



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## ESTUDO NUMÉRICO DA CINÉTICA DE SECAGEM EM BANANAS

Jailson Charles dos Santos, [jsurca@yahoo.com.br](mailto:jsurca@yahoo.com.br)<sup>1</sup>

Rodolfo de Sousa Santos, [rodolfosousa3@hotmail.com](mailto:rodolfosousa3@hotmail.com)<sup>1</sup>

Glauco Demóclito Tavares de Barros, [glauco.professor@hotmail.com](mailto:glauco.professor@hotmail.com)<sup>2</sup>

Jacques César dos Santos, [jacquesles@yahoo.com.br](mailto:jacquesles@yahoo.com.br)<sup>3</sup>

José Maurício Gurgel, [jm.gurgel@uol.com.br](mailto:jm.gurgel@uol.com.br)<sup>3</sup>

Francisco Marcondes, [marcondes@ufc.br](mailto:marcondes@ufc.br)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Regional do Cariri, Departamento de Engenharia de Produção Mecânica, Av. Leão Sampaio, Nº 107, Triângulo, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, CEP 63040-000, Campus Crajubar.

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Av. Plácido Aderaldo Castelo, Nº 1646, Planalto, Juazeiro do Norte, Ceará.

<sup>3</sup>Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Laboratório de Energia Solar, Cidade Universitária, João Pessoa, Paraíba, Brasil, CEP 58090-900

<sup>4</sup>Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Ciência dos Materiais, Campus do Pici, Bloco 714, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60455-760.

**Resumo:** *O presente trabalho ilustra uma abordagem numérica do problema de transferência de calor e massa relativa à secagem de bananas. Um modelo matemático representativo da cinética de secagem no produto foi apresentado e um código numérico baseado no método dos volumes finitos foi desenvolvido para resolver o sistema de equações que descreve o processo de secagem no alimento. Difusividade mássica variável com a temperatura foi considerada na modelagem matemática do processo. Uma concordância bastante razoável foi verificada comparando os resultados numéricos obtidos com resultados extraídos da literatura. A influência de parâmetros operacionais importantes no processo, tais como temperatura, umidade e vazão do ar de secagem foram investigadas. Os resultados numéricos mostraram que o aumento da temperatura, o aumento da vazão e a redução da umidade do ar favorecem a transferência de massa no alimento reduzindo o tempo de secagem.*

**Palavras-chave:** *Cinética de secagem, Banana, Volumes finitos.*

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe um desequilíbrio considerável entre a quantidade de alimentos que é produzida e aquela consumida em todo o mundo. Um dos fatores que contribuem para esse desequilíbrio é o desperdício de produtos agrícolas devido a condições inadequadas de armazenamento após a colheita. Estima-se que nos países em desenvolvimento, algo entre 10 a 40% da produção agrícola é desperdiçado devido a fatores como: carência de tecnologia adequada, técnicas de cultivo e fertilização impróprias e perdas pós-colheita (Murthy, 2009). No Brasil, cerca de 40 % da produção agrícola é perdida por consequência de conservação inadequada. Dentre os produtos desperdiçados destaca-se a banana, onde o Brasil é o segundo maior produtor no mundo (Baini e Langrish, 2007), sendo que apenas 1% da produção nacional é exportada no país. Tal desperdício acaba por trazer prejuízos ao pequeno e médio produtor reduzindo as exportações desses produtos e a oferta disponível no mercado interno. Uma forma de combater esse desperdício é investir na preservação dos alimentos. A desidratação ou secagem é um processo que consiste na eliminação de água por evaporação de modo a contribuir para a conservação de um produto. O processo de secagem tem como benefício direto a estabilização da atividade microbiológica e a redução nas reações químicas e enzimáticas, contribuindo para a obtenção de um período mais longo de armazenamento. Outro benefício da secagem é a redução no peso dos produtos que tem como consequência direta a redução do custo de transporte.

A desidratação de alimentos é um fenômeno complexo, envolvendo processos simultâneos de transferência de calor e massa. A velocidade de remoção de umidade na superfície do material a secar não pode exceder em muito a velocidade de difusão da água no interior do produto. Um estudo detalhado do problema para fins de dimensionamento e projeto de equipamentos de secagem de alimentos, requer o desenvolvimento e solução de um modelo matemático representativo do material a secar acoplado ao modelo matemático da câmara de secagem no secador.

Frutas e vegetais têm características distintas de outras substâncias naturais que influenciam significativamente o seu comportamento durante a secagem e preservação. As frutas são geralmente caracterizadas pelo seu alto teor de umidade inicial, alta sensibilidade à temperatura (cor, sabor, textura, deterioração do valor nutricional) e retração do produto durante a secagem. A quantidade necessária de energia térmica para secar um produto particular depende de muitos fatores tais como: vazão de ar, teor de umidade inicial no produto, teor de umidade final desejado, temperatura e umidade relativa do ar (Karim e Hawlader, 2005).

