



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE GRÃOS SUBMETIDOS A UM TIPO DE SECAGEM

Danilo Bossarino¹, Mariângela Amendola², Carla Rocha Gaspar³

Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas

Palavras-chave: Simulação numérica, Método explícito de diferenças finitas, Condutividade térmica de produtos

INTRODUÇÃO

O uso e / ou desenvolvimento de tecnologias de secagem de produtos agrícolas é de importância fundamental na área de tecnologia pós-colheita, uma vez que o conhecimento deste processo pode gerar suporte à decisão na implementação de alternativas para garantir e / ou aumentar o tempo de armazenagem dos produtos.

Neste sentido, são várias as pesquisas, em geral experimentais, que estão sendo desenvolvidas na Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Além disso, outras pesquisas de mesmo enfoque vêm sendo realizadas por meio de modelos matemáticos e métodos numéricos, sendo pioneiro da área de secagem da FEAGRI / UNICAMP o trabalho [3]. Este trabalho deu origem a outros de mesma natureza da área, como o trabalho de iniciação científica [2], que visou disponibilizar o programa computacional para a simulação numérica de um tipo específico de processo de secagem de grãos, para ser usado por usuários não especialistas em matemática aplicada e computação científica.

MATERIAIS E MÉTODOS

MODELO MATEMÁTICO ASSOCIADO AO EXPERIMENTO APTO PARA ESTE PROGRAMA

O **modelo matemático** é o de Fourier, unidimensional, em coordenadas cilíndricas e sujeito a simplificações e condições iniciais e de contorno de acordo com o experimento previamente realizado envolvendo cilindros concêntricos, expresso para a temperatura $T = T(r, t)$ como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}; R_1 < r < R_2 \quad (1)$$

onde
T: temperatura da amostra do produto [°C]
t: tempo [s]
r: direção radial [m]
k: condutividade térmica do produto [W / m°C]
ρ: densidade do produto [kg / m³]
Cp: capacidade calorífica do produto [J / kg°C]
R₁: raio do cilindro interno [m]
R₂: raio do cilindro externo [m]

Condição inicial

$$T(r,0) = T_i; \quad r \in [R_1, R_2] \quad (2)$$

onde T_i = Temperatura ambiente [°C]

Condições de contorno

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_1} = qf \quad (3) \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0 \quad (4)$$

onde qf é o fluxo de calor gerado por uma fonte de tensão de acordo com o experimento.

De acordo com o esquema explícito do **método numérico** de diferenças finitas selecionado, a discretização requerida para a simulação numérica mostra-se como:

$$T_j^i = f_0 \left(1 - \frac{\Delta r}{r(j)} \right) T_{j-1}^{i-1} + \left(f_0 \left(-2 + \frac{\Delta r}{r(j)} \right) + 1 \right) T_j^{i-1} + f_0 T_{j+1}^{i-1} \quad (5)$$

$T(i, j) = T(i^* \Delta t, j^* \Delta r)$

i = 1, ... p

p = último ponto do tempo de integração

Δt = intervalo da malha temporal

j = 1, ... m

m = último ponto do espaço total

Δr = intervalo da malha espacial

$$f_0 = \text{número de Fourier} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right) \quad (6)$$

r(j) = distância radial do ponto j*Δr

O uso do **algoritmo** então estabelecido para ser usado para a determinação da condutividade de grãos em geral, quando submetidos ao mesmo tipo de secagem, requer somente a inserção dos valores solicitados nas partes 1 e 2, como segue.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

PARTE 1. ENTRADA DE DADOS DO EXPERIMENTO

- 1) valor do raio do cilindro interno (R1) [m]
- 2) valor do raio do cilindro externo (R2) [m]
- 3) valor numérico do fluxo de calor (qf) [W / m²]
- 4) valor numérico da densidade real do produto (ρ) [kg / m³]
- 5) valor numérico da capacidade calorífica do produto (Cp) [J / kg°C]
- 6) valor numérico do tempo total do experimento realizado (te) [s]
- 7) valor numérico do intervalo de integração do tempo (Δt)
- 8)---- neste momento o programa deve pedir o arquivo de dados experimentais; então o usuário deve fazer `load nome_do_arquivo.m`, onde o arquivo deve constar de uma coluna de q linhas

