

A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO NODAL NA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS TÉRMICOS

C. R. RODRIGUES VELOSO¹, R. GEDRAITE²

¹ Bolsista PIBIC FAPEMIG/UFU, discente do curso de Engenharia Química

² Professor da Faculdade de Engenharia Química da UFU/MG

E-mail para contato: rgedraite@feq.ufu.br

RESUMO - No processamento térmico de produto alimentício industrializado é muito importante que a temperatura do mesmo alcance valores adequados e suficientes para assegurar um índice de letalidade pré-estabelecido a ser imposto ao microrganismo de referencia. Tipicamente, a determinação desta temperatura é feita de maneira experimental por meio de testes de penetração de calor no produto considerado. Neste trabalho se estudou o desenvolvimento de modelo matemático discretizado, desenvolvido com base na nodalização do volume de controle adotado, obtido a partir das equações de balanço global de energia e de transporte de calor que permita representar de forma adequada o comportamento temporal da temperatura do sistema estudado. O modelo matemático obtido foi validado por comparação com dados disponíveis na literatura. Com base no modelo obtido, foi estudada influência da propriedade difusividade térmica sobre o comportamento da temperatura simulada. Os resultados obtidos mostraram que o desvio entre os valores de temperatura medidos experimentalmente e preditos pelo modelo é afetado pelo valor da propriedade de transporte de calor considerada neste trabalho e, também, pela posição do nó considerado na análise.

1. INTRODUÇÃO

O processamento térmico de alimentos industrializados consiste no aquecimento de embalagens em autoclaves pressurizadas, que podem ser estacionárias ou rotativas, verticais ou horizontais, e/ou contínuas ou descontínuas. O processamento térmico deve ser especificado por especialistas que, para cada sistema equipamento/embalagem/alimento definem as condições de processo: tempo de processo, temperatura de processo, temperatura mínima inicial do alimento, perfil de pressão e programa de desaeração da autoclave.

Em face destes requisitos de qualidade e de segurança, grande cuidado é tomado no cálculo destes tempos de processamento, assim como no controle do tempo e da temperatura vigentes durante os mesmos, para evitar que o alimento seja submetido a um subprocessamento ou a um superprocessamento (Germer, 1997).

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo matemático, desenvolvido para ser executado em tempo real, e que leve em consideração as condições de operação de uma autoclave estacionária. Este modelo poderá ser empregado em conjunto com o sistema de controle da autoclave, com a finalidade de garantir o nível de letalidade previamente estabelecido para micro-organismos.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A esterilização de um produto alimentício depende, em parte, da taxa de penetração de calor no mesmo.

Quando produtos alimentícios são colocados numa embalagem, que por sua vez é colocada numa autoclave e processada termicamente através da condensação do vapor de água saturado, a taxa de transferência de calor para os mesmos depende dos seguintes fatores (Teixeira; Balaban, 1996):

- a) Coeficientes de transferência de calor;
- b) Propriedades físicas do produto alimentício e da embalagem;
- c) Diferença de temperatura entre o produto alimentício e autoclave; e
- d) Tamanho da embalagem.

O foco neste trabalho foi a predição da evolução do perfil de temperaturas no interior de uma embalagem metálica de geometria cilíndrica contendo proteína texturizada de soja (PTS).

O produto usado no trabalho experimental desenvolvido por Gedraite *et al*, (1998) foi obtido pelo processamento da PTS em instalação industrial localizada em São Paulo/SP. Nos ensaios experimentais realizados empregou-se embalagem metálica cilíndrica do tipo 300 X 406 (73,3 mm X 111 mm).

3. CONTROLE DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO EM TEMPO REAL

O emprego de modelos matemáticos capazes de prever as características do produto alimentício em função de alterações nas condições de processo é fundamental para um bom desempenho dos sistemas de controle baseados em computador que sejam executados em tempo real.