Um grande acervo de trabalhos teóricos e experimentais, abordando a análise do processo de secagem em alimentos, está disponível na literatura (Drouzas e Schubert, 1996; Schirmer et al., 1996; Turner e Majumdar, 1997; Kiranoudis et al., 1997; Rastogi et al., 1997; Prasertsan e Saen-Sabv, 1998; Lima et al., 2002; Karim e Hawlader, 2005; Bains e Langrish, 2007). Entretanto, a maioria dos modelos propostos para descrição do processo de secagem, ou são demasiadamente simples para fiel representação do processo real de secagem, ou são demasiadamente complexos para obtenção de qualquer resultado prático. Dessa forma, existe a necessidade de desenvolvimento de modelos relativamente simples para representação do fenômeno de secagem e que não comprometam a capacidade de descrição dos processos físicos envolvidos no fenômeno.

Uma grande quantidade de trabalhos publicados na literatura acerca da secagem de alimentos tem abordado a estimativa de propriedades termofísicas de frutas e vegetais tais como: condutividade térmica, calor específico e difusividade mássica. Embora esse estudo seja de fundamental importância para o levantamento da cinética de secagem nesses produtos há também a necessidade de investigar a influência das condições do ar de secagem sobre o processo, com o objetivo de otimizar o projeto de secadores. A contribuição do presente trabalho consiste na apresentação da modelagem para o problema de difusão de calor e massa que ocorre na secagem de frutas e na realização de um estudo detalhado da influência das condições operacionais do ar de secagem sobre a cinética do processo. A influência de parâmetros importantes como vazão, temperatura e umidade do ar de secagem serão investigadas. Um código computacional utilizando o método dos volumes finitos foi desenvolvido para resolver as equações que descrevem a cinética de secagem no produto. O código computacional será utilizado na determinação dos parâmetros operacionais ótimos que maximizam a eficiência do processo de secagem sem comprometer a qualidade do produto desidratado. Como estudo de caso, um estudo numérico da cinética de secagem em bananas foi realizado.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

A secagem é um processo complicado envolvendo um problema de transferência de calor e massa simultâneos. O fenômeno ocorre quando um determinado produto com alto teor de umidade é colocado em contato com uma corrente de ar com alta temperatura e baixa umidade. O ar transfere a energia térmica necessária para sustentar o processo de evaporação da água no alimento até que uma condição de equilíbrio seja alcançada, interrompendo os processos de transferência de calor e de massa. O teor de umidade de equilíbrio no alimento é dependente de suas propriedades referente ao equilíbrio de sorção.

Na secagem convectiva de alimentos, os fenômenos relevantes no processo são: a difusão de massa dentro do sólido em direção a sua superfície, a vaporização e a transferência convectiva do vapor acumulado na superfície para a corrente de ar, transferência convectiva de calor do ar para a superfície e a transferência de calor condutiva no sólido. A Figura (1) ilustra o problema de secagem investigado. Um fruto de banana idealizado por um cilindro sólido de comprimento  $L$  e diâmetro  $D$  é submetido a um escoamento transversal de ar. Admitindo que as condições do ar de secagem são uniformes ao longo da superfície externa do cilindro e que o comprimento do cilindro é bem maior que o seu diâmetro, apenas os gradientes radiais de temperatura e de umidade são relevantes no processo de forma que os balanços de massa e energia em coordenadas axialmente simétricas são suficientes para descrição do fenômeno.

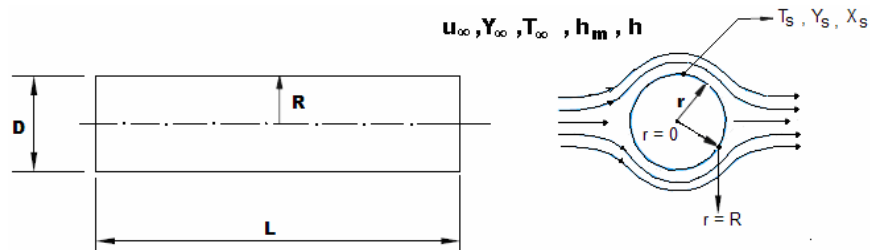


Figura 1. Geometria do problema abordado.

O problema abordado envolve a difusão de calor e massa na direção radial. Inicialmente, o sólido apresenta perfis de temperatura e de umidade uniformes. Para simplificar a modelagem do problema as seguintes hipóteses são consideradas: (1) Transferência de calor e massa na direção axial foi desprezada e condições axialmente simétricas foram empregadas nos balanços de massa e energia; (2) A difusividade térmica foi considerada dependente da temperatura; (3) O diâmetro do sólido permanece constante durante a secagem, ou seja, o efeito de retração do sólido não é considerado; (4) Com exceção da difusividade térmica todas as outras propriedades do material são consideradas constantes.

Nomenclatura		
$a_{ws}$	Atividade da água	<i>Adimensionais</i>
$C, C_0, \Delta H_C, K, K_0, \Delta H_K$	Parâmetros da isoterma GAB	Nu Número de Nusselt [Nu=h D/k]
$c_p$	Calor específico a pressão constante [J/kg K]	Re Número de Reynolds [Re=u D/v]
D	Diâmetro do sólido [m]	Pr Número de Pranttl [Pr=v/α]
$D_{ef}$	Coefficiente de difusão de massa [m <sup>2</sup> /s]	Sc Número de Shmidt [Sc=v/D <sub>ef</sub> ]
h	Coefficiente de transferência de calor [W/m <sup>2</sup> K]	Sh Número de Sherwood [h <sub>m</sub> D/D <sub>ef</sub> ]
$h_m$	Coefficiente de transferência de massa [m/s]	<i>Sobrescrito</i>
k	Condutividade térmica [W/m K]	* Relativo à última iteração
L	Comprimento do sólido [m]	<i>Subscritos</i>
p	Pressão atmosférica [Pa]	M Relativo à monocamada
$p_{sat}$	Pressão de saturação da água [Pa]	S Relativo à superfície do sólido
r	Coordenada radial [m]	∞ Relativo à condição do ar na corrente livre
R	Raio do sólido [m]	
$R_g$	Constante universal dos gases ideais [J/mol K]	
T	Temperatura [K]	
t	Tempo [s]	
u	Velocidade do ar [m/s]	
X	Teor de umidade [kg/kg em base seca]	
Y	Umidade absoluta do ar [kg/kg de ar seco]	
<i>Gregos</i>		
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar [kg/m <sup>3</sup> ]	
$\rho_b$	Massa específica da banana [kg/m <sup>3</sup> ]	
$\Delta H_S$	Calor latente de vaporização da água [J/kg]	

