



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA



MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO  
TÉRMICA EM BATELADA DE VEGETAIS EM CONSERVA

Uberlândia - MG

2006





UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO  
TÉRMICA EM BATELADA DE VEGETAIS EM CONSERVA

**Fanny Ferreira Melo Fávero de Fravet**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia - MG

MARÇO 2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

F846m Fravet, Fanny Ferreira Melo Fávero de, 1973-  
Modelagem e simulação do processo de esterilização térmica em batelada de vegetais em conserva / Fanny Ferreira Melo Fávero de Fravet. - 2006.  
191 f. : il.

Orientadores: Luís Cláudio Oliveira Lopes, Valéria Viana Murata.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
Inclui bibliografia.

1. Alimentos - Conservação - Teses. I. Lopes, Luís Cláudio Oliveira. II. Murata, Valéria Viana. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

---

CDU: 664.8

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO TÉRMICA EM BATELADA DE VEGETAIS EM CONSERVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **FANNY FERREIRA MELO FÁVERO DE FRAVET**, SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

## BANCA EXAMINADORA:

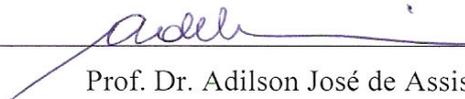


---

Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes  
Orientador - PPG – FEQUI/UFU

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Valéria Viana Murata  
Co-orientadora - PPG – FEQUI/UFU



---

Prof. Dr. Adilson José de Assis  
PPG – FEQUI/UFU



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Paula Collares  
DTA/FEA/UNICAMP



## DEDICATÓRIA

Ao Paulo, meu querido marido, amigo de todas as horas e amor da minha vida, esta dissertação é dedicada a você, pelo apoio, incentivo, compreensão, carinho e amor durante o desenvolvimento deste trabalho.



## AGRADECIMENTOS

A Deus e à minha querida Nossa Senhora, por estarem sempre comigo iluminado meus caminhos permitindo que eu superasse tantos obstáculos e alcançasse mais esta vitória.

Ao Professor Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes, pela oportunidade, pela orientação, pela confiança, pelo incentivo, pelo carinho e amizade. Agradeço ainda, por ter compartilhado comigo sua sabedoria, empenhando-se não só para meu desenvolvimento intelectual, mas também para meu crescimento pessoal.

À Professora Dra. Valéria Viana Murata, pela orientação, colaboração, serenidade e amizade, durante a realização deste trabalho.

Ao meu querido e amado marido, por seu apoio incondicional em todos os momentos.

À minha mãe, Joana, pelo carinho, atenção, ajuda e orações, cujas bênçãos permitiram que eu chegasse ao final desta longa jornada.

O meu pai, Júlio, pelo apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida.

Ao Sr. Roberto e à Sra. Célia, meus segundos pais aqui na terra, pelo incentivo, carinho e apoio para a conclusão deste mestrado.

Aos meus irmãos, pela ajuda, pelo incentivo, pelo carinho e por estarem sempre prontos a me socorrerem, a qualquer hora e em qualquer circunstância.

À amiga, Marília Assunta Sfredo, por ter me recebido em sua casa, pelo incentivo, apoio, dedicação, amizade e pela inestimável ajuda durante a fase final deste trabalho.

Ao Professor Dr. Adilson José de Assis, à Professora Dra. Fernanda Paula Collares e ao Professor, Dr. Humberto Molinar Henrique pela colaboração, pelas sugestões e empenho que muito contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

Ao querido amido Eduardo Adoulfo Bürger de Aguiar, por ter compartilhado comigo seus livros e, principalmente, sua alegria, persistência, otimismo e convicção de que podemos tudo, que só é impossível aquilo que não tentamos e, “que todos nós somos milagres, todos nós estamos aqui e podemos fazer alguma diferença”.

Ao grande amigo Colin Haine, que participou desde o início desta história e sempre se colocou pronto a ajudar-me, cuja opinião e apoio muito significaram para a elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos da Promotoria de Justiça de Araxá, em especial à Dra. Mara Lúcia Silva Dourado, pela compreensão, ajuda, apoio e amizade durante a elaboração desta dissertação.

À família COOPATOS, que agradeço na pessoa do Sr. Pedro Francisco Ferreira, por terem me incentivado e apoiado desde o início deste projeto.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, especialmente os funcionários Silvino e José Henrique, pela cordialidade, amizade e cooperação.

À pesquisadora do Instituto de Tecnologia de Alimentos – ITAL, Dra. Maria Isabel Berto, pela cordialidade, atenção e cooperação durante o desenvolvimento deste projeto

Aos professores do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Professor Dr. Luis Antônio Minim, Professor Dr. Antônio Carlos G. de Souza e Professor Dr. Frederico Passos, pelo apoio e cordialidade.

Aos amigos que fiz: Sandra, Fran Sérgio, Sandro, Paula, Patrícia, Fernanda, Taisa, Ailton, Leila, Márcio, Danilo, Raquel, Adriene, Líbia e muitos outros, que mesmo não citados aqui, contribuíram para que meus dias na UFU fossem sempre agradáveis, divertidos e produtivos.

Agradeço por fim, a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a elaboração desta dissertação.

## RESUMO

A esterilização térmica de alimentos baseia-se na aplicação de condições de temperatura por períodos de tempo que levem à inativação de microorganismos, esporos e enzimas e conseqüentemente a obtenção de produtos seguros por períodos ampliados de tempo. Neste trabalho é proposto um modelo matemático capaz de representar a transferência de calor durante o tratamento térmico de vegetais em conserva em autoclave a vapor, horizontal, com múltiplos estágios e operação em batelada. A partir de uma metodologia teórico-computacional, desenvolveram-se modelos parciais representativos da troca térmica no grão, lata e autoclave, com posterior acoplamento desses em um modelo global. O modelo dinâmico proposto possui vários níveis de detalhamento, sendo que a lata avaliada foi investigada numa geometria bidimensional. O método numérico da colocação ortogonal bidimensional acoplado ao método das linhas (MOL) foi utilizado para a solução das equações diferenciais parciais encontradas. O modelo foi validado através de comparação dos resultados encontrados com valores baseados em curva de penetração térmica de ervilhas reportados na literatura. Os resultados apresentados por este estudo mostram que o modelo proposto representa satisfatoriamente o processo de esterilização de alimentos enlatados. Mostra, também, que a letalidade pode ser definida como função objetivo monitorada para propósito de controle, mostrando-se adequada para a garantia da segurança do produto.

Palavras-chave: modelagem, esterilização, alimentos enlatados, autoclave.



## ABSTRACT

The thermal food sterilization is based on the application of temperature conditions for established periods that perform a commercial sterilization of microorganisms, spores and enzymes that has as main goal the attainment of safe products for consumption during extended periods of time. This work addresses the sterilization processing of canned food for the action of heat and introduces a novel mathematical model capable of describing the heat transfer during the thermal treatment of canned vegetables, simulating a processing in a retort. The adopted retort works with vapor, it is horizontal with multiples stages during a batch sterilization cycle. With a modeling methodology, representative partial models of the thermal exchange in the grain/vegetable and can were developed, with posterior coupling of these models in a retort unit model. The considered dynamic models possess 1D level of detail for vegetables, 2D level of detail for the can. The used numerical methods for the solution of the coupled set of partial and ordinary differential equations were the orthogonal collocation technique coupled to the method of lines (MOL). The model was validated through a comparison of the results with values based on thermal penetration curve during peas sterilization reported in the literature. The results for this study show that the proposed model satisfactorily represents the process of canned food sterilization. It also indicates that the lethality could be defined as the monitoring function for online process control, leading to suitable and safe methods for safe production of a sterilized canned product.

Keywords: modeling, sterilization, canned food, batch retort.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Histórico de temperatura e tempo de esterilização de um produto (adaptado de GONÇALVES <i>et al.</i> , 1992).....	12
<b>Figura 2.2</b> - Autoclave Fixa Vertical com pressão de vapor (RICHARDSON, 2001)....	16
<b>Figura 2.3</b> - Autoclave Fixa Horizontal com sobrepressão de vapor e ar (RICHARDSON, 2001).....	17
<b>Figura 2.4</b> – Autoclave Fixa Horizontal com sobrepressão em cascata de água (RICHARDSON, 2001). .....	24
<b>Figura 2.5</b> - Autoclave Fixa Horizontal com sobrepressão em água (RICHARDSON, 2001)....	25
<b>Figura 2.6</b> – Taxa de letalidade do processo em relação à $T_{ref}$ ( $L = 1,23$ ).....	27
<b>Figura 2.7</b> - Curva de Sobrevivência Térmica (adaptado de GAVA,1984).....	30
<b>Figura 2.8</b> - Curva de Resistência Térmica (adaptado de GAVA,1984).....	32
<b>Figura 2.9</b> - Curva de Destruição Térmica (adaptado de GAVA,1984).....	33
<b>Figura 2.10</b> - Aquecimento de um alimento em uma lata e a determinação do ponto frio (GAVA,1984).....	37
<b>Figura 2.11</b> - Esquema da transferência de calor por condução (a) e por convecção (b) dentro da lata para produtos apertizados (FELLOWS, 2000).....	38
<b>Figura 2.12</b> – Curva de Destruição Térmica (adaptado de GAVA, 1984).....	43
<b>Figura 2.13</b> – Curva de penetração de calor, por condução, em alimentos enlatados. A curva (—) corresponde à temperatura da autoclave e a curva (···) corresponde à temperatura do ponto frio da lata (RICHARDSON, 2001).....	43
<b>Figura 2.14</b> – Curva de aquecimento (adaptado de FELLOWS, 2000).....	45
<b>Figura 2.15</b> - Diagrama de Blocos para do Sistema de Controle da Autoclave (KUMAR <i>et al.</i> , 2001).....	48
<b>Figura 2.16</b> - Sistema bifásico apresentando as fases $\beta$ (fluido) e $\sigma$ (sólido) em uma região esférica (JIMÉNEZ-ISLAS, 1999).....	62
<b>Figura 2.17</b> - Representação de uma lata com <i>head space</i> (BANGA <i>et al.</i> 1993).....	66
<b>Figura 2.18</b> - Esquema do Processamento Térmico em Autoclave com controle baseado no modelo matemático da unidade de produto envasado (KUMAR <i>et al.</i> , 2001).....	68

<b>Figura 2.19</b> - Esquema do Processamento Térmico em Autoclave cujo controle é feito a partir da modelagem matemática da unidade de esterilização (ALONSO <i>et al.</i> , 1997).	69
<b>Figura 4.1</b> – Perfil da densidade da ervilha em função da temperatura. ....	91
<b>Figura 4.2</b> – Perfil do calor específico da ervilha em função da temperatura. ....	92
<b>Figura 4.3</b> – Perfil da condutividade térmica da ervilha em função da temperatura.....	93
<b>Figura 4.4</b> – Perfil da difusividade térmica da ervilha em função da temperatura, sendo o perfil (---) gerado pela Equação (4.29) e o perfil (—) gerado pela Equação (4.30).....	95
<b>Figura 4.5</b> – Perfil da densidade da salmoura em função da temperatura.....	97
<b>Figura 4.6</b> – Perfil do calor específico da salmoura em função da temperatura.....	97
<b>Figura 4.7</b> – Perfil da condutividade térmica da salmoura em função da temperatura....	98
<b>Figura 4.8</b> – Perfil da difusividade térmica da salmoura em função da temperatura, sendo o perfil (---) gerado pela Equação (4.34) e o perfil (—) gerado pela Equação (4.35).....	99
<b>Figura 4.9</b> – Comportamento do número de Biot para a interface partícula-salmoura....	107
<b>Figura 4.10</b> – Comportamento do valor de $\beta_s = \frac{\alpha_s t_c}{R_s^2}$ para a partícula de ervilha.....	108
<b>Figura 4.11</b> – Perfil da temperatura no ponto frio (—) e na superfície do grão (—), que são coincidentes, perfil da temperatura da salmoura (—); sendo $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ e $N_s = 5...$	109
<b>Figura 4.12</b> – Perfil da temperatura no ponto frio (—) e na superfície do grão (—), que são coincidentes, perfil da temperatura da salmoura (—); sendo $h_{sf} = 5 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ e $N_s = 5...$	109
<b>Figura 4.13</b> – Letalidade do processo térmico na superfície (—) e no ponto frio do grão (—) (curvas sobrepostas); sendo $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ e $N_s = 5.....$	111
<b>Figura 4.14</b> – Letalidade do processo térmico na superfície (—) e no ponto frio do grão (—) (curvas sobrepostas); sendo $h_{sf} = 5 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ e $N_s = 5.....$	112
<b>Figura 4.15</b> – Taxa de letalidade ( $L$ ) do processo; com $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ e $N_s = 5..$	112
<b>Figura 4.16</b> – Taxa de letalidade ( $L$ ) do processo; com $h_{sf} = 5 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ e $N_s = 5..$	113
<b>Figura 4.17</b> – Comportamento do número de Biot para a interface superfície lateral da lata-retorta..	122
<b>Figura 4.18</b> - Comportamento transiente da temperatura na lata ( $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ): perfil (---) da temperatura na superfície da lata em $r_L=R_L$ , perfil (—) da temperatura no centro geométrico da lata em $r_L=0$ (curva de penetração de calor); condutividade efetiva do sistema considerada igual a condutividade da água ( $k_{fc} \approx k_w$ ); ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	123

- Figura 4.19** - Comportamento dinâmico axial da temperatura na lata em  $r_L=R_L/2$  incluindo resfriamento e aquecimento, sendo:  $(-\circ-)$  comportamento inicial  $t=0$ ;  $(-\square-)$   $t=8$  min;  $(-\Delta-)$   $t=15$  min;  $(-\triangleright-)$   $t=22$  min;  $(-\nabla-)$   $t=40$ min;  $(-\diamond-)$   $t=55$  min e  $(-*-)$   $t=60$ min; condutividade efetiva do sistema considerada igual à condutividade da água ( $k_{f_c} \approx k_w$ );  $(N_s, N_L, M_L)=(5,5,7)$ ..... 124
- Figura 4.20** – Comportamento dinâmico axial da temperatura na lata em  $r_L=0$  para vários instantes de tempo incluindo resfriamento e aquecimento, sendo:  $(-\circ-)$  comportamento inicial  $t=0$ ;  $(-\square-)$   $t=8$  min;  $(-\Delta-)$   $t=15$  min;  $(-\triangleright-)$   $t=22$  min;  $(-\nabla-)$   $t=40$ min;  $(-\diamond-)$   $t=55$  min e  $(-*-)$   $t=60$ min; condutividade efetiva do sistema considerada igual à condutividade da água ( $k_{f_c} \approx k_w$ );  $(N_s, N_L, M_L)=(5,5,7)$ ..... 124
- Figura 4.21** – Comportamento dinâmico radial da temperatura na lata em  $L/2$  incluindo resfriamento e aquecimento, sendo:  $(-\circ-)$  comportamento inicial  $t=0$ ;  $(-\square-)$   $t=8$  min;  $(-\Delta-)$   $t=15$  min;  $(-\triangleright-)$   $t=22$  min;  $(-\nabla-)$   $t=40$ min;  $(-\diamond-)$   $t=55$  min e  $(-*-)$   $t=60$ min; condutividade efetiva do sistema considerada igual à condutividade da água ( $k_{f_c} \approx k_w$ );  $(N_s, N_L, M_L)=(5,5,7)$ ..... 125
- Figura 4.22** - Comportamento transiente da temperatura na lata ( $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ): perfil  $(- - - -)$  da temperatura na superfície da lata em  $L/2$ , perfil  $(\text{—})$  da temperatura no centro geométrico da lata  $r_L=0$  (curva de penetração de calor); condutividade térmica efetiva do sistema dada por:  $k_{f_c} = \varepsilon_f k_f$ ;  $(N_s, N_L, M_L) = (5,5,7)$ ..... 126
- Figura 4.23** – Comportamento dinâmico axial da temperatura na lata em  $r_L=R_L/2$ , sendo:  $(-\circ-)$  comportamento inicial  $t=0$ ;  $(-\square-)$   $t=8$  min;  $(-\Delta-)$   $t=15$  min;  $(-\triangleright-)$   $t=22$  min;  $(-\nabla-)$   $t=40$ min;  $(-\diamond-)$   $t=55$  min e  $(-*-)$   $t=60$ min; condutividade térmica efetiva do sistema dada por:  $k_{f_c} = \varepsilon_f k_f$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(5,5,7)$ ..... 126
- Figura 4.24** - Comportamento dinâmico axial da temperatura na lata em  $r_L=0$ , sendo:  $(-\circ-)$  comportamento inicial  $t=0$ ;  $(-\square-)$   $t=8$  min;  $(-\Delta-)$   $t=15$  min;  $(-\triangleright-)$   $t=22$  min;  $(-\nabla-)$   $t=40$ min;  $(-\diamond-)$   $t=55$  min e  $(-*-)$   $t=60$ min; condutividade térmica efetiva do sistema dada por:  $k_{f_c} = \varepsilon_f k_f$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(5,5,7)$ ..... 127
- Figura 4.25** - Comportamento radial da temperatura na lata em  $L/2$  para vários instantes de tempo, sendo:  $(-\circ-)$  comportamento inicial  $t=0$ ;  $(-\square-)$   $t=8$  min;  $(-\Delta-)$   $t=15$  min;  $(-\triangleright-)$   $t=22$  min;  $(-\nabla-)$   $t=40$ min;  $(-\diamond-)$   $t=55$  min e  $(-*-)$   $t=60$ min; condutividade térmica efetiva do sistema dada por:  $k_{f_c} = \varepsilon_f k_f$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(5,5,7)$ ..... 127
- Figura 4.26** – Perfil da temperatura na autoclave em função do tempo  $(- - -)$  e da temperatura no fluido em função do tempo  $(\text{—})$ ..... 130
- Figura 4.27** – Taxa da letalidade do processo..... 130
- Figura 4.28** – Esquema do processamento de esterilização térmica em batelada de ervilhas em salmoura..... 133

<b>Figura 4.29</b> – Comportamento transiente da temperatura na autoclave (—), trajetória de temperatura usual para esterilização de vegetais em conserva em autoclave (- - - -); ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	149
<b>Figura 4.30</b> – Perfil da variação transiente na quantidade de vapor (- - -) e ar (—); ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	150
<b>Figura 4.31</b> – Perfil da variação transiente no inventário de água para o ciclo de esterilização (—) e as linhas (- - -) marcam o início das etapas de <i>holding</i> e resfriamento; ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	150
<b>Figura 4.32</b> – Comportamento axial da temperatura na lata em $r_L=R_L/2$ para vários instantes de tempo, sendo: ( $\ominus$ ) comportamento inicial $t=0$ ; ( $\square$ ) $t=8$ min; ( $\Delta$ ) $t=15$ min; ( $\triangleright$ ) $t=22$ min; ( $\nabla$ ) $t=40$ min; ( $\diamond$ ) $t=55$ min e ( $*$ ) $t=60$ min; ( $N_s, N_L, M_L$ ) = (5,5,7).....	151
<b>Figura 4.33</b> - Comportamento axial da temperatura na lata em $r_L=0$ para vários instantes de tempo, sendo: ( $\ominus$ ) comportamento inicial $t=0$ ; ( $\square$ ) $t=8$ min; ( $\Delta$ ) $t=15$ min; ( $\triangleright$ ) $t=22$ min; ( $\nabla$ ) $t=40$ min; ( $\diamond$ ) $t=55$ min e ( $*$ ) $t=60$ min; ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	151
<b>Figura 4.34</b> - Comportamento radial da temperatura na lata em $z_L=L/2$ para vários instantes de tempo, sendo: ( $\ominus$ ) comportamento inicial $t=0$ ; ( $\square$ ) $t=8$ min; ( $\Delta$ ) $t=15$ min; ( $\triangleright$ ) $t=22$ min; ( $\nabla$ ) $t=40$ min; ( $\diamond$ ) $t=55$ min e ( $*$ ) $t=60$ min; ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	152
<b>Figura 4.35</b> - Comportamento de temperatura na lata em $z_L=L/2$ para a superfície lateral (- - -) e para o centro geométrico da lata (—); ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	153
<b>Figura 4.36</b> – Letalidade do processo térmico no centro da lata ( $r_L=0$ e $z_L=L/2$ ); ( $N_s, N_L, M_L$ ) = (5,5,7).....	153
<b>Figura 4.37</b> – Letalidade do processo térmico na superfície da lata ( $r_L=R_L$ e $z_L=L/2$ ); ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	154
<b>Figura 4.38</b> – Taxa de letalidade ( $\mathbb{L}$ ) do processo térmico no centro da lata ( $r_L=0$ e $z_L=L/2$ ); ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7).....	154
<b>Figura 4.39</b> – Taxa de letalidade ( $\mathbb{L}$ ) do processo térmico na superfície da lata; ( $N_s, N_L, M_L$ ) = (5,5,7).....	155
<b>Figura 4.40</b> – Comportamento transiente da temperatura simulado a partir do modelo reportado por Akterian (1996), baseado em dados experimentais (- - - -), e o comportamento da temperatura média do produto simulado a partir do modelo proposto (—); ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7); $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ e $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ .	156
<b>Figura 4.41</b> – Comportamento transiente da temperatura no centro geométrico (—) e na superfície da lata (—), comportamento utilizando dados experimentais reportados por Akterian (1996) para a curva de penetração térmica (- - -); comportamento a 1/3 da altura no centro radial da lata ( $z_L=L/3$ ) (—); para as discretizações ( $N_s, N_L, M_L$ )=(5,5,7); $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ e $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ .....	157

- Figura 4.42** – Comportamento da letalidade no centro geométrico da lata, para as discretizações  $(N_s, N_L, M_L) = (3,3,3)$  (—) x  $(3,3,5)$  (-----) x  $(5,5,7)$  (---). 159
- Figura 4.43**– Comportamento da temperatura no centro geométrico (—) e na superfície da lata (—), comportamento da temperatura utilizando dados experimentais reportados por Akterian, (1996) para a curva de penetração térmica (---); comportamento a 1/3 da altura no centro radial da lata ( $z_L=L/3$ ) (---); para as discretizações  $(N_s, N_L, M_L) = (3,3,3)$ ,  $(3,3,5)$  e  $(5,5,7)$ . 159
- Figura 4.44** – Comportamento do coeficiente de transferência de calor lata-retorta para a faixa de variação de temperatura ( $\Delta T$ ) do processo de esterilização em estudo;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ . 161
- Figura 4.45** – Comportamento transiente da temperatura no centro geométrico (—) e na superfície da lata (—), comportamento da temperatura utilizando dados experimentais reportados por Akterian (1996) para a curva de penetração térmica (---); comportamento a 1/3 da altura no centro radial da lata ( $z_L=L/3$ ) (---);  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ;  $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$  e  $h_{LRET} = 30 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ . 163
- Figura 4.46** – Comportamento da letalidade no centro geométrico da lata para simulações com coeficiente de transferência de calor na superfície da lata igual a  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$  (---) e  $h_{LRET} = 30 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$  (—);  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ;  $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ . 163
- Figura 4.47** – Comportamento transiente da temperatura na superfície e no centro geométrico da lata, para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor: para  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ , na superfície (---) e no centro geométrico (---); para  $h_{LRET} = 30 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$ , na superfície (—) e centro geométrico (—); para variação entre os ciclos ( $h_{LRET} = 40 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$  durante a desaeração;  $h_{LRET} = 30 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$  durante o aquecimento e esterilização e  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2\text{°C min}$  durante o resfriamento), na superfície (---) e no centro geométrico (---);  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ . 164
- Figura 4.48** – Comportamento transiente da temperatura na autoclave (—), trajetória usual das etapas de esterilização de vegetais em conserva (---);  $h_{LRET}=40 \text{ kJ/m}^2 \text{ °C min}$  durante a desaeração;  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ °C min}$  durante o aquecimento e esterilização e  $h_{LRET}=30 \text{ kJ/m}^2 \text{ °C min}$  durante o resfriamento;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ . 165
- Figura 4.49** – Perfil de variação na quantidade de vapor (---) e na quantidade de ar (—), em função do tempo;  $h_{LRET}=40 \text{ kJ/m}^2 \text{ °C min}$  durante a desaeração;  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ °C min}$  durante o aquecimento e esterilização e  $h_{LRET}=30 \text{ kJ/m}^2 \text{ °C min}$  durante o resfriamento;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ . 166

