

Transferência de calor transiente na agitação linear intermitente de latas

Transient heat transfer by intermittent shake of cans

Homero Ferracini GUMERATO¹, Flávio Luís SCHMIDT^{1*}, José Santo GOLDONI²

Resumo

Foi estudada a transferência de calor transiente na agitação linear e intermitente (ALI) de embalagens metálicas contendo simulantes de alimentos, objetivando-se sua aplicação em processos de pasteurização ou esterilização e conseqüentes tratamentos térmicos mais eficientes, homogêneos e com produto de melhor qualidade. Foram utilizados quatro meios fluidos simulantes de alimentos de diferentes viscosidades e massas específicas: três óleos e água. Foram combinados efeitos de cinco tratamentos, sendo: meio simulante (4 níveis), espaço livre (3 níveis), frequência de agitação (4 níveis), amplitude de agitação (2 níveis) e posição das latas (4 níveis). Os ensaios de aquecimento e resfriamento foram feitos em tanque com água à temperatura de 98 °C e 17-20 °C, respectivamente. Com os dados de penetração de calor em cada experimento, foram calculados os parâmetros de penetração de calor fh, jh, fc e jc. Os resultados foram modelados utilizando-se grupos de números adimensionais e expressos em termos de Nusselt, Prandtl, Reynolds e funções trigonométricas (com medidas de amplitude e frequência de agitação, espaço livre e dimensões da embalagem). Foram estabelecidas as duas Equações gerais para as fases de aquecimento e resfriamento:

$$Nu = Re_A^{-0,199} \cdot Pr^{-0,288} \cdot \text{sen}(xa/AM)^{0,406} \cdot \cos(xf/FA)^{-1,039} \cdot \cos((xf/FA) \cdot (EL/H) \cdot \pi)^{-4,556} \quad \text{Aquecimento}$$

$$Nu = 0,1295 \cdot Re_A^{-0,047} \cdot Pr^{-0,193} \cdot \text{sen}(xa/AM)^{0,114} \cdot \cos(xf/FA)^{-0,641} \cdot \cos((xf/FA) \cdot (EL/H) \cdot \pi)^{-2,476} \quad \text{Resfriamento}$$

O processo de ALI pode ser aplicado em pasteurizadores ou autoclaves estáticas horizontais e verticais, com modificações simples. Concluiu-se que a ALI aumenta significativamente a taxa de transferência de calor, tanto no aquecimento como no resfriamento.

Palavras-chave: transferência de calor; agitação linear intermitente; esterilização; pasteurização; autoclave.

Abstract

The transient heat transfer during the intermittent and linear shaking of tin plate cans containing simulating food was studied in order to apply this technology in the pasteurization and sterilization processes, achieving energy economy and higher food quality. Transient heat transfer was carried out in four different simulating media: water, *Neutral oil* 150 and 500 and *Bright stock oil*. Five treatment combinations were prepared: simulating media (4 levels), head space (3 levels), agitation frequency (4 levels), length of agitation (2 levels) and can positions (4 levels). Heating and cooling tests were carried out respectively in a boiling water tank at 98 °C and in a cool water tank at 17-20 °C. Heat transfer parameters (fh, jh, fc and jc) for each test were calculated and the results expressed using dimensionless numbers relations as Nusselt, Prandtl and Reynolds and trigonometric functions. Two equations were defined:

$$Nu = Re_A^{-0,199} \cdot Pr^{-0,288} \cdot \text{sen}(xa/AM)^{0,406} \cdot \cos(xf/FA)^{-1,039} \cdot \cos((xf/FA) \cdot (EL/H) \cdot \pi)^{-4,556} \quad \text{Heating}$$

$$Nu = 0,1295 \cdot Re_A^{-0,047} \cdot Pr^{-0,193} \cdot \text{sen}(xa/AM)^{0,114} \cdot \cos(xf/FA)^{-0,641} \cdot \cos((xf/FA) \cdot (EL/H) \cdot \pi)^{-2,476} \quad \text{Cooling}$$

The intermittent linear shaking increases significantly the heat transfer rates in the heating and in the cooling process phases. This system could be adapted to static pasteurizer or sterilizer with simple internal structure modifications.

Keywords: heat transfer; shake; sterilization; pasteurization.

1 Introdução

O processamento térmico é um processo de preservação de alimentos baseado na aplicação do calor cujo sucesso depende de vários parâmetros, como a difusividade térmica do alimento, as características da embalagem, as taxas de transferência de calor, tempo e temperatura efetivamente aplicados no alimento, dentre outros.

Processos de esterilização e pasteurização sob agitação vêm sendo estudados desde 1950^{4,14,15,19,21,13}, porém a agitação

linear e intermitente (ALI) praticamente não é citada. A vantagem das autoclaves e pasteurizadores agitados está na elevada taxa de transferência de calor do meio de aquecimento para a embalagem. Esse aumento nas taxas de transferência de calor acarreta melhora da qualidade do alimento, levando a uma otimização do processo térmico.

A transmissão de calor está associada a uma diferença de temperatura entre duas regiões e é governada pela combinação de várias leis da física^{6,17}. São reconhecidos pela literatura três mecanismos fundamentais para transmissão de calor: condução, convecção e radiação^{4,6}.

Para condução foi desenvolvida experimentalmente uma relação matemática por Fourier, em 1822, descrita na Equação 1, que estabelece que o calor transmitido (q) é diretamente proporcional à área (A) que ele flui e ao gradiente de temperatura (T) na direção (x) do fluxo de calor. O coeficiente de proporcionalidade é definido como a condutividade térmica (k) do material⁴.

Recebido para publicação em 15/11/2006

Aceito para publicação em 4/5/2007 (002060)

¹ Departamento de Tecnologia de Alimentos,

Faculdade de Engenharia de Alimentos,
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP,
CP 6121, CEP 13083-862, Campinas - SP, Brasil,
E-mail: schmidt@fea.unicamp.br

² Faculdade de Ciências Agrônomicas,

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
Campus de Botucatu, Botucatu - SP, Brasil

*A quem a correspondência deve ser enviada

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Casos de transferência de calor transiente em alimentos são comuns e, neste caso, a equação diferencial é descrita nos três eixos do sólido (x, y, z), da seguinte forma:

$$\frac{k}{\rho \cdot Cp} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

onde o primeiro termo da Equação 2 é a difusividade térmica do material. Ela representa, fisicamente, a relação entre a condução e a capacidade de armazenamento de calor no material (ρCp = densidade x calor específico) e indica a velocidade com que a frente de temperatura se propaga no sentido do fluxo de calor⁴.