## 2.1. Transferência de massa

O problema de difusão de massa no sólido da Fig. (1) é descrito pela segunda lei de Fick da difusão, conforme a Eq. (1). As condições de contorno para a Eq.(1) são dadas pelas Eqs. (2) e (3). Na equação (2), a condição de simetria foi utilizada, enquanto a Eq. (3) representa o balanço de massa para a superfície do sólido, ou seja, o fluxo de massa difusivo que chega na superfície equilibra o fluxo convectivo que deixa a superfície. A condição inicial é dada pela Eq. (4) que denota a uniformidade inicial do perfil de umidade.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_{ef} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2)$$

$$-D_{ef} \rho_b \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R} = \rho_{ar} h_m (Y_s - Y_\infty) \quad (3)$$

$$X(r,0) = X_0 \quad (4)$$

onde o coeficiente de difusão de massa,  $D_{ef}$ , varia com a temperatura conforme a Eq.(5), descrita por Bains e Langrish (2007).

$$D_{ef} = 1,36 \times 10^{-7} \exp \left( -\frac{1610}{T} \right) \quad (5)$$

Na equação (3), a umidade absoluta do ar adjacente à superfície,  $Y_s$ , é função da atividade da água na superfície,  $a_{ws}$ , conforme a Eq. (6). A atividade da água na superfície,  $a_{ws}$ , por sua vez, está em equilíbrio com o sólido sendo função do teor de umidade do material e da temperatura na superfície ( $X_s, T_s$ ). Conforme descrito por Maroulis et al (1995), esta relação de equilíbrio pode ser expressa através da isoterma de adsorção GAB, dada pela Eq.(7).

$$Y_s = \frac{0,62198 a_{ws}}{\frac{P}{P_{sat}} - a_{ws}} \quad (6)$$

$$a_{ws} = \frac{2 + \left(\frac{X_M}{X_s} - 1\right)C - \sqrt{\left[2 + \left(\frac{X_M}{X_s} - 1\right)C\right]^2 - 4(1-C)}}{[2K(1-C)]} \quad (7)$$

onde

$$C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_C}{R_g T_s}\right) \quad (8)$$

$$K = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_K}{R_g T_s}\right) \quad (9)$$

Nas equações (8) e (9),  $C_0$ ,  $\Delta H_C$ ,  $K_0$ ,  $\Delta H_K$  são constantes conhecidas para um dado material e  $R_g$  denota a constante universal dos gases perfeitos se  $\Delta H_C$  e  $\Delta H_K$  são dados em J/mol.

## 2.2. Transferência de calor

O problema de difusão térmica no sólido da Fig.(1), por sua vez, é descrito pela equação da energia conforme a Eq.(10). As equações (11) e (12) formam as condições de contorno para a Eq.(10), enquanto a condição inicial é dada pela Eq.(13). Na equação (11), a condição de simetria foi empregada, enquanto a Eq. (12) representa o balanço de energia na superfície do sólido. O fluxo de calor convectivo que chega na superfície subtraído da energia térmica consumida na evaporação da água, equilibra o fluxo difusivo que o sólido recebe. A equação (13) denota a uniformidade inicial do campo de temperatura no sólido.

$$\rho_b c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (11)$$

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T_\infty - T_s) - \Delta H_s \rho_{ar} h_m (Y_s - Y_\infty) \quad (12)$$

$$T(r,0) = T_0 \quad (13)$$

## 2.3. Determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa

Para determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h$ , a correlação dada pela Eq.(14), descrita em Incropera e DeWitt (2002) foi utilizada. O coeficiente de transferência de massa,  $h_m$ , foi determinado através de analogia entre os processos de transferência de calor e massa.

$$Nu = 0.3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282.000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (14)$$

$$Sh = 0.3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Sc^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Sc)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282.000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (15)$$

