

## DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA DETERMINAÇÃO DA CARGA TÉRMICA NA SECAGEM DE GRÃOS EM TEMPERATURAS MAIS AMENAS

HENRIQUE DA ROSA SCHMIDT <sup>1</sup>, PAULO CARTERI CORADI <sup>2</sup>, MARCUS VINÍCIUS TRES <sup>3</sup>, GIOVANI LEONE ZABOT <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Mecânica, UFSM – Campus Cachoeira do Sul – RS, henrique.schmidt@acad.ufsm.br

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, paulo.coradi@ufsm.br

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, marcus.tres@ufsm.br

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, giovani.zabot@ufsm.br

Apresentado no  
LIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2024  
6 a 8 de agosto de 2024 – Natal – RN, Brasil

**RESUMO:** A qualidade de grãos depende do controle adequado dos parâmetros de secagem. A vazão, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem representam o ponto chave na secagem dos grãos. É possível realizar este processo em temperaturas mais amenas utilizando-se ar com menor umidade absoluta. A simulação de secagem é baseada em uma variedade de parâmetros com séries temporais sequenciais e o uso de uma ferramenta algorítmica é de grande utilidade para processar essas massas de dados. Modelos matemáticos são úteis na criação e análise de sistemas de secagem, além da necessidade de habilidades e requisitos para criar interfaces que melhorem a acessibilidade e o uso destes modelos. Assim, este trabalho visou: a) implementar o modelo de Thompson para simular a secagem de grãos em temperaturas mais amenas do que as tradicionais para grãos de milho, arroz e soja; e b) implementar o cálculo da carga térmica que auxilia na avaliação da quantidade de calor a ser transferida no processo. Embora o tempo de secagem foi maior, os resultados indicaram que as cargas térmicas são diminuídas quando são utilizadas menores temperaturas e umidades do ar.

**PALAVRAS-CHAVE:** simulação, secagem de grãos, carga térmica.

## DEVELOPMENT OF *SOFTWARE* FOR DETERMINING THERMAL LOAD IN GRAIN DRYING AT Milder TEMPERATURES

**ABSTRACT:** Grain quality depends on the proper control of drying parameters. The flow rate, temperature, and relative humidity of the drying air are key points in grain drying. It is possible to carry out this process at milder temperatures using air with lower absolute humidity. Drying simulation is based on a variety of parameters with sequential time series, and the use of an algorithmic tool is of high utility for processing these data sets. Mathematical models are useful in creating and analyzing drying systems, in addition to the need for skills and requirements to create interfaces that improve accessibility and use of these models. Thus, this work aimed to: a) implement the Thompson model to simulate grain drying at temperatures milder than traditional ones for corn, rice, and soybean; and b) implement the calculation of thermal load that assists in evaluating the amount of heat to be transferred in the process. Although the drying time was longer, the results indicated that thermal loads are reduced when lower temperatures and humidities of the air are used.

**KEYWORDS:** simulation, grain drying, thermal load.

**INTRODUÇÃO:** A secagem é uma das etapas do processamento dos produtos agrícolas para retirar parte da água por meio de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem. A secagem de grãos com o uso de altas temperaturas influencia a qualidade dos grãos e o consumo de energia (MORAES et al., 2023). O interesse crescente em preservar as características dos grãos tem levado à busca por métodos que usam temperaturas mais amenas. Os processos envolvidos na secagem de grãos podem ser expressos matematicamente e representados em modelos, os quais têm-se demonstrado eficientes no desenvolvimento e na otimização dos secadores agrícolas. O estudo de carga térmica aplicada na secagem de grãos é uma área de pesquisa que tem por finalidade dimensionar a instalação, selecionar equipamentos, avaliar o funcionamento de equipamentos existentes ou a serem adquiridos e propor alterações necessárias ao sistema (KOMOLAFE, 2023). A carga térmica representa a quantidade de calor sensível e latente que deve ser retirada (resfriamento) ou aplicada (aquecimento) no recinto a fim de proporcionar as condições de alteração de temperatura para a secagem ou conservação do produto. Assim, este estudo visa contribuir com a avaliação da carga térmica e na previsão dos gastos energéticos por meio de um *software* de acesso aberto, uma abordagem pouco convencional, que represente o processo de secagem de grãos de milho, soja e arroz usando temperaturas mais amenas, alinhando-se a uma abordagem eficaz que atenda às necessidades da indústria agrícola moderna e ao fornecimento seguro de alimentos.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Os seguintes símbolos são definidos:  $\dot{Q}_{trn}$ : Quantidade de calor transferida no secador através das superfícies das paredes [ $\text{kJ h}^{-1}$ ]; L: Comprimento do cilindro [m];  $r_1$ : Raio interno [m];  $r_2$ : Raio externo [m];  $\Delta T$ : Diferencial de temperatura entre o ambiente externo e o interior da câmara [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $k_i$ : Condutividade térmica do material [ $\text{kJ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$ ];  $G_M$ : Movimentação diária de grãos [ $\text{kg dia}^{-1}$ ];  $c_{p,1}$ : Calor específico dos grãos antes do aquecimento [ $\text{kJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ];  $T_{ent}$ : Temperatura dos grãos quando entram na câmara [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $T_g$ : Temperatura dos grãos [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $h_{cg}$ : Calor latente de vaporização do produto [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ];  $c_{p,2}$ : Calor específico dos grãos após o aquecimento [ $\text{kJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ];  $T_e$ : Temperatura de equilíbrio dos grãos aquecidos [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $G_T$ : Quantidade total de grãos no secador [kg];  $Q_{resp}$ : Quantidade de calor liberado pela respiração dos grãos [ $\text{kJ kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$ ]; FTA: Fator de troca de ar [trocas  $\text{dia}^{-1}$ ];  $V_{cam}$ : volume do secador [ $\text{m}^3$ ];  $\Delta H'$ : Calor cedido que entra na câmara [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ];  $X_{exp}$ : Valor do dado experimental;  $X_{sim}$ : Valor do dado simulado. Considerando-se um secador de geometria cilíndrica, a carga térmica transmitida pelas superfícies foi calculada pela equação 1.