Os alimentos aquecidos tipicamente por condução são carnes em conservas, vegetais e frutas altamente compactadas na embalagem, além de produtos amiláceos em estado gelatinizado.

O calor transmitido por convecção é regido por uma relação empírica conforme a Equação 3:

$$q = \bar{h}_c \cdot A \cdot (T_\infty - T) \quad (3)$$

A Equação 3 é uma definição do coeficiente médio de transferência de calor local, \bar{h}_c . Esse coeficiente é de difícil avaliação por ser a convecção um fenômeno complexo, envolvendo a geometria da embalagem, a rugosidade, o espaço livre da embalagem, a viscosidade, a massa específica, o calor específico, a condutividade térmica e alterações estruturais do alimento em função da temperatura³.

A efetividade da transmissão de calor por convecção depende do movimento da mistura do fluido e, conseqüentemente, o estudo desse mecanismo fundamenta-se no conhecimento das características físicas de escoamento do fluido³.

Teoricamente, as soluções dos problemas matemáticos de transferência de calor para fluidos puros podem ser obtidas analiticamente utilizando-se as três equações de transporte de energia. Contudo, a solução analítica destas equações é muito difícil para casos de alimentos sob agitação, nos quais os perfis de velocidades são muito complexos e as condições de contorno difíceis de serem estabelecidas³.

Na convecção, o transporte de energia é feito pela ação combinada de condução de calor, armazenamento de energia e movimento da mistura. A convecção pode ser natural ou forçada, respectivamente se o agente da mistura for ocasionado simplesmente por diferença da massa específica das partículas ou por um agente externo, como a agitação mecânica³.

Os alimentos aquecidos simplesmente por convecção são, por exemplo, sucos de frutas, sopas e produtos lácteos. Já os aquecidos por condução e convecção são os produtos sólidos imersos em salmoura ou xarope e sopas contendo partículas vegetais ou carne¹.

Existem produtos que quando aquecidos inicialmente se comportam como convectivos, mas que durante o aquecimento passam a ter comportamento tipicamente condutivo, devido à mudança na sua estrutura, como por exemplo, um aumento na viscosidade. Tipicamente, são alimentos que contêm amido, o qual gelatiniza durante o aquecimento. Como exemplo existe o feijão em salmoura, "cream style corn" e molhos para massas¹.

O balanço de energia para o aquecimento por convecção de um alimento enlatado é escrito conforme Equação 4, onde m indica a massa e T_∞ a temperatura do meio de aquecimento:

$$m \cdot Cp \cdot \frac{dT}{dt} = h \cdot A \cdot (T_\infty - T) \quad (4)$$

Rearranjando para integração na forma de uma equação de reta e com o tempo como variável independente, temos:

$$\log(T_\infty - T) = 0,43 \cdot \frac{h \cdot A}{m \cdot Cp} \cdot t + \log(T_\infty - T_0) \quad (5)$$

A Equação 5 é válida para fluxo de calor transiente em sistemas com resistência interna desprezível. Por exemplo, alumínio, cobre. Contudo, essa equação pode ser aplicada para alimentos envasados.

BALL e OLSON¹ definiram dois parâmetros para descrever a transferência de calor em alimentos enlatados: fator de tempo fh (minutos) e fator de atraso de temperatura jh, ou fator de curvatura. O termo fh é definido conforme a Equação 6 e pode ser obtido pelo tempo necessário para que a curva de $\log(T_\infty - T)$ em função do tempo atravesse um ciclo logarítmico.

$$fh = -2,303 \cdot \frac{m \cdot Cp}{h \cdot A} \quad (6)$$

O termo jh é definido como:

$$jh = \frac{T_\infty - T_{p_{ih}}}{T_\infty - T_{ih}} \quad (7)$$

$T_{p_{ih}}$ = temperatura pseudo-inicial para aquecimento obtida pelo intercepto da projeção da reta $\log(T_\infty - T)$ em função do tempo com o eixo das ordenadas.

$$T_{p_{ih}} = T_\infty - 10^{\text{Intercepto}} \quad (8)$$

Enquanto

$$fh = \frac{-1}{\text{Inclinação}} \quad (9)$$

Os métodos de cálculos de BALL e OLSON¹ são baseados na curva de aquecimento e resfriamento semilogarítmica. No eixo das ordenadas a escala é logarítmica e na abscissa a escala é linear.

A relação de fh com o coeficiente de película, h, e com o coeficiente global de transferência de calor, U, está apresentada na Equação 10:

$$fh = \frac{m \cdot Cp}{h \cdot A} = h = \frac{m \cdot Cp}{fh \cdot A} \cong U \quad (10)$$

A Equação 10 aproxima o valor de U (coeficiente global de transferência de calor) para o coeficiente de película, h. Dessa forma, nos ensaios de penetração de calor nas embalagens pode ser obtido U admitido como uma estimativa do valor de h.

De modo análogo ao aquecimento, têm-se as mesmas relações para a fase de resfriamento do alimento.

O cálculo de h e Nusselt (Nu) a partir de fh pode ser descrito conforme a Equação 11, onde V é o volume e D o diâmetro da lata.

$$fh = 2,303 \cdot \frac{V \cdot \rho \cdot Cp}{\left(\frac{Nu \cdot k}{D}\right) \cdot A} \cdot 60 \quad (11)$$

QUAST e SIOSAWA¹⁴ mostraram que a rotação axial de latas contendo solução de glicose aumenta a transferência de calor. O tempo de aquecimento com latas a 150 rpm foi 30 a 60% menor que o tempo de aquecimento sem rotação, quando utilizados pasteurizadores a vapor.

QUAST et al.¹⁵ estudaram os efeitos do meio de resfriamento, da velocidade de rotação aparente, da posição da lata (horizontal, vertical e inclinada) da consistência e do espaço livre sobre a velocidade de resfriamento de soluções de carboximetilcelulose e de polpa de frutas em latas de 20 kg. O coeficiente global de transferência de calor (U) aumentou à medida que se utilizou espaço livre maior. A posição vertical foi a que apresentou maior eficiência na transferência de calor, devido à maior convecção do fluido. A posição horizontal foi a mais vantajosa em termos do projeto do equipamento. A consistência do fluido influi bastante na transferência de calor: fluidos mais viscosos (polpa de goiaba 12 °Brix) apresentaram maior tempo de resfriamento que fluidos pouco viscosos (2,5% de carboximetilcelulose).

