



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá  
Brasil

Peotta Zanini, Katy Regina; Kunigk, Leo; Ferreira Leonhardt, Gustavo  
Contribuição ao emprego do modelo da difusão na otimização do processamento térmico de alimentos  
enlatados

Acta Scientiarum. Technology, vol. 33, núm. 3, 2011, pp. 343-349

Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226532004>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Contribuição ao emprego do modelo da difusão na otimização do processamento térmico de alimentos enlatados

Katy Regina Peotta Zanini, Leo Kunigk e Gustavo Ferreira Leonhardt\*

*Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Praça Mauá, 1, 09580-900, São Caetano do Sul, São Paulo, Brasil.*

*\*Autor para correspondência. E-mail: gleonhardt@maua.br*

**RESUMO.** Para alimentos que se aquecem por condução, o conhecimento da propriedade difusividade térmica permite prever a velocidade de penetração de calor no interior do alimento. Dessa maneira, ela é fundamental para o cálculo do processamento térmico, pois conhecendo o microrganismo alvo do processo, sua resistência térmica e o perfil de penetração de calor no alimento é possível estabelecer o processo térmico adequado de forma a garantir a inativação bacteriana capaz de causar risco à saúde e assegurar a possibilidade de deterioração de um mínimo determinado. Empregando o modelo da difusão e o princípio dos processos divididos, este trabalho mostrou que é possível otimizar o tratamento térmico de modo a ser possível reduzir a perda de nutrientes de alimentos enlatados convencionalmente.

**Palavras-chave:** difusividade térmica, tratamento térmico de alimentos.

**ABSTRACT.** Contribution to employment of the diffusion model in the optimization of thermal processing of canned foods diffusion model in thermal processing. For foods that are warmed by conduction, knowledge of the thermal diffusivity property makes it possible to predict the rate of heat penetration inside the food to calculate thermal treatment. Other important variables in this process are the target organism, its heat resistance and the profile of heat penetration in food, making it possible to establish the appropriate thermal process to ensure the inactivation of bacteria capable of causing health risks and ensure the minimum possible deterioration of nutrients. Using the diffusion model and the principle of divided processes, this study showed it is possible to optimize the heat treatment in order to be able to reduce loss of nutrients in canned foods.

**Keywords:** thermal diffusivity, thermal treatment of food products.

## Introdução

O principal objetivo de um tratamento térmico é preservar os produtos alimentícios ao destruir enzimas e a atividade microbiológica prejudicial, tornando o alimento seguro para consumo. A intensidade do tratamento térmico depende da composição, das características físicas e da microbiota do alimento que será processado. As seguintes informações permitem estabelecer o tratamento térmico mais adequado: a) classificação a que pertence o alimento - para cada valor de pH e da atividade de água tem-se um tratamento térmico mais adequado; b) cinética das transformações - destruição de microrganismos, nutrientes etc -, que permite selecionar as transformações de referência; e c) taxa de transferência de calor.

Para alimentos de média acidez, durante o processamento térmico em autoclaves estacionárias, é possível distinguir três fases: aquecimento, esterilização e resfriamento. A fase de aquecimento, por sua vez, pode ser dividida em duas etapas não-

independentes: exaustão - na qual se deve eliminar o ar existente no interior da autoclave - e o aquecimento, para atingir a temperatura determinada para a esterilização. De acordo com Chen e Ramaswamy (2002), a operação de uma autoclave pode ser realizada mantendo a temperatura constante durante a fase de esterilização - processos CRT (Constant Retort Temperature) ou variando a temperatura da autoclave com o tempo, de acordo com um perfil pré-determinado - processos VRT (Variable Retort Temperature).

O projeto de processos CRT para um dado produto alimentício é definido respondendo a duas perguntas básicas: em que temperatura ocorre a esterilização? E durante quanto tempo ocorre esse processo? Para cada combinação temperatura da autoclave e tempo de processamento existe apenas um processo capaz de destruir o microrganismo de referência com a probabilidade de falha recomendada. Em essência, a pergunta a ser respondida é qual combinação garante, ao mesmo

tempo, a esterilidade desejada e o menor nível de destruição de nutriente?

