

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DE BANANA PRATA

J. A. da SILVA¹, R. T. BAIA¹, W. L. RODRIGUES¹

¹ Universidade do Estado do Amapá, Engenharia Química
E-mail para contato: jessica-eng@hotmail.com

RESUMO – A secagem é um método bastante usado para conservar frutas por mais tempo. A depender do material a ser desidratado pode-se ter um tempo longo na realização de experimentos de secagem. Para se otimizar esse processo várias técnicas foram desenvolvidas, dentre elas, destaca-se a simulação computacional por se adaptar às condições de processamento e oferecer resultados rápidos e confiáveis. Este trabalho tem como objetivo simular o processo de secagem convectiva de fatias de banana da variedade prata que sofreram pré-tratamento de desidratação osmótica em solução de sacarose. A simulação foi feita usando como princípios a Lei de Fick para transferência de massa e a Lei de Fourier para a transferência de calor. As curvas obtidas estão em conformidade com os dados encontrados na literatura e a simulação mostrou concordância com os valores experimentais.

1. INTRODUÇÃO

No Estado do Amapá há grande diversidade vegetal, porém muitos espécimes não são devidamente aproveitados devido à falta de informação ou técnicas de conservação de frutos, hortaliças e demais tipos de vegetais, causando prejuízos aos agricultores locais. A secagem de produtos é a operação unitária mais utilizada na região amazônica a fim de aumentar o tempo de estocagem de produtos.

Para se otimizar o processo de secagem é necessário saber qual a quantidade de umidade que se deseja alcançar, para que a secagem não se prolongue exageradamente e nem dure tempo insuficiente, ou seja, é fundamental conhecer o comportamento da curva de secagem do produto nas condições trabalhadas, principalmente temperatura e velocidade do ar de secagem.

Uma das maneiras para se estudar esse fenômeno é a simulação computacional, que, munida do conhecimento sobre a física do processo e das características dos produtos, simula o que ocorre durante a secagem. Esse método é bastante atrativo devido à rapidez e precisão.

O objetivo deste trabalho é simular as secagens convectivas no software COMSOL Multiphysics® v. 4.4, comparar os resultados obtidos pelo programa com os dados obtidos experimentalmente e avaliar o erro relativo médio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados 6 experimentos de secagem, sendo 4 precedidos de desidratação osmótica e 2 sem desidratação osmótica. A secagem convectiva foi realizada em túnel de secagem sob duas condições: temperatura a 68 °C e velocidade de 1,0 m/s do ar de secagem, e temperatura de 78 °C e velocidade de 0,5 m/s. Para o pré-tratamento osmótico foram usadas soluções nas concentrações de 60 % (m/m) e de 70 % (m/m).

Na secagem, a transferência de massa é regida pela 2ª Lei de Fick em regime não estacionário, conforme a Equação 1 (Cremasco, 2002).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla(-D_i \nabla C_i) = R_i \quad (1)$$

Onde C_i representa a concentração [mol/m³], D_i é o coeficiente de difusão [m²/s]. A expressão entre parênteses representa o fluxo (n), o qual descreve somente o transporte das partículas de água que se deslocam por difusão.

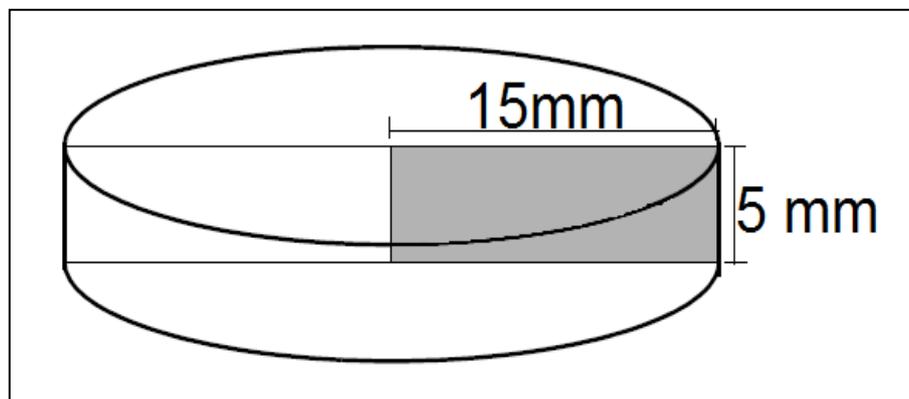
A transferência de calor é analisada segundo a Lei de Fourier, que pode ser expressa conforme a Equação 2. Onde ρ é a massa específica da banana [kg/m³], obtida através da razão entre a massa e o volume da mesma; C_p é o calor específico [J/(kg.K)], variável em função da temperatura; K é a condutividade térmica [W/(m.K)], variável em função da concentração (Zeineldin, 2008).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K \nabla T) \quad (2)$$

A simulação foi realizada em computador instalado no Laboratório de Análise Instrumental-LAI, utilizando o software comercial COMSOL Multiphysics® 4.4, baseado no método de elementos finitos, em regime transiente.

