

MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM EM UM SECADOR SOLAR HÍBRIDO: FORMULAÇÃO DE LUIKOV CONSIDERANDO PARÂMETROS VARIÁVEIS E USO DA GITT

Mauricio Andrés Gaggero Lajaña – mauricio.gaggero@cear.ufpb.br

Cristiane Kelly Ferreira da Silva – cristianek@cear.ufpb.br

Fabiano Cordeiro Cavalcanti – fabianofr@cear.ufpb.br

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, 58051-970 João Pessoa, Paraíba, Brasil

Resumo. A secagem solar de produtos agrícolas é uma das primeiras técnicas utilizadas pela humanidade, a fim de preservar alimentos sem comprometer seu valor nutricional, sabor, textura, etc. Ao longo do tempo, existiram algumas sofisticacões no processo, mas seus princípios essenciais permaneceram os mesmos. Por outro lado, para o dimensionamento e controle ótimos do processo e dos equipamentos é necessário um claro entendimento dos fenômenos envolvidos e das propriedades de transporte do produto que está sendo manuseado. Os fenômenos físicos envolvidos no processo de secagem são a transferência de calor e massa, os quais que se manifestam através da condução e convecção, difusão e evaporação, respectivamente. Neste sentido, o modelo de Luikov considera a transferência de calor e massa como um problema acoplado, em oposição a outros modelos nos quais eles são considerados problemas isolados. Este trabalho tem como objetivo investigar as transferências simultâneas de calor e de massa durante o processo de secagem, mediante a abordagem de um modelo matemático firmado nas equações de Luikov e considerando os parâmetros termofísicos variáveis. No modelo de Luikov os parâmetros termofísicos foram escolhidos como funções do tempo, resultando em um sistema de equação não-linear, o qual foi resolvido segundo os formalismos inerentes à Técnica da Transformada Integral Generalizada (GITT). Foram analisados seis casos, variando os parâmetros Lu , Biq e Bim , seguindo funções lineares crescentes e decrescentes. Os resultados mostraram uma forte dependência do modelo em relação aos parâmetros estudados, tornando interessante o estudo experimental do fenômeno.

Palavras-chave: Secagem Solar, Luikov, GITT

1. INTRODUÇÃO

A secagem solar é uma das técnicas mais antigas para secar alimentos usadas pelo homem. As instalações mais antigas foram encontradas no Sul da França e são estimadas para aproximadamente 8.000 BC (Kroll, 1989). A secagem é um processo de extração de água livre presente em um determinado produto. Diminuir a umidade dos alimentos desacelera a ação de enzimas, bactérias etc, aumentando a durabilidade do mesmo. A secagem dos alimentos apresenta vantagens como: evitar a necessidade de utilização de sistemas caros de refrigeração para a preservação; facilitar o transporte e o armazenamento, devido à redução de tamanho e agregar valor ao produto (Guiné *et al.*, 2007). Desta forma, ao longo dos últimos anos, vários pesquisadores concentraram seus estudos nos processos de secagem de alimentos (Alencar Junior *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2009a; Silva *et al.*, 2009b; Giner *et al.*, 2010; Lecorvaisier *et al.*, 2010; Ruiz-López *et al.*, 2012; Pacheco-Aguirre *et al.*, 2014; Esfahani *et al.*, 2014).

A crise energética e o aumento dos preços dos combustíveis provocou uma elevação considerável nos custos dos métodos convencionais de secagem, tal como a mecânica, exigindo a busca de alternativas para efetuar a secagem. Um procedimento de secagem que utiliza secagem mecânica e secagem natural é usado no Brasil, o qual consiste em combinar o aquecimento do ar em coletor solar e a convecção forçada do ar, realizada por ventiladores. Tal procedimento resulta em um emprego eficaz tanto da energia solar assim como da convecção forçada. Vários pesquisadores têm se dedicado ao estudo da secagem solar (Belessiotis e Delyannis, 2011; Singh e Kumar, 2012; El-Sebaï e Shalaby, 2013).

O fenômeno físico da secagem pode ser representado pela teoria de Luikov, a qual está baseada nos processos termodinamicamente irreversíveis. Luikov explicou teoricamente e provou experimentalmente, que a migração de umidade pode ser causada por um gradiente de temperatura (Luikov, 1966, 1975). A transferência simultânea de calor e massa causa um forte acoplamento nas equações de Luikov, e tal fator

as inclui dentre as equações de difusão de calor e massa mais difíceis de serem resolvidas pelas técnicas de solução até então existentes.

Soluções de problemas envolvendo transferência simultânea de calor e massa em meios porosos são apresentadas na literatura através de diversos métodos e técnicas. Dentro deste contexto, técnicas de soluções híbridas analítico-numéricas têm sido desenvolvidas e utilizadas. Dentre estas técnicas destaca-se a Técnica da Transformada Integral Generalizada (GITT). É vasta a literatura a respeito da GITT, porém, a aplicação desta técnica em problemas de secagem de alimentos é ainda escassa.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo investigar as transferências simultâneas de calor e de massa durante o processo de secagem, mediante a abordagem de um modelo matemático firmado nas equações de Luikov e considerando os parâmetros termofísicos variáveis.

