

## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

*Thermal history errors evaluation in heat processed foods with internal temperature registrors*

### Autores | Authors

✉ **Pedro Esteves Duarte  
AUGUSTO**

Universidade Estadual de Campinas  
(UNICAMP)  
Faculdade de Engenharia de Alimentos  
(FEA)  
Colégio Técnico de Campinas (COTUCA)  
Departamento de Tecnologia de Alimentos  
(DTA)  
Caixa Postal: 6121  
CEP: 13083-862  
Campinas/SP – Brasil  
e-mail: pedro@cotuca.unicamp.br

**Marcelo CRISTIANINI**

Universidade Estadual de Campinas  
(UNICAMP)  
Faculdade de Engenharia de Alimentos  
(FEA)  
Departamento de Tecnologia de Alimentos  
(DTA)  
olecram@fea.unicamp.br

### Resumo

O dimensionamento de tratamentos térmicos de alimentos pode ser realizado através da utilização de sensores de temperatura inseridos através da embalagem e conectados a aquisitores de dados, porém de forma pouco prática. A utilização de sistemas compactos (SC), que reúnem um sensor e um registrador, é tida como mais simples, porém pode resultar em grandes desvios devido à condutividade térmica do material e seu tamanho. O presente trabalho avaliou a influência da utilização de um SC comercial no processo térmico de duas latas (L1 e L2) contendo um alimento modelo condutivo (alimento infantil, AMk) ou convectivo (água, AMh) através da modelagem matemática. Simulou-se processo de aquecimento por vapor em condensação (121 °C) até valor de esterilização (Fp) igual a 8,0 min ( $z = 10$  °C; *C. botulinum*) para AMk (em L1 e L2); e água a 60 °C até Fm (médio da massa) de 15 UPs ( $z = 6,94$  °C, onde 1 unidade de pasteurização (UP) = 60 °C/1 min) para AMh (em L1). O SC consiste em um cilindro curto de aço inoxidável 316 L de 40 mm de diâmetro e 11 mm de altura com uma sonda rígida de mesmo material, cuja extremidade contém um RTD. Considerou-se o SC disposto internamente, apoiado no fundo das latas. A extremidade do RTD foi ajustada no PF do sistema (determinado previamente) e no seu centro geométrico (CG), para AMk; e em um terço da altura para AMh (PF tradicional). A presença do SC resultou em aumento de 13 a 63% nos valores de esterilização para o alimento condutivo, e apenas 2 a 4% no convectivo, indicando maior homogeneidade no tratamento térmico de produtos líquidos e menor influência da presença do SC. Conclui-se que a utilização de SC para dimensionamento de processos térmicos pode resultar em grandes desvios nos valores de F obtidos, principalmente para alimentos condutivos, levando a uma superestimativa do processo com conseqüente subprocessamento do produto.

**Palavras-chave:** Modelamento matemático; Análise de elementos finitos (FEA); Análise de volumes finitos (FVA); Fluidodinâmica computacional (CFD); Inativação microbiana; Esterilização; Controle de processo.

## ■ Summary

Thermal processes design can be achieved by the use of thermal sensors passed through packaged material and connected to data loggers, but in an impractical way. The use of compact systems (SC), formed by a sensor and a recorder, can be considered quite easy and useful. On the other hand, it deviations due thermal conductivity and size of the device may occur. The present work evaluated the influence of a commercial SC in thermal process of two commercial cans (L1 and L2) with a conductive (baby food, AMk) or convective food (water, AMh), by mathematical modeling. The thermal process were evaluated considering steam processing (121 °C) up to sterilization value (Fp) of 8,0 min ( $z = 10$  °C; *C. botulinum*) for AMk (L1 e L2); and a 60 °C water-bath until Fm (mass mean) of 15 UPs ( $z = 6,94$  °C, 1 pasteurization unit (UP) = 60 °C/1 min) for AMh (L1). The SC is formed by a stainless still (316 L) short cylinder, with 40 mm of diameter and 11 mm of high, and a rigid probe with a RTD in its end. The SC was kept in the bottom of the can, with its probe in the cold spot (PF) of the system or in its geometric center (CG) for AMk; and in 1/3 of can's high for AMh (conventional PF). The SC presence resulted in sterilization values 13 to 63% higher for AMk, and only 2 to 4% higher for AMh, showing that the heat process of liquids (convective heating) can be more homogeneous and less influenced by the presence of the sensor. It was conclude that the use of SC for thermal process design can result in great deviations in F values, particularly in conductive foods, leading to a process super-estimative and sub-processes of food.

**Key words:** *Mathematical modeling; Finite element analysis (FEA); Finite volume analysis (FVA); Computational fluid dynamics (CFD); Microbial inactivation; Sterilization; Process control.*

## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.

### 1 Introdução

O tratamento térmico é um dos métodos mais utilizados para a conservação de alimentos (GHANI et al., 2001a), dos quais a *appertização* ainda é o método de conservação mais efetivo, mesmo quando comparado aos recentes avanços de outras técnicas (FARID e GHANI, 2004; GHANI et al., 1999a).

O dimensionamento do tratamento térmico deve levar em consideração as características de transferência de calor do meio de aquecimento para o produto e através deste, deve considerar propriedades químicas, físicas e microbiológicas inerentes ao alimento, características de sua embalagem e do equipamento/meio de aquecimento e resfriamento, balanceado de modo a garantir a segurança no consumo com menores alterações sensoriais, nutricionais e menor custo (AUGUSTO et al., 2008a).

Para o correto dimensionamento do processo, a temperatura do ponto frio (PF) do produto deve ser conhecida ao longo do tratamento térmico (NICOLĂI et al., 1998). A determinação da história térmica pode ser obtida através da utilização de sensores de temperatura (termopares ou dispositivos de medição de temperatura por resistência elétrica – RTDs) inseridos através da embalagem e posicionados no ponto frio. A utilização de aquisitores de dados, entretanto, possui o inconveniente de expor o equipamento a condições adversas, além de demandar a utilização de fios e cabos, tornando pouco prática a realização de experimentos.

O mercado apresenta como solução mais simples a utilização de sistemas compactos (SC) que reúnem um sensor (em geral RTDs) e um registrador. Esse sistema pode ser utilizado dentro da embalagem durante o processo térmico, e depois conectado a uma base para coleta dos dados.

