagens, alterando o ajuste do circuito de potência e, consequentemente, a energia fornecida ao sistema de aquecimento.

Após a atuação do servo, uma nova leitura da temperatura era realizada, mantendo o processo de aquisição, comparação e atuação de forma cíclica durante o funcionamento do equipamento. Dessa maneira, a solução desenvolvida permitiu automatizar uma função de regulagem anteriormente realizada de forma manual, utilizando um mecanismo eletromecânico para atuar diretamente sobre o potenciômetro existente no sistema.

A Figura 6 apresenta o sistema desenvolvido e sua integração ao secador de bandejas, evidenciando os principais componentes empregados na aquisição da temperatura, processamento do sinal e atuação sobre o mecanismo de controle da potência.

Figura 6. Controlador e Indicador de Temperatura (CIT 1.0) desenvolvido para monitoramento e controle da temperatura do ar no secador de bandejas



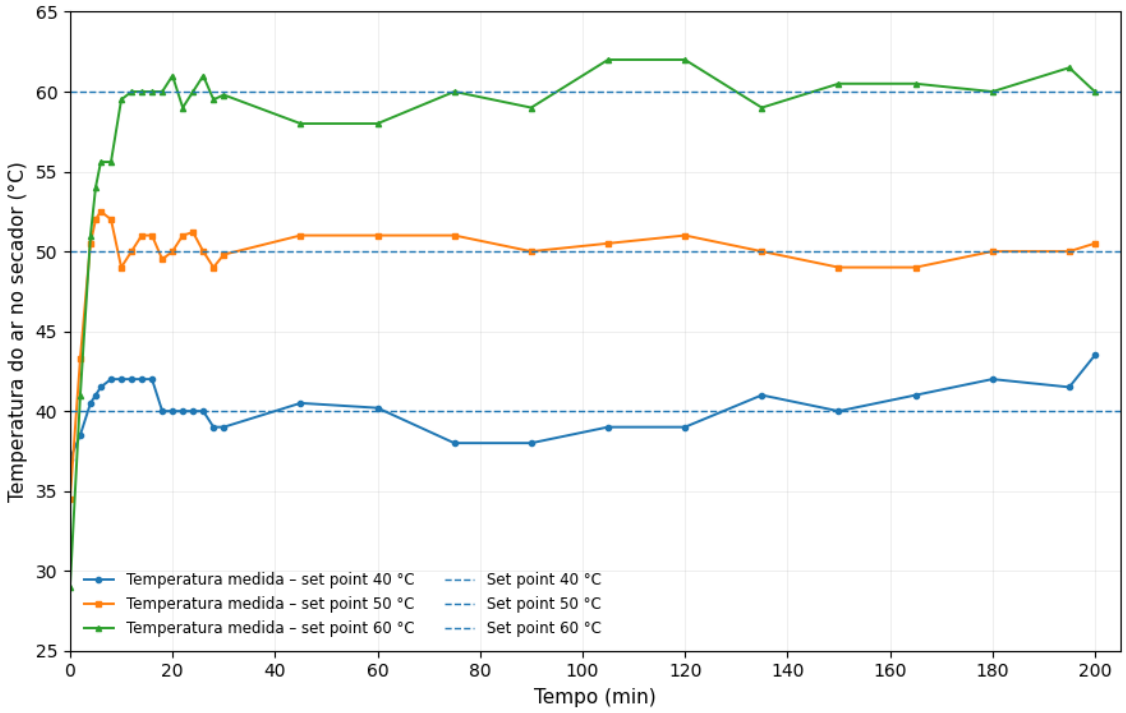
Fonte: Autores (2026).

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

3.2. Resposta térmica do sistema aos diferentes *set points*

A resposta térmica do sistema ao longo dos 200 min de ensaio para os set points de 40, 50 e 60 °C é apresentada na Figura 7. As séries temporais permitem observar a fase inicial de aquecimento e o comportamento da temperatura em relação aos respectivos valores de referência durante o funcionamento do controlador.

Figura 7. Variação da temperatura do ar no secador em função do tempo para os set points de 40, 50 e 60 °C



Fonte: Autores (2026).

Conforme observado na Figura 7, em todas as condições avaliadas ocorreu inicialmente o aumento da temperatura em direção ao respectivo set point. Após essa fase inicial de aquecimento, foram observadas oscilações da temperatura em torno dos valores de referência, com comportamento distinto entre as três séries temporais.

No ensaio realizado com set point de 40 °C, observaram-se oscilações de maior amplitude em determinados períodos da série. Para o set point de 50 °C, a temperatura apresentou visualmente menor amplitude de oscilação em torno do valor de referência quando

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

comparada às demais séries avaliadas. Na condição de 60 °C, também foram observadas oscilações em torno do set point, com amplitude visualmente superior à observada na série de 50 °C. Essas observações correspondem exclusivamente às séries temporais obtidas nos ensaios realizados e são posteriormente complementadas pelos indicadores descritivos de dispersão e erro.

