



## Modelagem da Secagem Contínua de Grãos de Trigo utilizando Modelos de Parâmetros Distribuídos

### Modeling Continuous Drying of Wheat Grains using Distributed Parameter Models

Leonardo Henrique Rissi<sup>1</sup>, Ana Caroline Raimundini Aranha<sup>2</sup>, Rafael Oliveira Defendi<sup>3</sup>

#### RESUMO

O estudo descreve a modelagem da secagem contínua de grãos de trigo utilizando modelos de parâmetros distribuídos. O trigo é um dos grãos mais importantes no mercado internacional, e sua qualidade pode ser afetada pelas condições de secagem e armazenamento. Foram utilizados modelos matemáticos combinados com dados experimentais para ajustar os parâmetros do modelo. Os resultados mostraram que o modelo de parâmetros distribuídos foi eficiente em prever o processo de secagem contínua, com uma eficiência próxima a 99%. Além disso, foi observado que a temperatura do ar e a distribuição do teor de umidade no interior do grão influenciam na difusão de água durante a secagem. Esses resultados são importantes para o projeto de secadores e para a otimização da secagem de grãos de trigo.

**PALAVRAS-CHAVE:** secagem contínua; difusão; parâmetros distribuídos; secagem; trigo.

#### ABSTRACT

The study describes the modeling of continuous drying of wheat grains using distributed parameter models. Wheat is one of the most important grains in the international market, and its quality can be affected by drying and storage conditions. Mathematical models combined with experimental data were used to adjust the model parameters. The results showed that the distributed parameter model was efficient in predicting the continuous drying process, with an efficiency close to 99%. Additionally, it was observed that air temperature and moisture content distribution inside the grain influence water diffusion during drying. These results are important for dryer design and optimization of wheat grain drying.

**KEYWORDS:** continuous drying; diffusion; distributed parameters; drying; wheat.

#### INTRODUÇÃO

Essencial na alimentação humana, o trigo (*Triticum aestivum*) é um dos grãos com maior importância no mercado internacional, sendo um dos grãos com maior comércio no mundo (MACHADO;ATAIDE, 2010).

Segundo Muller (2022) os efeitos da interação que a cultura sofre em campo podem afetar diretamente a qualidade do trigo, resultando de fatores como a composição do solo, condições climáticas e procedimentos de pré-colheita. Porém, os efeitos de pós-colheita são necessariamente iguais, já que quase 30 % das culturas produzidas sofrem com a deterioração dos grãos e com a proliferação de insetos e animais (FDA, 2017). Portanto, na fase de pós-colheita, a secagem é o processo mais utilizado para garantir a qualidade do grão, reduzindo a umidade e evitando a proliferação de fungos e pragas, durante o armazenamento (ULLMANN et al., 2010).

O principal objetivo do processo de secagem se constitui na remoção da fase líquida existente no grão, através de calor aplicado diretamente ao grão por meio de equipamentos

<sup>1</sup> Voluntário do programa de iniciação científica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; leonardorissi@alunos.utfpr.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil; carolraimundini@gmail.com

<sup>3</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; rafaeldefendi@utfpr.edu.br



secadores, reduzindo assim o teor de umidade do grão, e prevenindo a deterioração dos grãos, reduzindo o risco de perda no armazenamento (DE LIMA, 2015).

Modelos matemáticos combinados com dados experimentais sobre a cinética de secagem do grão têm sido vastamente utilizados em otimização de processos e simulação de secagem de grãos para projeto de secadores (DEFENDI et al., 2015). SETH-SARKAR (2004) cita a importância de considerar a distribuição de umidade no interior do material para a obtenção dos parâmetros do modelo, pois a secagem pode ocasionar em mudanças na estrutura do grão, deste modo, afim de prever danos e rachaduras nos grãos, usa-se a distribuição de parâmetros do modelo em relação ao espaço (distribuído).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de secagem de grãos de trigo por meio de modelos de parâmetros distribuídos. Também foi ajustado o coeficiente de transferência de massa por convecção ( $K_c$ ) e a difusão ( $D$ ).

## METODOLOGIA

Os dados experimentais utilizados nessa pesquisa foram obtidos por CORREA et al. (2021). Os grãos de trigo foram secos em estufa nas temperaturas de 40°C, 55°C e 70°C. As amostras foram secas por 90 minutos, sendo quantificadas as massas a cada 5 minutos em balança semi-analítica, no intuito de estimar o teor de umidade ao longo do tempo pela variação de massa.

Os ensaios foram conduzidos em duplicata para cada temperatura de secagem estimada. Assim, para uma pesquisa mais detalhada, também foram examinadas as características de transporte, difusividade ( $D$ ) e o coeficiente convectivo ( $K_c$ ), utilizando modelos matemáticos.