### 3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

As equações (1) e (10) que descrevem os processos de transferência de calor e massa no sólido foram discretizadas através do método de volumes finitos (Patankar, 1980; Maliska, 2004). O esquema de diferenças centrais foi empregado na avaliação das propriedades e de seus gradientes nas faces de cada volume da malha computacional. As não-linearidades e acoplamentos entre as diferentes equações que constituem o modelo matemático do problema são tratados por linearização e iteração interna em um determinado passo de tempo, até que a convergência seja obtida. Para solução do sistema de equações lineares decorrente da aproximação numérica, o algoritmo TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm) descrito em Maliska (2004) foi utilizado. O acoplamento entre os processos de difusão de calor e massa é dado pelas Eqs. (3), (5) e (12). Observando as Eqs. (6-9) percebe-se que as condições de contorno dadas pelas Eqs. (3) e (12) são não-lineares, uma vez que  $Y_s$  é uma função não-linear de  $X_s$  e  $T_s$ . Para tratamento desta não-linearidade, o procedimento adotado foi de linearizar  $Y_s$ , na Eq.(3) com relação a  $X_s$ , de acordo com a aproximação dada pela Eq. (16), quando a Eq.(1) está sendo resolvida. Quando a Eq.(10) é o objeto de solução, na Eq.(12), lineariza-se  $Y_s$  com relação a  $T_s$ , de acordo com a aproximação dada pela Eq. (17).

$$Y_s = Y_s^* + \left. \frac{\partial Y_s}{\partial X_s} \right|_* (X_s - X_s^*) \quad (16)$$

$$Y_s = Y_s^* + \left. \frac{\partial Y_s}{\partial T_s} \right|_* (T_s - T_s^*) \quad (17)$$

O sobrescrito (\*) indica os valores disponíveis mais recentes da variável. O processo iterativo empregado para obtenção da solução numérica consistiu nos seguintes passos:

- 1) Fornecer os valores iniciais das variáveis, X e T.
- 2) Resolver a Eq.(1) para determinação da variável X.
- 3) Resolver a Eq.(10) para determinação da variável T.
- 4) Atualizar o coeficiente de difusão de massa dado pela Eq.(5).
- 5) Retornar ao passo (2) até que a convergência seja obtida para o nível de tempo corrente.
- 6) Avançar para o próximo nível de tempo.

O critério de convergência utilizado para interromper as iterações em cada passo de tempo é dado pela Eq. (18)

$$\left| \frac{X_P^{i+1} - X_P^i}{X_{\max} - X_{\min}} \right| \leq 1 \times 10^{-3} \quad (18)$$

onde  $|X_{\max} - X_{\min}|$  denota a máxima variação do teor umidade na i-ésima iteração. O processo iterativo em cada passo de tempo prossegue, até que a Eq.(18) seja satisfeita para todos os volumes da malha.

### 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A fim de testar o código computacional desenvolvido, um estudo da influência de três parâmetros operacionais importantes do ar no processo de secagem será investigado. Os parâmetros escolhidos são: temperatura, umidade relativa e vazão. Os resultados são ilustrados em termos das curvas de secagem do material que mostram como o teor médio de umidade varia com o tempo. Perfis de temperatura média ao longo do tempo também serão discutidos. Os valores médios das propriedades foram determinados a partir da Eq.(19).

$$\bar{\phi} = \frac{1}{R} \int_0^R \phi(r, t) dr \quad (19)$$

onde  $\bar{\phi}$  pode denotar o teor de umidade X ou a temperatura T conforme desejado. Anteriormente a discussão dos resultados, procede-se a validação numérica do código computacional.

#### 4.1. Validação numérica

Baini e Langrish (2007) realizaram um estudo teórico e experimental da cinética de secagem em bananas inteiras. Modelos empíricos e um modelo de difusão baseado na aplicação da segunda Lei de Fick foram usados nos estudos de determinação da cinética de secagem no produto. Cinco experimentos foram realizados envolvendo processos de

secagem contínua (temperatura de secagem constante) e secagem intermitente (temperatura de secagem variável). O objetivo principal dos autores foi testar a capacidade de descrição de cada modelo com relação às curvas de secagem obtidas experimentalmente para a secagem contínua e para a secagem intermitente. No primeiro e segundo experimentos, bananas maduras foram desidratadas continuamente por 72 h a uma temperatura de bulbo úmido de 40°C e temperaturas de bulbo seco de 60 e 80°C, respectivamente. No terceiro experimento, bananas maduras foram desidratadas intermitentemente por 72 h a uma temperatura de bulbo úmido de 40°C e temperatura de bulbo seco de 60°C. A fonte térmica responsável pelo aquecimento do ar de secagem permaneceu ativada por 8 h contínuas no período diurno. Nas 16 h restantes do dia a fonte térmica foi desativada para permitir a variação da temperatura do ar de secagem no secador. O mesmo padrão foi usado para as 48 h seguintes no processo de secagem. Bananas verdes e maduras foram desidratadas no quarto e quinto experimentos, respectivamente.

A fim de testar a confiabilidade do código desenvolvido, resultados numéricos do presente trabalho são comparados com àqueles obtidos no primeiro experimento realizado por Baini e Langrish (2007). A parte (a) da Fig. (2) mostra uma comparação entre os dados obtidos para a curva de secagem no produto. Pode-se observar uma concordância bastante razoável entre a curva de secagem obtida a partir da solução numérica e os resultados experimentais. Mesmo sem levar em conta o efeito de retração do produto durante a secagem, observa-se que o modelo proposto é capaz de descrever satisfatoriamente os processos de transferência de calor e massa na fruta. A parte (b) da Fig. (2), por sua vez, mostra uma comparação do teor de umidade da superfície da fruta obtido numericamente neste trabalho com aquele descrito em Baini e Langrish (2007). A exemplo da comparação anterior, observa-se razoável concordância entre os resultados numéricos. Observa-se ainda que a umidade do produto, na superfície externa, decresce rapidamente até a condição de equilíbrio, tendo em vista o seu contato direto com o ar de secagem. A Tabela (1) mostra os valores de dados e propriedades que foram utilizados na simulação numérica do processo de secagem.

