

PROBLEMA INVERSO PARA ESTIMAR PROPRIEDADES TÉRMICAS DE BANANAS DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM

Viviana Cocco Mariani

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 81215-901, Curitiba, PR
viviana.mariani@pucpr.br

Leandro dos Santos Coelho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEPS
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 81215-901, Curitiba, PR
leandro.coelho@pucpr.br

Resumo. Neste trabalho, o método de Evolução Diferencial é usado para estimar a difusividade térmica, variável com a temperatura, da banana (durante o processo de secagem), resolvendo assim o problema inverso de transferência de calor por condução. Na modelagem numérica dos fenômenos de secagem por simplificação, as propriedades físicas geralmente permanecem constantes. Entretanto, muitas vezes, os resultados numéricos quando comparados com os resultados experimentais são insatisfatórios. Outras vezes estas propriedades são apresentadas como função da umidade exigindo o cálculo de outra equação diferencial para a obtenção destas propriedades. Assim, no presente trabalho optou-se pela análise e uso de problemas inversos para estimar a difusividade térmica da banana variável com a temperatura durante o processo de secagem. Os resultados experimentais da secagem foram obtidos da literatura e as estimativas para a difusividade térmica fornecidas pelo método de otimização têm uma excelente concordância com os resultados experimentais. Tal abordagem é vantajosa pelo fato de não necessitar da solução da equação da conservação da massa para obter a difusividade térmica assim como apenas o modelo unidimensional foi utilizado para resolver a transferência de calor através da metodologia de Diferenças Finitas.

Palavras chave: Evolução diferencial, difusividade térmica, processo de secagem, problema inverso de condução de calor

1. Introdução

O interesse dos problemas de condução de calor diretos é a estimação do campo de temperaturas no interior do corpo, conhecida as condições de contorno e inicial, as propriedades termofísicas e as taxas de geração de calor. Diferentemente, problemas inversos requerem a determinação das temperaturas na superfície, taxas de fonte de geração de calor e propriedades termofísicas, utilizando temperaturas medidas no interior do corpo. De acordo com Engl *et al.*, (1996): *Resolver um problema inverso é determinar causas desconhecidas a partir de efeitos desejados ou observados.* A partir desta definição pode-se inferir como causas as condições iniciais, condições de contorno, termo de fontes ou sumidouros e as propriedades do material, enquanto efeitos são as propriedades calculadas através da solução direta de um modelo matemático como campos de temperatura, corrente elétrica, entre outros. Deste modo o tipo de causa a ser determinado pelo problema inverso é usado para classificá-lo.

No presente trabalho a causa (na definição do problema inverso) são as propriedades térmicas da fruta (banana), ou seja, deseja-se estimar parâmetros, em específico estimar a difusividade térmica, α , da banana durante o processo de secagem. A difusividade térmica é a propriedade de transporte que controla o processo de transferência de calor por condução em regime transiente. Durante o processo de secagem da banana tal propriedade é variável com a temperatura.

Recentemente tem se observado um crescente interesse na análise e solução de problemas inversos de transferência de calor. Em muitos trabalhos da literatura, envolvendo problemas inversos, os métodos determinísticos (baseados em gradientes) são usados para minimizar a função objetivo (Carvalho e Silva Neto, 1999; Khachf e Jarny, 2002). Tais métodos podem obter um mínimo local e não global, contudo a principal vantagem é a boa taxa de convergência.

Porém novas metodologias estão sendo utilizadas na solução dos problemas inversos, em especial são citados os métodos estocásticos, fornecendo geralmente um ótimo global, porém geralmente o tempo computacional é maior que o obtido com os métodos determinísticos (Wood, 1996; Suram *et al.*, 2005). Outras técnicas, baseadas em inteligência artificial, tais como algoritmos genéticos e redes neurais artificiais têm sido utilizadas para a solução de problemas inversos (Raudenský *et al.*, 1995; Mikki *et al.*, 1999; Ayhan *et al.*, 2004; Sablani *et al.*, 2004; Soeiro *et al.*, 2004).

Existem outros trabalhos que usam uma combinação de métodos determinísticos e estocásticos, onde os métodos estocásticos são usados para fornecer uma estimativa melhorada para os métodos determinísticos (Sila Neto e Soeiro, 2003). No presente trabalho adota-se o método de Evolução Diferencial para obtenção da difusividade térmica variável com a temperatura. A Evolução Diferencial é um paradigma da computação evolutiva (ou evolucionária) desenvolvido

por Rainer Storn e Kenneth Price (Storn e Price, 1995; Storn, 1997) para problemas de otimização não-linear contínua. Basicamente, a ED realiza mutações nos vetores pela adição ponderada de diferenças aleatórias entre eles.

O objetivo deste trabalho é apresentar um procedimento simples para estimar a difusividade térmica (dependente da temperatura) a partir de um campo de temperatura numérico/experimental usando o método de Evolução Diferencial.