A principal vantagem advinda do uso de modelos matemáticos capazes de estimar o histórico da temperatura do produto é o fato de que se podem aceitar variações na temperatura da autoclave. Assim sendo, na ocorrência de uma diminuição inesperada da temperatura da autoclave, o modelo fornecerá rapidamente o histórico das temperaturas e calculará o valor do nível de letalidade atingido.

Pretende-se neste trabalho que o modelo matemático desenvolvido venha a ser parte integrante de um aplicativo usado para auxiliar a tomada de decisões por um sistema de controle baseado em computador. Assim, na ocorrência de uma perturbação na temperatura da autoclave, o modelo deverá prever a resposta correta da temperatura no interior do produto alimentício para este desvio, bem como o efeito correspondente sobre o fator de letalidade acumulado (F_0). O modelo matemático deverá, também, gerar informação que permita reprogramar o tempo de processamento, continuando o aquecimento até que a letalidade acumulada alcance o valor pré-estabelecido.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

A equação que governa a transferência de calor para a PTS em uma embalagem de altura H e raio R , com difusividade térmica constante α é dada pela Equação (1).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \hat{\alpha} \pm \hat{\alpha}^{\text{TM}} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de uma embalagem cilíndrica típica, que usa as coordenadas anteriormente citadas.

No desenvolvimento deste trabalho, foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras (Teixeira; Balaban, 1996):

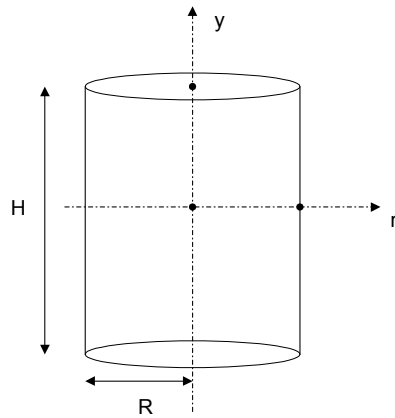
- a) A temperatura do produto alimentício é uniforme no instante $t = 0$;
- b) A temperatura da embalagem cilíndrica é constante depois de $t = 0$ (não há variação entre dois pontos distintos da embalagem);
- c) O coeficiente de transferência de calor, externo à embalagem, é muito elevado (isto é, a resistência térmica da superfície é desprezível);
- d) A difusividade térmica não varia com o tempo, com a temperatura, ou espacialmente no interior do produto alimentício; e
- e) Não existe *headspace* no interior da embalagem.
- f) O modelo matemático foi desenvolvido tomando-se por base a discretização do conjunto embalagem / produto alimentício em um número finito de elementos de volume, supostos isotérmicos (Gedraite, 1999). Na Figura 2 é apresentada a discretização típica adotada neste trabalho, na qual são mostradas as conexões de um determinado nó com os seus vizinhos.
- g) A equação geral de balanço de energia para um determinado nó no qual ocorre a difusão do calor é composta pelo termo de variação temporal da temperatura (lado esquerdo da equação) e pelos termos de troca térmica entre o nó considerado e seus vizinhos, assumindo a hipótese de que não há fonte de calor no interior do produto alimentício (Bastos, 1994). Na Equação (2) é apresentado o balanço global de energia considerado.

$$C_I \hat{\alpha}^{\text{TM}} \frac{dT_I}{dt} = G_{IN} \hat{\alpha}^{\text{TM}} (T_N - T_I) + G_{IS} \hat{\alpha}^{\text{TM}} (T_S - T_I) + G_{IL} \hat{\alpha}^{\text{TM}} (T_L - T_I) + G_{IN} \hat{\alpha}^{\text{TM}} (T_N - T_I) + G_{IO} \hat{\alpha}^{\text{TM}} (T_O - T_I) \quad (2)$$