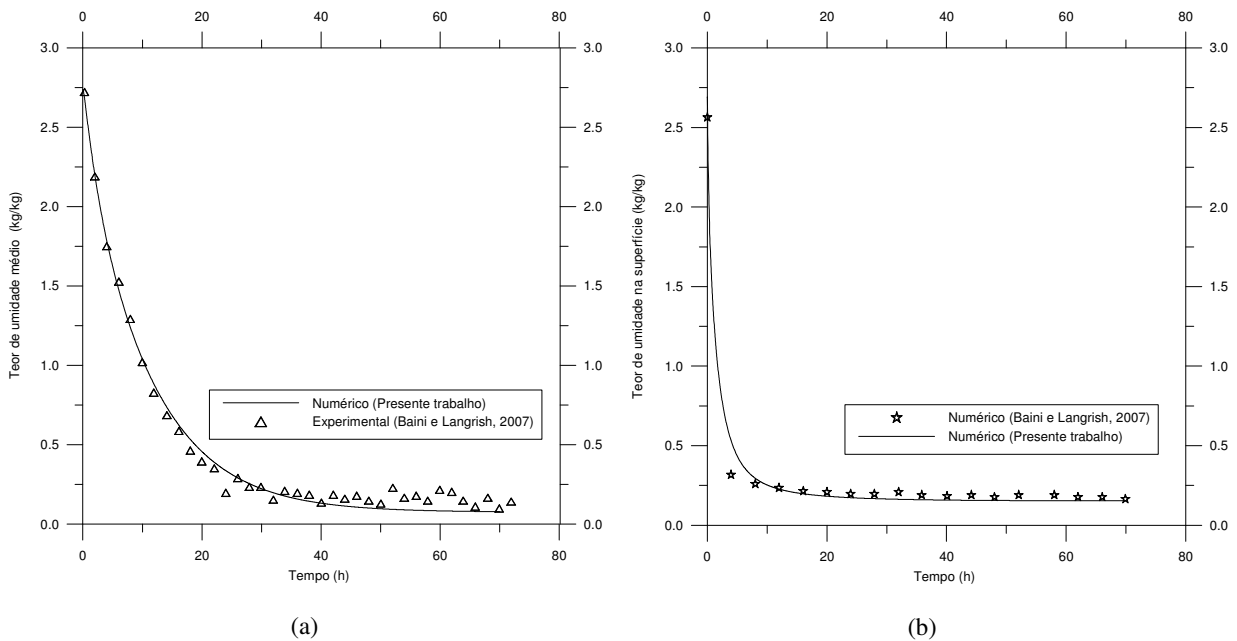


Figura 2. Comparação entre a solução numérica obtida e os resultados extraídos de Baini e Langrish (2007).

Tabela 1. Dados e propriedades usados nas simulações numéricas.

Comprimento do sólido (m)	$L=0,1$
Diâmetro do sólido (m)	$D=0,03$
Temperatura inicial (K)	$T_0=297,15$
Teor de umidade inicial (kg/kg)	$X_0=2,73$
Massa específica da banana ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_b=1000$
Massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_{ar}=1,17$
Calor específico da banana ( $\text{J/kg K}$ )	$C_p=3500$
Temperatura do ar de secagem (K)	$T_\infty=313,15; 323,15; 333,15; 343,15$
Condutividade térmica da banana ( $\text{W/m K}$ )	$k=0,5$
Calor de dessorção ( $\text{kJ/kg}$ )	$\Delta H_s=2400$
Velocidade do ar (m/s)	$u=0,25; 0,5; 1; 1,5; 2$
Umidade relativa do ar de secagem (%)	$\phi=30; 40; 50; 60; 70$

#### 4.2. Influência da temperatura do ar de secagem

Neste estudo de caso, a umidade relativa do ar foi admitida igual a 40 %, enquanto a velocidade assumida para o ar foi de 2 m/s. Quatro valores distintos foram assumidos para a temperatura do ar de secagem: 40, 50, 60 e 70°C. Conforme ilustra a Fig.(3), a elevação da temperatura de bulbo seco do ar proporciona tempos de secagem mais curtos. Isto ocorre em função da elevação na quantidade de energia térmica que o ar transfere para a superfície do produto. Este aumento de energia disponibilizado pelo ar favorece o processo de evaporação de umidade na superfície externa do sólido, de forma que a cinética de secagem ocorre de forma mais rápida. Entretanto, há a necessidade de limitação da temperatura de secagem tendo em vista a perda de conteúdo nutricional do produto e alterações de cor, sabor e textura. De forma geral, temperaturas acima de 70°C não são recomendadas no caso da secagem de banana.