O comportamento observado pode estar relacionado à própria dinâmica do sistema de controle, no qual a regulagem da potência ocorre por meio da atuação do servo sobre o potenciômetro, associada à resposta térmica do conjunto de aquecimento. Dessa forma, alterações na posição do potenciômetro modificam a potência fornecida às resistências, enquanto a temperatura do ar responde de acordo com a dinâmica térmica do equipamento. Como os valores específicos correspondentes às posições de atuação do servo representadas por N1, N2 e N3 na programação original não foram recuperados, não é possível atribuir quantitativamente as oscilações observadas a estados específicos de atuação do algoritmo de controle.

Para o cálculo dos indicadores quantitativos, foram considerados os registros obtidos a partir de 30 min de cada ensaio. Esse intervalo foi utilizado, conforme estabelecido na metodologia, como um critério operacional comum às três séries para reduzir a influência da fase inicial de aquecimento. Portanto, os 30 min não representam um tempo de estabilização determinado experimentalmente, e as diferenças observadas na evolução temporal das três séries devem ser interpretadas de forma descritiva.

Considerando que foi obtida apenas uma série temporal para cada temperatura de referência, as diferenças observadas na Figura 7 não permitem estabelecer superioridade de desempenho entre os set points. A caracterização quantitativa das séries por meio da temperatura média, desvio-padrão, valores mínimo e máximo, MAE e RMSE é apresentada na seção seguinte.

3.3. Indicadores de erro e variabilidade da temperatura

A caracterização quantitativa das séries temporais foi realizada considerando os registros obtidos a partir de 30 min de cada ensaio, conforme o critério operacional estabelecido na metodologia. A Tabela 1 apresenta a temperatura média, o desvio-padrão, os valores mínimo e máximo, o erro absoluto médio (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) para os set points de 40, 50 e 60 °C.

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

Tabela 1. Indicadores descritivos das séries temporais de temperatura a partir de 30 min de operação

Set point (°C)	Temperatura média (°C)	Desvio-padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)
40	40,21	1,61	38,00	43,50	1,28	1,56
50	50,22	0,70	49,00	51,00	0,55	0,71
60	60,02	1,32	58,00	62,00	0,98	1,26

Fonte: Autores (2026).

As temperaturas médias observadas foram de 40,21, 50,22 e 60,02 °C para os set points de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Em termos descritivos, as médias das três séries permaneceram próximas aos respectivos valores de referência. A diferença entre a temperatura média e o set point foi de 0,21 °C para 40 °C, 0,22 °C para 50 °C e 0,02 °C para 60 °C. Esses valores representam o desvio das médias das séries em relação às temperaturas de referência e não devem ser interpretados isoladamente como medida da variabilidade temporal do controle.

Diferenças entre as séries foram observadas principalmente na dispersão das temperaturas. Para o set point de 40 °C, o desvio-padrão foi de 1,61 °C, com valores registrados entre 38,0 e 43,5 °C. Na série correspondente a 50 °C, o desvio-padrão foi de 0,70 °C, com temperaturas entre 49,0 e 51,0 °C. Para o set point de 60 °C, foi observado desvio-padrão de 1,32 °C e temperaturas entre 58,0 e 62,0 °C. Dessa forma, na série obtida a 50 °C foi observada a menor dispersão dos valores de temperatura entre as três condições avaliadas.

Os indicadores de erro apresentaram comportamento semelhante. Os valores de MAE foram de 1,28, 0,55 e 0,98 °C para os set points de 40, 50 e 60 °C, respectivamente, enquanto os valores de RMSE foram de 1,56, 0,71 e 1,26 °C. Assim, no ensaio realizado a 50 °C foram observados os menores valores de MAE e RMSE entre as três séries temporais avaliadas. Esses indicadores mostram que, nessa série, os registros apresentaram menores desvios em relação ao respectivo valor de referência, sem que isso permita estabelecer superioridade estatística dessa condição em relação às demais.

A diferença entre MAE e RMSE observada nas três séries decorre da maior influência atribuída pelo RMSE aos desvios de maior magnitude. Na série correspondente a 40 °C, por exemplo, o RMSE de 1,56 °C foi superior ao MAE de 1,28 °C, comportamento compatível com a ocorrência de desvios de maior magnitude em determinados momentos do ensaio. Relação semelhante foi observada para os set points de 50 e 60 °C.