O modelo utilizado foi similar ao modelo adotado por DEFENDI et al. (2015), aplicado para a secagem contínua de soja. A análise da cinética de secagem em relação ao teor inicial de umidade pode ser abordada através da implementação de modelos de parâmetros distribuídos, os quais permitem estimar o perfil de umidade ao longo do raio da semente. Neste estudo, adotou-se um modelo fundamentado na equação de difusão em coordenadas esféricas. Assumiu-se que a difusividade ( $D$ ) é constante ao longo do grão, e que o grão analisado se comporta como uma esfera, proporcionando uma distribuição equilibrada de umidade do centro do grão até a sua superfície (DEFENDI et al., 2015):

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

Em seguida, assumiu-se que no interior do grão ocorre uma distribuição homogênea do teor de umidade inicial, em outros termos, o valor da umidade apresenta o mesmo para cada ponto no interior do grão ( $X(r, 0) = X_0$ ) sendo a condição inicial do problema (DEFENDI et al., 2015). Além da condição inicial estabelecida, há mais duas condições de contorno, em  $r = 0$  é reconhecida a existência de simetria no centro do grão, e pode-se considerar que o fluxo difusivo é igual ao fluxo convectivo na face do grão em qualquer instante no decorrer do processo de secagem (DEFENDI et al., 2015).

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \forall t \quad (2)$$



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

Kc se refere ao coeficiente de transferência de massa por convecção,  $\rho_a$  é a densidade do ar,  $X_R$  é o teor de umidade na face do grão e  $X_e$  é o teor de umidade de equilíbrio.

Para resolução dos modelos, foram aplicadas as considerações e métodos apresentados por DEFENDI et al. (2015). Com os parâmetros previamente estabelecidos, a solução do modelo de parâmetros distribuídos foi obtida por meio do método das diferenças finitas. Os valores de difusividade (D) e coeficiente de transferência de massa (Kc) foram ajustados empregando o método dos mínimos quadrados, de acordo com os resultados experimentais coletados durante o processo de secagem das sementes de trigo sob diferentes condições de temperatura.

Para o ajuste dos parâmetros dos modelos, foi minimizada a seguinte função objetivo ( $f_{obj}$ ), na qual analisa-se a discrepância entre os valores obtidos experimentalmente com os valores presumidos pelo modelo.

$$f_{obj} = \sum (M_{exp} - M_{pre})^2 \quad (4)$$

$M_{exp}$  representa o teor de umidade experimental,  $M_{pre}$  representa o teor de umidade predito pelo modelo e  $N_o$  representa o número de observações. Qui-quadrado reduzido ( $\chi^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro quadrático médio normalizado (NRMSE) e eficiência do modelo (EF) foram parâmetros utilizados para avaliar a eficácia do ajuste. Portanto, ao realizar o ajuste dos parâmetros do modelo, o objetivo do ajuste é a minimizar o  $\chi^2$  e obter valores próximos de zero para RMSE, MSE e NRMSE, e próximo de um para eficiência. Através das equações é possível prever e avaliar a qualidade do ajuste do modelo e comparar com os dados experimentais, assim, prevendo o comportamento da cinética de secagem para as sementes de trigo (DEFENDI et al., 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M_{exp} - M_{pre})^2}{N_o}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (M_{exp} - M_{pre})^2}{N_o - N_c} \quad (6)$$

$$EF = \frac{\sum (M_{exp} - \bar{M}_{exp})^2 - \sum (M_{pre} - M_{exp})^2}{\sum (M_{exp} - \bar{M}_{exp})^2} \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{M_{max} - M_{min}} \quad (8)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos resultados, observa-se que tanto a temperatura do ar quanto a distribuição de teor de umidade no interior da semente impactam na difusão de água do centro até a



superfície da semente, fenômeno este que controla as taxas de secagem do processo. Esta influência também foi verificada pelos valores de D ajustados, os quais para a maioria dos casos tiveram um aumento com o aumento da temperatura, caracterizando assim um favorecimento das transferências de massa e calor. As tabelas a seguir fornecem os parâmetros estatísticos obtidos por meio do ajuste dos modelos de parâmetros distribuídos, submetidos a uma secagem contínua nas temperaturas de 40,55 e 70 °C.