$$\dot{Q}_{trn} = \frac{2\pi k_i L \Delta T}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

A carga térmica devido aos produtos ( $Q_{prod}$ ) refere-se ao calor dos grãos e foi calculada pela equação 2.

$$\dot{Q}_{prod} = G_m [c_{p,1}(T_{ent} - T_g) + h_{cg} + c_{p,2}(T_g - T_e)] + G_T Q_{resp} \quad (2)$$

A carga térmica devido à infiltração de ar ( $Q_{inf}$ ) está relacionada com a entrada de ar através de aberturas. Quando a entrada do secador é aberta, uma determinada quantidade de ar externo penetra na mesma. O cálculo desta parcela de carga térmica foi feito pela equação 3.

$$\dot{Q}_{inf} = V_{cam} \times FTA \times \Delta H' \quad (3)$$

A metodologia se dividiu em três etapas. Primeiramente, a metodologia envolveu a pesquisa de bibliotecas e recursos para escolha do tipo de grão, das condições de secagem e dos dados experimentais para comparação. A segunda etapa se referiu à escolha da linguagem de programação. No *Back-End*, foi feita toda a programação contendo o código fonte de bibliotecas e equações utilizando PYTHON. Na terceira etapa, a validação do programa envolveu a comparação dos resultados obtidos pelo programa com os dados experimentais e com a literatura, havendo a verificação da precisão e da confiabilidade do programa. Para

validar o modelo de Thompson introduzido no programa, foram comparados os dados obtidos pelo mesmo com os dados obtidos em experimentos reais. Essa comparação é realizada para garantir que o programa esteja funcionando corretamente e que os resultados obtidos sejam confiáveis. A importância desses parâmetros confiáveis é relevante pela sequência nos cálculos da carga térmica. A análise estatística é feita para comparar os dados experimentais e simulados. O erro percentual absoluto ( $D_{esv}\%$ ) foi calculado conforme a equação 4.

$$D_{esv}\% = \left( \frac{X_{exp} - X_{sim}}{X_{exp}} \right) \times 100 \quad (4)$$

