KATY REGINA PEOTTA ZANINI

CONTRIBUIÇÃO AO EMPREGO DO MODELO DA DIFUSÃO NA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS ENLATADOS

SÃO CAETANO DO SUL

2009

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

KATY REGINA PEOTTA ZANINI

CONTRIBUIÇÃO AO EMPREGO DO MODELO DA DIFUSÃO NA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS ENLATADOS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de pesquisa: Análise e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira Leonhardt

SÃO CAETANO DO SUL

2009

ZANINI, Katy
Contribuição ao emprego do modelo de difusão na otimização do processamento térmico de alimentos enlatados. / Katy Regina Peotta Zanini – São Caetano do Sul, 2009.
110 p + apêndice

Dissertação – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2009. Orientador: Prof. Gustavo Leonhardt.

1. Processamento Térmico de Alimentos Enlatados 2. Emprego do Modelo da Difusão. II. Zanini, Katy. III. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Escola de Engenharia Mauá. IV. Título.

Ao meu esposo Fábio, pelo apoio e compreensão, à Regina pelo auxílio constante, aos amigos pelo incentivo e à minha filha Flávia pelo tempo que foi subtraído de nossa convivência.

AGRADECIMENTOS

Ao Orientador Prof. Gustavo Leonhardt, pelo acompanhamento pontual e competente.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação.

Ao Corpo Docente e Equipe Administrativa do Curso de Pós-Graduação do Instituto Mauá de Tecnologia.

A CAPES pela concessão da Bolsa.

A Deus que constantemente me ensina as virtudes do espírito e a arte de viver.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuiram para a realização deste trabalho.

"Uma descoberta, seja feita por um menino na escola ou por um cientista trabalhando na fronteira do conhecimento, é em sua essência uma questão de reorganizar ou transformar evidências, de tal forma que se possa ir além delas assim reorganizadas, rumo a novas percepções".

Jerone Bruner

RESUMO

No caso de alimentos de média acidez em que predomina o mecanismo de transferência de calor por condução, o processo VRT (variable retort temperature) pode proporcionar melhor qualidade do produto enlatado, aumento da produtividade e menor consumo de energia. Na otimização desse processo dois passos devem ser considerados:

1. desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam o processo com segurança;
2. identificação das condições ótimas baseadas em índices de desempenho tais como uso de energia e perda de propriedades nutricionais e organolépticas.

O objetivo deste trabalho é, empregando o modelo da difusão e o princípio dos processos divididos, estabelecer um método de análise que permita otimizar o tratamento térmico.

Palavras-chave: Processamento Térmico, Alimentos Enlatados, Modelo de Difusão

ABSTRACT

In case of foods of middle acidity in which there predominates the mechanism of transfer of heat for conduction, the VRT process (variable retort temperature) can provide better quality of the canned product, increase of the productivity and less consumption of energy. In the optimization of this process two steps must be considered:

1. development of mathematical models that describe the process with security;
2. identification of the best conditions based on rates of performance such as is used by me of energy and loss of nutritionals and organoleptics properties.

The objective of this work is, employing the model of the diffusion and the beginning of the divided processes, to establish a method of analysis that there allows to optimize the thermal treatment.

Keywords: Thermal Processing, Canned Food, Diffusion Model

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1. desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam o processo com segurança; 7
2. identificação das condições ótimas baseadas em índices de desempenho tais como uso de energia e perda de propriedades nutricionais e organolépticas. 7
Grupo I: que avaliam a letalidade no ponto frio do produto. 17
Grupo II: que determinam a avaliação da letalidade média da massa de todo o alimento contido na embalagem. 17
Método Gráfico ou Geral: geralmente mais preciso, pois normalmente utiliza medidas experimentais para o cálculo do valor de esterilização. 17
Método Analítico: emprega modelos matemáticos para predizer a temperatura do produto em função do tempo, durante o processamento. 17
- propriedades físicas constantes; 23
- dimensão característica do corpo (r_m) conhecida; 23
- condição inicial: 23
- SWEAT (1986) – Determinação da difusividade térmica de alimentos empregando-se a equação 2.61 a partir da determinação experimental da condutividade térmica, do calor específico e da massa específica. 49
- CHOI E OKOS (1983) – Determinação simultânea da difusividade e da condutividade térmica empregando-se um equipamento de laboratório que contenha uma fonte de calor linear, tipo sonda quente, com um termopar auxiliar fixado paralelamente à fonte quente. 49
- BALL E OLSON (1957) – Utilização da evolução da diferença entre a temperatura transiente em uma posição central da amostra (T_c) e a temperatura do meio de aquecimento (T_1) em função do tempo. Em geral, o gráfico do $log(T_1 - T_c)$ em função do tempo apresenta uma parte curvilínea no início do processo térmico, seguida de uma parte linear. A inclinação (m) da parte linear pode ser usada para determinar o índice de declive da curva de aquecimento (f_h). O índice de declive da curva de aquecimento relaciona-se com a difusividade térmica por meio de equações similares a equação 2.21. Este método só pode ser utilizado se a temperatura do meio de aquecimento T_1 for constante durante todo o processo térmico. 49

3. desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam o processo com segurança; 58
4. identificação das condições ótimas baseadas em índices de desempenho tais como uso de energia e perda de propriedades nutricionais e organolépticas. 58
1. O valor da constante de velocidade para as reações indesejáveis — amolecimento dos tecidos, degradação de aroma e sabor, destruição de vitaminas e escurecimento não-enzimático — possui uma ordem de grandeza bem inferior àquela obtida para as reações desejáveis — inativação de enzimas e morte de microrganismos. Esta comprovação experimental permite concluir que em altas temperaturas — por exemplo, 121°C — o processamento térmico é mais efetivo no que diz respeito à destruição de microrganismos e enzimas do que no caso das transformações que destroem o valor nutritivo e qualitativo do alimento. 62
2. Além disso, verifica-se também que as reações desejáveis são mais influenciadas pela temperatura do que as transformações indesejáveis. 62
a) concentração de microrganismos; 65
b) nível de destruição; 65
c) meio de suspensão; 65
d) idade da cultura; 65
e) meio em que o microrganismo é cultivado; e 65
f) meio em que é feito o aquecimento. 65
1. A transformação desejável é a destruição de esporos de *Clostridium botulinum*. Para isso, o valor F_M adotado será o sugerido por STUMBO ET AL. (1975) e apresentado na tabela 2.2, para cada tamanho de lata. 80
2. O valor de z que caracteriza a variação da resistência térmica do *Clostridium botulinum* com a temperatura é igual a 10°C. 80
3. A velocidade das transformações indesejáveis é praticamente a mesma e o valor z dessas transformações também é praticamente o mesmo, permitindo que a escolha de uma dada transformação desejada represente as demais (LUND, 1977). Assim, a transformação indesejável escolhida foi a destruição de vitaminas. 80
4. O valor de z que caracteriza a variação da resistência térmica do nutriente com a temperatura é igual a 30°C. 80
5. A variação da resistência térmica do microrganismo e do nutriente de referência obedece às equações 2.70, 2.74 e 2.77, de tal forma que o valor F_p do tratamento térmico pode ser calculado por meio da equação 2.88. 80

6. Para o nutriente, serão avaliados dois valores do valor F_p do tratamento térmico: o primeiro será baseado na temperatura do alimento no ponto crítico e o segundo na temperatura do alimento em contato com a superfície da embalagem. 80
7. O mecanismo de transferência de calor é o de condução, com a adoção de difusividades térmicas equivalentes para alimentos que apresentem outro mecanismo de transferência de calor. Esse modelo alcança desempenhos comparáveis aos demais modelos, porém com equações mais simples (LAROUSSE E BROWN, 1997). 81
8. No instante inicial, a temperatura do alimento é uniforme. 81
9. A temperatura da superfície do alimento em contato com a embalagem atinge instantaneamente a temperatura do meio e é homogênea durante todo o processamento térmico, ou seja, é possível admitir que $Bi = \infty$ 81
10. A determinação da difusividade térmica do alimento a partir da curva de aquecimento do alimento permite admitir que essa propriedade seja isotrópica e não varie com a temperatura na faixa de temperatura empregada durante o tratamento térmico. 81
T_r Temperatura de referência (°C) 81
z_M Valor z do microrganismo (°C) 81
z_N Valor z do nutriente (°C) 81
F_M Valor F do microrganismo (min) 81
a Largura do recipiente paralelepipédico (m) 81
b Profundidade do recipiente paralelepipédico (m) 81
c Altura do recipiente paralelepipédico (m) 82
d Diâmetro do recipiente cilíndrico (m) 82
h Altura do recipiente cilíndrico (m) 82
1. inicialmente estabelece-se o processo CRT que forneça a esterilidade desejada; 87
2. com base nesse processo calcula-se um tempo de tratamento térmico 20% inferior ao tempo de tratamento térmico que forneceu a esterilidade desejada; 87
3. com esse tempo procura-se estabelecer uma programação de temperatura para a autoclave que obedeça ao padrão apresentado na figura 3.1; 87
4. para isso, inicia-se o processo com uma temperatura T_1, obedecendo ao tempo calculado anteriormente, varia-se a temperatura da autoclave de modo

que o valor F_{PN}, calculado na superfície do recipiente, seja 20% inferior àquele obtido no tratamento CRT;.....87
5. com o auxílio da planilha apresentada no apêndice B, calcula-se o valor F_{PM} que deve ser igual ao sugerido por STUMBO ET AL. (1975);.....87
6. simultaneamente é calculado o F_{PN} na superfície do recipiente que deve ser inferior àquele obtido no tratamento CRT;.....87
7. o tratamento selecionado é aquele que obedece às duas condições anteriores.....87

