

# MELHORIA DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE AUTOCLAVES ESTACIONÁRIAS COM BASE EM MODELO MATEMÁTICO

Letícia Raquel de Oliveira<sup>1</sup>, Leo Kunigk<sup>2</sup>, Ariel S. Morais<sup>3</sup>, Ubirajara C. Filho<sup>1</sup> e Rubens Gedraite<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFU, FEQUI, Uberlândia – MG, [letciarakel@gmail.com](mailto:letciarakel@gmail.com), [ucfilho@feq.ufu.br](mailto:ucfilho@feq.ufu.br), [rgedraite@fequi.ufu.br](mailto:rgedraite@fequi.ufu.br)

<sup>2</sup>CEUN-IMT, Pós-Graduação, São Caetano do Sul – SP, [kunigk@maua.br](mailto:kunigk@maua.br)

<sup>3</sup>UFU, FEELT, Uberlândia – MG, [aniel@eletrica.ufu.br](mailto:aniel@eletrica.ufu.br)

**Resumo** - Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático, para ser executado em microcomputador do tipo PC, levando em consideração as condições de operação de uma autoclave estacionária, com o objetivo de garantir o índice de letalidade previamente estabelecido para microorganismos, reprogramando o tempo de processamento da autoclave quando necessário. Propõe-se o desenvolvimento de um modelo matemático para previsão da evolução temporal da temperatura no interior do alimento, assumindo-se como condição de contorno o comportamento da temperatura da autoclave.

**Palavras-Chave** - Autoclave, esterilização, controle baseado em modelo.

## MODEL BASED STACIONARY RETORT CONTROL STRATEGY IMPROVEMENT

**Abstract** – This paper presents the development of a mathematical model, to be executed by a personal computer, and taking into account the operating conditions of a stationary retort. The challenge is to assure the lethality index required for the food sterilization reprogramming the process elapsed time if necessary. The mathematical model will be responsible for the food inside temperature prediction, assuming as boundary condition the retort temperature.

**Keywords** - Retort, sterilization, Model-based control.

### I. 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 formado por equipamento/embalagem/alimento, definem as condições de processo, a saber: duração, temperatura de operação,

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 sub-processamento ou a um sobre-processamento.

“Embora os processos possam ser criteriosamente definidos, a sua aplicação no dia-a-dia da produção industrial foge da idealidade. Problemas operacionais como a falta de energia, queda na geração de vapor de água e falha nos sistemas de controle ocorrem com bastante frequência e causam desvios de processo pela flutuação da temperatura do meio de aquecimento. Outros desvios de processo podem ocorrer quando há alteração de parâmetros básicos de processo, tais como: temperatura inicial do produto, tempo de processo mais curto e temperatura do meio de aquecimento uniformemente mais baixa. Quando estes desvios acontecem, o lote - em geral - é reprocessado ou segregado para análise dos registros por um especialista que deve tomar decisões quanto à liberação deste ou o seu descarte. Estes procedimentos são dispendiosos, demorados e quando a opção é feita pelo reprocessamento, resultam num comprometimento da qualidade do alimento” [1].

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 deverá ser empregado em conjunto com o sistema de controle convencional da autoclave, com a finalidade de garantir o nível de letalidade previamente estabelecido para microorganismos.

### II. CONSIDERAÇÕES ACERCA DO MODELO MATEMÁTICO

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 [2]:

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



XI CEEL – ISSN 2178-8308  
25 a 29 de novembro de 2013  
Universidade Federal de Uberlândia – UFU  
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

Neste trabalho optou-se por utilizar um produto sólido cujo mecanismo de transporte de calor seja essencialmente condutivo. Foi escolhido o purê de batatas, acondicionado em embalagem metálica de geometria cilíndrica do tipo 300 por 406 (73,3 mm X 111 mm). O preparo do produto seguiu a metodologia apresentada em [3].

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 pode aceitar flutuações imprevistas 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 seja parte integrante de um “software” 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 nível 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.