TEIXEIRA NETO et al.¹⁹ estudaram o resfriamento de polpas concentradas de tomate e goiaba, previamente aquecida a 85~93 °C, em tambores de 200 L. O envase a quente e resfriamento de polpas de tomate em tambores foi muito utilizado pelas indústrias tomateira para estocagem de seus produtos na entressafra. A operação de processo consistia em encher o tambor com polpa, mantendo espaço livre e promover o resfriamento da massa através da rotação do tambor (24~36 rpm) sob pulverização de água potável e fria. O aumento da rotação aplicada ao tambor melhorava a transferência de calor, sendo mais aconselhável a rotação de 36 a 43 rpm. O resfriamento de 190 kg de polpa (com 10 cm de espaço livre) apresentou uma redução de tempo de 25% em relação ao tempo gasto para o resfriamento de 200 kg (5 cm de espaço livre).

CLIFCORN et al.⁴ estudaram a redução do tempo de atraso térmico, em função da posição das latas numa autoclave. O estudo foi realizado numa autoclave adaptada para ALI. Foram analisadas várias posições das latas e movimentos com variação de amplitude e frequência. Esse método de agitação mostrou-se superior quando comparado com método de agitação longitu-

dinal axial, porém, inferior à agitação “end-over-end”. Nesse experimento, a situação otimizada foi de 50 mm de amplitude e 120 cpm (ciclos por minuto) de frequência de agitação.

O estudo de transferência de calor em alimentos líquidos e não sólidos depende, em primeira instância, do estudo da reologia do alimento. Nesse sentido, é comum utilizar fluidos simulantes de alimentos e associar suas características às de alimentos, conhecendo-se suas propriedades físicas através de modelos matemáticos.

A análise dimensional permite deduzir correlações, transcritas em equações constituídas por grupos adimensionais de variáveis elevados a diversas potências⁶. O método de análise dimensional mais adequada para estudos de processos que envolvem transferência de calor é expressa por:

$$\frac{hD}{k} = K \left(\frac{Cp\mu}{k}\right)^a \left(\frac{DV\rho}{\mu}\right)^b \left(\frac{\mu_i}{\mu_e}\right)^c \left(\frac{x_a}{A}\right)^d \left(\frac{x_f}{F}\right)^e \left(\frac{el}{H}\right)^f \quad (12)$$

onde K, a, b, c, d, e e f são constantes adimensionais determinadas experimentalmente. Contudo, qualquer outra expressão algébrica ou mesmo relação gráfica, entre esses grupos de números adimensionais, pode ser obtida de dados experimentais¹².

O número de Nusselt, $Nu = \frac{hD}{k}$, representa o coeficiente de transmissão de calor no aquecimento por convecção. Indica a porção entre o calor fornecido por convecção pura e aquele fornecido por condução pela película fluida próxima à parede da embalagem⁶.

O número de Prandtl, $Pr = \frac{Cp\mu}{k}$, é a relação entre a difusividade da quantidade de movimento e a difusividade térmica do fluido. Esse adimensional é utilizado na análise de transferência de calor por convecção⁶.

A ALI estudada por CLIFCORN et al.⁴ em 1950, ao que se sabe, não teve nenhuma aplicação prática na indústria de alimentos. A princípio, na época deste estudo, as principais preocupações dos processadores eram grandes escalas de produção, sem preocupação com o elevado consumo de energia nos ciclos de processamento. Isso levou ao desenvolvimento de sistemas de agitação contínuos do tipo axial em batelada FMC Orbitort[®] e contínuo FMC Sterilmatic[®] ou “end over end” em batelada, como a STOCK Rotomat[®], todas de grande porte. Atualmente, face ao desenvolvimento de novos mercados, processos em menor escala, a custos mais baixos e com qualidade, a ALI poderá suprir esta necessidade com vantagens operacionais, de manutenção e homogeneidade no lote agitado.

Objetivou-se estudar a transferência de calor transiente por ALI em embalagens metálicas, pois este processo é de construção e manutenção relativamente simples se comparado ao sistema de agitação tradicional “end-over-end” (cabeça-sobre-cabeça); e a agitação axial, além de promover a agitação homogênea de todo o lote, pois não leva em consideração o raio de agitação. Para tal foi desenvolvido um sistema de agitação com movimento linear alternado que pode ser adaptado em pasteurizadores ou autoclaves fixas, tornando-os agitados.

Também foram desenvolvidas as equações de transferência de calor, baseadas nos parâmetros de processo, com o intuito de se projetar processos térmicos a partir destas informações.

2 Material e métodos

2.1 Suporte para agitação

O suporte para agitação foi construído em aço carbono podendo receber no máximo quatro latas. As dimensões do suporte foram as seguintes: base para as latas 340 x 240 mm, altura 400 mm e haste para movimentação de 400 mm. Para efetuar a agitação, a haste do suporte foi conectada a um dispositivo de agitação constituído por um motor 1/4 CV trifásico, polias e correias. A amplitude de agitação foi de 25 mm (mínimo) a 42 mm (máximo).

2.2 Meio de aquecimento e resfriamento

Foi composto de dois tanques paralelos, sendo um para aquecimento e outro para resfriamento. Cada tanque tinha 82 litros (500 x 470 x 350 mm altura) de capacidade nominal. O aquecimento foi feito em água em ebulição aquecida por vapor direto à pressão de 2 kgf.cm⁻². O resfriamento foi feito por circulação de água (6 litros/minuto) à temperatura ambiente (25 ± 1 °C). Ao final do aquecimento o suporte com as latas era transferido manualmente para o tanque de resfriamento.

2.3 Meios simuladores

Foram utilizados 4 meios para simulação: água destilada e óleos lubrificantes para uso automotivo, das marcas, *Neutral Oil 150*, *Neutral Oil 500* e *Bright Stock Oil*.

2.4 Características físicas da lata experimental

Lata construída em folha de flandres, com verniz anti-corrosivo, com anéis de expansão, 81 mm interno de altura x 73 mm de diâmetro interno.

2.5 Enchimento e recravação

As latas foram preenchidas com fluido simulante, T = 25 °C, mantendo-se espaço livre (5, 10 ou 15% do volume da lata), conforme o processo e foram recravadas sob vácuo de 600 mm Hg (23,5 polegadas Hg) ± 20 mm em recravadeira marca John Heine, Sydney, model 71D, series 2, previamente ajustada conforme normas do FDA (INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 2001). Foram utilizadas 4 latas (capacidade do suporte), sendo uma em pé, uma deitada longitudinalmente ao eixo de movimento, outra transversalmente ao eixo de movimento e finalmente uma a 45° com o eixo do movimento. A lata em pé recebeu um suporte de termopar de 52 mm, com sensor colocado a 1/3 da altura da lata, por se tratar de um fluido convectivo (simulador de alimento). As outras três latas, deitadas, foram montadas com suporte de termopar de 42 mm, posicionado no centro da lata. As latas e o termopar, para medida da temperatura do meio de aquecimento, foram

fixados no suporte com braçadeiras, diminuindo as chances de ocorrerem vazamentos e quebra dos cabos.

