



Modelagem da Secagem Intermitente de Grãos de Soja Utilizando Modelos de Parâmetros Distribuídos Modeling of the Intermittent Drying of Soybean Grains Using Distributed Parameter Models

Lucas de Oliveira Reis¹, Ana Caroline Raimundini Aranha², Rafael Oliveira Defendi³

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a secagem de grãos de soja em operação intermitente por meio de modelos de parâmetros distribuídos. Analisou-se também o coeficiente global de transferência de massa por convecção (K_c) e a difusividade (D) pelo ajuste dos modelos com base em dados experimentais. O presente proporcionou uma compreensão mais profunda dos complexos processos envolvidos na secagem de produtos agrícolas em operação intermitente. O ajuste dos parâmetros do modelo, seguido pela validação com dados experimentais, demonstrou a confiabilidade do modelo de parâmetros distribuídos para representar com precisão a cinética da secagem intermitente.

PALAVRAS-CHAVE: parâmetros distribuídos; secagem intermitente; soja.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the drying of soybeans in intermittent operation using distributed parameter models. The global convective mass transfer coefficient (K_c) and diffusivity (D) was also analyzed by fitting the models based on experimental data. The present provided a deeper understanding of the complex processes involved in the drying of agricultural products in intermittent operation. Fitting of model parameters, followed by validation with experimental data, demonstrated the reliability of the distributed parameter model to accurately represent intermittent drying kinetics.

KEYWORDS: distributed parameter; intermittent drying; soybean.

INTRODUÇÃO

A importância da secagem de grãos é reduzir o teor de umidade, tornando-os mais seguros para armazenamento e processamento, além de prolongar seu tempo de armazenamento ao inibir o crescimento de bactérias e fungos (CHARLOTTE et al., 2022).

O processo de secagem envolve o uso de sistemas que controlam a temperatura, sendo crítico encontrar o equilíbrio entre temperaturas altas e baixas, no intuito de evitar danos aos grãos e minimizar custos de produção. Um método promissor é a secagem intermitente, que reduz o consumo de energia e evita problemas como quebra de grãos e alterações nas propriedades dos alimentos (DALPASQUALE et al., 2008; LIMA, 2017).

Para otimizar o processo de secagem são utilizados modelos matemáticos que permitem prever diversos parâmetros, como tempo de secagem, consumo de energia e teor de umidade final (FREITAS, 2016; GONELI et al., 2009; VALENTE et al., 2013).

É importante considerar a distribuição da umidade dentro dos grãos ao usar modelos de parâmetros distribuídos, especialmente em produtos agrícolas onde a difusão é um fator importante. Além disso, também se destaca a influência do coeficiente global de

¹ Bolsista da UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: lucas.oliveirareis_99@outlook.com. ID Lattes: 0044992389503941.

² Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil. E-mail: carolraimundini@gmail.com. ID Lattes: 4045139426578662.

³ Docente no Curso/Departamento/Programa. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: rafaeldefendi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7640642191763213.



transferência de massa por convecção e da difusividade na velocidade de secagem dos grãos (FREITAS, 2016; GONELI et al., 2009; VALENTE et al., 2013).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a secagem intermitente de grãos de soja usando modelos de parâmetros distribuídos e analisar o coeficiente global de transferência de massa por convecção (K_c) e a difusividade (D) pelo ajuste do modelo com base em dados experimentais.

METODOLOGIA

Este estudo examinou a aplicação de modelos de parâmetros distribuídos na secagem intermitente de grãos de soja, usando dados experimentais obtidos por Fuzinelli et al. (2020). Os experimentos foram conduzidos em duplicata em uma estufa, com variações de temperatura (40, 55 e 70 °C) e períodos de intermitência entre 5 e 10 minutos, totalizando 90 minutos de secagem.

Para investigar o impacto do teor inicial de umidade na cinética de secagem, utilizou-se do modelo de parâmetros distribuídos. Este modelo é baseado na equação de difusão em coordenadas esféricas, assumindo-se que a difusividade (D) é constante e que o grão é uma esfera com distribuição simétrica de umidade desde o centro até a superfície do grão. Este modelo foi aplicado por Defendi et al. (2016) para a secagem de grãos de soja em operação contínua. A Equação (1) apresenta o modelo aplicado.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left[\frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right] \quad (1)$$