A equação que governa a transferência de calor para o produto em uma embalagem de altura H e raio R, com difusividade térmica constante é dada pela seguinte equação diferencial parcial:

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

Na qual;

T = temperatura do produto;  
t = tempo de processamento;  
r = cota na direção radial;  
y = cota na direção axial; e  
 $\alpha$  = difusividade térmica do produto

A Figura 1 mostra um esquema típico de uma embalagem cilíndrica que usa as coordenadas em questão;

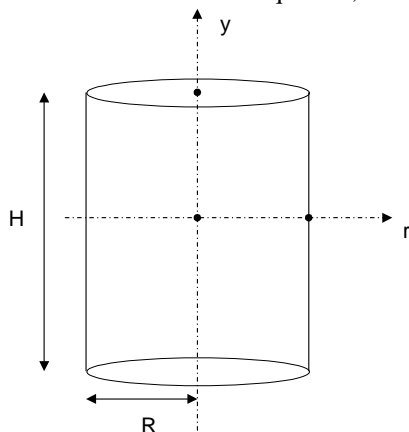


Fig. 1. Sistemas de Coordenadas para uma embalagem cilíndrica

A equação que calcula o nível de letalidade obtido durante o processamento é:

$$F_0 = \int_0^{t_f} \frac{1}{10^{\left(\frac{T_r - T}{z}\right)}} \cdot dt \quad (2)$$

Na qual:

$T_r$  = temperatura de referência para um dado alimento;  
T = temperatura do alimento;  
 $t_f$  = tempo final de processamento; e  
z = diferença de temperatura necessária para reduzir o tempo requerido para diminuir em 10 vezes a população de microorganismos.

A equação anterior permite calcular o nível de letalidade para o produto que está sendo processado e, por sua vez, depende do histórico de temperatura desde o início do processamento até o instante em que a embalagem é retirada da autoclave.

No desenvolvimento deste trabalho, foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras [2]:

- A temperatura do produto é uniforme no instante  $t=0$ ;
- A temperatura da embalagem cilíndrica é constante depois de  $t = 0$  (não há variação entre dois pontos distintos da embalagem);
- O coeficiente de transferência de calor, externo à embalagem, é muito elevado (isto é, a resistência térmica da superfície é desprezível);
- A difusividade térmica não varia com o tempo, com a temperatura, ou espacialmente no interior do produto alimentício; e
- Não existe “headspace” no interior da embalagem.

O modelo matemático foi desenvolvido tomando-se por base a discretização do conjunto embalagem / produto em um número finito de elementos de volume, supostos isotérmicos [4]. A Figura 2 apresenta a discretização típica, na qual são mostradas as conexões do nó “I” com seus vizinhos.

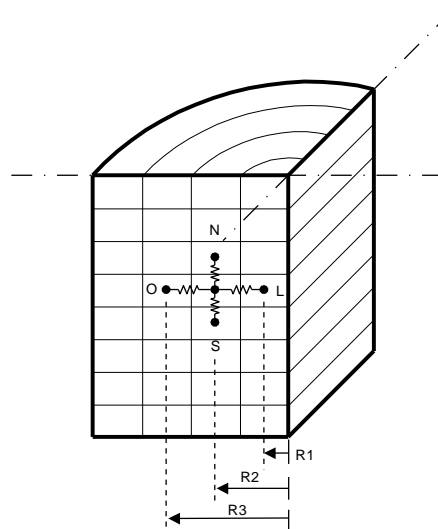


Fig. 2. Discretização típica do conjunto embalagem / produto alimentício.

A equação geral de balanço de energia para um nó de difusão “I” é composta pelo termo de variação temporal da

temperatura (lado esquerdo da equação) e pelos termos de troca térmica entre o nó “I” e seus vizinhos (não há fonte de calor no interior do produto alimentício) [4]. Assim, pode-se escrever que:

$$C_1 \frac{dT_I}{dt} = G_{IN}(T_N - T_I) + G_{IS}(T_S - T_I) + G_{IL}(T_L - T_I) + G_{IO}(T_O - T_I) \quad (3)$$

A capacitância térmica é calculada pela expressão:  $C = \rho \cdot Cp \cdot Vi$ , onde  $\rho$  é a densidade,  $Cp$  o calor específico do produto e  $Vi$  o volume do *i-ésimo* elemento considerado. As condutâncias térmicas entre os nós são de dois tipos: condutância radial ( $G_r$ ) e condutância axial ( $G_a$ ). Estas condutâncias são determinadas pelas seguintes equações:

$$\phi_{ij} = G_{ij} \cdot (T_j - T_i) \quad (4)$$

$$G_{I,L} = \frac{\pi K dz}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (5)$$

$$G_{I,D} = \frac{\pi K dz}{2 \ln \frac{R_3}{R_2}} \quad (6)$$

onde  $K$  representa a condutividade térmica do produto,  $R_3$  é o raio externo do *i-ésimo* nó,  $R_2$  é o raio interno do *i-ésimo* nó e  $dz$  é a altura de um nó (na direção axial do conjunto embalagem/produto).