2.6 Termopares e aquisitor de dados

Para monitoramento das temperaturas de processos, foram utilizados 5 cabos com termopares (04 nas latas e 01 no meio de aquecimento), tipo agulha, de junta cobre-constantã, tipo T, um aquisitor de dados e software E-Val™ Ver 2.00 ELLAB A/S Krongdalvej 9, DK-2610 Roedovre, Denmark, modelo TM 9616. Os históricos de temperaturas foram levantados por meio do aquisitor Ellab A/S conectado a um microcomputador compatível com PC. Todo o sistema de medida de temperatura, original Ellab (termopares, fios de extensão, aquisitor de dados) foi devidamente aterrado e previamente calibrado contra padrão de confiança.

Medidas de frequência de agitação e comprimento de curso

Foi utilizado um gerador de frequência marca Siemens, modelo Micromaster Vector 6SE3221-0CC40, com capacidade para motor de 3,0 CV. Esse gerador permitiu gerar frequências de 0,1 até 65,0 Hz, com variação decimal. O gerador foi utilizado para acionar o motor trifásico instalado no suporte das latas, gerando as frequências de agitações estudadas. A frequência de agitação foi medida toda vez que iniciava-se o experimento.

2.7 Propriedades de engenharia dos fluidos

Foram determinados os valores da massa específica, viscosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica dos fluidos conforme metodologias descritas em GRATZEK e TOLEDO⁷, KERN⁹, KESSLER¹⁰ e RAO et al.¹⁶. Para a água, estes valores foram obtidos teoricamente¹⁰.

2.8 Cálculo dos parâmetros de transferência térmica

O cálculo dos parâmetros fh e jh para aquecimento e fc e jc para resfriamento foi baseado em STUMBO¹⁸. Inicialmente foi feita uma avaliação gráfica das curvas de penetração de calor de cada lata, nas posições estudadas, selecionando-se os pontos da fase de aquecimento, log (T_∞ - T) em função do tempo (segundo), e da fase de resfriamento, log (T - T_∞) em função do tempo (segundo). Foram selecionados no mínimo 10 pontos para cada caso, escolhendo-se a porção retilínea das curvas com o maior resultado do R² (coeficiente de determinação múltipla). Em cada condição estudada foi realizada pelo menos uma repetição e, no máximo, n repetições conforme procedimento descrito por GUMERATO e SCHMIDT⁸.

O valor numérico de fh é o inverso do coeficiente angular da reta e jh foi calculado conforme Equação 13.

$$jh = \frac{T_{\infty} - T_{pjh}}{T_{\infty} - T_0} \quad (13)$$

O valor numérico de fc é o inverso do coeficiente angular da reta e jc foi calculado conforme Equação 14.

$$j_c = \frac{T_w - T_{pic}}{T_w - T_{ic}} \quad (14)$$

2.9 Planejamento experimental e avaliação do modelo matemático de transferência de calor

Foi utilizado um planejamento fatorial completo com as variáveis independentes: fluido (FL), espaço livre (EL), amplitude (AM), frequência de agitação (FA) e posição (PO). Foram escolhidos 4 fluidos, estáveis a vários processos de aquecimento e resfriamento, sem sofrerem deteriorações microbiológicas e físico-químicas, cobrindo ampla faixa de viscosidade. Foram definidos 3 espaços livres (EL) comuns em aplicações industriais²⁰: 5, 10 e 15% do volume total. Foram aplicadas AM de 25 e 42 mm e FA de 0, 60, 100 e 132 cpm. As 4 PO das latas (vertical, transversal, inclinada e longitudinal) foram planejadas para cobrir a faixa de disposição espacial que poderia ser influenciada pelo movimento de ALI. As condições de agitação foram baseadas em testes preliminares (não apresentados neste relato) que apresentaram garantia mecânica do funcionamento do sistema de agitação.

Na construção do modelo, utilizaram-se as variáveis de categoria (FL e PO) e as variáveis contínuas (EL, AM e FA), tendo o valor de fh e fc como variáveis dependentes. Utilizou-se a distribuição normal, e o modelo de predição dos resultados foi descrito conforme a função:

$$f_h = f[\text{FL}(\mu, \rho, C_p, k), \text{AM}, \text{FA}, \text{EL}, \text{PO}] \quad (15)$$

Para análise dos dados resultantes dos testes foi utilizada a regressão linear múltipla. As comparações dos parâmetros de transferência de calor entre as posições das latas foram feitas utilizando-se modelo linear geral².

3. Resultados e discussão

3.1 Propriedades de engenharia dos fluidos simulantes

O modelo que melhor descreveu a dependência da massa específica dos óleos simuladores com a temperatura foi o modelo linear. Na Tabela 1, estão listados os parâmetros da regressão linear dos valores de massas específicas em função da temperatura. Para os óleos orgânicos, o modelo aplicado

Tabela 1. Parâmetros das massas específicas dos fluidos em função da temperatura.

Parâmetros	Fluidos		
	Neutral oil 150	Neutral oil 500	Bright stock Oil
ρ_o para $T = 0^\circ\text{C}$	877,0 \pm 0,6	892,0 \pm 0,9	900,0 \pm 0,6
$A = \text{kg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$	-6,20 $\times 10^{-4} \pm 0,01 \times 10^{-4}$	-6,28 $\times 10^{-4} \pm 0,14 \times 10^{-4}$	-5,69 $\times 10^{-4} \pm 0,09 \times 10^{-4}$
R^2	99,90%	99,81%	99,90%

Tabela 2. Parâmetros do modelo de Arrhenius para viscosidade dos fluidos.

Parâmetros	Fluidos			
	Água	Neutral oil 150	Neutral oil 500	Bright stock oil
K (Pa·s)	1,916 $\times 10^{-6} \pm 0,271 \times 10^{-6}$	1,573 $\times 10^{-7} \pm 0,708 \times 10^{-7}$	3,783 $\times 10^{-8} \pm 0,298 \times 10^{-8}$	2,907 $\times 10^{-9} \pm 0,181 \times 10^{-9}$
Ea/R (K·Pa·s)	1841 \pm 44	3811 \pm 143	4636 \pm 237	5931 \pm 192
R^2 (-)	99,5%	99,4%	99,0%	99,6%

foi $\rho = a \cdot t + \rho_o$, onde ρ_o é a intersecção da reta quando a temperatura é igual a zero.