Para resolver o modelo descrito na Equação (1), assume-se uma distribuição inicial de umidade uniforme dentro do grão ($X(r,0) = X_0$). Além disso, são estabelecidas duas condições de contorno: a presença de simetria no centro do grão ($r = 0$) e a equivalência entre o fluxo de difusão e o fluxo convectivo na superfície do grão em qualquer momento durante o processo de secagem (DEFENDI et al., 2016).

$$\frac{\partial x}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \quad \forall t \quad (2)$$

$$-\rho_{DS} D \frac{\partial x}{\partial r} \Big|_{r=R} = \rho_a K_c (X_R - X_e) \quad \forall t \quad (3)$$

No modelo, K_c representa o coeficiente de transferência de massa por convecção, ρ_a é a densidade do ar, X_R denota o teor de umidade na superfície do grão e X_e indica o teor de umidade de equilíbrio. A resolução numérica do modelo de parâmetros distribuídos (Equação 1) envolveu o ajuste dos parâmetros D e K_c por meio do somatório dos quadrados dos resíduos (RSS). Esse modelo foi resolvido numericamente usando o método das diferenças finitas, de maneira semelhante ao estudo anterior de Defendi et al. (2016).

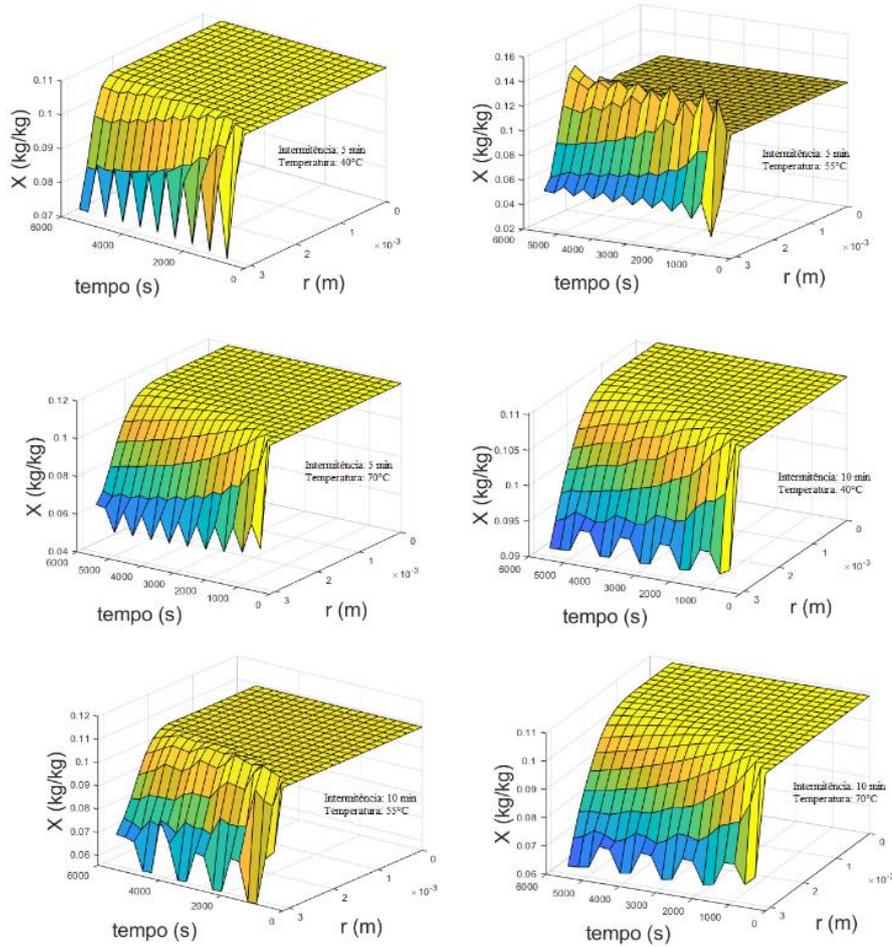
AJUSTES DE PARÂMETROS

Para avaliar o ajuste dos modelos foram calculados a RSS, X^2 (qui-quadrado), RMSE (raiz do erro quadrático médio) e EF (eficiência do modelo). O X^2 avalia o ajuste entre dados experimentais e previstos, buscando um valor mínimo para indicar um ajuste preciso. O RMSE mede a raiz quadrada do desvio entre os valores previstos e reais, enquanto o EF indica a eficiência do modelo em prever o comportamento de secagem, sendo desejáveis valores próximos a zero para RSS, X^2 e RMSE e 1,0 para o EF.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