O sistema de equações gerado é resolvido com o auxílio do código EES [5] que utiliza uma variante do método de Newton.

### III. VALIDAÇÃO DO MODELO

Devido à simetria das condições de contorno, a geometria tratada no modelo do produto alimentício é formada por um setor circular de  $90^\circ$  e de altura igual à metade da altura da embalagem. Foi gerada uma malha composta por 100 elementos de volume com 10 subdivisões na direção radial e 10 na direção axial.

A validação deste modelo foi feita pela comparação dos resultados obtidos pela simulação computacional com aqueles apresentados na literatura [3]. Utilizou-se o mesmo perfil de evolução temporal da temperatura da autoclave para alimentar o modelo matemático.

Na Figura 3 é apresentado o comportamento temporal da temperatura da autoclave e do produto, contemplando a comparação entre os valores simulado e experimental.

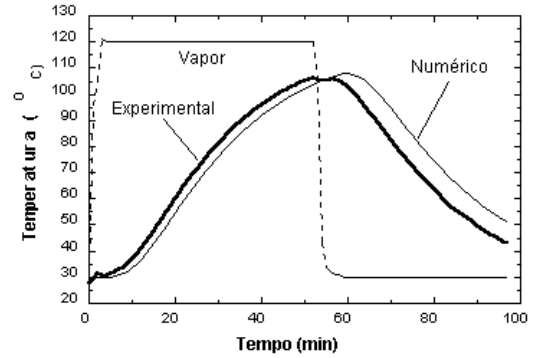


Fig. 3. Comparação entre a temperatura medida experimentalmente e a simulada do produto alimentício

Na Figura 4 é apresentada a evolução temporal do índice de letalidade imposto ao produto alimentício, calculado com base na temperatura do ponto central do sistema formado pelo conjunto embalagem e produto, utilizando-se as temperaturas calculadas com base no modelo matemático. É importante que se ressalte o fato de que ambas referem-se ao ponto mais frio do produto alimentício (isto é, o nó central da embalagem).

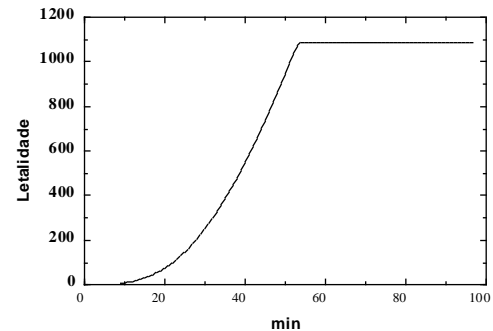


Fig. 4. Índice de letalidade do ponto frio do alimento

### IV. CONSIDERAÇÕES ACERCA DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O sistema tradicional de controle de autoclaves estacionárias simples tem sido desde há muito tempo aplicado nos processamentos térmicos de alimentos enlatados, apresentando desempenho satisfatório sob condições normais de operação. Contudo, em situações de anormalidade, nas quais a quantidade fornecida de vapor de água é insuficiente, seja intermitentemente ou não, para manter a temperatura desejada, resultam desvios no processo.

O controle da temperatura do produto é o ponto crítico do processo. Existem duas estratégias básicas de controle para se alcançar este objetivo. Uma delas envolve a monitoração da temperatura do produto e o ajuste da temperatura do meio de aquecimento/resfriamento para se alcançar e manter a temperatura do produto alimentício no valor desejado. A outra consiste somente no controle da temperatura do meio de aquecimento/resfriamento, assumindo que a temperatura do produto seguirá o curso definido pelos estudos prévios de transmissão de calor.

