

# MODELO MATEMÁTICO DE ELEMENTOS FINITOS DE VOLUME APLICADO AO CONTROLE DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS SÓLIDOS E PASTOSOS

VITOR ALEX OLIVEIRA ALVES<sup>♦</sup>, CLAUDIO GARCIA<sup>\*</sup>

<sup>♦</sup>*Escola de Engenharia Mauá*

*Praça Mauá, n° 1, São Caetano do Sul, SP, CEP 09580-900*

<sup>\*</sup>*Laboratório de Automação e Controle, Depto. de Engenharia de Telecomunicações e Controle, EPUSP*

*Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 3, n° 158, Cidade Universitária, São Paulo, SP, CEP 05508-900*

*E-mails: vitoralex.alves@maua.br, clgarcia@lac.usp.br*

**Resumo**— Este artigo apresenta um modelo matemático, fundamentado na técnica dos elementos finitos de volume, que descreve a transferência de calor no interior de alimentos enlatados quando submetidos ao processo de esterilização em autoclaves pressurizadas e determina a letalidade microbiológica associada ao processo. O modelo antecipa a etapa de resfriamento, visando garantir a letalidade desejada sem que haja sobre-processamento do alimento.

**Palavras-chave**— Esterilização, elementos finitos de volume, transferência de calor em alimentos enlatados.

## 1 Introdução

A esterilização térmica de alimentos enlatados em autoclaves pressurizadas é um dos métodos mais utilizados na preservação de alimentos e contribui ao bem-estar nutricional de grande parte da população mundial (TEIXEIRA; TUCKER, 1997). Eliminar os esporos de bactéria(s) presentes em alimentos industrializados que apresentem baixa acidez é o principal objetivo dos processos de esterilização térmica. Este(s) microorganismo(s) é (são) capaz(es) de crescer nos alimentos citados acima e produzir toxinas que, mesmo em quantidades muito reduzidas, são patogênicas ao ser humano, podendo mesmo serem letais (GERMER, 1997).

O processamento térmico de alimentos industrializados, para fins de esterilização comercial<sup>1</sup>, consiste tipicamente no aquecimento dos alimentos enlatados em autoclaves pressurizadas a temperaturas especificadas e por um período de tempo pré-definido, seguido pela etapa de resfriamento. Este tratamento térmico deve ser especificado em função da autoclave / alimento e deve incluir:

- i) tempo de processo (calculado para prover suficiente inativação microbiológica<sup>2</sup> em cada enlatado);
- ii) temperatura de processo para esterilização (determinada pela evolução dos perfis de temperatura que se estabelecem no interior do enlatado);
- iii) temperatura mínima inicial do alimento;
- iv) perfil de pressão e
- v) programa de desaeração da autoclave.

<sup>1</sup> A esterilização comercial é definida como a condição na qual os microorganismos patogênicos (assim como aqueles capazes de se desenvolverem em um produto alimentício submetido a condições de ausência de refrigeração, seja na distribuição ou no armazenamento) são destruídos (TOLEDO, 1994).

<sup>2</sup> Ou letalidade microbiológica desejada para o alimento em questão. Geralmente, o microorganismo alvo da esterilização comercial é o *Clostridium botulinum*.

Os fatores de qualidade e segurança desejados no processo de esterilização exigem grande cuidado no cálculo e controle dos tempos de processamento e, principalmente, do perfil de temperatura da autoclave durante o tratamento térmico, de forma a evitar sub ou sobre-processamento do alimento.

Face aos mesmos requisitos de qualidade e segurança, as indústrias processadoras de alimento devem operar em estreita concordância com as regulamentações vigentes acerca dos alimentos enlatados de baixa acidez propostas por diversas agências governamentais ao redor do mundo. Entre outras exigências, estas regulamentações requerem documentação e registro completo de todos os pontos de controle críticos do processamento de cada lote ou batelada de produto enlatado. Particular ênfase é empregada nos lotes de produto que sofreram desvios de processo não programados, tais como: queda ou falta de energia na planta industrial, queda na geração de vapor de água e queda da temperatura da autoclave durante o processamento.