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A secagem com temperaturas mais amenas ( $< 60^{\circ}\text{C}$ ) é um processo lento, com suas próprias peculiaridades, como a natureza dos grãos e as taxas e características do ar de secagem. Por isso, as mudanças nas propriedades do produto ocorrem de modo mais lento. Observa-se que a variação nos resultados da simulação é influenciada pelos dados de entrada, sendo que neste trabalho foram avaliados três tipos de grãos (milho, arroz e soja) e duas umidades relativas e duas temperaturas para cada tipo de grão. Uma pequena alteração em um dos parâmetros de entrada pode resultar em diferenças significativas nos resultados. Esse padrão também é observado na prática, já que o processo de secagem em temperaturas amenas é afetado por variáveis dos grãos e psicrométricas do ar de secagem. Na Tabela 1 são comparados os tempos de secagem obtidos em testes experimentais com os resultados obtidos a partir do modelo de Thompson fazendo as seguintes considerações: um secador com paredes em alumínio, cuja condutividade térmica é  $k_i = 732,2 \text{ kJ h}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , altura de 10 m, raio externo de 5 m e espessura de parede de 2 cm. Na Tabela 2, são apresentadas as variações da carga térmica com base nas alterações de cenários aplicados na Tabela 1. Considerando que o volume aplicado ao secador na simulação foi de aproximadamente  $196 \text{ m}^3$ , atingiu-se cargas térmicas de secagem para milho de  $289.376 \text{ kJ h}^{-1}$  para umidade relativa (UR) de 28% e temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ ; e  $454.464 \text{ kJ h}^{-1}$  para UR 9,7% e temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ . O comportamento para arroz e soja foi similar, tendo maiores cargas térmicas na temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  em relação a  $40^{\circ}\text{C}$ . Estudos futuros continuados devem ser desenvolvidos para a simulação de cargas térmicas usando temperaturas do ar entre  $35^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$  e UR menores do que 20%. Isto permitirá determinar condições de processo que resultem em boas qualidades de grãos e com menores gastos energéticos. De acordo com Ostrikov et al. (2022), um projeto de secador de grãos permite o ajuste da carga específica de grãos na rede de distribuição do ar, facilitando a ocorrência de secagem uniforme e o mínimo consumo de energia.

TABELA 1. Dados experimentais e simulados pelo programa - Modelo de Thompson (1968).

CONDIÇÕES	Tempo de secagem - literatura (h)	Tempo de secagem - programa (h)	Erro percentual (%)
MILHO	Queiroz et al. (1982)		
UR=28%; $40^{\circ}\text{C}$	14	14	0
UR=9,7%; $60^{\circ}\text{C}$	5	5	0
ARROZ	Caneppele et al. (1993)		
UR=50%; $40^{\circ}\text{C}$	11	11	0
UR=19%; $60^{\circ}\text{C}$	8	7	12,5
SOJA	Mata et al. (1999)		
UR=32%; $40^{\circ}\text{C}$	5,5	5,5	0
UR=12%; $60^{\circ}\text{C}$	2,8	2,8	0

TABELA 2. Cálculo da carga térmica usando-se o *software* desenvolvido.

ENTRADA	Carga térmica - transmissão de calor (kJ h <sup>-1</sup> )	Carga térmica - produtos (kJ h <sup>-1</sup> )	Carga térmica - infiltração de ar (kJ h <sup>-1</sup> )	Carga térmica total (kJ h <sup>-1</sup> )
<b>MILHO</b>				
UR=28%; 40°C	114.873	26.063	148.440	289.376
UR=9,7%; 60°C	344.450	70.521	39.492	454.464
<b>ARROZ</b>				
UR=50%; 40°C	114.873	31.422	191.759	338.055
UR=19%; 60°C	344.450	82.739	46.650	473.840
<b>SOJA</b>				
UR=32%; 40°C	114.873	20.544	94.507	229.925
UR=12%; 60°C	344.450	59.967	31.467	435.886

**CONCLUSÕES:** Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que o *software* desenvolvido simula de forma adequada os processos de secagem dos grãos de soja, milho e arroz na faixa de temperatura de 40 a 60°C e UR < 50%. Além disso, o *software* possui a capacidade de auxiliar no dimensionamento de um sistema para transferência de calor aplicado na secagem de grãos utilizando temperaturas mais amenas e umidades do ar mais baixas. O seu aperfeiçoamento permitirá a utilização por diferentes públicos, incluindo no meio acadêmico educacional para cursos de graduação em Engenharia Agrícola e afins.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem à UFSM, à CAPES, à FAPERGS e ao CNPq. G. L. Zabot agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade (308067/2021-5).

**REFERÊNCIAS:** CANEPPELE, C.; HARA, T.; MARTINS, J. H.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. **Simulação de secagem de arroz (*Oriza sativa* L.)**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Ilhéus, BA, p. 1080-1090, 1993.

KOMOLAFE, C. A. Numerical simulation of the 3D simultaneous heat and mass transfer in a forced convection solar drying system integrated with thermal storage material. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 145, n. 5, p. 051012, 2023.

MATA, M. E. R. M. C.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. Programa computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 1, n.1, p. 33-50, 1999.

MORAES, R. S.; CORADI, P. C.; NUNES, M. T., LEAL, M. M.; MULLER, E. I.; TEODORO, P. E.; FLORES, E. M. M. Thick layer drying and storage of rice grain cultivars in silo-dryer-aerator: Quality evaluation at low drying temperature. **Helyion**, v. 9, n. 7, p. e17962, 2023.

QUEIROZ, D. M., SILVA, J. S., MELO, E. C. **Práticas de simulação de secagem em calculadoras programáveis**. Ed. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 1982.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying - A new model. **Transaction of the ASAE**, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.