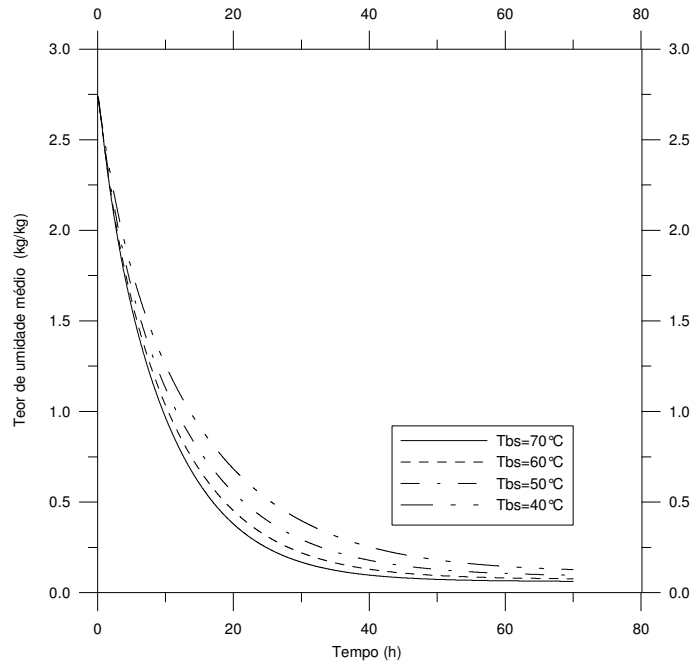


Figura 3. Influência da temperatura do ar na cinética de secagem.

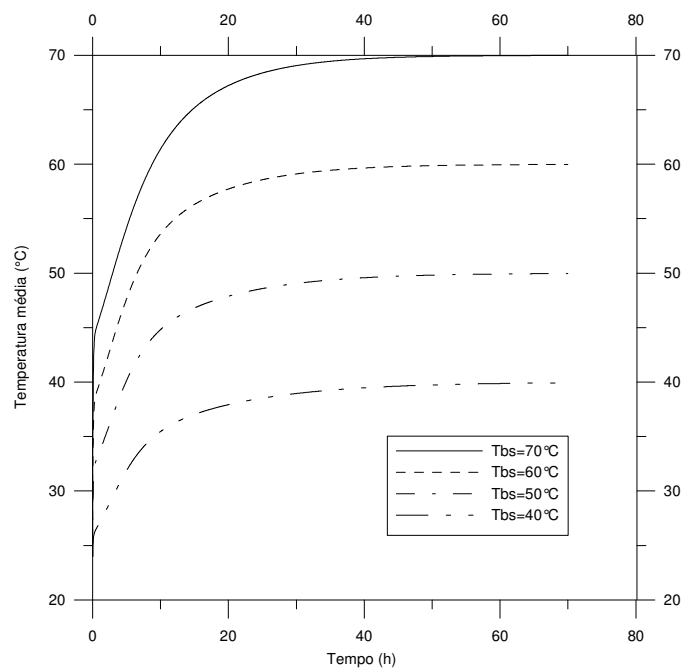


Figura 4. Perfis de temperatura média do sólido obtidos para diferentes temperaturas de secagem.

A Figura (4) mostra os perfis de temperatura média no sólido ao longo do tempo. Em todos os casos, observa-se um aumento brusco da temperatura média no início da secagem decorrente do alto gradiente de temperatura inicial registrado na superfície do sólido. Na medida em que temperatura do material aumenta, os gradientes térmicos diminuem e a temperatura do sólido eleva-se suavemente até atingir a condição de equilíbrio com o ar de secagem.

#### 4.3. Influência da umidade relativa do ar de secagem

Para este estudo de caso, admitimos que a temperatura de bulbo seco do ar de secagem foi mantida em 60°C e a velocidade do ar igual a 2 m/s. Quatro valores distintos foram selecionados para testar a influência da umidade relativa na cinética de secagem: 40, 50, 60 e 70%. Na Figura (5), observa-se que a redução na umidade relativa favorece a transferência de massa no alimento, de forma que os tempos de secagem são mais curtos. Isto ocorre devido ao fato de que a redução na umidade relativa, mantendo-se a temperatura de bulbo seco constante, causa uma redução na pressão parcial do vapor de água presente no ar, aumentando a força motriz para transferência de massa entre a superfície externa do produto e o ar de secagem.

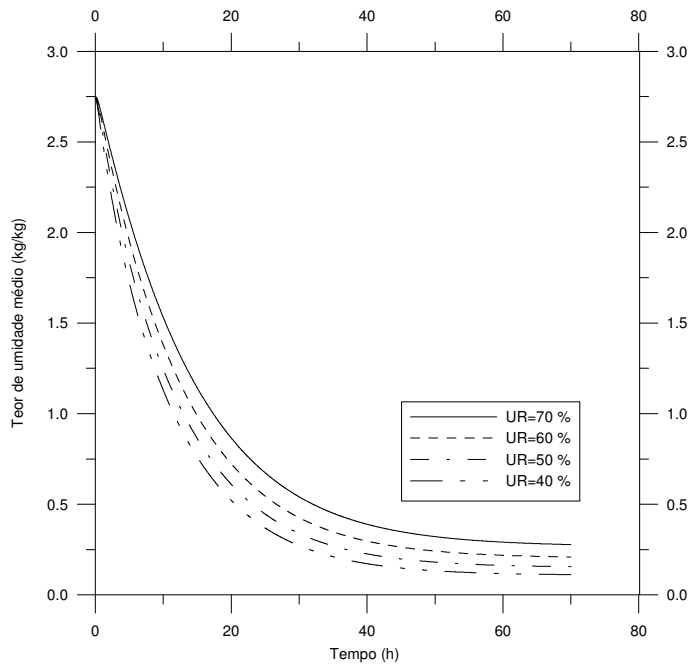


Figura 5. Influência da umidade relativa sobre a cinética de secagem.