Estas medidas são de custo elevado e afetam o esforço realizado para alcançar a máxima eficiência no processamento. Grandes investimentos têm sido feitos nos últimos anos para desenvolver sistemas de controle de autoclaves capazes de rápida avaliação, correção e documentação impressa dos desvios que possam ocorrer durante a operação (TEIXEIRA; TUCKER, 1997).

Aos custos mencionados anteriormente, somam-se os gastos relativos ao consumo energético. De fato, a indústria de alimentos enlatados é a líder de consumo de energia nas nações desenvolvidas (DINCER, 1998). Por conseqüência, grande atenção deve ser dada à busca de soluções ótimas para tratamentos térmicos no que concerne ao consumo de energia no processamento de alimentos.

Um fator restritivo importante na escolha do tratamento térmico para esterilizar determinado alimento é a inerente degradação de um atributo de qualidade deste alimento (perda de nutrientes, alteração na cor e/ou sabor, etc) que ocorre concomitantemente à esterilização. Portanto, de todas as combinações tempo-temperatura

que resultem na mesma letalidade microbiológica assumida como aceitável, deve-se escolher aquela que melhor preserve os atributos de qualidade do produto alimentício (STOFOROS, 1995).

Faz-se necessário, portanto, o estudo de uma política de controle do processo de esterilização de alimentos enlatados em autoclaves (aliada a um modelo matemático que reproduza o processo de transferência de calor no interior do alimento enlatado com alto grau de confiabilidade) capaz de garantir:

- i) o nível de letalidade microbiológica desejado;
- ii) o mínimo consumo de energia durante o tratamento térmico e
- iii) a degradação mínima dos atributos de qualidade do produto alimentício.

O presente trabalho descreve um modelo matemático, em que se aplica a técnica dos elementos finitos de volume, capaz de inferir sobre a distribuição de temperatura no interior do alimento enlatado a partir da medição da temperatura da autoclave. Para que a etapa de validação do modelo seja efetuada, são realizados testes de sensibilidade quanto à nodalização (número de elementos de volume considerados) e é avaliado um índice de mérito, calculado a partir de dados experimentais e de simulação computacional. O modelo é responsável também pelo cálculo do valor  $F_p$  (representativo da letalidade microbiológica) associado ao tratamento térmico. Este cálculo é realizado ao se computar antecipadamente a contribuição na letalidade microbiológica da etapa de resfriamento, de forma a se evitar sub ou sobreprocessamento do alimento, garantindo qualidade e economia de energia.

## 2 Fundamentos teóricos para construção do modelo matemático de elementos finitos de volume

### 2.1 Esterilização de alimentos enlatados

A inativação de microorganismos presentes em alimentos enlatados por meio do emprego do calor, denominada esterilização, é uma operação unitária fundamental na indústria de alimentos (TOLEDO, 1994). Este tratamento térmico tem uma única finalidade: destruir, com uma probabilidade de falha conhecida, aqueles microorganismos prejudiciais sob o ponto de vista sanitário ou que causem deteriorações que influam diretamente na estabilidade do alimento (LEONHARDT, 2003).

Em um conceito bastante restrito, a operação de esterilização resulta na total ausência de microorganismos viáveis no produto alimentício. Desta forma, o produto esterilizado poderia ser armazenado por tempo indefinido sem que nenhum dano causado por atividade microbiana seja causado ao alimento. Entretanto, os esporos podem sobreviver a temperaturas muito mais elevadas do que as células vegetativas. Assim sendo, a eliminação dos esporos seria o objetivo principal da esterilização. Em uma situação ideal, quando estes esporos fossem destruídos, não mais existiriam células vegetativas vivas no produto alimentício (TEIXEIRA; BALABAN, 1996).