- Figura 4.50** – Letalidade do processo térmico no centro geométrico da lata, para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor na superfície da lata; considerando  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  (---),  $h_{LRET} = 30 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  (— —) e variação entre os ciclos com  $h_{LRET} = 40 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante a desaeração;  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante o aquecimento e esterilização e  $h_{LRET} = 30 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante o resfriamento (—); considerando desaeração nos cinco primeiros minutos do processo e  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 167
- Figura 4.51** – Letalidade do processo térmico na superfície da lata ( $r_L = 1$  e  $Z_L = L/2$ );  $h_{LRET} = 40 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante a desaeração;  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante o aquecimento e esterilização e  $h_{LRET} = 30 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante o resfriamento; considerando desaeração nos cinco primeiros minutos do processo e  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 167
- Figura 4.52** – Taxa de letalidade ( $\mathbb{L}$ ) do processo térmico no ponto frio da lata;  $h_L = 40 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante a desaeração;  $h_L = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante o aquecimento e esterilização e  $h_L = 30 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  durante o resfriamento;  $(N_s, N_L, M_L) = (5, 11, 11)$ ..... 168
- Figura 4.53** – Taxa de letalidade do processo térmico na superfície da lata que recebe a maior quantidade de calor da lata (ponto quente);  $h_L = 40 \text{ kJ/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C min)}$  durante a desaeração;  $h_L = 50 \text{ kJ/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C min)}$  durante o aquecimento a esterilização e  $h_L = 30 \text{ kJ/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C min)}$  durante o resfriamento;  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 168
- Figura 4.54** – Comportamento axial da temperatura na lata em  $r_L = R_L/2$  para vários instantes de, sendo: (—○—) comportamento inicial  $t = 0$ ; (—□—)  $t = 8 \text{ min}$ ; (—Δ—)  $t = 15 \text{ min}$ ; (—▷—)  $t = 22 \text{ min}$ ; (—▽—)  $t = 40 \text{ min}$ ; (—◇—)  $t = 55 \text{ min}$  e (—\*—)  $t = 60 \text{ min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 169
- Figura 4.55** – Comportamento axial da temperatura na lata em  $r_L = 0$  para vários instantes de tempo, sendo: (—○—) comportamento inicial  $t = 0$ ; (—□—)  $t = 8 \text{ min}$ ; (—Δ—)  $t = 15 \text{ min}$ ; (—▷—)  $t = 22 \text{ min}$ ; (—▽—)  $t = 40 \text{ min}$ ; (—◇—)  $t = 55 \text{ min}$  e (—\*—)  $t = 60 \text{ min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 170
- Figura 4.56** - Comportamento radial da temperatura na lata em  $Z_L = L/2$  para vários instantes de tempo, sendo: (—○—) comportamento inicial  $t = 0$ ; (—□—)  $t = 8 \text{ min}$ ; (—Δ—)  $t = 15 \text{ min}$ ; (—▷—)  $t = 22 \text{ min}$ ; (—▽—)  $t = 40 \text{ min}$ ; (—◇—)  $t = 55 \text{ min}$  e (—\*—)  $t = 60 \text{ min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 170
- Figura 4.57** – Comportamento transiente da temperatura na superfície da lata em  $r_L = R_L$  e  $Z_L = L/2$  (---) e no centro da lata em  $r_L = 0$  e  $Z_L = L/2$  (—);  $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 171
- Figura 4.58** – Letalidade do processo térmico no centro da lata ( $r_L = 0$  e  $Z_L = L/2$ );  $h_{sf} = 1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 172
- Figura 4.59** – Taxa de letalidade ( $\mathbb{L}$ ) do processo térmico no centro da lata em  $r_L = 0$  e  $Z_L = L/2$  (—) (curva com pico em  $\mathbb{L} \approx 10$ ) e na superfície da lata em  $r_L = R_L$  e  $Z_L = L/2$  (—) (curva com pico em  $\mathbb{L} \approx 11$ );  $h_{sf} = 1 \text{ kJ/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C min)}$  e  $h_{LRET} = 50 \text{ kJ/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C min)}$ ;  $(N_s, N_L, M_L) = (3, 3, 5)$ ..... 172

- Figura 4.60** – Perfil da variação na quantidade de vapor (---) e ar (—) dentro da autoclave; para processo conduzido sem efetuar a etapa de desaeração;  $h_{sf}=1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ..... 173
- Figura 4.61** – Comportamento transiente da temperatura considerando o processamento com a condução da etapa de desaeração (no centro geométrico em  $r_L=0$  e  $z_L=L/2$  (—) e na superfície da lata em  $r_L=R_L$  e  $z_L=L/2$  (---)), e sem percorrer a etapa de desaeração (no centro geométrico em  $r_L=0$  e  $z_L=L/2$  (---) e na superfície da lata em  $r_L=R_L$  e  $z_L=L/2$  (---));  $h_{sf}=1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ..... 174
- Figura 4.62** – Letalidade no centro geométrico da lata ( $r_L=0$  e  $Z_L=L/2$ ): processo com desaeração nos 5 primeiros minutos (—) e processo sem desaeração (---);  $h_{sf}=1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ..... 174
- Figura 4.63** – Comportamento transiente da temperatura considerando os valores de  $30^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$  para a temperatura inicial do produto: simulação a partir do modelo proposto para a superfície da lata com  $30^\circ\text{C}$  (—) e  $60^\circ\text{C}$  (---) e para o centro geométrico da lata com  $30^\circ\text{C}$  (---) e  $60^\circ\text{C}$  (---); simulação a partir do modelo reportado por Akterian (1996) para a curva de penetração térmica com  $30^\circ\text{C}$  (---) e  $60^\circ\text{C}$  (---);  $h_{sf}=1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ..... 176
- Figura 4.64** – Simulação da temperatura média da lata (—) e da temperatura definida pelo modelo proposto por Akterian (1996) (---) considerando a temperatura inicial do produto igual a  $80^\circ\text{C}$ ;  $h_{sf}=1 \text{ kJ/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C min)}$  e  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C min)}$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ..... 176
- Figura 4.65** – Letalidade no centro geométrico da lata ( $r_L=0$  e  $z_L=L/2$ ): considerando a temperatura inicial do produto  $30^\circ\text{C}$  (—);  $60^\circ\text{C}$  (---) e  $80^\circ\text{C}$  (---);  $h_{sf}=1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ..... 177
- Figura 4.66** – Comportamento transiente da temperatura: na superfície (—) e no centro geométrico da lata (—); utilizando dados experimentais reportados por Akterian (1996) para a curva de penetração térmica (---); considerando o resfriamento realizado através de circulação de ar;  $h_{sf}=1 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$  e  $h_{LRET}=50 \text{ kJ/m}^2 \text{ }^\circ\text{C min}$ ;  $(N_s, N_L, M_L)=(3,3,5)$ ..... 178



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Taxas de letalidade para $z = 10^{\circ}\text{C}$ (FELLOWS, 2000).....	27
<b>Tabela 2.2</b> – Equações constitutivas para estimativa das propriedades térmicas de componentes dos alimentos (CHOI; OKOS, 1986).....	57
<b>Tabela 2.3</b> – Equações constitutivas para estimativa das propriedades térmicas da água (CHOI; OKOS, 1986).....	58
<b>Tabela 3.1</b> – Tabela 3.1: Especificações físico-químicas para ervilha em conserva (SEBRAE, 1996).....	78
<b>Tabela 4.1</b> – Composição da ervilha cozida (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP, 2005).	90
<b>Tabela 4.2</b> – Propriedades físico-químicas médias para ervilha e salmoura.....	100
<b>Tabela 4.3</b> – Valores do coeficiente $\mathbb{E}$ para alimentos enlatados (AKTERIAN, 1996)..	129
<b>Tabela 4.4</b> - Esquema de discretização dos balanços de energia para a lata indicando as $(N_L M_L)(N_s+1)$ equações diferenciais resultantes. Para as equações representando $T_s$ , a coluna à esquerda representa a posição do grão na lata.....	158

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> - Métodos para a conservação de alimentos (SILVA, 2000).....	6
<b>Quadro 2.2</b> - Algoritmo para estimativa do tempo de esterilização térmica.....	47
<b>Quadro 3.1</b> - Plano de APPCC.....	80



## SIMBOLOGIA

A	Parâmetro da lei de Antoine (24,633)	[-]
A	Área superficial	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>b</sub>	Área da seção do sangrador	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>d</sub>	Área da seção do dreno	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>RT</sub>	Área efetiva da autoclave	[m <sup>2</sup> ]
a	Número de microrganismos sobreviventes no tempo t = t <sub>2</sub>	[-]
a <sub>1</sub>	Constante	[-]
a <sub>2</sub>	Constante	[-]
a <sub>3</sub>	Constante	[-]
a <sub>s</sub>	Área superficial do grão (área do grão/volume do grão)	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
B <sub>h</sub>	Tempo da fase de aquecimento	[min]
B	Parâmetro da lei de Antoine (4893,0)	[-]
b	Número de microrganismos sobreviventes no tempo t = t <sub>1</sub>	[-]
b <sub>1</sub>	Constante	[-]
b <sub>2</sub>	Constante	[-]
b <sub>3</sub>	Constante	[-]
C <sub>f</sub>	Constante Característica da válvula	[-]
C <sup>-1</sup>	Inverso da permeabilidade	[m <sup>[-1]2</sup> ]
c <sub>1</sub>	Constante	[-]
c <sub>2</sub>	Constante	[-]
c <sub>p</sub>	Calor específico à pressão constante	[kJ/kg °C]
$\bar{c}_{p_a}^i$	Calor específico do ar na entrada do sistema	[kJ/kg °C]
$\bar{c}_{p_v}^i$	Calor específico do vapor na entrada do sistema	[kJ/kg °C]
C <sub>va</sub>	Parâmetro característico da válvula de ar	[gpm]
C <sub>vv</sub>	Parâmetro característico da válvula de vapor	[gpm]
D <sub>c</sub>	Dimensão característica	[m]
D	Tempo de redução decimal	[°C]
D <sub>1</sub>	Tempo de redução decimal a uma determinada temperatura (T <sub>1</sub> )	[°C]
D <sub>2</sub>	Tempo de redução decimal a uma determinada temperatura (T <sub>2</sub> )	[°C]
E <sub>a</sub>	Energia de ativação	[cal/mol]
E	Energia interna	[kJ]

$\mathbb{E}$	Coefficiente de inércia térmica	[min]
$E_T$	Energia total do sistema	[kJ]
$\bar{e}$	Energia interna, por unidade de massa	[kJ/kg]
$F$	Letalidade	[min]
$F_0$	Letalidade à temperatura de referência $T = 121^\circ\text{C}$ e $z = 10^\circ\text{C}$	[min]
$F_b^a$	Vazão mássica de ar através do sangrador	[kg/min]
$F_b^v$	Vazão mássica de vapor através do sangrador	[kg/min]
$F_a$	Vazão mássica de ar	[kg/min]
$F_{d,0}$	Letalidade desejada	[min]
$F_v$	Vazão mássica de vapor	[kg/min]
$F_w$	Vazão mássica de água	[kg/min]
$f_h$	Constante de velocidade de aquecimento	[min]
$G$	Taxa de geração de calor	[kJ/m <sup>2</sup> min]
$G_f$	Gravidade específica do gás	[-]
$Gr$	Número de Grashof	[-]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$g$	Diferença entre a temperatura da autoclave e a temperatura final do produto (Equação 2.31)	[°C]
$h$	Coefficiente de transferência de calor convectivo	[kJ/m <sup>2</sup> °C min]
$h$	Coefficiente de transferência de calor convectivo (Equação 2.21, 2.23 e 2.29)	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_c$	Coefficiente de troca térmica, por convecção natural, entre a superfície da autoclave e o meio ambiente	[kJ/m <sup>2</sup> °C min]
$h_{LR}$	Metade da altura da lata	[m]
$h_{LRET}$	Coefficiente de troca térmica, por convecção natural, entre a superfície da lata e o meio de aquecimento (autoclave)	[kJ/m <sup>2</sup> °Cmin]
$h_{sf}$	Coefficiente de troca térmica, por convecção natural, entre a superfície do grão e a salmoura	[kJ/m <sup>2</sup> °C min]
$\bar{h}_a$	Entalpia do ar dentro do sistema, por unidade de massa	[kJ/kg]
$\bar{h}_d$	Entalpia do dreno dentro do sistema, por unidade de massa	[kJ/kg]
$\bar{h}_v$	Entalpia do vapor dentro do sistema, por unidade de massa	[kJ/kg]
$\bar{h}_a^i$	Entalpia do ar na entrada do sistema, por unidade de massa	[kJ/kg]
$\bar{h}_v^i$	Entalpia do vapor na entrada do sistema, por unidade de massa	[kJ/kg]
$\bar{h}_w^i$	Entalpia da água na entrada do sistema, por unidade de massa	[kJ/kg]

$\bar{h}_v^{\text{ref}}$	Entalpia no estado de referência para o vapor, por unidade de massa	[kJ/kg]
$I_h$	Diferença entre a temperatura da autoclave e a temperatura inicial do produto	[°C]
$j_h$	Fator de atraso térmico ( <i>thermal lag factor</i> )	[-]
$k$	Constante de proporcionalidade (Equações 2.3 a 2.7 e 2.14 a 2.18)	[-]
$k$	Condutividade térmica (Equações 2.22, 2.23, 2.24 e 2.29)	[W/m K]
$k$	Condutividade térmica	[kJ/m°Cmin]
$k_1$	Constante de proporcionalidade a uma temperatura $T_1$ (Equações 2.16 e 2.17)	[-]
$k_1$	Condutividade térmica à temperatura $T_1$	[kJ/m <sup>2</sup> °Cmin]
$k_{f_c}$	Coefficiente efetivo de troca térmica, por convecção natural, entre a superfície do grão e a salmoura	[kJ/m <sup>2</sup> °Cmin]
$k_{(T+10^\circ\text{C})}$	Constante de morte térmica quando a temperatura é aumentada em 10 °C	[-]
$k_T$	Constante de morte térmica a uma temperatura $T$	[-]
$L_T$	Comprimento do tubo	[m]
$L$	Altura da lata	[m]
$\mathbb{L}$	Taxa de letalidade	[-]
$L_F$	Metade da altura do sólido excluindo a fração do <i>head spaces</i>	[m]
$L_{\text{headspaces}}$	Dimensão do <i>head spaces</i>	[m]
$M_a$	Massa molecular do ar	[kg]
$M_{\text{prod}}$	Massa efetiva do produto	[kg]
$M_{\text{RT}}$	Massa efetiva da autoclave	[kg]
$M_v$	Massa molecular do vapor	[kg]
$m$	Massa	[kg]
$m_{a_0}$	Massa inicial de ar	[kg]
$m_v^{\text{eq}}$	Massa de vapor no equilíbrio	[kg]
$n_{\beta\sigma}$	Vetor normal unitário que aponta da fase $\beta$ para a fase $\sigma$	[m]
$n$	Parâmetro do Número de Nusselt (Equação 2.27)	[-]
$n$	Número de mols	[mol]
$N_m$	Número de microrganismos sobreviventes	[-]
$N_{m_0}$	Número de microrganismos inicial	N°
$Nu$	Número de Nusselt	[-]
$P$	Pressão	Pa

$P_{\text{atm}}$	Pressão atmosférica	[bar]
$Pr$	Número de Prandtl	[-]
$P^{\text{eq}}$	Pressão no estado de equilíbrio	[bar]
$P^{\text{sat}}$	Pressão de vapor saturado	[bar]
$P_1$	Pressão antes da válvula	[bar]
$P_2$	Pressão depois da válvula	[bar]
$Q$	Taxa de calor transferido	[J/s]
$Q_{10}$	Parâmetro que descreve o aumento no efeito da esterilização com a elevação da temperatura	[-]
$Q_{\text{conv}}$	Calor trocado com o ambiente por convecção	[kJ]
$Q_{\text{prod}}$	Calor trocado com o produto	[kg]
$Q_{\text{rad}}$	Calor trocado com o ambiente por radiação	[kJ]
$Q_{\text{RT}}$	Calor para aquecimento do material de construção da autoclave	[kJ]
$Q_{\text{T}}$	Calor de todos os elementos do sistema	[kJ]
$Q_{10}^{\text{°C}}$	$Q_{10}$ considerando a temperatura em °C	[-]
$Q_{10}^{\text{°F}}$	$Q_{10}$ considerando a temperatura em °F	[-]
$q$	Taxa de energia interna fornecida por condução	[kJ/m <sup>2</sup> min]
$r$	Dimensão radial	[m]
$\dot{r}$	Taxa de mudança de temperatura do meio	[°C/min]
$R_{\text{T}}$	Raio total	[m]
$R$	Constante universal dos gases	[m <sup>3</sup> bar/mol°C]
$R_{\text{a}}$	Constante universal dos gases para o ar	[m <sup>3</sup> bar/°C]
$R_{\text{v}}$	Constante universal dos gases para o vapor	[m <sup>3</sup> bar/°C]
$Re$	Reynolds	[-]
$R_{\text{L}}$	Raio total da lata	[m]
$R_{\text{nãoesférico}}$	Raio não esférico da partícula	[m]
$R_{\text{s}}$	Raio total do grão	[m]
$S_{\text{f}}$	Fator de frequência	[min]
$S$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$s$	Fator de Forma (para uma placa plana, cilindro e esfera, todos finitos $s = 0, 1$ e $2$ , respectivamente)	[-]
$T$	Temperatura (Equações 2.14 a 2.22)	[K]
$T$	Temperatura	[°C]
$T_{\text{amb}}$	Temperatura ambiente	[°C]
$T_{\text{SUP}}$	Temperatura na superfície da tampa da lata	[°C]

$T_1$	Temperatura qualquer ( $T_1$ ) (Equações 2.16, 2.17, 2.19 e 2.20)	[°C]
$T_2$	Temperatura qualquer ( $T_2$ ) (Equações 2.19 e 2.20)	[°C]
$T_1$	Temperatura no estado de referência (Equação 4.173)	[K]
$T_2$	Temperatura da água em função do tempo (Equação 4.174)	[K]
$T_c$	Temperatura crítica da água	[K]
$T_m$	Temperatura do meio de aquecimento	[°C]
$T_{SUP}$	Temperatura na superfície (Equação 2.21)	[K]
$T_{ih}$	Temperatura inicial do produto	[°C]
$T_{pih}$	Pseudo-temperatura inicial do produto	[°C]
$T_v^i$	Temperatura de entrada do vapor	[°C]
$T_i$	Temperatura de entrada da água	[°C]
$\langle T \rangle$	Temperatura média aritmética	[°C]
$T_{r_1}$	Temperatura reduzida de $T_1$	[-]
$T_{r_2}$	Temperatura reduzida de $T_2$	[-]
$t$	Tempo	[min]
$t_1$	Tempo à temperatura $T_1$	[min]
$t_2$	Tempo à temperatura $T_2$	[min]
$t_p$	Tempo total de processamento	[min]
$u$	Posição da válvula (varia de 0 a 1)	[-]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$\mathbf{v}$	Vetor velocidade	
$x$	Menor distância entre o centro térmico (ponto frio) e a superfície do sólido	[m]
$X_n^w$	Fração mássica do componente n	[-]
$X_n^v$	Fração volumétrica do componente n	[-]
$x_p$	Espessura do produto	[m]
$x$	Fração mássica	[-]
$x_i$	Fração do componente i na mistura	[-]
$z^{\circ C}$	Resistência térmica do microrganismo alvo	[°C]
$z^{\circ F}$	Resistência térmica do microrganismo alvo	[°F]
$z$	Resistência térmica do microrganismo alvo	[°C]
$z_L$	Dimensão axial da lata	[m]

## Letras Gregas

$\tau$	Tensor de esforços	[kg/m min <sup>2</sup> ]
$\mu$	Viscosidade do fluido (Equações 2.24, 2.28 e 2.29)	[N s/m <sup>2</sup> ]
$\mu$	Viscosidade do fluido (Equações 2.57, 2.58, 2.59 e 2.62)	[kg/m min]
$v$	Velocidade	[m/s]
$\sigma$	Constante de Stephan-Boltzman (3,408x10 <sup>-9</sup> )	[kJ/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> min]
$\lambda$	Calor latente da água	[kJ/kg]
$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /min]
$\beta$	Coefficiente de expansão térmica	[k <sup>-1</sup> ]
$\langle \beta \rangle$	Coefficiente médio de expansão volumétrica	[°C <sup>-1</sup> ]
$\xi$	Qualquer propriedade	[-]
$\epsilon$	Emissividade térmica da autoclave	[-]
$\epsilon$	Fração de líquido no meio (volume de líquido/volume total dentro da lata)	[-]
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\langle \rho \rangle$	Densidade na temperatura média	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\langle \Omega \rangle$	Média volumétrica de uma propriedade	[-]
$\delta$	Valor de esterilização	[-]
$\Delta\rho$	Diferença de densidade entre o fluido em contato com a parede e o fluido do meio de aquecimento	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta H_1$	Calor latente da água na $T_{r_1}$	[kJ/kg]
$\Delta H_2$	Calor latente da água na $T_{r_2}$	[kJ/kg]
$\Delta H_{vap}$	Calor latente de vaporização da água	[kJ/kg]
$\Delta T$	Diferença de temperatura	[K]
$\Delta t_i$	Incremento de tempo usado na determinação da temperatura média	[min]
$\Psi$	Taxa de conversão de vapor em água	[kg/min]
$\chi$	Tolerância	[min]

**Subscrito**

0	Instante inicial
a	Ar
b	Sangrador
$\beta$	Fase que representa o fluido
$\sigma$	Fase que representa o sólido
d	Dreno
Ervilha	Grão de ervilha
ext	Externa
f	Salmoura
L	Lata
n	Componente do alimento (água, proteína, lipídio, carboidrato, fibras e cinzas)
p	Partícula
prod	Produto
ref	Referência
RET	Interior da autoclave
RT	Autoclave como um todo
s	Grão
Salmoura	Solução de aquosa a 2% de sal e 3% de açúcar
v	Vapor
w	Água
$w_1$	Água à temperatura de -40 a 0°C
$w_2$	Água à temperatura de 0 a 150°C



## SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE QUADROS	xxi
SIMBOLOGIA	xxiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Conservação dos Alimentos .....	5
2.2 Conservação dos Alimentos pelo Calor .....	7
2.3 Processos de Esterilização pelo Calor .....	9
2.4 Equipamentos de Esterilização .....	13
2.4.1 Componentes da autoclave fixa – processamento com pressão de vapor..	18
2.4.2 Operação de uma autoclave – processamento com pressão de vapor.....	21
2.4.2.1 Resfriamento em autoclave fixa.....	22
2.4.3 Autoclave fixa – processamento com sobrepressão.....	24
2.5 Cinética de Destruição Térmica dos Microrganismos .....	25
2.5.1 Bactérias Esporuladas Patogênicas .....	28
2.5.2 Curva de Sobrevivência Térmica .....	29
2.5.3 Curva de Resistência Térmica .....	31
2.5.4 Curva de Destruição Térmica .....	33
2.5.5 Dependência das Constantes Cinéticas com a Temperatura .....	34
2.6 Transferência de Calor .....	35
2.7 Determinação do Tratamento Térmico .....	41
2.7.1 Método Geral ou Gráfico .....	42
2.7.2 Método Matemático .....	44
2.8 Avaliação de um Processo Térmico .....	45
2.9 Processamento de Grãos em Conserva .....	49
2.10 Metodologia APPCC .....	53

---

2.11 Modelagem Matemática dos Processos de Esterilização de Alimentos .....	54
2.11.1 Modelos para Predição das Propriedades Físicas dos Alimentos .....	55
2.11.2 Modelo Matemático da Unidade de Produto Envasado .....	58
2.11.2.1 Modelo para sistema homogêneo e isotrópico .....	63
2.11.2.2 Modelo para sistema não homogêneo e não isotrópico .....	64
2.11.2.3 Modelo para a transferência de calor por condução para geometrias não regulares.....	66
2.11.2.4 Modelo para a transferência de calor em regime térmico regular .....	67
2.11.3 Modelo Matemático da Unidade de Esterilização .....	68
2.12 Conclusões .....	76
CAPÍTULO 3 – PLANO APPCC.....	77
3.1 Introdução .....	77
3.2 Escopo do Plano APPCC.....	77
3.3 Especificações do Produto.....	78
3.4 Identificação dos perigos e análise de riscos .....	78
3.5 O Plano de APPCC.....	79
3.6 Comentários sobre o Plano de APPCC proposto.....	88
CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO EM BATELADA .....	89
4.1 Propriedades Físico-Químicas da Ervilha em Conserva .....	89
4.1.1 Estimativa das Propriedades da Ervilha .....	89
4.1.1.1 Estimativa da Densidade da Ervilha .....	90
4.1.1.2 Estimativa do Calor Específico da Ervilha.....	91
4.1.1.3 Estimativa da Condutividade Térmica da Ervilha.....	92
4.1.1.4 Estimativa da Difusividade Térmica da Ervilha.....	94
4.1.2 Estimativa das Propriedades da Salmoura .....	95
4.1.2.1 Estimativa da Densidade da Salmoura .....	96
4.1.2.2 Estimativa do Calor Específico da Salmoura .....	97
4.1.2.3 Estimativa da Condutividade Térmica da Salmoura .....	98
4.1.2.4 Estimativa da Difusividade Térmica da Salmoura .....	99
4.2 Modelo Matemático da Transferência de Calor no Grão de Ervilha .....	100

---

4.3 Letalidade do Processo .....	110
4.4 Modelo Matemático da Transferência de Calor na Lata .....	113
4.5 Modelo Matemático da Transferência de Calor no Sistema de Esterilização ...	132
4.6 Simulação do Modelo Matemático para o Sistema de Esterilização .....	148
4.7 Validação do Modelo Matemático para o Sistema de Esterilização .....	155
4.8 Simulação do Modelo Matemático para diferentes condições de operação do Sistema de Esterilização .....	159
4.8.1 Efeito da variação do coeficiente de transferência de calor na superfície da lata para o processo de esterilização .....	160
4.8.2 Efeito do tempo de <i>holding</i> no processo de esterilização .....	171
4.8.3 Efeito da desaeração no processo de esterilização .....	173
4.8.4 Efeito da temperatura inicial do produto no processo de esterilização ....	175
4.8.5 Efeito da utilização do ar para resfriamento das latas no processo de esterilização.....	177
 CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	 179
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	 181
 APÊNDICE I – FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO – ERVILHA EM SALMOURA...	 185
 APÊNDICE II – ORGANOGRAMA DA FÁBRICA.....	 187
 APÊNDICE III – SUMÁRIO DO PLANO DE APPCC.....	 189



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa a posição de grande produtor agrícola, e se consolida como potencial nação para a incorporação de tecnologias de esterilização de vegetais em conserva, amplificando a expansão das exportações e fortalecimento da credibilidade e competitividade no exterior. Para que esse objetivo seja alcançado, é primordial que as tecnologias nacionais evoluam em igual proporção, para que o país seja capaz de desenvolver técnicas e sistemas de controle compatíveis com a realidade do setor produtivo e de processamento industrial, conquistando um melhor aproveitamento de recursos e autonomia técnico-científica. Este avanço proporcionará às grandes empresas agregadoras e aos produtores, ações de incentivo para o desenvolvimento rural e comunitário sustentável, infra-estrutura e conhecimento tecnológico para promover, de forma eficaz e sustentável, o agronegócio brasileiro. No que se refere aos produtos provenientes do setor agrícola brasileiro, a agroindústria é a grande responsável por agregar valor à matéria-prima nacional. Dentre os inúmeros produtos processados pelas indústrias de alimentos, pode-se citar a produção de grãos em conserva, como uma alternativa para expandir mercados e valorizar os produtos do Brasil (SOUZA, 2004).