#### 4.4. Influência da velocidade do ar de secagem

Nesse caso, admitimos que a temperatura de bulbo seco foi mantida em 70°C e a umidade relativa fixada em 30%. Quatro valores distintos de velocidade do ar foram considerados: 0,25, 0,50, 1,0 e 1,5 m/s. Na figura (6), observa-se que o aumento da vazão de ar reduz o tempo de secagem. O aumento da vazão de ar proporciona maiores coeficientes de transferência de massa na superfície do produto, intensificando o processo de evaporação de água. Entretanto, a elevação da velocidade de 1 para 1,5 m/s, não proporcionou redução significativa do tempo de secagem. Isto indica que velocidades em torno de 1m/s já proporcionam uma resistência à transferência de massa suficientemente baixa na superfície da fruta de forma que não existe ganho significativo com o aumento de velocidade acima de 1m/s. Um comportamento similar é observado na Fig. (7) em que o aumento de vazão reduz a resistência à transferência de calor na superfície, favorecendo a difusão de energia térmica no produto. De forma análoga ao problema de difusão de massa, não existem ganhos substanciais quando se eleva a velocidade acima de 1m/s, ou seja, o processo de difusão não é muito mais rápido quando uma velocidade de 1,5 m/s é considerada. Pode-se concluir então que existe uma vazão máxima de secagem que minimiza as resistências externas a transferência de calor e massa na superfície do alimento a um valor além do qual não há redução significativa no tempo de secagem. Tendo em vista a demanda de energia associada com a utilização de ventiladores no sistema de secagem, não seria interessante trabalhar com valores acima da vazão definida como ótima no processo.

### 5. CONCLUSÃO

Um código numérico baseado no método dos volumes finitos foi desenvolvido a fim de se estudar os processos simultâneos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a secagem de frutas. Um modelo matemático



representativo dos processos físicos relevantes na secagem de frutas foi apresentado. O efeito da difusividade mássica variável com a temperatura foi considerado na modelagem. Como aplicação do código numérico, a cinética de secagem em bananas foi selecionada como estudo de caso. Mesmo sem a consideração do efeito da retração do produto no modelo apresentado, observou-se que o código numérico reproduziu com razoável precisão os resultados disponíveis na literatura, indicando que o modelo pode descrever de forma bastante satisfatória os processos de difusão de calor e massa presentes na secagem de frutas. A influência de parâmetros operacionais importantes no processo de secagem tais como a umidade relativa, a temperatura de bulbo seco e a vazão aplicada foram investigadas. Os resultados numéricos obtidos mostraram que a redução na umidade relativa do ar de secagem, a elevação da temperatura de bulbo seco e o aumento da vazão favorecem a transferência de massa na fruta, reduzindo os tempos de secagem. Foi observado ainda, que existe um valor ótimo a ser considerado para a vazão aplicada, além do qual não existem ganhos substanciais em termos de redução do tempo de secagem.

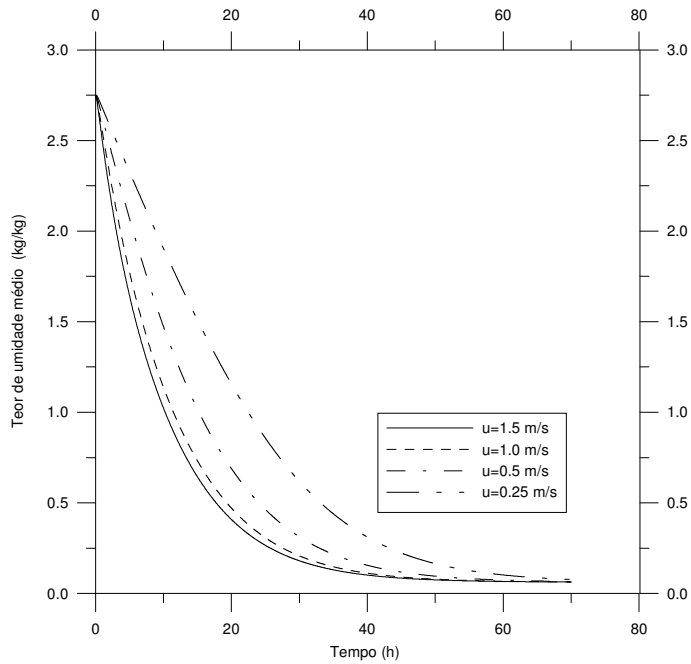


Figura 6. Influência da vazão de ar sobre a cinética de secagem.