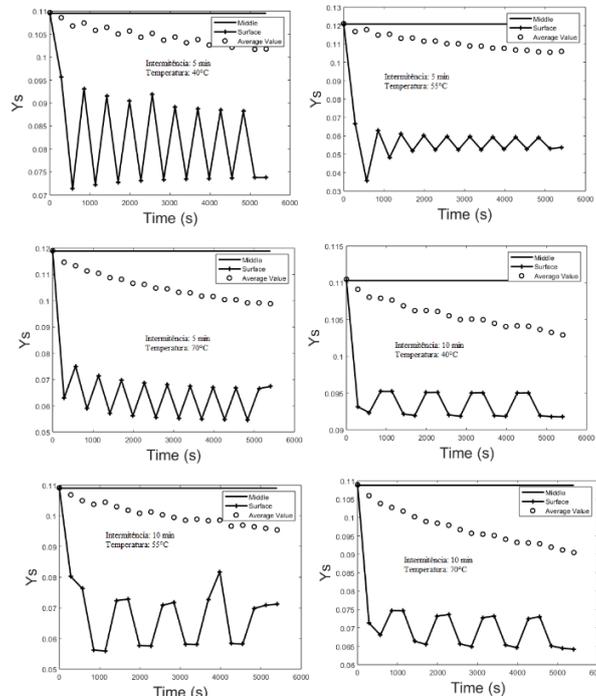
Os resultados da modelagem da secagem intermitente de grãos de soja usando a equação de difusão em coordenadas esféricas são mostrados nas Figuras 1, 2 e 3. As simulações investigaram o impacto das mudanças na temperatura e no teor inicial de umidade no comportamento dos grãos de soja durante o processo de secagem intermitente ao longo do tempo.

Figura 1 – Teor de umidade em função do raio do grão e tempo de secagem.



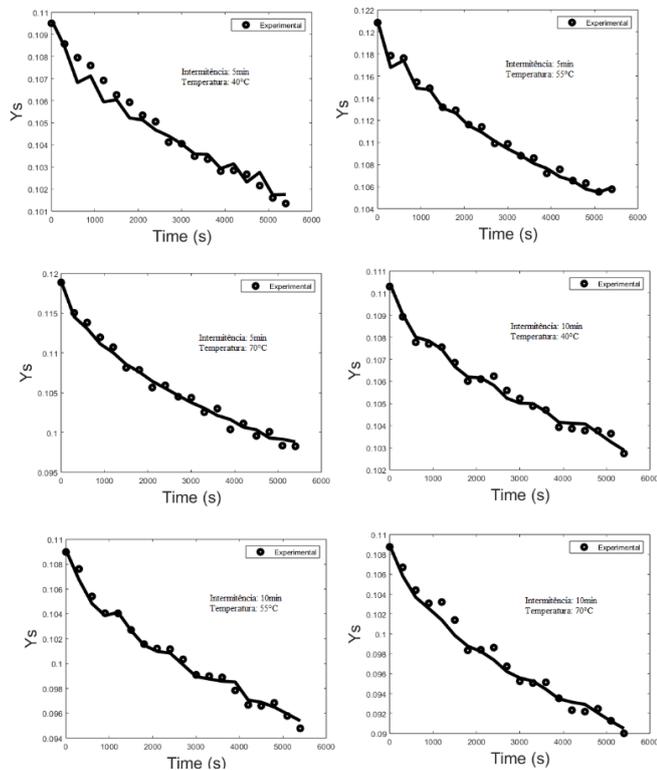
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 2 – Teor de umidade do grão distribuído ao longo do raio em função do tempo de secagem.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3 – Teor de umidade experimental e calculado pelo modelo.



Fonte: Autoria própria (2023).



Ajustes de parâmetros foram feitos para analisar a correspondência entre dados experimentais e simulações. X^2 , RMSE e EF foram usados para avaliar o ajuste (Tabela 1). D_1 e D_2 representam a difusividade dentro e fora do secador. Os coeficientes D e K_c variaram com temperatura e períodos de intermitência. Valores de difusão foram maiores conforme o aumento da temperatura, sugerindo influência da temperatura na difusão da água do interior até a superfície do material.