No caso da água, a relação entre a temperatura e a massa específica foi quadrática e foi aplicado o modelo matemático $\rho = 0,569 + 0,002 \times T - 5,87 \times 10^{-6} \times T^2$ com os dados listados por¹⁰.

Quanto aos valores de calor específico, foram linearmente crescentes para os óleos, na faixa de temperatura de trabalho de 20 a 100 °C, o que já foi descrito anteriormente⁹. Os resultados em (kJ.kg⁻¹.K⁻¹) foram: água destilada, 4,184¹⁰; neutral oil 150, 1,859 \pm 4,3%; neutral oil 500, 1,850 \pm 7,4% e bright stock oil, 2,015 \pm 7,3%.

Em relação aos valores da condutividade térmica para a água, foi realizada uma regressão linear, conforme¹⁰, utilizando um nível de significância de 10%. Para os três óleos, os resultados foram iguais a 0,147 W.m⁻¹.K⁻¹.

As viscosidades dos óleos foram quantificadas conforme metodologia descrita, utilizando-se um nível de significância de 1%. No caso da água, os resultados foram coletados e fez-se regressão linear¹⁰. Os parâmetros para modelo de Arrhenius estão apresentados na Tabela 2. Esses modelos foram avaliados através de regressão linear entre os valores de viscosidades e o inverso das temperaturas absolutas experimentadas. O modelo descreveu muito bem o comportamento de óleos e água, na faixa de temperatura deste trabalho.

3.2 Medidas da frequência de oscilação

A função que relaciona a agitação (cpm) com a frequência da tensão (sempre para o mesmo conjunto de polias) foi linear, apresentou $R^2 = 99,9\%$, e foi utilizada para estimar a velocidade da agitação.

3.3 Resultados dos parâmetros fh, jh, fc e jc obtidos nos ensaios

Foram feitos 294 ensaios de penetração de calor obtendo-se o mesmo número de valores para cada um dos parâmetros de transferência de calor (fh, jh, fc e jc). Na Figura 1, está representada a história térmica de um dos experimentos realizados (amplitude 42 mm; frequência de agitação 120 cpm; espaço-livre 8,1 mm). A história térmica são os perfis de temperatura

de cada uma das 4 latas e mais um termopar de medida da temperatura do meio em função do tempo de processo.

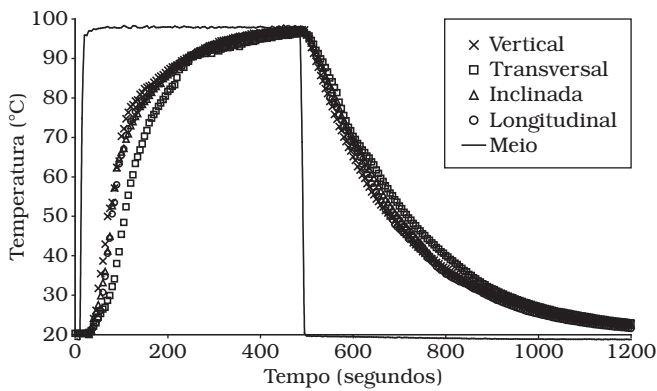


Figura 1. História térmica de penetração de calor em 4 latas (amplitude 42 mm; frequência de agitação 120 cpm; espaço-livre 8,1 mm).

Os valores apresentados nas Figuras 2 a 5 são resultados de desvios respectivamente de fh, jh, fc e jc em função das médias (em %) de no mínimo duas observações para cada condição de ensaio. Estas figuras foram construídas para avaliar a dispersão e, conseqüentemente, a qualidade dos dados coletados nos experimentos, pois não existe modelo matemático descrito para esse mecanismo de transferência de calor.

Na Figura 2, pode ser observado que a distribuição dos desvios experimentais (em porcentagem) em função dos valores de fh (minutos) foi de no máximo 22% e de no mínimo 0%.

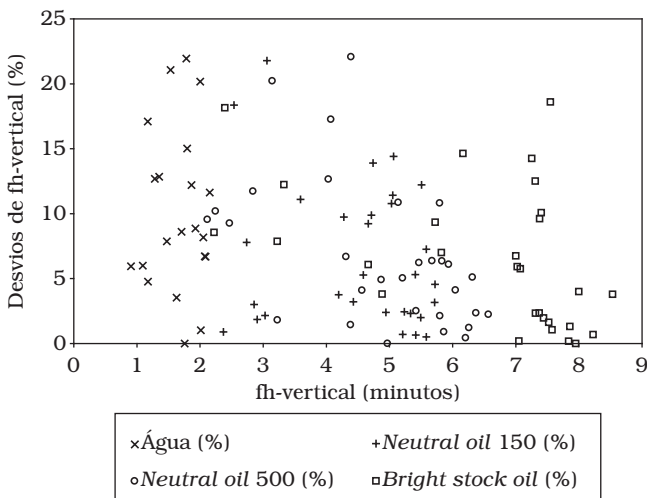


Figura 2. Desvios de fh (minutos) com nível de significância de 10% em função dos valores médios de fh (minutos).

Observa-se que não há nenhuma tendência entre os desvios com os valores de fh. De forma análoga, na Figura 3, apresenta-se a distribuição dos desvios experimentais (em porcentagem) em função dos valores de fc (minutos). O desvio máximo foi de 26% e o mínimo de 0%.

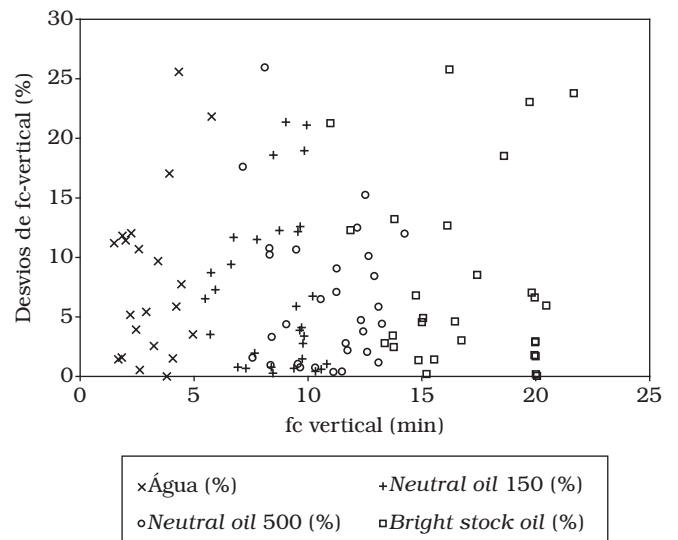


Figura 3. Desvios de fc (minutos) com nível de significância de 10% em função dos valores médios de fc (minutos).

