



# Modelagem da Cinética de Secagem Intermitente de Sementes de Trigo

## *Modelling of Intermittent Drying Kinetics of Wheat Seeds*

Victor Hugo Corrêa\*, Bruna Clara Romansina<sup>†</sup>,  
Ana Caroline Raimundini Aranha<sup>‡</sup>, Lilian Tatiani Dusman Tonin<sup>§</sup>, Rafael Oliveira Defendi<sup>¶</sup>

### RESUMO

A secagem é uma operação unitária de extrema importância para materiais que podem ser degradados, devido ao alto teor de umidade em seu interior. A secagem intermitente é um processo que vem sendo estudado, pois apresenta vantagens em comparação à convencional. Diante disso, o presente trabalho avaliou o efeito das secagens intermitentes e convencionais em grãos de trigo, por meio de modelos matemáticos ajustados com base em dados experimentais. Verificou-se que em relação aos modelos cinéticos da secagem convencional, o de Hii, Law e Clock apresentou melhores ajustes, com eficiência do modelo média de 0,9976. Para a modelagem da secagem intermitente, observou-se que o melhor ajuste foi obtido considerando o coeficiente global de transferência de massa como uma função do tipo quadrática em função da temperatura. Este modelo ajustado possibilitou descrever os dados experimentais com um desvio global máximo em torno de 10%.

**Palavras-chave:** cinética, coeficiente global de transferência de massa, secagem.

### ABSTRACT

Drying is an extremely important unit operation for materials that can be degraded due to the high moisture content inside. Intermittent drying is a process that has been studied, as it has advantages compared to the conventional one. Therefore, the present work evaluated the effect of intermittent and conventional drying on wheat grains, through adjusted mathematical models based on experimental data. It was found that in relation to the kinetic models of conventional drying, the Hii, Law and Clock showed better fits, with average model efficiency compared to the experimental data with a value of 0.9976. For the modeling of intermittent drying, it was observed that the best fit was obtained considering the global mass transfer coefficient as a quadratic-type function as a function of temperature. This adjusted model made it possible to describe the experimental data with a maximum global deviation around 10 %.

**Keywords:** kinetics, overall mass transfer coefficient, drying.

## 1 INTRODUÇÃO

Globalmente, uma das indústrias com maior influência é a agroindústria, sendo que os grãos com maior destaque são: arroz, cevada, sorgo, milho e trigo (STATISTA, 2020). A produção de trigo ocorre sazonalmente, e para suprir a demanda desta matéria prima durante todo o ano, necessita-se da realização do armazenamento.

\* Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; [victorcorrea@alunos.utfpr.edu.br](mailto:victorcorrea@alunos.utfpr.edu.br)

<sup>†</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana: [bruna.romansina@hotmail.com](mailto:bruna.romansina@hotmail.com)

<sup>‡</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; [carolraimundini@gmail.com](mailto:carolraimundini@gmail.com)

<sup>§</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; [liliandusman@utfpr.edu.br](mailto:liliandusman@utfpr.edu.br)

<sup>¶</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; [rafaeldefendi@utfpr.edu.br](mailto:rafaeldefendi@utfpr.edu.br)



Para o armazenamento do trigo, o teor de umidade deve variar entre 12,5-14,0 % em base seca (b.s.), porém, o trigo é colhido com elevado teor de umidade, variando entre 18,0-20,0 % (b.s.), necessitando do processo de secagem (ABSOLLARHPOUR *et al.*, 2020; KARUNAKARAN *et al.*, 2002).

Pesquisas são realizadas para a otimização do processo de secagem intermitente, com o intuito de se obter as condições mais satisfatórias, visando maximizar a preservação da qualidade do material e minimizar o consumo de energia. Neste sentido, modelos matemáticos são desenvolvidos e aprimorados, sendo aplicados em estudos de otimização, simulação e dimensionamento de equipamentos (DEFENDI *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2001; GOLMOHAMMADI *et al.*, 2015; SHEI *et al.*, 2002; PARK *et al.*, 2019; FRANCO *et al.*, 2020; SALEH *et al.*, 2019). Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi ajustar modelos matemáticos para a secagem dos grãos tanto em operação convencional quanto intermitente, com base em dados experimentais de teor de umidade e temperatura.