O problema considerado neste trabalho tem relevância em operações de processamento de alimentos tal como: a análise transiente da transferência de calor durante a secagem, resfriamento ou congelamento de frutas e vegetais em sistemas contínuos, as quais requerem o conhecimento das propriedades térmicas dos produtos.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. Na próxima seção são descritas as simplificações adotadas para resolver o problema de transferência de calor por condução, os 6 testes de secagem investigados e a solução numérica obtida utilizando a difusividade térmica constante, contudo tal solução é insatisfatória mostrando que a difusividade térmica apresenta variação com a temperatura. Assim, na seção 3 apresenta-se o problema inverso para estimar a difusividade térmica variável e o método de otimização utilizado. Na quarta seção os principais resultados numéricos obtidos na realização deste trabalho são expostos, mostrando uma boa concordância com os resultados experimentais. A última seção é destinada as principais conclusões e os trabalhos futuros.

2. Modelagem Matemática

O modelo de transferência de calor por condução foi desenvolvido explorando os mecanismos de transferência de calor no interior da fruta e em sua superfície durante a secagem. Para descrever o modelo matemático as seguintes hipóteses foram consideradas:

- (i) a condução ou difusão de calor é o mecanismo controlador;
- (ii) a banana é representada pela forma geométrica de um cilindro infinito com comprimento $L[m]$ e raio $R[m]$ definido entre $[0; R]$, onde $R \ll L$, assim a transferência de calor longitudinal é desprezada e a simetria axial é considerada;
- (iii) a temperatura na superfície está em equilíbrio com a temperatura do ar de secagem e é igual à temperatura de bulbo seco do ar;
- (iv) o coeficiente de difusividade térmica em um primeiro momento é considerado constante e homogêneo durante o período de secagem, após este coeficiente é considerado variável com a temperatura.
- (v) a banana é considerada homogênea;
- (vi) o encolhimento durante a secagem é considerado desprezível.

Através da lei de Fourier, a equação diferencial parcial é obtida fazendo um balanço de calor sobre uma região (volume elementar) da banana, a forma desta região depende do sistema de coordenadas adotado. Assim, o problema de condução de calor não linear, em coordenadas cilíndricas, sem geração interna de calor, considerando primeiramente a condutividade térmica, o calor específico e a densidade constantes, após considerando a difusividade térmica variável com a temperatura ou variável com o tempo, pode ser descrito em um domínio espacial unidimensional como,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

onde $\alpha (= k/\rho c_p \text{ m}^2/\text{s})$ é a difusividade térmica da banana, $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$ é a densidade da banana, $c_p \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}$ é o calor específico da banana, $k \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$ é a condutividade térmica da banana, $T \text{ (}^\circ\text{C)}$ é a temperatura no interior da banana e $t \text{ (s)}$ é o tempo.

No presente trabalho é considerada uma geometria unidimensional no sistema cilíndrico de coordenadas, conforme ilustrado na Fig. 1, onde a condição inicial associada a Eq. (1) é:

$$T(r, t) = T_0 \quad \text{em } t = t_0, r \in [0, R] \quad (2)$$

onde $T_0 \text{ (}^\circ\text{C)}$ é a temperatura conhecida no tempo inicial obtida geralmente através de dados experimentais, $t_0 \text{ (s)}$ é o tempo inicial e $R \text{ (m)}$ é o raio da banana.

Na superfície da banana ($r = R$) a condição de contorno de temperatura fixa é considerada

$$T(r, t) = T_e \quad \text{em } r = R; t \geq 0 \quad (3)$$

onde $T_e \text{ (}^\circ\text{C)}$ é a temperatura de bulbo seco, isto é, é a temperatura de secagem. Considerou-se no centro da banana a condição de simetria ou fluxo de calor nulo,

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{em } r = 0, t \geq 0 \quad (4)$$