A primeira alternativa permite tanto o ajuste em tempo real das temperaturas dos meios de aquecimento/resfriamento como do tempo de processamento necessário para se considerar quaisquer desvios esperados ou não. As temperaturas do produto podem ser transformadas em índices de letalidade e a letalidade acumulada avaliada em tempo real, de forma a permitir que se encontre o instante mais adequado para a finalização do processamento térmico. A temperatura do produto alimentício acondicionado numa embalagem, durante o processamento térmico, é medida por meio de um elemento sensor de temperatura adequadamente instalado no ponto mais frio do mesmo. O sinal de saída gerado pelo elemento sensor de temperatura é usado para se avaliar o grau de esterilização do produto alimentício. Esta abordagem não requer um conhecimento prévio do modo de transferência de calor e/ou das propriedades físicas e de transporte de calor do produto alimentício, além de apresentar menor incerteza no valor medido, por estar baseada na medição direta da temperatura. Contudo, exige-se a preparação de unidades de teste para a instalação em cada carregamento da autoclave, no ponto de aquecimento mais lento. É importante salientar o fato de que a colocação de unidades de teste na carga da autoclave e a manipulação dos fios dos respectivos elementos sensores podem causar atrasos na programação de operação das autoclaves, que – por sua vez – acarretam diminuição da produtividade. As unidades de teste podem, também, exibir parâmetros de transmissão de calor variáveis; assim sendo, os processamentos térmicos poderão variar quando baseados nas mesmas. Além do mais, a medição direta é difícil, ou mesmo impossível, no caso de autoclaves contínuas, implicando em uma recalibração freqüente do sistema de medição de temperatura [6].

A segunda alternativa baseia-se na previsão da temperatura do produto alimentício a partir da temperatura do meio de aquecimento/resfriamento. Com base no modelo matemático que descreva com precisão a velocidade de transporte de calor - em regime transiente - para o produto alimentício, pode-se executar o controle do processo de esterilização deste. Esta metodologia é mais vantajosa porque dispensa a medição da temperatura no interior do produto alimentício. A sua desvantagem mais marcante é a necessidade de se conhecer as propriedades termofísicas do produto alimentício considerado, que nem sempre são constantes e/ou conhecidas em literatura. Porém, este fato não impede que estas propriedades sejam determinadas experimentalmente e/ou que se considere um valor médio global para as mesmas quando da elaboração do modelo. Os dois mecanismos predominantes de transferência de calor envolvidos no processamento térmico de alimentos enlatados são a condução e a convecção [6], [7], [8]. Na prática, o mecanismo de aquecimento condutivo é considerado mais restritivo para efeito de modelamento matemático da transferência de calor para o alimento enlatado, apesar do fato dos modelos desenvolvidos com base neste último mecanismo parecerem operar igualmente bem no caso de aquecimento convectivo de produtos alimentícios. Por se estar trabalhando com transporte de calor por condução, a complexidade do modelo matemático foi consideravelmente reduzida, pois este mecanismo de transporte faz uso de

equações significativamente mais simples do que aquelas utilizadas pelo mecanismo da convecção.

O método de otimização mais recentemente proposto na literatura [9], [10] baseia-se numa estratégia de controle denominada de controle baseado em modelo. A razão pela qual se pode afirmar isto deve-se ao fato de que o modelo matemático desenvolvido permite prever a contribuição da etapa de resfriamento para o cálculo do índice de letalidade acumulada ( $F_0$ ) imposta ao microorganismo de referência, antes do seu efetivo início. A Figura 5 apresenta um diagrama de blocos que ilustra o que se está querendo explicar.

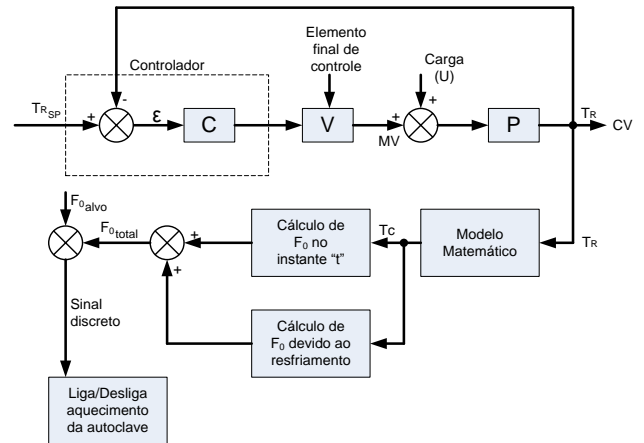


Fig. 5 Diagrama de blocos genérico para uma malha de controle antecipatório baseada em modelo.