Em geral, o microorganismo alvo da esterilização é o *Clostridium botulinum*, responsável pela produção de uma toxina letal para o ser humano e que encontra ambiente propício para se desenvolver em alimentos que apresentem baixa acidez. Esta destruição é probabilística. A sobrevivência de 1 em  $10^{12}$  esporos tem sido adotada (e se mostrado satisfatória) por muitas décadas (RANGANNA, 1996 *apud* KUMAR *et al.*, 2001).

Teixeira e Balaban (1996) afirmam que cinco são os fatores que controlam a operação de esterilização:

- i) natureza do produto alimentício: pH, potencial redox e nível de oxigênio presente, entre outros;
- ii) condições de armazenamento após o processamento térmico do produto alimentício;
- iii) resistência térmica dos microorganismos ou esporos alvo da destruição;
- iv) características de transferência de calor do produto alimentício: condutividade térmica, viscosidade, meio de aquecimento, modo de transferência de calor, dimensão e material de construção da embalagem entre outros e
- v) número inicial de microorganismos.

Além destes fatores, o projetista de tratamentos térmicos deve considerar que um processo ótimo de esterilização de alimentos sempre exige um compromisso entre as influências benéficas e destrutivas do calor sobre o alimento. Por um lado, o calor destrói micróbios patogênicos, organismos endógenos e enzimas que tornariam o alimento impróprio para o consumo. Ao mesmo tempo, as concentrações de vitaminas sensíveis ao calor, particularmente a tiamina e a vitamina C são reduzidas (LATHROP; LEUNG, 1980 *apud* DURANCE, 1997).

Stoforos (1995) afirma que o cálculo de um processo térmico requer o conhecimento do valor  $F_p$  alcançado pelo processo em resposta à integração do histórico de temperatura em função do tempo experimentado pelo alimento em seu ponto menos afetado pelo tratamento, referido como ponto frio. A equação básica é:

$$F_p = \int_0^{t_h} 10^{\left(\frac{T-T_{ref}}{z}\right)} dt \quad (1)$$

Na equação (1), tem-se (LEONHARDT, 2003):

$F_p$  = Intervalo de tempo durante o qual o alimento enlatado deve ser aquecido, em um experimento fictício, a uma temperatura de referência ( $T_{ref}$ ) constante, de modo a se obter o mesmo efeito verificado no tratamento térmico (real);

$T$  = Temperatura do ponto mais frio do enlatado em qualquer instante de tempo;

$T_{ref}$  = Temperatura de referência padronizada, geralmente 121,1°C para alimentos de baixa acidez (pH  $\geq$  4,5);

$z$  = Intervalo de temperatura necessário para que a razão entre o número inicial e final de microorganismos seja multiplicada por 10.

Stoforos (1995) refere o cálculo do valor  $F_p$  aos dados oriundos de um único ponto crítico do produto: o

ponto frio. A razão para tal escolha contempla o fato de que se o ponto crítico se torna esterilizado após o processamento, então o restante do produto (que recebe um tratamento térmico mais severo) também esterilizado. Claramente, o conhecimento da localização do ponto crítico é muito importante. No processamento térmico de alimentos enlatados sólidos e pastosos é comum se considerar o ponto crítico como sendo o centro geométrico do volume ocupado pelo produto.

O processo de esterilização de alimentos enlatados é realizado em vasos pressurizados (autoclaves), cuja temperatura é manipulada, segundo um perfil adequado, durante um certo intervalo de tempo determinado *a priori*. As etapas de um ciclo básico de operação são vistas na figura 1, na qual tem-se:  $T_i$ , temperatura inicial da autoclave;  $T_{EX}$ , temperatura de exaustão;  $T_{ES}$ ,