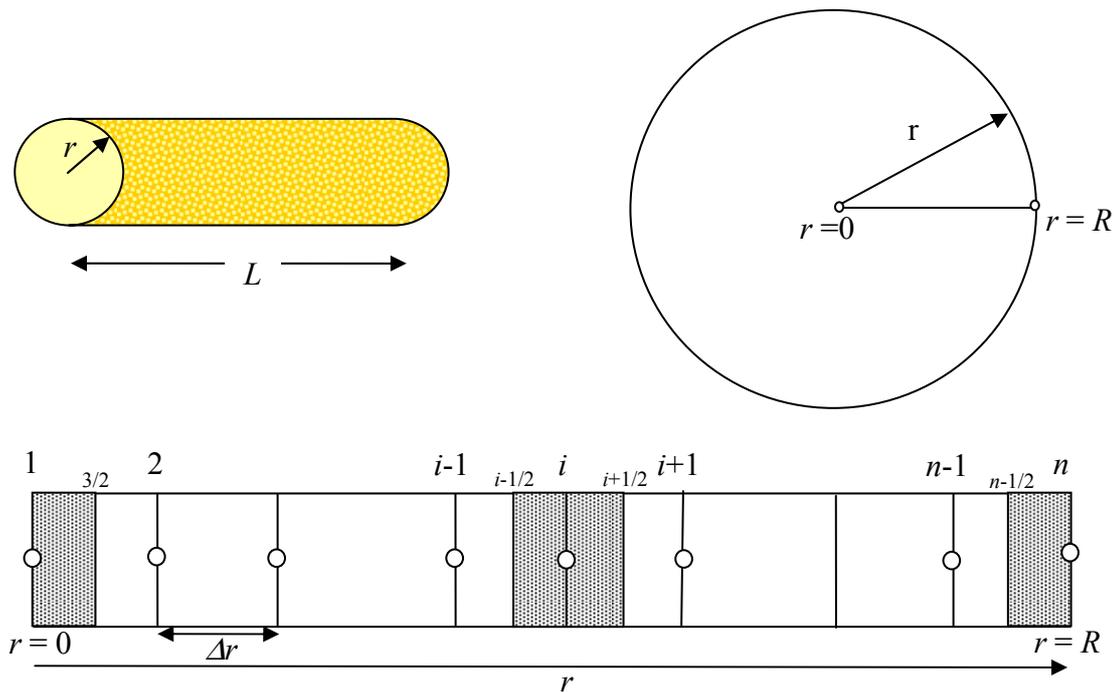


Figura 1 - Representação radial da banana.

Os resultados experimentais utilizados no presente trabalho foram obtidos de Pérez (1998). Naquele trabalho são apresentados resultados para 6 testes de secagem em diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar. A Tab. 1 apresenta alguns dados e características do ar e da banana, sob os quais foram realizados os testes, e são utilizados no presente trabalho.

Tabela 1. Características do ar e da banana nos testes de secagem.

Teste	T_e (°C)	R (m)	Tempo (h)
1	29,9	0,01613	121,85
2	39,9	0,01569	74,3
3	49,9	0,01522	40,8
4	60,2	0,01530	35,3
5	60,5	0,01506	27,8
6	68,4	0,01545	25,13

As Eqs. (1) a (4) são resolvidas no presente trabalho pelo método de Diferenças Finitas explícito. Observa-se na Eq. (1) que a difusividade térmica permanece constante por todo o processo de secagem. Esta é uma simplificação comum nas modelagens de muitos meios isotrópicos, cujas propriedades físicas permanecem quase constantes em determinados valores de temperaturas. Com esta suposição, Pérez (1998) obteve resultados insatisfatórios principalmente no início do processo de secagem, em que os valores calculados pelo modelo numérico diferiram dos valores obtidos experimentalmente, o mesmo ocorreu neste trabalho, cuja Fig. 2 apresenta tal situação para o teste 6 usando o coeficiente de difusão constante ($\alpha = 1,429 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$).

A Fig. 2 indica a incapacidade do modelo unidimensional de aproximar-se dos resultados experimentais, principalmente no início do processo de secagem. Em todos os testes observou-se o mesmo comportamento, ou seja, ocorreram desvios entre a curva experimental e numérica, indicando a necessidade de modificar o modelo atual utilizado ou acrescentar outros efeitos. No trabalho de Pérez adotou-se duas alternativas (i) utilizou uma geometria finita juntamente com o método de elementos finitos de segunda ordem combinado com Crank-Nicolson, variando a difusividade térmica com a temperatura e (ii) cilindro infinito e difusividade térmica variável com a temperatura da banana.

A primeira abordagem (mais sofisticada) apresentou resultados adequados, já na segunda abordagem os resultados mostraram um comportamento similar ao primeiro modelo investigado naquele e neste trabalho, e os resultados numéricos obtidos com a segunda abordagem não foram apresentados naquele trabalho.

Com vista nos resultados obtidos em Pérez (1998) no presente trabalho optou-se pelo uso da geometria unidimensional infinita e o método das diferenças finitas explícita, enfocando o problema inverso de transferência de calor por condução, para obter o coeficiente de difusão de calor variável com a temperatura.

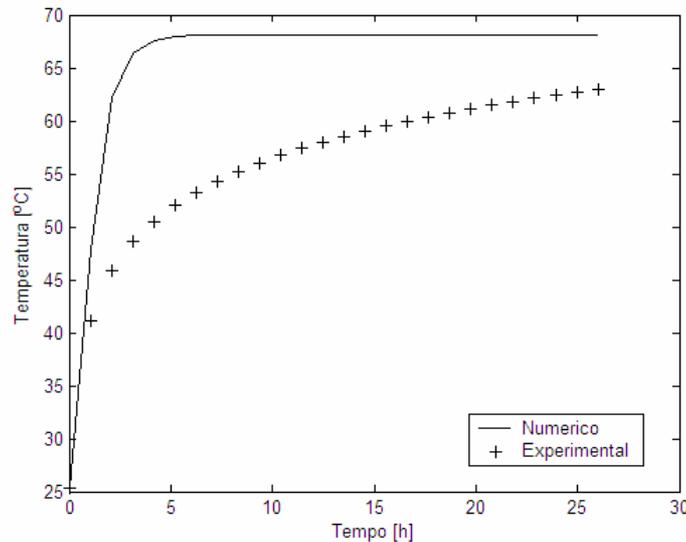


Figura 2 - Cinética de temperatura no centro da banana para o teste 6 com α constante.

3. Problema Inverso

Quando a geometria, as propriedades físicas da fruta, as condições de contorno e inicial são conhecidas as Eqs. (1) a (4) podem ser resolvidas, determinando-se, então a distribuição transiente de temperaturas na fruta. Um problema deste tipo é chamado direto. Se alguma destas grandezas, ou uma combinação das mesmas, não é conhecida, contudo dados experimentais da temperatura medida no interior e/ou contorno da fruta estão disponíveis, tem-se um problema inverso, o qual permite a determinação das grandezas desconhecidas, desde que estes dados contenham informação suficiente (Silva Neto e Moura Neto, 2005).