Os fatores de curvatura, jh e jc, foram calculados considerando-se todos os fluidos estudados e o valor médio para jh foi de 1,4 e jc 1,0. BALL e OLSON¹ recomendam jc, fator de curvatura, de 1,4 para alimentos condutivos e 1,0 para alimentos convectivos. O *Bright stock oil* proporcionou uma curvatura (jh) maior no aquecimento, quando sob alta agitação (132 cpm) e amplitude de 42 mm. Os demais fluidos simuladores apresentaram valores menores e próximos de 1,4.

Na Figura 4, pode ser observada a distribuição dos desvios experimentais (em porcentagem) em função dos valores de jh (minutos). A maioria dos resultados de jh estão concentrados em 1,4, com desvio máximo de 26% e mínimo de 0%. Os fatores de curvilinearidade são dependentes do raio da lata, segundo BALL e OLSON¹. Dois valores de jh estão fora da faixa de 1,4 e não foram explicados (3 e 6,5).

A Figura 5 apresenta a distribuição dos desvios experimentais (em porcentagem) em função dos valores de jc (minutos). O desvio máximo foi de 24% e o mínimo de 0%. Observou-se também que a maioria dos resultados de jc está concentrada em 1,4. Esses resultados estão de acordo com¹.

3.4 Modelamento matemático do processo de transferência de calor no aquecimento para latas na posição vertical.

Foram analisados vários modelos na tentativa de associar fh (minutos) com medidas reológicas e características do processo. Os cálculos das propriedades dos fluidos (μ —viscosidade; ρ —massa específica; C_p —calor específico; e k —condutividade térmica) para compor os adimensionais Re, Nu e Pr foram feitos utilizando-se a temperatura média de processo de 60 °C (medida entre o aquecimento e o resfriamento). Os fluidos utilizados neste trabalho não sofreram alterações em suas propriedades de engenharia, as quais se assemelham à de vários alimentos fluidos e também não foram observadas curvas quebradas durante a fase de aquecimento e resfriamento. Os cálculos

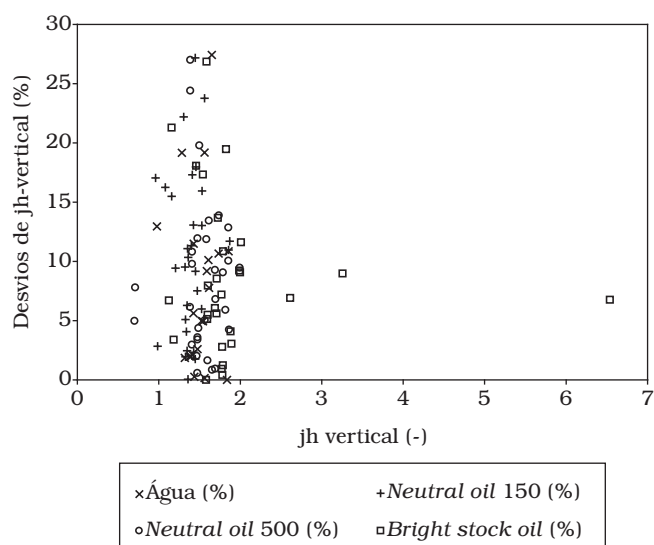


Figura 4. Desvios de jh (minutos) com nível de significância de 10% em função dos valores médios de jh (minutos).

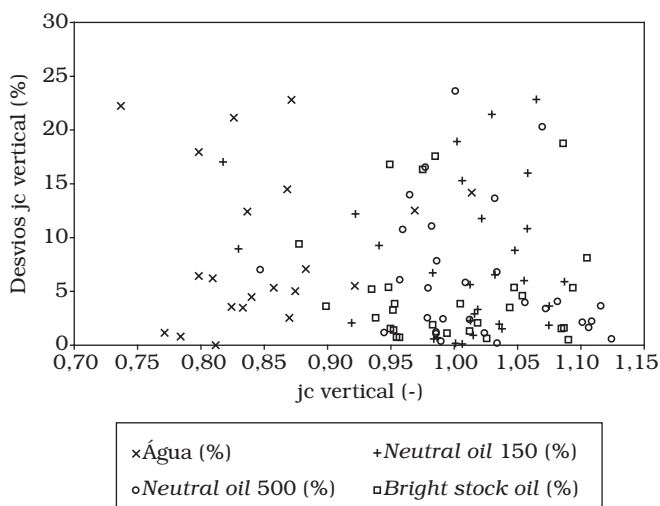


Figura 5. Desvios de jc (minutos) com nível de significância de 10% em função dos valores médios de jc (minutos).

de fh e fc foram determinados por regressão linear, conforme etapas descritas no item 2.8.

Avaliou-se o efeito da posição das latas sobre o fh e concluiu-se que não teve influência significativa de aproximadamente 41% ($1 - 0,595686$) nos resultados. A posição vertical é a posição de melhor manejo nas indústrias de alimentos, facilitando o processo de carga e descarga mecanizadas de latas nos cestos de produção, diminuindo os danos mecânicos na litografia e evitando amassamentos em geral. Por esse motivo, na discussão de resultados subsequentes apenas a posição vertical será considerada.

Da mesma forma, a combinação posição e frequência foi pouco significativa. Por outro lado, os efeitos espaço-livre, frequência de agitação, amplitude e fluido foram significativos. A amplitude foi um fator relevante na transferência de calor (fh), sendo que quanto maior, maior o valor de fh.

O modelo matemático foi construído baseado na relação de números adimensionais e em funções trigonométricas. No cálculo do Re foi aplicada a equação a seguir:

$$Re = \frac{D_{lata} \cdot (2 \cdot xa \cdot xf) \cdot \rho}{\mu} \quad (16)$$

onde: xa = amplitude de agitação (mínimo = 1 m); xf = frequência de agitação (mínimo = 1 cpm); e EL = espaço livre na lata (mm); para adequar o modelo no limite mínimo foi necessário atribuir amplitude = 1 mm e frequência = 1 cpm para processo estático.