A geometria construída foi baseada nas medidas da secção transversal de uma fatia de banana com 3 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura, conforme a Figura 1. Desenhada com geometria bidimensional, como um retângulo de medidas 15 mm x 5 mm. A malha gerada foi do tipo triangular livre.

Figura 1 – Fatia de banana com a secção transversal analisada em cinza.



As condições de contorno estão listadas na Tabela 1, a qual estabelece as condições usadas na simulação para os fluxos mássico e de calor em cada limite do domínio estudado.

Considerou-se que nos limites 1 e 2 não há fluxos de calor e massa, porém, sabe-se que há fluxo de calor no limite 2 entre a placa de petri e a amostra, no entanto, esse fluxo é bem menor do que nos limites 3 e 4, sendo desprezado durante a simulação computacional sem comprometer os resultados.

Na equação para o fluxo de calor, T_{ar} é a temperatura do ar de secagem, T é a temperatura da banana, cz e cx são as concentrações de água na direção z e na direção x , l_{da} é o calor latente de vaporização da água, D_m é a difusividade de água e h_T é o coeficiente de transferência de calor (Chen *et al.*, 1999). Nas equações para o fluxo de massa, N_i é o fluxo mássico difusivo (Sandhu, 2010).

Tabela 1 – Condições de contorno

Limites	Fluxo mássico [mol/(m ² .s)]	Fluxo de calor [W/m ²]
1	$-n \times N_i = 0$ (3)	$n(K\nabla T) = 0$ (5)
2	$-n \times N_i = 0$	$n(K\nabla T) = 0$
3	$-n \times N_i$ (4)	$D_m \times l_{da} \times cz + h_T (T_{ar} - T)$ (6)
4	$-n \times N_i$	$D_m \times l_{da} \times cx + h_T (T_{ar} - T)$ (7)

Alguns parâmetros são indispensáveis para se realizar a simulação corretamente, além do conhecimento da física do problema estudado, no caso, a secagem convectiva, é necessário especificar o material que está sendo seco, bem como as propriedades do ar e da água contida na amostra. As propriedades e condições utilizadas na simulação e seus respectivos valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – propriedades e condições utilizadas na simulação

Propriedade	Valor
Densidade da banana	1018 kg/m ³
Densidade do ar *	1,073 kg/m ³
Densidade da água *	994,59 kg/m ³
Calor latente molar de vaporização **	41400 J/mol
Condutividade térmica do ar *	0,0287 W/(m K)
Calor específico do ar *	1005,04 J/(kg K)
Calor específico da água *	4184 J/kg
Viscosidade dinâmica do ar *	$1,78 \times 10^{-4}$ Pa.s
Coeficiente de difusão (E-09)	1,09; 1,44; 1,32; 1,50; 1,57 e 2,30
Coeficiente convectivo de calor [W/(m ² .K)]	14,62 e 9,4
Temperatura inicial	28 °C
Temperatura do ar de secagem	68°C e 78 °C
Velocidade do ar de secagem	1 m/s e 0,5 m/s

Fonte: * Kumar *et al.*, 2012; ** Perusselo, 2013.

Para calcular o erro médio relativo (P) utilizou-se a Equação 8 e para o erro médio estimado (SE), a Equação 9 (Resende *et al.*, 2009).

