

## MODELAGEM DE UM SECADOR ESTÁTICO DE CAFÉ SEM MOVIMENTAÇÃO DE MASSA.

MIGUEL ANGEL SALGADO HERRERA<sup>1</sup>, IVAN CAMILO ARBELÁEZ RUIZ<sup>2</sup>,  
JENYFFER DA SILVA GOMES SANTOS<sup>3</sup>, WESSLEN LINS ARAUJO<sup>4</sup>  
ANGEL PONTIN GARCIA<sup>5</sup>, DANIEL ALBIERO<sup>6</sup>

1 Eng. Mecatrônico, Doutorando em Engenharia Agrícola, UNICAMP

2 Eng. Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola, UNICAMP

3 Eng. Agrícola e Ambiental, Doutoranda em Engenharia Agrícola, UNICAMP

4 Eng. Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, UNICAMP

5 Eng. Agrícola, Prof. Dr., UNICAMP

6 Eng. Agrícola, Prof. Dr., UNICAMP

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** A umidade do grão de café na secagem é um dos parâmetros mais importantes a ser controlado no processo de pós-colheita, já que influencia na qualidade de armazenamento, o que afeta o sabor, o aroma e a quantidade de venda do produto. A modelagem do comportamento das variáveis que atuam no sistema assim como a estimativa de perda de umidade do grão são de vital importância para determinar tempos de secagem, gasto energético e eficiência do processo. Neste projeto utilizando a ferramenta *Identification tool* de *Matlab* foram modeladas as duas malhas do secador, a vazão mássica com o ventilador como atuador e a temperatura do ar de entrada utilizando um banco de resistências. As funções de transferência obtidas apresentaram aproximações aos valores reais de 85 a 99 %.

**PALAVRAS-CHAVE:** Secagem; Pós-colheita.

### MODELING OF A STATIC COFFEE DRYER WITHOUT MASS MOVEMENT

**ABSTRACT:** Coffee bean moisture during drying is one of the most important parameters to be controlled in the post-harvest process, influencing the quality of storage, which affects the flavor, aroma and sale amount of the product. The modeling of the behavior of the variables that act in the system, as well as the estimation of grain moisture loss, are of vital importance to determine drying times, energy consumption and process efficiency. In this project, using *Matlab's Identification tool*, the two loops of the dryer were modeled, the mass flow with the fan and the inlet air temperature with the bank of resistances. The obtained transfer functions presented approximations to the real values from 85 to 99%.

**KEYWORDS:** Drying; Post-harvest.

**INTRODUÇÃO:** Diversos autores tem feito cálculos de secagem para estimar a perda de umidade com modelos como Thompson (THOMPSON *et al.*, 1968) e MSU (BAKKER-ARKEMA *et al.*, 1974), com o intuito de prever tempos de secagem e manter a qualidade do produto. Antes do cálculo da umidade é importante a modelagem das variáveis que entram no secador, serem por sistema de transferência de calor por convecção forçada (SILVA, 1991; MANCILLA, 2015; PARRA CORONADO *et al.*, 2017), ou por sistema termo hidráulicos (GARCIA, 1997). O presente trabalho apresenta uma engenharia inversa da modelagem das variáveis de temperatura e vazão mássica que entram no secador. Sabendo os valores das

variáveis de controle dos atuadores e com os resultados das variáveis medidas, são determinadas as funções de transferência (TF) é gerada uma função geral utilizando uma equivalência com um sistema massa-mola-amortecedor.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O projeto foi desenvolvido com um secador estático do laboratório de pós-colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas. As TF dos atuadores foram obtidas empregando a ferramenta *Identification toolbox* (IT), para o qual foi necessário instalar um sistema de aquisição de dados para as variáveis de temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e estado dos atuadores. A TF do ventilador, foi determinada com comportamento da velocidade do vento em m/s à certa entrada de frequência (0-60 Hz) do ventilador acoplado a um motor elétrico trifásico marca Weg de 1 CV de potência com 3420 rpm e um consumo de 1,48 A acionado por um inversor de frequência Siemens Micromaster 440. A temperatura e velocidade do ar no plenum foram medidas com um anemômetro Dwyer VTT-V-D-R-2. A temperatura ambiente foi obtida com um sensor DS18B20 e a umidade relativa ambiente com um DHT11. Para o cálculo da TF foram coletados os dados da velocidade do ar em malha aberta a frequências entre 20 Hz e 60 Hz, a cada 10 Hz, com período de amostragem de 0,14 s. Para o aquecedor, foi utilizado um banco de 6 resistências de 1 kW cada uma a 220 V de tensão e corrente alterna, ativado por 3 relés de estado sólido controlados por PWM. Para determinar a TF do aquecedor foram feitos 24 ensaios, onde determinou-se o comportamento da temperatura modificando a frequência do inversor (dentro da faixa de 30 Hz e 60 Hz, com incrementos de 10 Hz) e o duty-cycle do PWM das resistências (de 10 % até 60 %, com incrementos de 10 %). O período de amostragem da foi de 0,1 s. As TF dos atuadores foram determinadas com o IT segundo o melhor ajuste (*Best FIT*), o ventilador foi estimado por funções de transferência com 2 polos em tempo contínuo (Equação 1) e o aquecedor como um sistema de primeira ordem com tempo morto (Equação 2).