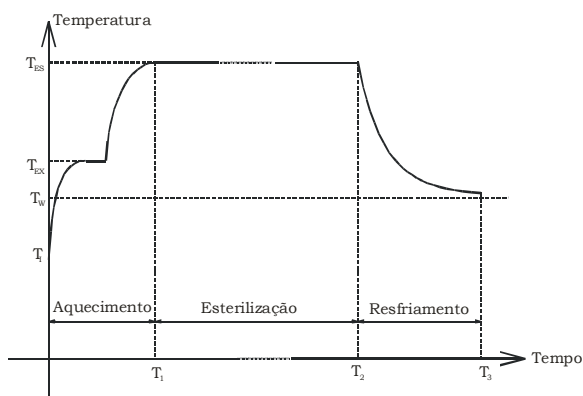


Figura 1. Perfil de temperatura de autoclave durante o processo de esterilização de alimentos enlatados

temperatura de esterilização e  $T_w$ , temperatura da água de resfriamento. Ficam patentes as três fases de operação da autoclave: aquecimento, esterilização e resfriamento. Deve-se notar que a duração da etapa de esterilização (dezenas de minutos) é superior à duração das etapas de aquecimento e resfriamento (da ordem de minutos).

A fase de aquecimento é subdividida nas etapas de exaustão e aquecimento propriamente dito. Na etapa de exaustão, o objetivo é a eliminação do ar existente no interior do equipamento, enquanto que a etapa de aquecimento visa levá-la à temperatura prescrita para a esterilização do alimento.

## 2.2 Transferência de calor no produto alimentício

A intensidade com a qual o tratamento térmico afeta o alimento enlatado depende essencialmente da composição, das características físicas e da microbiota presente no alimento submetido ao tratamento (LEONHARDT, 2003). Ao aliar estas informações a um modelo fiel da transferência de calor no interior do enlatado, o projetista de tratamentos térmicos é capaz de determinar as condições ótimas de processamento.

Um modelo de transferência de calor para a simulação do aquecimento de um corpo sólido, tal como acontece na esterilização de alimentos enlatados, é uma equação matemática capaz de prever a temperatura interna ao longo do tempo em resposta a mudanças de

temperatura aplicadas à superfície do corpo. Para a aplicação em processos de esterilização de alimentos enlatados, este modelo é uma equação diferencial de derivadas parciais de 2ª ordem a duas dimensões que descreve a transferência de calor por condução<sup>3</sup> em um cilindro finito (TEIXEIRA; BALABAN, 1996; TEIXEIRA; TUCKER, 1997):

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

Na equação (2), tem-se:

$T$  = temperatura dos pontos internos do produto em qualquer instante de tempo;

$t$  = tempo de processamento;

$r$  = cota na direção radial no cilindro;

$h$  = cota na direção vertical no cilindro;

$\alpha$  = difusividade térmica do alimento.

As condições de contorno são a temperatura inicial do alimento (ao ser colocado na autoclave) e a equação  $T_{contorno} = T_R(t)$ , sendo  $T_R(t)$  a temperatura da autoclave.

Os perfis de temperaturas no interior do produto alimentício são então obtidos a partir da integração da equação (2). É necessária a solução numérica da equação de transferência de calor seguida de integração numérica desta solução ao longo do tempo de processamento. Esta discretização do sistema é alcançada por meio do uso da técnica das diferenças finitas aplicadas a elementos finitos de volume ( $V_i$ ), supostos isotérmicos e de temperatura  $T_i$ . A cada nó do sistema é associada uma capacitância térmica  $C_i$ , relacionada à inércia térmica do nó analisado.

Assim construído, o sistema nodalizado permite que o *i-ésimo* nó de volume troque energia com um conjunto de nós imediatamente vizinhos. Este fluxo de calor trocado entre o *i-ésimo* nó e seus vizinhos resulta em uma malha de conexões entre os nós, geralmente representada por condutâncias térmicas. Neste estudo, a condutância térmica  $G_{ij}$  representa o grau de facilidade com que o calor flui do *i-ésimo* para o *j-ésimo* nó. O fluxo de calor trocado entre o *i-ésimo* e o *j-ésimo* nó é calculado pela equação (3).