## 2 MÉTODOS

Para a realização das secagens, tanto do tipo convencional, quanto intermitente, dos grãos de trigo, empregou-se uma estufa convencional (Nova Ética), e temperaturas de 40 °C, 55 °C e 70 °C. Realizou-se os experimentos em duplicata, e os tempos de intermitência foram de 5, 10 e 15 minutos.

Foram separados 100,00 g de trigo em uma bandeja em camada delgada, os quais permaneceram em estufa por 90 minutos, nas temperaturas pré-determinadas, sendo quantificada a perda de massa inerente à evaporação a cada 5 minutos. Após a secagem, amostras dos grãos permanecem na estufa por 24 horas a 105 °C, para completa remoção da água presente no trigo, para quantificação da massa de sólido seco.

Ambas as secagens foram realizadas em amostras com teores de umidade iniciais variando entre 10 a 28 % (b.s.). Para o ajuste do teor de umidade inicial, as amostras foram umidificadas. Para isso, os grãos foram submersos em água durante períodos de 1, 3, 5, 10, 15 e 20 minutos. Após esse tempo, os grãos foram expostos ao ar ambiente por um período de 10 minutos para completa absorção da água. Em seguida, determinou-se o teor de umidade com o uso da estufa, por um tempo de 24 horas à 105 °C. Plotou-se um gráfico de teor de umidade em base seca pelo tempo de umidificação (minutos), e com uma equação ajustada do gráfico, determinou-se o tempo de hidratação necessária em função do teor de umidade inicial do material.

Para a modelagem matemática do processo de secagem, empregou-se a equação global do balanço de massa, em que se considerou um processo transiente. O termo do acúmulo pode ser expresso em termos da variação da massa de grão pelo tempo de secagem e a saída equivale à taxa de água removida, resultando na Equação 1, em que:  $dY/dt$  refere-se à variação de umidade em relação ao tempo,  $K$  é o coeficiente global de transferência de massa,  $Y$  é a umidade e  $Y_{eq}$  é a umidade de equilíbrio.

$$\frac{dY}{dt} = -K \cdot (Y - Y_{eq}) \quad (1)$$

Realizando-se também o balanço de energia para o processo, e sabendo que os termos de energia existentes na equação podem ser reescritos como a soma de três outras que acompanham a matéria, sendo elas: energia interna, cinética e potencial. A variação das energias cinética e potencial em comparação com a energia interna, podem ser desconsideradas. Também se sabe que o termo de trabalho do sistema pode ser descrito como trabalho de escoamento e considera-se que não há o termo de energia que entra e o termo de



saída é dado em termos da quantidade de água que é evaporada. Como a taxa de calor no processo de secagem ocorre pelo mecanismo de convecção, esta seguirá a lei de Newton do resfriamento e a massa pode ser calculada como  $m_{seca} (1+Y)$ . Foram considerados constantes os valores de  $C_p$ , assim como a massa seca, o que resultou na Equação 2, em que:  $A_{sup}$  refere-se à área superficial do material,  $h$  é o coeficiente convectivo de transferência de calor,  $T_{\infty}$  é a temperatura do fluido utilizado na secagem,  $T$  é a temperatura do material,  $C_p$  é a capacidade calorífica à pressão constante,  $m_{seca}$  é a quantidade de massa seca,  $\dot{m}_{evap}$  é a massa de evaporado e  $h_{evap}$  é a entalpia de vaporização.

$$\frac{d[(1+Y)T]}{dt} = \frac{A_{sup}h(T_{\infty}-T)}{C_p m_{seca}} - \frac{\dot{m}_{evap}h_{evap}}{C_p m_{seca}} \quad (2)$$

Para análise da cinética de secagem convencional, modelos matemáticos empíricos foram utilizados, conforme apresentado pela Tabela 1, em que dependem da umidade relativa (RU) e do tempo (t).