O interesse do presente trabalho é estimar o coeficiente de difusão de calor, α , representado por um vetor α_i para $i=1, \dots, 4$; usando dados experimentais da temperatura adquirida no centro da banana durante um intervalo de tempo.

Neste trabalho são $M = 4$ os parâmetros estimados e como o número de dados medidos experimentalmente é superior então o problema é resolvido por um método de otimização dimensional finito em que se pretende minimizar a função objetivo,

$$f = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (T_k(\vec{\alpha}) - T_{exp,k})^2 \tag{5}$$

onde $T_1^{i+1} = [(1-F)T_1^i + FT_2^i + FT_2^{i+1}](1+F)$ é a temperatura calculada numericamente através do método de diferenças finitas explícito no centro da banana, enquanto $F (= \alpha\Delta t/\Delta r^2)$ é o número de Fourier e T_{exp} é a temperatura experimental obtida no centro da banana durante todo o processo de secagem. O índice k representa a discretização do intervalo de tempo em que as temperaturas experimentais são medidas. A variável α é limitada por $[10^{-10}; 10^{-7}]$. O número de parâmetros ($M = 4$) foi escolhido após a realização de diversos experimentos numéricos aumentando-se gradativamente o número de parâmetros. O uso de 4 parâmetros mostrou-se adequado prevendo o comportamento experimental. A análise de sensibilidade dos coeficientes não foi feita neste trabalho, contudo deve ser feita em uma futura pesquisa.

Na maioria das técnicas desenvolvidas para resolver problemas inversos é necessário que o modelo numérico seja capaz de solucionar o problema direto com valores arbitrados para as grandezas que se deseja determinar. Como, geralmente, os procedimentos para solução são iterativos, o problema direto terá de ser resolvido várias vezes. Assim, é desejável que se tenha um método para a solução do problema direto que seja preciso e que demande um tempo computacional relativamente pequeno (Silva Neto e Moura Neto, 2005). No presente trabalho a metodologia de diferenças finitas explícita será utilizada e o sistema de equações lineares será resolvido através da decomposição LU.

4. Método de Otimização

A Evolução Diferencial (ED) é um paradigma da computação evolutiva e, basicamente, realiza mutações nos vetores pela adição ponderada de diferenças aleatórias entre eles. A escolha da ED para problemas de otimização é baseada nas características de que a ED:

- é um algoritmo de busca estocástica que é motivado pelos mecanismos de seleção natural;
- é menos susceptível a mínimos (ou máximos) locais, pois busca a solução ótima global pela manipulação de uma população de soluções candidatas, ou seja, busca um número de diferentes áreas simultaneamente no espaço de busca;
- não requer informação de derivadas para o cálculo da função de aptidão;
- manipula diretamente os números de ponto flutuante (fenótipo), diferente dos algoritmos genéticos canônicos ou binários que manipulam cadeias de bits (genótipo), o que diminui o custo computacional necessário para transformação de uma representação genotípica em fenotípica;
- geralmente não necessita de populações grandes para funcionar eficientemente.

Na ED clássica, cada variável (indivíduo) é representada por um valor real (ponto flutuante). A variante implementada neste trabalho foi a ED/rand/1/bin, que é regida pelas seguintes etapas:

Etapa 1: *Iniciar os parâmetros de controle da evolução diferencial*: O projetista deve escolher os parâmetros de controle da ED, tais como tamanho da população (M), limites (máximos e mínimos) das variáveis de otimização, taxa de mutação ($f_m(t)$), taxa de cruzamento (CR) e o critério de parada do procedimento de otimização.

Os parâmetros do algoritmo ED são sensíveis no processo de minimização contudo uma análise de sensibilidade de tais parâmetros não foi executada neste trabalho, por não ser este o objetivo principal do mesmo.

Etapa 2: *Iniciar o contador de gerações*: Atribuir geração inicial, $t=1$.

Etapa 3: *Iniciar a população inicial de indivíduos (soluções)*: Gerar uma população inicial aleatória, com distribuição uniforme, de soluções factíveis à resolução do problema em questão, onde as regras de “reparo” garantem que os valores atribuídos as variáveis estão intrnas as fronteiras delimitadas pelo projetista. No presente trabalho utilizou-se 8 indivíduos da população.

Etapa 4: *Avaliar os indivíduos da população*: Avaliar a função objetivo (custo) de cada um dos indivíduos da população.