$$\phi_{ij} = G_{ij} \cdot (T_i - T_j) \quad (3)$$

Bastos (1994) afirma que descrever um sistema térmico, utilizando a técnica da nodalização, se resume no emprego de uma malha de capacitâncias e condutâncias térmicas que conduza a um sistema de equações algébrico-diferenciais acoplado. Adotando-se apenas a condução de calor (pois a convecção apresenta

<sup>3</sup> Os mecanismos de transferência de calor predominantes no processo de esterilização de alimentos enlatados em autoclaves pressurizadas são a condução e a convecção. A radiação de calor assume papel meramente secundário, podendo ser descartada. Entretanto, modelos construídos com aquecimento condutivo alcançam desempenhos comparáveis àqueles modelos que fazem uso dos dois mecanismos de transferência de calor, porém com equações (e conseqüentemente implementações) significativamente mais simples (LAROUSSE; BROWN, 1997).

influência desprezível na esterilização de alimentos sólidos e pastosos), a equação (3) assume a forma simplificada:

$$C_i \cdot \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \sum_{j=1}^n G_{ij}^r (T_i - T_j) + \sum_{j=1}^m G_{ij}^a (T_i - T_j) \quad (4)$$

Na equação (4), o sistema embalagem/produto alimentício foi discretizado com  $n$  nós na direção radial e  $m$  nós na direção axial do enlatado e os termos  $G_{ij}^r$  e  $G_{ij}^a$  representam as trocas térmicas condutivas na direção radial e axial, respectivamente.

O modelo da equação (4) contempla hipóteses simplificadoras propostas por Teixeira e Balaban (1996):

- i) a temperatura do produto alimentício é uniforme no instante inicial do processo;
- ii) a temperatura da embalagem cilíndrica é homogênea depois de iniciado o tratamento térmico;
- iii) o coeficiente de transferência de calor, externo à embalagem, é muito elevado;
- iv) a difusividade térmica não varia com o tempo, com a temperatura ou espacialmente no interior do alimento e

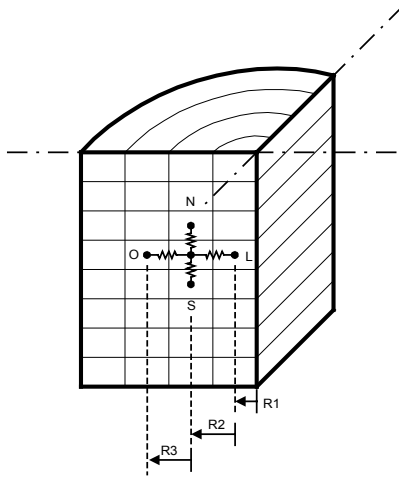


Figura 2. Nodalização típica de um sistema embalagem / produto alimentício

- v) não existe *headspace* no interior da embalagem cilíndrica de altura  $h$  e raio  $r$ .

A figura 2 ilustra uma nodalização típica onde ainda são vistas as conexões do  $i$ -ésimo nó com seus nós vizinhos. Deve-se notar que, devido à simetria, o processo de nodalização cobre somente 1/8 da lata.

Com base na figura 2, a equação (4) se torna:

$$C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = G_{iN} \cdot (T_N - T_i) + G_{iS} \cdot (T_S - T_i) + G_{iL} \cdot (T_L - T_i) + G_{iO} \cdot (T_O - T_i) \quad (5)$$

O primeiro termo de (5) pode ser escrito como:

$$C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = \rho \cdot c_p \cdot V_i \cdot \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \quad (6)$$

Na equação (6),  $\rho$  é o valor médio global da massa específica do produto alimentício,  $c_p$  é o valor médio

global do calor específico do produto alimentício e  $V_i$  é volume do  $i$ -ésimo nó.