2. PROBLEMA FÍSICO E MODELAGEM MATEMÁTICA

O problema físico considerado aqui envolve um processo de secagem solar indireta de uma placa porosa. Dentro da câmara de secagem os dois lados da amostra são expostos a um fluxo de ar seco à temperatura T_0 , conforme ilustrado na Fig.1.

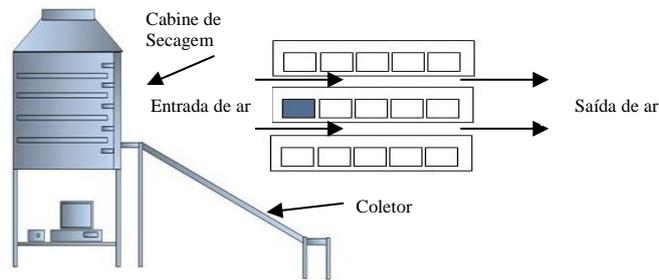


Figura 1 - Diagrama esquemático de um secador solar indireto do tipo gabinete

2.1 Modelagem Matemática

O sistema linear de equações proposto por Luikov (1966) com as condições iniciais e de contorno associadas, para a modelagem desse problema físico envolvendo transferência de calor e massa em meios capilares porosos, pode ser escrita na forma adimensional como:

$$\frac{\partial \Theta(X, \tau)}{\partial \tau} = (1 + \varepsilon L_u K_o P_n) \frac{\partial^2 \Theta(X, \tau)}{\partial X^2} - \varepsilon L_u K_o \frac{\partial^2 \Phi(X, \tau)}{\partial X^2} \quad 0 < X < 1, \quad \tau > 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi(X, \tau)}{\partial \tau} = -L_u P_n \frac{\partial^2 \Theta(X, \tau)}{\partial X^2} + L_u \frac{\partial^2 \Phi(X, \tau)}{\partial X^2} \quad 0 < X < 1, \quad \tau > 0 \quad (2)$$

$$\Theta(X, 0) = 0; \quad \Phi(X, 0) = 0 \quad 0 < X < 1, \quad \tau = 0 \quad (3,4)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, \tau)}{\partial X} = 0; \quad \frac{\partial \Phi(0, \tau)}{\partial X} = 0 \quad X = 0, \quad \tau > 0 \quad (5,6)$$

$$\frac{\partial \Theta(1, \tau)}{\partial X} - Bi_q(1 - \Theta(1, \tau)) + (1 - \varepsilon) Bi_m K_o L_u (1 - \Phi(1, \tau)) = 0 \quad X = 1, \quad \tau > 0 \quad (7)$$

$$- \frac{\partial \Phi(1, \tau)}{\partial X} + P_n \frac{\partial \Theta(1, \tau)}{\partial X} + Bi_m (1 - \Phi(1, \tau)) = 0 \quad X = 1, \quad \tau > 0 \quad (8)$$

Onde os seguintes grupos adimensionais foram definidos:

$$\Theta(X, \tau) = \frac{T(x, t) - T_0}{T_{ar} - T_0}; \quad \Phi(X, \tau) = \frac{u(x, t) - u_0}{u_s - u^*}; \quad X = \frac{x}{L}; \quad \tau = \frac{at}{L^2}; \quad Bi_q = \frac{h_c L}{K}; \quad Bi_m = \frac{h_m L}{K_m}$$

$$L_u = \frac{a_m}{a}; \quad K_o = \frac{\lambda u_0 - u^*}{c T_{ar} - T_0}; \quad P_n = \delta \frac{T_{ar} - T_0}{u_0 - u^*}$$

As propriedades do meio poroso, que aparecem acima, incluem a difusividade térmica (a), difusividade de massa (a_m), a condutividade térmica (k), condutividade de massa (k_m), calor específico (c) e as variáveis independentes são posição (x) e tempo (t), respectivamente. As demais quantidades físicas que aparecem nos grupos adimensionais são o coeficiente convectivo de transferência de calor (h), coeficiente convectivo de transferência de massa (h_m), calor latente de evaporação (λ), umidade inicial (u_0), umidade de equilíbrio (u^*), umidade no tempo e no espaço (u), temperatura inicial do meio poroso (T_0), temperatura do ar (T_{ar}) temperatura no tempo e no espaço (T), coeficiente termogradiante (δ) e critério de mudança de fase (ε). Lu , Pn , e Ko são denominados números de Luikov, Posnov e Kossovitch, respectivamente.

3. MÉTODO DE SOLUÇÃO PARA A MODELAGEM MATEMÁTICA

A técnica da transformada integral generalizada (GITT), por ser um método que possui características analítico-numéricas, têm motivado, ao longo dos anos, o desenvolvimento de vários esquemas para aceleração da convergência e/ou redução do custo computacional, como consequência direta da aplicação do método à classes de problemas distintos (Silva 2010 *Apud* Dantas, 2002). A fim de superar as dificuldades na convergência da solução nos contornos que possuem não-homogeneidade, a solução da modelagem matemática, Eqs. (1-8), é escrita em termos de soluções filtradas, como:

$$\Theta(X, \tau) = 1 + \Theta_h(X, \tau); \quad \Phi(X, \tau) = 1 + \Phi_h(X, \tau) \quad (9,10)$$