Etapa 5: *Aplicar a operação de mutação (ou operação diferença)*: A mutação é uma operação que adiciona um vetor diferencial para o vetor dos indivíduos da população, de acordo com a equação:

$$z_i(t+1) = x_{i,r_1}(t) + f_m(t)[x_{i,r_2}(t) - x_{i,r_3}(t)] \quad (6)$$

onde $i=1,2,\dots,M$ é o índice do indivíduo da população; $j=1,2,\dots,n$ é a posição do indivíduo em um espaço n -dimensional; t é a geração (tempo); $x_i(t) = [x_{i_1}(t), x_{i_2}(t), \dots, x_{i_n}(t)]^T$ consiste da posição do i -ésimo indivíduo de uma população de M vetores n -dimensional; $z_i(t) = [z_{i_1}(t), z_{i_2}(t), \dots, z_{i_n}(t)]^T$ é responsável pela posição do i -ésimo indivíduo de um vetor que sofrerá mutação; r_1, r_2 e r_3 são valores inteiros mutuamente diferentes, selecionados aleatoriamente com distribuição uniforme do conjunto $\{1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N\}$; $f_m(t) > 0$ é um parâmetro real denominado de taxa de mutação, que controla a amplificação da diferença entre os dois indivíduos de índices r_2 e r_3 para evitar a estagnação da busca e é usualmente projetado com valores no intervalo $[0,4; 1,0]$.

Etapa 6: *Aplicar a operação de cruzamento*: Após a operação de mutação, o cruzamento (ou recombinação) é aplicado a população. O cruzamento é empregado para gerar um novo vetor tentativa ou vetor doador (*trial vector*) pela substituição de certos parâmetros do vetor destino (*target vector*) pelos seus parâmetros correspondentes ao vetor doador, estes gerados aleatoriamente.

Nesta operação, para cada vetor, $z_i(t+1)$, um índice $rnbr(i) \in \{1, 2, \dots, n\}$ é escolhido aleatoriamente usando uma função densidade de probabilidade uniforme, e um vetor denominado de vetor tentativa, $u_i(t+1) = [u_{i_1}(t+1), u_{i_2}(t+1), \dots, u_{i_n}(t+1)]^T$. Neste caso é gerado um novo vetor tal que,

$$u_{i_j}(t+1) = \begin{cases} z_{i_j}(t+1), & \text{se } (randb(j) \leq CR) \text{ ou } (j = rnbr(i)), \\ x_{i_j}(t), & \text{se } (randb(j) > CR) \text{ ou } (j \neq rnbr(i)) \end{cases} \quad (7)$$

onde $randb(j)$ é a j -ésima avaliação da geração de um número aleatório com distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$; e CR é a taxa de cruzamento (ou recombinação) no intervalo $[0, 1]$. Geralmente, o desempenho do algoritmo de ED depende do projeto de três variáveis: o tamanho da população, M , a taxa de mutação, $f_m(t)$, e a taxa de cruzamento, CR .

Etapa 7: *Aplicar a operação de seleção*: A seleção é um procedimento em que os “melhores” descendentes (indivíduos filhos) são produzidos. Para decidir se o vetor $u_i(t+1)$ será (ou não) um membro da população na próxima geração, ele é comparado com o vetor $x_i(t)$. Assim considerando que F denota a função objetivo sob minimização, então:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} u_i(t+1), & \text{if } F(u_i(t+1)) < F(x_i(t)), \\ x_i(t), & \text{outros} \end{cases} \quad (8)$$

Neste caso, o custo de cada vetor tentativa $u_i(t+1)$ é comparado com seu vetor destino $x_i(t)$. Se o custo, F , do vetor destino $x_i(t)$ é tem valor menor que o custo do vetor tentativa, é permitido ao vetor destino continuar na próxima geração. Caso contrário, o vetor destino é substituído pelo vetor tentativa na próxima geração.

Etapa 8: *Verificar se o critério de parada foi atendido*: Atribuir à geração $t = t + 1$. Retornar para a Etapa 4 até que o critério de parada seja atendido, usualmente o número de gerações, t_{max} .

5. Resultados e Discussões

Para a caracterização da variação da difusividade térmica com a temperatura algumas análises preliminares foram feitas, onde constatou-se que por a temperatura ser variável com o tempo então a difusividade durante o processo de secagem é variável com o tempo. Assim, os resultados obtidos numericamente utilizando o método de Evolução Diferencial com 300 iterações são indicados na Tabela 2 para cada intervalo de tempo e todos os testes. As figuras 3 a 8 ilustram o comportamento numérico e experimental para cada teste onde se nota a excelente concordância obtida entre os valores numéricos obtidos pelo problema inverso e os resultados experimentais disponíveis em Pérez (1998).

Observando os valores dispostos na Tab. 2 é possível verificar que a variação da difusividade térmica para um mesmo intervalo de tempo (ou seja um intervalo específico de temperatura) não varia acentuadamente de um teste para o outro. Com vistas nesta observação calculou-se a média deste coeficiente em cada intervalo de tempo obtendo $\alpha_1 = 9,49804 \cdot 10^{-9}$, $\alpha_2 = 1,857415 \cdot 10^{-9}$, $\alpha_3 = 9,176283 \cdot 10^{-10}$ e $\alpha_4 = 4,571483 \cdot 10^{-10}$ e os resultados dos perfis de cinética de temperatura no centro da banana, para todos os testes de secagem, usando esta difusividade são ilustrados na figura 9, onde percebe-se que a difusividade média variável consegue prever com relativa precisão os resultados obtidos experimentalmente, exceto os testes 5 e 6 que apresentam um desvio maior.

A evolução diferencial foi pouco afetada pelo número reduzido de parâmetros testados.

Tabela 2. Difusividade térmica variável ao longo do processo de secagem.