As condutâncias térmicas do balanço de energia mostrado na equação (5) são radiais ( $G_{iL}$  e  $G_{iO}$ ) e axiais ( $G_{iN}$  e  $G_{iS}$ ) e seus valores são:

$$G_{iL} = \frac{\pi \cdot K \cdot dh}{2 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (7)$$

$$G_{iO} = \frac{\pi \cdot K \cdot dh}{2 \cdot \ln \frac{R_3}{R_2}} \quad (8)$$

$$G_{iN} = G_{iS} = \frac{\pi \cdot K \cdot (R_2 - R_1)}{4 \cdot dh} \quad (9)$$

Nas equações anteriores,  $K$  representa o valor médio global da condutividade térmica do produto alimentício;  $R$ , com seus índices, são os raios internos ou externos do  $i$ -ésimo nó e  $dh$  é a altura de um nó na direção axial do enlatado.

O modelo desejado é obtido via um sistema de equações que representa as interações entre cada um dos nós do sistema embalagem/produto alimentício.

### 2.3 Cálculo do valor $F_p$ e simulação antecipada da etapa de resfriamento

A letalidade microbiológica acumulada imposta aos microorganismos presentes no produto alimentício é calculada pelo modelo matemático de elementos finitos de volume com base no valor da temperatura no ponto frio do enlatado. Então, o valor  $F_p$  do tratamento térmico é obtido pela solução da equação (1). Este cálculo é feito com o processo ainda em curso e, a cada passo no tempo, o modelo simula também a letalidade adicional associada à fase de resfriamento, se esta se iniciasse naquele instante.

Este cômputo antecipado é realizado ao simular a evolução da temperatura interna do alimento nos próximos dez minutos<sup>4</sup>, se o resfriamento fosse iniciado no instante atual de cálculo. Assume-se aqui uma hipótese simplificadora: a temperatura da autoclave é uniforme e igual à temperatura da água de resfriamento (assumida como 20°C) durante toda a etapa de resfriamento. Esta hipótese não é verdadeira nos primeiros instantes da etapa de resfriamento. No entanto, como a vazão de água necessária ao resfriamento é geralmente elevada, a temperatura no interior da autoclave tende a se estabilizar em poucos minutos e a aproximação adotada se mostra bastante eficaz.

<sup>4</sup> A etapa de resfriamento deve ser de curta duração, de forma que o intervalo de tempo no qual o alimento se encontra em temperaturas favoráveis ao desenvolvimento de bactérias termófilas seja o mais breve possível. Assim, os dez minutos adotados neste estudo são mais que suficientes.

### 3 Validação do modelo matemático

#### 3.1 Testes realizados

Para a validação do modelo matemático construído, que exclui inicialmente a sub-rotina de simulação da etapa de resfriamento, foram usados os dados experimentais colhidos por Gedraite (1999). Neste experimento, o autor instalou elementos sensores de temperatura do tipo DATA TRACE no centro geométrico de duas embalagens metálicas de geometria cilíndrica com 73,3mm de diâmetro por 111mm de altura, contendo patê de coração de alcachofra ( $\alpha = 9,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

O processo de esterilização, cujo alvo para o valor  $F_p$  era de 5min no ponto frio do enlatado, foi realizado forçando-se um distúrbio na pressão de operação da autoclave que foi inicialmente colocada em funcionamento normal. Depois de alcançada a condição de temperatura de esterilização, um aumento brusco na abertura da válvula de dreno causou o distúrbio desejado.

Tabela 1. Resultados experimentais.

Número de nós	$V_p$	$F_p$ acumulado
25	17,68	5,51min
36	16,92	5,62min
49	16,55	5,68min
64	16,47	5,72min
81	16,24	5,75min
100	16,15	5,78min

O modelo foi implementado na linguagem Borland Delphi 6<sup>®</sup>. Os dados de entrada do modelo – dimensões do enlatado, difusividade térmica do alimento, temperatura inicial do alimento (18°C), valor  $z$  do alimento (11min) e temperatura de referência para o cálculo do valor  $F_p$  (121,1°C) – foram aplicados a seis situações de nodalização, discriminadas na Tabela 1.