**Tabela 1 – Cinética de secagem convencional: modelos matemáticos empíricos utilizados.**

Nome do modelo	Equação
Page	$RU = e^{-kt^n}$
Newton	$RU = e^{-kt}$
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot e^{-kt}$
Logarítmico	$RU = a \cdot e^{-kt} + c$
Dois termos	$RU = a \cdot e^{-k_0t} + b \cdot e^{-k_1t}$
Aproximação da difusão	$RU = a \cdot e^{-kt} + (1 - a) \cdot e^{-kbt}$
Hii, Law e Clock	$RU = a \cdot e^{-kt^n} + c \cdot e^{-gt^n}$
Midilli	$RU = a \cdot e^{-kt^n} + b \cdot t$

Fonte: Adaptado de ARAUJO *et al.*, 2017; COSTA *et al.*; 2015.

Para a obtenção do teor de umidade de equilíbrio, ajustou-se uma equação quadrática e empírica com base em dados experimentais. O valor do coeficiente global de transferência de calor,  $h$ , foi ajustado com base nos dados da temperatura superficial das amostras de trigo completamente secas. Para isso, utilizou-se um pirômetro, bandejas contendo grãos de trigo completamente secos e uma estufa. Adicionou-se a bandeja na estufa nas temperaturas de 40 °C, 70 °C e 100 °C, sendo estes experimentos conduzidos em triplicata. Por fim, retirou-se a bandeja da estufa após os grãos atingirem a temperatura do ar da estufa e mediu-se a temperatura superficial a cada 30 segundos até que esta temperatura atingisse o valor da temperatura do ar ambiente. Neste caso, como os grãos estão completamente secos, não há variação de massa do material, e o balanço de energia resulta na seguinte equação, sendo desprezado o termo de saída de energia devido a evaporação da água (Equação 3), onde  $dT/dt$  refere-se à variação da temperatura com o tempo:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{A_{sup}h(T_{\infty}-T)}{C_p m_{gr\tilde{a}o}} \quad (3)$$



O modelo foi resolvido numericamente e os valores de  $h$  foram ajustados para cada condição ao se minimizar a seguinte função objetivo, onde são explicitados os valores experimentais e os calculados (Equação 4):

$$\varphi = \sum (T_{exp} - T_{calc})^2 \quad (4)$$

Os modelos para a secagem intermitente representados pelas Equações 1 e 2 foram resolvidos numericamente em sequência, sendo o valor do coeficiente global de transferência de massa,  $k$ , ajustado como uma função exponencial, linear e quadrática da temperatura, por meio da minimização da função objetivo:

$$\varphi = \sum (X_{exp} - X_{calc})^2 \quad (5)$$

As análises estatísticas foram conduzidas para a avaliação dos modelos ajustados, sendo calculados os valores de: qui-quadrado reduzido ( $X^2$ ), erro quadrático médio (MSE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE) e eficiência do modelo (EF).