O algoritmo desenvolvido neste trabalho pode ser executado em um microcomputador do tipo PC, que troca informações com o sistema de controle convencional, baseado em controlador lógico programável para executar o intertravamento e em controlador do tipo “multi-loop” para executar o controle regulatório, por exemplo. Na Figura 6 é apresentada a arquitetura básica do sistema de controle otimizado.

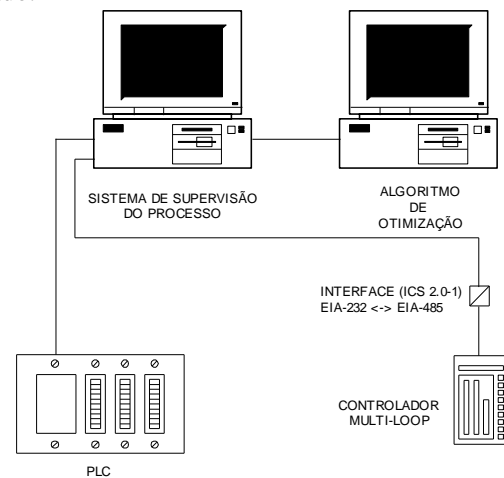


Fig. 6. Sistema de controle da autoclave utilizando o algoritmo computacional

## V. CONCLUSÕES

O modelo matemático desenvolvido é adequado para representar a evolução temporal da temperatura do produto alimentício, visando o controle otimizado da operação da autoclave.

Os desvios verificados entre as temperaturas do produto alimentício ensaiado, medida experimentalmente [3], e aquela calculada pela simulação computacional são pouco significativos.

O modelo matemático desenvolvido poderá ser facilmente implementado em código computacional que permita a troca de informações em tempo real com o sistema de controle instalado em autoclaves estacionárias tipicamente utilizadas na indústria alimentícia.

O modelo matemático em questão poderá ser usado em etapa futura como uma ferramenta de projeto para estimar o valor da propriedade de transporte de calor difusividade térmica em estudos de transferência de calor.

Adicionalmente, este modelo poderá ser adaptado para estudar o transporte de calor em outras geometrias de embalagens comumente utilizadas na indústria de alimentos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UFU e ao Instituto Mauá de Tecnologia. Este projeto foi financiado com base em projeto aprovado no Edital 04/2011.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. P. M. Germer, “Avaliação dos desvios no processamento térmico de alimentos em conserva”, *Informativo FRUTHOTEC*, vol. 3, no. 2, pp. 2-3, 1997.
- [2] A. A. Teixeira & M. O. Balaban, *Computer Applications in Thermal Processing of Canned Foods*. ITAL, Campinas, 1996.
- [3] G. F. Leonhardt, “Contribuição ao cálculo da temperatura de alimentos que se aquecem por condução: cálculo da temperatura central e da temperatura média para os casos de latas cilíndricas e paralelepípedicas”. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
- [4] R. Gedraite, J. L. F. Bastos, C. Garcia, “A Utilização de Modelagem Matemática para Otimizar o Controle da Temperatura de Alimentos Processados em Autoclaves Estacionárias”, *In Proc. of VIII Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, Vinãs del Mar – Chile, vol.2, pp. 679 – 683, 1998.
- [5] S. A. Klein, & F. L. Alvarado, *Engineering Equation Solver: Manual do Usuário*, F-Chart Software. Middleton, WI, 1996.
- [6] J. Larousse & B. E. Brown, “Food Canning Technology”, New York, Wiley - VCH Inc., 1997.
- [7] T. Ohlsson, & N. Bengtsson, “Minimal processing technologies in the food industry”, Cambridge, CRC Press, 2000.
- [8] A. A. Teixeira & M. O. Balaban, S. P. M. Germer, M. S. Sadahira, R. O. Teixeira Neto, A. A. Vitali, “Heat Transfer Model Performance in Simulation of Process Deviations”, *Journal of Food Science*, vol. 64, no. 3, pp. 488 - 493, 1999.
- [9] A. J. Fontana, B. Wacker, C. S. Campbell, G. S. Campbell, “Simultaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Foods and Soils”. *In 2001 ASAE Annual International Meeting*, California, EUA, 2001.
- [10] S. G. Akterian, “On-line control strategy for compensating for arbitrary deviations in heating-medium temperature during batch thermal sterilization processes”, *Journal of Food Engineering*, vol.39, pp. 1-7, 1999