

Investigação de Modelo Fenomenológico Aplicado à Secagem de Grãos de *Jatropha curcas* L.

Gracielle Johann¹, Nehemias Curvelo Pereira¹ e Edson Antonio da Silva²

¹Universidade Estadual de Maringá – Departamento de Engenharia Química
CEP 87020-900 Maringá – Paraná - E-mail: grajohann@yahoo.com.br

²Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Centro de Engenharias e Ciências Exatas
Caixa Postal 520 – 85903-000 Toledo – Paraná

RESUMO

Foi realizada a modelagem fenomenológica de parâmetros concentrados da secagem convectiva de pinhão-mansão em camada fina e os resultados obtidos foram comparados com dados da literatura. Dentre as condições de secagem simuladas, os perfis de umidade experimental e calculado, apresentaram um erro médio de 12,7 %. O coeficiente de transferência de massa, estimado pelo modelo variou entre $8,6 \times 10^{-3}$ e $1,5 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$, respectivamente para a secagem conduzida a 30 °C e 0,397 m min^{-1} e 50 °C e 1,190 m min^{-1} . As simplificações propostas para a obtenção das equações e o método numérico utilizado para resolvê-las, foi eficiente na descrição do fenômeno de secagem convectiva de grãos de pinhão-mansão em camada fina, nas condições de operação simuladas.

Palavras-chave: secagem, modelo fenomenológico, *Jatropha curcas*.

INTRODUÇÃO

O cultivo de plantas oleaginosas tem sido preconizado nos últimos anos, em virtude da necessidade de mudanças na matriz energética, principalmente no que concerne à substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis renováveis, como o biodiesel (FERRARI et al., 2009). Nesse cenário, o pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L. - Euphorbiaceae), planta arbustiva, nativa da América tropical que apresenta alta plasticidade adaptativa, cultivada em diferentes regiões de clima tropical e subtropical do planeta (OPENSHAW, 2000), apresenta alto teor de óleo e características físico-químicas que o apontam como uma das promissoras matérias-primas para a produção de biodiesel (KUMAR; SHARMA, 2008).

O pinhão-mansão apresenta uma concentração média de $40,33 \pm 1,91$ % de lipídios na matéria seca das sementes (SOUZA et al., 2009), sendo que outros atributos estão relacionados ao óleo que não é comestível, não concorrendo, portanto, com a alimentação humana (SATURNINO et al., 2005). Por sua vez, no processo de extração de óleo das sementes para produção de biodiesel, são comumente utilizadas prensas, e como as sementes não são descascadas, é necessária a secagem antes da prensagem (RAMOS; MANCINI; MENDES, 2014).

Mais de 70 milhões de toneladas de água são removidas de grãos anualmente, para garantir o armazenamento adequado dos mesmos, isso é equivalente a evaporar um cubo de água com mais de 400 m de comprimento lateral (RAGHAVAN; SOSLE, 2007). Sendo que a energia consumida na secagem de grãos é essencialmente empregada em três processos: aquecimento do grão, evaporação da água e aquecimento do ar de secagem (ALONSO, 2011), dessa forma,

para que o processo seja eficiente, é necessário recuperar energia de um desses três processos, entretanto, o desenvolvimento dessas alternativas tem levado muitas décadas. Por sua vez, os estudos de secagem conduzidos a convecção forçada, método de secagem mais amplamente utilizado, são essenciais para determinação das propriedades de transferência de calor e massa.

Os objetivos do presente trabalho são propor um modelo matemático fenomenológico de parâmetros concentrados, para descrever a secagem de grãos de pinhão-mansão e validar o método por meio de comparação com dados da literatura.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo fenomenológico da secagem de grãos de pinhão-mansão foi obtido a partir de balanços de massa e energia efetuados no leito de grãos. Para a realização dos balanços do modelo, foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras: Os grãos inteiros são dispostos em camada fina e com distribuição homogênea; as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis; a umidade e temperatura iniciais da camada fina são uniformes; transporte unidimensional de calor e massa na camada; distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador; na transferência de calor entre o ar de secagem e os grãos, predomina o fenômeno da convecção; o ar de secagem comporta-se gás ideal, nas condições de modelagem.