O processamento térmico é uma das mais importantes operações para a indústria de alimentos. O tratamento térmico de alimentos utilizando autoclaves pressurizadas (esterilização) é um método muito empregado na preservação de alimentos e contribui para o bem estar nutricional de grande parte da população mundial (ALVES, 2005).

O processo de esterilização é particularmente importante no tratamento térmico de alimentos enlatados, onde o controle adequado do processo de aquecimento torna-se primordial. Se esse controle for insuficiente poderá causar perigo à saúde do consumidor ou prejuízos econômicos devido ao aumento de produtos deteriorados durante os períodos de produção e de consumo. Por outro lado, um processamento excessivo, apesar de fornecer um produto seguro, reduzirá o valor nutritivo e a qualidade do alimento, além de aumentar o custo de produção devido ao maior gasto de energia. Produtos seguros para o consumidor são obtidos com a utilização de matérias-primas de qualidade e com o emprego de controles precisos no processamento (KUMAR *et al.*, 2001).

Embora os métodos de esterilização pelo uso do calor sejam conhecidos desde o início do século 19, a idéia da modelagem e otimização das condições do processamento térmico é relativamente recente, sendo que o trabalho pioneiro nessa área foi desenvolvido em 1969 por Teixeira, Dixon, Zahradnik e Zinsmeister (SILVA *et al.*, 1993; MOHAMED, 2003). Muitos trabalhos envolvendo métodos computacionais baseados em modelos têm sido publicados com o intuito de projetar e/ou otimizar esse tipo de processo (BALSA-CANTO *et al.*, 2002a; SIMPSON *et al.*, 2006). Segundo Banga *et al.* (1993), o interesse da literatura científica reflete a grande importância econômica e nutricional do processamento térmico.

As primeiras pesquisas envolvendo equações matemáticas solucionáveis analiticamente para tratamento térmico foram desenvolvidas por Charles Olin Ball na década de 20. A partir daí, foram desenvolvidos vários métodos matemáticos de cálculo de processos, baseados na solução analítica aproximada do problema de transferência de calor em alimentos (MOHAMED, 2005; RODRIGUES *et al.*, 1998). Os importantes conceitos introduzidos por C. O. Ball representam a base dos métodos modernos para determinações dos processos térmicos. E, com o advento das novas gerações de computadores, a solução do problema de transferência de calor foi obtida por métodos numéricos, permitindo a resolução do modelo completo do fenômeno, incluindo sua característica multivariável no tempo e no espaço (RODRIGUES *et al.*, 1998).

Neste contexto, o objetivo central desta dissertação é modelar e simular o processo de esterilização térmica, em especial, o processamento de grãos em conserva, estabelecendo modelos que englobem os aspectos tecnológicos, de qualidade e segurança alimentar. Para tanto, tem-se como objetivos específicos: (i) desenvolver um Plano de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) para o processo, levantando os Pontos Críticos de Controle (PCC) atribuídos ao tratamento térmico; (ii) modelar o processamento térmico de grãos em conserva em autoclave a batelada; (iii) simular o processo de esterilização, possibilitando a aplicação dos modelos desenvolvidos por algoritmos de controle modernos. O presente trabalho propõe um modelo matemático capaz de inferir sobre a distribuição de temperatura no interior do alimento enlatado a partir da medição de condições da autoclave, da temperatura inicial do produto e do tempo do processo. O modelo também engloba o cálculo do valor F, que representa a letalidade microbiológica do processo, associada ao tratamento térmico. As simulações foram conduzidas com a utilização do método das linhas acoplado ao método da colocação ortogonal, com a utilização do software livre *Scilab*<sup>TM</sup>. Realizaram-se análises dos perfis de temperatura, variando com a posição, em estado estacionário e transiente e a análise de sensibilidade dos principais parâmetros do modelo.

Para a validação do modelo, foram utilizados dados da curva de penetração térmica do processo de esterilização de ervilha em conserva, reportados por Akterian (1996).

Esta dissertação foi estruturada conforme segue. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os processos de conservação dos alimentos e os conceitos relacionados à esterilização pelo calor e parâmetros térmicos, descrevendo também modelos matemáticos que representam a transferência de calor em alimentos enlatados, para diferentes volumes de controle.

O Capítulo 3 apresenta o Plano de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC), destacando os perigos levantados e os pontos críticos de controle destes perigos para o processo de esterilização de ervilhas em conserva.

O Capítulo 4 define os modelos matemáticos e sua resolução pelo método das linhas acoplado ao procedimento de colocação ortogonal para a solução do conjunto de equações diferenciais parciais e ordinárias. Os modelos representam a transferência de calor no interior do grão e no interior da lata de conserva, durante a esterilização em autoclave horizontal à batelada, considerando a letalidade microbiológica associada a este processo de conservação. O Capítulo 4 também apresenta os parâmetros do processo e de resistência térmica específicos para a esterilização de ervilhas enlatadas em autoclave à batelada. Este capítulo descreve os resultados gerados através da simulação computacional do modelo, mostrando os perfis dinâmicos de temperatura, em diferentes posições na lata, bem como a letalidade do processo térmico. Os dados simulados são comparados com a curva de penetração térmica disponível na literatura.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho e as sugestões de atividades a serem desenvolvidas no futuro.



## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Conservação dos Alimentos

A necessidade de conservar os alimentos surgiu com a consciência de que a grande maioria dos produtos alimentícios tinha uma safra sazonal, e apesar de se ter colheitas fartas, o excedente de produção deteriorava-se, pois o homem ainda não dominava as técnicas de preservação dos alimentos. Nesta seção, serão apresentadas considerações feitas por Silva (2000) e a descrição dos pontos importantes desta tecnologia que é primordial para a sobrevivência humana.

Os métodos utilizados para conservar os alimentos, sejam eles industrializados ou *in natura*, têm como objetivo principal preservar, durante o maior tempo possível, as características sensoriais, biológicas e nutricionais dos alimentos.

Entretanto, apesar da diversidade de técnicas atualmente disponíveis para a conservação de alimentos, um princípio fundamental para o emprego, com sucesso, dos métodos de conservação, é a exigência de que os alimentos destinados ao processamento sejam de boa qualidade, pois é impossível recuperar ou melhorar a qualidade de um produto processado que se originou de uma matéria-prima comprometida, seja físico-química ou microbiologicamente.

O Quadro 2.1 apresenta os principais métodos utilizados na conservação de alimentos. Os processos de conservação foram agrupados em categorias, de acordo com a forma de ação sobre os microrganismos, usada para garantir a estabilidade do produto.

Os processos de ação direta são especificados com o objetivo de eliminar os microrganismos. Já os processos de ação indireta, têm como princípio a inibição do desenvolvimento microbiano através de alteração do substrato.

**Quadro 2.1** - Métodos para a conservação de alimentos (SILVA, 2000).

	<b>Forma de Ação</b>	<b>Agente de Conservação</b>	<b>Método de Conservação</b>
<b>Métodos Diretos</b>	Inativação dos microrganismos	Calor	Pasteurização Esterilização
		Radiações	Radiação Radurização Radapertização
<b>Métodos Indiretos</b>	Inibição ou retardamento da multiplicação dos microrganismos	Frio	Refrigeração Congelamento
		Desidratação	Dessecação Adição de sal Adição de açúcar Adição de glicerol
		Redução de CO <sub>2</sub>	Embalagem à vácuo Uso de nitrogênio
	Adição de CO <sub>2</sub>	Embalagem com CO <sub>2</sub>	
	Acidificação	Adição de ácidos Fermentação láctica Fermentação acética	
	Adição de Conservantes	Inorgânicos (sulfitos e nitritos) Orgânicos (sorbatos e benzoatos) Antibióticos (nisina) Fumaça líquida	
Restrição de contaminação	Descontaminação	Ingredientes Materiais de embalagem	
	Manipulação asséptica	Tratamento asséptico	
	Embalagem	Embalagem asséptica	

## 2.2 Conservação dos Alimentos pelo Calor

Os microrganismos estão naturalmente presentes nos alimentos e nos ambientes comuns ao habitat humano. A falta de controle dos microrganismos presentes no alimento, bem como a recontaminação durante o processamento, por microrganismos indesejáveis, podem levar à deterioração do alimento e até a consequências mais graves, como surtos de doenças causados pela ingestão de alimentos contaminados por microrganismos patogênicos ou pelas toxinas produzidas por eles.

A estratégia de aplicar temperaturas ligeiramente superiores às temperaturas máximas permitidas para que ainda ocorra a multiplicação dos microrganismos, já é suficiente para provocar a morte ou a inativação das células vegetativas destes organismos. Entretanto, os esporos microbianos geralmente sobrevivem a temperaturas elevadas, principalmente os esporos de bactérias. A forma esporulada é a forma mais resistente de um microrganismo. Estes esporos são os organismos alvos dos tratamentos térmicos, principalmente nos processos de esterilização.

A definição do binômio tempo e temperatura a ser empregado no tratamento de um determinado alimento dependerá do efeito que o calor exercerá sobre as características gerais deste alimento, aliado aos demais métodos de conservação que serão agregados ao longo do processo.

A morte bacteriana, do ponto de vista bacteriológico, ocorre quando a bactéria perde a capacidade de se reproduzir. Entretanto, a resistência dos microrganismos aos tratamentos capazes de levá-los a esta incapacidade reprodutiva varia com diversos fatores, como o próprio alimento, a espécie de microrganismo, a natureza do calor empregado, o meio de aquecimento, entre outros.

Sabe-se que nem sempre há necessidade de se destruir todos os microrganismos existentes em um determinado alimento, mas apenas aqueles que são deterioradores e patogênicos.

Os processos decorrentes do crescimento microbiano e das reações enzimáticas são os principais agentes de alterações nos alimentos, resultando no comprometimento nutricional e na formação de novos compostos, capazes de alterar a cor, o aroma, o sabor e a consistência do produto. De maneira análoga, a intensidade e o tempo de exposição ao calor também levam a inúmeras alterações, podendo até tornar o alimento impróprio para o consumo.

Portanto, o uso do calor como método de conservação deve ser acompanhado de um controle rigoroso para garantir a preservação das características e das propriedades desejáveis do alimento.

Existem muitos métodos de preservação que têm como princípio o uso do calor como forma de conservação, dentre eles o branqueamento, tindalização, pasteurização e esterilização.

O *Branqueamento* é um tratamento térmico amplamente aplicado a vegetais que serão submetidos a outro método de conservação. Tem como princípio o aquecimento rápido do produto através da aplicação de água fervente ou injeção direta de vapor, por um determinado tempo, e o resfriamento em água corrente à temperatura ambiente. Este aquecimento deve ser conduzido de forma a alcançar os benefícios oferecidos pelo branqueamento sem, contudo, comprometer as características sensoriais e nutricionais do alimento. Tem como objetivos principais a inativação enzimática, a redução de gases nos tecidos vegetais e a redução da carga microbiana na superfície externa dos alimentos. Além destas aplicações, também proporciona a fixação da cor, da textura e pré-aquecimento do alimento.

A *Tindalização* não é uma técnica muito utilizada como método de conservação. Baseia-se no aquecimento descontínuo dos produtos, onde inicialmente as matérias-primas são aquecidas, acondicionadas e a embalagem fechada é submetida a temperaturas que variam de 60 a 90°C por alguns minutos. Nesta etapa, eliminam-se os microrganismos na forma vegetativa. Após o tratamento térmico, o produto é resfriado e deixado em espera por 24 horas para que a forma esporulada entre em processo de germinação. Repete-se todo este procedimento quantas vezes for necessário para garantir a esterilidade comercial do produto. Este método apresenta como vantagem, em relação aos demais, o fato de possibilitar a preservação quase que completa das propriedades nutricionais e sensoriais do alimento.

A *Pasteurização* foi desenvolvida por Pasteur em 1864 e tem como objetivo destruir parte da flora banal e eliminar integralmente a flora microbiana patogênica. Trata-se de uma técnica amplamente utilizada na indústria de alimentos, pois possibilita a preservação de muitas propriedades sensoriais e nutricionais do alimento. Tem como princípio a inativação de enzimas e a destruição de microrganismos com baixa resistência térmica. Trabalha com temperaturas inferiores a 100°C. É um método especialmente indicado para eliminar os microrganismos mesófilos, cuja atividade ideal é a 35°C e não resistem a temperaturas superiores a 65°C. O objetivo deste método é prolongar a vida útil dos alimentos. A escolha do binômio tempo e temperatura empregados na pasteurização está relacionada a vários fatores como: pH do alimento, resistência térmica das enzimas, dos microrganismos e do

próprio alimento. O processo de pasteurização pode ser contínuo ou descontínuo. Com relação ao tempo e temperatura definidos, o processo de pasteurização se classifica em: LTLT (*Low Temperature Long Time*) realizado a temperaturas próximas de 65°C por 30min e em HTST (*High Temperature Short Time*) realizado a 127°C por 15 segundos. Como a pasteurização não elimina toda a flora microbiana, este método deve ser utilizado em conjunto com outros métodos de conservação complementares.

A *Esterilização* tem como objetivo a eliminação de todos os microrganismos e inativação das enzimas presentes no alimento. É uma operação de engenharia na qual energia na forma de calor, radiação, produtos químicos ou uma combinação desses agentes é aplicada ao “objeto alvo” da esterilização (produto, utensílio, superfície, local e local de manipulação ou fabricação), de forma a destruir os microrganismos viáveis. O método de esterilização pelo calor consiste na exposição do alimento a um tratamento térmico intenso (altas temperaturas por intervalos de tempos consideráveis). Tem como vantagem a possibilidade de armazenamento do produto, por longos períodos em temperatura ambiente. Esta possibilidade leva a inúmeras outras, como alcançar mercados geograficamente distantes, facilitar o transporte e a distribuição, minimizar o retorno de produtos não vendidos e garantir maior segurança à saúde do consumidor. Entretanto, apresenta a desvantagem de promover significativas alterações, tanto sensoriais como nutricionais, no alimento. Logo, os processos de esterilização ideais são aqueles que garantam a eliminação dos microrganismos patogênicos e deterioradores e a inativação enzimática, sem provocar alterações indesejáveis nas características do produto.

Em alimentos apertizados (enlatados) não é possível atingir a esterilidade absoluta e por isso, os termos "comercialmente estéril" ou "esterilidade comercial" são amplamente aplicados na literatura (GAVA, 1984). Como os processos de esterilização pelo calor são o objetivo deste trabalho, este tema será amplamente discutido deste ponto em diante.

### 2.3 Processos de Esterilização pelo Calor

O processo de esterilização engloba conhecimentos de Microbiologia, Engenharia e Matemática. A microbiologia fornece dados que permitem relacionar o nível de *stress* aplicado à carga microbiana do produto *versus* a redução microbiológica alcançada. A engenharia, a partir destes dados microbiológicos, é capaz de desenvolver um modelo de esterilização aplicável a uma ampla faixa de condições. Através dos recursos matemáticos é

possível relacionar, quantitativamente, as características físicas do agente letal que atua sobre o microrganismo alvo do processo térmico (EGUCHI; MASSAGUER, 1995).

Os vários métodos de conservação de alimentos que utilizam o calor podem ser distribuídos em categorias: esterilização com envase prévio (apertização), esterilização com envase posterior, secagem e concentração.

Dentre os inúmeros métodos de conservação de alimentos pelo calor, o tratamento térmico em recipientes hermeticamente fechados (apertização) constitui um dos métodos de maior importância industrial, sendo mundialmente empregado, não só na indústria como também na produção doméstica.

Nicolas Appert, confeitoiro parisiense, atraído pela recompensa de 12.000 francos prometida por Napoleão a quem descobrisse um novo processo de conservação de alimentos, tornou-se, em 1795, o grande idealizador do processo de conservação de alimentos em recipientes fechados. Após este primeiro passo, outros pesquisadores foram aperfeiçoando o método e em 1904 ocorreu uma grande evolução com a invenção pela *Sanitary Can Company* da lata recravada (GAVA, 1984).

Na *Apertização*, uma parte dos microrganismos e esporos bacterianos expostos aos agentes esterilizadores, independentemente da energia utilizada, sobrevive ao tratamento. Se os microrganismos resistentes forem novamente submetidos ao mesmo processo de esterilização (mesma temperatura e tempo), a redução na carga microbiana será de igual percentual e assim sucessivamente, independentemente do volume do produto (GAVA, 1984).

O efeito letal da esterilização nos microrganismos pode ser expresso matematicamente como uma função logarítmica. Conforme definição, uma função logarítmica jamais atinge zero. Portanto, a esterilização definida como ausência de esporos bacterianos vivos em um volume ilimitado do produto não pode ser atingida. A função logarítmica define o número de reduções decimais na contagem de esporos microbianos alcançadas pelo processo de esterilização, ou seja, define o efeito da esterilização ou sua eficácia. Por exemplo, um efeito de esterilização de 9 indica que de  $10^9$  esporos presentes no alimento, somente 1 sobreviverá (EGUCHI; MASSAGUER, 1995).

O efeito da esterilização é definido pela relação tempo/temperatura adotada no tratamento, sendo tão maior quanto mais altos forem as temperaturas e tempos de retenção.

Destes conceitos, surgiu a denominação *Esterilização Comercial*, definida como o processo que garante um alimento microbiologicamente estável, ou seja, ausência de microrganismos deterioradores e patogênicos capazes de proliferarem nas condições normais de armazenamento do produto. Esta

estabilidade se deve ao fato dos microrganismos sobreviventes à esterilização serem espécies termófilas que têm seu crescimento restrito a temperaturas superiores a 45°C, que estão acima das condições normais de armazenamento dos produtos esterilizados (GONÇALVES *et al.*, 1992; SILVA, 2000).

O processo de esterilização engloba inúmeros parâmetros. Dentre eles, destacam-se:

- Parâmetros do Processo Térmico:  $t$ ,  $t_h$ ,  $t_p$ ,  $T$ ,  $T_0$  e  $T_m$  (GONÇALVES *et al.*, 1992), onde:

$t$ : tempo de subida da temperatura ou tempo decorrido desde a abertura do vapor até atingir a temperatura  $T_1$  (minutos);

$t_h$ : tempo de processamento, medido a partir do momento em que o esterilizador atingiu a temperatura programada até quando o vapor for fechado (minutos);

$t_p$ : tempo total de aquecimento, medido desde o momento que o recipiente é colocado no meio de aquecimento até o momento final do aquecimento, quando o recipiente entra em contato com o meio de resfriamento (minutos);

$T$ : temperatura variável do produto ou do recipiente (°C);

$T_0$ : temperatura inicial do produto ou recipiente, medida no ponto de aquecimento mais lento.  $T_0$  deve ser medida quando  $t_h=0$ . Idealmente, a temperatura deverá ser uniforme em todo o recipiente em  $t_h=0$ , porque a variação da temperatura pode afetar o valor do fator de atraso ( $j$ ) (°C);

$T_m$ : temperatura do meio de aquecimento (°C);

Alguns dos Parâmetros do Processo Térmicos estão ilustrados na Figura 2.1.

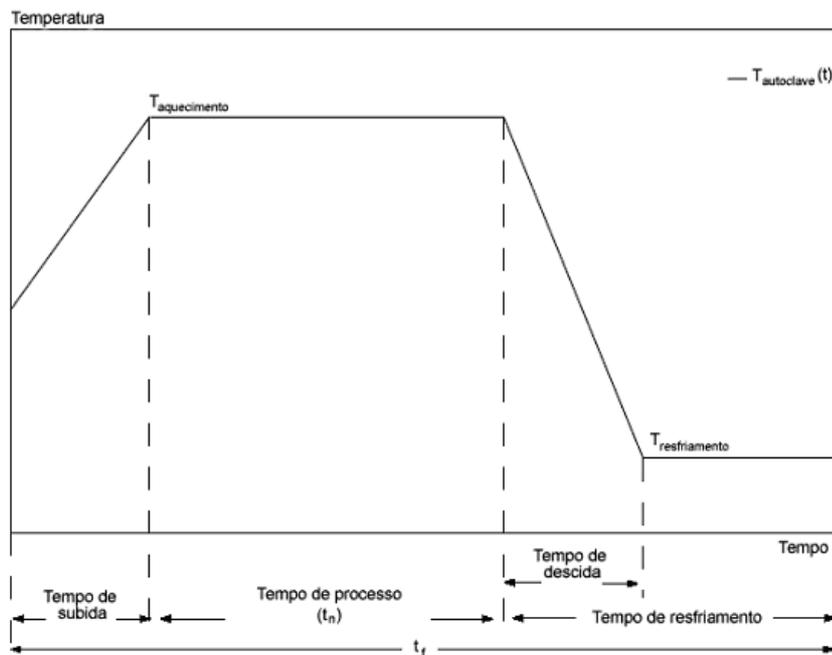
- Parâmetros de Resistência Térmica:  $D$ ,  $z$ ,  $F$  e  $F_0$ , onde:

Valor  $D$ : tempo de redução decimal ou constante de morte térmica ou ainda, razão letal; corresponde ao tempo, em uma determinada temperatura, capaz de causar a redução de 90% no número de células ou esporos presentes no produto (minutos) (EGUCHI; MASSAGER, 1995; GONÇALVES *et al.*, 1992);

Valor  $z$ : é o número de graus centígrados que se deve aumentar a temperatura para que o tempo de destruição seja reduzido em 10 vezes (°C) (SILVA, 2000);

Valor  $F$ : tempo de morte térmica ou o tempo a uma dada  $T_1$  requerido para destruir um certo número de microrganismos com um dado valor de  $z$ ,  $F_T^z$  (min), pode ser expresso em função de múltiplos do valor  $D$  (EGUCHI; MASSAGUER, 1995);

Valor  $F_0$ : tempo de morte térmica, é o tempo a  $T_1=121^\circ\text{C}$  requerido para destruir um certo número de microrganismos com um valor de  $z = 10^\circ\text{C}$ ,  $F_{121^\circ\text{C}}^{10^\circ\text{C}}$  (min), (EGUCHI; MASSAGUER, 1995).



**Figura 2.1** - Histórico de temperatura e tempo de esterilização de um produto (adaptado de GONÇALVES *et al.*, 1992).

- Parâmetros da Penetração de Calor:  $f$ ,  $f_c$ ,  $f_h$ ,  $j_h$  e  $j_c$  (EGUCHI; MASSAGUER, 1995; GONÇALVES *et al.*, 1992):

$f$ : parâmetro de efeito da temperatura, é o tempo requerido para atravessar um ciclo logarítmico, ou seja, é o tempo requerido para a diferença de temperatura entre o produto e o meio diminuir 90%;

$f_h$ : taxa de aquecimento (min);

$f_c$ : taxa de resfriamento (min);

$j$ : fator de atraso, termo usado para relacionar a temperatura inicial real do produto com a temperatura que intercepta a escala logarítmica do gráfico ( $^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ );

$j_h$ : fator de atraso do aquecimento ( $^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ );

$j_c$ : fator de atraso do resfriamento ( $^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ );

## 2.4 Equipamentos de Esterilização

A esterilização dos alimentos pode ser realizada em unidades envasadas ou a granel. A aplicação de calor a produtos acondicionados é mais conhecida como apertização, enquanto que a designação esterilização é atribuída a processos que apresentam características especiais (SILVA, 2000).

O processo de esterilização depende de todas as etapas produtivas que englobam a obtenção da matéria-prima (colheita/abate), transporte, seleção/classificação, limpeza, pré-processamento (branqueamento, resfriamento e preparo), acondicionamento, exaustão e fechamento (para apertizados), tratamento térmico, resfriamento, envase (produto a granel), empacotamento, armazenamento e distribuição. Esta seção, baseia-se nas considerações feitas por Gava (1984) e irá descrever alguns dos principais equipamentos voltados para a esterilização de alimentos.

