

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

---

## Solução Numérica do Processo de Secagem das Sementes de Canola Baseada em Métodos de Regressão Não-Lineares

Rafaela Greici da Motta Camicia <sup>1</sup>

Departamento de Matemática e Estatística, UTFPR, Medianeira, PR

Marcio Furlan Maggi <sup>2</sup>

Departamento de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel, PR

Rodrigo Junior da Motta Camicia <sup>3</sup>

Erli Raquel Zortea Andretta <sup>4</sup>

Departamento de Engenharia Civil, UTFPR, Pato Branco, PR

Francisco Augusto Aparecido Gomes <sup>5</sup>

Departamento de Engenharia Mecânica, UTFPR, Pato Branco, PR

Dierli Maiara da Rosa Maschio <sup>6</sup>

Departamento de Engenharia de Computação, UTFPR, Pato Branco, PR

**Resumo.** O objetivo do trabalho foi determinar e modelar as curvas de secagem da canola, em diferentes temperaturas, ajustando-se modelos matemáticos aos dados experimentais para selecionar o que melhor representa o fenômeno. As sementes de canola foram selecionadas com teor de água de 0,34 (b.s.), secas até o teor 0,11 (b.s.). A secagem foi realizada em secador experimental sob temperaturas controladas de 40 e 60 °C, e umidade relativa do ar de secagem entre 13 e 36%. Foram testados vários modelos de regressão não-linear; na seleção do melhor modelo considerou-se: a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, a magnitude do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ), o erro médio relativo (P) e o erro médio estimado (SE). Serão avaliados quanto ao processo de secagem, o tempo, a faixa de temperatura correta para a obtenção do grão seco seguido do modelo estatístico que melhor representa o fenômeno físico da secagem da canola com base no ajuste dos dados experimentais.

**Palavras-chave.** *Brassica napus*, curvas de secagem, regressão linear, Quasi-Newton.

## 1 Introdução

A canola é uma oleaginosa de inverno, desenvolvida a partir do melhoramento genético da colza (*Brassica napus L. var. oleifera* ou *Brassica campestris L. var. oleifera*). Possui

---

<sup>1</sup>rafaelacamicia@utfpr.edu.br

<sup>2</sup>mfmaggi2003@yahoo.com.br

<sup>3</sup>rodrigocamicia@hotmail.com

<sup>4</sup>eng.erliandretta@gmail.com

<sup>5</sup>franciscogomes@utfpr.edu.br

<sup>6</sup>dierlimaiara14@gmail.com

de 45 a 50% de óleo no grão e 34 a 38% de proteína no farelo, [1]. A comercialização de sementes de canola exige conhecimentos sobre o armazenamento e cuidados na secagem. A secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e a estabilidade da canola, considerando que a diminuição da quantidade de água reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento [2]. No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos e sementes é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água [3]. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem dos tecidos, utilizam-se modelos matemáticos que representam satisfatoriamente a perda do teor de água do produto durante o período de secagem [4]. Vários trabalhos já foram desenvolvidos para avaliar a secagem de diversos tipos de grãos e sementes. [2] estudaram a secagem de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), [5] analisaram o coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*), [6] trabalharam com a secagem da pimenta cumari do Pará, [7] investigaram a cinética de secagem de grãos de abóbora. O objetivo do presente trabalho foi estudar o ajuste de curvas de secagem de sementes de canola às temperaturas de 40 e 60°C. A seguir serão apresentados material e métodos seguidos dos resultados e discussões e das conclusões pertinentes ao observado com o desenvolvimento do presente trabalho.