Em cada situação, foi calculado um índice de mérito (função-perda) utilizado para julgar a acuidade do modelo em relação aos dados experimentais, como descrito na equação (10).

$$V_p = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{experimental}} - T_{\text{modelo}})^2 \quad (10)$$

O valor  $F_p$  acumulado no ponto frio do alimento também foi calculado (de modo a verificar se o projeto do experimento foi adequado) e listado na Tabela 1. Na discretização, sempre foi mantido igual o número de nós nas direções axial e radial.

As figuras 3 e 4 representam os resultados obtidos pela simulação computacional na primeira e última situação de nodalização, respectivamente. Nelas, a linha mais grossa representa a evolução da temperatura simulada no centro geométrico do enlatado. Na figura 5 mostra-se a evolução do parâmetro  $F_p$  para o modelo executado com 100 elementos de volume.



Figura 3. Evolução da temperatura do centro geométrico do enlatado versus simulação computacional com 25 elementos de volume

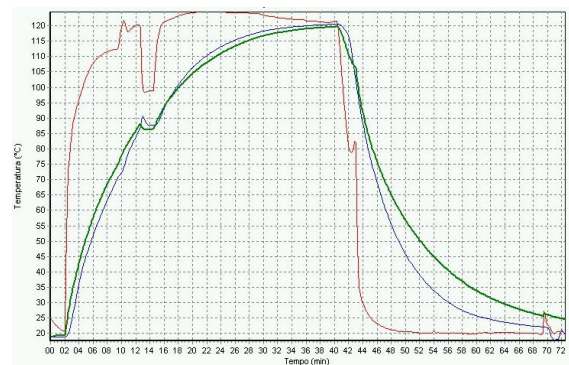


Figura 4. Evolução da temperatura do centro geométrico do enlatado versus simulação computacional com 100 elementos de volume

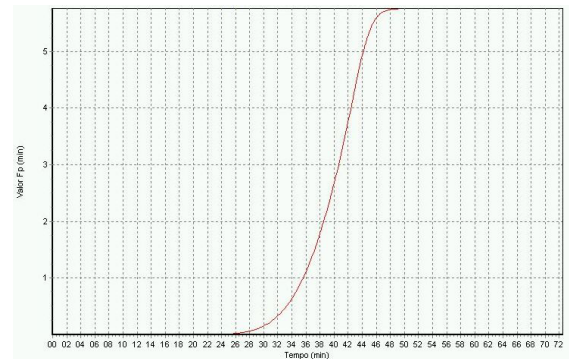


Figura 5. Evolução do valor  $F_p$  calculado no centro geométrico do enlatado na situação de 100 elementos de volume

Verifica-se que com o aumento do número de elementos de volume utilizados na modelagem, o comportamento do modelo se aproxima cada vez mais do real. Entretanto, a melhoria não é tão significativa. Na verdade, o esforço computacional aumenta muito, indicando que uma solução de compromisso deve ser adotada. Nota-se também que houve sobre-processamento do alimento ( $F_p$  ultrapassou os 5min desejados).

#### 3.2 Simulação da etapa de resfriamento

A simulação antecipada da etapa de resfriamento permite que a decisão de controle sobre o término da etapa de aquecimento seja tomada no momento oportuno e visa eliminar o sobre-processamento, evitando-se assim

perdas de atributos de qualidade. Além disso, procura evitar o desperdício de energia na forma de vapor.

Visando verificar a acuidade do modelo em termos da tomada de decisão de encerramento do aquecimento, foi realizado um teste na situação de 100 elementos de volume. Também foi introduzido um novo valor de entrada para o modelo: o valor  $F_p$  alvo do tratamento térmico, neste caso igual a 5min.

A etapa de resfriamento foi simulada por 10min, a cada iteração da resolução numérica da equação (5). O valor do parâmetro  $F_p$  é composto pelo acúmulo, até o instante de análise, devido ao aquecimento somado à



Figura 6. Tomada de decisão sobre o encerramento da etapa de aquecimento

contribuição do resfriamento, caso este se iniciasse no mesmo instante.