Em contraste, nos processos VRT, a temperatura da autoclave sofre variações ao longo do tempo, de acordo com um perfil previamente estipulado. O responsável pelo processo deve escolher um dentre vários processos viáveis. Sendo a seleção de processos VRT um problema de otimização, dois passos devem ser considerados (CHEN; RAMASWAMY, 2002): 1) desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam o processo com segurança; 2) identificação das condições ótimas baseadas em índices de desempenho tais como uso de energia e perda de propriedades nutricionais e organolépticas.

Teixeira et al. (1975) foram os primeiros a analisar processos VRT, empregando como função objetivo a retenção de tiamina. Os resultados obtidos - melhoria de apenas 2% - levaram os autores a sugerir que esse tipo de processo fosse pouco útil. Mais tarde, Saguy e Karel (1979) afirmaram que os processos VRT ótimos eram muito específicos: cada combinação da geometria da embalagem, do produto analisado e do atributo crítico de qualidade levaria a uma única solução VRT.

Esses resultados iniciais desviaram a atenção dos pesquisadores dos processos VTR. Banga et al. (1991), usando um processo iterativo, computacionalmente eficiente para a busca de uma curva de temperatura para o processo VRT favorável e examinando a retenção de nutrientes, confirmaram a pequena vantagem da técnica VRT em relação à CRT. Esses mesmos autores, trabalhando com a qualidade do alimento em contato com a superfície do recipiente e o tempo de processamento, conseguiram melhora de 20% na qualidade do alimento em contato com a embalagem. No mesmo estudo, os autores indicaram que é possível obter a mesma letalidade e qualidade superficial do alimento alcançada pela melhor técnica CRT, porém com tempos de processamento inferiores em até 16,5%.

Com o desenvolvimento dos microprocessadores e de seus aplicativos, Chen e Ramaswamy (2002) mostraram que o processamento VRT com função exponencial melhora a qualidade do alimento em contato com a superfície e a economia de energia decorrente da redução do tempo de processamento. Yoshimi (2002), empregando como atributo de qualidade o grau de cozimento do alimento, indicou que a temperatura da autoclave pode ser otimizada por uma função do tipo rampa. Por outro lado, Vargas et al. (2000) indicam que é necessário levar em conta grande número de variáveis na determinação do perfil mais adequado para a temperatura da autoclave, justificando a introdução das distribuições de frequências das principais variáveis.

Como se observa o assunto é amplo, permitindo novos trabalhos que possam indicar qual a melhor técnica de operação da autoclave. Dentro dessa ordem de idéias, neste trabalho, procurou-se, empregando o modelo da difusão e o princípio dos processos divididos, estabelecer um método de análise que permita otimizar o tratamento térmico.

## Material e métodos

Considerando que a utilização do processo VRT proporciona melhoria na qualidade do alimento esterilizado em relação ao processo CRT (BANGA et al., 1991; CHEN; RAMANWANY, 2002; SAGUY; KAREL, 1979; TEIXEIRA et al., 1975; YOSHIMI, 2002), o problema a ser resolvido é determinar o melhor conjunto embalagem e perfil de temperatura da autoclave que resulte em melhoria significativa no atributo crítico de qualidade. Para a solução desse problema serão adotadas as seguintes hipóteses:

1) A transformação desejável é a destruição de esporos de *Clostridium botulinum*. Para isso, o valor  $F_M$  adotado será o sugerido por Stumbo et al. (1975) para cada tamanho de lata.

2) O valor de  $z$  que caracteriza a variação da resistência térmica do *Clostridium botulinum* com a temperatura é igual a 10°C.

3) A velocidade das transformações indesejáveis é praticamente a mesma e o valor  $z$  dessas transformações também é praticamente o mesmo, permitindo que a escolha de uma dada transformação desejada represente as demais (LUND, 1977). Assim, a transformação indesejável escolhida foi a destruição de vitaminas, e o valor de  $z$  que caracteriza a variação da resistência térmica dessa transformação com a temperatura adotado é igual a 30°C.

4) Para o nutriente, serão avaliados dois valores de  $F_p$  do tratamento térmico: o primeiro será baseado na temperatura do alimento no ponto crítico e o segundo na temperatura do alimento em contato com a superfície da embalagem.