Tempo (h)	$t \leq 1$	$1 < t \leq 3$	$3 < t \leq 8$	$t > 8$
Teste	$\alpha_1 \cdot 10^8$	$\alpha_2 \cdot 10^8$	$\alpha_3 \cdot 10^8$	$\alpha_4 \cdot 10^8$
1	0,698108	0,180429	0,096375	0,026047
2	0,912378	0,181264	0,091087	0,038398
3	1,063360	0,178066	0,087470	0,045389
4	0,953818	0,173195	0,083225	0,039904
5	0,982839	0,197417	0,094497	0,061569
6	1,088321	0,204078	0,097923	0,062982

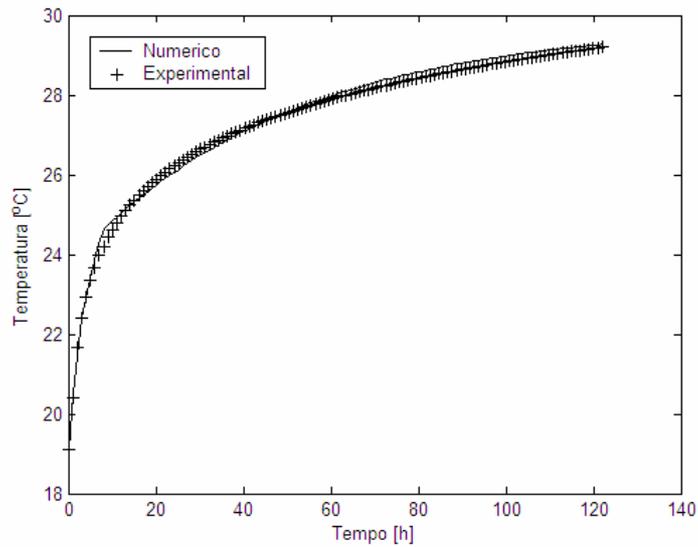


Figura 3 - Perfil de temperatura no centro da banana para o teste 1 com α variável.

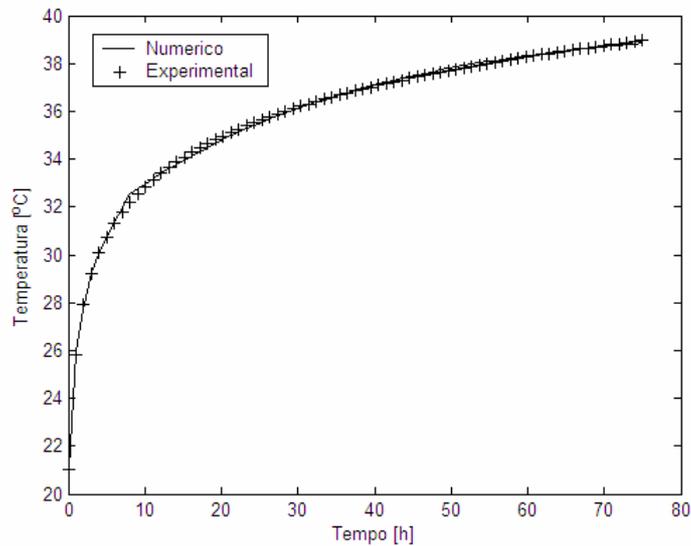


Figura 4 - Perfil de temperatura no centro da banana para o teste 2 com α variável.

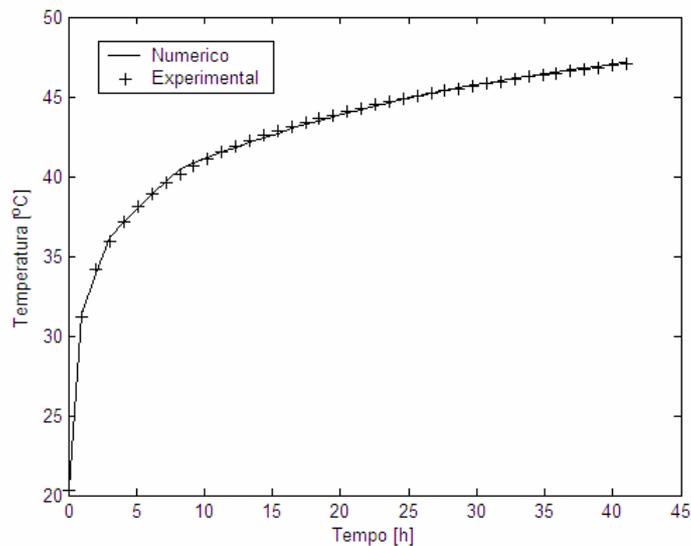


Figura 5 - Perfil de temperatura no centro da banana para o teste 3 com α variável.