LISTA DE TABELAS

KATY REGINA PEOTTA ZANINI.....1
SÃO CAETANO DO SUL.....1
2009.....1
KATY REGINA PEOTTA ZANINI.....2
SÃO CAETANO DO SUL.....2
2009.....2
AGRADECIMENTOS.....5
RESUMO.....7
No caso de alimentos de média acidez em que predomina o mecanismo de transferência de calor por condução, o processo VRT (variable retort temperature) pode proporcionar melhor qualidade do produto enlatado, aumento da produtividade e menor consumo de energia. Na otimização desse processo dois passos devem ser considerados:.....7
O objetivo deste trabalho é, empregando o modelo da difusão e o princípio dos processos divididos, estabelecer um método de análise que permita otimizar o tratamento térmico.....7
Palavras-chave: Processamento Térmico, Alimentos Enlatados, Modelo de Difusão.7
ABSTRACT.....8
In case of foods of middle acidity in which there predominates the mechanism of transfer of heat for conduction, the VRT process (variable retort temperature) can provide better quality of the canned product, increase of the productivity and less consumption of energy. In the optimization of this process two steps must be considered:.....8

1. development of mathematical models that describe the process with security;..8
2. identification of the best conditions based on rates of performance such as is used by me of energy and loss of nutritionals and organoleptics properties.....8
The objective of this work is, employing the model of the diffusion and the beginning of the divided processes, to establish a method of analysis that there allows to optimize the thermal treatment.....8
Keywords: Thermal Processing, Canned Food, Diffusion Model 8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....9
LISTA DE TABELAS 12
SUMÁRIO.....102
O efeito do processamento térmico sobre a qualidade dos alimentos tem se mostrado de grande importância econômica e nutricional, uma vez que o valor nutritivo, a qualidade, a segurança e a vida-de-prateleira se tornaram fatores extremamente importantes com o avanço nas técnicas de esterilização que empregam o calor. Atualmente, o enlatamento seguido de processamento térmico é considerado um método efetivo de preservação de alimentos. 105
No entanto, como em um grande número de produtos a transferência de calor ocorre de maneira muito lenta, para que o ponto frio do alimento atinja o valor de esterilização desejado, o produto é aquecido de maneira muito mais intensa na superfície em contato com o recipiente do que seria necessário para que a esterilidade comercial seja atingida, resultando em perdas consideráveis de fatores de qualidade. Ocorrem alterações de cor, sabor, textura e os nutrientes mais termolábeis são destruídos por degradações químicas que são induzidas pelo tratamento térmico. Essa degradação reduz o valor nutritivo do alimento, causa alterações organolépticas, resultando em grandes perdas para o alimento em si.105
O conhecimento das propriedades térmicas dos alimentos passou a ser um fator determinante para o processamento térmico e com o advento computacional um maior rigor na determinação dessas propriedades térmicas passou a ser exigido. Por outro lado, o uso de métodos matemáticos mais avançados permite obter modelos mais adequados e, portanto, aperfeiçoar o processamento térmico dos alimentos. 105
Muitos trabalhos foram desenvolvidos neste sentido. A grande maioria baseou-se na determinação da condutividade térmica dos alimentos. Poucos se basearam na determinação da difusividade térmica. Essa preferência pela condutividade

térmica pode ser explicada ao se constatar que aquela pode ser determinada conhecendo esta, o calor específico e a massa específica. 105
Também no estudo da transferência de calor, com o desenvolvimento do microcomputador, métodos numéricos são cada vez mais empregados. No enlatamento convencional, em que alimento e recipiente são esterilizados simultaneamente em autoclaves, os modelos que permitem conhecer a transferência de calor para o alimento, utilizam a equação do balanço diferencial de energia para determinar a variação da temperatura com a posição e o tempo. 105
Empregando o modelo da difusão e o princípio dos processos divididos, o objetivo deste trabalho é sugerir técnicas de operação da autoclave que permitam reduzir a destruição de nutrientes..... 106
Uma das principais aplicações da modelagem matemática de transferência de calor no processamento de alimentos é para avaliação dos processos destinados a produzir alimentos enlatados comercialmente estéreis. Nos últimos anos esse campo do conhecimento tem sido freqüentemente alvo de muitos estudos, devido a sua grande importância na indústria. Geralmente são processos complexos, pois, envolve muitas variáveis, o que aumenta a dificuldade de interpretação em si. ... 107
Associado a um processo térmico para a inativação de microorganismos sempre existirá uma degradação de nutrientes ou de qualquer outro fator de qualidade. Assim, extremo cuidado é necessário no cálculo do tempo e da temperatura de processo para se evitar tanto o sub como o super processamento. 107
Desde que Ball, em 1923, publicou seu primeiro modelo matemático para avaliar processos de esterilização de alimentos muitos outros têm sido publicados. Geralmente eles são classificados em dois grupos: 107
Os procedimentos do grupo I são divididos em dois subgrupos: 107
Com o advento dos computadores, os métodos numéricos para resolução de equações diferenciais passaram a ser utilizados para resolver problemas mais realísticos e complexos de transferência de calor, como aqueles apresentados pela maioria dos processos de esterilização de alimentos. A idéia básica dos métodos numéricos é o processo de discretização, que reduz o problema físico contínuo a um número finito de equações que pode ser resolvido por computador. De acordo com WELT (1997), o desenvolvimento de um método confiável de análise do

processamento térmico depende da escolha adequada do método numérico e da forma de converter os dados de tempo e temperatura em letalidade. 107
Segundo CRISTIANINI (1998), vários procedimentos gráficos e matemáticos foram propostos (STUMBO (1949), GILLESPY (1953), STUMBO (1953) e STUMBO (1973)) para estimar a eficiência do processamento térmico na destruição de microorganismos viáveis. De acordo com este autor, BALL E OLSON (1957), TEIXEIRA ET AL. (1969) e HAYAKAWA E BALL (1969) apresentaram métodos para estimar a degradação de nutrientes em alimentos em embalagens cilíndricas durante o processamento térmico. 108
Vários estudos já foram feitos simulando em computador o processamento térmico de alimentos para otimizar a retenção de nutrientes ao mesmo tempo em que a esterilidade é garantida (TEIXEIRA ET AL. (1969), MANSO ET AL. (1970), OHLSSON (1980) THIJISSEN E KOCHEM (1980) e NADKARNI E HATTON (1985)), mas somente poucos estudos comparam os valores previstos pelo modelo com resultados obtidos experimentalmente (JEN ET AL.(1971), TEIXEIRA ET AL. (1975) apud GHAZALA ET AL.(1989)). 108
CASTILLO ET AL. (1980) desenvolveram um modelo para predizer retenção de nutrientes através de um modelo de cinética de primeira ordem para a degradação térmica em alimentos processados em bolsas flexíveis através de condução térmica. A validação do modelo foi verificada experimentalmente e o modelo foi capaz de predizer a temperatura no centro da embalagem ao final da fase de aquecimento bem como a retenção de nutrientes com 90% de confiança. 108
RAMASWAMY ET AL. (1982) apresentam relações simples para predizer valores de funções características. Empregando estas relações, avaliações dos adimensionais de temperatura para várias combinações dos números de Fourier e Biot foram discutidas. Além disso, relações simplificadas para prever a temperatura em um ponto qualquer e também a temperatura média da massa foram obtidas. Estas relações se aplicam a placas planas, cilindros finitos e infinitos e esferas. 108
NAVEH ET AL. (1984) empregando métodos numéricos e medidas experimentais estudaram a esterilização de alimentos em recipientes de extremidade plana posicionados na base da autoclave. 109
GHAZALA ET AL. (1989) elaboraram um modelo para alimentos que apresentam um mecanismo de transferência de calor por condução para avaliar a retenção de ácido ascórbico e a ocorrência da reação de Maillard durante o processamento

térmico, através do uso de diferenças finitas. Os resultados mostraram boa correlação entre os resultados obtidos experimentalmente e a retenção de ácido ascórbico prevista pelo modelo matemático, sendo o valor de R^2 de 0,94 considerado satisfatório pelos autores. 109

SIMPSON ET AL. (1989) desenvolveram um modelo matemático utilizando diferenças finitas para esterilização de alimentos que se aquecem por condução em embalagens ovais. A validação experimental realizada mostrou que o método prediz de maneira satisfatória os parâmetros temperatura e retenção de nutrientes, sendo que para os valores de temperatura o valor de R^2 obtido foi 0,9999 e para retenção de nutrientes o erro médio entre valores previstos e valores experimentais foi de 6,3%. Além disso, o programa desenvolvido pode ser modificado para aceitar variações na temperatura da autoclave, condições iniciais de temperatura não uniformes, mudanças nos parâmetros cinéticos e condições heterogêneas do meio. 109