Os balanços de massa e de energia no leito fornecem as Equações 1 e 2.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k_s(X - X_E) \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_s \rho_s}{\partial t} = a h_c (T_G - T_s) - \lambda \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2)$$

Em que X é a umidade em base seca (b.s.), t é o tempo (min), k_s é o coeficiente de transferência de massa (min^{-1}), X_E é a umidade de equilíbrio (b.s.), H_s é a entalpia do grão (J kg^{-1}), ρ_s é a densidade do grão (kg m^{-3}), a é a área específica do grão (m^2), h_c é o coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{J kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$), T_G é a temperatura do ar de secagem (K), T_s é a temperatura do grão (K) e λ é o calor de vaporização da água (J kg^{-1}). As dimensões dos grãos foram obtidas em PIMENTA; ZUFFELLATO-RIBAS; LAVIOLA (2014).

As propriedades termo físicas massa específica, ρ_s , e calor específico, cp_s , do pinhão-mansão, foram calculadas com base na composição centesimal, que varia com o tempo, por meio das Equações 3 a 5, de SINGH; HELDMAN (1993).

$$\rho_s = \frac{1 - \varepsilon}{\sum \left(\frac{x_j}{\rho_j} \right)} \quad (3)$$

$$cp_s = \sum \frac{x_j}{\rho_j} \times cp_j \quad (4)$$

$$x_{vj} = \frac{\rho_j}{\sum \left(\frac{x_j}{\rho_j} \right)} \quad (5)$$

Em que ε é a porosidade, igual a 0,5286 (SIRISOMBOON; KITCHAIYA, 2009), x_j é a fração mássica de cada componente puro, c_{pS} é o calor específico ($J\ kg^{-1}K^{-1}$) e x_{vj} é a fração volumétrica de cada componente puro. A composição centesimal foi obtida no trabalho de FERRARI et al. (2009).

Para a secagem de materiais esféricos, como grãos, pode-se aplicar correlações empíricas específicas, como a de RANZ; MARSHALL (1956), Equação 6, válida para a faixa ($1 < Re < 105$, $0.6 < Pr < 380$), para a determinação do coeficiente de transferência de calor, h_c .

$$Nu = 2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (6)$$

Em que Nu , Re e Pr são os números de Nusselt (-), Reynolds (-) e Prandtl (-), respectivamente.

O valor do calor de dessorção da pinhão-mansão, λ , foi igualado ao calor de vaporização da água pura, conforme Equação 7 (TREYBAL, 1980).

$$\lambda = 2.162 \times 10^6 + 2T_s \quad (7)$$

Na resolução do sistema das equações diferenciais 1 e 2, foi empregado o comando *dsolve* do software Maple 13®, sendo os coeficientes de transferência convectivos de massa determinados empregando o método de otimização *nonlinearsimplex*, utilizando o comando *NLPSolve*, após minimização do erro quadrático dos desvios da umidade do leito (valor calculado e valor experimental (RAMOS, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na resolução do sistema de equações diferenciais parciais, Equações 1 e 2, concomitantemente com a estimativa do coeficiente de transferência de massa, k_s , estes variaram entre $8,6 \times 10^{-3}$ e $1,5 \times 10^{-2}\ min^{-1}$, respectivamente para a secagem conduzida a 30 °C e 0,397 m min⁻¹ e 50 °C e 1,190 m min⁻¹, observou-se que, mantendo a velocidade de secagem constante, e aumentando a temperatura, há incremento no valor do coeficiente convectivo de transferência de massa.

A Figura 1 apresenta as curvas de secagem do pinhão-mansão para as condições estudadas, 30, 40 e 50 °C e 0,397, 0,794 e 1,190 m min⁻¹.

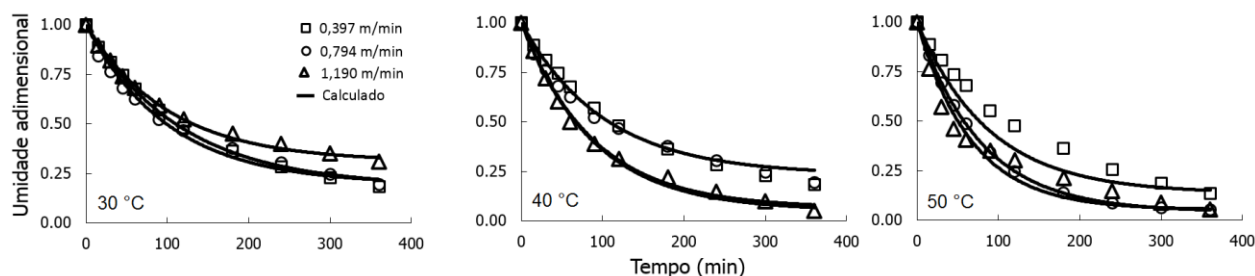


Figura 1: Curvas de secagem do pinhão-mansão

É possível, ainda observar a influência pouco pronunciada da velocidade do ar de secagem na curva de secagem, o que pode ser atribuído ao mecanismo cinético da secagem de grãos, em que se observa, apenas período de taxa decrescente, uma vez que a difusão interna de umidade