5) O mecanismo de transferência de calor é o de condução, com a adoção de difusividades térmicas equivalentes para alimentos que apresentem outro mecanismo de transferência de calor. Esse modelo alcança desempenhos comparáveis aos demais modelos, porém com equações mais simples (LAROUSSE; BROWN, 1997).

6) No instante inicial, a temperatura do alimento é uniforme.

7) A temperatura da superfície do alimento em contato com a embalagem atinge instantaneamente a temperatura do meio e é homogênea durante todo o processamento térmico, ou seja, é possível admitir que o número de Biot tende a infinito ( $Bi = \infty$ ).

8) A determinação da difusividade térmica do alimento, a partir da curva de aquecimento do alimento, permite admitir que essa propriedade seja isotrópica e não varie com a temperatura na faixa de temperatura empregada durante o tratamento térmico.

#### Dados iniciais

Serão empregados três conjuntos de dados. Aqueles que caracterizam a cinética das transformações, a embalagem e a transferência de calor no alimento.

Cinética das transformações:  $T_r$ , temperatura de referência ( $^{\circ}\text{C}$ );  $z_M$ , valor  $z$  do microrganismo ( $^{\circ}\text{C}$ );  $z_N$ , valor  $z$  do nutriente ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $F_M$ , valor  $F$  do microrganismo (min.).

Embalagem:  $a$ , largura do recipiente paralelepípedo (m);  $b$ , profundidade do recipiente paralelepípedo (m);  $c$ , altura do recipiente paralelepípedo (m);  $d$ , diâmetro do recipiente cilíndrico (m) e  $h$ , altura do recipiente cilíndrico (m).

Transferência de calor:  $\alpha$ , difusividade térmica do alimento ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

#### Equações básicas

Uma análise das soluções encontradas na literatura, para a placa plana infinita e o cilindro infinito, da equação diferencial parcial da condução mostra que essas duas geometrias possuem uma mesma solução estrutural, podendo ser representadas por meio da equação:

$$u = \sum A_n B_n \exp(-C_n \theta) \quad (1)$$

Nessa equação,  $u$  representa o adimensional de temperatura  $\left[ u = \left( \frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} \right) \right]$  medido no tempo  $t$ .  $A_n$  o coeficiente constante de cada termo da série que depende do formato do corpo e do número de Biot. O parâmetro  $B_n$  é função do formato do corpo, das ordenadas do ponto de medida considerado e do número de Biot. Já a constante  $C_n$  depende do formato e das propriedades físicas do corpo considerado, do seu tamanho e do número de Biot. A Tabela 1 apresenta esses parâmetros para a placa plana infinita e o cilindro infinito.

**Tabela 1.** Parâmetros da equação (1) para a placa plana e o cilindro infinito.

Geometria	Parâmetros da equação (1)		
	$A_n$	$B_n$	$C_n$
Placa plana infinita	$\frac{2 \sin \lambda_n}{\lambda_n + \sin \lambda_n \cos \lambda_n}$	$\cos \left( \frac{\lambda_n x}{r_m} \right)$	$\left( \frac{(\lambda_n)^2 \alpha}{(r_m)^2} \right)$
Cilindro infinito	$\frac{2(Bi)^2}{[(Bi)^2 + (\beta_n)^2] \beta_n J_1(\beta_n)}$	$J_0 \left( \frac{\beta_n r}{r_m} \right)$	$\left( \frac{(\beta_n)^2 \alpha}{(r_m)^2} \right)$

em que:

$$Bi = \left( \frac{h \cdot r_m}{k} \right) \text{ é número de Biot;}$$

$h$  é coeficiente de transferência de massa entre o meio e a superfície do recipiente ( $\text{W m}^{-2} \text{K}$ );

$J_n(x)$  é a função de Bessel de primeira espécie e ordem  $n$ ;

$k$  é condutibilidade térmica do alimento ( $\text{W m}^{-1} \text{K}$ );

$r$  é o raio de medida da temperatura para o cilindro infinito (m);

$r_m$  é a dimensão característica do corpo (m);

$x$  é o plano de medida da temperatura para a placa plana infinita (m);

$\alpha$  é a difusividade térmica do alimento ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );

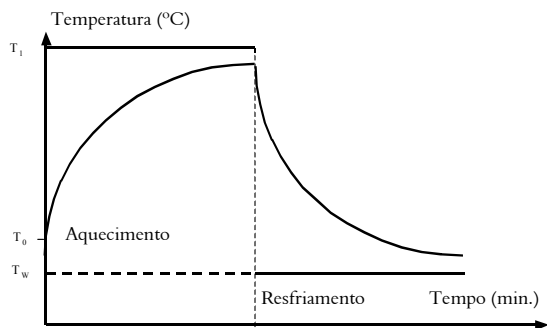
$\beta_n$  representa a raiz  $n$ -ésima positiva da equação  $\beta J_1(\beta) = Bi J_0(\beta)$ ;

$\lambda_n$  representa a raiz  $n$ -ésima positiva da equação  $Bicot \lambda = \lambda$ .

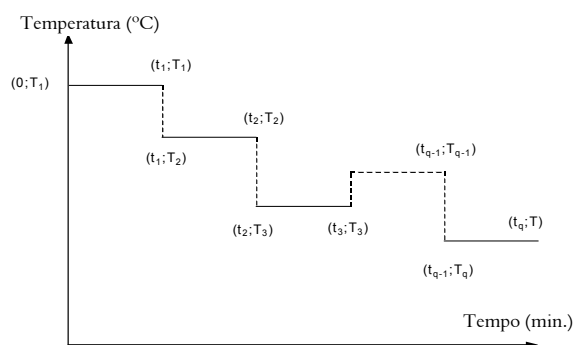
A solução da equação diferencial parcial da condução para corpos de dimensões finitas baseia-se na regra de Newman (1936), que consiste em estabelecer o perfil de temperatura para corpos finitos, a partir da solução obtida para corpos infinitos. O método de Newman, também conhecido como regra da multiplicação, baseia-se no fato de que um corpo finito pode ser obtido pela interseção de dois ou mais corpos infinitos. No caso das condições de contorno para os corpos infinitos serem as mesmas verificadas para os corpos finitos, a solução para o corpo finito pode ser obtida multiplicando-se as soluções para os corpos infinitos. Leonhardt (1976a e b), aplicando a regra da multiplicação às equações da placa plana infinita e do cilindro finito, propôs equações para o cálculo da temperatura central e da temperatura média de recipientes cilíndricos e paralelepípedos.

No enlatamento convencional, durante a operação de esterilização, o alimento já envasado é colocado em autoclaves onde é realizado o tratamento térmico. Geralmente, esse tratamento é constituído de duas etapas: aquecimento e resfriamento, como apresentado na Figura 1. No aquecimento, a condição de distribuição uniforme de temperatura no instante inicial, geralmente prevalece, e a maioria dos autores é unânime em adotá-la. Já no resfriamento, se a autoclave não é dotada de sistema de agitação dos recipientes, a hipótese de distribuição inicial de temperatura uniforme não é verdadeira. Dessa forma, não é possível o emprego da Equação (1). Em alguns casos, a temperatura do meio pode variar como na (Figura 2). Ball e Olson (1957) classificaram esse tipo de tratamento térmico como sendo um processo dividido. Nesse caso, para  $t = t_q$  a temperatura inicial

do alimento não é uniforme, ou seja, no instante  $t = t_{q-1}$  não se tem distribuição uniforme de temperatura.



**Figura 1.** Etapas do tratamento térmico realizado no enlatamento convencional.



**Figura 2.** Variação da temperatura do meio durante um tratamento térmico.

A solução da equação diferencial parcial da condução quando não ocorre distribuição uniforme de temperatura, não é simples. Para um cilindro infinito, Carslaw e Jaeger (1959), admitindo  $Bi = \infty$ , indicaram que a previsão da temperatura em função do tempo, quando a condição de distribuição uniforme de temperatura não é verificada, pode ser estimada por meio da equação:

$$T_1 - T = \frac{2}{r_m} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_j R)}{J_1^2(\beta_j)} \exp(-\beta_j^2 Fo) \int_0^{r_m} r f(r) J_0(\beta_j R) dr \quad (2)$$

Nessa equação,  $f(r)$  representa uma função de  $r$  que fornece a distribuição inicial de temperatura. A integral contida na equação (2) deve ser avaliada graficamente, tornando trabalhoso seu emprego.