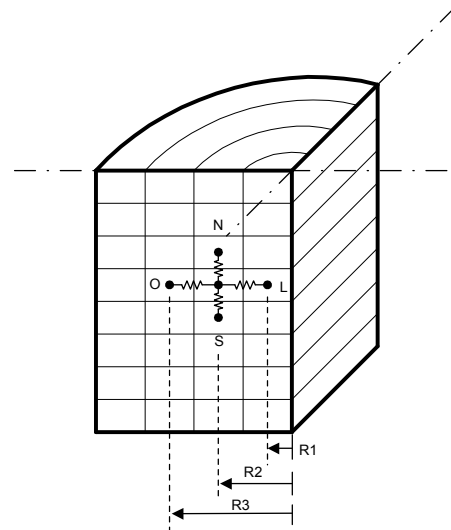
Figura 1 – Representação esquemática de

Figura 2 – Discretização típica do conjunto

uma embalagem cilíndrica



embalagem / produto alimentício.



A capacitância térmica é calculada pela expressão $C = \rho \hat{C}_p V_I$, e as condutâncias térmicas entre os nós podem ser de dois tipos: condutâncias radiais (G_{IL} e G_{IO}) e condutâncias axiais (G_{IN} e G_{IS}). Estas condutâncias são determinadas pelas Equações (3), (4) e (5), sendo que as Equações (3) e (4) representam exemplos típicos de condutâncias radiais e a Equação (5) de condutância axial.

$$G_{IL} = \frac{\rho \hat{K} dz}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (3)$$

$$G_{IO} = \frac{\rho \hat{K} dz}{2 \ln \frac{R_3}{R_2}} \quad (4)$$

$$G_{IN} = G_{IS} = \frac{\rho \hat{K} (r_e^2 - r_i^2)}{4 dz} \quad (5)$$

O sistema de equações gerado foi resolvido com o auxílio do código EES (Klein & Alvarado, 2015).

5. VALIDAÇÃO DO MODELO

Devido à simetria das condições de contorno para o volume de controle a ser nodalizado, foi considerada a geometria formada por um setor circular de 90° e de altura igual à metade da altura da embalagem. Foi gerada uma malha composta por 49 elementos de volume com 07 subdivisões na direção radial e 07 na direção axial.

A validação deste modelo foi feita pela comparação dos resultados obtidos pela simulação computacional desenvolvida com base no modelo matemático proposto neste trabalho com aqueles apresentados por Gedraite (1999).

Na Figura 3 é apresentado o comportamento da temperatura da autoclave e uma comparação entre os resultados obtidos com o modelo matemático e o experimental.

6. RESULTADOS & DISCUSSÃO

Na Figura 4 é apresentado o comportamento temporal das temperaturas do nó central [1,7] para cinco valores diferentes da propriedade de transporte de calor difusividade térmica. Os valores da difusividade térmica foram escolhidos de maneira aleatória e utilizaram como referencia o valor igual a $2,0E-7 \text{ m}^2/\text{s}$, obtido experimentalmente (Gedraite, 1999), com variação de amplitude entre os mesmos de $\pm 0,2 \text{ m}^2/\text{s}$.

O comportamento das temperaturas simuladas está adequado e coerente com o esperado, haja vista o fato de que com o aumento do valor da difusividade térmica, a variação de temperatura no ponto considerado tende a ser mais rápida.

Figura 3 – Comparação entre as temperaturas experimental e simulada do produto alimentício