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

Os resultados indicam, portanto, que o sistema foi capaz de conduzir e manter, nas séries avaliadas, a temperatura em torno dos respectivos valores de referência, embora com diferentes magnitudes de oscilação. Entretanto, esses resultados devem ser interpretados considerando o caráter preliminar da avaliação. Foi obtida apenas uma série temporal para cada set point, sem repetições experimentais independentes, não sendo possível avaliar a variabilidade entre ensaios ou estabelecer diferenças estatisticamente significativas entre as condições.

Além disso, o sensor LM35 utilizado não foi submetido à calibração independente com instrumento de referência, e a incerteza associada às medições de temperatura não foi determinada experimentalmente. Dessa forma, diferenças de pequena magnitude entre a temperatura registrada e o valor de referência devem ser interpretadas com cautela, particularmente quando consideradas isoladamente. Os indicadores apresentados caracterizam, portanto, o comportamento observado nas séries temporais obtidas e não constituem uma avaliação metrológica da exatidão do sistema.

3.4. Desempenho e limitações do sistema desenvolvido

Os resultados obtidos permitiram caracterizar preliminarmente o funcionamento do CIT 1.0 nas três temperaturas de referência avaliadas. Nas séries temporais correspondentes aos set points de 40, 50 e 60 °C, as temperaturas médias permaneceram próximas aos respectivos valores de referência, embora tenham sido observadas diferentes magnitudes de oscilação e de erro ao longo dos ensaios. Entre as séries avaliadas, aquela correspondente ao set point de 50 °C apresentou os menores valores observados de desvio-padrão, MAE e RMSE. Entretanto, essa observação possui caráter exclusivamente descritivo e não permite afirmar desempenho superior dessa condição.

A resposta observada está relacionada às características do sistema desenvolvido, que combina aquisição da temperatura, processamento e atuação eletromecânica sobre o potenciômetro responsável pela regulagem da potência. Diferentemente de sistemas nos quais o comando sobre a potência ocorre diretamente por meio de dispositivos eletrônicos, no CIT 1.0 a atuação depende do movimento do servo e da transmissão desse movimento pelo conjunto de engrenagens. Além disso, a resposta da temperatura às alterações de potência está sujeita à dinâmica térmica do secador. Essas características devem ser consideradas na interpretação das oscilações observadas nas séries temporais.

Uma das principais limitações do estudo está relacionada ao delineamento experimental. Foi realizada apenas uma série temporal para cada temperatura de referência, sem repetições

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

experimentais independentes. Consequentemente, não foi possível determinar a variabilidade entre ensaios nem realizar inferências estatísticas sobre diferenças de desempenho entre as condições avaliadas. Os resultados devem, portanto, ser interpretados como uma caracterização preliminar e descritiva do comportamento do sistema nas condições em que os ensaios foram realizados.

Outra limitação refere-se à medição da temperatura. O sensor LM35 utilizado no sistema não foi submetido à calibração independente com instrumento de referência antes dos ensaios, e a incerteza associada às medições não foi determinada experimentalmente. Dessa forma, embora os indicadores calculados permitam caracterizar os desvios dos registros em relação aos respectivos set points, eles não devem ser interpretados como uma avaliação metrológica da exatidão do sistema. Essa limitação é particularmente relevante na interpretação de diferenças de pequena magnitude entre a temperatura registrada e o valor de referência.

Também deve ser considerado que o período inicial de 30 min foi excluído do cálculo dos indicadores com base em um critério operacional comum às três séries, com a finalidade de reduzir a influência da fase inicial de aquecimento. Esse intervalo não foi determinado a partir de um critério experimental específico de estabilização térmica. Portanto, não é possível assumir que os três ensaios tenham atingido uma condição de estabilidade no mesmo instante.

Adicionalmente, embora os limiares de temperatura utilizados na lógica de controle estejam identificados como 40, 50 e 60 °C, não foram recuperados os valores específicos correspondentes às posições de atuação do servo representadas por N1, N2 e N3 na programação original. Essa ausência limita a reprodução integral da estratégia de controle e impossibilita relacionar quantitativamente as oscilações observadas nas séries temporais às posições específicas de atuação do servo.

Apesar dessas limitações, os ensaios realizados permitiram verificar o funcionamento integrado dos componentes de medição, processamento e atuação eletromecânica e caracterizar a resposta térmica observada para os três set points avaliados. Estudos posteriores poderão ampliar essa avaliação por meio da realização de repetições experimentais independentes, calibração do sistema de medição com instrumento de referência, determinação da incerteza de medição e registro detalhado dos parâmetros de atuação do controlador. A utilização de critérios objetivos para determinação do tempo de acomodação e a inclusão de indicadores como sobressinal e tempo de subida também poderão contribuir para uma caracterização mais abrangente da resposta dinâmica do sistema.