No caso da Figura 3, Hayakawa e Ball (1969) apresentaram que é possível prever, com boa precisão, a temperatura ( $T$ ) para  $t = t_q$ . Para tanto é necessário aplicar o teorema de Duhamel (CARLAW; JAEGER, 1959) às equações desenvolvidas para a condição de distribuição uniforme de temperatura. A aplicação desse teorema à equação (1) fornece:

$$T = T_q + \sum_{i=1}^{q-1} (T_i - T_0) u(L - L_i) - \sum_{i=1}^q (T_i - T_0) u(L - L_{i-1}) \quad (3)$$

### Análise preliminar

Conhecendo-se a geometria e as dimensões dos recipientes é possível selecionar a equação que permite prever a variação da temperatura em função do tempo. No caso de recipientes cilíndricos, as seguintes condições são possíveis (LEONHARDT, 1976a e b): caso  $(d/h) < 0,25$  a geometria é de um cilindro infinito; caso  $0,25 \leq (d/h) \leq 4,00$  tem-se cilindro finito; caso  $(d/h) > 4,00$  a geometria pode ser aproximada por uma placa plana. No caso de recipientes paralelepípedicos, considerando que  $c \geq b \geq a$ , as seguintes condições são possíveis (Leonhardt, 1976a e b):  $(c/a) \geq (b/a) \geq 4,00$  a geometria pode ser aproximada por uma placa plana; caso  $(c/a) > 4,00$  e  $(b/a) \leq 4,00$  tem-se um paralelepípedo de seção retangular de dimensões  $a$  e  $b$  e altura infinita; caso  $4,00 > (c/a) > (b/a)$  a geometria corresponde a um paralelepípedo finito de dimensões  $(a, b, c)$ .

### Processo de otimização

Considerando o objetivo do presente trabalho, serão analisados dois tipos de tratamento térmico: o tratamento CRT, em que a temperatura da autoclave obedece ao modelo proposto na Figura 1; e contraposto a esse, será analisado o processo VRT em que a temperatura da autoclave obedece a um modelo do tipo apresentado na Figura 2. Tanto no caso da Figura 1, quanto no caso da Figura 2, no resfriamento ou no segundo intervalo de tempo, a temperatura inicial do alimento não é mais constante, sendo necessário empregar a Equação (3) proposta por Hayakawa e Ball (1969). Uma vez que há uma infinidade de processo VRT possíveis, o procedimento adotado segue os seguintes passos:

- 1) inicialmente, estabelece-se o processo CRT que proporcione a esterilidade desejada;
- 2) com base nesse processo, calcula-se um tempo de tratamento térmico 20% inferior ao tempo de tratamento térmico que forneceu a esterilidade desejada;
- 3) com esse tempo procura-se estabelecer uma programação de temperatura para a autoclave que obedeça ao padrão apresentado na Figura 2;
- 4) para isso, inicia-se o processo com uma temperatura inferior a  $T_1$  e, obedecendo ao tempo calculado anteriormente, varia-se a temperatura da autoclave de modo que o valor  $F_{PN}$ , calculado na

superfície do recipiente, seja inferior àquele obtido no tratamento CRT;

5) calcula-se o valor  $F_{PM}$  que deve ser igual ao sugerido por Stumbo et al. (1975);

6) simultaneamente, é calculado o  $F_{PN}$  na superfície do recipiente que deve ser inferior àquele obtido no tratamento CRT;

7) o tratamento selecionado é aquele que obedece às duas condições anteriores.

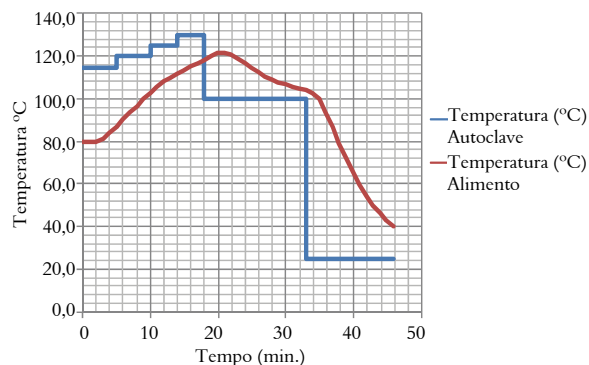
#### Avaliação do tratamento térmico

Para cada tratamento térmico, o tempo de processamento foi determinado com base na esterilidade, impondo que o valor  $F_p$  do tratamento térmico referenciado ao microrganismo fosse igual ao valor  $F_M$  do microrganismo selecionado de acordo com os critérios propostos por Stumbo et al. (1975). Tendo obtido a esterilidade desejada, determinou-se o valor  $F_p$  do tratamento térmico referenciado ao nutriente tanto para a temperatura do ponto frio, quanto para a temperatura do alimento em contato com a superfície da embalagem.