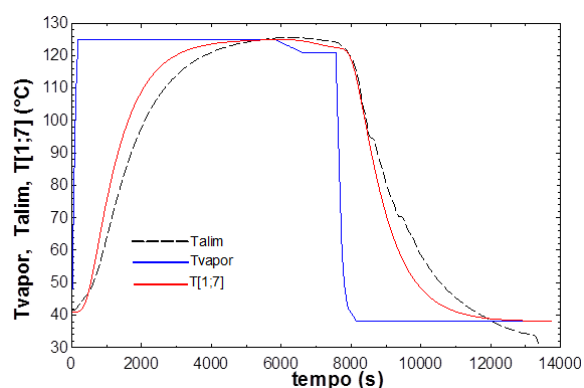
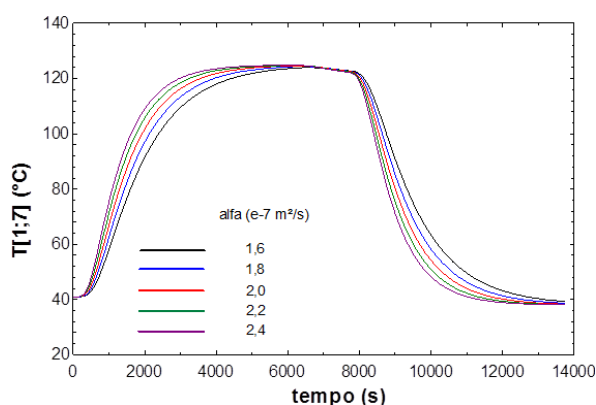


Figura 4 – Comparação entre as temperaturas simuladas do nó [1,7] do produto alimentício



7. CONCLUSÃO

Observou-se que o modelo matemático representa, com boa aproximação, o comportamento da temperatura no interior do produto alimentício ensaiado.

O modelo matemático desenvolvido é adequado para uso na análise do processo de esterilização de produtos alimentícios que sejam aquecidos pelo mecanismo de transporte de calor por condução e apresentou tempo de execução pequeno e compatível com o requerido para uso em sistemas de automação de processos desta natureza.

8. NOMENCLATURA

dz = Altura de um nó (m)	R_i = Raio correspondente ao i -ésimo nó (m)
C_p = Calor específico da PTS ($J/kg^{\circ}C$)	r_e = Raio externo do i -ésimo nó (m)
C = Capacitância térmica (J)	r_i = Raio interno do i -ésimo nó (m)
G_{ij} = Condutâncias térmicas entre os nós ($m^{\circ}C/f/W$)	$T(t)$ = Temperatura da PTS no instante ($^{\circ}C$)
K = Condutividade térmica da PTS ($W/m^{\circ}C$)	T_r = Temperatura de referência para a PTS ($^{\circ}C$)
y = Cota na direção axial (m)	T = Temperatura do corpo ($^{\circ}C$)
r = Cota na direção radial (m)	t = Tempo de processamento (s)
ρ = Densidade da PTS (kg/m^3)	t_f = Tempo final de processamento (s)
α = Difusividade térmica da PTS (m^2/s)	V_i = Volume do i -ésimo nó (m^3)

9. REFERÊNCIAS

- BASTOS, J. L. F. Notas de Aula da Disciplina Análise Termofluído Dinâmica de Reatores Nucleares. Depto. de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1994.
- GEDRAITE, R. 1999. Desenvolvimento e Implementação de Algoritmo Computacional para garantir um determinado nível de Letalidade Acumulada para Micro-organismos presentes em Alimentos Industrializados. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Dissertação (Mestrado).
- GEDRAITE, R., BASTOS, J. L. F., GARCIA, C. A., 1998. Utilização de modelagem matemática para otimizar o controle da temperatura de alimentos processados em autoclaves estacionárias, In Proc. of VIII Congresso Latino-americano de Controle Automático, Vinã del Mar – Chile, vol.2, pp. 679 – 683.
- GERMER, S. P. M. Avaliação dos desvios no processamento térmico de alimentos em conserva. Informativo FRUTHOTEC, v. 3, n. 2, p. 2-3, 1997.
- KLEIN, S. A., ALVARADO, F. L. Engineering Equation Solver. Middleton, WI, 1996. Manual do Usuário, F-Chart Software.
- TEIXEIRA, A. A. & BALABAN, M. Computer Applications in Thermal Processing of Canned Foods. ITAL, Campinas, 1996.