Os processos térmicos, além de conferirem esterilidade ao produto, proporcionam um certo grau de cozimento.

A operação de tratamento térmico pode ser realizada nas seguintes condições:

- Pressão atmosférica: incluem-se os cozedores usados para processamento de produtos ácidos, podendo ser fixos ou rotativos. O cozedor rotativo (*spin-cooker*) é bastante conhecido na prática.
- Altas pressões:
  - Câmaras pressurizadas (autoclaves);
  - Sistemas pressurizados (esterilizadores hidrostáticos);
  - Salas pressurizadas (*Flash 18*).
- Altas temperaturas: sistema HTST (*High Temperature Short Time*) e UHT (*Ultra-High Temperature*) que inclui o envase asséptico.

Os principais equipamentos utilizados no tratamento térmico de produtos apertizados são: Autoclave, Cozedor-rotativo, Esterilizador Hidrostático, *Flash 18*, Esterilizador à Chama e Esterilizador Asséptico.

O *Cozedor Rotativo (Spin-Cooker)* é contínuo podendo trabalhar à pressão atmosférica ou sob pressão. Nos modelos mais simples, tem-se um compartimento para cozimento e outro para resfriamento. Possui espiral que conduz as latas de uma extremidade para outra. O fato de manter as latas em constante movimento faz com que a penetração de calor aconteça mais rapidamente, diminuindo assim o tempo de tratamento térmico. Entre os vários fatores importantes no processo, podem ser mencionados: velocidade de rotação, espaço livre,

diâmetro da lata, geometria da lata e consistência do produto. O resfriamento também pode ser feito à pressão atmosférica ou sob pressão.

*Esterilizador hidrostático* ou autoclave hidrostática (*hydrostatic cooker*) é um sistema contínuo, constituído de uma torre alta que contém uma câmara de vapor, com capacidade para processar de 100 a 1.000 latas por minuto. Tem um formato semelhante a um tubo em U, alargado na seção inferior. A parte central e mais larga do tubo comporta a câmara de vapor, sendo um dos lados do U preenchido com água aquecida e o outro lado com água fria. As latas são transportadas por uma esteira através da coluna de água quente, zona de vapor e água fria. As colunas de água são suficientemente altas para fornecer pressão hidrostática necessária para equilibrar a pressão de vapor do esterilizador. A temperatura da água na coluna de alimentação é controlada independentemente, e pode variar desde a temperatura ambiente até a temperatura de ebulição; sendo esta última a temperatura da coluna que confere a letalidade do processo. Após passarem pela câmara de vapor a uma certa velocidade e temperatura, as latas retornam à pressão atmosférica quando atingem a coluna de descarga (água fria), trocando calor com a água fria que deverá ser resfriada continuamente. Sabe-se que quanto mais altas as temperaturas, maior será a pressão na câmara de vapor e mais alta deverá ser a coluna de água para equilibrar a pressão. Este equipamento oferece a vantagem de permitir o processamento de latas de diferentes tamanhos e recipientes de vidro. O tempo de processamento pode ser menor que o utilizado nas autoclaves fixas em função das colunas de alimentação e de descarga. A redução deste tempo de processamento dependerá do tipo de equipamento, tamanho da lata e temperatura da coluna.

*Flash 18* é um equipamento composto de um compartimento recoberto por alumínio com 18 pés de diâmetro (5,5 m) e 110 pés (33 m) de comprimento. Este compartimento é pressurizado. Na parte externa, onde os alimentos são preparados por técnicas convencionais, a temperatura e pressão permanecem normais. Após o preparo, os alimentos são enviados ao compartimento pressurizado e desta etapa em diante o processo passa a ser contínuo. Os alimentos são aquecidos e entram na câmara a aproximadamente 135°C, passam por um desaerador, onde a temperatura cai para 121 a 124°C a 18 psi. Por se tratar de um processo pressurizado, consegue-se reduzir o tempo de processo. Enquanto no *Flash 18* o tempo de tratamento térmico é de 15 minutos, na autoclave fixa seria necessário um tratamento térmico de 30 minutos para atingir o mesmo objetivo.

*Esterilizador à chama* é um equipamento que confere aquecimento por meio de chama e é recomendado especialmente para produtos líquidos ou acondicionados em salmoura, xarope ou suco. A primeira planta industrial que utilizou a esterilização à chama foi criada em

1959 para o processamento de ervilhas apertizadas; das setenta ou mais instalações existentes na atualidade, cerca da metade se destina à apertização de cogumelos. O processo baseia-se fundamentalmente em 04 (quatro) etapas: (i) pré-aquecimento, pelo uso de vapor, até atingir uma temperatura inicial uniforme de 95°C, aproximadamente; (ii) aquecimento, empregando uma chama de gás (propano ou butano) diretamente na lata, elevando rapidamente a temperatura do produto para 115°C – 130°C; (iii) manutenção da temperatura, pelo uso de chama reduzida ou intermitente, durante o tempo de esterilização e (iv) resfriamento, por meio de aspersores de água até atingir 38°C. Durante as quatro etapas de processamento, as latas são mantidas em constante rotação, aumentando assim a transferência de calor com a conseqüente redução do tempo de processo. É um equipamento mais simples que a autoclave rotativa, com custos operacionais menores, além de proporcionar uma redução de três a quatro vezes do tempo de tratamento térmico que leva a uma melhor qualidade sensorial e nutricional dos produtos submetidos a este tratamento.

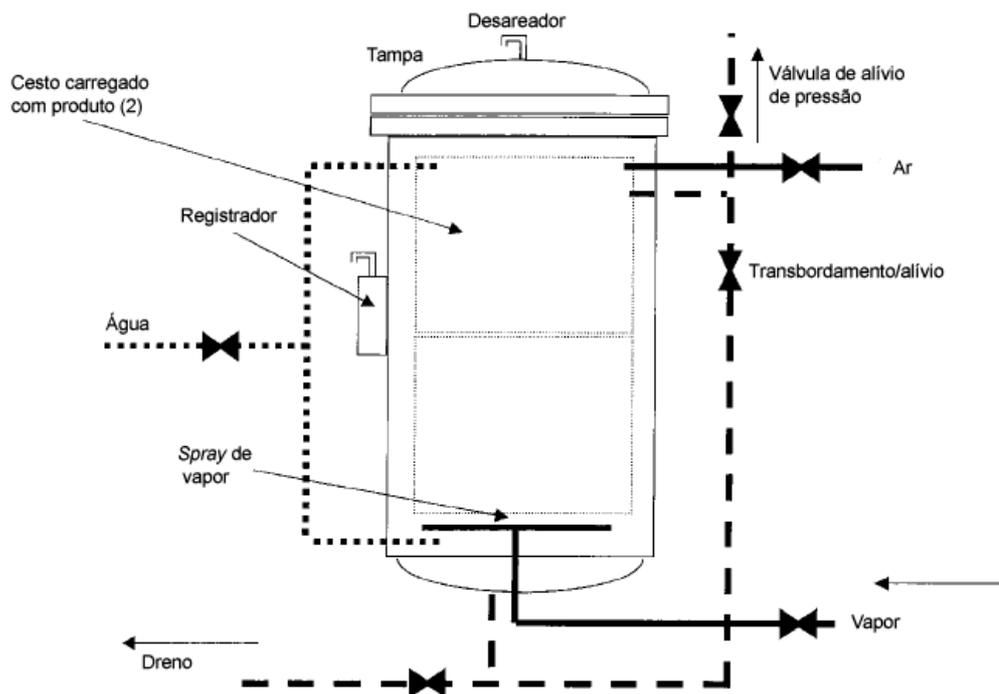
*Equipamentos assépticos* baseiam-se no aquecimento, resfriamento e transporte do produto sob condições estéreis e o envase deste produto em recipientes previamente esterilizados com posterior fechamento hermético. Trabalham a temperaturas da ordem de 140°C a 175°C durante 1 a 2 segundos. Através dos processos convencionais, onde o produto é aquecido dentro da lata, o tempo de processamento varia de minutos até horas. Estes tratamentos são denominados UHT (*Ultra High Temperature*). O sistema UHT pode ter um aquecimento direto por vapor ou indireto por meio de trocadores de calor. No sistema de aquecimento direto, o vapor entra em contato direto com o produto, podendo ser por injeção direta de vapor ou pela pulverização do produto no vapor. No processo por injeção direta de vapor, os principais equipamentos são: *Vacum-Therm Instant Sterilizer* – VTIS, da Alfa-Laval; Uperização, da APV; *Aro-Vac System*, da Cherry-Burrell Corp. (EUA). Já no processo por pulverização do produto no vapor, destacam-se os seguintes equipamentos: *Ultra-Therm*, da Cream Package Div. St. Regis (EUA); Laguilharse, da Ets, Laguilharse (França).

No sistema de aquecimento indireto, os alimentos fluidos ou semifluidos são aquecidos em trocadores de calor tubulares, de placa ou de superfície raspada, por meio de vapor que circula entre as paredes do trocador de calor. O resfriamento é feito com base no mesmo princípio, substituindo o vapor por um fluido refrigerante. Dentre os trocadores de calor tubulares, destacam-se: *Sterideal*, da Stork (Holanda) e Sistema CTA, da C.P. Division St. Regis (EUA). Entre os trocadores de calor de placas, destacam-se: *Ultramatic*, da APV e *Dual-Purpose System*, da Alfa-Laval. Em relação aos trocadores de calor de superfície raspada (tambor), merecem destaque: *Votator Scraped Surface Heater*, da Votator Division,

Chermestron Corp. (EUA); *Swept Surface Heater*, da C.P. Division St. Regis. (EUA) e *Therutator Heater* da Cherry Burrell (EUA).

O processo de esterilização UHT apresenta como vantagens a melhor preservação das características sensoriais e nutricionais (menor sabor de queimado, menor alteração da cor e menor destruição de nutrientes e vitaminas). Entretanto, apresenta algumas desvantagens como a transferência de calor dificultada por partículas sólidas; custo alto da embalagem asséptica e, em alguns produtos, podem surgir defeitos como gelatinização e desnaturação.

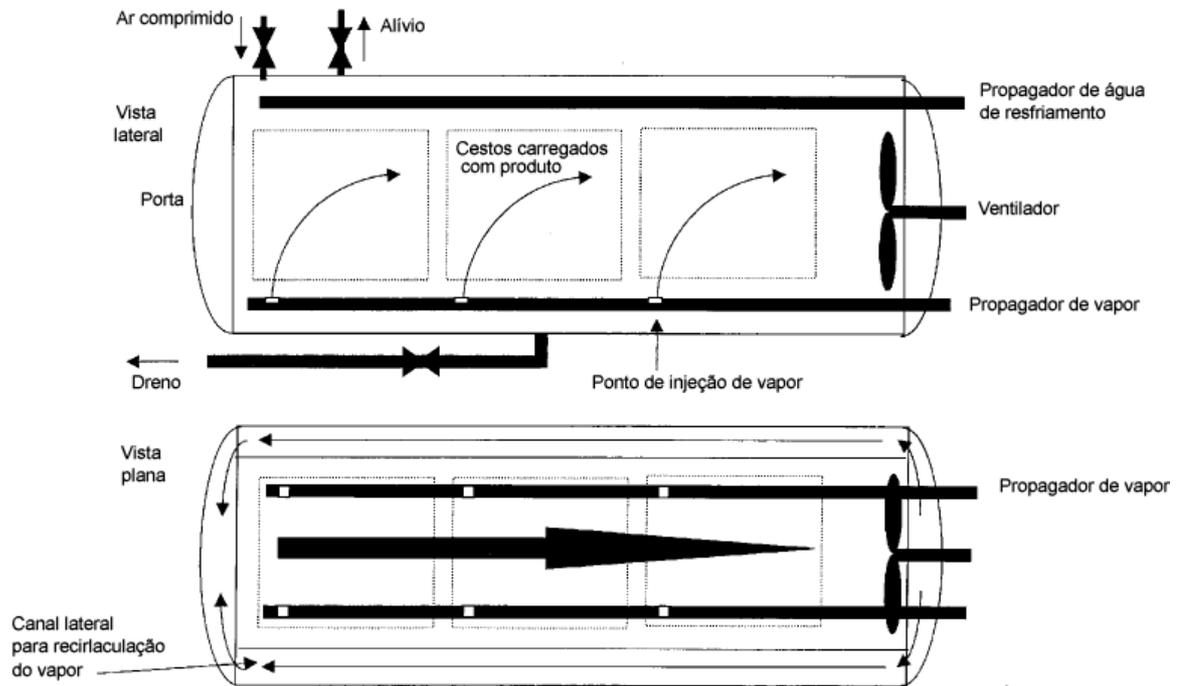
A autoclave, também conhecida como retorta, é o equipamento definido para a condução do processo de esterilização deste trabalho e é descrita a seguir com base nas considerações feitas pelo ITAL (Instituto de Tecnologia de Alimentos) (ITAL, 2001). A retorta é um equipamento fechado, onde o produto é aquecido, geralmente pelo uso de vapor. Pode ser fixa ou rotativa, contínua ou descontínua e vertical ou horizontal. A autoclave fixa e descontínua é a mais utilizada, podendo ser vertical (Figura 2.2) ou horizontal (Figura 2.3).



**Figura 2.2** - Autoclave Fixa Vertical com pressão de vapor (RICHARDSON, 2001).

Alimentos embalados em recipientes hermeticamente fechados são processados usualmente em autoclave fixa, vertical ou horizontal, tipo batelada e sem agitação. Como as retortas são vasos de pressão, são construídas em chapa de caldeira com  $\frac{1}{4}$  de polegada ou

mais espessas, suas portas ou tampas são feitas de ferro fundido ou de chapa pesada, com travas ou ferrolhos especiais para conferir segurança.



**Figura 2.3** - Autoclave Fixa Horizontal com sobrepressão de vapor e ar (RICHARDSON, 2001).

A finalidade principal da autoclavagem é evitar o desenvolvimento de microrganismos patogênicos e deterioradores no produto processado, além de promover um certo cozimento do alimento.

As autoclaves são equipamentos que trabalham a altas pressões, 121°C com 1 kgf/cm<sup>2</sup> (15 lb/pol), e têm o vapor como meio mais comum de transferência de calor. Água quente é mais utilizada para processamento de embalagens de vidro com sobreposição de pressão de ar.

Existem inúmeras vantagens de se usar vapor sob pressão nas autoclaves, como o fato do vapor ser um excelente meio de transferência de calor, proporcionar um fácil controle de temperatura, que pode ser feito apenas pelo controle da pressão de vapor; da própria pressão de vapor exigida para o tratamento térmico ser suficiente para contrabalançar a pressão que é formada no interior da lata impedindo a deformação das embalagens; além do vapor ser uma energia de fácil produção. O vapor possibilita uma boa transferência de calor dado a sua energia armazenada ou calor latente.

Para um processamento térmico adequado, utilizando uma autoclave fixa, com processamento de sobrepressão em vapor, é fundamental que se proceda à prévia desaeração

do equipamento. O ar existente no interior da autoclave irá contribuir, não apenas para reduzir a eficiência do processo, mas atuará também como uma camada isolante ao redor das latas, além de ocasionar ferrugem das embalagens quando na presença de umidade. Mesmo quando uma autoclave é carregada completamente com latas a maior parte do espaço é preenchida com ar; na autoclave vertical carregada, o ar ocupa 60% do espaço total e na autoclave horizontal, ocupa cerca de 80%. Testes têm demonstrado que mesmo quantidades pequenas de ar presentes na autoclave podem resultar em considerável subprocessamento e deterioração.

### 2.4.1 Componentes da autoclave fixa – processamento com pressão de vapor

*Linha Principal e Suprimento de Vapor:* o vapor deverá ser suprido através de um condutor grande o suficiente para prover vapor adequado a todas autoclaves em operação. O vapor deve entrar em um ponto que facilite a remoção de ar durante a desaeração, sendo que o *United States Department of Agriculture (USDA)* e o *Food and Drug Administration (FDA)*, estabelecem que a entrada de vapor seja localizada no lado oposto ao desaerador.

*Controlador de vapor e desviador (bypass):* as autoclaves fixas têm que ser equipadas com um controlador automático de vapor para manter a temperatura, que pode ser um instrumento registrador-controlador, quando combinado com um dispositivo de registro de temperatura/tempo. A válvula do regulador automático de vapor pode ser de diâmetro menor que o tubo de entrada de vapor, desde que um *bypass* de vapor seja usado durante todo o tempo de subida. O uso da válvula de controle de menor diâmetro que o tubo de entrada de vapor pode ter a vantagem de controlar a temperatura de processo com uma menor flutuação em relação ao que ocorre quando se usa uma válvula do mesmo diâmetro. Entretanto, esta última condição oferece maior segurança quando um mesmo operador tem diversas autoclaves para operar, porque a temperatura da autoclave pode ser elevada rapidamente sem o uso de um *bypass* controlador de vapor. Quando se utiliza o *bypass*, o operador deve permanecer próximo à autoclave até o término do período de subida da temperatura para evitar um excessivo desenvolvimento de pressão no interior da retorta. Autoclaves equipadas com *bypass* podem ser operadas manualmente em casos de falha do controlador. Quando a retorta atinge a temperatura de processamento, a válvula de *bypass* deverá ser fechada lentamente, para evitar uma súbita queda na temperatura.

*Distribuidores de vapor:* são tubos perfurados que não devem ter diâmetro superior ao da linha de entrada. São obrigatórios nas instalações de autoclaves fixas horizontais, devem ser perfurados e se estenderem ao longo do fundo por todo o comprimento da autoclave, além de apresentarem suas perfurações no lado superior dos tubos. As perfurações não devem ser dirigidas para baixo, porque o vapor tenderia a seguir em torno da carcaça e sairia pelos desaeradores, sem expulsar o ar. Já para as autoclaves fixas verticais, os distribuidores não são essenciais, mas quando usados, deverão ser dispostos, de preferência, na forma de cruzeta com perfurações ao longo do topo ou dos lados do tubo. As autoclaves verticais podem ser facilmente desaeradas sem auxílio dos distribuidores de vapor, quando o vapor entra através de uma abertura única em uma ou outra de suas extremidades.

*Desaeradores:* são grandes válvulas de controle de aberturas em autoclaves, situadas de maneira que todo ar possa ser removido rapidamente do interior da autoclave, antes de se iniciar a contagem do tempo necessário para o tratamento térmico. A saída do ar deve ser controlada por válvulas gaveta, esfera, ou outras de fluxo total (*plug-cock*), conservadas totalmente abertas durante a primeira parte da operação da retorta de modo que permita a rápida eliminação do ar. As tubulações de escape devem ser curtas e, tanto quanto possível, livres de cotovelos. A maior eficiência de desaeração é observada quando as válvulas se localizam na parede da autoclave, no lado oposto ao da entrada de vapor. É necessário que os desaeradores fiquem abertos por um certo tempo (exemplo: no mínimo cinco minutos a 110°C, para retorta vertical com um desaerador de 1 ½ polegada) até que a temperatura determinada seja atingida. Os desaeradores só operam durante a desaeração, não podem ser conectados diretamente a um sistema de dreno fechado sem que este tenha uma saída para a atmosfera.

*Sangradores:* também denominados *suspiros* são orifícios de 1/8 a 1/4 de polegada feitos na autoclave para remover o ar que entra com o vapor e promover a circulação de vapor no interior da autoclave. Têm que operar totalmente abertos durante todo o processo, incluindo o tempo de subida da temperatura. Um sangrador de 1/16 de polegada ou maior tem que ser usado nos nichos de termômetro. Algumas autoclaves necessitam de dreno para completa retirada do condensado. As autoclaves fixas verticais devem ter, pelo menos, um sangrador, com a localização oposta àquela em que o vapor é admitido. Já as horizontais, têm que ter, em cada extremidade ao longo do seu topo, pelo menos um sangrador e drenos adicionais ao longo de seu fundo.

*Silenciadores:* usados freqüentemente em sangradores e desaeradores para reduzir o ruído criado pelo escape de vapor. Quando utilizados, deve-se assegurar que não impeçam, significativamente, a remoção de ar.

*Suprimento de ar:* o ar é requerido em duas circunstâncias, sendo a primeira o fato de ser, a maioria das autoclaves, equipadas com controladores automáticos de vapor operados a ar; a segunda razão é que o emprego do ar para resfriar recipientes sob pressão é preferível ao uso de vapor, devido às propriedades não condensáveis do ar, o que elimina a possibilidade de condensação acidental do vapor na autoclave, reduzindo a pressão e aumentando a possibilidade de deformação dos recipientes. Autoclaves que operam com ar para resfriamento sob pressão, têm que ser equipadas com válvulas globo ou equivalente na linha de ar, para impedir vazamento de ar na autoclave durante o processamento.

*Suprimento de água:* a maioria das autoclaves é provida de uma linha de água para resfriamento parcial ou completo do recipiente após o processamento. A válvula globo ou equivalente é a mais indicada, pois evita o vazamento de água dentro da autoclave durante o processamento. Se a água de resfriamento entrar pelo topo da autoclave, deve-se tomar cuidado para prevenir a condensação do vapor remanescente na autoclave ao final do processo. Esta condensação pode criar vácuo parcial na autoclave e causar deformação e tensionamento nas extremidades das latas. Um dispositivo para a quebra do vácuo pode evitar esta situação. O suprimento de água poderá ser feito pela parte inferior ou simultaneamente pelas partes superior e inferior da autoclave. Os melhores resultados, quando o resfriamento é feito na própria autoclave, são obtidos com a entrada de água na parte superior e inferior da autoclave. Deve-se garantir que a entrada de água na parte superior não esteja aberta enquanto o vapor ainda está sendo usado para manter a pressão, para que não ocorra a deformação das latas. As válvulas globos são recomendadas para as linhas de entrada de água com o objetivo de evitar vazamento de água para dentro da autoclave, o que poderia resultar em distribuição de calor deficiente ou resfriamento localizado e um processamento insuficiente. O dreno deve ser de diâmetro suficiente para permitir uma rápida eliminação de água.

*Construção de engradados, carros, gôndolas, bandejas e separadores:* são utilizados para armazenar ou separar os recipientes; são feitos de fitas de aço, chapas metálicas perfuradas ou outro material adequado para este fim. Existem padrões para o tamanho e distanciamento dos furos, tanto para as chapas usadas na construção dos recipientes coletores quanto para aquelas utilizadas como separadores, de forma a garantir uma distribuição adequada de calor.

*Válvula de segurança:* deve ter diâmetro maior que o diâmetro do tubo de entrada de vapor e satisfazer às condições de segurança do local e às normas para um vaso de pressão.

*Manômetro:* toda autoclave deve ser munida de um medidor de pressão de 0 – 30 libras, graduado em divisões de uma a duas libras e instalado por meio de tubulação em forma de sifão.

*Termômetro de mercúrio:* toda autoclave deve estar equipada com, pelo menos, um termômetro de mercúrio, com amplitude de variação na ordem de 50°C (por exemplo, 80° a 130°C), em uma escala de no mínimo 17 cm de comprimento, devidamente aferido. O termômetro de mercúrio, é o termômetro de referência do processo, uma vez que as leituras feitas no termômetro registrador podem ser facilmente modificadas pelo ajustamento da pena registradora.

#### 2.4.2 Operação de uma autoclave fixa - processamento com pressão de vapor

Etapas de operação de uma autoclave fixa:

1. Fechar a porta ou tampa, verificando se os dispositivos de travamentos foram ajustados com segurança;
2. Conferir o registrador de temperatura, verificando se está preparado adequadamente para iniciar os registros;
3. Abrir os desaeradores e os sangradores, fechar o(s) dreno(s) e tubo(s) de extravasamento;
4. Injetar vapor gradualmente, abrindo tanto a válvula de controle de vapor como o *bypass*;
5. Fechar a(s) válvula(s) de desaeração assim que a temperatura e o tempo de desaeração especificados forem atingidos;
6. Fechar gradualmente o *bypass* de vapor um pouco antes da temperatura de esterilização ser alcançada, para evitar a queda brusca de temperatura que normalmente ocorre quando esta válvula de desvio é fechada muito rapidamente;
7. Contabilizar o tempo de esterilização, a partir do momento em que a temperatura de esterilização especificada for atingida;

8. Anotar o tempo decorrido entre o início da operação até se atingir a temperatura de esterilização, verificando se a etapa de desaeração foi cumprida corretamente;
9. Registrar, no início do tratamento térmico, na planilha de controle do processo, a hora, a temperatura do termômetro de mercúrio, a pressão na retorta e a temperatura indicada pelo termômetro-registrador;
10. Manter a temperatura da retorta sempre cerca de 0,5°C acima da temperatura recomendada para a esterilização, com o objetivo de compensar possíveis flutuações do processo;
11. Monitorar a temperatura durante todo o processo, verificando se está dentro dos padrões especificados;
12. Manter todos os sangradores completamente abertos durante toda a operação;
13. Iniciar a etapa de resfriamento, tão logo a esterilização seja completada.