Assim, o sistema pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial \Theta_h(X, \tau)}{\partial \tau} = K_{11} \frac{\partial^2 \Theta_h(X, \tau)}{\partial X^2} + K_{12} \frac{\partial^2 \Phi_h(X, \tau)}{\partial X^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Phi_h(X, \tau)}{\partial \tau} = K_{21} \frac{\partial^2 \Theta_h(X, \tau)}{\partial X^2} + K_{22} \frac{\partial^2 \Phi_h(X, \tau)}{\partial X^2} \quad (12)$$

$$\Theta_h(X, 0) = -1; \quad \Phi_h(X, 0) = -1 \quad (13,14)$$

$$\frac{\partial \Theta_h(0, \tau)}{\partial X} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_h(0, \tau)}{\partial X} = 0 \quad (15,16)$$

$$\frac{\partial \Theta_h(1, \tau)}{\partial X} + Bi_q \Theta_h(1, \tau) = Bi_m^{**} \Phi_h(1, \tau) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Phi_h(1, \tau)}{\partial X} + Bi_m^* \Phi_h(1, \tau) = -Bi_q P_n \Theta_h(1, \tau) \quad (18)$$

Onde

$$Bi_m^* = Bi_m [1 - (1 - \varepsilon) K_o L_u P_n]; \quad Bi_m^{**} = (1 - \varepsilon) Bi_m K_o L_u$$

Os seguintes problemas de autovalor do tipo Sturm-Liouville para a temperatura e umidade, respectivamente, são:

$$\frac{d^2 \Psi_i(X)}{dX^2} + \mu_i^2 \Psi_i(X) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{d\Psi_i(0)}{dX} = 0; \quad \frac{d\Psi_i(0)}{dX} + Bi_q \Psi_i(1) = 0 \quad (20,21)$$

$$\frac{d^2 \varphi_i(X)}{dX^2} + \lambda_i^2 \varphi_i(X) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{d\varphi_i(X)}{dX} = 0; \quad \frac{d\varphi_i(X)}{dX} + Bi_q \varphi_i(1) = 0 \quad (23,24)$$

Com soluções analíticas (Özişik, 1993] e normas, respectivamente, dadas por:

$$\Psi_i(X) = \cos(\mu_i X) \text{ e } \varphi_i(X) = \cos(\lambda_i X) \quad (25,26)$$

$$M_i = \frac{1}{2} \frac{\mu_i^2 + Bi_q^2 + Bi_q}{\mu_i^2 + Bi_q^2}; \quad N_i = \frac{1}{2} \frac{\lambda_i^2 + Bi_m^{*2} + Bi_m^*}{\lambda_i^2 + Bi_m^{*2}} \quad (27,28)$$

Os autovalores podem ser calculados a partir da solução das seguintes equações transcendentais:

$$\mu_i \operatorname{tg}(\mu_i) = Bi_q; \quad \lambda_i \operatorname{tg}(\lambda_i) = Bi_m \quad (29,30)$$

O par Transformada/Inversa, para temperatura e umidade foi definido, respectivamente, como:

$$\bar{\Theta}_i(\tau) = \int_0^1 \bar{\Psi}_i(X) \Theta_h(X, \tau) dX; \quad \Theta_h(X, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{\Psi}_i(X) \bar{\Theta}_i(\tau) \quad (31,32)$$

$$\bar{\Phi}_i(\tau) = \int_0^1 \bar{\varphi}_i(X) \Phi_h(X, \tau) dX; \quad \Phi_h(X, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{\varphi}_i(X) \bar{\Phi}_i(\tau) \quad (33,34)$$

Executando a transformação integral das Eqs. (11,12) com as Eqs. (32) e (34) e realizando algumas manipulações matemáticas, obtiveram-se o seguinte sistema acoplado de EDO's para os potenciais transformados:

$$\frac{d\bar{\Theta}_i(\tau)}{d\tau} + K_{11}\mu_i^2\bar{\Theta}_i(\tau) + K_{12}\mu_i^2 \sum_{j=0}^{\infty} a_{ij}\bar{\Phi}_j(\tau) = K_{11}Bi_m^{**}\bar{\varphi}_i(1)\Phi_h(1, \tau) + K_{12}[(Bi_q - Bi_m^*)\bar{\varphi}(1)\Phi_h(1, \tau) - Bi_q P_n \bar{\varphi}(1)\Theta_h(1, \tau)] \quad (35)$$

$$\frac{d\bar{\Phi}_i(\tau)}{d\tau} + K_{22}\lambda_i^2\bar{\Phi}_i(\tau) + K_{21}\lambda_i^2 \sum_{j=0}^{\infty} b_{ij}\bar{\Theta}_j(\tau) = K_{21}[(Bi_m^* - Bi_q)\bar{\varphi}_i(1)\Theta_h(1, \tau) + Bi_m^{**}\bar{\varphi}_i(1)\Phi_h(1, \tau)] - K_{22}Bi_q P_n \bar{\varphi}(1)\Theta_h(1, \tau) \quad (36)$$

3.1 Estudo dos Parâmetros Adimensionais das Equações de Luikov

Um dos objetivos específicos deste trabalho é considerar os parâmetros de Luikov como funções do tempo. Foram considerados um caso base (Silva 2010 *Apud* Karim e Hawlader 2005), com coeficientes constantes e seis casos com coeficientes variáveis. As propriedades do caso base se apresentam na Tab. 1, enquanto as propriedades dos casos com coeficientes variáveis se apresentam na Tab. 2.