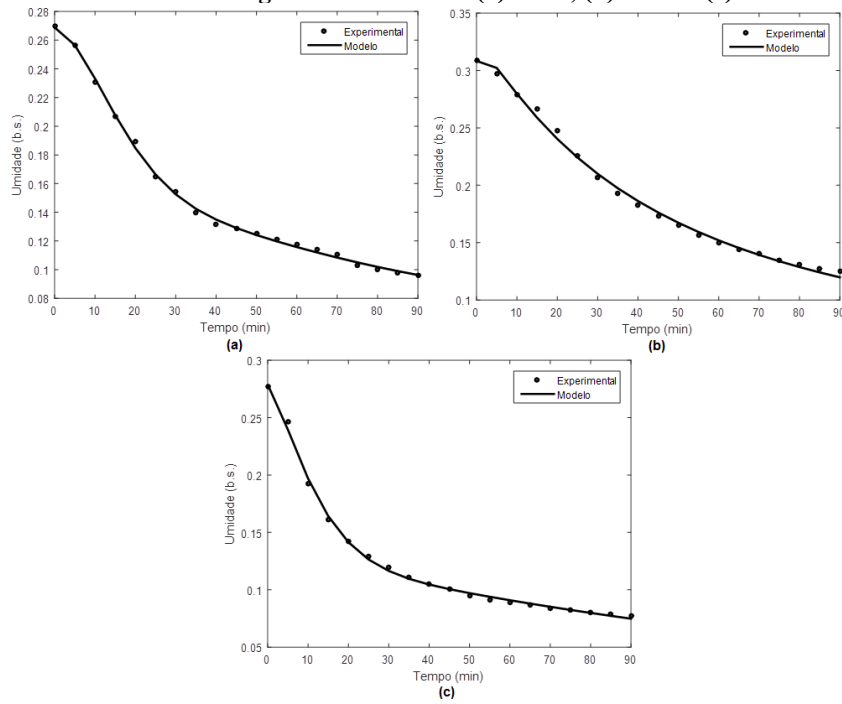
### 3 RESULTADOS

Por meio do ajuste dos parâmetros das equações empíricas e com base na análise estatística, nota-se que para o modelo de Hii, Law e Clock os dados se ajustaram de maneira mais eficiente, com um valor para a eficiência do modelo de 0,9976. Para evidenciar os resultados, a Figura 1 apresenta o ajuste deste modelo em comparação aos dados experimentais.

O valor do coeficiente médio de transferência de calor por convecção encontrado foi de 8,64 W/(m<sup>2</sup>.°C), cujo valor é considerado típico de transferência de calor por convecção natural, pois está na faixa de 2-25 W/(m<sup>2</sup>.°C) (BERGMAN *et al.*, 2019).

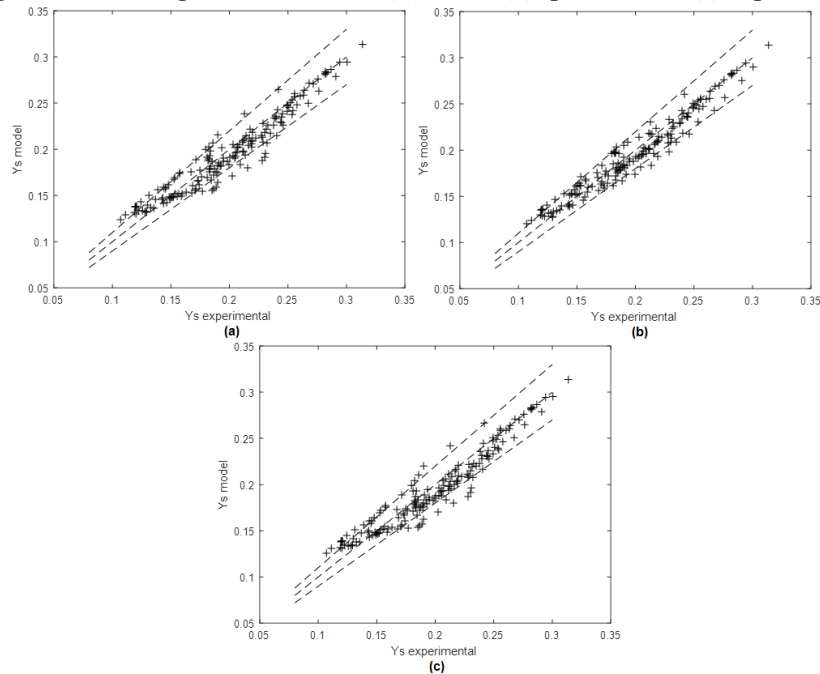
Em sequência, obteve-se o valor do coeficiente global de transferência de massa por meio de ajustes de equações lineares, quadráticas e exponenciais em função da temperatura. Por meio das análises estatísticas para os três modelos, o que melhor se ajustou foi o de função quadrática. Na Figura 2 são apresentados os desvios globais do modelo para a secagem intermitente, em que foi obtido um desvio máximo em torno de 10 %, e com isso, observa-se que os modelos podem ser aplicados para fins de estudos de otimização, simulação de processos e projeto de equipamentos.