BHOWMIK E SHIN (1991) construíram um modelo matemático para avaliar o processamento térmico de alimentos processados em recipientes de plástico cilíndricos. O modelo inclui o coeficiente convectivo de transferência de calor para os meios de aquecimento e resfriamento, difusividade térmica do plástico e do alimento e o contato entre os mesmos, sendo que estes influenciam de maneira significativa o valor de esterilização entregue ao produto. As temperaturas estimadas pelo modelo no ponto frio obtiveram boa concordância com aquelas obtidas experimentalmente. 109

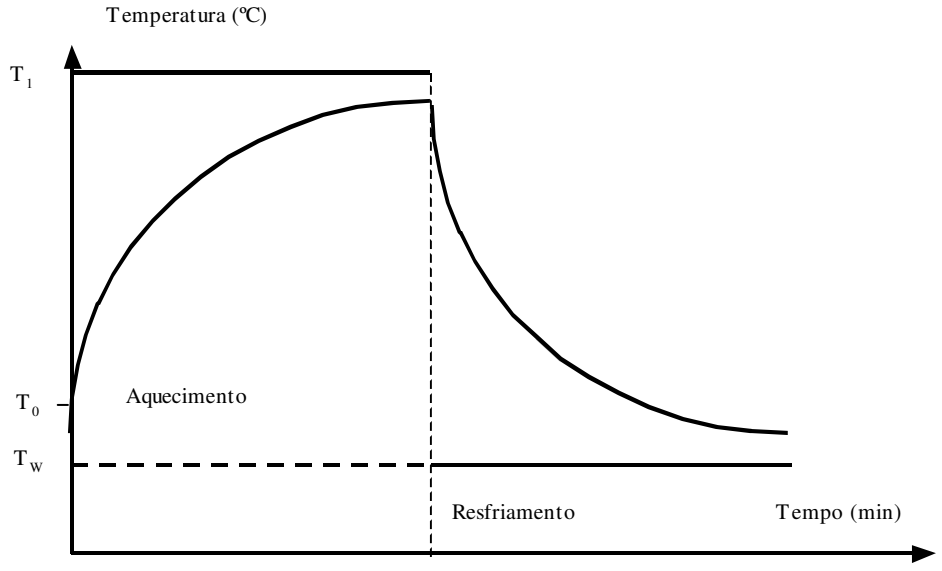
TUCKER E CLARK (1990) elaboraram um modelo matemático capaz de prever a temperatura no interior de produtos condutivos durante a fase de resfriamento baseado na técnica de diferenças finitas. Devido à contribuição para a letalidade ser significativa no início da fase de resfriamento, o modelamento matemático desta fase do processamento deve ser feito de maneira adequada. Entretanto, esta contribuição em termos percentuais é variável e difícil de quantificar. A máxima diferença entre temperaturas previstas pelo modelo e aquelas obtidas experimentalmente foi de 2,5ºC. 109

ERDOGDU ET AL. (1998) construíram um modelo matemático utilizando a técnica de diferenças finitas capaz de prever a distribuição de temperatura no interior da amostra durante o cozimento de camarão. O modelo é capaz de considerar condutividade térmica, calor específico e densidade variáveis além de variações

nas dimensões da amostra devido ao encolhimento. Os valores de R^2 obtidos na regressão entre valores preditos pelo modelo e valores obtidos experimentalmente foram de 0,99 para medidas feitas no centro da amostra e 0,96 para pontos próximos à superfície da mesma.....110
JACZYNSKI E PARK (2002) construíram e validaram um método interativo de predição da temperatura para surimi. O modelo é baseado nas cartas de Gurney-Lurie para condução de calor em uma placa infinita. Os dados de entrada do modelo são: temperatura de processo, tempo de processamento, temperatura inicial da amostra e espessura do produto. O modelo proposto apresentou boa correlação entre os valores preditos e os observados experimentalmente (R^2 = 0,999), sendo que a máxima diferença de temperatura verificada foi de 1ºC.....110
PORNCHALOEMPONG ET AL. (2002) elaboraram um modelo matemático utilizando a técnica de diferenças finitas para otimizar a retenção de qualidade em alimentos condutivos embalados em recipientes cônicos. O modelo assume: transferência de calor apenas por condução, alimento homogêneo e isotrópico, propriedades térmicas e físicas constantes com a temperatura, temperatura inicial do produto uniforme e o coeficiente de transferência de calor pode ser especificado ou assumido como infinito. As condições de processamento foram otimizadas através da simulação de processos térmicos equivalentes, isto é, processos em que um mesmo valor de letalidade é entregue ao produto e os valores de retenção global de qualidade em alimentos são calculados. Os perfis porcentagem de retenção de qualidade em função da temperatura de processamento, obtidos para recipientes cônicos são bastante semelhantes àqueles reportados na literatura para formatos tradicionais de embalagem, tais como recipientes cilíndricos. Este fato confirma que os resultados obtidos para recipientes cônicos podem ser extrapolados para outros tipos de geometria, conforme esperado pelos autores.....110
MOHAMED (2003) propôs um modelo computacional para simulação da esterilização de alimentos baseado na solução de Fourier para equação de aquecimento por condução em recipientes finitos de geometria cilíndrica, utilizando o método de elementos finitos.....111
SAKAI ET AL. (2003) E CHEN ET AL. (2005) propuseram um método para prever a temperatura em latas quando a convecção natural é o mecanismo principal. 111

MOHAMED (2005) estudou o sistema de controle da autoclave propondo um algoritmo que compensasse os efeitos de variação da temperatura arbitrária da autoclave na letalidade.....111

No enlatamento convencional durante a operação de esterilização o alimento já envasado é colocado em autoclaves ou pasteurizadores onde é realizado o tratamento térmico. Geralmente esse tratamento é constituído de duas etapas: aquecimento e resfriamento como mostrado na figura 2.1. 111



.....111

Em qualquer das etapas a transferência de calor entre o meio e o alimento encontra três resistências associadas em série. A primeira é representada pela transferência de calor entre o meio e a superfície do recipiente. Nos equipamentos comumente utilizados, o mecanismo de transferência de calor nesta primeira etapa é o de convecção. A segunda resistência é oferecida pela parede do recipiente. Neste caso, o mecanismo é o de condução. Finalmente calor é transferido entre a superfície interna do recipiente e o alimento na direção contrária ao gradiente de temperatura.....112

Neste último caso, o mecanismo pode ser de condução, convecção ou mesmo uma associação destes dois mecanismos. Uma vez que a resistência limitante é a interna, entre a superfície interna do recipiente e o alimento, o estudo da transferência de calor no enlatamento convencional se resume no estudo da transferência de calor no próprio alimento.....112

A bibliografia especializada é rica em trabalhos que apresentam equações empíricas para a previsão da temperatura em função do tempo no caso de alimentos enlatados através da técnica do enlatamento convencional. BALL (1923)

foi quem primeiro introduziu os parâmetros f e j das curvas de aquecimento e de resfriamento de alimentos enlatados e HAYAKAWA (1970), empregando os parâmetros definidos por BALL (1923), apresentou equações que permitem prever com boa precisão o histórico de temperatura para um alimento enlatado. 112

Também no caso de alimentos que se aquecem por condução, a literatura também apresenta um grande número de trabalhos publicados. Após os trabalhos de HAYAKAWA (1969), HAYAKAWA & BALL (1969), LEONHARDT (1976 e 1976a) é possível prever, com boa precisão, a temperatura em um ponto qualquer e a temperatura média de alimentos que se aquecem por condução em função do tempo, para recipientes cilíndricos e paralelepipédicos. 112

Considerando que o objetivo deste trabalho é sugerir técnicas de operação da autoclave, o modelo matemático a ser empregado baseia-se na equação básica da difusão do calor. Por este motivo ele será apresentado com detalhes. 112

A transferência de calor por condução em regime variável pode ser descrita matematicamente por meio da equação diferencial parcial da condução e das condições particulares de cada processo. Na ausência de fontes ou sorvedores internos de calor e para difusividade térmica uniforme ela pode ser escrita como segue 113

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad 2.1$$

.....113

A condições particulares de processo geralmente verificadas e que permitem resolver a equação 2.1 são:.....113

$$para \;\; t = 0 \qquad T = T_0 = f(x, y, z) \qquad 2.2$$ 113

$$na\ fronteira\ do\ corpo \qquad -k\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}\right) = h(T - T_f) \qquad 2.3$$ 113

Nas equações 2.1 a 2.3, *T* representa a temperatura do alimento em °C medida em um ponto de coordenadas *x*, *y*, *z* no tempo *t*, α a difusividade térmica do alimento (m^2/s), T_0 representa a temperatura inicial do alimento (°C), *k* a condutividade térmica do alimento (W/m.K) e *h* o coeficiente de transferência de calor entre o meio e o alimento ($W/m^2.K$). 113