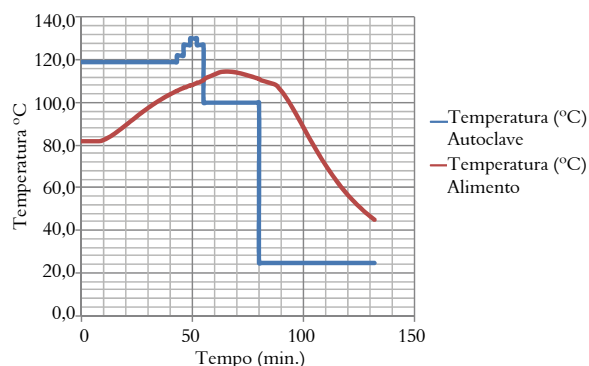
#### Resultados e discussão

Considerando que há uma infinidade de combinações possíveis entre as variáveis temperatura e tempo em processos VRT para um conjunto alimento, embalagem e transformações selecionadas, selecionaram-se três conjuntos embalagem, alimento - caracterizado pela difusividade térmica - e microrganismo de referência. Para cada conjunto, inicialmente, calculou-se o tempo de processamento para o processo CRT a uma temperatura de esterilização de  $121,1^\circ\text{C}$ , com base no valor  $F_M$  recomendado por Stumbo et al. (1975). O tempo de processamento e o valor  $F_{PN}$  obtidos para cada conjunto foram empregados como base para comparação com o processo VRT, de acordo com método de análise proposto. As Figuras 3, 4 e 5 apresentam os processos VRT para cada conjunto selecionado.

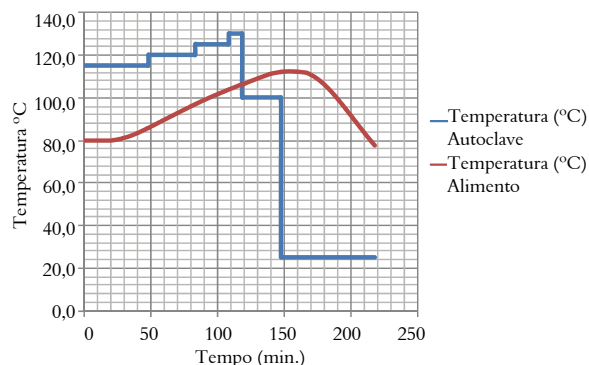
Observa-se que as dimensões da lata afetam significativamente o tempo necessário para se atingir o tratamento térmico desejado. Verifica-se uma elevação do valor  $F_p$  de 66% quando o volume da lata passa de 130 para 3.100 mL. Verifica-se também que pelo maior tempo que o produto permanece sob aquecimento, lata 603 x 700, a temperatura do produto não precisa atingir  $121^\circ\text{C}$  para se obter a esterilização do produto bastando para tanto atingir uma temperatura de  $118^\circ\text{C}$ .



**Figura 3.** Variação da temperatura da autoclave e do alimento em função do tempo para o processo VRT - Lata 202X204,  $\alpha = 2,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ,  $F_{PM121,1^\circ\text{C}} = 3,49 \text{ min}$ .



**Figura 4.** Variação da temperatura da autoclave e do alimento em função do tempo para o processo VRT - Lata 300x407,  $\alpha = 1,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ,  $F_{PM121,1^\circ\text{C}} = 4,91 \text{ min}$ .



**Figura 5.** Variação da temperatura da autoclave e do alimento em função do tempo para o processo VRT - Lata 603x700,  $\alpha = 2,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ,  $F_{PM121,1^\circ\text{C}} = 5,81 \text{ min}$ .