#### 2.4.2.1 Resfriamento em autoclave fixa

A intensidade e duração da etapa de resfriamento dependerão, dentre outros fatores, do produto, do tamanho da lata, da temperatura de processamento térmico, da temperatura da água de resfriamento e dos métodos de manuseio das latas após o resfriamento. Existem duas formas de proceder ao resfriamento das latas dentro da autoclave, sendo uma o resfriamento completo e a outra o resfriamento parcial.

No resfriamento completo, o objetivo é resfriar o conteúdo da lata, no menor tempo possível, até uma temperatura de 38 a 45°C.

No resfriamento parcial, o objetivo é resfriar suficientemente os recipientes para reduzir a pressão interna a níveis seguros, evitando que as embalagens se deformem quando expostas à temperatura atmosférica. Altas pressões são desenvolvidas no interior das latas no momento que o ciclo de processamento térmico está chegando ao fim. Entretanto, durante esse tempo, essa pressão sofre oposição da pressão de vapor na autoclave. Se a pressão de vapor da autoclave for aliviada, e assim removida a pressão oposta, a extremidade da lata fica sujeita a uma pressão diferencial mais alta, que pode exceder a resistência da sua extremidade e assim provocar uma distorção permanente. Visando evitar este problema, resfria-se parcialmente as latas na autoclave sob pressão. Estas embalagens serão encaminhadas para

uma outra etapa de resfriamento para que atinjam, o mais rápido possível, temperaturas entre 38 a 45°C.

A água de resfriamento deve ser clorada para evitar contaminação por vazamento devido ao vácuo existente dentro da lata, caso ocorra uma imperfeição na recravação ou solda lateral.

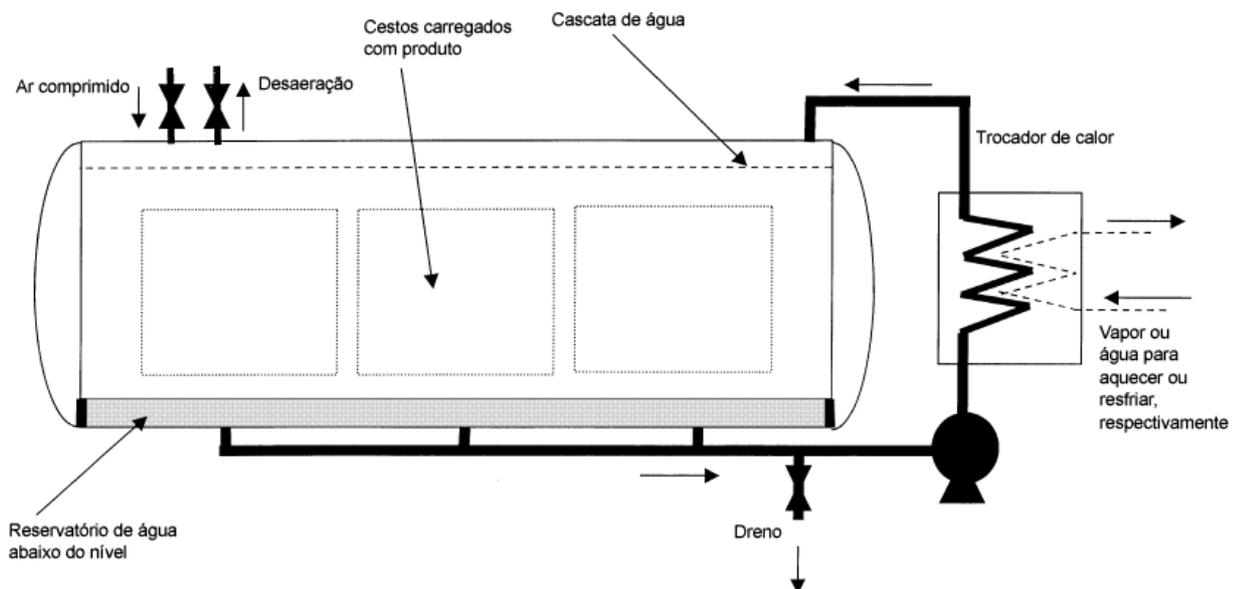
A temperatura de resfriamento entre 38 e 45°C garante que haverá calor suficiente para a secagem rápida das latas, evitando a corrosão, sem contudo permitir que os microrganismos termófilos se desenvolvam. O resfriamento sob pressão pode utilizar pressão com vapor d'água ou pressão com ar. Já, o resfriamento sem pressão poderá seguir as seguintes etapas:

1. Abrir o tubo de extravasamento e o dreno, deixando o vapor escapar da autoclave;
2. Fechar o dreno, mas não o tubo de extravasamento e abrir a água, na parte superior da autoclave, vagarosamente. Encher a autoclave com água;
3. Quando a autoclave estiver cheia, fechar a válvula de água na parte superior e abrir a água da parte inferior da autoclave. Isto fará com que a água circule de baixo para cima, saindo pelo tubo de extravasamento. Manter este procedimento por alguns minutos e então inverter o fluxo, abrindo o dreno e a entrada de água superior. Se a autoclave não for equipada com o tubo de extravasamento, a introdução de água corrente na parte de cima, e esta saindo pelo dreno (com a autoclave cheia de água), fornecerá um resfriamento quase uniforme. No caso da autoclave possuir apenas uma entrada de água, pela parte inferior, abrir a válvula com bastante pressão para enchê-la rapidamente até extravasamento. Diminuir, então a vazão, deixando a água circular até atingir a temperatura desejada para o resfriamento;
4. Quando a temperatura de resfriamento for atingida, fechar a entrada de água e abrir o dreno, para saída de água;
5. Abrir a porta ou tampa da autoclave e retirar os cestos de latas, deixando-os dispostos de maneira a permitir que ocorra a completa

evaporação da porção de água remanescente na superfície das embalagens.

### 2.4.3 A autoclave fixa - processamento com sobrepressão

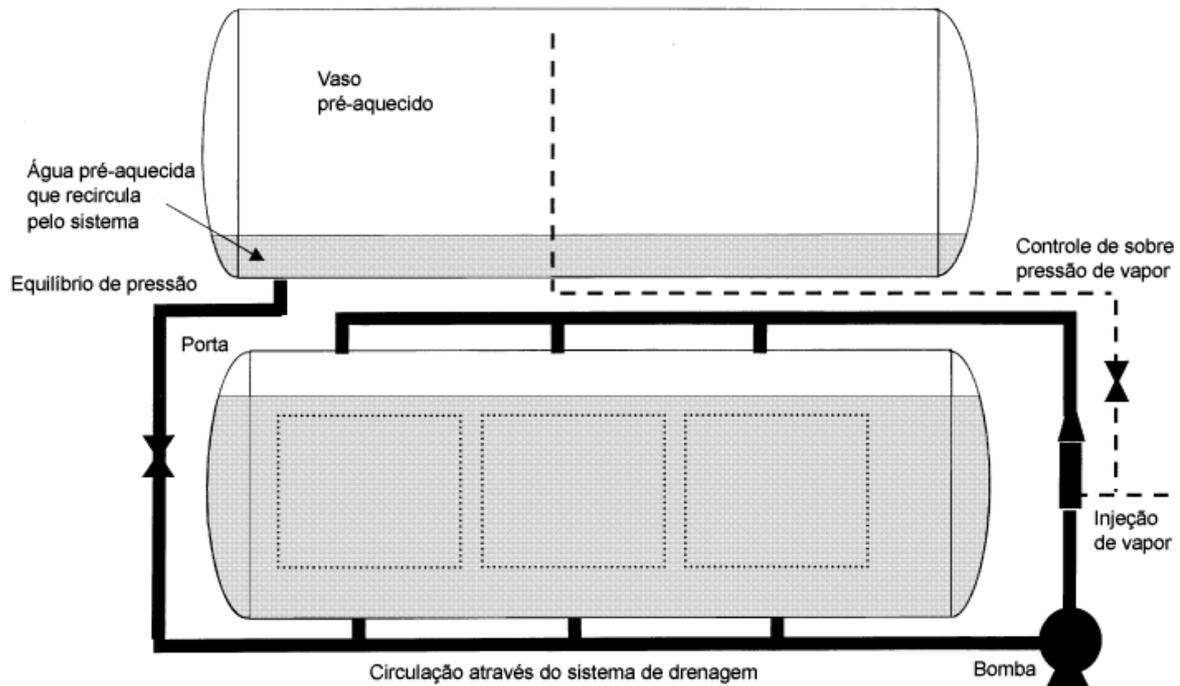
A autoclave fixa - processamento com sobrepressão é outra autoclave amplamente utilizada para o processamento de alimentos submetidos ao envase prévio. O termo sobrepressão refere-se à pressão adicional suprida à autoclave, além daquela exercida pelo meio de aquecimento a uma determinada temperatura de processo. Em uma autoclave a vapor, a pressão de 121°C (250°F) é de 1 atm (15 psig); qualquer pressão suprida à autoclave superior a 15 psig, caracteriza-se como sobrepressão. Faixas de trabalho entre 1,7 – 2,4 atm (23 a 35 psig) a uma temperatura de 121°C são observadas para autoclaves fixas com sobrepressão. O meio de processamento utilizado poderá ser água jogada em forma de cascata sobre os recipientes (Figura 2.4), a imersão completa dos recipientes em água (Figura 2.5) ou até a mistura de vapor/ar (Figura 2.3).



**Figura 2.4** – Autoclave Fixa Horizontal com sobrepressão em cascata de água (RICHARDSON, 2001).

Ao contrário da operação de autoclaves que utilizam vapor puro como meio de aquecimento, as autoclaves que utilizam água ou mistura de vapor/ar podem receber introdução de ar durante o ciclo de processamento. A sobrepressão durante o processamento térmico é requerida para manter a integridade dos recipientes que, devido à construção da

embalagem e/ou ao tipo do fechamento, têm uma resistência limitada à pressão interna. Neste tipo de equipamento, além do controle rigoroso da temperatura e pressão, o controle de fatores como a temperatura de enchimento, o espaço livre e o vácuo do recipiente e a quantidade de ar diluído no produto torna-se mais crítico para equipamentos que operam com pressão de vapor.



**Figura 2.5** - Autoclave Fixa Horizontal com sobrepressão em água (RICHARDSON, 2001).

## 2.5 Cinética de Destruição Térmica dos Microrganismos

Como já mencionado anteriormente, a microbiologia define morte como impossibilidade de reprodução. Apesar das divergências, existem inúmeras evidências que demonstram a morte logarítmica das bactérias quando submetidas ao calor. Algumas vezes, obtém-se um comportamento diferente de uma reta, que pode ser atribuído a eventos microbiológicos que interferem na representação do fenômeno de morte térmica como a existência de uma flora variada, o agrupamento de células, a floculação durante o aquecimento, dentre outros.

Na morte bacteriana em ordem logarítmica, mantendo as condições térmicas constantes, a mesma porcentagem de bactérias será destruída num dado intervalo de tempo e à mesma temperatura, não importando o número de bactérias sobreviventes, ou seja, se uma

certa temperatura destrói 90% da população inicial em 1 minuto, 90% da população remanescente serão destruídos no segundo minuto, 90% do que restar será destruído no terceiro minuto e assim sucessivamente (GAVA, 1984).

A cinética de destruição térmica dos microrganismos dependerá da resistência destes organismos ao processo de esterilização. As variáveis que afetam a resistência térmica dos microrganismos podem ser agrupadas em três categorias (EGUCHI; MASSAGUER, 1995):

- resistência inerente ao microrganismo como: diferenças entre espécies de um mesmo gênero, entre linhagens de uma mesma espécie e entre células vegetativas e esporos de um mesmo organismo;

- resistência segundo as condições ambientais durante o desenvolvimento e formação da célula: idade, número de células, temperatura de crescimento, meio de crescimento, etapa do crescimento;

- resistência segundo as condições ambientais durante o tratamento térmico das células e/ou esporos: produto (pH, atividade de água -  $a_w$ ), binômio tempo e temperatura.

A termo-resistência dos microrganismos é definida como o tempo necessário para esterilizar uma determinada carga microbiana ou seus esporos a uma dada temperatura. Esta resistência térmica do microrganismo é designada pela função letalidade, ou valor F.

$$F = \int_{t_0}^t 10^{\frac{(T-T_{ref})}{z}} dt \quad (2.1)$$

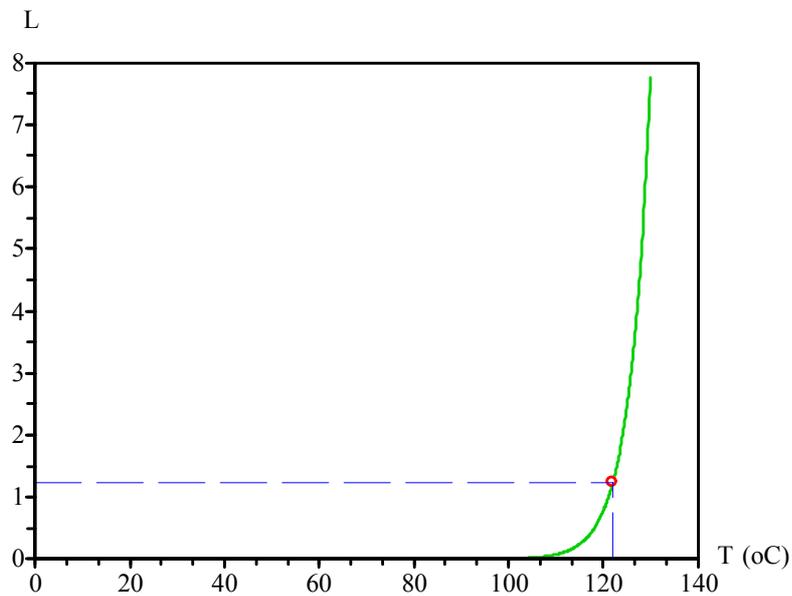
Sendo que,  $z$  é o aumento na temperatura que fornece um aumento na taxa de letalidade por um fator de 10 e  $T_{REF}$  é uma temperatura de referência. O valor F possui unidade de tempo e representa o intervalo de tempo em que o alimento deve ser mantido à temperatura de referência para obtenção do mesmo efeito que o processo real à temperatura T. Com o aumento da temperatura, ocorre uma redução logarítmica do tempo necessário para a destruição do mesmo número de microrganismo que é expresso pela taxa de letalidade (número adimensional que é o recíproco ao tempo de morte térmica). A taxa de letalidade é dada por:

$$\mathbb{L} = 10^{\frac{(T-T_{ref})}{z}} \quad (2.2)$$

O tempo de morte térmica é comparado à temperatura de referência ( $T_{ref}=121,1^{\circ}\text{C}$ ). Assim, se um produto é processado a  $122^{\circ}\text{C}$  e se o microrganismo alvo do tratamento térmico possui um valor  $z$  de  $10^{\circ}\text{C}$ , tem-se  $\mathbb{L} = 10^{\frac{(122-121,1)}{10}} = 1,23$ , conforme ilustrado pela Figura 2.6. Com o aumento da temperatura do alimento, a taxa de letalidade microbiana durante o

processamento também aumenta. O que significa dizer que para alcançar a mesma letalidade proporcionada por 1 minuto à temperatura real do processo é necessário manter o produto por 1,23 minutos à temperatura de referência.

A parte inicial de aquecimento do processo pouco contribui para a letalidade total. A maior contribuição para a letalidade acumulada ocorre a partir do momento em que a temperatura da autoclave atinge o valor especificado. A taxa de letalidade depende do valor de  $z$  do microrganismo alvo do processo e da temperatura do produto. A Tabela 2.1 apresenta a taxa de letalidade para diferentes temperaturas de processamento.



**Figura 2.6** – Taxa de letalidade do processo em relação à  $T_{ref}$  ( $L_r = 1,23$ ).

**Tabela 2.1** - Taxas de letalidade para  $z = 10^\circ\text{C}$  (FELLOWS, 2000).

Temperatura (°C)	Taxa de Letalidade	Temperatura (°C)	Taxa de Letalidade
90	0,001	108	0,049
92	0,001	110	0,078
94	0,002	112	0,123
96	0,003	114	0,195
98	0,005	116	0,309
100	0,008	118	0,490
102	0,012	120	0,776
104	0,019	122	1,230
106	0,031	124	1,950

A destruição dos microrganismos ou seus esporos se dá sempre segundo determinada relação tempo-temperatura. Assim, o tempo necessário para destruir certa concentração de microrganismos ou esporos está em razão inversa da temperatura aplicada. Combinações distintas do binômio tempo-temperatura possuem o mesmo efeito de letalidade sobre microrganismos (STUMBO, 1973; GAVA, 1984; LEWIS, 1996).

No estudo cinético de destruição térmica dos microrganismos, duas informações são imprescindíveis: conhecer o comportamento das constantes de velocidade de destruição térmica e a dependência destas constantes com a temperatura. A seguir, estes pontos fundamentais da termobacteriologia serão abordados em detalhe.

### 2.5.1 Bactérias Esporuladas Patogênicas

As bactérias são os microrganismos mais importantes para a indústria de alimentos no que se refere à segurança alimentar. Podem ser divididas em dois grupos segundo a capacidade de formarem ou não esporos. Geralmente, as bactérias na forma de cocos e muitas na forma de bastonetes, não podem formar esporos, sendo classificadas como não esporogênicas. Entretanto, algumas bactérias em forma de bastonetes têm a capacidade de formar esporos, sendo classificadas como esporogênicas. Os esporos representam um estágio de dormência no ciclo normal de crescimento do microrganismo, são altamente resistentes a condições ambientais adversas, permanecendo viáveis durante longos períodos de estocagem, e em condições adequadas, são capazes de germinar e produzir células vegetativas. A forma bacteriana esporulada está presente em quase todas as matérias-primas agropecuárias e, de maneira geral, é altamente resistente ao calor, ao frio e aos agentes químicos. A maioria dos esporos de importância para alimentos enlatados é capaz de sobreviver em água a 100°C (212°F) por mais de 16 horas, sendo também resistente à destruição por substâncias químicas, podendo permanecer mais de três horas em contato com soluções sanitizantes. Já a forma vegetativa dos mesmos microrganismos e as bactérias não esporogênicas, não resistem à temperatura de ebulição da água (ITAL, 2001).

A principal preocupação, em termos de saúde pública, com relação a alimentos enlatados de baixa acidez é a formação da toxina botulínica. O microrganismo *Clostridium botulinum* é uma bactéria esporulada patogênica toxigênica e representa uma das formas mais severas de intoxicação alimentar para o homem. O tempo e a temperatura dos processos térmicos, para os alimentos mencionados acima, foram estabelecidos tendo como referência a resistência ao calor de esporos da bactéria *C. botulinum*. A eliminação dos esporos desse

microrganismo é considerada, em geral, como o tratamento térmico mínimo para alimentos enlatados. Existe a possibilidade do microrganismo *C. botulinum* crescer e produzir a toxina botulínica. Embora os esporos não produzam a toxina, sua destruição é o alvo do processo, já que em condições favoráveis (anaerobiose, meio com mais de 30% de água, menos de 10% de sal, menos de 40% de açúcar e pH acima de 4,5) estes esporos podem germinar e a forma vegetativa poderá produzir a toxina. Tanto a toxina como a forma vegetativa que a produz, são termolábeis, ou seja, são facilmente eliminadas pelo calor, mas a forma esporulada não. Existem oito tipos de *C. botulinum*, classificados como A, B, Ca, Cb, D, E, F e G, com base na especificidade antigênica de suas toxinas. A temperatura necessária para a destruição das toxinas e esporos botulínicos depende do tipo considerado, mas de maneira geral, a destruição das toxinas e da forma vegetativa submetidas a uma temperatura de 80°C ocorre entre 10 e 30 minutos e a 100°C são necessários 3 minutos. Já a forma esporulada é capaz de sobreviver em água a 100°C (212°F) por mais de 16 horas.

Para alimentos ácidos enlatados ( $\text{pH} \leq 4,5$ ), temperaturas até 100°C são suficientes para garantir sua estabilidade microbiológica, à temperatura ambiente. No caso de enlatados pouco ácidos ( $\text{pH} > 4,5$ ), é necessário esterilizar o alimento, ou seja, eliminar os esporos do *C. botulinum*, que ocorre a temperaturas entre 115 e 121°C, através da utilização de autoclaves que trabalham com calor sob pressão.

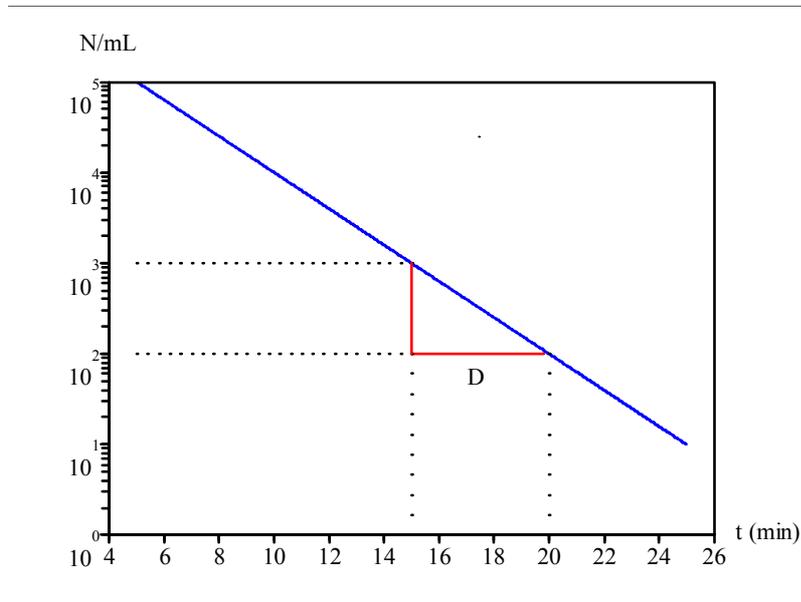
Para determinar o tratamento térmico necessário para esterilizar um produto é preciso conhecer a resistência do microrganismo alvo, através do seu valor D e z, e determinar a curva de penetração de calor do produto. Através destas informações, pode-se calcular o valor de  $F_0$ , que é o tempo do processo real que equivale ao tempo de processamento a uma temperatura de 121,1°C (STUMBO, 1973; GAVA, 1984; GERMANO, P. M. L.; GERMANO, M. I. S., 2001).

### 2.5.2 Curva de Sobrevivência Térmica

No processo de esterilização térmica, além do interesse em destruir os microrganismos presentes no alimento e conhecer a redução microbiana alcançada, é de fundamental importância, conhecer também, o número de microrganismos que sobreviveram ao tratamento (EGUCHI; MASSAGUER, 1995).

Segundo Gava (1984), a Curva de Sobrevivência Térmica (Figura 2.7) é conhecida também pela denominação de *Survivor Curve*, *Thermal Death-Rate Curve* e *Thermal Destruction Curve*.

É obtida a partir de um gráfico em escala semilogarítmica que possui, na ordenada, o número de células microbianas sobreviventes e na abscissa o tempo de aquecimento a uma temperatura constante. Como se trata de uma destruição em ordem logarítmica, os pontos formam uma reta, cuja inclinação é chamada de Tempo de Redução Decimal (*Decimal Reduction Time* - DRT) ou simplesmente D.



**Figura 2.7** - Curva de Sobrevivência Térmica (adaptado de GAVA, 1984).

A destruição microbiana obedece às leis da cinética química. A taxa de decrescimento microbiano é proporcional ao número de microrganismos viáveis presentes no produto e pode ser expressa com uma cinética de 1ª ordem.

$$\begin{cases} \frac{dN_m}{dt} = -kN_m \\ N_m(0) = N_{m_0} \end{cases} \quad (2.3)$$

Sendo,  $N_{m_0}$  o número de microrganismos antes do tratamento térmico;  $N_m$  é o número de organismos sobreviventes ao processo de esterilização;  $k$  é a constante de proporcionalidade. Logo,  $dN_m/dt$  representa a velocidade de morte dos microrganismos por unidade de tempo.

Aplicando o método de separação de variáveis e integrando  $t$  de 0 a  $t$  e  $N$  de  $N_0$  a  $N$  tem-se:

$$\ln N_m - \ln N_{m_0} = -kt \quad (2.4)$$

Reescrevendo a Equação (2.4) na forma exponencial:

$$\frac{N_m}{N_{m_0}} = e^{-kt} \quad (2.5)$$

A Equação (2.5) mostra que o número de sobreviventes decresce de forma exponencial. Aplicando logaritmos decimais na Equação (2.5) chega-se à Equação (2.6), que descreve a curva de sobreviventes em função do tempo e de uma constante k.

$$\log \frac{N_m}{N_{m_0}} = -(\log e)kt \quad (2.6)$$

O valor D, definido como a Constante de Morte Térmica ou Tempo de Redução Decimal, é dado por:

$$D = \frac{1}{(\log e)k} \quad (2.7)$$

Substituindo a Equação (2.7) na Equação (2.6), a equação da curva de sobreviventes pode ser descrita como:

$$\log \frac{N_m}{N_{m_0}} = -\frac{t}{D} \quad (2.8)$$

Sendo o valor D definido como o tempo em minutos, a uma certa temperatura, necessário para destruir 90% dos organismos de uma população, ou tempo necessário para reduzir uma população a um décimo do número original, ou ainda, tempo em minutos requerido para a curva atravessar um ciclo logarítmico na escala de sobrevivência térmica. O valor D é numericamente igual ao inverso negativo da inclinação da curva de sobreviventes.