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - Y'|}{Y} \quad (8)$$

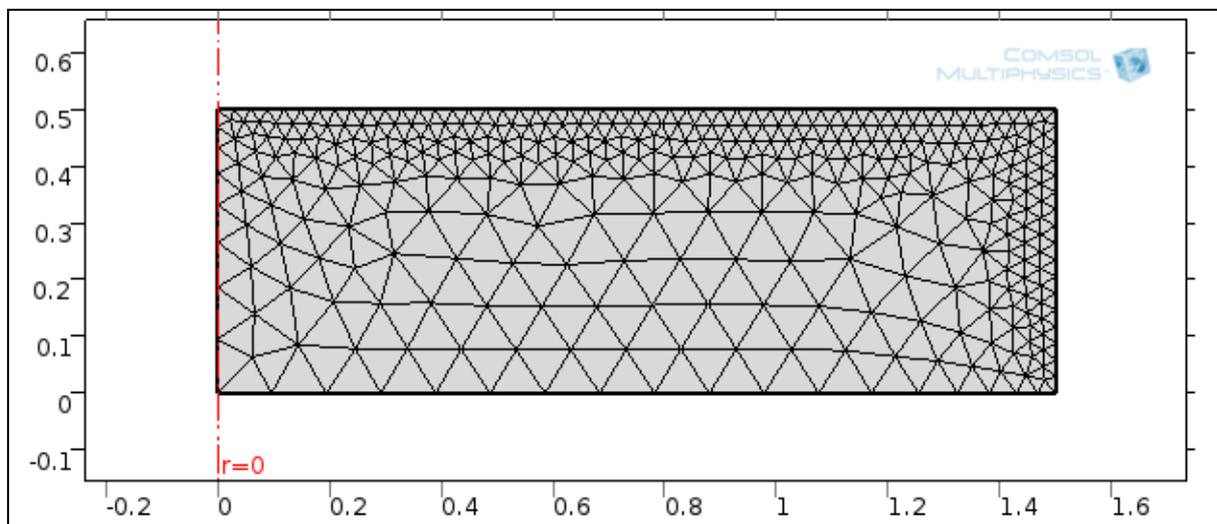
$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{GLR}} \quad (9)$$

Na qual, Y é o valor observado experimentalmente, Y' é o valor calculado pelo modelo e GLR representa os graus de liberdade do modelo, medido pela diferença entre o número de observações (N) e o número de parâmetros do modelo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A malha gerada no software COMSOL Multiphysics® 4.4 é formada por 659 elementos finitos e 93 contornos de elementos e é exibida na Figura 2. As extremidades superior e direita são mais refinadas devido ao maior fluxo inicial nessa região e contato direto com o ar quente de secagem. As medidas de comprimento estão em centímetros.

Figura 2 – Malha gerada.



Na Figura 3 são mostrados os dados experimentais de secagem realizada a 68 °C e sua respectiva curva simulada computacionalmente e na Figura 4 são exibidas os dados experimentais e simuladas para as secagens a 78 °C. Sendo que no eixo y são exibidos os valores de massa (em gramas) para uma fatia de banana no decorrer do tempo (em minutos) mostrado no eixo x. Para melhor avaliação dos resultados foram comparados dados experimentais com os simulados em diferentes condições de desidratação osmótica em solução de sacarose, etapa esta que foi realizada antes da secagem no túnel de vento.

Pode-se observar que as simulações dos experimentos 5 e 6 se ajustaram mais satisfatoriamente aos valores experimentais e que as curvas simuladas para os experimentos 1 e 3 foram as que exibiram menor ajuste.

Figura 3 – Curvas experimentais e simuladas a $T = 68^{\circ}\text{C}$.