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

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema CIT 1.0 possibilitou integrar a medição da temperatura, o processamento do sinal e a atuação eletromecânica sobre o mecanismo de regulagem da potência do secador de bandejas, permitindo automatizar uma função anteriormente realizada de forma manual e mantendo parte da estrutura original do equipamento.

Na avaliação experimental preliminar, o sistema foi operado com temperaturas de referência (set points) de 40, 50 e 60 °C. As temperaturas médias observadas foram de 40,21, 50,22 e 60,02 °C, respectivamente. Entre as três séries temporais avaliadas, no ensaio realizado a 50 °C foram observados os menores valores de dispersão, MAE e RMSE, correspondentes a 0,70, 0,55 e 0,71 °C, respectivamente. Esses resultados descrevem o comportamento observado nos ensaios realizados e não permitem estabelecer superioridade de desempenho entre as condições avaliadas.

A interpretação dos resultados deve considerar o caráter preliminar do estudo, uma vez que foi obtida apenas uma série temporal para cada temperatura de referência, sem repetições experimentais independentes. Além disso, o sensor LM35 não foi submetido à calibração independente com instrumento de referência, não tendo sido determinada experimentalmente a incerteza associada às medições. O intervalo inicial de 30 min utilizado na análise também correspondeu a um critério operacional, e não a um tempo de estabilização determinado experimentalmente.

Dessa forma, os resultados permitem caracterizar preliminarmente o funcionamento e a resposta térmica do sistema desenvolvido nas condições avaliadas. Estudos posteriores, com repetições experimentais independentes, calibração do sistema de medição, determinação da incerteza e caracterização mais detalhada da resposta dinâmica do controlador, são necessários para ampliar a avaliação do CIT 1.0.

REFERÊNCIAS

ADNOUNI, M.; JIANG, L.; ZHANG, X. J.; ZHANG, L. Z.; PATHARE, P. B.; ROSKILLY, A. P. Computational modelling for decarbonised drying of agricultural products: sustainable processes, energy efficiency, and quality improvement. **Journal of Food Engineering**, v. 338, art. 111247, 2023. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111247.

AMER, B. M. A.; AZAM, M. M.; SAAD, A. Monitoring temperature profile and drying kinetics of thin-layer banana slices under controlled forced convection conditions. **Processes**, v. 11, n. 6, p. 1771, 2023. DOI: 10.3390/pr11061771.

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

BALDEÓN, E. O.; SALAS-VALERIO, W. F.; VIDAURRE-RUIZ, J. M.; COMETTANT-RABANAL, R. Convective drying kinetics of yacon (Smallanthus sonchifolius Poepp. & Endl.) slabs and evaluation of the dryer PID temperature control system. **Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences**, v. 40, n. 1, p. 44-54, 2024. DOI: 10.29393/CHJAAS40-5CDER40005.

JIMOH, K. A.; HASHIM, N.; SHAMSUDIN, R.; MAN, H. C.; JAHARI, M.; ONWUDE, D. I. Recent advances in the drying process of grains. **Food Engineering Reviews**, v. 15, p. 548-576, 2023. DOI: 10.1007/s12393-023-09333-7.

JUSRAN, J.; MUHLIS, M.; DANIAL, M. I. R. A. Modifikasi Sistem Kontrol Suhu pada Alat Pengering Tipe Rak (Tray Dryer) Skala Laboratorium. **Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian**, v. 11, n. 1, 2025. DOI: 10.26858/jptp.v11i1.8263.

LINS, T.; OLIVEIRA, R. A. R.; CORREIA, L. H. A.; SILVA, J. S. Digital retrofitting of legacy machines: a holistic procedure model for industrial companies. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 36, p. 35-44, 2022. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.10.011.

MENDONÇA, R. S.; SANTOS, K. V.; MEDEIROS, R. L. P.; SILVA, M.; LUCENA JR., V. F. Proposta de metodologia Retrofit aplicada em um processo produtivo legado. Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2024, v. 4, n. 1, 2024. DOI: 10.20906/CBA2024/4830.

PRATES, M. O.; PIZZIOLO, T. A.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P.; NICÁCIO, J. V. Controle da temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais. Engenharia na **Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 101-111, 2011. DOI: 10.13083/reveng.v19i2.148.

SHAUKAT, M. N.; FALLICO, B.; NAZIR, A. Impact of air-drying temperatures on drying kinetics, physicochemical properties, and bioactive profile of ginger. **Foods**, v. 13, n. 7, art. 1096, 2024. DOI: 10.3390/foods13071096.

YANG, T.; ZHENG, X.; XIAO, H.; SHAN, C.; YAO, X.; LI, Y.; ZHANG, J. Drying temperature precision control system based on improved neural network PID controller and variable-temperature drying experiment of cantaloupe slices. **Plants**, v. 12, n. 12, art. 2257, 2023. DOI: 10.3390/plants12122257.

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