### 2.5.3 Curva de Resistência Térmica

Gava (1984) define a Curva de Resistência Térmica (Figura 2.8) (*Thermal Resistance Curve, Phantom Death Time Curve*), como a Curva do Tempo de Morte Térmica, pois descreve a resistência dos microrganismos a temperaturas letais diferentes.

É obtida a partir de um gráfico em escala semilogarítmica que possui, na ordenada, o valor D ou algum múltiplo de D, para determinado microrganismo, em várias temperaturas letais, usando as mesmas condições e, na abscissa, a temperatura correspondente.

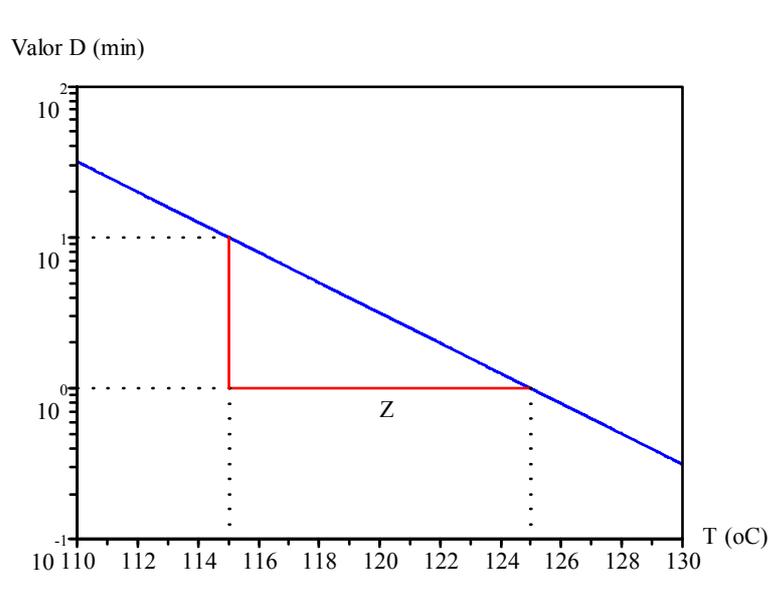
O valor  $z$ , utilizado nos métodos de cálculo da resistência relativa de um microrganismo a diferentes temperaturas, é numericamente igual ao número de graus centígrados requeridos para a curva de resistência térmica atravessar um ciclo logarítmico.

A inclinação da curva leva à Equação (2.9):

$$\frac{\log D_2 - \log D_1}{T_1 - T_2} = \frac{1}{z} \quad (2.9)$$

$$\log \frac{D_2}{D_1} = \frac{T_1 - T_2}{z} \quad (2.10)$$

Sendo que,  $D_2$  é o valor à  $T_2$ ;  $D_1$  é o valor à  $T_1$  e o valor  $z$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é definido como a inclinação da curva, para que  $D$  possa atravessar um ciclo logarítmico, ou seja, o número de graus centígrados que se deve aumentar a temperatura para que o tempo de destruição térmica seja reduzido em 10 vezes.



**Figura 2.8** - Curva de Resistência Térmica (adaptado de GAVA,1984).

Adota-se, em muitos casos, para tratamentos térmicos de produtos apertizados, o valor de  $10^{\circ}\text{C}$  para o valor  $z$ .

Na comparação de diferentes processos, uma temperatura de referência é necessária. Para alimentos não ácidos,  $121,1^{\circ}\text{C}$  é uma referência bastante utilizada. Portanto, pode-se reescrever a Equação (2.10), da seguinte forma:

$$\log \frac{t_p}{F} = \frac{T_{ref} - T}{z} \quad (2.11)$$

Sendo que,  $t_p$  é o tempo de processamento em minutos a uma temperatura  $T$ ;  $F$  é usado para designar o tempo, em minutos, à temperatura de referência;  $T_{ref}$  é a temperatura de referência; e  $T$  é a temperatura do processamento.

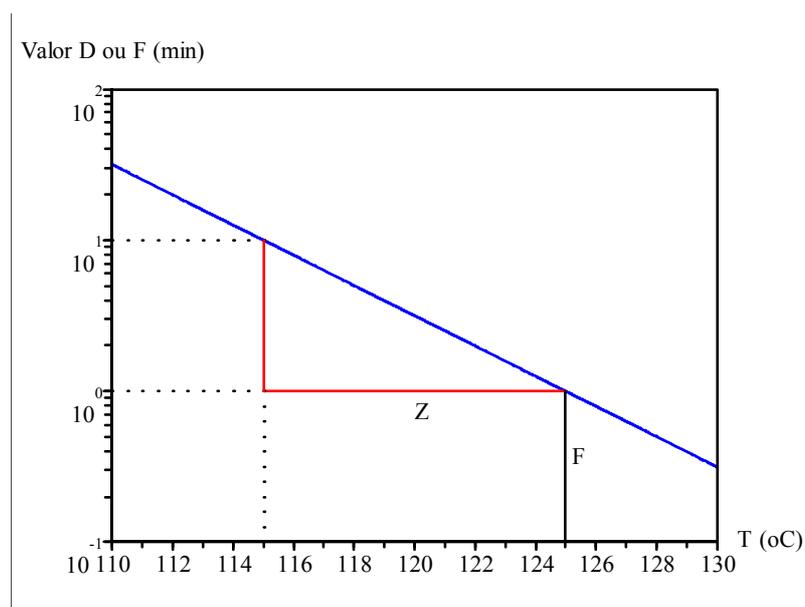
Se  $T_{ref} = 121,1^\circ\text{C}$  e  $z = 10^\circ\text{C}$ , então  $F = F_0$ , substituindo na Equação (2.11) tem-se:

$$\log \frac{t_p}{F_0} = \frac{121,1 - T}{10} \quad (2.12)$$

#### 2.5.4 Curva de Destruição Térmica

Como mencionado anteriormente, a morte dos microrganismos é definida como a perda da capacidade reprodutiva desses microrganismos. A destruição dos microrganismos pelo calor úmido é provocada pela coagulação de suas proteínas, especialmente pela inativação dos sistemas enzimáticos necessários ao seu metabolismo (SILVA, 2000).

A Curva de Destruição Térmica (Figura 2.9) (*Thermal Death Time Curve – TDT Curve*), proposta por Bigelow (1921 *apud* GAVA, 1984), é obtida a partir de um gráfico cuja ordenada equivale ao tempo em minutos (escala logarítmica) e a abscissa corresponde à temperatura (escala linear) (GAVA, 1984; SILVA, 2000). A partir desta curva é possível determinar os valores de  $F$  e  $z$ .



**Figura 2.9** - Curva de Destruição Térmica (adaptado de GAVA, 1984).

O valor  $z$  obtido na Curva de Destruição Térmica é o mesmo valor  $z$  obtido a partir da Curva de Resistência Térmica. Estas duas análises levam a medidas quantitativas da resistência térmica dos esporos numa dada faixa de temperatura (GAVA, 1984).

As equações descritas nos itens 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3 podem ser usadas para as seguintes situações (EGUCHI; MASSAGUER, 1995):

- Para um processo à temperatura constante o número de reduções decimais ou valor de esterilização ( $\delta = \log(N_{m_0} / N_m)$ ) pode ser calculado se o tempo  $t$  do processo e o valor  $D$ , do microrganismo alvo, forem conhecidos; se  $t$ ,  $N_{m_0}$  e  $D$  forem conhecidos, é possível calcular  $N_m$ , ou seja, o número de sobreviventes ao processo térmico;
- Pode-se calcular, experimentalmente, o valor  $D$ , a uma dada temperatura, selando em dois tubos iguais uma suspensão do microrganismo e submetendo-os à mesma temperatura por tempos diferentes; as contagens de cada tubo podem ser utilizadas para obter o valor  $D$  pela Equação (2.13):

$$D = \frac{t_1 - t_2}{\log a - \log b} \quad (2.13)$$

Sendo  $a$  e  $b$  as populações sobreviventes nos tempos  $t_2$  e  $t_1$ , respectivamente;

- Pode-se calcular um tempo de processo equivalente, a uma temperatura de referência, e também o valor de esterilização quando o processo é conduzido a uma temperatura variável.
- Pode-se calcular o tempo necessário para destruir um determinado número de células, submetidas ao aquecimento a uma temperatura  $T$ , conhecendo-se também o valor de  $z$  (SILVA, 2000).

### 2.5.5 Dependência das Constantes Cinéticas com a Temperatura

Eguchi e Massaguer (1995) citam a equação de Arrhenius como a forma universalmente aceita para descrever a variação do valor da constante de velocidade de reação com a temperatura.

$$k = S_f e^{(-E_a/RT)} \quad (2.14)$$

Sendo que,  $k$  é a constante de proporcionalidade (min),  $S_f$  é uma constante ou fator de frequência (min),  $E_a$  é a energia de ativação (cal/gmol),  $R$  é a constante dos gases (1,987cal/K

gmol) e  $T$  é a temperatura absoluta (K). A energia de ativação  $E_a$  é a energia mínima que uma molécula precisa atingir para sofrer a reação responsável pela transferência observada.

Aplicando-se a função logarítmica na Equação (2.14), tem-se:

$$\ln k = \ln S_f - (E_a / RT) \quad (2.15)$$

Quando a constante de proporcionalidade  $k_1$  é conhecida à temperatura  $T_1$ , o fator de frequência  $S_f$  pode ser avaliado:

$$\ln S_f = \ln k_1 + E_s / RT_1 \quad (2.16)$$

Substituindo a Equação (2.16) na Equação (2.15) e passando para logaritmos decimais:

$$\log \frac{k}{k_1} = -\log e^{\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)\right]} = -\log e^{\left[\frac{E}{R} \left(\frac{T_1 - T}{T_1 T}\right)\right]} \quad (2.17)$$

Para uma temperatura de referência  $T_{ref}$ , tem-se:

$$\log \frac{k}{k_{ref}} = -\log e^{\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]} = -\log e^{\left[\frac{E}{R} \left(\frac{T_{ref} - T}{T_{ref} T}\right)\right]} \quad (2.18)$$

A relação entre a constante de proporcionalidade  $k$  e o valor dado pela Equação (2.17), quando substituída na Equação (2.18), resulta em:

$$\log (D_2 \log e) - \log (D_1 \log e) = -\log e^{\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}\right)\right]} \quad (2.19)$$

Rearranjando as Equações (2.9) e (2.19) e substituindo na Equação (2.18), a relação entre  $E_a$  e  $z$  é estabelecida por:

$$E_a = \frac{RT_1 T_2}{z \log e} \quad (2.20)$$

## 2.6 Transferência de Calor

O tempo de tratamento térmico de todo alimento é influenciado pela velocidade com que o calor atinge o centro das embalagens e esta velocidade de propagação do calor depende da natureza do alimento, do tamanho e forma do recipiente, da diferença inicial de temperatura entre o produto e o esterilizador e, ainda, do tipo de processamento (com agitação ou estacionário). A condutividade térmica e a difusividade térmica são parâmetros

característicos dos alimentos e estão relacionados com a rapidez com que o alimento é aquecido ou resfriado durante o processo térmico (Gava, 1984).

Existem três mecanismos distintos de transferência de calor: (i) condução, (ii) convecção e (iii) radiação. Em líquidos e gases, os mecanismos de convecção e radiação são altamente relevantes, o que não se aplica aos sólidos, pois não apresentam transferência de calor por convecção e a transferência de calor por radiação não é significativa (CARSLAW; JAEGER, 1959; LUERA-PEÑA, 2000). Na maioria dos processos, os três tipos de transferência de calor ocorrem simultaneamente, entretanto, uma das formas é mais significativa que as demais (FELLOWS, 2000).

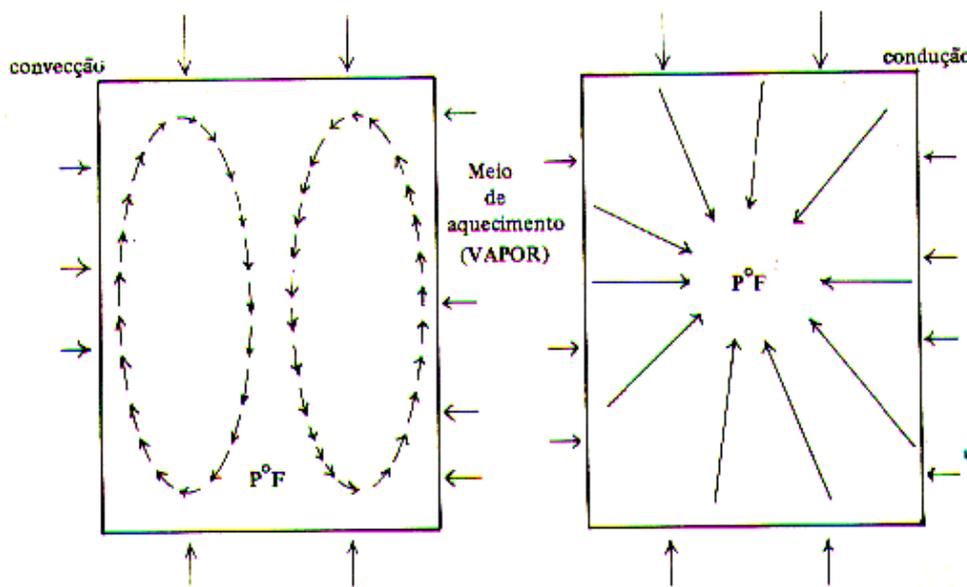
O calor se propaga mais facilmente nos alimentos líquidos que nos sólidos e semi-sólidos. Nos alimentos líquidos, a transmissão de calor até o centro do recipiente se faz por convecção, isto é, pelo movimento constante do líquido, que ocorre dado ao movimento dos grupos de moléculas em função de diferenças na densidade ou como resultado de agitação. As correntes de convecção tendem a igualar com rapidez a temperatura no interior do alimento. Já nos alimentos sólidos, a penetração do calor se faz por condução, isto é, as moléculas transmitem calor às suas vizinhas, estas às seguintes e assim sucessivamente. A transmissão por condução é mais lenta. Nos alimentos semi-sólidos, os fenômenos de condução e convecção ocorrem simultaneamente. Em líquidos e gases, o processo de conservação pode ser conduzido a partir do emprego de radiação, que consiste na transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas (CARSLAW; JAEGER, 1959; GAVA, 1984; LUERA-PEÑA, 2000).

A disposição do produto dentro do recipiente pode afetar significativamente as condições de transmissão de calor no seu interior. Produtos como aspargos e palmitos aquecem-se mais rapidamente quando as embalagens são processadas na posição vertical, permitindo que a transferência de calor seja feita naturalmente por convecção, pela movimentação das correntes de salmoura subindo pelas paredes e descendo pelo centro do recipiente. Situação oposta pode ser observada para o processamento de produtos como o espinafre, acondicionado em camadas horizontais, permitindo que as correntes de convecção atinjam o centro dos recipientes com mais rapidez quando são processados na posição horizontal. Na Figura 2.10 encontra-se esquematizado a transmissão de calor por condução e transmissão de calor por convecção.

No interior de um recipiente submetido à mesma temperatura externa, nem todos os pontos estão sendo aquecidos com a mesma intensidade. A zona de aquecimento mais lento é chamada de ponto frio do recipiente e é, por isso, a zona mais difícil de ser esterilizada. Nos

produtos em que o calor é transmitido por condução (Figura 2.11(a)), o ponto frio encontra-se no centro geométrico do recipiente, já em produtos onde o calor é transmitido por convecção (Figura 2.11(b)) o ponto frio não coincide com o centro geométrico do recipiente (GAVA, 1984; SILVA, 2000).

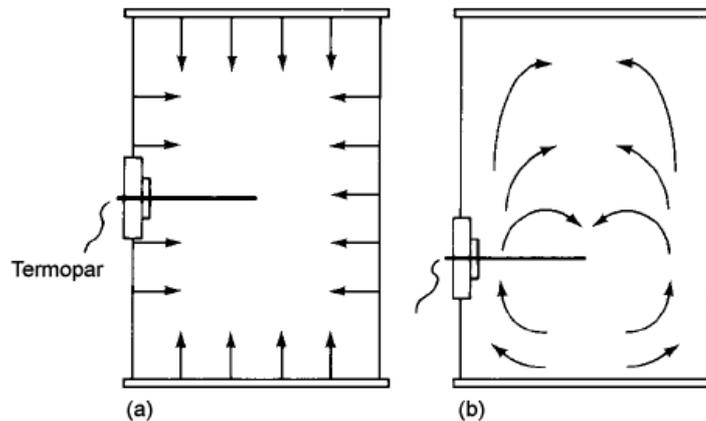
O calor é transferido do meio de aquecimento para o alimento. Geralmente, o coeficiente de transferência de calor é muito grande não constituindo um fator limitante para a propagação do calor. Em produtos líquidos ou com partículas (por exemplo, ervilhas em salmoura), as correntes de convecção natural são estabelecidas durante o tratamento térmico, o que proporciona um aquecimento mais rápido em relação aos alimentos sólidos nos quais predomina a transferência de calor por condução. A baixa condutividade térmica dos alimentos constitui a maior limitação para a transferência de calor por condução nestes produtos (FELLOWS, 2000).



**Figura 2.10** - Aquecimento de um alimento em uma lata e a determinação do ponto frio (GAVA,1984).

A transferência de calor por convecção pode se classificada em convecção natural e convecção forçada. A convecção forçada é caracterizada quando um agitador ou ventilador é utilizado para agitar um fluido, fazendo com que a espessura do filme superficial seja reduzida levando a altas taxas de transferência de calor e uma distribuição de temperatura mais rápida. Secadores de leito fluidizado e líquidos bombeados através de trocadores de calor são exemplos de operações que envolvem convecção forçada. Quando uma mudança na temperatura de um fluido acarreta variação em sua densidade, as correntes de convecção são

estabelecidas. Os evaporadores de circulação natural e o movimento de líquidos dentro da lata durante a esterilização podem ser citados como exemplo de processos caracterizados pela ocorrência de convecção natural (LEWIS, 1996; FELLOWS, 2000).



**Figura 2.11** - Esquema da transferência de calor por condução (a) e por convecção (b) dentro da lata para produtos apertizados (FELLOWS, 2000).

Quando líquidos ou gases são utilizados para aquecer ou resfriar o meio, a taxa de transferência entre o fluido e a superfície do alimento pode ser obtida através da seguinte equação:

$$Q = hA(T_m - T_{SUP}) \quad (2.21)$$

Sendo:

Q : taxa de calor transferido (J/s);

A : área superficial ( $m^2$ );

$T_{SUP}$  : temperatura na superfície (K);

$T_m$  : temperatura do fluido de aquecimento (K);

h : coeficiente de transferência de calor convectivo ( $W/m^2 K$ ).

O coeficiente de transferência de calor é uma medida da resistência à transferência de calor, resultante da formação de uma película entre o fluido e a superfície do alimento. Este coeficiente equivale ao termo  $k/x_p$  da equação de transferência de calor por condução, apresentada abaixo.

$$Q = \frac{kA(T_m - T_{prod})}{x_p} \quad (2.22)$$

Sendo:

$k$  : condutividade térmica (W/m K);

$x_p$ : espessura do produto (m).

O coeficiente de transferência de calor possui maiores valores para fluxo turbulento do que aqueles para fluxo laminar. A transferência de calor através do ar é menor que através de líquidos, sendo que elevadas taxas de transferência de calor são obtidas quando se emprega ar em movimento. Vapor condensado proporciona maiores taxas de transferência de calor que a água aquecida, na mesma temperatura, sendo que a presença de ar no vapor reduz a taxa de transferência de calor. Este fato tem grande relevância para a esterilização de enlatados, pois a presença de ar no vapor diminui a temperatura reduzindo a quantidade de calor recebida pelo alimento.

O coeficiente de transferência de calor superficial está relacionado a propriedades físicas do fluido (como a densidade, a viscosidade e o calor específico), gravidade (que causa a circulação em função da mudança na densidade), diferença de temperatura e o tamanho ou comprimento do recipiente/produto em estudo. As equações que relacionam estes fatores são expressas em números adimensionais da seguinte forma (FELLOWS, 2000):

*Número de Nusselt (Nu)*

$$\text{Nu} = \frac{hD_c}{k} \quad (2.23)$$

*Número de Prandtl (Pr)*

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.24)$$

*Número de Grashof (Gr)*

$$\text{Gr} = \frac{D_c^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (2.25)$$

Onde:

$D_c$  : dimensão característica (comprimento ou diâmetro) (m);

$k$  : condutividade térmica do fluido (W/m K);

$h$  : coeficiente de transferência de calor convectivo (W/m<sup>2</sup> K);

$c_p$  : calor específico à pressão constante (J/kg K);

$\rho$  : densidade (kg/m<sup>3</sup>);

$\mu$  : viscosidade do fluido (N s/m<sup>2</sup>);

$g$  : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$\beta$  : coeficiente de expansão térmica (K<sup>-1</sup>);

$\Delta T$  : diferença de temperatura (K).

O fluxo de transferência de calor pode ser determinado conforme os regimes de escoamento dados pelas Equações (2.26) e (2.27):

✓ Fluxo laminar através de um tubo:

$$Nu = 1,62 \left( Re Pr \frac{D_c}{L_T} \right)^{0,33} \quad (2.26)$$

Sendo,  $L_T$  o comprimento do tubo (m), quando  $Re Pr \frac{D_c}{L_T} > 120$  e todas as propriedades físicas medidas à temperatura média do fluido.

✓ Fluxo turbulento através de um tubo:

$$Nu = 0,023 (Re)^{0,8} (Pr)^n \quad (2.27)$$

Sendo que,  $n = 0,4$  para aquecimento e  $n = 0,3$  para resfriamento, quando  $Re > 10000$ , a viscosidade medida à temperatura da película e as outras propriedades são medidas à temperatura média do fluido.

O número de Grashof é usado para expressar a convecção natural quando não há turbulência no fluido e representa a razão das forças de empuxo e das forças viscosas. Outra forma alternativa para o número de Grashof é dada por:

$$Gr = \frac{D_c^3 \rho g \Delta \rho}{\mu^2} \quad (2.28)$$

Sendo,  $\Delta \rho$  a diferença de densidade, neste caso, entre o fluido em contato com a parede e o fluido do meio de aquecimento.

Lewis (1996) também relaciona o coeficiente de transferência de calor às propriedades físicas do fluido, como descrito a seguir:

$$\underbrace{\frac{hD_c}{k}}_{\text{Número de Nusselt}} = 0,23 \left( \underbrace{\frac{vD_c\rho}{\mu}}_{\text{Número de Reynolds}} \right)^{0,8} \left( \underbrace{\frac{c_p\mu}{k}}_{\text{Número de Prandtl}} \right)^{0,4} \quad (2.29)$$

Sendo,  $v$  a velocidade (m/s).

## 2.7 Determinação do Tratamento Térmico

Inicialmente, os processos térmicos eram definidos com base em tentativa e erro (GAVA, 1984), sem qualquer embasamento científico, resultando em freqüentes casos de deterioração e até mesmo intoxicação alimentar.

Atualmente, a definição destes processos é feita a partir de critérios científicos, envolvendo medidas precisas, interpretadas com o auxílio de recursos computacionais e matemáticos avançados.

A dinâmica do ponto frio da lata é determinada de forma experimental, colocando-se termopares em posições pré-determinadas na lata, registrando-se a temperatura de cada posição selecionada durante o tratamento térmico. Isso permite inferir a posição do ponto frio da lata, o que leva a determinar o tempo de tratamento para assegurar a esterilidade comercial. Existem várias dificuldades para a validação experimental desse fenômeno, segundo Mongkhonsi *et al.* (1992), existe uma distorção pela troca de calor na superfície do recipiente devido à presença de termopares para medida da temperatura interna na lata, pois os mesmos fornecem uma área de transferência de calor adicional, com um efeito similar àquele de uma aleta em trocadores de calor. A inserção do termopar na lata tende a aumentar a taxa de penetração de calor e, assim, subestimar os tempos de tratamento térmico (5% aproximadamente) (ZHANG, 2002). Outro aspecto importante refere-se ao fato de que essa validação implica em fazer orifícios no recipiente para colocar os termopares e isso modifica o movimento do líquido e fluxo de calor dentro da lata.

Marra e Romano (2003) testaram uma forma alternativa de se avaliar o processo de esterilização através da utilização de sensores de temperatura sem fio (*Wireless Temperature Sensor - WTS*), capazes de ler os valores de temperatura em um ponto da lata e armazená-los. Ao final do processo de esterilização, pode-se recuperar o sensor e com ele os valores registrados para a temperatura, possibilitando então o conhecimento da curva térmica, para

aquele ponto na lata, para o ciclo de esterilização. O acompanhamento do tratamento térmico pode ser feito inserindo-se sensores em parte das latas do lote que será submetido ao tratamento térmico, sendo necessário que se estabeleça uma quantidade estatisticamente significativa para garantir o monitoramento efetivo do processo. Os autores concluíram que quanto maior o dispositivo de medida, maior será o erro esperado nas medidas de temperatura, podendo levar a erros inaceitáveis. Esse fato indica que os medidores tradicionais são úteis apenas para latas em formatos maiores que os usuais no mercado de consumo doméstico no Brasil.