A utilização de termopares ou outros dispositivos metálicos podem influenciar o fluxo de calor para o produto devido à alta condutividade térmica dos materiais (DENYS et al., 2003). Ecklund (1956) avaliou tais erros em seu sistema projetado para fixação de termopares em latas, observando taxa de aquecimento mais alta. Zhang et al. (2002) observaram erros de até 27% do valor de  $F_p$  para produto condutivo esterilizado em latas com o sistema de Ecklund. Kanellopoulos e Povey (1991) utilizaram modelos matemáticos para estimativa dos erros no processo de esterilização de latas devido à condutividade dos termopares tipo T de diversos diâmetros. Observaram erros de até 2 °C no ponto frio do produto, que resultaram em subprocessamento. Marra e Romano (2003) utilizaram modelagem matemática na avaliação de tratamentos térmicos de alimentos condutivos contendo sistemas compactos (SC), observando erros de até 13% nos valores de  $F_p$ . Não se observa na literatura, traba-

lhos semelhantes em relação ao tratamento térmico de alimentos convectivos.

Além de aumentarem a taxa de aquecimento do produto, Kannan e Sandaka (2008), Ghani (2006), Ghani e Farid (2006), Varma e Kannan (2006), Farid e Ghani (2004), Ghani et al. (2002a), Ghani et al. (2001a), Kumar e Bhattacharya (1991) e Brandon et al. (1984) observam que a inserção de termopares para medição de temperaturas ao longo de tratamento térmico de alimentos convectivos pode causar distúrbios no fluxo de líquido, podendo resultar em mudança na localização da região de aquecimento mais lento (RAML) ou no valor de esterilização (F).

A avaliação de processos térmicos através de modelamento matemático tem sido feita com êxito por diversos autores, inclusive na estimativa de erros no processo a partir de diferentes fatores, tais como: utilização de termopares e SCs (MARRA e ROMANO, 2003; NICOLĂI et al., 1998; KANELLOPOULOS e POVEY, 1991); erros na localização de termopares (PETERSON e ADAMS, 1985); variação nas características do meio de aquecimento (AUGUSTO et al., 2008a; VARGA et al., 2000a; 2000b); e variações nas propriedades térmicas dos alimentos (AUGUSTO et al., 2008a).

A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma técnica numérica de resolução de equações que governam o escoamento de fluidos e transferência de calor em uma determinada geometria. Consiste na resolução numérica e simultânea das Equações de Transporte de Navier-Stokes, que descrevem a conservação de massa, momento e energia e de equações de estado (NORTON e SUN, 2006; SCOTT e RICHARDSON, 1997).

No caso de alimentos condutivos, a transferência de calor é descrita pela Equação de Fourier, cuja resolução numérica é necessária para geometrias complexas e/ou condições de contorno variáveis (NICOLĂI et al., 1998).

A análise numérica, em ambos os casos, pode ser realizada através de várias formas de discretização do modelo em questão. As três formas mais importantes são as metodologias de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos (NORTON e SUN, 2006; NICOLĂI et al., 2001). O método de diferenças finitas possui limitações na maioria das aplicações devido às complexas geometrias envolvidas. No método de elementos finitos (FEM, ou análise de elementos finitos – FEA), a solução das equações diferenciais é aproximada para cada elemento por polinômios que relacionam os valores de determinada propriedade em seus nós (NICOLĂI et al., 2001). No método de volumes finitos (FVA), as equações diferenciais são aproximadas através de balanços da propriedade envolvida (massa, quantidade de movimento, entalpia) por integração sobre volumes elementares (volumes finitos) (NICOLĂI et al., 2001; MALISKA, 1995).

## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.

Dessa forma, a resolução das equações ocorre no nível de volumes elementares, próximo do infinitesimal desejado com a resolução numérica (MALISKA, 1995), sendo, portanto, a técnica mais utilizada nos programas comerciais de CFD (NORTON e SUN, 2006).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da utilização de um SC comercial no processo térmico de duas latas (L1 e L2) contendo um alimento modelo condutivo (alimento infantil, AMk) ou convectivo (água, AMh) através da modelagem matemática (FVA - condutivo; CFD - convectivo).

## 2 Material e métodos

### 2.1 Embalagens e sistema compacto para registro de temperatura (SC)

Foram utilizadas duas latas cilíndricas de folha de Flandres comerciais, L1 e L2. L1 possui 315 mL de volume, 75 mm de altura e 73 mm de diâmetro; L2 possui 860 mL, com 114 mm de altura e 98 mm de diâmetro (Figura 1).

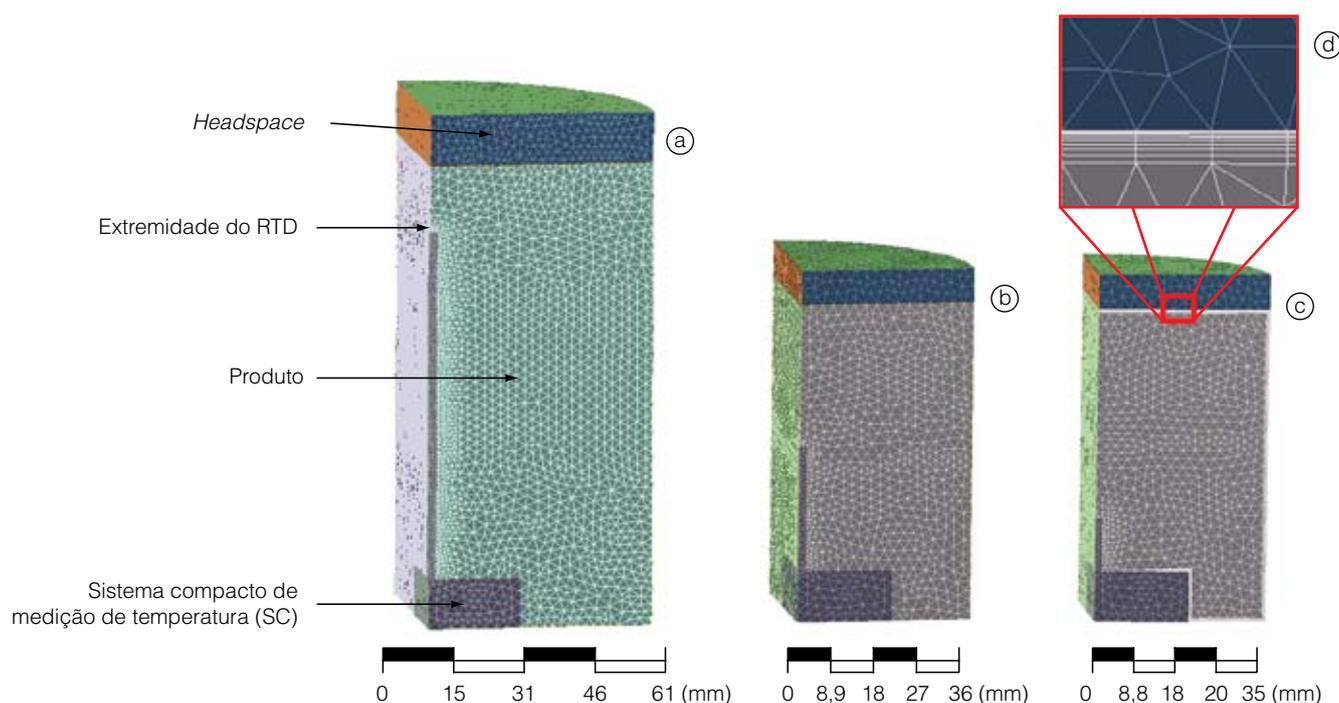
Considerou-se um sistema compacto para registro de temperatura (SC) disponível comercialmente, sendo seus dados obtidos a partir do catálogo disponibilizado pelo fabricante. Consiste em um cilindro curto de aço inoxidável 316 L de 40 mm de diâmetro e 11 mm de altura com uma sonda rígida do mesmo material, cuja extremidade contém um RTD (Figura 1).