## 2 Materias e Métodos

As sementes de canola foram colhidas no município de Realeza, situado na região sudoeste do Paraná Brasil. A região caracteriza-se por um clima subtropical úmido, mesotérmico, com verões quentes e invernos amenos, sendo pouco frequentes as geadas. As chuvas concentram-se nos meses de verão e não há estação seca definida. A temperatura média é superior a 22 °C no verão e fica em torno de 18 °C no inverno. As amostras foram submetidas ao processo de limpeza e armazenadas em sacos plásticos, lacrados e acondicionados por 02 dias em refrigerador a temperatura de 4 °C. A secagem foi realizada no Laboratório de Armazenagem e Protótipos de Instalações de Secagem (LAPIS), do Curso de Engenharia Agrícola, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Cascavel. Previamente aos experimentos de secagem, procedeu-se com a retirada das amostras do refrigerador a temperatura de 4 °C, mantendo-as em temperatura ambiente, visando a sua homogeneização. Para determinação do teor de água inicial utilizou-se subamostras do produto com aproximadamente 5 g cada. As sementes foram dispostas em cápsulas de alumínio e levadas a estufa a temperatura de 105°C ± 3°C durante 24 h, com três repetições. Posteriormente, foram acondicionadas no dessecador por aproximadamente 20 min, e pesadas para o cálculo do teor de água. Os resultados foram expressos em porcentagem, conforme as Regras para Análises de Sementes [8]. Para a secagem do produto utilizaram-se temperaturas de 40 e 60°C ± 1°C [9], em um secador de camada fixa em escala de laboratório, com ventilador de fluxo axial. As amostras foram colocadas em três bandejas de metal perfuradas para permitir a passagem do ar através da massa do produto, o fluxo de ar foi perpendicular às sementes de canola. As velocidades do

ar consideradas no processo de secagem variaram de 0,72 à 0,77m/s e foram monitoradas com o auxílio de anemômetro, psicrômetro e termopares do tipo T, respectivamente. Durante o processo foram realizadas pesagens sucessivas das bandejas com as amostras objetivando a determinação do teor de umidade e o conteúdo adimensional de umidade, utilizando-se balança analítica com precisão de  $0,001g \pm 0,0001g$ . A secagem das sementes prosseguiu até que o produto atingisse o teor de água de aproximadamente 11% na base úmida. Aos dados experimentais de secagem da canola foram ajustados os modelos estatísticos utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas, Equações 1 à 11 ([10], [4], [7]), cujas expressões estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem em camada delgada de sementes de canola.

Modelo	Modelo	Equação
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	(1)
Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	(2)
Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	(3)
Wang e Sing	$RU = 1 + a.t + b.t^2$	(4)
Thompson	$RU = a.\ln(RU) + b.[\ln(RU)]^2$	(5)
Newton	$RU = \exp(-k.t)$	(6)
Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	(7)
Henderson & Pabis	$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-k_0.t) + c.\exp(k_1.t)$	(8)
Exponencial de dois termos	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.a.c)$	(9)
Dois termos	$RU = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$	(10)
Aproximação da difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.b.t)$	(11)

Fonte: ([11], [12], [13]), RU é a razão de umidade do produto, adimensional, t é o tempo de secagem, k,  $k_0$  e  $k_1$  são os coeficientes de secagem, h-1, a, b, c e n são os coeficientes dos modelos.

Para a determinação das razões de umidade (RU) da canola, nas diferentes condições de secagem foi utilizada a Eq. 12.

$$\frac{U - U_e}{U_i - U_e} = RU \tag{12}$$

em que U é o teor de água do produto,  $U_i$  é o teor de água inicial do produto e  $U_e$  é o teor de água de equilíbrio do produto, ambos decimal base seca. Para o ajuste dos modelos estatísticos de secagem aos dados experimentais, realizou-se a análise de regressão não-linear pelo método Quasi Newton, utilizando-se o software Statistica 7.0 e os gráficos sendo plotados no software Microsoft Excel 2010. Na seleção do melhor modelo foram considerados: a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, adotando-se o nível de até 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ), o erro médio relativo (P) e, o erro médio estimado (SE) ([4], [14], [15]). O erro médio relativo e o erro médio estimado foram calculados conforme descrito nas Equações 13 e 14 ([16], [14]), respectivamente:

$$\frac{100}{n} \sum_{i=1}^N \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} = P \quad (13)$$

$$\sqrt{\frac{\sum(Y - Y_0)^2}{GLR}} = SE \quad (14)$$

em que  $Y$  é o valor observado experimentalmente,  $Y_0$  é o valor calculado pelo modelo e  $GLR$  são graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

### 3 Resultados e Discussão

No processo de determinação das curvas de secagem, a umidade inicial das sementes de canola foi de  $34,5 \pm 0,2\%$  base úmida. A umidade relativa do ar de secagem foi de 36 e 13%, respectivamente, para as temperaturas de 40 e 60 °C, durante o processo de secagem das sementes. Analisando-se a Figura 1 observa-se que o tempo necessário para a canola atingir o teor de água de, aproximadamente, 0,11 (base seca) foi de 1,2 e 0,67 (80, 40 min) para as temperaturas de 40 e 60 °C, respectivamente.