Tabela 1 – Condições experimentais e propriedades do produto (banana): $L = 2.0 \times 10^{-3}$ (m), $\rho = 980$ (kg/m³), $k = 0.5424$ (w/m K), $c = 3350$ (J/kg K), $c_m = 3.0 \times 10^{-3}$ (kg/kg °M), $T_0 = 24$ (°C), $u_0 = 4$ (kg/kg), $\delta = 0.015$ (kg/kg°C).

Propriedades	Caso Base
h_c (W/m ² K)	36,51
h_m (kg/m ² s°M)	$4,97 \times 10^{-7}$
K_m (kg/m s°M)	$4,73 \times 10^{-10}$
λ (J/Kg)	$2,3586 \times 10^6$
T_{ar} (°C)	50
v_{ar} (m/s)	0,70
u^* b.s. (kg/kg)	0,20
D_{ef} (m ² /s)	$2,41 \times 10^{-10}$
P_n	0,142
ko	74,32
ε	0,3
Lu	0,0015
Bi_q	0,135
Bi_m	2,43

Tabela 2 – Estudos de casos.

Casos	Lu	Bi_q	Bi_m
1	$0,0015+0,00000004t$	0,135	2,43
2	$0,0015-0,00000004t$	0,135	2,43
3	0,0015	$0,135+0,00004t$	2,43
4	0,0015	$0,135-0,00004t$	2,43
5	0,0015	0,135	$2,43+0,00004t$
6	0,0015	0,135	$2,43-0,00004t$

O programa foi escrito em Fortran 90 e o sistema de equações diferenciais, obtido pela GITT, foi resolvido pela subrotina DIVPAG, da livreria numérica ISML. O controle de erro relativo foi definido em 10^8 .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da Transferência Simultânea de Calor e Massa

Esta análise refere-se ao comportamento do processo simultâneo de transferência de calor e massa para o caso base mostrado na Tab. 1. As variações de temperatura e umidade, para diferentes tempos e posições, no interior do produto são apresentadas nas Figs. 2 e 3.

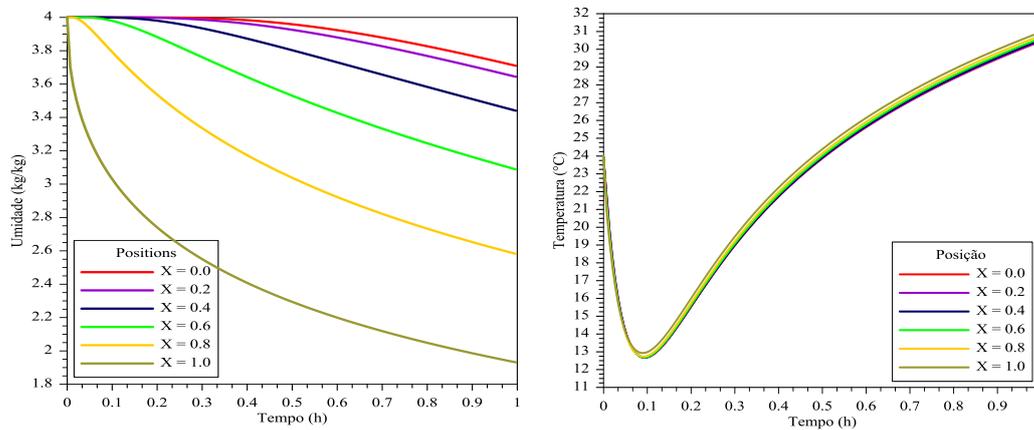


Figura 2 - Perfis (a) umidade *versus* tempo na primeira hora da secagem, (b) temperatura *versus* tempo na primeira hora da secagem para o Caso Base.

Na Figura 2 pode-se verificar que para curtos períodos de secagem houve uma forte diminuição na umidade, u , na região próxima da superfície, $X = 1$, devido à intensa transferência convectiva de massa que ocorre quando as diferenças de potencial da umidade na fronteira são mais significativas. Isso provocou uma queda rápida da temperatura T , atingindo valores abaixo T_0 . No entanto, este fenômeno nem sempre é observável em secagem de alimentos, devido ao curto período de tempo em que ela subsiste, onde no caso estudado foi de aproximadamente 0.1 h. Após esse período inicial, uma parte da energia recebida pela superfície causou uma elevação de temperatura nessa região, iniciando uma transferência de calor para o centro do alimento.

Um pequeno gradiente de temperatura foi estabelecido na superfície durante o desenvolvimento do processo, e a sua dependência da transferência de massa foi diminuída (Fig. 3). Portanto, a última fase de secagem ocorreu principalmente devido à presença do gradiente da umidade. A secagem das camadas interiores do produto foi desenvolvida e a umidade do produto, em todas as posições, se aproximou do estado de equilíbrio.