O valor de Re foi modificado para se adequar ao processo de agitação e, dessa forma, foi incluído o diâmetro da lata e a velocidade de agitação nos termos xa e xf, que são a proporção de amplitude e a proporção da frequência de agitação, respectivamente. O número de Reynolds modificado variou de $8,7 \times 10^{-3}$ a $2,4 \times 10^4$ e quantificou o comportamento do escoamento (teórico) do fluido na lata na posição vertical.

O número de Prandtl, calculado pela Equação 18, foi mantido sem alterações e variou de no mínimo 3,6 a no máximo $3,4 \times 10^3$, para as latas na posição vertical.

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k} \quad (17)$$

A Equação adimensional 18 foi então desenvolvida para as latas na posição vertical, utilizando-se, além do número de Reynolds e Prandtl, as funções trigonométricas seno e co-seno. Essas funções foram utilizadas para transformar medidas discretas (frequência e amplitude de agitação) em uma função contínua (Nu). A aplicação dessas transformações foi inspirada na física quântica (funções de níveis quânticos)⁵.

$$Nu = \quad (18)$$

$$Re_A^{-0,199} \cdot Pr^{-0,288} \cdot \text{sen}\left(\frac{xa}{AM}\right)^{0,406} \cdot \cos\left(\frac{xf}{FA}\right)^{-1,039} \cdot \cos\left(\frac{xf}{FA} \frac{EL}{H} \pi\right)^{-4,556}$$

Onde: xa/AM = razão entre amplitude de agitação (mínimo = 1) e amplitude máxima de agitação e xf/FA = razão entre frequência de agitação (mínimo = 1) e frequência máxima de agitação. H indica a altura da lata.

Os valores do coeficiente de película, h, variaram de $9,7 \times 10^1$ a $2,3 \times 10^3$ W.K.m⁻². Os valores encontrados foram respectivamente aqueles observados para latas mantidas estáticas e sob agitação, na posição vertical. O número de Nusselt foi calculado utilizando-se os valores de coeficiente de película, h, e variou de $5,0 \times 10^{-2}$ a $2,6 \times 10^{-1}$.

Os resultados das constantes do modelo estão descritos na Tabela 3. A primeira coluna refere-se ao coeficiente da Equação do modelo, a segunda coluna, seu valor numérico e a terceira à precisão do resultado. Foi considerado nível de significância de 5%.

Na Figura 6, estão representados os valores dos resíduos de fh ($\frac{fh_{\text{experimental}} - fh_{\text{calculado}}}{fh_{\text{experimental}}}$) em função de $fh_{\text{experimental}}$. O resíduo mínimo foi de -50% e o máximo foi de +45%. Os

Tabela 3. Coeficientes da equação de transferência de calor, no aquecimento, para latas verticais sob ALI.

Coeficiente	Valor	Precisão 95%
Reynolds adaptado	-0,199	± 1,7%
Prandtl	-0,288	± 1,1%
Xa/AM	+0,406	± 1,9%
Xf/FA	-1,039	± 8,4%
Xf/FA·EL/H·π	-4,556	± 12,1%
R ²	93,8%	

resultados de erros maiores estão na faixa de 2 a 5 minutos de fh. Nessa faixa, pode-se observar a distribuição dos pontos em forma de três retas inclinadas para a direita. Elas são efeitos residuais do modelamento matemático e ocorreram com os óleos *Bright stock oil* e *Neutral oil* 150 e 500.

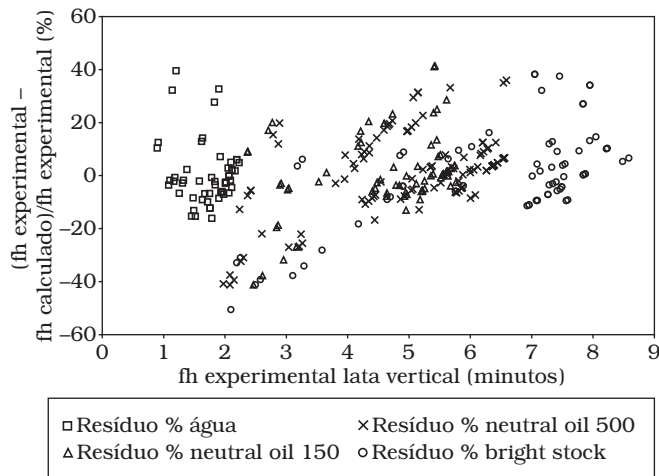


Figura 6. Resíduos $(fh_{\text{experimental}} - fh_{\text{calculado}})/fh_{\text{experimental}}$ em função do $fh_{\text{experimental}}$.

Modelamento matemático do processo de transferência de calor no resfriamento para latas na posição vertical

Aplicando as Equações 16 e 17 foi desenvolvida para o caso do resfriamento, de modo análogo ao aquecimento, a Equação 19:

$$Nu = 0.1295 Re_A^{-0,047} \cdot Pr^{-0,193} \cdot \text{sen} \left(\frac{xa}{AM} \right)^{0,114} \cdot \cos \left(\frac{xf}{FA} \right)^{-0,641} \cdot \cos \left(\frac{xf}{FA} \frac{EL}{H} \pi \right)^{-2,476} \quad (19)$$

Os resultados das constantes do modelo estão descritos na Tabela 4. A primeira coluna refere-se ao coeficiente da equação do modelo, a segunda coluna, a seu valor numérico e a terceira, à precisão do resultado. Foi considerado nível de significância de 5%.

Na Figura 7, estão representados os valores dos resíduos de fc $(fc_{\text{experimental}} - fc_{\text{calculado}})/fc_{\text{experimental}}$ em função de $fc_{\text{experimental}}$. O resíduo mínimo foi -35% e o máximo foi 58%. Esse gráfico mostra os desvios das medidas de fc quando aplicado o mo-

Tabela 4. Coeficientes da equação de transferência de calor, no resfriamento, para latas verticais sob ALI.

Coeficiente	Valor	Precisão (95%)
K	$1,295 \times 10^{-1}$	± 29,9%
Reynolds adaptado	-0,047	± 19,2%
Prandtl	-0,193	± 27,0%
xa/AM	+0,114	± 16,8%
xf/FA	-0,641	± 26,1%
xf/FA·EL/H·π	-2,476	± 35,4%
R ²	85,3%	

delo conforme Equação 19. Observa-se que os resíduos são bem distribuídos e que ainda persiste uma “reta” de inclinação positiva que descreve o fluido água. Para o resfriamento foi seguido o mesmo raciocínio que no aquecimento. Os valores de fc menores que 5 minutos apresentaram maior desvio, quando comparado com fc maiores que 5. O ajuste foi melhor na faixa de fc maior que 5 minutos.