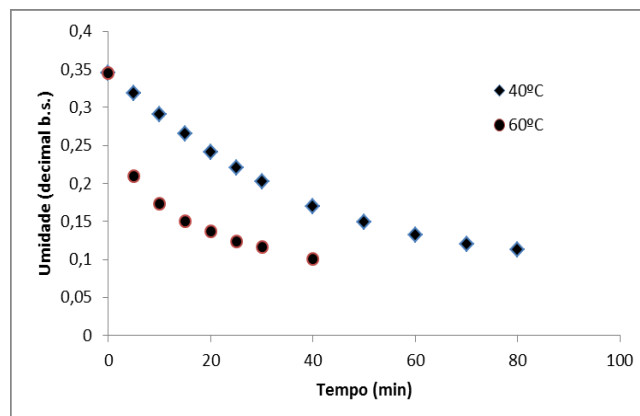


Figura 1: Valores médios da razão de umidade (decimal) em relação ao tempo de secagem (min) para as condições de temperatura de 40 e 60 °C, durante a secagem da canola.

Não foi possível observar o período de taxa de secagem constante para as condições estudadas, verificando-se que a secagem das sementes ocorre no período de taxa decrescente. Estes resultados estão de acordo com o trabalho de [9], quando também, secou sementes de canola. Com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorreu maior taxa de remoção de água do produto, concordando com diversos pesquisadores para vários produtos agrícolas ([10], [17], [18]). Na Tabela 2 são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), os erros médios relativo (P) e estimado

(SE), para os modelos ajustados de secagem da canola, nas temperaturas de 40 e 60 °C, objetivando a comparação entre os modelos de secagem analisados.

Tabela 2: Coeficientes de determinação ( $R^2$ ), erros médio relativo (P,%) e estimado (SE, decimal) para os modelos analisados durante a secagem da canola, em diferentes condições de temperatura (°C).

Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	40 °C	40 °C	40 °C
Modelo	$R^2$	P	SE	$R^2$	P	SE
Page	98.82	8.49	0.041	99.75	2.09	0.033
Henderson e Pabis	92.08	12.72	0.059	93.78	8.86	0.056
Midili	95.71	11.60	0.054	97.83	4.17	0.066
Wang e Sing	91.24	16.23	0.100	94.05	11.54	0.082
Thompson	97.60	9.60	0.081	98.84	3.47	0.031
Newton	92.62	13.16	0.092	95.90	15.18	0.091
Logarítmico	92.10	12.91	0.090	96.10	6.68	0.050
Henderson & Pabis modificado	83.44	17.13	0.331	89.99	9.89	0.243
Exponencial de dois termos	96.32	10.89	0.058	98.53	9.35	0.060
Dois termos aproximação da difusão	83.43	16.77	0.326	86.99	13.88	0.312

Considerando-se as diferentes condições de secagem para a canola, verificou-se que a maioria dos modelos estatísticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 90%, indicando, de acordo com [13], uma representação satisfatória do processo de secagem, sendo o modelo de Page, Midilli, Thompson e exponencial de dois termos os que possuem os maiores valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) nas temperaturas de secagem estudadas. De acordo com [11], o coeficiente de determinação isoladamente não constitui um bom parâmetro para a seleção de modelos não lineares; desta forma utiliza-se os valores do erro médio relativo (P) e estimado (SE). Analisando-se os valores do valor médio estimado, nota-se que nas temperaturas em estudo, o modelo de Page apresentou o menor valor, seguido do modelo de Thompson. Destaca-se nos modelos de Page e Thompson os melhores valores do erro médio relativo, sendo inferiores a 10%, Tabela 2, que de acordo com [13], indica uma representação adequada do fenômeno. Observa-se que em ambas as situações os valores do modelo de Page foram melhores quando comparados ao de Thompson. Os melhores ajustes aos dados experimentais da secagem da canola foram obtidos com o modelo de Page, concordando com os resultados verificados por [14] para a modelagem matemática das sementes de Pinhão-Manso do Pará. A Figura 2 apresenta as curvas de secagem da canola, experimentais e estimadas, pelo modelo de Page em função do tempo (minutos) de secagem para as temperaturas de 40 e 60°C. Verificou-se pela correspondência entre os valores experimentais e estimados, ajuste satisfatório do modelo para a descrição da secagem da canola.