Entende-se por placa plana infinita aquela cuja espessura é pequena quando comparada com sua largura e comprimento. Para essa geometria — ver figura 2.2

— é possível considerar transferência de calor unidimensional. Neste caso, a solução da equação 2.1 pode ser escrita como segue 113

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) \exp(-\lambda_i^2 Fo) \qquad 2.4$$

..... 114

Nesta equação, tem-se 114

$$A_i = \frac{2 sen\, \lambda_i}{\lambda_i + sen\, \lambda_i \cos \lambda_i} \qquad u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_o} \qquad X = \frac{x}{r_m} \qquad Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2}$$ 114

Sendo λ_i a raiz i-ésima positiva da equação $Bi \cot \lambda = \lambda$, com $Bi = \frac{h r_m}{k}$ 114

Para estes adimensionais, T representa a temperatura da placa no plano de medida (°C) no instante t (s); T_1 a temperatura do meio (°C); T_o a temperatura inicial da placa (°C); x a distância do plano de medida ao plano de simetria da placa (m); r_m a meia espessura da placa (m); α a difusividade térmica da placa (m^2/s); t o tempo (s); h o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o meio e a placa ($W/m^2.K$); k a condutividade térmica da placa (W/m.K)..... 114

O número de Biot ($Bi = \left({}^{h r_m}/_{k} \right)$) relaciona a resistência interna à transferência de calor com a resistência externa à transferência de calor. Para aqueles casos em que a resistência interna é limitante, o número de Biot tende a infinito. Ao contrário, para os casos em que a resistência externa é limitante, o número de Biot é igual a zero. Para a maioria dos tratamentos térmicos realizados na indústria de alimentos, especialmente aqueles realizados em autoclaves, é possível assumir Bi = ∞. 114

Desde que $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_i$ representam uma série de números crescentes, quanto maior for o valor de λ menor será o significado do termo da série correspondente. Assim, quanto maior o número de Fourier menor o significado dos últimos termos da série. ISACHENKO ET AL. (1977) mostraram que a série representada pela equação 2.4 converge rapidamente. Assim, para $Fo \geq 0{,}3$ a distribuição de temperatura pode ser calculada, com suficiente precisão, através de seu primeiro termo 115

$$u = A_1 \cos(\lambda_1 X) \exp(-\lambda_1^2 Fo) \qquad 2.5$$

..... 115

Cilindro infinito é aquele cujo comprimento é muito grande quando comparado com seu diâmetro. Para essa geometria — ver figura 2.3 —, o fluxo de calor também é unidimensional e a solução da equação pode ser escrita como segue 115

$$u = \sum_{j=1}^{\infty} A_j J_o(\beta_j R)\exp(-\beta_j^2 Fo) \qquad 2.6$$

.....115

Nesta equação, tem-se 115

$$u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} \qquad A_j = \frac{2Bi^2}{(Bi^2 + \beta_j^2)\beta_j J_1(\beta_j)} \qquad R = \frac{r}{r_m} \qquad Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2}$$ 116

Sendo β_j a raiz j-ésima positiva da equação $\beta J_1(\beta) = Bi J_0(\beta)$, com $Bi = \left(hr_m / k\right)$ 116

Nestes adimensionais, T representa a temperatura do cilindro no plano de medida (°C) no instante t(s); T_1 a temperatura do meio (°C); T_o a temperatura inicial do cilindro (°C); r a distância do ponto de medida ao eixo de simetria do cilindro (m); r_m o raio do cilindro (m); α a difusividade térmica do cilindro (m^2/s); t o tempo (s); h o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o meio e o cilindro ($W/m^2.K$); k a condutividade térmica do cilindro (W/m.K) e $J_n(x)$ a função de Bessel de primeira espécie e ordem n. 116

Como no caso da placa plana infinita, a série representada pela equação 2.6 também converge rapidamente. Com base nesse conhecimento, ISACHENKO ET AL. (l977) mostraram que para $Fo \geq 0{,}30$ a distribuição de temperatura de um cilindro infinito pode ser calculada com suficiente precisão por meio da equação 116

$$u = A_1 J_o(\beta_1 R)\exp(-\beta_1^2 Fo) \qquad 2.7$$

.....116

A solução da equação 2.1 para corpos de dimensões finitas baseia-se na regra de NEWMAN (1936), que consiste em estabelecer o perfil de temperatura para corpos finitos a partir da solução obtida para corpos infinitos. O método de Newman, também conhecido como regra da multiplicação, baseia-se no fato de que um corpo finito pode ser obtido pela interseção de dois ou mais corpos infinitos. No caso das condições de contorno para os corpos infinitos serem as mesmas verificadas para os corpos finitos, a solução para o corpo finito pode ser obtida multiplicando-se as soluções para os corpos infinitos. 116

O primeiro a destacar esta propriedade das equações obtidas para corpos infinitos foi NEWMAN (1936). Mais tarde, OLSON E SCHULTZ (1942) utilizaram esta propriedade para estabelecer as equações que permitem prever a temperatura em função do tempo para 12 corpos diferentes. Para um cilindro finito, LEONHARDT (1976), aplicando a regra da multiplicação às equações 2.4 e 2.6, obteve 116

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) A_j J_o(\beta_j R) \exp(-4\lambda_i^2 R_{ij} L) \qquad 2.8$$

.....117

Nesta equação, ...117

$$A_i = \frac{2 sen\,\lambda_i}{\lambda_i + sen\,\lambda_i \cos\lambda_i} \qquad A_j = \frac{2\,Bi^2}{(Bi^2 + \beta_j^2)\beta_j J_1(\beta_j)}$$ 117

$$R_{ij} = \frac{(d/l)^2 + (\beta_j/\lambda_i)^2}{(d/l)^2 + (\beta_1/\lambda_1)^2} \qquad L = \frac{\alpha t}{S} \qquad S = \frac{d^2}{(d/l)^2 + (\beta_1/\lambda_1)^2}$$ 117

Nestas equações, d representa o diâmetro interno do recipiente cilíndrico (m) e l sua altura interna (m). 117

LEONHARDT (l976) mostrou ainda que a equação 2.8 deve ser empregada quando $0{,}25 \le (d/l) \le 4{,}00$. Para *(d/l)* < 0,25 o corpo pode ser considerado um cilindro infinito e a equação 2.6 deve ser empregada. Para *(d/l)* > 4,0 o comportamento é o de uma placa plana infinita e a equação 2.4 é que deve ser usada. 117

A equação 2.8 permite calcular a distribuição de temperatura para o cilindro finito de dimensões d e l qualquer que seja o valor de Biot. Admitindo $Bi = \infty$ a temperatura no ponto central de um cilindro finito pode ser avaliada por meio da equação 117

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} \frac{4\,\mathrm{sen}\,\lambda_i}{\lambda_i \beta_j J_1(\beta_j)} \exp(-4\lambda_i^2 R_{ij} L) \qquad 2.9$$

.....117

Para essa equação 117

$$R_{ij} = \frac{(d/l)^2 + (\beta_j/\lambda_i)^2}{(d/l)^2 + 2{,}344} \qquad S = \frac{d^2}{(d/l)^2 + 2{,}344}$$ 117

Considerando que a série representada pela equação 2.9 é convergente, LEONHARDT (1976) demonstrou ainda que quando $L \ge 0{,}25$ somente o primeiro termo da equação 2.9 deve ser usado, resultando 118

$$u = 2{,}040 \exp(-\pi^2 L) \qquad 2.10$$

.....118

Considerando um paralelepípedo de dimensão *a, b* e *c* e aplicando a regra da multiplicação à equação 2.4, LEONHARDT (l976) propôs como solução a equação 118

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} A_i \cos(2\lambda_{ai}\frac{x}{a}) A_j \cos(2\lambda_{bj}\frac{y}{b}) A_k \cos(2\lambda_{ck}\frac{z}{c}) \exp(-4R_{ijk}L) \quad 2.11$$

.....118

Nesta equação,.....118

$$A_i = \frac{2sen\lambda_{ai}}{\lambda_{ai} + sen\lambda_{ai}\cos\lambda_{ai}} \qquad A_j = \frac{2sen\lambda_{bj}}{\lambda_{bj} + sen\lambda_{bj}\cos\lambda_{bj}}$$ 118

$$A_k = \frac{2sen\lambda_{ck}}{\lambda_{ck} + sen\lambda_{ck}\cos\lambda_{ck}} \qquad R_{ijk} = \frac{\lambda_{a1}{}^2 b^2c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2b^2}{\lambda_{ai}{}^2 b^2c^2 + \lambda_{bj}{}^2 a^2c^2 + \lambda_{ck}{}^2 a^2b^2}$$ 118

$$L = \frac{\alpha\theta}{S} \qquad S = \frac{a^2b^2c^2}{\lambda_{a1}{}^2 b^2c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2b^2}$$ 118

A equação 2.11 permite calcular a distribuição de temperatura para o paralelepípedo finito qualquer que seja o valor do número de Biot. Admitindo $Bi = \infty$, a temperatura central de um paralelepípedo finito pode ser calculada por meio da equação 118