$$G(s) = (K * W_n^2) / (s^2 + 2 * \xi * W_n * s + W_n^2) = (1/m) / (s^2 + (b*s/m) + (K_m/m))$$

Equação 1. Função de transferência sistemas de segunda ordem e equivalência com um sistema massa-mola-amortecedor

Para cada frequência e porcentagem do *duty cycle* foi determinado a vazão mássica ( $\text{kg min}^{-1}$ ) em função da velocidade do vento, a variação da temperatura, a temperatura ambiente (média de 20 °C) e a umidade relativa ambiente (média de 63 %).

$$G(s) = \Delta \text{temperatura} / (V_m [\text{kg/min}] \text{ PWM} [\%]) = (K * W_n^2) / (s^2 + 2 * \xi * W_n * s + W_n^2) = (K_p * \exp(-T_d * s)) / (1 + T_p * s)$$

Equação 2 - Função de transferência do ventilador

Tendo determinado a TF foram identificadas as características para cada função, o ganho K, a frequência natural do sistema  $w_n$  e o índice de amortecimento  $\xi$ . Na parte final da Equação 1 apresentasse a TF para um sistema massa amortecedor, esse sistema representado no *simulink* permite juntar várias TF modificando os valores  $m$ ,  $b$  e  $K_m$ .

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Figura 1 apresenta-se os resultados do comportamento da variável de velocidade do ar. O comportamento expõe um sistema com um regime estável, mas com diferenças de amplitude e tempo de estabilização para cada frequência.

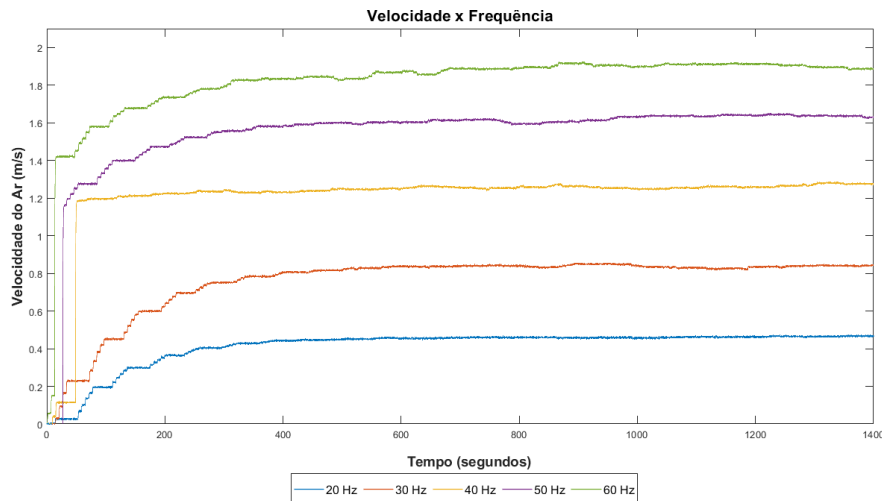


Figura 1. Ventilador em malha aberta

Na Tabela 1 apresentam-se as funções de transferência para cada frequência e o valor de ajuste estimado dos dados (*Best FIT*).