### 2.2 Modelo matemático

As simulações foram realizadas através de análise de CFD, utilizando-se o programa Ansys CFX 11.0 (Ansys Inc., EUA), baseado na análise de volumes finitos (FVA). No caso do alimento convectivo, as Equações de Transporte de Navier-Stokes são resolvidas para a malha, enquanto apenas a Equação de Fourier é resolvida na análise do alimento condutivo. Devido à simetria axial das embalagens, considerou-se apenas um quarto delas na elaboração do modelo tridimensional, gerado a partir de revolução das áreas decorrentes das dimensões dos corpos.

Considerou-se o SC disposto internamente, apoiado no fundo das latas. Nas simulações do alimento condutivo (AMk), a extremidade do RTD foi ajustada no ponto frio do sistema (PF), determinado previamente, e no seu centro geométrico (CG). Nas simulações do alimento convectivo (AMh), o RTD foi disposto a um terço da altura de líquido, ponto frio tradicional de alimentos convectivos (KUMAR et al., 1990). A Figura 1 apresenta as duas latas, com o SC disposto no ponto frio do sistema condutivo a), centro geométrico do sistema condutivo b); e a um terço da altura do sistema convectivo c).

Os modelos foram compostos por três partes: alimento modelo, *headspace* e SC. Utilizou-se água como alimento modelo convectivo (AMh) e o alimento infantil descrito por Pinho e Cristianini (2006 e 2005) como o alimento modelo condutivo (AMk), considerando-se o



**Figura 1.** L2 com alimento condutivo e extremidade do RTD localizada no ponto frio do sistema, previamente determinado a); L1 com alimento condutivo e extremidade do RTD localizada no centro geométrico da lata b); L1 com alimento convectivo e extremidade do RTD localizada a um terço da altura do líquido c); detalhe do refino da malha nas extremidades do líquido d).

## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.

*headspace* com 10% do volume das latas, segundo especificações do Codex Alimentarius (1981). Utilizaram-se as propriedades físicas do alimento infantil e *headspace* (camada condutiva de ar saturado, como descrito por Pinho e Cristianini, 2005 e Varga et al., 2000a) descritas por Pinho e Cristianini (2006 e 2005). Considerou-se o SC maciço, com as propriedades físicas do aço inoxidável 316 L descritas por Incropera e DeWitt (2003), e a resistência térmica das latas desprezível, de acordo com o afirmado por Kumar et al. (1990) e Ghani et al. (1999a).

A malha foi gerada com dimensões máximas dos elementos de 2 mm (VARMA e KANNAN, 2006) (Figura 1). Para as simulações do alimento convectivo, por CFD, utilizou-se refino nas bordas do fluido segundo expansão geométrica de fator 1,3 (VARMA e KANNAN, 2006; 2005) (Figura 1d), região com maior gradiente de temperatura e velocidade (KUMAR e DILBER, 2007), como utilizado por diversos autores (KANNAN e SANDAKA, 2008; GHANI e FARID, 2006; VARMA e KANAN, 2006; 2005; FARID e GHANI, 2004; GHANI et al., 2002a; GHANI et al., 1999a; 1999b; KUMAR e BHATTACHARYA, 1991; KUMAR et al., 1990; DATTA e TEIXEIRA, 1988; 1987). A lata L1 teve 88.867 elementos para AMk e 114.047 para AMh, enquanto a L2 teve 245.767 elementos.

Foram utilizadas as seguintes considerações e condições iniciais, frequentemente utilizadas na literatura (KANNAN e SANDAKA, 2008; 2006; GHANI, 2006; GHANI e FARID, 2006; CHEN et al., 2005; VARMA e KANNAN, 2005; FARID e GHANI, 2004; DENYS et al., 2004; GHANI et al., 2002a; 2002b; 2002c; GHANI et al., 2001a; 2001b; GHANI et al., 1999a; 1999b; KUMAR e BHATTACHARYA, 1991; KUMAR et al., 1990):

- temperatura inicial uniforme (25 °C);
- dissipação viscosa e geração interna de energia são desprezíveis;
- propriedades físicas constantes, à exceção da densidade na Aproximação de Boussinesq (relação entre a densidade do fluido e sua temperatura) para AMh;
- velocidades das correntes de convecção do fluido nos eixos x, y e z nulas em  $t = 0$  (AMh); e
- velocidades das correntes de convecção do fluido nulas nas paredes da embalagem (*no slip condition*) (AMh).

### 2.3 Processos

Devido à prática comum de se considerar a letalidade do resfriamento como margem de segurança (KANELLOPOULOS e POVEY, 1991), simulou-se apenas o período de aquecimento dos produtos. Segundo Bown

(2003), essa prática se deve ao maior controle obtido nas autoclaves durante a etapa de aquecimento.

Dessa forma, como condição de contorno, considerou-se aquecimento das latas uniforme, com temperatura do meio de aquecimento e coeficiente convectivo de transferência de calor ( $h$ ). Para o alimento condutivo, considerou-se aquecimento em autoclave com vapor saturado a 121 °C, com  $h$  de 1 kW.m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>, como utilizado por Kanellopoulos e Povey (1991). Para o alimento convectivo, considerou-se aquecimento em água a 60 °C e  $h$  determinado em experimentos prévios de 1.550 W.m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> (AUGUSTO et al., 2008b).