Figura 1 – Curva da cinética de secagem convencional: (a) 40°C, (b) 55°C e (c) 70°C – Hii, Law e Clock



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 2 – Desvio global do modelo: (a) linear, (b) quadrático e (c) exponencial



Fonte: Autoria própria (2021)



## 4 CONCLUSÃO

Verificou-se por meio de modelagem matemática do processo de secagem convencional que o modelo de Hii, Law e Clock apresentou melhor ajuste, com uma eficiência do modelo média em torno de 0,9976. Quanto à modelagem do processo intermitente, o coeficiente convectivo médio de transferência de calor ( $h$ ) obtido foi de  $8,64 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  e o coeficiente global de transferência de massa foi representado por uma equação do tipo quadrática em função da temperatura, em que os dados experimentados foram descritos com um desvio global máximo em torno de 10,0 %. Estes resultados indicam que estes modelos podem ser aplicados para estudos de simulação de processos e projeto de equipamentos.

## REFERÊNCIAS

- STATISTA. **Worldwide production of grain in 2018/19**, by type. (2020).
- Absollahpour, S.; Kosari-Moghaddam, A.; Bannayan, M. **Prediction of wheat moisture content at harvest time through ANN and SVR modeling techniques**. Information Processing in Agriculture, 7 (2020) 500-510.
- Karunakaran, C.; Muir, W. E.; Jayas, D. S.; White, N. D. G.; Abramson, D. **Safe storage of high moisture wheat**. Journal of Stored Products Research, 37 (2002) 303-312.
- Carmo, J. E. F. do; Lima, A. G. B. de; Silva, C. J. E. **Continuous and intermittent drying (tempering) of oblate spheroidal bodies: Modeling and simulation**. International Journal of Food Engineering, 8 (2012).
- Szadzinska, J.; Mierzwa, D.; Pawlowski, A.; Musielak, G.; Pashminehazar, R.; Kharaghani, A. **Ultrasound and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot**. Drying Technology (2019).
- Defendi, R. O.; Nicolin, D. J.; Paraíso, P. R.; Jorge, L. M. de M. **Assessment of the Initial Moisture Content on Soybean Drying Kinetics and Transport Properties**. Drying Technology, 34 (2016), 360-371.
- Lima, A. G. B. de; Nebra, S. A. **Theoretical study of intermittent drying (tempering) in prolate spheroidal bodies**. Drying Technology, 19 (2001) 1569-1589.
- Golmohammadi, M.; Assar, M.; Rajabi-Hamaneh, M. Hashemi, S. J. **Energy efficiency investigation of intermittent paddy rice dryer: Modeling and experimental study**. Food and Bioproducts Processing, 94 (2015) 275-283.
- Shei, H. J.; Chen, Y. L. **Computer simulation on intermittent drying of rough rice**. Drying Technology, 20 (2002) 615-636.
- Park, H. W.; Yoon, W. B. **Prediction of the intermittent drying behavior of soybeans [Glycine max (L.)] using novel multilayered mass transfer simulation with an image analysis**. Drying Technology, 37 (2019) 1228-1238.
- Franco, C. M. R.; Lima, A. G. B. D.; Farias, V. S. O.; Silva, W. P. D. **Modeling and experimentation of continuous and intermittent drying of rough rice grains**. Heat and Mass Transfer, 56 (2020) 1003-1014.
- Saleh, R. M.; Emiliozzi, A.; Kulig, B.; Hendel, O.; Sturm, B. **The effect of intermittent drying on drying kinetics and quality change dynamics of organic carrot (daucus carota v. laguna)**. Proceedings of Eurodrying (2019).
- Costa, L. M.; Resende, O.; Gonçalves, D. N.; Oliveira, D. E. C. de. **Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada**. Bioscience Journal, 31 (2015) 392-403.
- Araujo, W. D.; Goneli, A. L. D.; Corrêa, P. C.; Filho, C. P. H.; Martins, E. A. S. **Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada**. Revista Ciência Agronômica, 48 (2017) 448-457.
- Golmohammadi, M.; Assar, M.; Rajabi-Hamaneh, M. Hashemi, S. J. **Energy efficiency investigation of intermittent paddy rice dryer: Modeling and experimental study**. Food and Bioproducts Processing, 94 (2015) 275-283.
- Bergman, T. L.; Lavine, A. S. Incropera. **Fundamentos de Transferência de calor e de Massa**. Rio de Janeiro (2019).