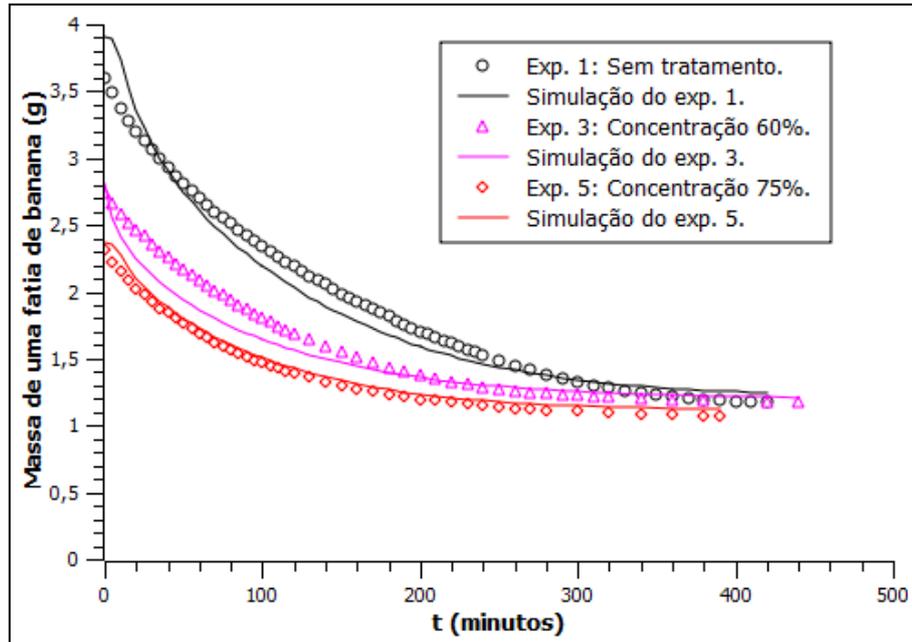
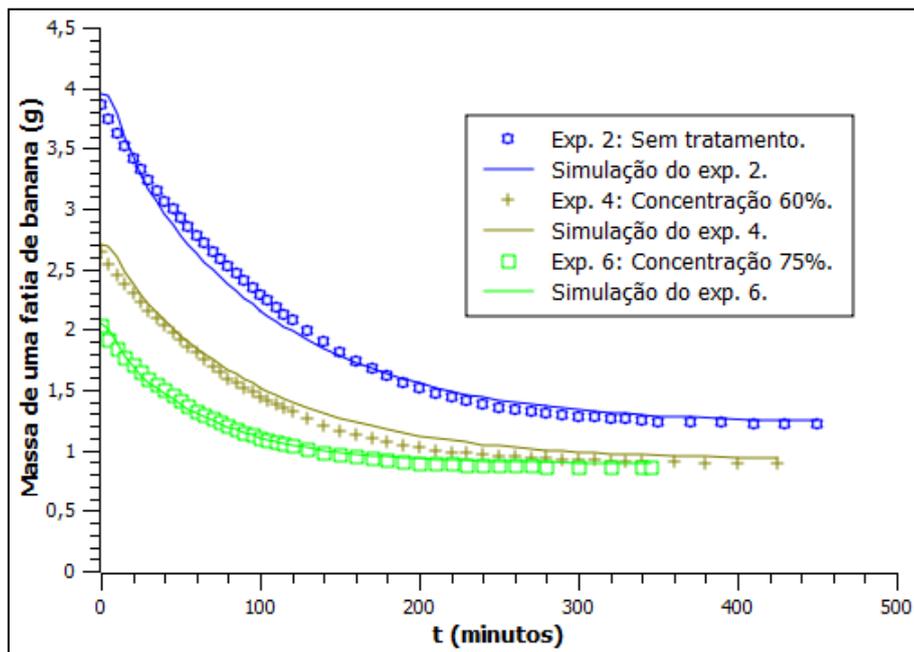


Figura 4 – Curvas experimentais e simuladas a $T = 78^{\circ}\text{C}$.



A Tabela 3 é composta pelos valores dos erros médios relativos e erros médios estimados para as comparações entre as curvas simuladas e as experimentais. Os valores confirmam que as simulações que mais se aproximaram foram a 5 e a 6.

Tabela 3 – Valores dos erros médios estimados e do erro médio relativo

Simulação	1	2	3	4	5	6
SE (%)	1,3659	1,0889	1,5831	1,0538	0,6829	0,3486
P (%)	5,3613	3,6726	5,7800	5,9153	3,1415	2,1498

4. CONCLUSÃO

Os valores encontrados através das simulações se aproximaram dos valores obtidos experimentalmente, mostrando que o software utilizado oferece soluções satisfatórias para esse tipo de problema e que pode ser uma ferramenta confiável para se otimizar processos de secagem, estabelecendo os melhores valores para as variáveis da operação para se alcançar os resultados desejados.

5. REFERÊNCIAS

- CHEN, H.; MARKS, B. P.; MURPHY, R. Y. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. *Journal of Food Engineering*, v.42. p. 139-146. 1999.
- CREMASCO, M. A. *Transferência de Massa*. 2^a. ed. Campinas: UNICAMP, 2002.
- KUMAR, C. et al. Multiphysics modeling of convective drying of food materials. In Proceedings of the Global Engineering, *Science and Technology Conference*, Global Institute of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh. 2012.
- PERUSSELO, C. A. *Análise numérica e experimental da secagem osmo-convectiva do yacon*. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.
- RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.
- SANDHU, S. K. *COMSOL assisted modeling of a climbing film evaporator*. 2010. Dissertation (Bachelor of Science) – Worcester Polytechnic Institute, 2010.
- ZEINELDIN, T. Modeling the processo f drying stationary objectis inside a tumble drying using COMSOL Multiphysics. Hannover, *COMSOL Conference*, 2008.