O tratamento térmico de alimentos embalados resulta em superprocessamento de algumas regiões para garantia de segurança e conservação do ponto frio. No caso de alimentos condutivos, essa abordagem é necessária (dimensionamento para  $F_p$ ; Equação 1), porém resulta em gradiente de  $F$  no produto final. No caso de alimentos líquidos, em que há mistura de regiões do produto, a contagem microbiana final será a média das diversas porções, portanto relacionada com o valor de esterilização média da massa ( $F_m$ ; Equação 2). Nesse caso, o processo poderia ser dimensionado para o  $F_m$ , porém, por questões práticas (necessidade de medida de temperatura através de um termopar), em geral é realizado para um  $F_p$ .

$$F_p = \int_{t_0}^{t_r} 10^{\frac{T(t,\text{ponto}) - T_{ref}}{z}} dt \quad (1)$$

$$F_m = \frac{1}{V} \int_{V_0}^{V_r} \int_{t_0}^{t_r} 10^{\frac{T(t,V) - T_{ref}}{z}} dt dV \quad (2)$$

Dessa forma, o processo para AMk foi realizado até  $F_p$  igual a 8,0 min, considerando-se a resistência térmica do *Clostridium botulinum* ( $z = 10$  °C). O processo para AMh foi realizado até  $F_m$  de 15 UPs, processo comum de pasteurização de cervejas, em que 1 UP (1 unidade de pasteurização) corresponde a 1 min a 60 °C (DILAY et al., 2006), utilizando valor de  $z$  de 6,94 °C (HORN et al., 1997). Utilizou-se intervalo de tempo (*timestep*) de 1,0 s para as simulações do alimento convectivo, e 30 s para as do condutivo.

As reações químicas e bioquímicas (como inativação microbiana) envolvidas no tratamento térmico de alimentos possuem relação exponencial com a temperatura. Assim, mesmo pequenas diferenças na temperatura do meio de troca térmica podem ser significativas ao longo do processo. Quando relacionadas à inativação microbiana que resultam em cargas finais diferentes, elas podem ser críticas ao se considerar a natureza exponencial do crescimento microbiano (AUGUSTO et al., 2008a).

## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.

Dessa forma, confirma-se a importância da avaliação e comparação de processos não somente através de perfis térmicos, mas principalmente através dos valores de esterilização (F) resultantes.

### 3 Resultados e discussão

Determinou-se como ponto frio do sistema lata-alimento condutivo o ponto com menor temperatura na fase de aquecimento (AUGUSTO et al., 2008a). Observou-se que o efeito de isolamento térmico proporcionado pelo *headspace* modifica o ponto frio da lata, deslocando-o do centro geométrico (50% da altura) para cerca de 78,7% da altura da lata para L1 e 77,4% para L2, valores próximos dos encontrados por Pinho (2004). A Figura 2 apresenta as latas L1 e L2 e seus pontos frios (marca em azul) e centros geométricos (marcas em vermelho).

A Figura 3 apresenta os perfis de temperatura para o alimento condutivo na lata L1 após 1, 5, 20, 50 e 90 min de processo, para as três situações testadas: a) lata sem

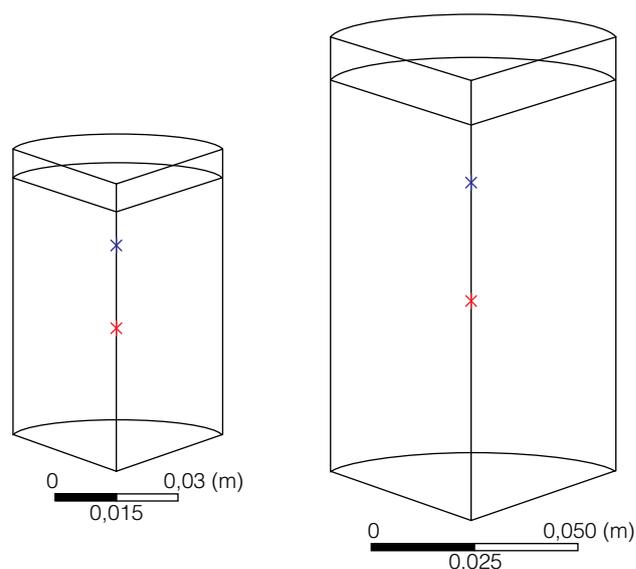


Figura 2. Latas L1 (esquerda) e L2 (direita): pontos frios (PF, marca azul) e centros geométricos (CG, marca vermelha).