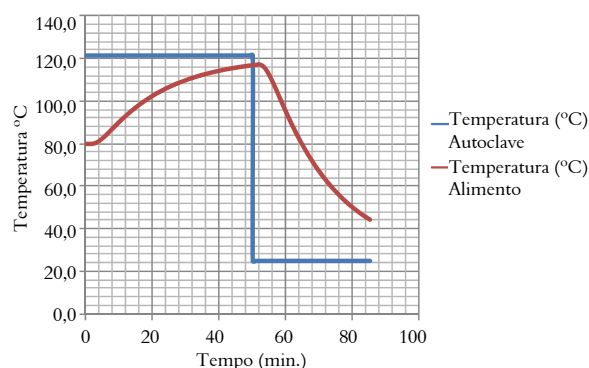
A Tabela 2 apresenta o tempo de processamento, o valor  $F_{PM}$  calculado para o ponto central e o valor  $F_{PN}$  calculado para o ponto central e a superfície do alimento. Os resultados obtidos indicam que, em relação ao tratamento CRT, o tratamento VRT apresenta redução no valor  $F_{PN}$  e no tempo de processamento, como relatado na bibliografia (BANGA et al., 1991; DURANCE et al., 1997; DURANCE, 1997; YOSHIMI, 2002), indicando ser

possível obter tratamentos térmicos que, além de reduzir o tempo de processamento, ainda melhore a qualidade final do alimento processado.

**Tabela 2.** Tempo de processamento, valor  $F_{PM}$  calculado no ponto central e  $F_{PN}$  calculado no ponto central e na superfície para os três conjuntos - embalagem, alimento e microrganismo de referência - selecionados.

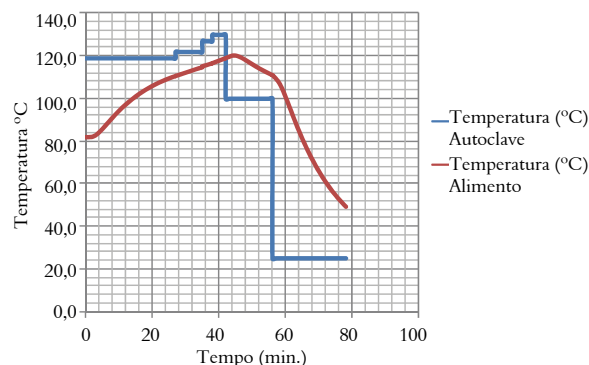
Embalagem	Processamento	Tempo de Processamento (min.)	Valor $F_{PM}$ (min.)	Valor $F_{PN}$ (min.)	
				Ponto central	Superfície
202x204	CRT	23	3,86	9,98	23,0
	VRT	18	3,50	8,23	23,0
300x407	CRT	62	5,06	24,36	62,0
	VRT	55	4,95	24,26	60,3
603x700	CRT	126	5,91	43,3	126,0
	VRT	118	5,88	40,0	121,7

O tempo de processamento encontrado, tanto na técnica CRT quanto na técnica VRT, para lata cilíndrica 603 x 700, sugere a conveniência de se estudar o emprego de embalagens flexíveis. Consultando a Volpak, a embalagem flexível que fornece um volume compatível com o volume da lata 603 x 700 tem as dimensões: 22,6 cm por 31,5 cm e espessura de 4,3 cm - 3.061 cm<sup>3</sup> contra 3.069 cm<sup>3</sup> fornecidos pela lata. Para essa embalagem, o processo CRT que confere um valor  $F_{PM} = 5,81$  min é apresentado na Figura 7. Para esse processo, o valor  $F_p$  referenciado ao nutriente, calculado para o ponto frio e para a superfície, é igual a  $F_{PN} = 21,5$  min e  $F_{PN} = 50,0$  min, respectivamente.



**Figura 7.** Variação da temperatura da autoclave e do alimento em função do tempo para o processo CRT – Embalagem flexível (22,6 x 31,5 x 4,3 cm),  $\alpha = 2,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .

A Figura 8 apresenta um dos muitos processos VRT que podem ser empregados para a embalagem flexível selecionada. Para esse processo, o valor  $F_p$  referenciado ao microrganismo é igual 5,83 min. Já o valor  $F_p$  referenciado ao nutriente, calculado para o ponto frio e a superfície, é igual à  $F_{PN} = 17,8$  min. e  $F_{PN} = 48,5$  min., respectivamente.