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\,\mathrm{sen}\,\lambda_{ai}\, 2\,\mathrm{sen}\,\lambda_{bj}\, 2\,\mathrm{sen}\,\lambda_{ck}}{\lambda_{ai}\lambda_{bj}\lambda_{ck}} \exp(-\pi^2 R_{ijk}L) \quad 2.12$$

.....118

Para essa equação 118

$$S = \frac{a^2b^2c^2}{a^2b^2 + a^2c^2 + b^2c^2}$$ 118

Como no caso do cilindro finito, LEONHARDT (1976) mostrou que para $L \geq 0{,}25$ somente o primeiro termo da equação deve ser usado, resultando.....119

$$u = \frac{64}{\pi^3}\exp(-\pi^2 L) \quad 2.13$$

.....119

Uma análise das soluções obtidas para as diferentes geometrias até aqui estudadas mostra que elas possuem uma mesma forma estrutural, podendo ser representadas por meio da equação 119

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n exp(-C_n t) \quad 2.14$$

.....119

Nesta equação, A_n representa o coeficiente constante de cada termo da série que depende do formato do corpo e do número de Biot. O parâmetro B_n é função do formato do corpo, das ordenadas do ponto de medida considerado e do número

de Biot. Já a constante C_n depende do formato e das propriedades físicas do corpo considerado, do seu tamanho e do número de Biot. Definida desta forma, a equação 2.14 pode ser adotada como a equação geral para a determinação da distribuição de temperatura com o tempo para um corpo qualquer. 119

Uma vez que a série representada pela equação 2.14 é convergente, para $t > t_L$ — $Fo \geq 0{,}30$ no caso de corpos infinitos ou $L \geq 0{,}25$ no caso de corpos finitos — é possível empregar apenas o primeiro termo da série, ou seja.....119

$$u = A_1 B_1 \exp(-C_1 t) \qquad 2.15$$

.....119

Tomando logaritmo em ambos os membros da equação 2.15 é possível escrever 119

$$\ln u = \ln(A_1 B_1) - C_1 t \qquad 2.16$$

.....119

A equação 2.16 mostra que para $t > t_L$ o logaritmo natural do adimensional de temperatura varia linearmente com o tempo, qualquer que seja o ponto de medida considerado. Se prolongarmos o processo para $t \rightarrow \infty$ todos os pontos do corpo atingem a temperatura T_f e o regime estacionário é estabelecido.....119

Com base nessas equações, o processo de aquecimento ou resfriamento de um corpo pode ser dividido em três estágios. O primeiro estágio, também conhecido como período desordenado, é caracterizado por ser influenciado pela distribuição inicial de temperatura e a relação entre o adimensional de temperatura (u) e o tempo (t) é dada pela equação 2.14 levando-se em consideração todos os termos da série. O segundo estágio é denominado de período regular de aquecimento ou resfriamento e a relação entre u e t é dada pela equação 2.15. O terceiro estágio corresponde ao estado estacionário e a temperatura de todos os pontos do corpo é igual à temperatura do meio de aquecimento ou resfriamento, ou seja, no terceiro estágio o corpo está em equilíbrio térmico com o meio. 120

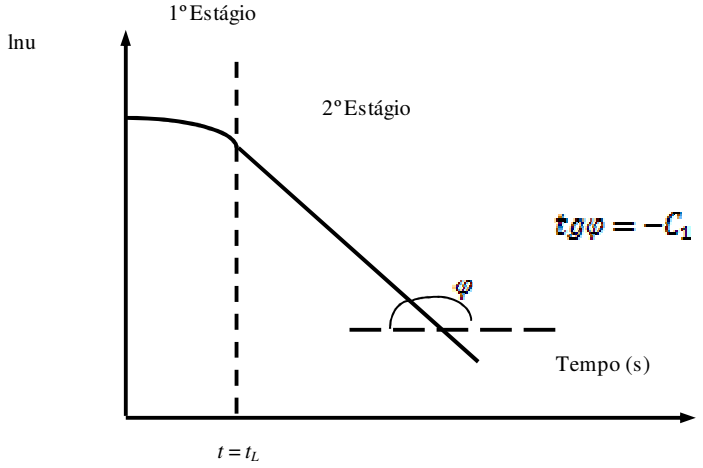
Diferenciando ambos os membros da equação 2,16 em relação ao tempo, resulta 120

$$\frac{1}{u} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -C_1 \qquad 2.17$$

.....120

A equação 2.17 mostra que a velocidade específica de aquecimento ou resfriamento de um corpo (C_1) independe do tempo e da ordenada do ponto considerado. Desde que C_1 é função das propriedades físicas, formato e dimensão

do corpo, bem como das condições em que o processo ocorre na interface corpo meio considerado — número de Biot —, a velocidade específica de aquecimento ou de resfriamento dependerá apenas destes parâmetros. 120
Se a variação do adimensional de temperatura com o tempo é determinada experimentalmente e os resultados são representados em um gráfico semelhante ao da figura 2.4, a velocidade específica de aquecimento ou de resfriamento pode ser calculada através da inclinação do trecho retilíneo obtido no segundo estágio. O valor da velocidade específica de aquecimento ou de resfriamento assim obtida pode ser empregado para determinar a difusividade térmica do corpo considerado..... 120
Comparando a equação 2.15 com a equação 2.4 é possível escrever 120



..... 121
$C_1 t = \lambda_1^2 Fo$ 121
Ou ainda 121

$$\alpha = \frac{r_m^2}{\lambda_1^2} C_1 \qquad 2.18$$

..... 121
A equação 2.18 permite calcular a difusividade térmica de uma placa plana infinita homogênea e isotrópica. De maneira análoga, a difusividade térmica de um cilindro infinito homogêneo e isotrópico será dada por 121

$$\alpha = \frac{r_m^2}{\beta_1^2} C_1 \qquad 2.19$$

..... 121

Admitindo *Bi* = ∞, a difusividade térmica de um cilindro ou de um paralelepípedo finito, comparando as equações 2.10 e 2.13 com a equação 2.15, pode ser determinada através da equação 121

$$\alpha = \frac{S}{\pi^2} C_1 \qquad 2.20$$

.....121

Nesta equação, S representa o fator de forma do cilindro ou paralelepípedo finito, definido por ocasião da apresentação das equações para essas geometrias. Com base na equação 2.20, LEONHARDT E DUSSE (l975), propuseram que a difusividade térmica de alimentos enlatados fosse determinada através da equação.....122

$$\alpha = \frac{2{,}303S}{\pi^2 f_h} \qquad 2.21$$

.....122

Nesta equação, f_h representa o índice de declive da curva de aquecimento do alimento considerado e *S* o fator de forma do recipiente empregado. A utilização da equação só é possível se Bi = ∞. Para que esta condição seja válida é necessário que o tratamento térmico seja realizado em autoclave.....122

No enlatamento convencional durante a operação de esterilização, o alimento já envasado é colocado em autoclaves ou pasteurizadores onde é realizado o tratamento térmico. Geralmente esse tratamento é constituído de duas etapas: aquecimento e resfriamento, como mostrado na figura 2.1. No aquecimento, a condição de distribuição uniforme de temperatura no instante inicial geralmente prevalece e a maioria dos autores é unânime em adotar distribuição uniforme de temperatura no interior do recipiente para o instante inicial *t = 0*. Já no resfriamento, se a autoclave ou o pasteurizador não é dotado de sistema de agitação dos recipientes, a hipótese de distribuição inicial de temperatura uniforme não é verdadeira. Dessa forma, não é possível o emprego das equações apresentadas anteriormente.....122

Em alguns casos, a temperatura do meio pode variar como na figura 2.5. BALL E OLSON (1957) classificaram este tipo de tratamento térmico como sendo um processo dividido. Neste caso, para $t = t_q$ a temperatura inicial do alimento não é uniforme, ou seja, no instante $t = t_{q-1}$ não se tem distribuição uniforme de temperatura.....122

A solução da equação 2.1 quando não temos distribuição uniforme de temperatura não é simples. Para um cilindro infinito, CARSLAW E JAEGER (1959), admitindo $Bi = \infty$, mostraram que a previsão da temperatura em função do tempo, quando a condição de distribuição uniforme de temperatura não é verificada, pode ser estimada por meio da equação 122

$$T_1 - T = \frac{2}{r_m^{\,2}} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_j R)}{J_1^2(\beta_j)} \exp(-\beta_j^{\,2} Fo) \int_0^{r_m} r f(r) J_0(\beta_j R) dr \qquad 2.22$$