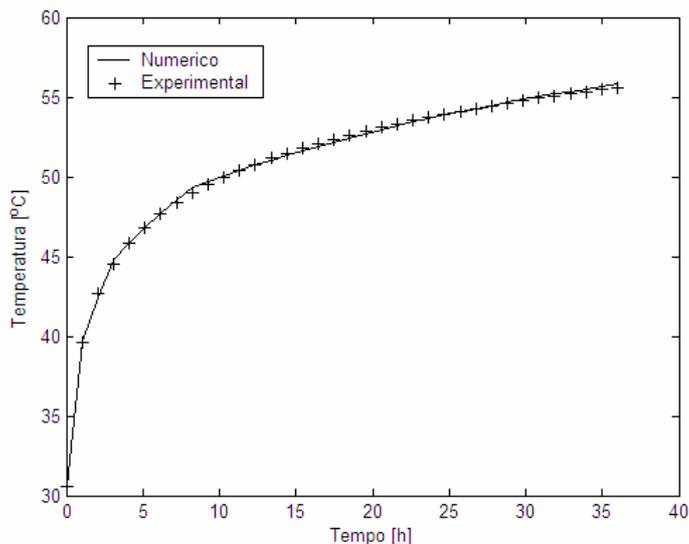


Figura 6 – Perfil de temperatura no centro da banana para o teste 4 com α variável.

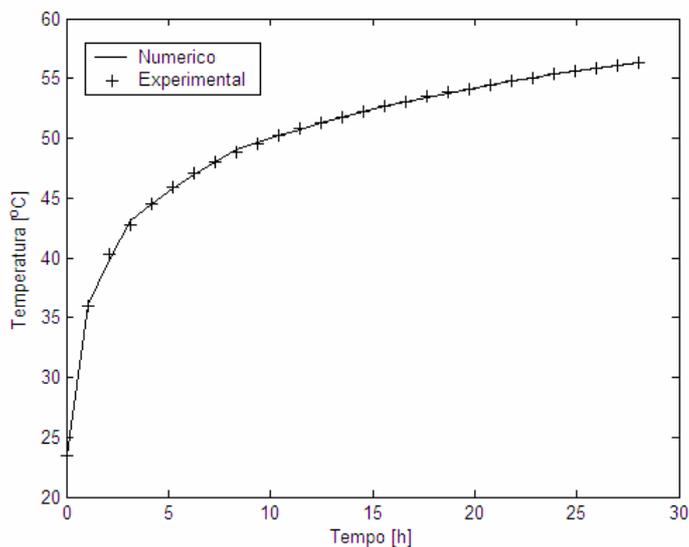


Figura 7 - Perfil de temperatura no centro da banana para o teste 5 com α variável.

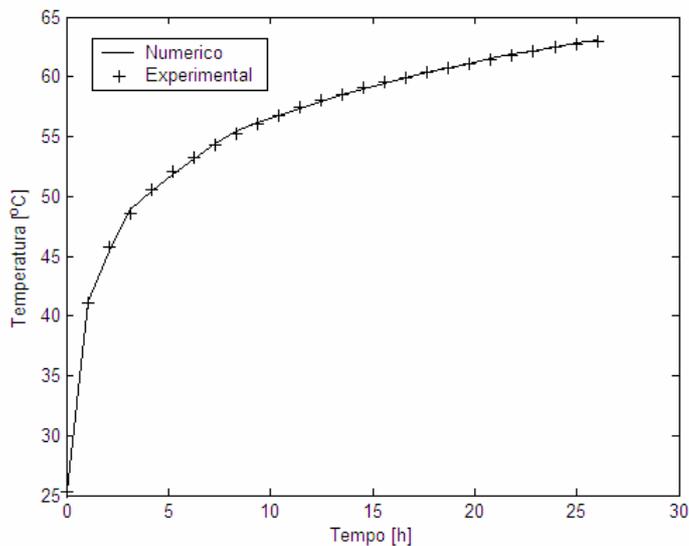


Figura 8 – Perfil de temperatura no centro da banana para o teste 6 com α variável.

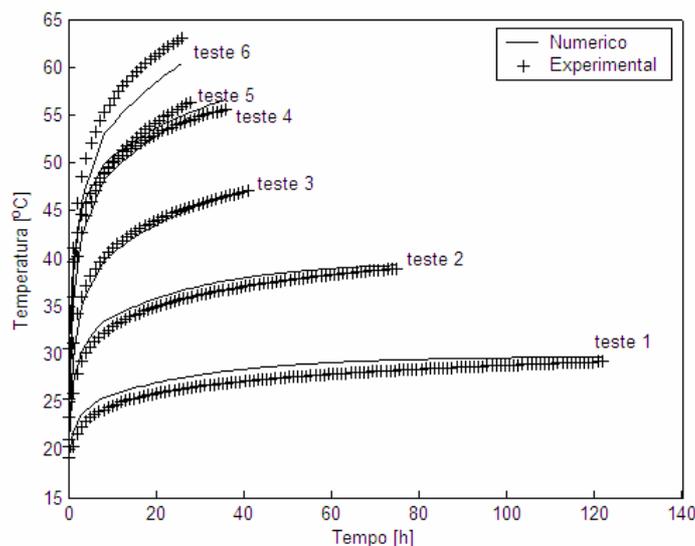


Figura 9 – Perfis de temperatura no centro da banana para todos os testes com α médio variável.

6. Conclusões

Neste trabalho o método de Evolução Diferencial foi usado para obter estimativas para a difusividade térmica da banana variável com a temperatura durante o processo de secagem. Este método mostrou-se eficiente resolvendo o problema proposto, mostrando-se promissor quando o problema é complexo, contudo o custo computacional ainda não é o ideal, já que todos os testes tiveram convergência com aproximadamente 300 iterações. Com a efetivação do trabalho obteve-se um coeficiente de difusividade térmica médio variável que se mostrou eficaz na predição dos resultados experimentais dos 6 testes utilizados neste trabalho. A contribuição deste trabalho está na obtenção do coeficiente de difusividade térmica variável utilizando a geometria simplificada do modelo, uma geometria unidimensional resolvendo apenas a equação da transferência de calor sem a necessidade de resolver a equação da transferência de massa.