**Figura 8.** Variação da temperatura da autoclave e do alimento em função do tempo para o processo VRT – Embalagem flexível (22,6 cm x 31,5 cm x 4,3 cm),  $\alpha = 2,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .

## Conclusão

Confirmando o observado na bibliografia especializada, é possível, empregando a técnica VRT de operação da autoclave, melhorar o processo de esterilização de alimentos, mostrando que há muito que fazer na pesquisa de melhores tratamentos térmicos.

O sistema de análise proposto neste trabalho, baseado nas equações integradas da difusão do calor, permite aperfeiçoar o tratamento térmico. A técnica proposta pode servir de base para estabelecer um método de simulação que permita melhorar ainda mais os atuais tratamentos.

O tamanho do recipiente influi diretamente na melhoria encontrada e o emprego de embalagens flexíveis contribui para reduzir o tempo de processamento em até 50%, melhorando a qualidade final do alimento conservado.

## Referências

- BALL, C. O.; OLSON, C. W. **Sterilization in food technology**. Theory, Practice and Calculation. New York: McGraw-Hill, 1957.
- BANGA, J. R.; PEREZ-MARTIN, R. I.; GALLARDO, J. M.; CASARES, J. J. Optimization of the thermal processing of conduction-heated canned foods: study of several objective functions. **Journal of Food Engineering**, v. 14, n. 1, p. 25-51, 1991.
- CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959.
- CHEN, F.; RAMASWAMY, H. Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms. **Journal of Food Engineering**, v. 53, n. 3, p. 209-220, 2002.
- DURANCE, T. D. Improving canned food quality with variable retort temperature processes. **Trends in Food Science and Technology**, v. 8, n. 4, p. 113-118, 1997.
- DURANCE, T. D.; DOU, J.; MAZZA, J. Selection of Variable retort temperature processes for canned salmon.

- Journal of Food Process Engineering**, v. 20, n. 1, p. 65-76, 1997.
- HAYAKAWA, K.; BALL, C. O. Charts for calculating average temperature of thermally conductive food in a cylindrical can during heat processing. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v. 2, n. 10, p. 12-19, 1969.
- LAROUSSE, J.; BROWN, B. E. **Food canning technology**. New York: Wiley-VCH, 1997.
- LEONHARDT, G. F. Estimation of the central temperature of thermally conductive foods in cylindrical and rectangular cans during heat processing. **Journal of Food Science**, v. 41, n. 3, p. 685-690, 1976a.
- LEONHARDT, G. F. Estimation of the average temperature of thermally conductive foods in cylindrical and rectangular cans during heat processing. **Journal of Food Science**, v. 41, n. 3, p. 691-695, 1976b.
- LUND, D. B. Design of thermal processes for maximizing nutrient retention. **Food Technology**, v. 31, n. 2, p. 71-78, 1977.
- NEWMAN, A. B. **Heating and cooling rectangular and cylindrical solids**. Canadá: Industrial and Engineering Chemistry, 1936. p. 545-548.
- SAGUY, I.; KAREL, M. Optimal retort temperature profile in optimizing thiamine retention in conduction-type heating of canned foods. **Journal of Food Science**, v. 44, n. 5, p. 1485-1490, 1979.
- STUMBO, C. R.; PUROHIT, K. S.; RAMAKRISHNAN, T. V. Thermal process lethality guide for low-acid foods in metal containers. **Journal of Food Science**, v. 40, n. 6, p. 1316-1323, 1975.
- TEIXEIRA, A. A.; ZINMEISTER, G. E.; ZAHRADNIK, J. W. Computer simulation of variable retort control and container geometry as a possible means of improving thiamine retention in thermally processed foods. **Journal of Food Science**, v. 40, n. 4, p. 656-659, 1975.
- VARGAS, S.; OLIVEIRA, J.; SMOUT, C.; HENDRICKX, M. Modeling temperature variability in batch retorts and its impact on lethality distribution. **Journal of Food Engineering**, v. 44, n. 3, p. 163-174, 2000.
- YOSHIMI, T. Retort temperature profile optimum quality during heat sterilization of heat conductive food in cans. **Journal of Food Technology**, v. 81, n. 7, p. 651-660, 2002.

*Received on November 18, 2009.*

*Accepted on October 26, 2010.*

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.