controla o movimento desta. Nesse mecanismo, a diferença de temperatura entre o interior do grão e sua superfície é determinante e não a influência provocada pela velocidade do ar de secagem, que implica na evaporação do filme superficial.

Os valores de R^2 obtidos por meio de estudo estatístico indicaram correlações de 0,96 a 0,99, entre os dados experimentais da literatura e aqueles calculados pelo modelo matemático. O erro médio, $\bar{E} = (X_{EXP} - X_{CAL})/X_{EXP}$, em que \bar{E} é o erro médio, X_{EXP} (b.s.) é o valor experimental e X_{CAL} (b.s.) é o valor calculado pelo modelo, foi de 12,7 %, indicando adequação das considerações e método de resolução das equações do modelo fenomenológico obtido.

CONCLUSÕES

A modelagem matemática da secagem convectiva e as simplificações propostas, somadas ao método numérico utilizado para resolver o sistema de equações, foi eficiente na descrição do fenômeno de secagem convectiva de grãos de pinhão-mansinho em camada fina, nas condições de operação simuladas. Dentre as condições de secagem simuladas, os perfis de umidade experimental e calculado, apresentaram um erro médio de 12,7 %. O coeficiente de transferência de massa, estimado pelo modelo variou entre $8,6 \times 10^{-3}$ e $1,5 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$, respectivamente para a secagem conduzida a 30 °C e 0,397 m min^{-1} e 50 °C e 1,190 m min^{-1} .

Agência de Fomento: Capes.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, D. M. J. **Modeling of grain dryers: thin layer to deep beds**. 2011. Dissertação de Mestrado, McGill University, Montreal, Canadá, 2011.
- FERRARI, R. A.; CASARINI, M. B.; MARQUES, D. A.; SIQUEIRA, W. J. Avaliação da composição química e de constituinte tóxico em acessos de pinhão-mansinho de diferentes origens. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 12, n. 4, p. 309-314, 2009.
- KUMAR, A.; SHARMA, S. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. **Industrial Crops and Products**, v. 2, p. 1-10, 2008.
- OPENSHAW, K. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 1-15, 2000.
- PIMENTA, A. C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; LAVIOLA, B. G. Morfologia de frutos, sementes e plântulas de *Jatropha curcas*. **Floresta**, v. 44, n. 1, p. 73-80, 2014.
- RAGHAVAN, V. G. S.; SOSLE, V. Grain Drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), **Handbook of industrial drying**. Boca Raton, CRC/Taylor & Francis, 2007.
- RAMOS, B. A. **Estudo Cinético e Termodinâmico da Secagem das Sementes de Pinhão-Mansinho (*Jatropha curcas* L.)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- RAMOS, B. A.; MANCINI, M. C.; M. F., MENDES. Estudo das isotermas de equilíbrio das sementes de pinhão-mansinho (*Jatropha curcas* L.). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 8, n. 2, p. 1385-1398, 2014.
- RANZ, W. E.; MARSHALL, W. R. JR. Evaporation from drops. Parts I & II. **Chemical Engineering Progress**. v. 48, p. 173-180, 1952.
- SATURNINO, H. M.; PACHECO, D. D.; KAKIDA, J.; TOMINAGA, N.; GONÇALVES, N. P. Cultura do pinhão-mansinho (*Jatropha curcas* L.). **Informe Agropecuário**, v. 26, n. 229, p. 44-78, 2005.
- SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P. Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments. **Biosystems Engineering**, v. 102, n. 02, p. 244-250, 2009.
- SINGH, P. R.; HELDMAN D. R. Introduction to food engineering. 2. ed. USA: Editora Acadêmica, 499 p., 1993.
- TREYBAL, R. E. **Mass-transfer operations**. New York, McGraw Hill, 1980.
- SOUZA, A. D. V.; FÁVARO, S. P.; ÍTAVO, L. C. V.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão manso, nabo-forrageiro e crambe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1328-1335, 2009.