Referências

- Ayhan, T., Karlik, B., Tandiroglu, A., 2003, "Flow Geometry Optimization of Channels with Baffles Using Neural Networks and Second Law of Thermodynamics", *Computational Mechanics*, Vol. 33, p. 139-143.
- Carvalho, G., Silva Neto, A. J., 1999, "An Inverse Analysis for Polymers Thermal Properties Estimation", *Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice*, 3rd Int. Conference on Inverse Problems in Engineering, Port Ludlow, WA, USA, p. 1 - 6.
- Engl, H. W., Hanke, M., Neubauer, A., 1996, "Regularization of Inverse Problems: Mathematics and its Applications", Ed. Kluwer.
- Khachfe, R. A., Bailleut, J. L., Jarny, Y., 2002, "The Simultaneous Determination of Thermal Conductivity and Heat Capacity within a Composite Medium by Using Conjugate Gradient Algorithm", *IMACS Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics, and Simulation*, Lausanne, Switzerland, p. 1-8.
- Mikki, F. T., Issamoto, E., Luz, J. I., Oliveira, P. P. B., Campos Velho, H. F., Silva, J. D. D., 1999, "A Neural Network Approach in a Backward Heat Conduction Problem", *Proceedings of the IV Brazilian Conference on Neural Networks*, São José dos Campos, SP, Brasil, p. 19-24.
- Pérez, V. H., 1998, "Estudo do Comportamento da Temperatura de Bananas durante o Processo de Secagem, Dissertação de Mestrado", Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Raudenský, M., Horský, J., Krejsa, J., 1995, "Usage of Neural Network for Coupled Parameter and Function Specification Inverse Heat Conduction Problem", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, nº 5, p. 661-670.
- Sablani, S. S., Kacimov, A., Perret, J., Mujumdar, A. S., Campo, A., 2004, "Non-Iterative Estimation of Heat Transfer Coefficients using Artificial Neural Network Models, *International Journal of Heat and Mass Transfer*", Vol. 48, nº 3, p. 665-679.
- Silva Neto, A. J., Moura Neto, F. D., 2005, "Problemas Inversos: Conceitos Fundamentais e Aplicações", Ed. UERJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Silva Neto, A. J., Soeiro, F. J. C. P., 2003, "Solution of Implicitly Formulated Inverse Heat Transfer Problems with Hybrid Methods", *Mini-Symposium Inverse Problems from Thermal Fluids and Solid Mechanics Applications*, 2th MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Cambridge, EUA.

- Soeiro, F. J. C., Campos Velho, H. F., Soares, P. O., Silva Neto, A. J., 2004, "Using Neural Networks to Obtain Initial Estimates for the Solution of Inverse Heat Transfer Problems". Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Rio de Janeiro, Brasil, p 1-6.
- Storn, R., Price, K., 1995, "Differential Evolution: a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces". *Technical Report TR-95-012*, International Computer Science Institute, Berkeley, USA.
- Storn, R., 1997, "Differential Evolution — a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces". *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, nº 4, p. 341-359.
- Suram, S., Bryden, K. M., Ashlock, D. A., 2005, "An Evolutionary Algorithm to Estimate Unknown Heat Flux in a One-Dimensional Inverse Heat Conduction Problem", Proceedings of the 5th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice, Cambridge, UK.
- Wood, R. L., 1996, "Genetic Algorithm Behaviour in the Solution of an Inverse Thermal Field Problem", *Engineering Computation*, Vol. 13, nº 5, p. 38-56.

INVERSE PROBLEM TO ESTIMATE THERMAL PROPERTIES OF BANANAS DURING THE DRYING PROCESS

Viviana Cocco Mariani

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 81215-901, Curitiba, PR
viviana.mariani@pucpr.br

Leandro dos Santos Coelho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEPS
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 81215-901, Curitiba, PR
leandro.coelho@pucpr.br

Abstract

In this work, the Differential Evolution optimization method is used to estimate the thermal diffusivity, variable with the banana temperature (during the drying process), thus solving the inverse problem of heat transfer by conduction. In the numerical modeling of the drying phenomena for simplification the physical properties generally remains constant. However, many times, the numerical results when compared with the experimental results are unsatisfactory. Other times these properties are presented as function of the humidity demanding the calculation of other equation for obtain these properties. Thus, in the present work deals the analysis and utilizing of inverse problems to estimate the thermal diffusivity of banana variable with the temperature during the drying process. Experimental results of the drying had been obtained of literature and the estimates of the thermal diffusivity by the optimization method have an excellent agreement with the results experimental. Such approach are advantageous for the fact not to need the solution of the mass equation to get the thermal diffusivity so as only the 1-D model were used to decide the heat transfer by Finite Difference method.

Keywords: Differential Evolution, thermal diffusivity, drying process, Inverse heat conduction problem.