No tratamento térmico dos alimentos, tanto o aquecimento quanto o resfriamento, contribuem para a letalidade do processo. O efeito letal desses períodos deve ser considerado na avaliação do efeito destrutivo do processo. Entre os métodos empregados para o cálculo do processamento térmico, destacam-se (GAVA, 1984):

- Método geral ou gráfico;
- Método matemático;

A seguir é feito um breve relato sobre o método geral ou gráfico e sobre o método matemático.

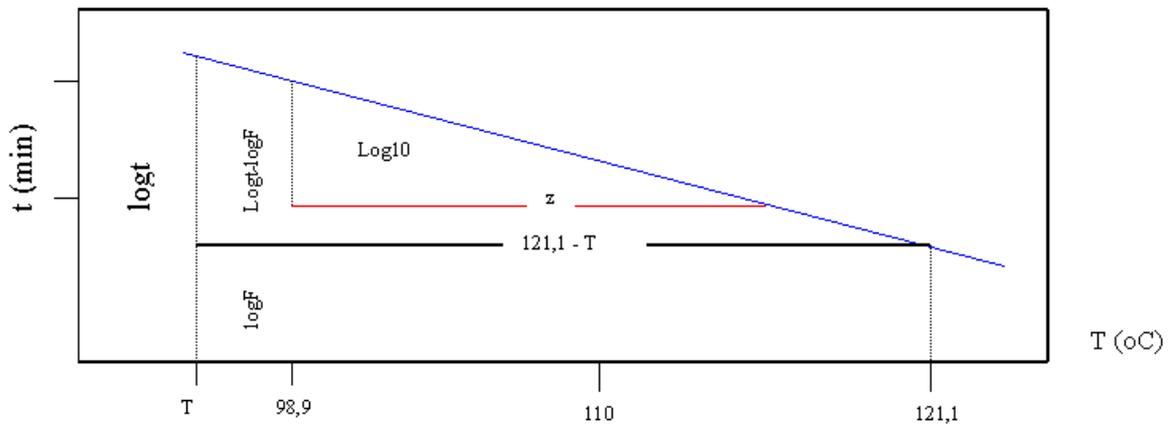
### 2.7.1 Método Geral ou Gráfico

O método geral ou gráfico é um procedimento gráfico para integrar os efeitos letais das relações tempo-temperatura existentes num dado ponto do alimento, durante o processamento térmico. A partir da curva de Destruição Térmica (DT), construída de acordo com uma certa relação tempo-temperatura, pode-se atribuir índices letais (*Lethal Rates*) para cada temperatura representada pelo ponto da curva que descreve o aquecimento ou resfriamento do produto, durante o processo. O valor do índice letal atribuído a cada temperatura é numericamente igual à recíproca do número de minutos necessários para destruir uma certa porcentagem de esporos naquela temperatura. A porcentagem de destruição do tratamento térmico é representada por todos os pontos da curva DT. Durante o processamento térmico, a temperatura do recipiente aumenta até um máximo para depois descer, durante o resfriamento. A curva *Lethal Rates* é obtida relacionando-se os índices letais a diferentes temperaturas. A área da curva representa a letalidade total do processo e pode ser medida por um planímetro, método do retângulo, dentre outros. Para estabelecer um tempo de processo, há a necessidade de definir uma unidade letal. O Método Geral foi aperfeiçoado

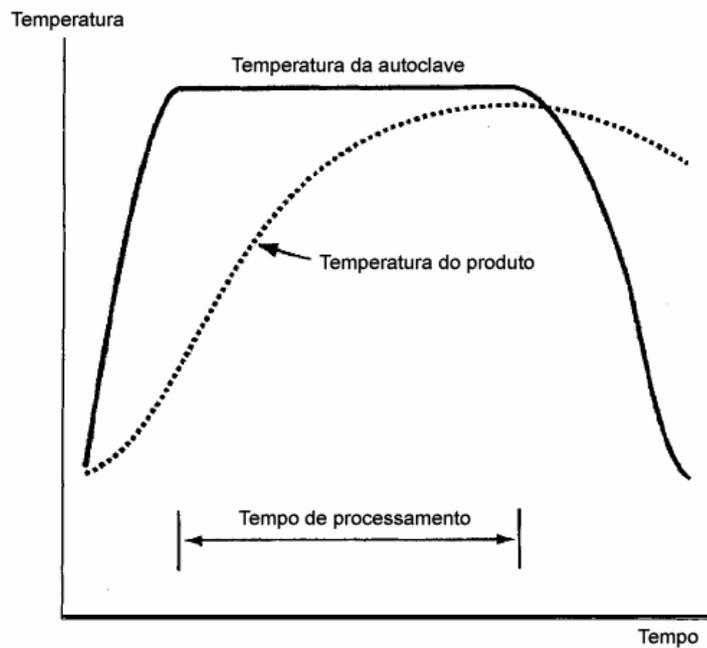
posteriormente, incluindo a construção de uma curva hipotética de DT passando por um minuto a 121,1°C, com a equação para cálculo do índice letal dada por:

$$\log \frac{t}{F} = \frac{121,1 - T}{z} \quad (2.30)$$

Sendo que, t é o tempo em minutos, necessário para destruir organismos a uma temperatura T; t/F é o tempo para destruir organismos à temperatura T se F = 1; F/t é o índice letal. A Equação (2.30) é obtida pela Curva de Destruição Térmica (Figura 2.12).



**Figura 2.12** – Curva de Destruição Térmica (adaptado de GAVA, 1984).



**Figura 2.13** – Curva de penetração de calor, por condução, em alimentos enlatados. A curva (—) corresponde à temperatura da autoclave e a curva (···) corresponde à temperatura do ponto frio da lata (RICHARDSON, 2001).

O ponto frio de um recipiente pode não atingir a temperatura de esterilização (Figura 2.13), mas uma vez que a temperatura do alimento aumenta acima de aproximadamente 70°C, a destruição térmica de microrganismos se inicia. O propósito de se calcular o tempo de esterilização é o de possibilitar o conhecimento de quanto tempo o alimento deve operar na temperatura de esterilização para que se obtenha a destruição térmica exigida no ponto frio do recipiente.

## 2.7.2 Método Matemático

O Método Matemático ou Método dos Fatores Térmicos foi idealizado por Charles Olin Ball (1928), para o cálculo do tratamento térmico de um produto que apresenta uma reta na curva de aquecimento em escala semilogarítmica (GAVA, 1984). Esse método baseia-se na avaliação do tempo de aquecimento, dado por:

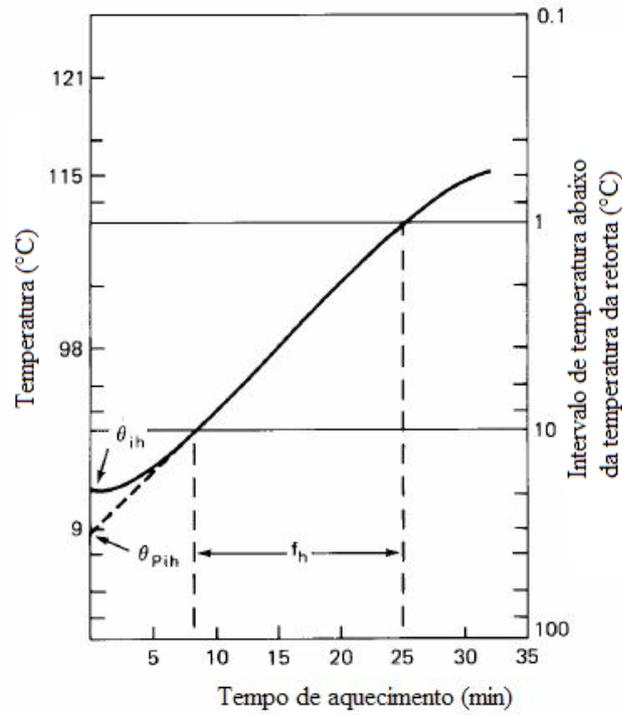
$$B_h = f_h \log \left( \frac{j_h I_h}{g} \right) \quad (2.31)$$

$$j_h = \frac{T_{RET} - T_{pih}}{T_{RET} - T_{ih}} \quad (2.32)$$

Sendo que,  $B_h$  (min) é o tempo da fase de aquecimento;  $f_h$  (min) é a constante de velocidade de aquecimento, que é o tempo para a curva de penetração percorrer um ciclo logarítmico;  $j_h$  é o fator de atraso térmico (*thermal lag factor*), encontrado pela extrapolação da curva de aquecimento até se encontrar à pseudo-temperatura inicial do produto ( $T_{pih}$ ), conforme representado na Figura 2.14 e Equação (2.32);  $I_h = (T_{RET} - T_{ih})$  (°C) é a diferença entre a temperatura da retorta e a temperatura inicial do produto,  $g$  (°C) é a diferença entre a temperatura da retorta e a temperatura final do produto no ponto frio do recipiente,  $T_{RET}$  (°C) é a temperatura da retorta e  $T_{ih}$  (°C) a temperatura inicial do produto.

A constante de velocidade de aquecimento varia de acordo com as dimensões do recipiente e do mecanismo de aquecimento (convecção ou condução). Assim, com exceção do valor de  $g$ , que é função dos seguintes fatores: (a) temperatura de morte térmica do microrganismo no qual o processo se baseia; (b) velocidade da curva de aquecimento ( $f_h$ ); (c) valor  $z$  do microrganismo alvo e (d) diferença de temperatura entre a retorta e a água de

resfriamento, todas as informações necessárias na análise podem ser conseguidas através da curva de aquecimento (FELLOWS, 2000).



**Figura 2.14** – Curva de aquecimento (adaptado de FELLOWS, 2000).

## 2.8 Avaliação de um Processo Térmico

O valor  $F$  é o tempo de aquecimento à temperatura  $T$  para se atingir o estágio de redução numa população de microrganismos ou esporos. Quando se deseja reduzir a contagem microbiana em 99,9999%, deseja-se ter uma redução de 6 vezes, indicada por processo 6D, onde  $D$  é tempo requerido para se reduzir a população microbiana em 10 vezes, também conhecido como tempo de morte térmica. O valor  $F$  é, em geral, referenciado como  $F_T^z$ , onde  $T$  é a temperatura de processamento e  $z$  é a resistência térmica do microrganismo alvo do tratamento térmico, ou seja,  $z$  é a mudança na temperatura que acompanha uma mudança em 10 vezes no tempo de inativação microbiana. O valor  $F$  de um microrganismo com  $z=10$  processado a uma temperatura de 121,1°C é denominado de  $F_0$ .

Pode-se estimar aproximadamente a letalidade do processo de tratamento térmico supondo-se que o aquecimento e resfriamento sejam instantâneos. Seja um tratamento com aquecimento instantâneo a 138°C seguido por 4 segundos nessa temperatura (temperatura de

esterilização, *holding*) seguido posteriormente por resfriamento instantâneo. A estimativa da letalidade a 121,1°C para um microrganismo com  $z=8,5$  pode ser feita calculando-se a razão de letalidade:

$$\log\left(\frac{F}{F_0}\right) = \frac{T_{\text{ref}} - T}{z} \Rightarrow \frac{F}{F_0} = 10^{(T_{\text{ref}} - T)/z} \quad (2.33)$$

$$F_0 = F \times 10^{(T - T_{\text{REF}})/z} \quad (2.34)$$

No exemplo acima,

$$F_{121,1} = (4)10^{(138-121,1)/8,5} = 389,31 \text{ s} \quad (2.35)$$

Assim, 4 segundos a 138°C é equivalente a 389,31 segundos a 121,1°C.

A avaliação do tempo de processamento necessita do conhecimento de todo o comportamento da curva de penetração de calor (aquecimento, manutenção e resfriamento) uma vez que as hipóteses de aquecimento e resfriamento instantâneos são exageradamente simplificadoras. O valor de esterilização refere-se ao número de reduções decimais que se atinge o tratamento térmico e pode ser calculado dividindo-se o tempo de processamento ( $t$ ) pelo valor  $D$ .

A determinação do tempo de processamento térmico pode ser feita de forma aproximada por métodos gráficos, que envolve a integração numérica de dados de temperatura versus tempo no ponto frio do alimento (curva de penetração de calor) durante o processamento térmico para se obter a letalidade total do tratamento térmico. Para se calcular o tempo de processamento térmico, a curva de penetração de calor é necessária, o procedimento consiste nas seguintes etapas:

- 1) Subdivide-se as regiões de aquecimento, *holding* e resfriamento em pequenos incrementos de tempo;
- 2) Calcula-se a temperatura média aritmética para cada intervalo de incremento de tempo;
- 3) Calcula-se a taxa de letalidade para cada temperatura média.

$$\mathbb{L} = 10^{(\langle T \rangle - 121,1)/z} \quad (2.36)$$

sendo:

$\mathbb{L}$  : taxa de letalidade de um microrganismo a temperatura  $\langle T \rangle$ ;

$\langle T \rangle$  : temperatura média aritmética no intervalo de incremento em °C;

$z$ : valor  $z$  para o microrganismo.

A estimativa da letalidade é feita, então, aproximando-se a integral da curva de taxa de letalidade. Uma possibilidade é pela regra do retângulo:

$$F_o = \int_0^t \mathbb{L} dt = \int_0^t 10^{(T-121,1)/z} dt \cong \sum_{i=1}^n \mathbb{L}_i \Delta t_i = \sum_{i=1}^n 10^{\langle T \rangle_i - 121,1/z} \Delta t_i \quad (2.37)$$

sendo:

n: número de intervalos em que o período de tratamento térmico considerado foi subdividido;

$F_o$ : valor F a 121,1°C de um microrganismo cujo valor z é conhecido;

$\Delta t_i$ : incremento de tempo usado na determinação da temperatura média  $\langle T \rangle_i$ .

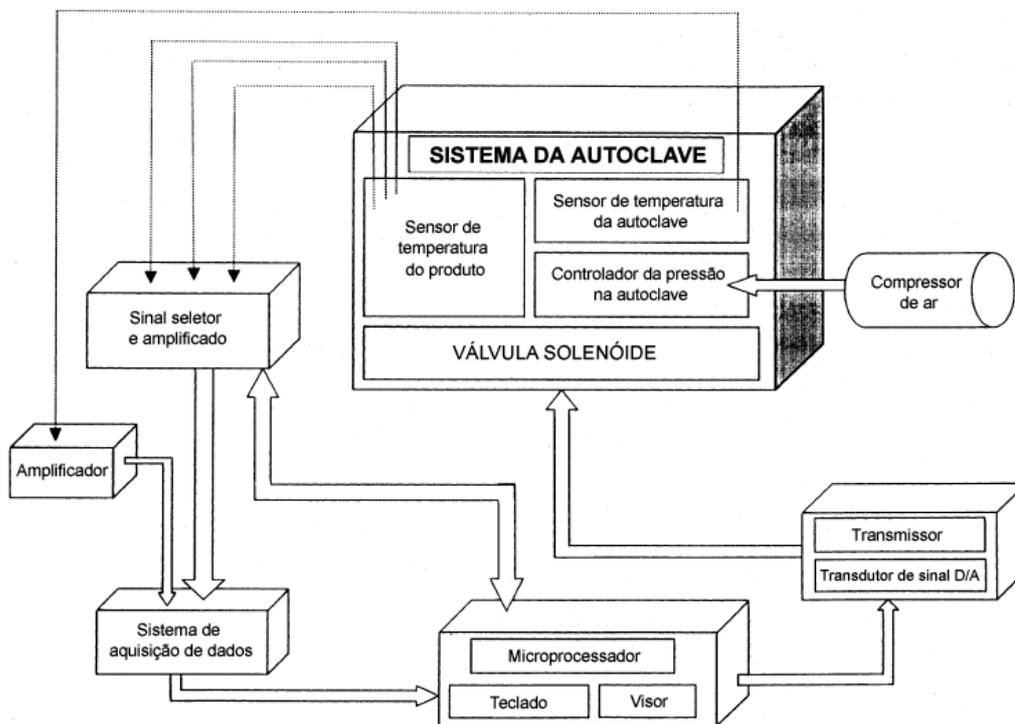
Assim, o valor de esterilização de um processo pode ser estimado através da conversão do tempo de processamento a uma dada temperatura num tempo de processamento equivalente na temperatura de referência (em geral 121,1°C). O algoritmo pode ser apresentado conforme Quadro 2.2.

**Quadro 2.2** - Algoritmo para estimativa do tempo de esterilização térmica.

Passo	Função
1	Entrada de dados: $F_{o,d}$ ( $F_o$ desejado), z e $\chi$ (tolerância)
2	Subdivisão de intervalos da curva de penetração de calor: $T_i$ e $\Delta t_i$
3	Cálculo da temperatura média para o intervalo i, $\langle T \rangle_i$
4	Faça $F_o = 0$
5	Repita enquanto $ F_o - F_{o,d}  < \chi$
5.1	Calcule: $F_o = F_o + 10^{\langle T \rangle_i - 121,1/z} \Delta t_i$
5.2	$i=i+1$
6	Fim da repetição
7	Impressão do tempo de processamento equivalente, $F_o$ ;
8	Fim.

A determinação exata do tempo de processamento exigirá a avaliação mais precisa da integral. O método gráfico apresentado acima indica uma forma rápida de considerar esse cálculo não negligenciando os comportamentos das curvas durante o aquecimento e resfriamento do alimento.

A letalidade é usada como variável controlada em estratégias de controle de processos térmicos, em esquema similar àquele apresentado na Figura 2.15 (AKTERIAN, 1999).



**Figura 2.15-** Diagrama de Blocos para do Sistema de Controle da Autoclave (KUMAR *et al.*, 2001).

Segundo Eguchi e Massaguer (1995), da mesma forma que o efeito da esterilização aumenta com o aumento da temperatura, a velocidade das reações também aumenta. O valor  $Q_{10}$  é um parâmetro usado para descrever este aumento e determina quantas vezes a velocidade de uma reação cresce se a temperatura do sistema aumentar em  $10^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{10}^{\circ\text{C}} = \frac{k_{(T+10^{\circ}\text{C})}}{k_T} \quad (2.38)$$

Sendo que,  $k_{(T+10^{\circ}\text{C})}$  é a constante de morte térmica quando a temperatura é aumentada em  $10^{\circ}\text{C}$  e  $k_T$  é a constante de morte térmica a uma temperatura  $T$ .

É importante especificar qual a escala de temperatura empregada. Assim  $Q_{10^{\circ}\text{C}}$  é maior que  $Q_{10^{\circ}\text{F}}$ , conforme Equação(2.39).

$$\frac{\log Q_{10}^{\circ\text{C}}}{\log Q_{10}^{\circ\text{F}}} = 1,8 \quad (2.39)$$

Com relação ao valor  $z$ , temos:

$$\log Q_{10}^{\circ\text{C}} = \frac{10}{z_{\circ\text{C}}} \quad (2.40)$$

ou

$$\log Q_{10^{\circ\text{F}}} = \frac{10}{z_{\circ\text{F}}} \quad (2.41)$$

A maioria das reações químicas e biológicas tem o valor de  $Q_{10}^{\circ\text{C}}$  entre 2,0 e 2,5.

Já, para a desnaturação térmica de proteínas e destruição microbiológica, o valor de  $Q_{10}^{\circ\text{C}}$  fica entre 10 e 20, o que implica que para cada aumento de  $10^{\circ\text{C}}$  na temperatura de esterilização, equivale a aumentar de 10 a 20 vezes a velocidade de destruição microbiológica. A faixa de variação é ampla em função do comportamento diferenciado que cada tipo de esporo apresenta diante de aumentos na temperatura (EGUCHI; MASSAGUER, 1995).

Na indústria de alimentos enlatados, utiliza-se o critério de 12D para alimentos comercialmente estéreis, que têm o *C. botulinum* como o microrganismo alvo do processo. Adotar um tratamento térmico 12D significa que a contagem inicial foi reduzida em 90%, 12 vezes, ou seja, ao final do processo o número provável de sobreviventes equivale a  $10^{-12}$  vezes a população inicial. Stumbo (1973), criador do conceito 12D, indica que para processos que têm como alvo esporos de bactérias deterioradoras mesófilas, que apresentem um valor  $D_{121,1^{\circ\text{C}}}$  maior que o do *C. botulinum*, adota-se um tratamento entre 4D e 5D, pois como o valor  $D_{121,1^{\circ\text{C}}}$  é maior, o alimento não tolera mais do que 4 ou 5 reduções decimais. (GONÇALVES *et al.*, 1992; EGUCHI; MASSAGUER, 1995; LUERA-PEÑA, 2000).

## 2.9 Processamento de Grãos em Conserva

Pode-se considerar que as conservas alimentícias são produzidas através da combinação de dois métodos: acondicionamento em recipientes hermeticamente fechados e tratamento térmico capaz de inativar ou destruir os microrganismos e enzimas de modo irreversível. As operações tecnológicas básicas utilizadas na fabricação de grãos em conserva englobam a preparação dos grãos (recebimento, classificação, limpeza e seleção) e da

salmoura, enchimento dos recipientes, exaustão, fechamento, esterilização, resfriamento, armazenamento e distribuição (ITAL, 2001).

Além de evitar ou reduzir ao mínimo as possibilidades de interação com o alimento, as embalagens empregadas devem permitir fácil transmissão de calor, oferecer proteção completa ao alimento, ser de baixo custo, leves e resistentes aos choques térmicos e mecânicos. Existem várias formas geométricas para os recipientes usados no acondicionamento de grãos, sendo que a grande maioria possui geometria cilíndrica podendo apresentar pequenas modificações. Dentre os materiais mais usados encontram-se:

- ✓ Folha de Flandres: é uma folha de aço com aproximadamente um quarto de milímetro, revestida de ambos lados com uma camada de estanho (0,0025 mm) formado por banho fundido ou por galvanoplastia. As latas são freqüentemente envernizadas na superfície interna, para a proteção e diminuição dos efeitos da interação metal-alimento. Os vernizes internos ou esmaltes podem ser oleoresinosos, fenólicos, vinílicos e epoxílicos.
- ✓ Vidro: a utilização de recipientes de vidro data da antigüidade. Uma grande variedade de alimentos é acondicionada em vidros hermeticamente fechados; embora o tratamento destes recipientes seja, de certo modo, diferente daquele adotado para os alimentos enlatados, os princípios de conservação são os mesmos. O uso do recipiente de vidro tem como desvantagens o alto custo, maior fragilidade, menor produtividade para a mesma quantidade de equipamento e mão-de-obra, além de requerer despesas extras no acondicionamento. Por outro lado, apresenta como vantagens uma baixa interação entre o alimento e embalagem, além de proporcionarem uma fácil inspeção pelo consumidor. Em geral, alimentos acondicionados em vidro apresentam um tempo de processamento térmico maior do que os alimentos enlatados, porém, a uma temperatura mais baixa, em função do risco de quebra dos vidros, ou de comprometimento de seu fechamento, sendo que tanto aquecimento como o resfriamento, devem ser conduzidos mais lentamente.

Existem outros materiais que possuem também potencial para utilização no acondicionamento de conservas: as ligas de alumínio e embalagens plásticas termoprocessáveis podem ser utilizadas (GAVA, 1984), mas ainda não fazem parte da realidade do mercado brasileiro.

Na produção de grãos em conserva, após o enchimento dos recipientes, faz-se a eliminação do oxigênio, que é responsável pela oxidação da superfície interna do recipiente

durante o aquecimento e por conferir a forma cônica ou no mínimo plana para o fundo e tampa do recipiente, que é um dos indícios da boa qualidade dos alimentos em conserva. O método de exaustão mais utilizado para alimentos envasados com salmoura é o uso de bombas de vácuo, que promovem o vácuo em câmaras especiais simultaneamente à operação de fechamento da embalagem.

A esterilização de grãos em conserva é realizada, geralmente, em autoclaves capazes de resistir a altas pressões (32 kg/cm<sup>2</sup>). Normalmente, as autoclaves trabalham com temperaturas superiores a 120°C, o que proporciona uma redução no tempo de processamento.

As condições de anaerobiose existentes num recipiente de conserva hermeticamente fechado são favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos anaeróbios encontrados amplamente na natureza. Entre eles, o *C. botulinum* merece destaque especial, por produzir toxinas em pH superior a 4,5 e na condição de anaerobiose. Como o *C. botulinum* é um dos microrganismos patogênicos mais resistentes ao calor, a eliminação deste microrganismo e de seus esporos constitui padrão mínimo para a esterilização de conservas alimentícias de baixa acidez. A termo-resistência dos microrganismos geralmente é expressa como tempo de morte térmica ou tempo de destruição térmica (TDT).

A etapa de resfriamento deve ser rápida para paralisar a ação do calor e evitar alterações de cor e textura do alimento. Além disso, a elevação da temperatura provoca um aumento pronunciado da pressão dentro da lata. Por outro lado, o resfriamento rápido das embalagens reduz a pressão interna dos recipientes a um nível seguro para a exposição dos mesmos à pressão atmosférica. O resfriamento é efetuado colocando-se as latas sob chuveiro de água fria, submergindo-as em tanques de água fria ou, em alguns casos, pelo resfriamento sob pressão na autoclave, uma vez terminado o processamento térmico. Este último processo é efetuado principalmente para recipientes de vidro, pois as tampas fechadas à vácuo poderiam abrir pelo grande diferencial de pressão. A água utilizada para o resfriamento deve ser limpa e isenta de bactérias. Na prática comercial, as latas são resfriadas em água até atingirem a temperatura de 37°C, de modo a restar calor suficiente para secar a parte externa da embalagem, evitando a corrosão. Dentre as operações finais, pode-se destacar a codificação e rotulagem, armazenamento e distribuição, que „devem ser conduzidas de forma a garantir a integridade tanto da embalagem como do produto acondicionado.