*Tabela 1 - Parâmetros estatísticos para a secagem a 40 °C.*

Grãos	RSS	$\chi^2$	RMSE	NRMSE	MSE	KC (m/s)	D (m <sup>2</sup> /s)	EF
Úmido 1	3,469E-06	2,168E-07	4,273E-04	2,459E-03	1,826E-07	4,610E+04	2,559E-11	0,965
Úmido 2	5,291E-06	3,528E-07	5,422E-04	2,177E-03	2,940E-07	4,621E-02	2,728E-11	0,979
Seco 1	2,732E-10	1,708E-11	3,792E-06	1,830E-04	1,438E-11	8,175E-04	1,258E-11	0,977
Seco 2	5,189E-11	3,243E-12	1,653E-06	5,318E-05	2,731E-12	1,523E-03	1,738E-11	0,995

Fonte: Autoria própria (2023).

*Tabela 2 - Parâmetros estatísticos para a secagem a 55 °C.*

Grãos	RSS	$\chi^2$	RMSE	NRMSE	MSE	KC(m/s)	D(m <sup>2</sup> /s)	EF
Úmido 1	2,717E-07	1,356E-10	1,196E-04	7,035E-04	1,430E-08	3,783E-04	2,641E-11	0,990
Úmido 2	4,122E-06	2,576E-07	1,856E-04	4,658E-04	2,169E-07	4,218E-02	2,364E-11	0,974
Seco 1	2,170E-09	1,356E-10	1,069E-05	2,356E-04	1,142E-10	2,676E+04	1,284E-11	0,985
Seco 2	6,545E-07	4,090E-08	1,856E-04	3,088E-03	3,445E-08	9,317E+04	2,207E-11	0,846

Fonte: Autoria própria (2023).

*Tabela 3 - Parâmetros estatísticos para a secagem a 70 °C.*

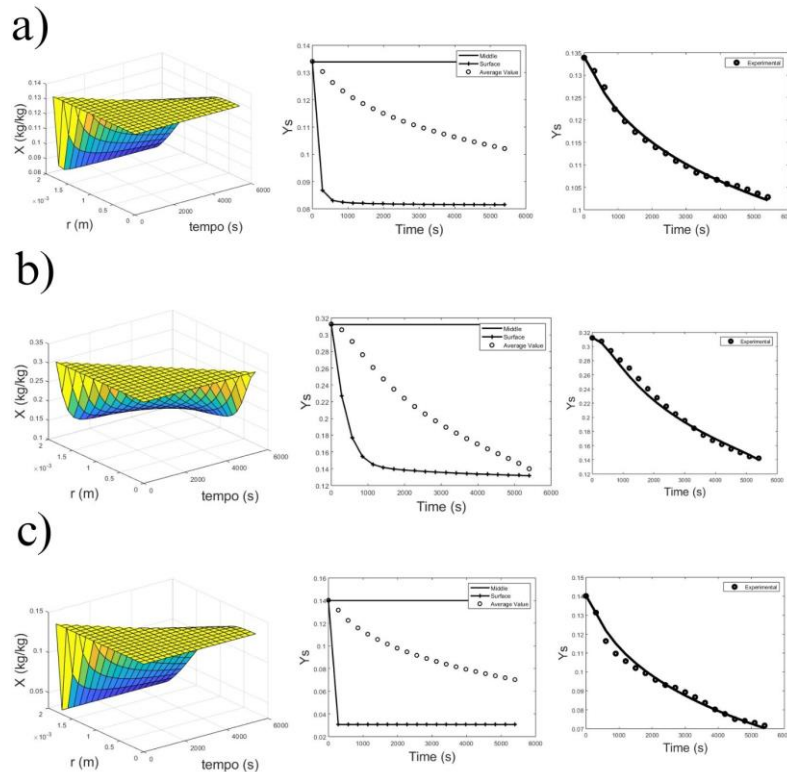
Grãos	RSS	$\chi^2$	RMSE	NRMSE	MSE	KC (m/s)	D (m <sup>2</sup> /s)	EF
Úmido 1	1,659E-05	1,037E-06	9,344E-04	5,044E-03	8,731E-07	1,902E+04	2,347E-11	0,923
Úmido 2	6,091E-04	3,807E-05	5,662E-03	2,655E-02	3,206E-05	4,731E+05	2,622E-11	0,640
Seco 1	9,085E-09	5,678E-10	2,187E-05	3,192E-04	4,782E-10	3,613E+04	1,829E-11	0,986

Fonte: Autoria própria (2023).

De acordo com as Tabelas 1 a 3, observou-se que conforme há um aumento da temperatura do ar de secagem, não houve um aumento proporcional do valor de Kc. Segundo DEFENDI et al. (2015), o modelo é pouco sensível às mudanças de Kc com a temperatura para a secagem de soja. Analogamente, estes resultados obtidos para os valores de Kc para a secagem de grão de trigo podem indicar que o modelo seja pouco sensível a variação da temperatura para este parâmetro.