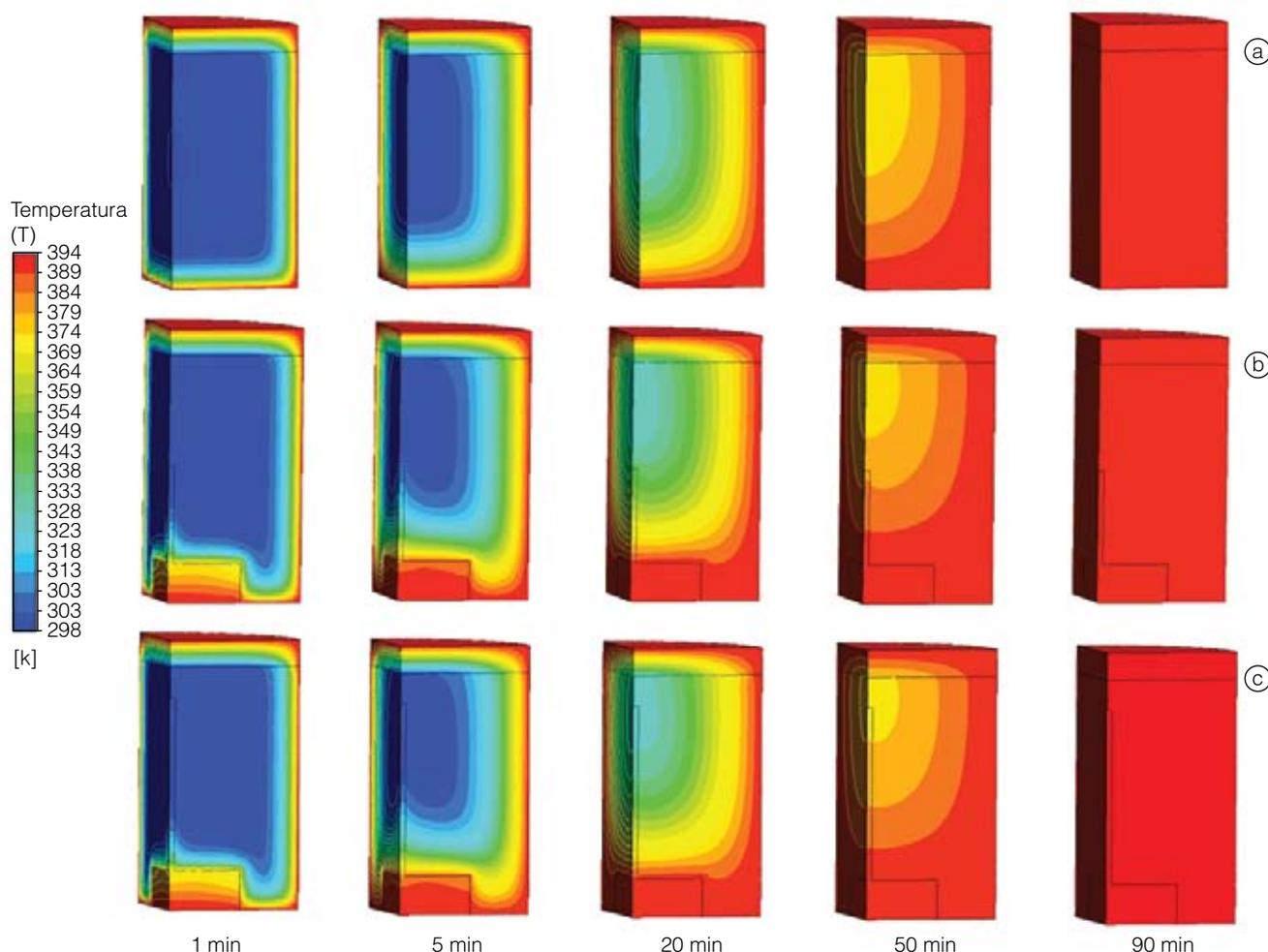


Figura 3. Perfis de temperatura para o alimento condutivo (AMk) na lata L1 após 1, 5, 20, 50 e 90 min de processo: a) lata sem SC; b) lata com extremidade do SC no centro geométrico (CG); c) lata com extremidade do SC no ponto frio (PF).

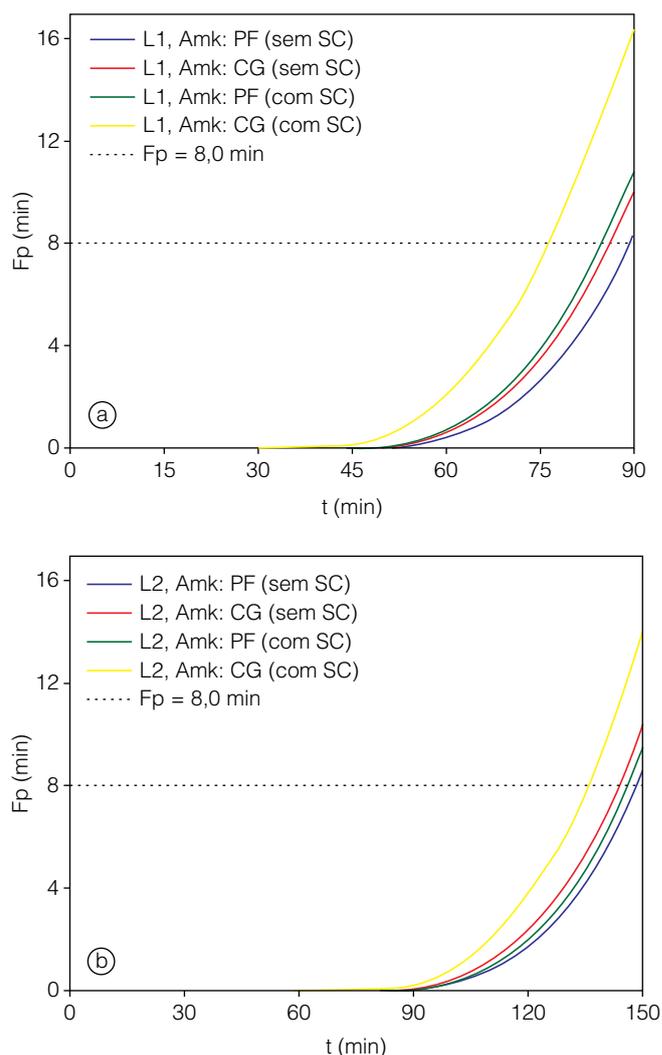
## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.

sistema compacto de medição de temperatura (SC); b) lata com extremidade do SC no centro geométrico (CG); c) lata com extremidade do SC no ponto frio (PF). Perfis semelhantes foram observados para L2. Através das isotermas apresentadas, é possível se observar claramente o efeito da utilização do SC testado na taxa de aquecimento do produto. Devido à maior difusividade térmica do aço inoxidável em relação ao alimento, o fluxo de calor percorre o SC mais rapidamente, resultando em isoterma menos alongada nos perfis apresentados. Ressalta-se, no entanto, que os maiores valores de  $F_p$  são decorrentes não somente da condutividade térmica do SC, mas também pela menor quantidade de produto contido na lata (parte do volume da lata é preenchido pelo próprio SC).

A Figura 4 apresenta os valores de  $F_p$  para L1 e L2 no centro geométrico (CG) e ponto frio (PF) em processos com e sem a presença de SC. A presença do SC resultou em aumento de 31% no  $F_{PF}$  e 63% no  $F_{CG}$  para L1, e 13% no  $F_{PF}$  e 37% no  $F_{CG}$  para L2. Observa-se que erros maiores foram observados nos valores de esterilização calculados no centro geométrico ( $F_{CG}$ ). Esse fato se deve ao comprimento da haste necessária para que o RTD fique localizado no ponto frio, que resulta em dissipação de energia para o alimento ao longo do aquecimento, influenciando menos o perfil térmico de sua extremidade. O controle do processo em questão através de medição de temperatura com o SC testado resultaria em subprocessamento, uma vez que o  $F_p$  do processo seria superestimado. Tal erro seria maior caso o monitoramento fosse realizado através do CG, em relação ao PF (procedimento correto).

A Figura 5 apresenta os perfis de temperatura e a Figura 6 as linhas de corrente (*streamlines*) de velocidade das correntes de convecção naturais para o alimento convectivo na lata L1 após 30, 120, 300, 1000 e 1500 s de processo. Tais perfis se mostraram coerentes com o reportado na literatura para aquecimento de líquidos em latas (KANNAN e SANDAKA, 2008; 2006, GHANI, 2006; CHEN et al., 2005; VARMA e KANNAN, 2005; GHANI et al., 2001b; GHANI et al., 1999a; 1999b; KUMAR e BHATTACHARYA, 1991; KUMAR et al., 1990). Observa-se inicialmente (até cerca de 120 s) fluxos com distribuição e características aleatórias, como descrito por Ghani et al. (1999a), Datta e Teixeira (1988 e 1987), Brandon et al. (1984) e Brandon et al. (1982), e então perfil determinado até o fim do processo. As correntes de circulação são chamadas Células de Bernard, formadas devido ao encontro de duas ou mais correntes, comportamento característico de fluidos aquecidos de forma uniforme em recipientes (GHANI et al., 1999a; CHEN, 2006; CHEN et al., 2005 discutem de forma bastante detalhada esse comportamento). Assim como para o processo com alimento condutivo, observa-se a influência da utilização da SC na transferência de calor, através dos perfis de temperatura.