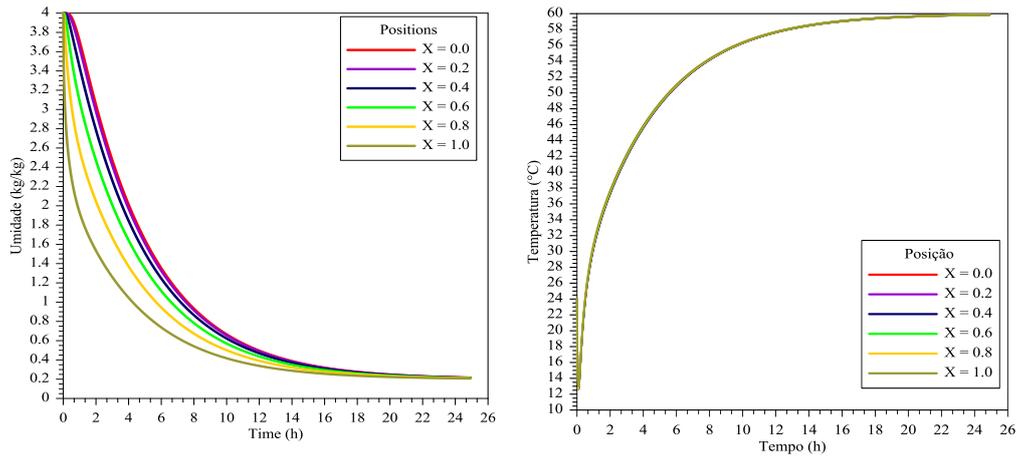


Figura 3 - Perfis (a) umidade *versus* tempo ao longo de todo o domínio, (b) temperatura *versus* tempo ao longo de todo o domínio para o Caso Base.

4.2 Estudo dos Parâmetros Adimensionais das Equações de Luikov

Neste tópico são apresentados estudos referentes à influência da variação dos parâmetros Lu , Bi_q e Bi_m sobre os perfis de temperatura e umidade, baseados nos casos 2 à 6 da Tab.2. Para este fim, as curvas de distribuição de temperatura e umidade, para as posições $X = 0,2$ e $X = 0,8$ são mostradas nas Figs. 3-8.

- **Resultados Variando Lu**

Nas Figs. 3 e 4 apresentam-se as variações das distribuições de temperatura e umidade durante as primeiras duas horas e meia do processo de secagem, para Lu variando.

Verifica-se que, à medida que Lu cresceu a velocidade característica no transporte da umidade foi aumentada sensivelmente, com a melhoria do processo de secagem e, conseqüentemente, ocasionou a diminuição na temperatura. Pode-se observar que as temperaturas do caso 2 (Lu decrescente) são maiores do que as temperaturas do caso base (Lu constante), as quais são maiores que as temperaturas do caso 1 (Lu crescente).

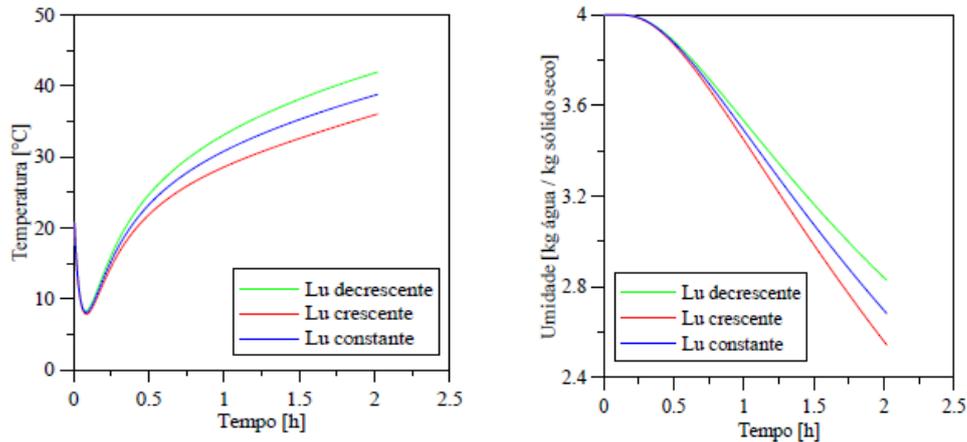


Figura 3 - Perfis para a posição $X = 0,2$. (a) temperatura *versus* tempo, (b) umidade *versus* tempo.

Lembrando que $Lu = a_m/a$, e analisando as curvas da temperatura, Lu crescente se traduz em uma difusividade térmica decrescente, ocasionando que a temperatura aumente com menor rapidez. Verifica-se ainda nas Figs. 3 e 4 que a queda de umidade é mais intensa no caso 1 (Lu crescente). Isso se deve a que Lu crescente equivale a uma difusividade mássica crescente. Portanto, a umidade é transferida mais rapidamente do que nos outros casos. Este comportamento é verificado nas diferentes posições estudadas.