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos para os experimentos de 5 e 10 minutos de intermitência.

| Temperatura | 40°C | 55°C | 70°C |
|---|-----------|----------|----------|
| 5 minutos | | | |
| $D_1 \times 10^{-10}$ (m ² /s) | 0,179 | 0,321 | 0,153 |
| $D_2 \times 10^{-10}$ (m ² /s) | -4,85E-02 | -0,401 | 0,262 |
| K_c (m/s) | 5,36E-03 | 2,14E-03 | 7,52E-03 |
| X^2 | 1,07E-11 | 5,98E-12 | 4,41E-09 |
| RMSE | 9,48E-06 | 7,10E-06 | 1,93E-05 |
| NRMSE | 1,16E-03 | 4,64E-04 | 9,35E-04 |
| EF | 0,962 | 0,991 | 0,987 |
| 10 minutos | | | |
| Temperatura | 40°C | 55°C | 70°C |
| $D_1 \times 10^{-10}$ (m ² /s) | 0,390 | 0,324 | 0,294 |
| $D_2 \times 10^{-10}$ (m ² /s) | 0,189 | 0,189 | 5,84E-02 |
| K_c (m/s) | 3,65E-03 | 8,26E-03 | 1,28E-03 |
| X^2 | 5,32E-12 | 5,32E-12 | 2,67E-11 |
| RMSE | 2,12E-06 | 8,08E-06 | 1,50E-05 |
| NRMSE | 2,80E-04 | 4,69E-04 | 6,78E-04 |
| EF | 0,988 | 0,988 | 0,991 |

Fonte: Autoria própria (2023).

A modelagem de parâmetros distribuídos apresentou-se como uma ferramenta eficaz para prever o comportamento da secagem intermitente e aperfeiçoar o processo de secagem de grãos de soja. A compreensão desses fatores é essencial para melhorar a eficiência energética, a qualidade do produto e a sustentabilidade na produção de alimentos. Esses resultados abrem caminho para futuras investigações e aplicações da modelagem de secagem intermitente por modelos de parâmetros distribuídos em outros tipos de grãos e condições operacionais (DEFENDI et al., 2016).

CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados, verificou-se que a temperatura é um fator importante no processo de secagem intermitente. O ajuste dos parâmetros do modelo, seguido pela validação com dados experimentais, demonstrou a confiabilidade do modelo de parâmetros distribuídos para representar com precisão a cinética da secagem intermitente. O uso de parâmetros estatísticos, como X^2 , RMSE e EF, permitiu uma avaliação objetiva da eficácia do modelo em prever o comportamento da secagem. Pode-se concluir que, este estudo amplia o conhecimento sobre os processos de secagem intermitente de grãos de soja e oferece contribuições, pois este trabalho poderá servir como um guia para a otimização de processos com base no modelo validado.



Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

REFERÊNCIAS

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W & HALL, C.W., Drying and storage of grains and oilseeds. **The AVI Publishing**, New York, p.420, 1992.

C. Kumar, M. A. Karim, and M. U. H. Joardder. Intermittent drying of food products: A critical review, **Journal of Food Engineering**, v.121, p.48-57, 2014.

Charlotte Van Engeland, Laurent Spreutels, Robert Legros, Benoît Haut, Comprehensive analysis of intermittent drying. **A theoretical approach, Food and Bioprocess Processing**, v.131, p.86-101, 2022.

C. M. Franco, e A. G. de Lima. Modelagem Matemática e Simulação Computacional da Secagem Contínua e Intermitente de Sólidos Elipsoidais, **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v.6, n.2, 2018.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; SILVA, L. H. M.; KOLLINGA, E. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme. **Applied Mathematics and Computation**, v.200, n.2, p.590-595, 2008.

DEFENDI, R. O., Douglas Junior Nicolin, Paulo Roberto Paraíso & Luiz Mario de Matos Jorge (2016) **Assessment of the initial moisture content on soybean drying kinetics and transport properties**, *Drying Technology*, 34:3, p.360-371, 2016.

FREITAS, R. P. D. Estudo experimental e da simulação da secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fluidizado. **[S.I.]**: [s.n.], 2016.

FUZINELLI, J. V. A.; DEFENDI, R. O.; ARANHA, A. C. R. Modelagem da secagem intermitente de grãos de soja. **[S.I.]**: [s.n.], 2020.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenagem**, Viçosa-MG, v.11, p.64-73, 2009.

Valente, D.S.M., D.M. Queiroz, L.C. Silva, F.L. Santos, and I.A. Diogo. "Modelagem E Simulação Da Secagem De Milho Em Secador Intermitente De Fluxos Cruzados." **Revista Agrotecnologia - Agrotec** 4.1, 109-19, 2013.