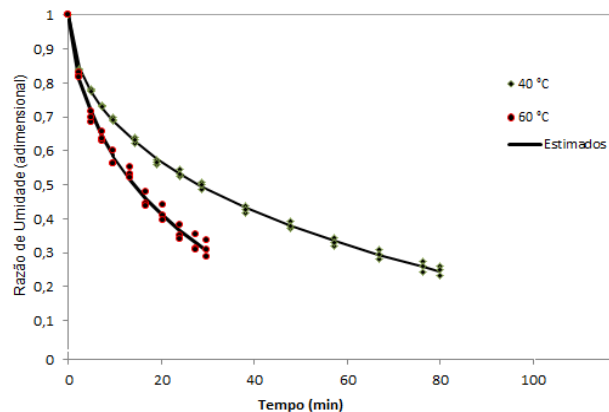


Figura 2: Valores médios da razão de umidade (decimal) em relação ao tempo de secagem (min) para as condições de temperatura de 40 e 60 °C, durante a secagem da canola.

## 4 Conclusões

Efetuiu-se a secagem das sementes de canola, para determinar e modelar as curvas de secagem, em duas temperaturas, e selecionar o modelo que melhor representa a situação. A secagem realizou-se em secador experimental, aos dados de secagem ajustou-se modelos de regressão não-linear, considerando-se a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, a magnitude do coeficiente de determinação ajustado, o erro médio relativo e o erro médio estimado. O tempo necessário para a secagem da canola até o teor de umidade de aproximadamente 0,11 (decimal base seca) foi de 80 e 40 minutos para as temperaturas de 40 e 60 °C, respectivamente. O modelo matemático de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, nas diferentes condições de secagem.

## Referências

- [1] O. Marchiori Jr, M.H. Inoue, A.L. Braccini, R.S. Oliveira Jr, M.R. Avila, M. Lawder, J. Constantin. Qualidade e produtividade de sementes de canola (*Brassica napus*) após aplicação de dessecantes em pré-colheita. Planta Daninha, Viçosa-MG, 2002.
- [2] P. C. Corrêa, et al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em camadas delgadas. *Revista de Engenharia Agrícola*, 27:501-510, 2007, (to appear).
- [3] P. A. Berbet, et al. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 60:167-173, 1995, (to appear).
- [4] D. C. Santos, A. J. M. Queiroz, R. M. F. Figueiredo, E. N. Oliveira. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17:223-231, 2013, (to appear).

- [5] L. M. Costa, et al. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15:1089-1096, 2011, (to appear).
- [6] R. C. Reis, et al. Modelagem matemática da secagem da pimenta cumari do Pará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15:347-353, 2011, (to appear).
- [7] A. M. G. Diógenes, et al. Cinética de secagem de grãos de abóbora. *Revista Caatinga*, 26:71-80, 2013, (to appear).
- [8] Brasil. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. Regras para Análise de Sementes, Brasília, 2009.
- [9] D. Christ. Curvas de umidade de equilíbrio higroscópico e de secagem da canola (*Brassica napus* L. var. oleífera), e efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade das sementes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- [10] E. K. Akpınar, Y. Bicer, C. Yildiz. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59:99-104, 2003, (to appear).
- [11] P. S. Madamba, R. H. Drisocoll, K. A. Buckle. Thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29:75-97, 1996, (to appear).
- [12] I. Doymaz. Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61:341-346, 2007, (to appear).
- [13] D. Mohapatra, P. S. Rao. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 66:513-518, 2005, (to appear).
- [14] O. Resende, L. U. Ferreira, D. P. Almeida. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão-adzuki (*Vigna angularis*). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 12:171-178, 2010, (to appear).
- [15] S. J. S. Morais. Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Goiás, 2010.
- [16] O. Resende, P. C. Corrêa, A. L. D. Goneli, A. P. Martinazzo, R. M. Ribeiro. Contração volumétrica na infusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. *Revista Brasileira de Armazenamento*, 30:163-171, 2005, (to appear).
- [17] S. Azzouz, et al. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55:323-330, 2002, (to appear).
- [18] O. Yaldiz, C. Ertekin, H. I. Uzun. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26:457-465, 2001, (to appear).
- [19] K. J. Park, Z. Vohnikoza, F. P. R. Brod. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*, 51:193-199, 2002, (to appear).