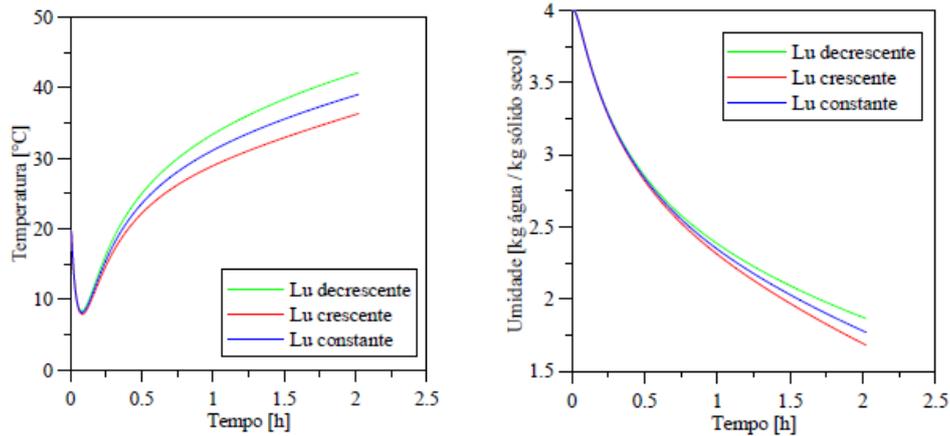


Figura 4- Perfis para a posição $X = 0,8$. (a) temperatura *versus* tempo, (b) umidade *versus* tempo.

- **Resultados Variando Bi_q**

Apresentam-se nas Figs. 5 e 6 o comportamento dos perfis de temperatura e umidade durante as primeiras duas horas e meia no processo de secagem, variando-se Bi_q .

Pode-se observar que as temperaturas do caso 3 (Bi_q crescente) são maiores do que as temperaturas do caso base (Bi_q constante), as quais são maiores que as temperaturas do caso 4 (Bi_q decrescente). Lembrando que $Bi_q = h_c L / K$, Bi_q crescente equivale a dizer que a taxa de crescimento do coeficiente de transferência de calor por convecção é maior do que a taxa de crescimento da condutividade térmica. Para que ocorra transferência de calor no interior do alimento (condução), é preciso que antes ocorra uma transferência de calor na superfície (convecção), provocando um gradiente de temperatura. Portanto, um aumento no coeficiente convectivo se traduz em um aumento na temperatura, mesmo que o coeficiente condutivo aumente a uma taxa menor, pois um gradiente de temperatura grande compensará uma condutividade térmica pequena.

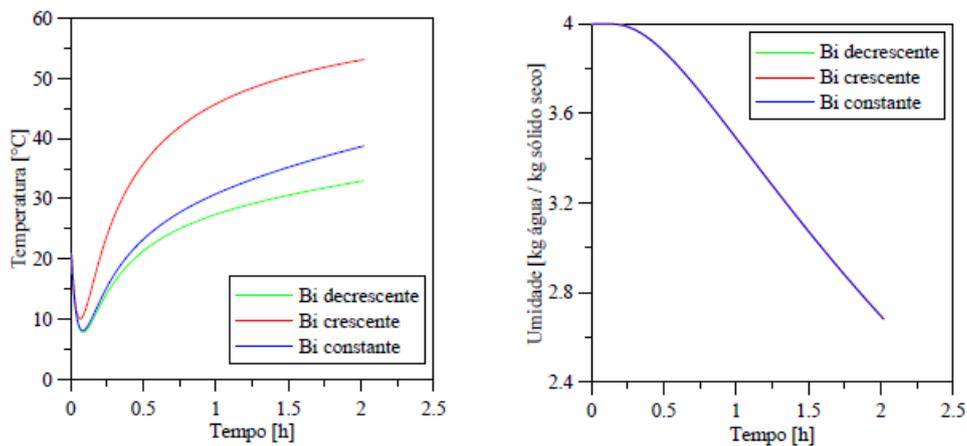


Figura 5- Perfis para a posição $X = 0,2$. (a) temperatura *versus* tempo, (b) umidade *versus* tempo.

Observa-se ainda nas Figs. 5 e 6 que a queda de umidade é idêntica para os todos os casos. Tal comportamento está pautado no fato de que Bi_q tem uma influência insignificante sobre a transferência de massa.

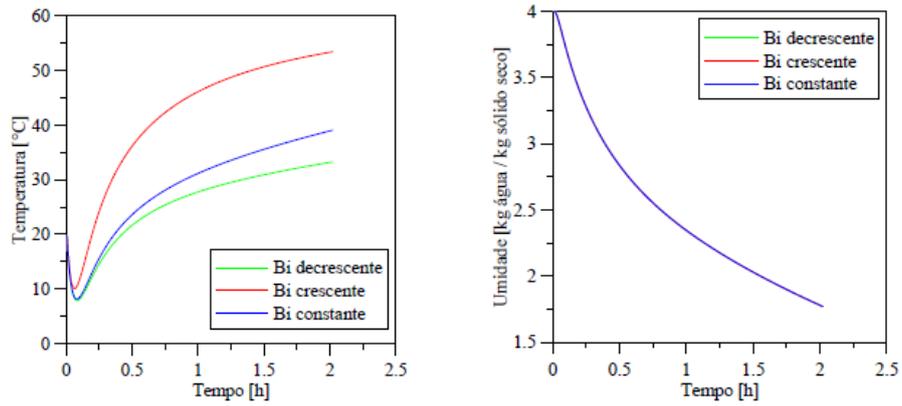


Figura 6- Perfis para a posição $X = 0,8$. (a) temperatura *versus* tempo, (b) umidade *versus* tempo.