A Figura 1 apresenta as curvas ajustadas para a secagem de grãos de trigo, no qual o primeiro gráfico representa o perfil de distribuição do teor de umidade ao longo do raio e do tempo de secagem, o segundo gráfico representa o perfil de umidade no centro e na superfície do grão e o terceiro gráfico representa a média do teor de umidade obtida nos ajustes através do modelo em comparação aos dados experimentais.

Figura 1 – Distribuição de umidade pelo modelo de parâmetro distribuídos.



Fonte: Autoria própria (2023). (A) Grão seco 2 submetido a uma secagem contínua a 40 °C; (B) Grão úmido 1 submetido a uma secagem contínua a 55 °C; (C) Grão seco 1 submetido a uma secagem contínua a 70 °C

A Tabela 4 apresenta os melhores resultados obtidos em termos de eficiência a partir da secagem contínua de grãos de trigo, com os grãos úmidos e secos nas temperaturas de 40, 55 e 70 °C. Conforme os resultados apresentados, o modelo de parâmetros distribuídos se mostrou eficiente em diferentes temperaturas, apresentando valores de EF acima de 90 %. A temperatura de 40 °C sucedeu na maior eficiência obtida entre as temperaturas de secagem, resultando em um valor de 99,5 %. Estes resultados apontam que o modelo pode ser aplicado para estudos futuros de simulação de processos, projeto de secadores e otimização da secagem de grão de trigo.

Tabela 4 – Melhores parâmetros estatísticos obtidos.

Temperatura (°C)	Kc (m.s <sup>-1</sup> )	D (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	EF
40	1,523E-03	1,738E-11	0,995
55	3,783E-04	2,641E-11	0,990
70	3,613E+04	1,829E-11	0,986

Fonte: Autoria própria (2023).

## CONCLUSÃO

Verificou-se que o modelo de parâmetros distribuídos foi eficiente em prever o processo de secagem contínua. Observou-se uma aproximação dos valores dos teores de



umidade estimados pelo modelo aos dados experimentais, com EF superior a 90%. Diante desses resultados, é possível apontar que este modelo pode ser aplicado para o projeto de secadores, além do auxílio para o estudo de simulação e otimização de processos. Além disso, por meio dos valores de  $K_c$  e  $D$  ajustados, como também pelos perfis de umidade distribuídos ao longo do raio do grão, foi possível analisar a influência da temperatura e da distribuição do teor de umidade nas cinéticas de secagem, as quais foram potencializadas pelo aumento de temperatura.

## REFERÊNCIAS

DE LIMA, A. G. B., SILVA, J. V., PEREIRA, E. M. A., SANTOS, I. B., DE LIMA, W. M. P. B. in **Advanced Structured Materials** (Eds: A. Öchsner, L. F. M. Silva, H. Altenbach), Springer Science, New York 2015.

CORRÊA, Victor Hugo; ROMANSINA, Bruna Clara; ARANHA, Ana Caroline Raimundini; TONIN, Lilian Tatiani Dusman; DEFENDI, Rafael Oliveira. **Modelagem da Cinética de Secagem Intermitente de Sementes de Trigo**. SEI-SICITE, [s. l.], 2021. Disponível em: [www.eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2021/paper/viewFile/8135/3794](http://www.eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2021/paper/viewFile/8135/3794). Acesso em: 20 jul. 2023.

DEFENDI, R. O. et al. **Assessment of the initial moisture content on soybean drying kinetics and transport properties**. *Drying Technology*, v. 34, n. 3, p. 360–371, 19 jun. 2015. DOI:10.1080/07373937.2015.1055496.

**FOOD CODE: U.S. Public Health Service**. College Park, MD 20740: Public Health Service • Food and Drug Administration, 1934-2017. Anual. Disponível em: <https://www.fda.gov/food/fda-food-code/food-code-2017>. Acesso em: 24 out. 2023.

MACHADO, T. de A.; ATAIDES, C. de F. **DINÂMICA DA FORMAÇÃO DE PREÇOS NO MERCADO DE TRIGO DO BRASIL**. Brasil, 2010.

MULLER A. et al. **Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality**. *Rice Science*, Volume 29, Issue 1, 2022, Pages 16-30, ISSN 1672-6308, <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.12.002>.

SETH, D., SARKAR, A. **A Lumped Parameter Model for Effective Moisture Diffusivity in Air Drying of Foods, Food and Bioproducts Processing**. Volume 82, Issue 3, 2004, <https://doi.org/10.1205/fbio.82.3.183.44181>.

ULLMANN, R. et al. **Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial**. *Rev. Ciênc. Agron*, Goiás, v. 41, n. 3, p. 442-447, 23 set. 2010. DOI <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000300017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/JzPyzN69yVMFWV7VQBkGf5m/?lang=pt#>. Acesso em: 25 out. 2023.