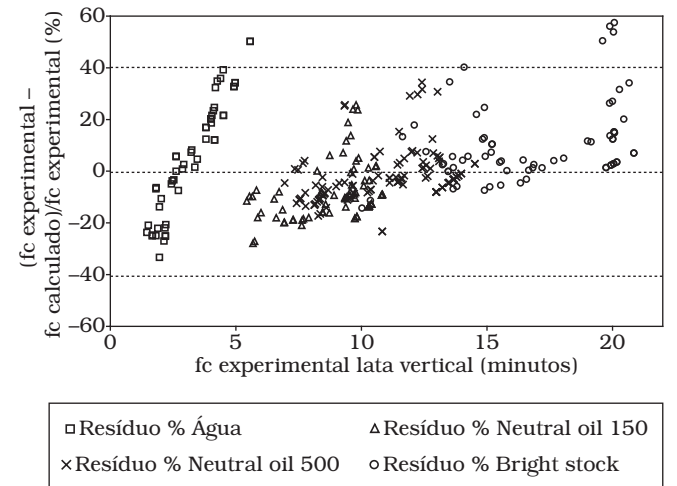


Figura 7. Resíduos $(fc_{\text{experimental}} - fc_{\text{calculado}})/fc_{\text{experimental}}$ em função de $fc_{\text{experimental}}$.

Observações quanto aos modelos matemáticos propostos, tanto para aquecimento quanto para resfriamento

Observou-se que a dispersão dos dados aumentou à medida que o valor numérico de Nusselt também cresceu. A maior dispersão ocorreu com os dados obtidos com água, ou seja, no resfriamento e a maior distorção (diferença entre o experimental e o calculado) ocorreu com o *Bright stock oil*.

Foram calculados os mesmos coeficientes em outras duas temperaturas: 0 e 100 °C e não foi observada diferença estatística a um nível de significância de 5% entre os coeficientes adimensionais. Nos resultados apresentados neste trabalho para validação do modelo escolheu-se a temperatura média entre o final do aquecimento e o resfriamento, que foi de aproximadamente 60 °C.

4 Conclusões

Não houve diferença significativa (1% de significância) entre os valores de fh entre as posições das latas, para o mesmo fluido. Isso resultou no processamento das latas na posição vertical, mais favorável no ambiente industrial, com separadores dentro dos cestos que forem mecanizados para agitação.

Esse processo de agitação é homogêneo, pois todas as latas passam pela mesma intensidade de agitação e garante o mesmo fh entre as latas de todas as posições distribuídas pelos cestos.

O parâmetro de transferência de calor fh em latas agitadas pode ser estimado com auxílio da Equação 18 com desvio máximo de 40% para valores de fh entre 3 e 5 minutos.

Quanto maior a frequência de agitação das latas, menor foi o valor de fh e, portanto, maior a transferência de calor para o alimento. O limite para o aumento da frequência depende da construção mecânica da autoclave e um valor de 120 cpm pode ser considerado satisfatório, e está de acordo com CLIFCORN⁴. Não foram investigadas frequências maiores que 132 cpm.

As Equações 18 e 19 permitiram relacionar amplitude, frequência de agitação, massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade com fh e fc para o processo de agitação com movimento linear alternado.

Referências bibliográficas

1. BALL, C. O.; OLSON, F. C. W. **Sterilization in food technology**. Theory, Practice and Calculation. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1957.
2. BARROS, N. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 2 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002, 401 p.
3. BIRD, R. B.; WARREN E. S.; EDWIN, N. L. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley e Sons, Inc., 1960.
4. CLIFCORN L. E. et al. A new principle of canned foods. **Food Technology**, New York, v. 4, n. 11, p. 450-460, dec. 1950.
5. FORMOSINHO, S. J.; VARANDAS A. J. C. **Estrutura e Reactividade molecular**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.
6. FOUST, A. S. et al. **Princípios das operações unitárias**. Tradução Horácio Macedo, Segunda Edição, Rio de Janeiro: Guanabara Dois – BRASIL. 1982. 632 p. (1982).
7. GRATZEK, J. P.; TOLEDO, R. T. Solid food thermal conductivity determination at high temperatures. **Journal of Food Science**, v. 58, n. 4, p. 908-913, 1993.
8. GUMERATO, F. H.; SCHMIDT, F. L. **Técnica para dimensionamento do tamanho amostral ou número de repetições de medidas em sistemas de Engenharia**. Nota técnica a ser publicada, 2005.
9. KERN, D. Q. **Process heat transfer**. McGraw-Hill International Book Company, International Student Edition. 1982, 871p.
10. KESSLER, H. G. **Food Engineering and Dairy Technology**. D-8050 Freising (F. R. Germany), Verlag A. Kessler, 1981, 625p.
11. OKOS, R. M. **Physical and Chemical Properties of Foods**. American Society of Agricultural Engineers, 1986, 407 p.
12. PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Chemical Engineer's Handbook**. 15 ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1977.
13. PINTO NETO, M. **Estudo da transferência de calor no aquecimento de fluidos newtonianos com partículas sólidas em latas cilíndricas com rotação longitudinal**. 1989. 179 f.. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1989.
14. QUAST, D. G.; SIOSAWA, Y. Y. **Tempo de aquecimento de latas sob rotação axial em pasteurizador a vapor**. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, n. 43, p. 67-78, Campinas, Setembro, 1975.
15. QUAST, D. G.; OKADA, M.; GUTIERREZ, J. A. F. **Transferência de calor durante o resfriamento de polpas de frutas em latas de 20 kg**. Campinas: Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos. n. 49, p. 151-177. jan/fev., 1977.
16. RAO, M. A.; BARNARD J.; KENNY, J. F. **Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes**. New York: Transactions of the ASAE, p. 1188-1196. 1975.
17. SCHMIDT, F. L. **Transferência de calor em sistemas líquido/particulados envasados sob alto vácuo**. 2000. 222 f.. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
18. STUMBO, C. R. **Thermobacteriology in Food Process**. 2 ed. London: Academic Press. 300 p. 1973.
19. TEIXEIRA, N. R. O. et al. **Resfriamento de polpas semi concentradas em tambores de 200 litros**. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 1, n 1, p. 1-22, 1981.
20. TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. 2 ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 602 p. 1991.
21. YAMAGATA, H. et al. **Transferência de calor aquecimento e resfriamento de polpas em latas cilíndricas de 20 litros**. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos. Campinas, v. 19, n. 3, p. 325-345. jun. 1982.