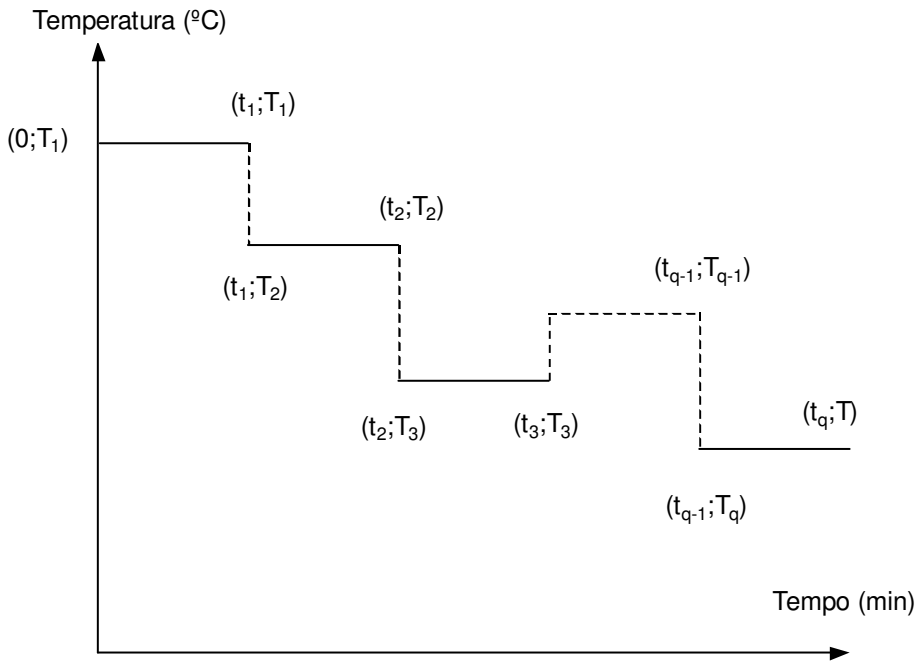
.....123

Nesta equação, *f(r)* representa uma função de *r* que fornece a distribuição inicial de temperatura.....123

A integral contida na equação 2.22 deve ser avaliada graficamente, tornando trabalhoso seu emprego. No caso da figura 2.5, HAYAKAWA E BALL (1969) mostraram que é possível prever, com boa precisão, a temperatura (*T*) para $t = t_q$. Para tanto é necessário aplicar o teorema de Duhamel — CARSLAW E JAEGER (1959) — às equações desenvolvidas para a condição de distribuição uniforme de temperatura. A aplicação deste teorema às equações 2.4, 2,6, 2.8 e 2.11 fornece 123

$$T = T_q + \sum_{i=1}^{q-1} (T_i - T_0) u(L - L_i) - \sum_{i=1}^{q} (T_i - T_0) u(L - L_{i-1}) \qquad 2.23$$

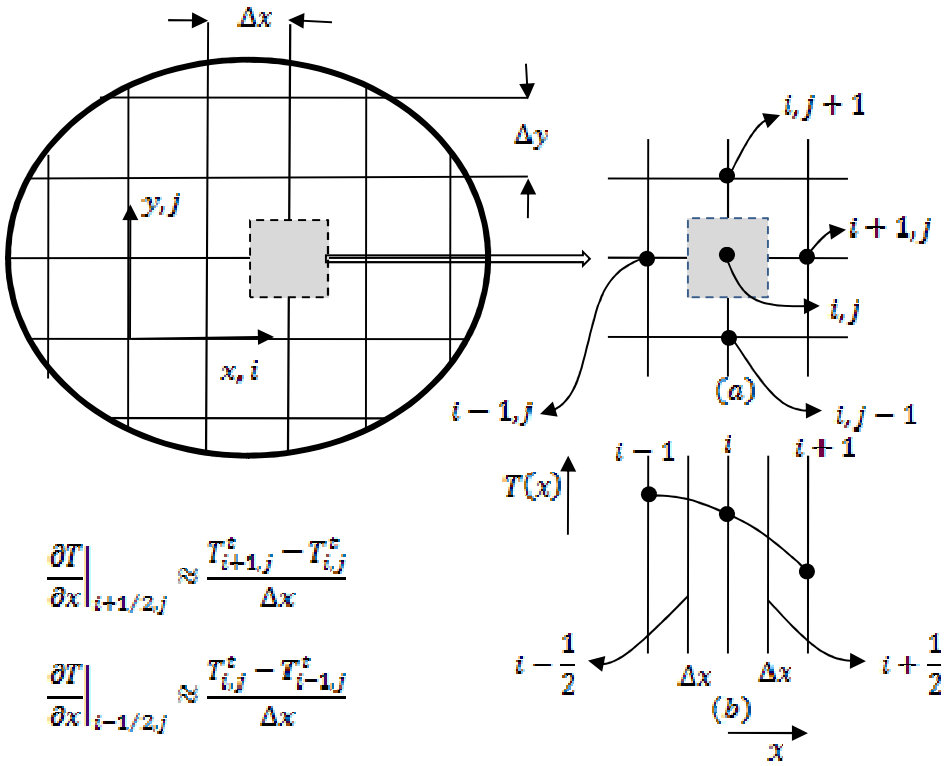
.....123



.....123

Os mecanismos de transferência de calor predominantes no processo de esterilização de alimentos enlatados em autoclaves pressurizadas são a condução

e a convecção. A radiação de calor assume papel meramente secundário, podendo ser descartada. Entretanto, modelos construídos apenas considerando aquecimento condutivo alcançam desempenhos comparáveis àqueles modelos que fazem uso dos dois mecanismos predominantes de transferência de calor, porém com equações — e conseqüentemente implementações — significativamente mais simples (LAROUSSE E BROWN, 1997). 124
Com base neste princípio, a variação da temperatura com o tempo e a posição em um recipiente paralelepipédico pode ser representada pela equação 2.1. 124
De acordo com o discutido na seção anterior, métodos analíticos podem ser utilizados, em certos casos, para efetuar soluções matemáticas exatas para problemas de transferência de calor por condução bidimensional ou mesmo tridimensional em regime variável. No entanto, dependendo da situação é possível encontrar problemas de transferência de calor por condução que não se encaixam nas soluções apresentadas. Nesses casos, com o desenvolvimento dos computadores pessoais, a melhor solução é frequentemente a que emprega a técnica numérica tal como *diferenças finitas*, *elementos finitos* ou método de *elementos de contorno* (INCROPERA E DEWITT, 2003). 124
Ao contrário da solução analítica, que permite determinar a temperatura para qualquer ponto, a solução numérica permite a solução apenas para pontos discretos do sistema considerado. Assim, a primeira providência deve ser a escolha desses pontos. A figura 2.6 mostra como um volume de controle qualquer pode ser subdividido em um número de pequenas regiões que são identificadas com um ponto de referência, freqüentemente denominado *ponto nodal*. O conjunto de pontos recebe o nome de rede nodal, ou simplesmente rede ou malha. 124
Os pontos nodais são designados por um sistema de numeração que, para transferência de calor bidimensional, pode ter a forma mostrada na figura 2.6a. Neste caso, as coordenadas x, y foram designadas pelas letras i e j 125
Cada nó representa uma região e sua temperatura é uma medida da temperatura média da região. Assim por exemplo, a temperatura do nó i,j da figura 2.6a pode ser interpretada como sendo a temperatura média da área vizinha sombreada. . 125
A escolha dos pontos nodais depende de questões como: conveniência geométrica e precisão. Quanto maior o número de nós maior a precisão. 125



$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{i+1/2,j} \approx \frac{T^{t}_{i+1,j} - T^{t}_{i,j}}{\Delta x}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{i-1/2,j} \approx \frac{T^{t}_{i,j} - T^{t}_{i-1,j}}{\Delta x}$$

.....125

A determinação numérica da distribuição de temperatura exige que uma forma apropriada da equação 2.1 seja escrita para cada um dos pontos nodais em que a temperatura é desconhecida. 126

Para a derivada parcial em relação ao tempo, a aproximação das diferenças finitas para o nó i, j, k pode ser representada por meio da equação 126

$$\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T^{t+\Delta t}_{i,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta t} \qquad 2.24$$

.....126

O índice $t + \Delta t$ é empregado para mostrar que a temperatura no nó i, j, k é função do tempo e a derivada em relação ao tempo corresponde à diferença de temperatura entre o tempo *futuro* $t + \Delta t$ e o tempo *anterior* t 126

As *diferenças centrais* $\left({[(\partial]^2 T)}/{\partial x^2}, \; {\partial^2 T}/{\partial y^2} \; e \; {\partial^2 T}/{\partial z^2} \right)$ podem ser aproximadas como segue. Considere a derivada segunda ${\partial^2 T}/{\partial x^2}$. A partir da figura 2.6b, o valor desta derivada no nó i, j, k pode ser aproximado por 126

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right|_{i+1/2,j,k} \approx \frac{{\partial T}/{\partial x}\big|_{i+1/2,j,k} - {\partial T}/{\partial x}\big|_{i-1/2,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.25$$

...126

Os gradientes de temperatura, como mostrado na figura 2.6, podem ser representados por 126

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{i+1/2,j,k} \approx \frac{T^{t}_{i+1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.26$$
..... 126

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{i-1/2,j,k} \approx \frac{T^{t}_{i,j,k} - T^{t}_{i-1,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.27$$
..... 126

Substituindo as equações 2.26 e 2.27 na equação 2.25, resulta..... 126

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T^{t}_{i+1,j,k} + T^{t}_{i-1,j,k} - 2T^{t}_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} \qquad 2.28$$
..... 127

De maneira similar é possível mostrar que 127

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T^{t}_{i,j+1,k} + T^{t}_{i,j-1,k} - 2T^{t}_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} \qquad 2.29$$
..... 127