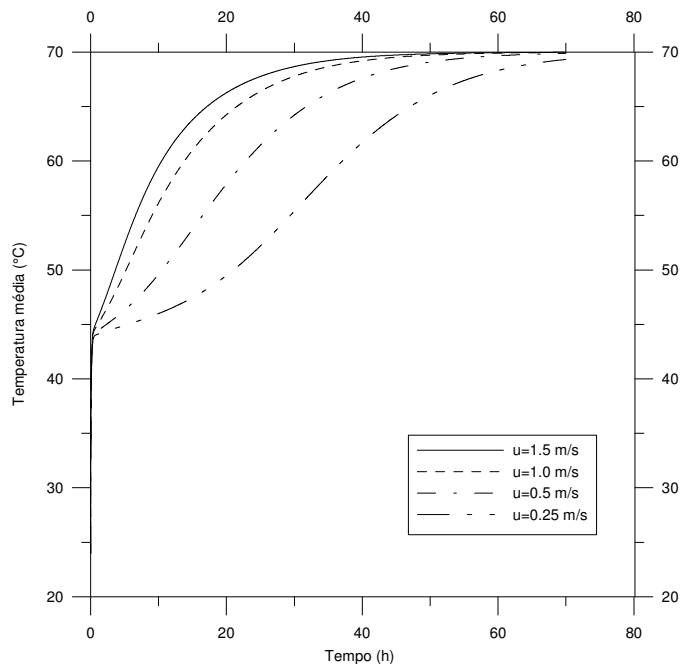


Figura 7. Influência da vazão de ar de secagem sobre a difusão de calor na fruta.

## 6. REFERÊNCIAS

- Baini, R. and Langrish, T. A. G., 2007, "Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas", Journal of Food Engineering, Vol. 79, pp. 330-343.
- Drouzas A. E. and Schubert, H., 1996, "Microwave application in vacuum drying of fruits", Journal of Food Engineering, Vol. 28, pp. 203-209.
- Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2002, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Fifth Edition, John Wiley & Sons.
- Karim, M. A. and Hawlader, M. N. A., 2005, "Drying characteristics: Theoretical modeling and experimental validation", Journal of Food Engineering, Vol. 70, n. 4, pp. 35-40.
- Kiranoudis, C. T., Tsami, E., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D., 1997, "Drying kinetics of some fruits", Drying technology, Vol.15, pp. 1399-1418.
- Lima, A. G. B., Queiroz, M. R., Nebra, S. A., 2002, "Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying solids ellipsoidal configuration", Chemical Engineering Journal, Vol. 86, pp. 83-85.
- Maroulis, Z. B., Kiranoudis, C. T., Marinos-Kouris, D., 1995, "Heat and Mass Transfer Modeling in air Drying of Foods", Journal of Food Engineering, Vol. 26, pp. 113-130.
- Murthy, M. V. R., 2009, "A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 835-844.
- Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation.
- Maliska, C. R., 2004, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", Segunda Edição, Editora LTC.
- Prasertan, S. and Saen-Sabv, P., 1998, "Heat pump drying of agricultural materials", Drying technology, Vol. 16, pp. 235-250.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjana, K., 1997, "Mass transfer during osmotic dehydration of banana", Journal of Food Engineering, Vol. 31, pp. 423-432.
- Schirmer, P., Janjai, S., Esper, A., Smitabhindu, R., Muhlhbauer, W., 1996, "Experimental of investigation of the performance of the solar tunnel drying of bananas", Renewable Energy, Vol. 7, pp. 119-129.
- Tuerner, I. and Majumdar, S., 1997, "Mathematical modelling and numerical techniques in drying technology", New York: Marcel Dekker.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## NUMERICAL STUDY OF THE DRYING KINETICS IN BANANAS

Jailson Charles dos Santos, [jsurca@yahoo.com.br](mailto:jsurca@yahoo.com.br)<sup>1</sup>

Rodolfo de Sousa Santos, [rodolfosousa3@hotmail.com](mailto:rodolfosousa3@hotmail.com)<sup>1</sup>

Glauco Demóclito Tavares de Barros, [glauco.professor@hotmail.com](mailto:glauco.professor@hotmail.com)<sup>2</sup>

Jacques César dos Santos, [jacquesles@yahoo.com.br](mailto:jacquesles@yahoo.com.br)<sup>3</sup>

José Maurício Gurgel, [jm.gurgel@uol.com.br](mailto:jm.gurgel@uol.com.br)<sup>3</sup>

Francisco Marcondes, [marcondes@ufc.br](mailto:marcondes@ufc.br)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Regional University of Cariri, Department of Mechanical Production Engineering, Av. Leão Sampaio, Nº 107, Triângulo, Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil, CEP 63040-000, Campus Crajubar.

<sup>2</sup>Federal Institute of Education, Science and Technology, Av. Plácido Aderaldo Castelo, Nº 1646, Planalto, Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil.

<sup>3</sup>Federal University of Paraíba, Campus I, Laboratory of Solar Energy, Cidade Universitária, João Pessoa, Paraíba, Brazil, CEP 58090-900

<sup>4</sup>Federal University of Ceara, Department of Metallurgical and Material Science, Campus do Pici, Bloco 714, Fortaleza, Ceará, Brazil, CEP 60455-760.

**Abstract.** *The present work shows a numerical approach for the heat and mass transfer problem relative at the banana drying. A representative mathematical model of the drying kinetics in the product was presented and a numerical code based on the finite volume method was developed to solve the system of equations that describes the drying process in the food. Variable mass diffusivity with the temperature was considered in the mathematical modeling of the process. A quite reasonable agreement was verified comparing the numerical results obtained with extracted results of the literature. The influence of the important operational parameters to the process such as temperature, relative humidity and air flow rate were investigated. The numerical results showed that the increase in the temperature, the increase air flow rate and a reduction in the humidity increases the mass transfer in the food, reducing the drying time.*

**Keywords:** *Drying kinetics, Banana, Finite Volume.*