PARTE 2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

- 1) valor numérico da temperatura inicial do produto (Ti) [°C]
- 2) dois valores numéricos de condutividade térmica: k1 e kmax [W / m°C] e o tamanho do passo de busca entre eles
- 3) tamanho do intervalo de tempo (Δt) [s] que obedeça ao critério de estabilidade $[\Delta t \leq 0.5 * ((\Delta r)^2) / (k_{max} + (\rho * C_p))]$

A partir destas especificações o programa realiza a simulação numérica, gera as curvas obtidas para os diferentes valores de k e mostra os resíduos quando comparados com os dados experimentais para que o usuário decida qual o melhor valor de k a usar.

Como exemplo, usa-se um conjunto de dados de temperatura do produto soja, obtida do termopar número 1 (mais próximo do centro dos cilindros), por ser o pior caso relatado em [3] e o usado em [1]. Neste caso, fez-se o valor de k variar entre as estimativas 0,20 a 0,30 [W / m°C], extraídas da literatura, com um passo de 0,001. Os resíduos da comparação dos valores obtidos com os dados experimentais aparecem na Figura 1. A curva de melhor valor de k (menor resíduo) é mostrada junto com a curva experimental na Figura 2.

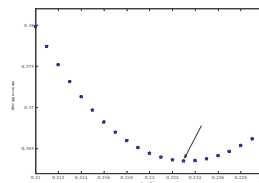


Figura 1: Valores dos resíduos em função dos valores de k

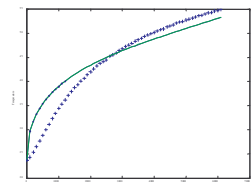


Figura 2: Curva experimental e curva numérica para melhor valor de k.

Ressalta-se que o tempo de execução do programa, para cada valor de k, é cerca de 100 segundos, sem contar o cálculo externo para a garantia do critério de estabilidade, o que sugere o uso da implementação do esquema implícito, também devido ao fato de o mesmo ser repetido tantas vezes quanto for o número de termopares instalados ao longo do raio dos cilindros. Entretanto, esta implementação não se mostra atrativa, porque é complexa para alunos deste nível de pesquisas em engenharia agrícola, embora já esteja concluída ([1]).

Nota-se que associado ao melhor valor de k = 0,223 W / m°C, usado na Figura 2, tem-se o valor de menor resíduo, que é 0,3635.

CONCLUSÃO

O programa computacional re-elaborado mostra-se de fácil compreensão a usuários não especialistas em matemática aplicada e computação científica, os quais, entretanto, devem ter domínio dos conhecimentos essenciais do processo físico modelado de acordo com o procedimento experimental realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] M. Amendola. Considerations to continue researches in drying process numerical simulation of agriculture products at FEAGRI / UNICAMP. Abstract of the minisymposium: Topics in Computational Mechanics at the Eighth U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM8), Austin-TX, 2005.

[2] D. Bossarino e M. Amendola. Elaboração de um programa computacional no MATLAB® 6.1 como fruto da revisão bibliográfica de estudos de processos de secagem de produtos agrícolas. XII Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP, 2004, Campinas, 2004.

[3] A. P. Ito; M. Amendola e K. J. Park. Construção e avaliação de um sistema de determinação de condutividade e difusividade térmica em regime transiente. *Congreso Agronómico De Chile y Congreso Ibero Americano de Tecnología Poscosecha y Agro negocios*, 3. Resumem. Simiente, v. 72 (3-4). ISSN 0037 - 5403. Santiago - Chile. 2002. p.141-142.

AGRADECIMENTOS: Ito, A. P. pelos dados experimentais e ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

¹ Aluno graduação FEAGRI / UNICAMP

e-mail: danilo@agr.unicamp.br

³ Aluna graduação FEAGRI / UNICAMP

e-mail: rocha@agr.unicamp.br

² Professora Dra. FEAGRI / UNICAMP

e-mail: amendola@agr.unicamp.br