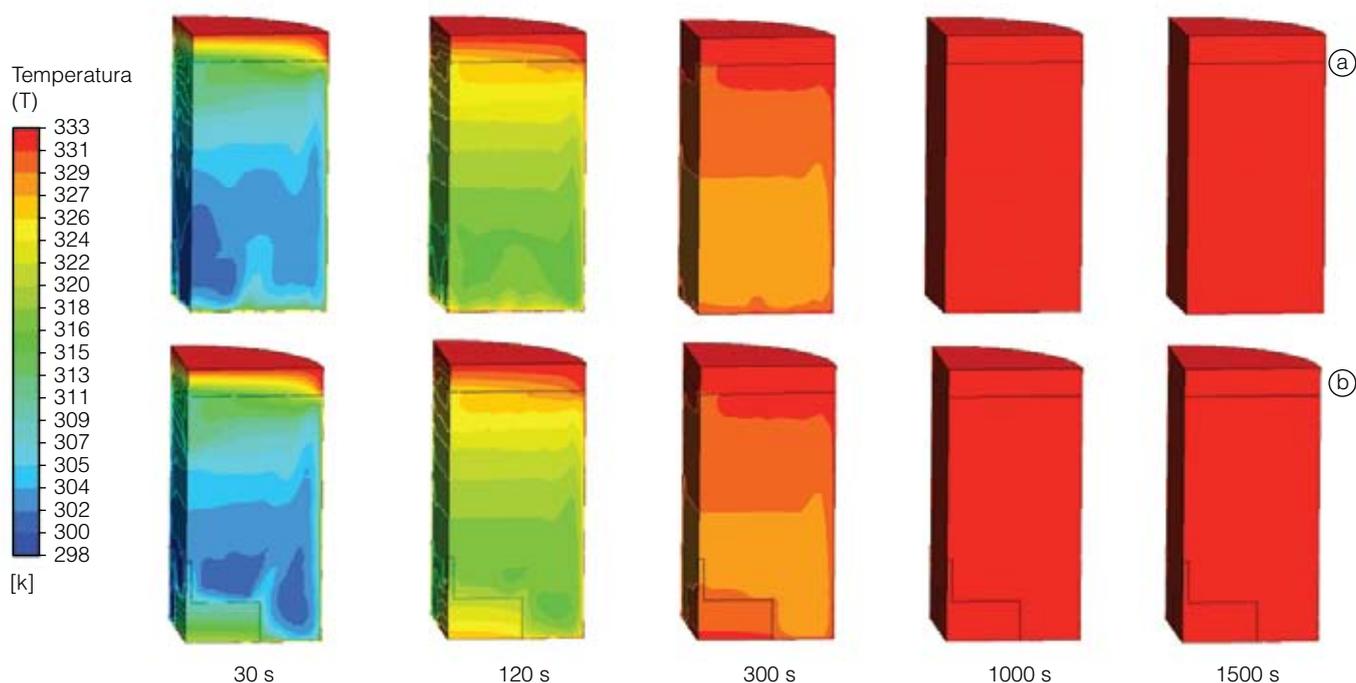
**Figura 4.** Valores de esterilização ( $F_p$ ) no ponto frio (PF) e centro geométrico (CG) das duas latas (L1 e L2) com alimento condutivo (AMk), com e sem o sistema compacto de medição de temperatura (SC).

A presença do SC resultou em alteração nas correntes de convecção naturais dentro das latas, como pode ser observado na Figura 6, resultando em uma Célula de Bernard próxima à haste, porém com pouca alteração na corrente principal.

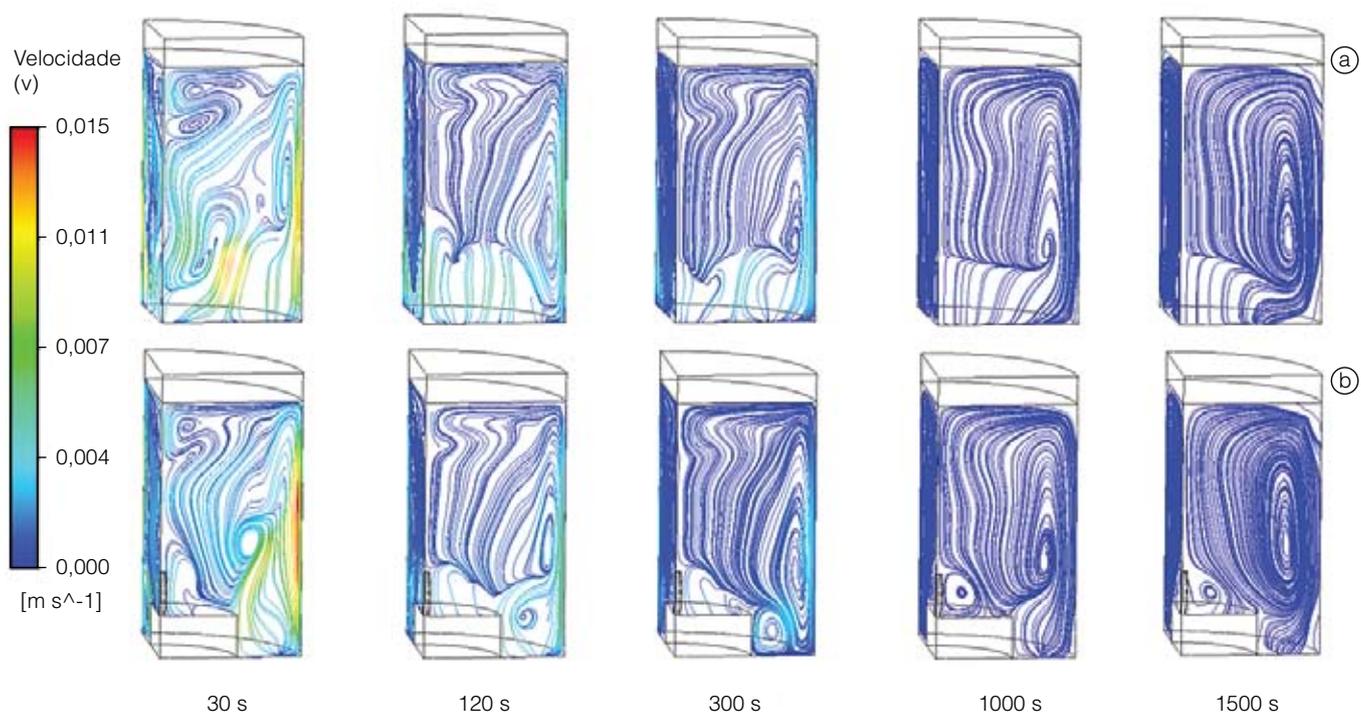
Os valores de esterilização médios da massa ( $F_m$ ) e obtidos a um terço da altura da lata ( $F_p$ ) pouco se alteram com a inserção do sistema compacto (SC) (Figura 7). A presença do SC resultou em alteração de 2% no valor de  $F_m$  e de 4% no de  $F_p$ . Devido à movimentação do fluido durante o aquecimento, a energia transferida pelo SC é mais bem distribuída pela massa de produto, ao contrário do produto condutivo, no qual a energia é transferida apenas para as porções do produto próximas ao SC. Essa característica torna o tratamento térmico de alimentos líquidos mais homogêneo e menos influenciado pela utilização do SC.

## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.



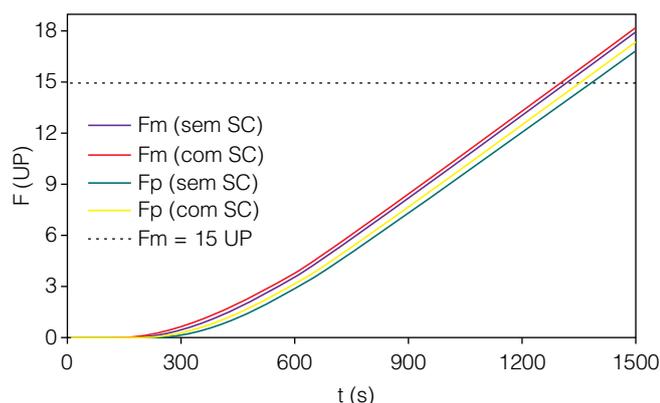
**Figura 5.** Perfis de temperatura para o alimento convectivo (AMh) na lata L1 após 30, 120, 300, 1000 e 1500 s de processo: a) lata sem SC; b) lata com SC.



**Figura 6.** Linhas de corrente (*streamlines*) para o alimento convectivo (AMh) na lata L1 após 30, 120, 300, 1000 e 1500 s de processo: a) lata sem SC; b) lata com SC.

## Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.



**Figura 7.** Valores de esterilização (F) a um terço da altura de líquido (Fp) e médio da massa (Fm) da lata L1 com alimento convectivo (AMh), com e sem o sistema compacto de medição de temperatura (SC).

### 4 Conclusões

Conclui-se que a utilização de sistemas compactos para medição de temperatura para dimensionamento de processos térmicos pode resultar em grandes desvios nos valores de F obtidos, principalmente para alimentos condutivos, levando a uma superestimativa do processo com consequente subprocessamento do produto.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) o financiamento do projeto 2007/04121-6 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) a inscrição dos autores no VII *Brazilian Meeting on Chemistry of Food and Beverages* (BMCFB).

### Nomenclatura

- AMh : alimento modelo convectivo
- AMk : alimento modelo condutivo
- CG: centro geométrico
- F : valor de esterilização
- Fm : valor de esterilização média da massa
- Fp : valor de esterilização do ponto frio
- h : coeficiente convectivo de transferência de calor
- PF : ponto frio
- RAML : região de aquecimento mais lento
- RTD : dispositivo de medição de temperatura por resistência elétrica
- SC : sistema compacto de medição de temperatura
- T : temperatura

- $T_{ref}$  : temperatura de referência
- t : tempo
- UP : unidades de pasteurização
- V : volume
- z : coeficiente térmico

### Referências

- AUGUSTO, P. E. D.; SANTANA, F. F.; CRISTIANINI, M. Utilização de modelagem matemática para avaliação dos efeitos da temperatura de processo e das propriedades térmicas na esterilização de alimentos. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 11, n. 2, p. 159-168, 2008a.
- AUGUSTO, P. E. D.; PINHEIRO, T. F.; CRISTIANINI, M. Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) na avaliação do efeito da geometria e orientação de garrafas no tratamento térmico de bebidas. In: BRAZILIAN MEETING ON CHEMISTRY OF FOOD AND BEVERAGES, 7., 2008, Lorena. **Anais...** Lorena: EEL – USP, 2008b.
- BOWN, G. Developments in conventional heat treatment. In: ZEUTHEN, P.; BOGH-SORENSEN, L. (Eds.). **Food preservation techniques**. Cambridge: CRC Press, 2003.
- BRANDON, H.; PELTON, P.; STAACK, G. State-of-the-art methodology for evaluation of pasteurizer heating and cooling processes. **MBAA Technical Quaterly**, St. Paul, v. 19, n. 1, p. 34-40, 1982.
- BRANDON, H.; GARDNER, R.; HULING, J.; STAACK, G. Time-dependent modeling of in-package pasteurization. **MBAA Technical Quaterly**, St. Paul, v. 21, n. 4, p. 153-159, 1984.
- CHEN, X. D.; HUANG, H. J.; GHANI, A. G. A. Thermal sterilization of liquid foods in a sealed container: developing simple correlations to account for natural convection. **International Journal of Food Engineering**, Clayton, v. 1, n. 1, article 5, 2005.
- CHEN, X. D. Modeling thermal processing using computational fluid dynamics (CFD). In: SUN, D. W. (Ed.). **Thermal food processing: new technologies and quality issues**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- CODEX ALIMENTARIUS. **Codex standard for canned baby foods**: codex stan 73-1981., 1981. p. 1-6. Disponível em: <[http://www.codexalimentarius.net/download/standards/289/CXS\\_073e.pdf](http://www.codexalimentarius.net/download/standards/289/CXS_073e.pdf)>. Acesso em: 22 de jul. de 2008.
- DATTA, A. K.; TEIXEIRA, A. A. Numerical modeling of natural convection heating in canned liquid foods. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 5, p. 1542-1551, 1987.
- DATTA, A. K.; TEIXEIRA, A. A. Numerically predicted transient temperature and velocity profiles during natural convection heating of canned liquid foods. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 53, n. 1, p. 191-195, 1988.

## **Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura**

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.