A figura 6 mostra a evolução da temperatura do centro geométrico do enlatado, calculada até o instante em que o algoritmo computacional encerrar o aquecimento. Iniciado o resfriamento neste mesmo instante, o valor final desejado para o parâmetro  $F_p$  é atingido, sem risco de sobre-processamento.

Fica patente na figura 6 que o aquecimento deveria ser encerrado decorridos 34min ao invés dos 40min efetivamente gastos. Esta é a causa do sobre-processamento ao qual foi submetido o alimento, fato que foi destacado nos experimentos de validação do modelo matemático. Soma-se a isto a economia de energia que seria realizada caso um sistema de controle acoplasse em si o modelo gerado.

#### 4 Conclusões

Este trabalho exibiu a construção de um modelo matemático, baseado na técnica dos elementos finitos de volume, que foi aplicado ao processo de esterilização de alimentos enlatados sólidos e pastosos.

Os testes realizados indicam alto grau de confiabilidade do modelo, que cresce com o aumento da malha de elementos de volume. No entanto, aconselha-se uma análise profunda do problema, de modo a se encontrar uma solução de compromisso, já que o aumento do número de nós acarreta em um grande aumento do esforço computacional para a solução numérica do sistema de equações do modelo.

A outra face do modelo é a simulação (antecipada) do resfriamento, que também contribui para a letalidade

microbiológica alvo. Isto permite ao algoritmo computacional decidir encerrar o aquecimento, de forma a garantir o valor desejado para o parâmetro  $F_p$  ao final do resfriamento.

O modelo aqui apresentado foi acoplado a um sistema de controle antecipatório do processo de esterilização de alimentos em autoclaves estacionárias. Este sistema é responsável pelo gerenciamento de toda a operação (controle de temperatura da autoclave – nível regulatório, controle das válvulas da autoclave – controle da batelada e decisão de encerramento da etapa de aquecimento – controle antecipatório) e evita a instalação de embalagens instrumentadas em cada batelada (pois a evolução da temperatura do alimento enlatado será inferida pelo modelo). Ademais, a utilização deste sistema de controle antecipatório, visa garantir a obtenção da letalidade microbiológica desejada, por meio da simulação antecipada da etapa de resfriamento.

#### Referências Bibliográficas

- Bastos, J. L. F. (1994). Análise de Termofluido Dinâmica de Reatores Nucleares. Depto. de Tecnologia de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. /Notas de aula/
- Dincer, I. (1998). Heat transfer during heat sterilization and cooling processes of canned products, *Heat and Mass Transfer*, **34**(2-3): 101-5.
- Durance, T. D. (1997). Improving canned food quality with variable retort temperatura processes, *Trends in Food Science & Technology*, **8**(4): 113-18.
- Gedraite, R. (1999). Desenvolvimento e implementação de algoritmo computacional para garantir um determinado nível de letalidade acumulada para microorganismos presentes em alimentos industrializados. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP.
- Germer, S. P. M. (1997). Avaliação dos desvios no processamento térmico de alimentos em conserva, *Informativo FRUTHOTEC*, **3**(2): 113-18.
- Kumar, M. A., Ramesh, M. N. e Rao S. N. (2001). Retrofitting of a vertical retort for on-line control of the sterilization process, *Journal of Food engineering*, **47**(2): 89-96.
- Leonhardt, G. F. (2003). Operações Unitárias da Indústria de Alimento – Enlatamento: sua Tecnologia e Engenharia. Depto. de Engenharia Química e de Alimentos da Escola de Engenharia Mauá. 377p. /Apostila/
- Stoforos, N. G. (1995). Thermal-Process Design, *Food Control*, **6**(2): 81-94.
- Teixeira, A. A. e Balaban, M. (1996). Computer Applications in Thermal Processing of Canned Foods. Campinas: ITAL. /Notas de aula/
- Teixeira, A. A. e Tucker, G. S. (1997). On-line retort control in thermal sterilization of canned foods, *Food Control*, **8**(1): 13-20.
- Toledo, R. T. (1994). Fundamentals of Food Process Engineering, 2ed. Londres: Chapman & Hall.