Algumas alterações em conservas alimentícias de baixa acidez (pH maior que 4,5) merecem destaque (ITAL, 1992):

(i) *Alterações microbianas*: caracterizada pela deterioração dos produtos enlatados pela ação de microrganismos em consequência da sobrevivência destes organismos ao tratamento térmico (subprocessamento), e/ou vazamento do recipiente depois do tratamento térmico (recontaminação), e/ou resfriamento inadequado, e/ou deterioração no pré-processamento. Estas alterações podem ser classificadas como segue:

✓ Deterioração sem formação de gás:

1) Deterioração tipo *Flat-Sour*: os microrganismos contaminantes mais comuns são *Bacillus coagulans* e *Bacillus stearothermophilus*. E estes microrganismos produzem ácido, a partir de açúcares, sem que haja a formação de gás. Geralmente, é causada por subprocessamento ou recontaminação. A lata permanece sem alteração, isto é, plana ou chata, sendo que a alteração só poderá ser detectada através das análises laboratoriais. É mais freqüente em alimentos de baixa acidez, só ocorrendo em alimentos ácidos excepcionalmente.

2) Deterioração sulfídrica: o microrganismo contaminante mais comum é *Desulfotomaculum nigrificans*. Este microrganismo produz o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) a partir de aminoácidos sulfurados. Geralmente, é causada por subprocessamento. A lata contaminada por este grupo de bactérias apresenta comumente aparência normal, pelo fato deste gás ser solúvel no conteúdo da mesma. Tanto o alimento, como a lata que o acondiciona, se tornam escuros como consequência da reação entre o composto sulfídrico e o material da lata.

✓ Deterioração com formação de gás:

Caracterizada pela deformação da embalagem, os microrganismos contaminantes mais comuns são as bactérias anaeróbicas. Os anaeróbios esporulados são geralmente oriundos do solo, sendo algumas espécies encontradas no intestino do homem e dos animais. Geralmente, esta deterioração é causada por bactérias do gênero *Clostridium*, podendo ser termófilas como o *C. termosacharolyticum*, que hidrolisa o açúcar e produz ácido (H<sub>2</sub>) e gás (CO<sub>2</sub>) ou mesófilas como o *C. sporogenes* e *C. botulinum*, que decompõem proteínas, produzindo H<sub>2</sub>S, amônia, indol e excatol, que são substância de aroma desagradável, bem como ácido (H<sub>2</sub>) e gás (CO<sub>2</sub>).

(ii) *Alterações químicas*: ocorrem externa e/ou internamente à embalagem. São alterações de grande relevância, pois constituem fator limitante para a vida útil das conservas enlatadas. Podem ser causadas pela ação do calor, produção de hidrogênio sulfurado e amoníaco, conversão do colágeno em gelatina, extravasamento dos líquidos tissulares, desnaturação protéica, desenvolvimento de gás carbônico, hidrólise de glicogênio e escurecimento não enzimático, dentre outros fatores.

(iii) *Alterações físicas*: pode ocorrer o enchimento excessivo das latas, baixo vácuo, técnica deficiente na operação da autoclave, dentre outros fatores.

## 2.10 Metodologia APPCC

Dentre as alternativas para a avaliação efetiva da habilidade de produção consistente de alimentos seguros e de alta qualidade encontra-se o sistema Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle - APPCC (HACCP - *Hazard Analysis Critical Control Points*), que enfatiza a identificação e prevenção de perigos, ao invés de confiar em avaliações intermitentes dos processos de produção através de amostragens.

A metodologia APPCC foi desenvolvida pela Pillsbury Company com a NASA nos anos 60. Ela foi originalmente desenvolvida como um sistema de segurança microbiológica para a garantia da segurança alimentar dos astronautas. Naquela época, a maioria da segurança de alimentos e dos sistemas de controle de qualidade baseava-se no controle do produto final, que é um método ineficiente devido ao descarte de produto. O APPCC surgiu como um procedimento de segurança alimentar baseado na engenharia de sistemas: Análise de falha, modos e efeitos (*Failure, Mode and Effect Analysis*, FMEA). O sistema identifica potenciais problemas em cada etapa operacional e propõe soluções para cada problema antes de ativar procedimentos efetivos de controle. Assim, o APPCC identifica os perigos de interesse à segurança do alimento.

A metodologia APPCC se baseia na implementação dos seguintes princípios:

1. Realizar análise de perigos e avaliação de riscos;
2. Identificar os Pontos Críticos de Controle (PCC) no processamento do alimento;
3. Estabelecer limites críticos para cada PCC;
4. Estabelecer procedimentos para monitoramento de cada PCC;
5. Estabelecer protocolo de ações corretivas para cada PCC;
6. Estabelecer procedimentos para registro efetivo;
7. Estabelecer procedimentos para efetiva verificação de auditoria.

Com a implementação do Plano de APPCC, pode-se identificar e monitorar perigos específicos dos alimentos: microbiológicos (bactérias, vírus, microrganismos parasitas, entre outros); químicos, incluindo os presentes naturalmente (como toxinas) ou adicionados no processamento (por exemplo, os resíduos de pesticida, produtos de limpeza) e físicos (fragmentos de vidros e corpos estranhos ao alimento).

O APPCC deve ser desenvolvido para cada produto e processo. Alguns programas são pré-requisitos para se iniciar a implantação do APPCC. Estes programas já devem estar adequadamente implementados às rotinas da produção, dentre eles destacam-se: os sistemas de controle de qualidade, auditorias de qualidade, Boas Práticas de Fabricação (BPF), Procedimentos Padrões de Higiene e Operacional (PPHO) e/ou Procedimentos Operacionais Padronizados (POP) e manutenção preventiva.

## 2.11 Modelagem Matemática dos Processos de Esterilização de Alimentos

Os modelos matemáticos são a representação conceitual simplificada da realidade. Podem ser classificados em quatro tipos, conforme descrito a seguir:

**Modelos Fundamentais ou Fenomenológicos**, que são baseados nos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

**Modelos Empíricos**, baseiam-se em dados de laboratório, são úteis somente para situações e condições equivalentes àquelas em que foram gerados.

**Modelos Físicos**, que são representações físicas dos processos e são usualmente feitos em escala reduzida.

**Modelos Híbridos**, que são representações baseadas em modelagem fenomenológica e empírica, combinadas em um único modelo.

A seguir são apresentados os modelos para a predição das propriedades físicas dos alimentos, baseados na composição do produto, que foram utilizados, nesta pesquisa, na estimativa das propriedades do grão de ervilha e salmoura. Na seqüência, são apresentados os modelos para transferência de calor na lata e na autoclave, separadamente, utilizados como referência para a modelagem da transferência de calor do processo em batelada para a esterilização térmica de vegetais em conserva.

### 2.11.1 Modelos para Predição das Propriedades Físicas dos Alimentos

O domínio dos conceitos relacionados às propriedades físicas dos alimentos é de incontestável relevância para a indústria. O desenvolvimento das tecnologias de conservação pelo calor requer profundo conhecimento das propriedades físicas, em especial, das propriedades termo-físicas dos alimentos, que são necessárias para a predição e controle dos processos. Quando as propriedades térmicas são requeridas para várias condições de processamento, o ideal é obtê-las a partir de modelos baseados em parâmetros do processo.

Na literatura, pode-se encontrar, além de valores para as propriedades físicas em várias temperaturas, equações já desenvolvidas, de simples aplicação, em função da temperatura ou composição do produto. A aplicação destas correlações gera resultados mais precisos comparados àqueles obtidos a partir de um valor constante, calculado considerando a temperatura média do produto (BERTO, 2000).

Existem muitos modelos para a predição das propriedades térmicas em alimentos. Entretanto, poucos são aplicáveis para uma larga faixa de temperatura e composição.

Segundo Choi e Okos (1986), de maneira geral, os principais fatores ou condições de processo que afetam a propriedades térmicas são a composição, densidade e temperatura. A condutividade térmica e difusividade térmica variam com a composição, densidade e temperatura, enquanto que o calor específico varia apenas com a composição e temperatura.

A densidade ( $\rho$ ) é a massa de uma substância ou de um alimento presente em uma unidade de seu volume. Utilizada em especial para determinar a concentração de compostos em uma solução, dos sólidos em um alimento e para caracterizar diferentes substâncias e materiais (LEWIS, 1996; ALVARADO; AGUILERA, 2001).

A capacidade calorífica ( $c_p$ ) é a quantidade de calor requerida para elevar em um grau a temperatura de uma dada massa de qualquer material. Denominada usualmente como calor molar ou capacidade calorífica molar (para um mol de substância) e calor específico ou capacidade calorífica específica (para uma unidade de massa da substância) (SMITH *et al.*, 1996; LEWIS, 1996; ALVARADO; AGUILERA, 2001).

A condutividade térmica ( $k$ ) de um material quantifica a capacidade deste material em conduzir calor e representa a constante de proporcionalidade da Lei de Fourier para a condução de calor (LEWIS, 1996; ALVARADO; AGUILERA, 2001).

A difusividade térmica ( $\alpha$ ) de um material quantifica a velocidade da mudança da temperatura, quando o material é aquecido ou resfriado (LEWIS, 1996; ALVARADO;

AGUILERA, 2001). Para o cálculo destas propriedades físicas, em função da composição, Choi e Okos (1986) apresentaram as seguintes equações:

✓ para os componentes:

$$k_n = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 \quad (2.42)$$

$$\alpha_n = b_1 + b_2 T + b_3 T^2 \quad (2.43)$$

$$\rho_n = c_1 + c_2 T \quad (2.44)$$

$$c_{p_n} = d_1 + d_2 T + d_3 T^2 \quad (2.45)$$

✓ para o alimento:

$$k = \sum k_n X_n^V \quad (2.46)$$

$$\rho = \frac{1}{\sum X_n^W / \rho_n} \quad (2.47)$$

$$c_p = \sum c_{p_n} X_n^W \quad (2.48)$$

$$\alpha = \sum \alpha_n X_n^V \quad (2.49)$$

sendo:

$n$  = componente (água, proteína, lipídio, carboidrato, fibra e cinzas);

$X_n^W$  = fração mássica do componente  $n$ ;

$X_n^V$  = fração volumétrica do componente  $n$ ;

$a_1, a_2, a_3$  = constantes;

$b_1, b_2, b_3$  = constantes;

$c_1, c_2$  = constantes.

Choi e Okos (1986) propuseram modelos, apresentados na Tabela 2.2, para os principais componentes puros dos alimentos (proteína, lipídio, carboidrato, fibra e cinzas).

**Tabela 2.2** – Equações constitutivas para estimativa das propriedades térmicas de componentes dos alimentos (CHOI; OKOS, 1986).

Propriedade Térmica	Componente	Modelo em função da temperatura	Erro Padrão (%)
$k_n$ (W / m °C)	Proteína	$1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$	5,91
	Lipídios	$2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$	1,95
	Carboidratos	$2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$	5,42
	Fibras	$1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3} T - 3,1683 \times 10^{-6} T^2$	5,55
	Cinzas	$3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$	2,15
$\alpha_n$ (m <sup>2</sup> /s)	Proteína	$6,8714 \times 10^{-8} + 4,7578 \times 10^{-10} T - 1,4646 \times 10^{-12} T^2$	4,50
	Lipídios	$9,8777 \times 10^{-8} - 1,2569 \times 10^{-10} T - 3,8286 \times 10^{-14} T^2$	2,15
	Carboidratos	$8,0842 \times 10^{-8} + 5,3052 \times 10^{-10} T - 2,3218 \times 10^{-12} T^2$	5,84
	Fibras	$7,3976 \times 10^{-2} + 5,1902 \times 10^{-4} T - 2,2202 \times 10^{-6} T^2$	3,14
	Cinzas	$1,2461 \times 10^{-7} + 3,7321 \times 10^{-10} T - 1,2244 \times 10^{-12} T^2$	1,61
$\rho_n$ (kg / m <sup>3</sup> )	Proteína	$1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1} T$	3,07
	Lipídios	$9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1} T$	0,47
	Carboidratos	$1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1} T$	5,98
	Fibras	$1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1} T$	0,64
	Cinzas	$2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1} T$	0,09
$c_{p_n}$ (kJ / kg °C)	Proteína	$2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3} T - 3,129 \times 10^{-6} T^2$	5,57
	Lipídios	$1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} T - 4,8008 \times 10^{-6} T^2$	1,16
	Carboidratos	$1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2$	5,96
	Fibras	$1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3} T - 4,6509 \times 10^{-6} T^2$	1,66
	Cinzas	$1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} T - 3,6817 \times 10^{-6} T^2$	2,47

As correlações propostas na Tabela 2.2 são válidas para a faixa de temperatura de -40 a 150°C, para soluções de 0 a 95% de sólidos em suspensão. Desta maneira, sabendo-se a composição do alimento, calcula-se as propriedades termofísicas utilizando-se as equações para o componente predominante ou utilizando-se a ponderação das equações por componente. O erro apresentado pelas equações não ultrapassa 6%. Os autores também apresentaram equações para o cálculo das propriedades termofísicas da água e do gelo (Tabela 2.3). As equações de condutividade térmica, difusividade e densidade estão definidas para as faixas de temperatura de -40 a 150°C. O calor específico é definido por duas equações, uma para a água na temperatura de 0 e 150°C e outra para a faixa de temperatura entre -40 a 0°C.

**Tabela 2.3** – Equações constitutivas para estimativa das propriedades térmicas da água (CHOI; OKOS, 1986)

Propriedade Térmica	Equação constitutiva em função da temperatura	Erro Padrão (%)
$k_w$ (W / m °C)	$5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7036 \times 10^{-6} T^2$	0,45
$\alpha_w$ (m <sup>2</sup> / s)	$1,3168 \times 10^{-7} + 6,2477 \times 10^{-10} T - 2,4022 \times 10^{-12} T^2$	1,44
$\rho_w$ (kg / m <sup>3</sup> )	$9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2$	0,22
$c_{p_{w1}}$ (kJ / kg °C)	$4,0817 - 5,3062 \times 10^{-3} T + 9,9516 \times 10^{-4} T^2$	2,15
$c_{p_{w2}}$ (kJ / kg °C)	$4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5} T + 5,4731 \times 10^{-6} T^2$	0,38

$c_{p_{w1}}$  = calor específico da água à temperatura de -40 a 0°C;

$c_{p_{w2}}$  = calor específico da água à temperatura de 0 a 150°C.

### 2.11.2 Modelo Matemático para Unidade de Produto Envasado

Apesar do grande avanço na tecnologia e engenharia de alimentos, a esterilização térmica em batelada de enlatados ainda é o mais universal e econômico método para preservação de alimentos por um longo período de vida útil (AKTERIAN, 1999).

**Energia:** A transferência de calor em alimentos sólidos, semi-sólidos e líquidos ocorre pelo mecanismo de condução de calor, conforme a lei de Fourier; pela convecção, devido ao movimento global do fluido e, em casos especiais, pelo mecanismo de radiação, descrito pela lei de Stefan-Boltzmann.

Bird *et al.* (1960) apresentaram a equação da conservação de energia como:

$$\rho c_p \left[ \underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_1 + \underbrace{\mathbf{v} \cdot \nabla T}_2 \right] = - \underbrace{\nabla \cdot \mathbf{q}}_3 - \underbrace{\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}}_4 - \underbrace{T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \nabla \cdot \mathbf{v}}_5 + \underbrace{G}_6 \quad (2.50)$$

A equação de condução de calor pode ser simplificada conforme o sistema de interesse. Para o caso de um sólido, onde o mecanismo importante é a condução, a simplificação da Equação (2.50) com as considerações abaixo (1 a 6), fornece a Equação (2.51):

- 1-  $\rho c_p$  multiplicado pelo termo 1 corresponde à transferência de energia por condução;
- 2-  $\rho c_p$  multiplicado pelo termo 2 corresponde à transferência de energia por convecção, como trata-se de sólido não há movimento de entrada/saída, este termo é nulo;
- 3- taxa de energia interna fornecida por condução;
- 4- taxa de deformação, como não há massa entrando nem saindo, este termo é nulo;
- 5- taxa de compressão, como não ocorre compressão do sólido, este termo é nulo;
- 6- taxa de geração de calor, como não ocorre geração de calor, este termo é nulo.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q} \quad (2.51)$$

Banga *et al.* (1993), Silva *et al.* (1993), Richardson (2001) e Alves (2005) descreveram a transferência de calor por condução em alimentos sólidos a partir da lei de condução de calor de Fourier representada pela Equação (2.52).

$$\mathbf{q} = -k \cdot \nabla T \quad (2.52)$$

Substituindo a Equação (2.52) na Equação (2.51):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (2.53)$$

Sendo que,  $k$  é a condutividade térmica;  $\rho$  é a densidade;  $c_p$  é o calor específico;  $T$  é a temperatura; todas referentes aos sólidos, e  $t$  equivale ao tempo de processamento.

A difusividade térmica do sólido é dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.54)$$

Substituindo a Equação (2.54) na Equação(2.53), obtém-se

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.55)$$

O estudo de sistemas em que o mecanismo de convecção torna-se importante exige que o termo (2) da Equação (2.50) não possa ser negligenciado. Esse problema, no entanto, possui complexidade maior, pois exige que se conheça informações de velocidade do fluido no sistema, através de equacionamento da conservação da quantidade de movimento ou do uso de equações empíricas de velocidade.

**Quantidade de movimento:** Estabelece que um pequeno elemento de volume, que se move com o fluido, é acelerado pelas forças que atuam sobre ele (segunda lei de Newton), conforme:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} = -[\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v})] - \nabla \mathbf{P} - [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \rho \mathbf{g} \quad (2.56)$$

Sendo:

$\rho$  = densidade do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$P$  = pressão (Pa);

$\mathbf{v}$  = vetor velocidade ( $\text{m}/\text{min}$ );

$\boldsymbol{\tau}$  = tensor de esforços ( $\text{kg}/\text{m min}^2$ );

$\mathbf{g}$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{min}^2$ );

$t$  = tempo (min).

Se o fluido é newtoniano, com densidade e viscosidade constantes, a Equação (2.56) se reduz as equações de Navier-Stokes (BIRD *et al.*, 1960):

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}) = -\nabla \mathbf{P} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (2.57)$$

Sendo que,  $\mu$  é a viscosidade do fluido (kg/m min).

Para sistemas em que a convecção livre é o transporte predominante, a variação da densidade com a temperatura tem um papel importante e costuma-se modificar a equação do movimento para se considerar o efeito do empuxo (BIRD *et al.*, 1960). Essa condição faz com que o sistema apresente elevado grau de complexidade. Uma abordagem simplificadora usual (JIMÉNEZ-ISLAS, 1999) é a de se utilizar a aproximação de Boussinesq, que consiste em supor a densidade constante, exceto no termo de forças volumétricas, as propriedades do fluido constantes com exceção da massa específica no termo de forças e os efeitos viscosos negligenciáveis, levando a Equação (2.57) para a forma dada por:

$$\langle \rho \rangle \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \langle \rho \rangle (\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}) = \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \langle \rho \rangle \langle \beta \rangle \mathbf{g} (T - \langle T \rangle) \quad (2.58)$$

Sendo:

$\langle T \rangle$  = temperatura média (°C);

$\langle \rho \rangle$  = densidade na temperatura média  $\langle T \rangle$  (kg/m<sup>3</sup>);

$\langle \beta \rangle$  = coeficiente médio de expansão volumétrica,  $\beta = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_T$  (°C<sup>-1</sup>).

O caso de interesse, nesse estudo, trata-se de um meio onde mais de uma fase estão presentes. Assim em um meio heterogêneo (onde um meio fluido contínuo está em contato com um meio sólido descontínuo), duas propriedades são importantes: (i) a porosidade, que é a relação de volumes dos sólidos com respeito ao volume total do sistema e depende da natureza geométrica do sólido; e (ii) a permeabilidade, que é uma medida quantitativa da facilidade com que o fluido se transporta pelo meio poroso. Quando a permeabilidade depende somente da natureza intrínseca do sólido é dita de meio isotrópico, de outra forma quando depende também da natureza geométrica do sólido (propriedades direcionais dos poros), se trata de um meio não isotrópico.

A lei de Darcy evita a dificuldade de representar o perfil de velocidade local pela introdução de uma velocidade média e é dada por:

$$\mathbf{v} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \quad (2.59)$$

O comportamento em um meio poroso, segundo a lei de Darcy, dá-se pela consideração dos efeitos viscosos. Existem várias modificações como a extensão de Brinkman, a inclusão de efeitos inerciais e de resistência viscosa. Neste estudo, o meio poroso é constituído por grãos de ervilhas,

cujos valores de permeabilidade estão na ordem de  $10^{-8}$  ( $m^2$ ) (SINGH; THORPE, 1993), e assim possuem valores inerciais pequenos de forma que a equação de Darcy é adequada para a sua representação.

Uma forma de extrapolar os modelos desenvolvidos para a situação de múltiplas fases é através da utilização de valores médios, que se baseia na definição de média volumétrica da propriedade. A média volumétrica de uma propriedade  $\Omega$  é dada por (JIMÉNEZ-ISLAS, 1999):

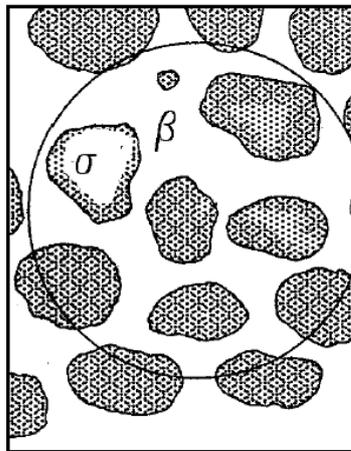
$$\langle \Omega \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_\beta} \Omega dV \quad (2.60)$$

Pode-se escrever, então:

$$\langle \nabla \Omega_\beta \rangle = \nabla \langle \Omega_\beta \rangle + \frac{1}{V} \int_{V_\beta} n_{\beta\sigma} \Omega_\beta dV \quad (2.61)$$

Sendo que  $\Omega$  representa qualquer propriedade derivável,  $\beta$  é a fase que representa o fluido,  $\sigma$  representa a fase sólida,  $n$  é o vetor normal unitário que aponta da fase  $\beta$  para a fase  $\sigma$ . O termo  $V_\beta$  representa o volume da fase  $\beta$  dentro do volume total, assim:  $V = V_\beta + V_\sigma$  e a porosidade é dada por  $\varepsilon = \frac{V_\beta}{V}$ .

A Figura 2.16 apresenta o esquema ilustrativo representando o sistema bifásico com uma região esférica para a propriedade volumétrica.



**Figura 2.16** - Sistema bifásico apresentando as fases  $\beta$  (fluido) e  $\sigma$  (sólido) em uma região esférica (JIMÉNEZ-ISLAS, 1999).

As formas funcionais para essa situação de propriedades médias possuem descrição similar àquelas apresentadas para o meio homogêneo com parâmetros de transporte efetivos. No caso de grãos em conserva, a abordagem segue o seguinte procedimento:

a) Considera-se um modelo para a fase do fluido e outro para a fase do sólido, acoplando as equações através de condições interfaciais apropriadas. A utilização deste esquema implica no emprego de coeficientes de transferência de calor que devem ser determinados experimentalmente ou através de equações constitutivas.

b) Emprega-se o conceito de propriedades volumétricas médias para se obter equações de transporte que modelem o sistema bifásico.

As equações na forma de médias volumétricas para o sistema com as considerações de que o fluido intersticial é newtoniano e incompressível e que os tensores de transporte somente dependem das coordenadas espaciais, são:

**Quantidade de movimento:**

$$\rho_{\beta} \frac{\partial \mathbf{v}_{\beta}}{\partial t} = -\nabla P - \mu C^{-1} \cdot \mathbf{v}_{\beta} + \rho \mathbf{g} \quad (2.62)$$

**Energia:**

$$(\rho c_p)_{\beta} \left( \frac{\partial T_{\beta}}{\partial t} + \mathbf{v}_{\beta} \cdot \nabla T_{\beta} \right) = k : \nabla \nabla T_{\beta} + G \quad (2.63)$$

Sendo que, para simplificar a notação, as variáveis foram representadas analogamente àquelas locais instantâneas vistas anteriormente e os parâmetros  $C^{-1}$  (inverso da permeabilidade) e  $k$  (condutividade térmica) são tensores de segunda ordem.

### 2.11.2.1 Modelo para sistema homogêneo e isotrópico

Para um sistema homogêneo e isotrópico a equação de transferência de calor bidimensional, por condução, Equação (2.64), foi obtida a partir da Equação (2.55) escrita em coordenadas cilíndricas, considerando desprezível a transferência de calor na direção angular.

As hipóteses simplificadoras adotadas para a definição deste modelo foram:

- transferência de calor bidimensional;
- ocorre apenas gradiente de energia;