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T^{t}_{mi,j,k+1} + T^{t}_{i,j,k-1} - 2T^{t}_{i,j,k}}{(\Delta z)^2} \qquad 2.30$$
..... 127

Substituindo as equações 2.24, a 2.30 na equação 2.1, resulta 127

$$\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{T^{t+\Delta t}_{i,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta t} = \frac{T^{t}_{i+1,j,k} + T^{t}_{i-1,j,k} - 2T^{t}_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} + \frac{T^{t}_{i,j+1,k} + T^{t}_{i,j-1,k} - 2T^{t}_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} +$$
..... 127

$$+\frac{T^{t}_{m+1,n} + T^{t}_{m-1,n} - 2T^{t}_{m,n}}{(\Delta z)^2} \qquad 2.31$$
127

Resolvendo para a temperatura nodal no tempo futuro $t+\Delta t$ e considerando que $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, tem-se..... 127

$$T^{t+\Delta t}_{i,j,k} = Fo\left(T^{t}_{i+1,j,k} + T^{t}_{i-1,j,k} + T^{t}_{i,j+1,k} + T^{t}_{i,j-1,k} + T^{t}_{i,j,k+1} + T^{t}_{i,j,k-1}\right) + (1 - 6Fo)T^{t}_{i,j,k} \qquad 2.32$$
..... 127

Nesta equação, Fo representa o número de Fourier expresso em termos de diferenças finitas 127

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \qquad 2.33$$
.. 127

A equação 2.32 pode ser empregada para determinar a temperatura no tempo $t+\Delta t$ em qualquer nó de um recipiente retangular de dimensões a, b, c. Como condição inicial, admite-se que a temperatura de cada nó é uniforme em todo o recipiente. Como condição de contorno, para tratamentos térmicos realizados em autoclave, admite-se que a temperatura da superfície do recipiente é igual à temperatura do meio de aquecimento ou de resfriamento..... 127

MANSON ET AL. (1970), empregaram a equação 2.32 para avaliar a letalidade e a retenção de nutrientes para alimentos esterilizados em recipientes retangulares... 128

PINHO (2004), empregando a técnica de elementos finitos, elaborou modelo matemático para a previsão da temperatura de alimento infantil em recipientes de vidro. 128

Para sistemas bidimensionais em x, y a equação resultante tem a forma 128

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = Fo\left(T_{i+1,j}^{t} + T_{i-1,j}^{t} + T_{i,j+1}^{t} + T_{i,j-1}^{t}\right) + (1 - 4Fo)T_{i,j}^{t} \qquad 2.34$$

..... 128

Se o sistema é unidimensional em x para um nó interno i se reduz a..... 128

$$T_{i}^{t+\Delta t} = Fo\left(T_{i+1}^{t} + T_{i-1}^{t}\right) + (1 - 4Fo)T_{i}^{t} \qquad 2.35$$

..... 128

Para um recipiente cilíndrico em que existe simetria axial, a equação 2.1 toma a forma..... 128

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad 2.36$$

.. 128

Nesta equação, T representa a temperatura (°C), t o tempo (s), r a distância radial (m) e y a distância vertical (m). 128

Como no caso do recipiente retangular, cada uma das derivadas parciais da equação 2.36 pode ser aproximada pelas diferenças finitas para o nó i,j 128

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta t} \qquad 2.37$$

128

$$\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r} \approx \frac{1}{r}\cdot\frac{T_{i-1,j}^{t} - T_{i+1,j}^{t}}{2\Delta r} \qquad 2.38$$

128

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{i-1,j}^{t} + T_{i+1,j}^{t} - 2T_{i,j}^{t}}{(\Delta r)^2} \qquad 2.39$$

129

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i,j-1}^{t} + T_{i,j+1}^{t} - 2T_{i,j}^{t}}{(\Delta y)^2} \qquad 2.40$$

129

Substituindo as equações 2.37a 2.40 na equação 2.36, resulta 129

$$\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^{t} - T_{i+1,j}^{t}}{2r\Delta r} + \frac{T_{i+1,j}^{t} + T_{i-1,j}^{t} - 2T_{i,j}^{t}}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{t} + T_{i,j-1}^{t} - 2T_{i,j}^{t}}{(\Delta y)^2} \qquad 2.41$$

..... 129

Resolvendo essa última equação para a temperatura nodal no tempo futuro, tem-se 129

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = T_{i,j}^{t} + \frac{\alpha\Delta t}{2r\Delta r}\left(T_{i-1,j}^{t} - T_{i+1,j}^{t}\right) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2}\left(T_{i-1,j}^{t} + T_{i+1,j}^{t} - 2T_{i,j}^{t}\right) +$$

..... 129

$$+\frac{\alpha\Delta t}{(\Delta y)^2}\left(T_{i,j-1}^{t} + T_{1,j+1}^{t} - 2T_{i,j}^{t}\right) \qquad 2.42$$

129

Nesta equação, $T_{i,j}^{t+\Delta t}$ representa a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente cilíndrico no instante $t+\Delta t$ (s), $T_{i,j}^{t}$ a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente no tempo t (s), Δr a diferença finita na direção radial (m), Δy a diferença finita na direção vertical (m) e α a difusividade térmica do alimento (m^2/s). 129

No caso da equação 2.42, devido à presença do grupo adimensional $\left({}^{\alpha\Delta t}/_{2r\Delta r}\right)$ não é possível definir um único grupo de Fourier. Como no caso do recipiente paralelepipédico, a equação 2.42 pode ser empregada para determinar a temperatura no tempo $t+\Delta t$ em qualquer nó de um recipiente cilíndrico de dimensões d,h. Como condição inicial, admite-se que a temperatura de cada nó é uniforme em todo o recipiente. Como condição de contorno, para tratamentos térmicos realizados em autoclave, admite-se que a temperatura da superfície do recipiente é igual à temperatura do meio de aquecimento ou de resfriamento. 129

TEIXEIRA ET AL (1969) e RODRIGUES ET AL (1998) empregaram a equação 2.42 para prever a temperatura em função do tempo e da posição durante o processo de esterilização de alimentos embalados em recipientes cilíndricos. 130

Considerando que a equação 2.1 representa o balanço diferencial de energia para aquelas situações em que as formas de energia mecânica podem ser desprezadas em relação ao calor, o meio encontra-se parado — não há o transporte convectivo — e não há geração interna de calor, é possível obter a equação que permite calcular a distribuição de temperatura em função do tempo e da posição, a partir de um balanço de energia para um nó genérico da rede nodal. Para realizar o balanço de energia para um corpo retangular, seja o volume de controle representado na figura 2.7. 130

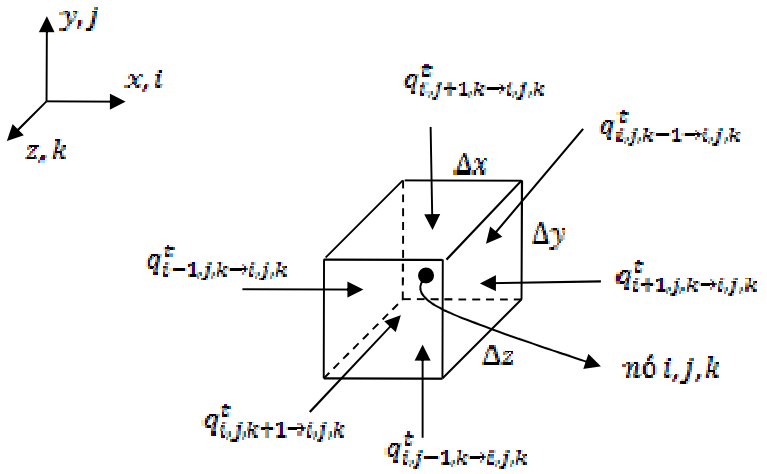
Uma vez que o sentido real do fluxo de calor é desconhecido, será adotado o sentido indicado na figura 2.7, ou seja, o nó interno está recebendo calor dos nós adjacentes. Considerando que o regime é variável, a equação do balanço de energia pode ser escrita como segue 130

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{ac} \qquad 2.43$$ .130

A taxa de acúmulo de energia pode ser calculada com base na variação da energia interna do volume de controle representado pelo nó i,j,k 130

$$\dot{E}_{ac} = \rho C_p \Delta x \Delta y \Delta z \frac{T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^{t}}{\Delta T} \qquad 2.44$$

130



.....131

Já a taxa de energia que entra no volume de controle representado pelo nó i, j, k corresponde à somatória das taxas de energia transferida entre o nó e os nós adjacentes. Considerando que o mecanismo é o de condução do calor, a taxa de energia transferida do nó $i-1, j, k$ para o nó i, j, k será 131

$$\dot{Q}^{t}_{i-1,j,k\to 1,j,k} = k\Delta y\Delta z\frac{T^{t}_{i-1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.45$$

.....131

Nesta equação, k representa a condutividade térmica do material (W/m.k), $\Delta y\Delta z$ a área de transferência de calor existente entre os nós considerados (m²), e a expressão $\left(\left(T^{t}_{i-1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}\right)/\Delta x\right)$ a aproximação por diferenças finitas do gradiente de temperatura na fronteira entre os dois nós (K/m).....131