• **Resultados Variando Bi_m**

São apresentadas nas Figs. 7 e 8 os perfis de temperatura e umidade durante as primeiras duas horas e meia no processo de secagem, variando-se Bi_m .

Verifica-se que as temperaturas do caso 6 (Bi_m decrescente) são maiores do que as temperaturas do caso base (Bi_m constante), as quais são maiores do que as temperaturas do caso 5 (Bi_m crescente). Lembrando que $Bi_m = h_m L / K_m$, Bi_m decrescente equivale a dizer que a taxa de crescimento do coeficiente condutivo (difusão) é maior do que a taxa de crescimento do coeficiente convectivo (evaporação). Se a água tende a permanecer dentro do alimento, a energia térmica dela provocará um aumento mais rápido da temperatura do que se ela fosse evaporada.

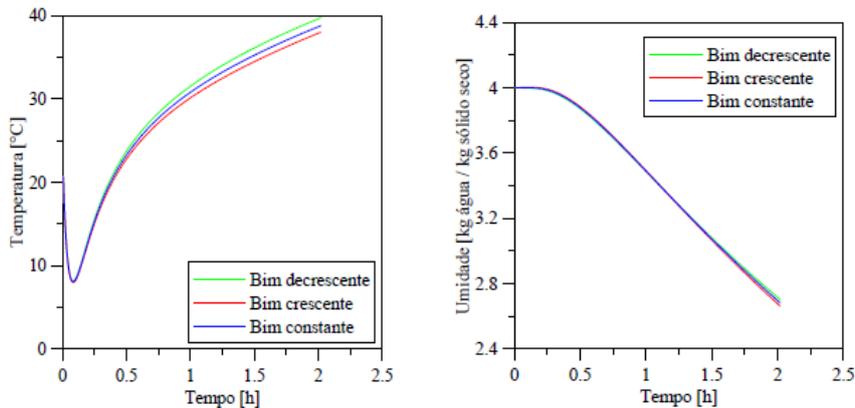


Figura 7- Perfis para a posição $X = 0,2$. (a) temperatura *versus* tempo, (b) umidade *versus* tempo.

Observa-se também que a queda de umidade é mais intensa no caso 5 (Bi_m crescente). Isso faz sentido, pois um maior Bi_m é equivalente a uma maior evaporação, a qual se traduz em um maior gradiente de concentração de umidades, o que ocasiona uma maior transferência de massa no interior do alimento.

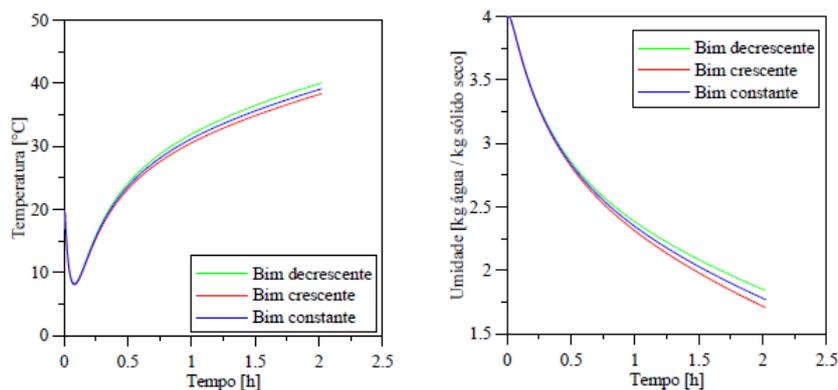


Figura 8- Perfis para a posição $X = 0,8$. (a) temperatura *versus* tempo, (b) umidade *versus* tempo.

5 CONCLUSÃO

De uma forma geral baseando-se nos resultados alcançados, conclui-se que a metodologia adotada no presente estudo foi apropriada, e os objetivos estabelecidos foram atingidos. Os modelos matemáticos podem ser uma ferramenta útil para otimizar o processo de secagem de alimentos, tendo como efeitos a diminuição de perdas na produção e a padronização da qualidade do produto, entre outros. Entender os fenômenos físicos que acontecem durante o processo de secagem e as leis que os governam é fundamental para conseguir fazer uma modelagem matemática que os represente fielmente. O modelo de Luikov inclui o estudo físico da secagem de uma forma mais realista, uma vez que considera a transferência simultânea de calor e massa. O mesmo permite, portanto, saber os perfis de temperatura e umidade no interior do produto. Assim, o modelo do Luikov é mais preciso para prever os valores de temperatura no interior do alimento, quando os coeficientes de transferência estão disponíveis. A utilização de métodos híbridos numérico-analíticos é de grande utilidade para resolver problemas complexos, como o modelo de Luikov. Foi demonstrada a importância dos efeitos da variação dos parâmetros Lu , Bi_q e Bi_m sobre a temperatura e a umidade foram os esperados. O modelo de Luikov apresentou uma forte sensibilidade em relação aos parâmetros Lu , Bi_q e Bi_m . Portanto, é interessante fazer um trabalho experimental para comparar com os resultados teóricos, com o objetivo de encontrar as melhores funções para os parâmetros.