Frequência Hz	Função de Transferência	Best FIT	Frequência Hz	Função de Transferência	Best FIT
20	$\frac{0,001068}{s^2 + 0,6283s + 0,04627}$	92,03	50	$\frac{0,009484}{s^2 + 0,7897s + 0,2963}$	90,4
30	$\frac{0,0003402}{s^2 + 0,2276s + 0,01216}$	92,2	60	$\frac{0,001197}{s^2 + 0,8811s + 0,03771}$	91,1
40	$\frac{0,006943}{s^2 + 0,6922s + 0,2223}$	85,4			

Tabela 1 - Funções de Transferência do ventilador

Na Figura 2 apresentam-se os resultados do aquecedor em malha aberta, cada gráfico mostra a variação da temperatura com uma rotação constante do ventilador e variação do duty cycle do PWM. O comportamento expõe um sistema com um regime estável, mas com diferenças de amplitude e tempo de estabilização. Para frequências menores a 30 Hz o sistema gerava altas temperaturas pelo que não foi considerado esse tipo de comportamento, a sua vez para 50 e 60 Hz não se apresenta estabilidade no sistema.

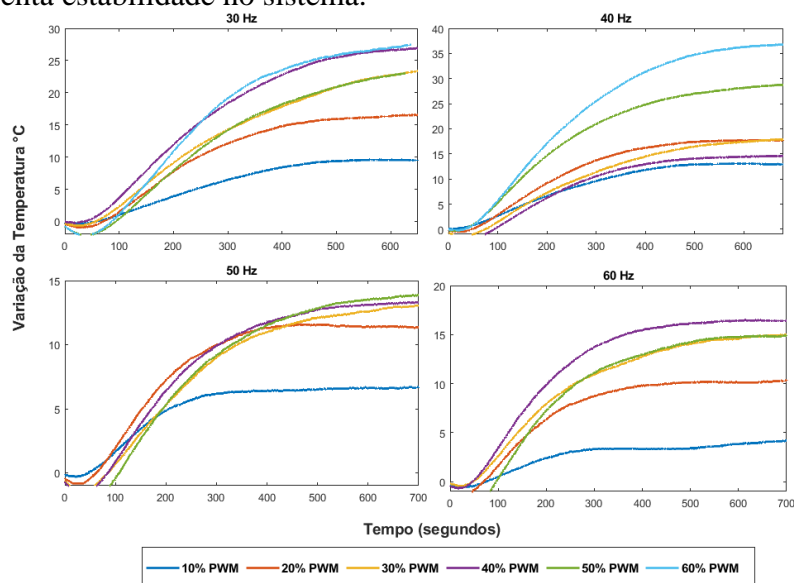


Figura 2. Comportamento da temperatura em malha aberta para diferentes valores de frequência do inversor e PWM do banco de resistências

Na, apresentam-se para cada vazão e PWM e o valor de ajuste estimado dos dados (*Best FIT*).

Percentagem PWM	Vazão mássica	Best FIT %	Percentagem PWM	Vazão mássica	Best FIT %
10	3,51	85,06	40	3,3	97,42
	5,32	87,48		5,05	94,12
	6,82	94,56		6,57	99,11
	8,04	92,99		7,71	91,66
20	3,38	98,12	50	3,24	99,15
	5,14	91,22		4,97	99,3
	6,68	94,71		6,47	98,57
	7,83	97,67		7,62	98,23
30	3,33	98,26	60	3,17	98,29
	5,08	98,11		4,84	94,81
	6,6	98,63			
	7,74	97,86			

Tabela 2. Resultados da FT do aquecedor

**CONCLUSÕES:** Foram obtidas as funções de transferência para os sistemas que formam o secador, com uma percentagem de aproximação aos valores reais de 85 a 99 % para a variável de temperatura e de 85 até 92 % para a vazão mássica do ar. Foi possível agrupar as diferentes variáveis de cada malha em uma só por meio de uma equivalência com um sistema massa mola amortecedor. Com a modelagem do comportamento das variáveis do secador com as entradas de controle dos atuadores podem ser feitas simulações de secagem do grão, assim como simulações de controle e de consumo energético.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor no período 2020-2022.

#### REFERÊNCIAS:

BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DE BOER, S. F.; e ROTH, M. C. Grain drying simulation. **Michigan: Research report from de Michigan State University East Lansing-MI**, p. 80, 1974.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação**. 3. ed. São Paulo: [s.n.].

MANCILLA, T. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS CONTRACORRENTES PARA FRUTOS DO CAFEEIRO**. **Construction and Building Materials**, 2015.

PARRA CORONADO, A.; ROA MEJÍA, G.; OLIVEROS TASCÓN, C. E.; e SANZ URIBE, J. R. Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino. **Cenicafé**, 2017.

SILVA, L. C. Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrentes. **Universidade federal de Viçosa**, 1991.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; e FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying —A New Model. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 4, p. 0582–0586, 1968.