- DENYS, S.; PIETERS, J. G.; DEWETTINK, K. Combined CFD and experimental approach for determination of the surface heat transfer coefficient during thermal processing of eggs. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 68, n. 3, p. 943-951, 2003.
- DENYS, S.; PIETERS, J. G.; DEWETTINK, K. Computational fluid dynamics analysis of combined conductive and convective heat transfer in model eggs. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 63, n. 3, p. 281-290, 2004.
- DILAY, E.; VARGAS, J. V. C.; AMICO, S. C.; ORDONEZ, J. C. Modeling, simulation and optimization of a beer pasteurization tunnel. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 77, n. 3, p. 500-513, 2006.
- ECKLUND, O. F. Correction factors for heat penetration thermocouples. **Food Technology**, Chicago, v. 10, n. 1, p. 43-44, 1956.
- FARID, M.; GHANI, A. G. A. A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food. **Chemical Engineering and Processing**, Lausanne, v. 43, n. 4, p. 523-531, 2004.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D.; RICHARDS, P. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 41, n. 1, p. 55-64, 1999a.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D.; RICHARDS, P. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 42, n. 4, p. 207-214, 1999b.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D.; RICHARDS, P. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 48, n. 2, p. 147-56, 2001a.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D.; RICHARDS, P. Numerical simulation of biochemical changes in a viscous liquid canned food during sterilization using computational fluid dynamics. **Food Australia**, Waterloo D.C., v. 53, n. 1-2, p. 48-53, 2001b.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D. Numerical simulation of transient temperature and velocity profiles in a horizontal can during sterilization using computational fluid dynamics. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 51, n. 1, p. 77-83, 2002a.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D. Theoretical and experimental investigation of the thermal inactivation of *Bacillus stearothermophilus* in food pouches. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 51, n. 3, p. 221-228, 2002b.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D. Theoretical and experimental investigation of the thermal destruction of vitamin C in food pouches. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 34, n. 1-3, p. 129-43, 2002c.
- GHANI, A. G. A. A computer simulation of heating and cooling liquid food during sterilization process using computational fluid dynamics. **Association for Computing Machinery New Zealand Bulletin**, Taradale, v. 2, n. 3, 2006.
- GHANI, A. G. A.; FARID, M. M. Using the computational fluid dynamics to analyze the thermal sterilization of solid-liquid food mixture in cans. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, Oxon, v. 7, n. 1-2, p. 55-61, 2006.
- HORN, C. S.; FRANKE, M.; BLAKEMORE, B.; STANNEK, W. Modeling and simulation of pasteurization and staling effects during tunnel pasteurization of bottled beer. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, v. 75, n. 1, p. 23-33, 1997.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- KANELLOPOULOS, G.; POVEY, M. J. W. A finite element model for conduction errors in thermocouples during thermal sterilization of conduction-heating foods. **International Journal of Food Science and Technology**, Malden, v. 26, n. 4, p. 409-421, 1991.
- KANNAN, A.; SANDAKA, P. C. G. Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 88, n. 2, p. 213-228, 2008.
- KUMAR, A.; BHATTACHARYA, M.; BLAYLOCK, J. Numerical simulation of natural convection heating of canned thick viscous liquid food products. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 55, n. 5, p. 1403-1411, 1990.
- KUMAR, A.; BHATTACHARYA, M. Transient temperature and velocity profiles in a canned non-Newtonian liquid food during sterilization in a still-cook retort. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 34, n. 4-5, p. 1083-96, 1991.
- KUMAR, A.; DILBER, I. Fluid flow and its modeling using computational fluid dynamics. In: SABLANI, S. S.; DATTA, A. K.; SHAFIURRAHMAN, M. (Eds.). **Handbook of food bioprocess modeling techniques**. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- MARRA, F.; ROMANO, V. A mathematical model to study the influence of wireless temperature sensor during assessment of canned food sterilization. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 59, n. 2-3, p. 245-252, 2003.
- NICOLĂI, B. M.; VERBOVEN, P.; SCHEERLINCK, N.; De BAERDEEMAERKER, J. Numerical analysis of the propagation of random parameter fluctuations in time and space during thermal food processes. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 38, n. 3, p. 259-278, 1998.
- NICOLĂI, B. M.; VERBOVEN, P.; SCHEERLINCK, N. Modelling and simulation of thermal processes. In: RICHARDSON, P. (Ed.). **Thermal technologies in food processing**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

**Avaliação de erros na determinação de histórias térmicas de produtos processados termicamente com registradores internos de temperatura**

AUGUSTO, P. E. D. e CRISTIANINI, M.

NORTON, T.; SUN, D. W. Computational fluid dynamics (CFD): an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. **Trends in Food Science and Technology**, London, v. 17, n. 11, p. 600-20, 2006.

PETERSON, W. R.; ADAMS, J. P. Temperature sensor placement errors in institutional size retort pouches. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 50, n. 1, p. 192-196, 1985.

PINHO, C. **Modelamento matemático do processo de esterilização de alimentos condutivos em embalagens de vidro**. 2003. 123 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000317685>>. Acesso em 29 de Janeiro de 2007.

PINHO, C.; CRISTIANINI, M. Three-dimensional mathematical modeling of microbiological destruction of *Bacillus stearothermophilus* in conductive baby food packed in glass container. **International Journal of Food Engineering**, Clayton, v. 1, n. 2, p. 1-8, 2005.

PINHO, C.; CRISTIANINI, M. Método de otimização para determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor em alimentos esterilizados em embalagem de vidro. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 157-163, 2006.

SCOTT, G.; RICHARDSON, P. The application of computational fluid dynamics in the food industry. **Trends in Food Science and Technology**, London, v. 8, n. 4, p. 119-124, 1997.

VARGA, S.; OLIVEIRA, J. C.; OLIVEIRA, F. A. R. Influence of the variability of processing factors on the F-value distribution in batch retorts. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 44, n. 3, p. 155-161, 2000a.

VARGA, S.; OLIVEIRA, J. C.; SMOUT, C.; HENDRICKX, M. E. Modelling temperature variability in batch retorts and its impact on lethality distribution. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 44, n. 3, p. 163-174, 2000b.

VARMA, M. N.; KANNAN, A. Enhanced food sterilization through inclination of the container walls and geometry modifications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 48, n. 18, p. 3753-3762, 2005.

VARMA, M. N.; KANNAN, A. CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 77, n. 4, p. 1024-1036, 2006.

ZHANG, Z.; WEDDIG, L.; ECONOMIDES, S. The effect of thermocouple and receptacle type on observed heating characteristics of conduction-heating foods packaged in small metal containers. **Journal of Food Process Engineering**, Oxford, v. 25, n. 1, p. 323-335, 2002.