REFERÊNCIAS

- Alencar Junior, J. P.; Oliveira, A. S. S. and Silva, Z. E., 2008. Numerical Simulation of a Hybrid Solar Dryer for Agriculture Products, Proceedings of the 12th Brazillian Congress of Thermal Engineering and Sciences, Belo Horizonte, MG, Brasil, November 10-14.
- Belessiotis, V. and Delyannis, E., 2011. Solar Drying, *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1665–1691.
- El-Sebaei, A.A. and Shalaby, S.M., 2013. Experimental Investigation of an Indirect-Mode Forced Convection Solar Dryer for Drying Thymus and Mint, *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 109–116.
- Esfahani, J. A., Majdi, H and Barati, E., 2014. Analytical Two-Dimensional Analysis of the Transport Phenomena Occurring During Convective Drying: Apple Slices, *Journal of Food Engineering*, vol. 123, pp. 87–93.
- Giner, S. A. and Irigoyen, R. M. T., 2010. The Variable Nature of Biot Numbers in Food Drying, *Journal of Food Engineering*, vol. 101, pp. 214–222.
- Guiné, R. P. F., Rodrigues, A. E. and Figueiredo, M. M., 2007. Modelling and Simulation of Pear Drying, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 192, pp. 69–77.
- Kroll, K., Kast, W., 1989. Geschichtliche Entwicklung der Trocknungstechnik, *Trocknen und Trockner in der Produktion*, vol 3, pp. 574. Springer Verlag, Berlin
- Lecorvaisier, E., Darche, S., Silva, Z. E. and Silva, C. K. F., 2010. Theoretical Model of a Drying System Including Turbulence Aspects, *Journal of Food Engineering*, vol. 96, n. 3, pp. 365–373
- Luikov, A. V., 1966. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, Ed. Pergamon Press, Oxford.
- Luikov, A. V., 1975. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary- Porous Bodies, *International Journal Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1-14.
- Özişik, M. N., 1993. Heat Conduction, Ed 2. New York, John Wiley & Sons.

- Pacheco-Aguirre, F. M., Ladrón-González, A., Ruiz-Espinosa, H. et al., 2014. A method to Estimate Anisotropic Diffusion Coefficients for Cylindrical Solids: Application to the Drying of Carrot, *Journal of Food Engineering*, vol. 125, pp. 24–33.
- Ruiz-Lopez, I. I., Ruiz-Espinosa, H., Arellanes-Lozada, P. et al, 2012. Analytical Model for Variable Moisture Diffusivity Estimation and Drying Simulation of Shrinkable Food Products, *Journal of Food Engineering*, vol. 108, pp. 427–435.
- Silva, C. K. F., 2010. Estimacão de Parâmetros de Secagem de Alimentos - Formulação de Luikov e Uso da Transformada Integral Generalizada, Tese de Doutorado, PPGEM, UFPB, João Pessoa.
- Silva, C. K. F., Oliveira, A. S. S., Silva. Z. E. e Santos, A. C. C., 2009b. Use of the Generalized Integral Transform Method for Solving Equation of Mass Transfer in Food Drying, *Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado, RS, Brasil.
- Silva, C. K. F., Silva. Z. E. and Mariani, V. C., 2009a. Determination of the Diffusion Coefficient of Dry Mushrooms Using the Inverse Method, *Journal of Food Engineering*, vol. 95, n. 1, pp. 1-10.
- Singh, S. e Kumar, S., 2012. Development of Convective Heat Transfer Correlations for Common Designs of Solar Dryer, *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 403–414.

MODELING OF THE DRYING PROCESS IN A HYBRID SOLAR DRYER: LUIKOV'S FORMULATION CONSIDERING VARIABLE PARAMETERS AND USE OF The GITT

Abstract. *Solar drying of agricultural products is one of the first techniques used by mankind in order to preserve food without compromising its nutritional value, taste, texture, etc. Over time, there were some sophistications in the process, but their essential principles remained the same. On the other hand, for the desing and optimal control of the process and the equipment a clear understanding of the phenomena involved and the transport properties of the product being handled is necessary. The physical phenomena involved in the drying process are heat transfer and mass transfer, which occur through conduction, convection, diffusion and evaporation, respectively. In this sense, Luikov's model considers the heat and mass transfer as a coupled problem, as opposed to other models in which they are considered isolated problems. This work aims to investigate the simultaneous transfer of heat and mass during the drying process, using a mathematical model based on the Luikov equations and considering the variable thermophysical parameters. This work goal to investigate the simultaneous transfer of heat and mass during the drying process, using a mathematical model based on the Luikov equations and considering the variable thermophysical parameters. In Luikov's model the thermophysical parameters were chosen as functions of time, resulting in a system of non-linear equations, which was solved according to the Generalized Integral Transformation Technique (GITT). Six cases were analyzed, varying the L_u , B_{iq} and B_{im} parameters, using increasing and decreasing linear functions. Six cases were analyzed, varying the L_u , B_{iq} and B_{im} parameters, using increasing and decreasing linear functions. The results showed a strong dependence of the model in relation to the studied parameters, making interesting an experimental study of the phenomenon.*

Key words: *Solar Drying, Luikov, GITT*