Analogamente é possível escrever as taxas de energia transferidas por condução restantes 131

$$\dot{Q}^{t}_{i+1,j,k\to 1,j,k} = k\Delta y\Delta z\frac{T^{t}_{i+1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.46$$

.....131

$$\dot{Q}^{t}_{i,j-1,k\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta z\frac{T^{t}_{i,j-1,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta y} \qquad 2.47$$

.....131

$$\dot{Q}^{t}_{i,j+1,k\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta z\frac{T^{t}_{i,j+1,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta y} \qquad 2.48$$

.....132

$$\dot{Q}^{t}_{i,j,k-1\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta y\frac{T^{t}_{i,j,k-1} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta z} \qquad 2.49$$

.....132

$$\dot{Q}^{t}_{i,j,k+1\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta y\frac{T^{t}_{i,j,k+1} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta z} \qquad 2.50$$

.....132

Substituindo as equações 2.44 a 2.50 na equação 2.43 e fazendo $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, resulta.....132

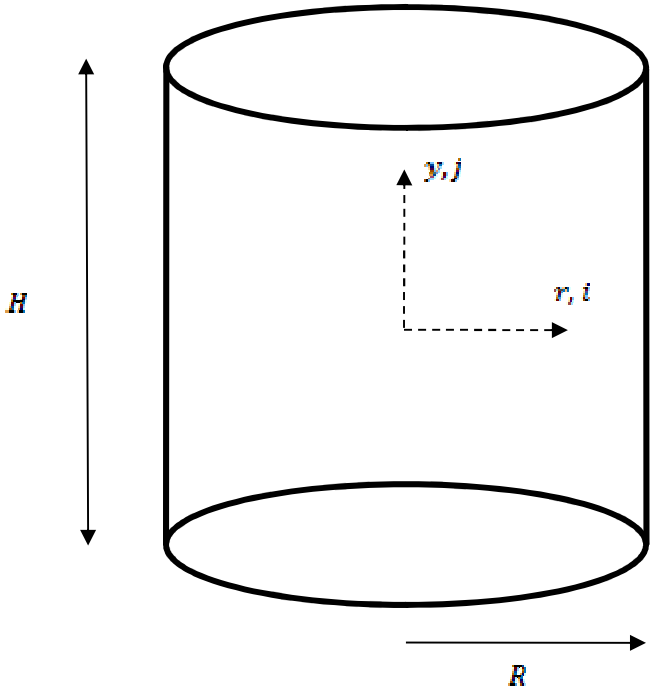
$$\rho C_p \Delta x^3 \frac{T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{1,j,k}^{t}}{\Delta t} = k\Delta x \left(T_{i+1,j,k}^{t} + T_{i-1,j,k}^{t} + T_{i,j+1,k}^{t} + T_{i,j-1,k}^{t} + T_{i,j,k+1}^{t} + T_{i,j,k-1}^{t} - 6T_{1,j,k}^{t}\right)$$

.....132

Resolvendo esta equação para a temperatura nodal no tempo futuro e lembrando que $\alpha = {}^{k}/_{\rho C_p}$, tem-se como resultado a equação 2.32. 132

Seja o recipiente cilíndrico mostrado na figura 2.8. Uma vez que há simetria axial, o balanço diferencial de energia para aquelas situações em que as formas de energia mecânica podem ser desprezadas em relação ao calor, o meio encontra-se parado e não há geração interna de calor, é representado pela equação 2.36. 132

Para estabelecer a equação que represente a equação 2.36 em termos de diferenças finitas, a partir de um balanço de energia, é necessário estabelecer o volume de controle. Considerando que há simetria axial foi selecionado o volume de controle mostrado na figura 2.9. Nesta figura também estão representados os fluxos de transferência de calor por condução que o nó i,j recebe dos nós adjacentes. Como no caso da figura 2.8, uma vez que o sentido real do fluxo de calor é desconhecido, será adotado o sentido indicado na figura 2.9, em que o fluxo interno recebe calor dos fluxos adjacentes.....132



.....133

Considerando regime variável é possível adotar, para o volume de controle representado na figura 2.9, a equação 2.43 do balanço de energia. Nesta equação, a taxa de acúmulo de energia pode ser calculada com base na variação da energia interna do volume de controle representado pelo nó i, j, k ..133

$$\dot{E}_{ac} = \rho C_p(\Delta r)(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^{t}}{\Delta T} \qquad 2.51$$

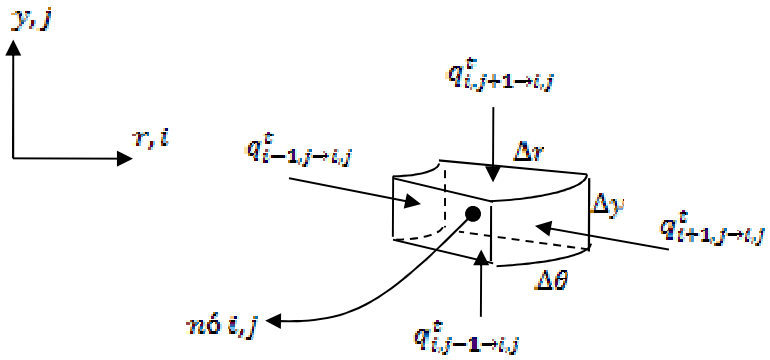
.....133

Como no caso da figura 2.7, a taxa de energia que entra no volume de controle corresponde à somatória das taxas de energia transferidas entre o nó i, j, k e os nós adjacentes. Considerando o mecanismo de condução, a taxa de energia transferida do nó $i-1, j$ para o nó i, j será 133

$$\dot{Q}_{i-1,j\to i,j}^{t} = k(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i-1,j}^{t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta r} \qquad 2.52$$ 133

Nesta equação, k representa a condutividade térmica do material (W/m.k), $(r\Delta\theta)(\Delta y)$ a área de transferência de calor existente entre os nós considerados (m²), e a expressão $\left(\left(T_{i-1,j,k}^{t} - T_{i,j,k}^{t}\right)/\Delta r\right)$ a aproximação por diferenças finitas do gradiente de temperatura na fronteira entre os dois nós (K/m). 133

Analogamente é possível escrever as taxas de energia transferidas por condução restantes 134



.....134

$$\dot{Q}_{i+1,j\to i,j}^{t} = k((r+\Delta r)\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i+1,j}^{t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta r} \qquad 2.53$$ 134

$$\dot{Q}_{i,j-1\to i,j}^{t} = k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T_{i,j-1}^{t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta y} \qquad 2.54$$

.....134

$$\dot{Q}_{i,j+1\to i,j}^{t} = k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T_{i,j+1}^{t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta y} \qquad 2.55$$ 134

Substituindo as equações 2.51 a 2.55 na equação 2.43, resulta 134

$$\rho C_p(\Delta r)(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i,j,k}^{t+\Delta t}-T_{i,j,k}^{t}}{\Delta T}=k(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i-1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta r}+k((r+\Delta r)\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i+1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta r}+$$ 134

$$+k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T_{i,j-1}^{t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta y}+k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T_{i,j+1}^{t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta y}$$ 134

Lembrando que $\alpha = k/\rho C_p$, esta última equação toma a forma 134

$$T_{i,j,k}^{t+\Delta t}-T_{i,j,k}^{t}=\frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\left(T_{i-1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+\frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\left(T_{i+1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+\frac{\alpha\Delta T}{r\Delta r}\left(T_{i+1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+$$ 135

$$+\frac{\alpha\Delta T}{\Delta y^2}\left(T_{i,j-1}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+\frac{\alpha\Delta T}{\Delta y^2}\left(T_{i,j+1}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)$$ 135

Fazendo, com base na figura 2.6,..... 135

$$\frac{T_{i+1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta r}=\frac{T_{i-1,j}^{t}-T_{i+1,j}^{t}}{2\Delta r}$$ 135

Esta última equação pode ser escrita na forma da equação 2.42. 135

Ao aplicar o método do balanço de energia verifica-se que cada nó da rede nodal está associado a uma capacitância térmica $C_{i,j}$. Além disso, cada nó recebe dos nós adjacentes uma taxa de energia representada por uma equação do tipo..... 135

$$\dot{Q}_{i,j}=K_{i,j}\left(\sum_{i=1}^{m}T_{i,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+K_{i,j}\left(\sum_{j=1}^{n}T_{i,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right) \qquad 2.56$$

..... 135

Nesta equação, $\dot{Q}_{i,j}$ representa a taxa de transferência de calor para o nó i,j (W), $K_{i,j}$ a condutância térmica (W/K) entre o nó i,j e o nós adjacentes e $T_{i,j}^{t}$ a temperatura (°C) uniforme do nó i,j no tempo t (s)..... 135

A condutância térmica $K_{i,j}$ representa o grau de facilidade com que o calor é transferido entre o nó i,j e os nós adjacentes. Dependendo da geometria as condutâncias podem variar ou permanecer constantes..... 135

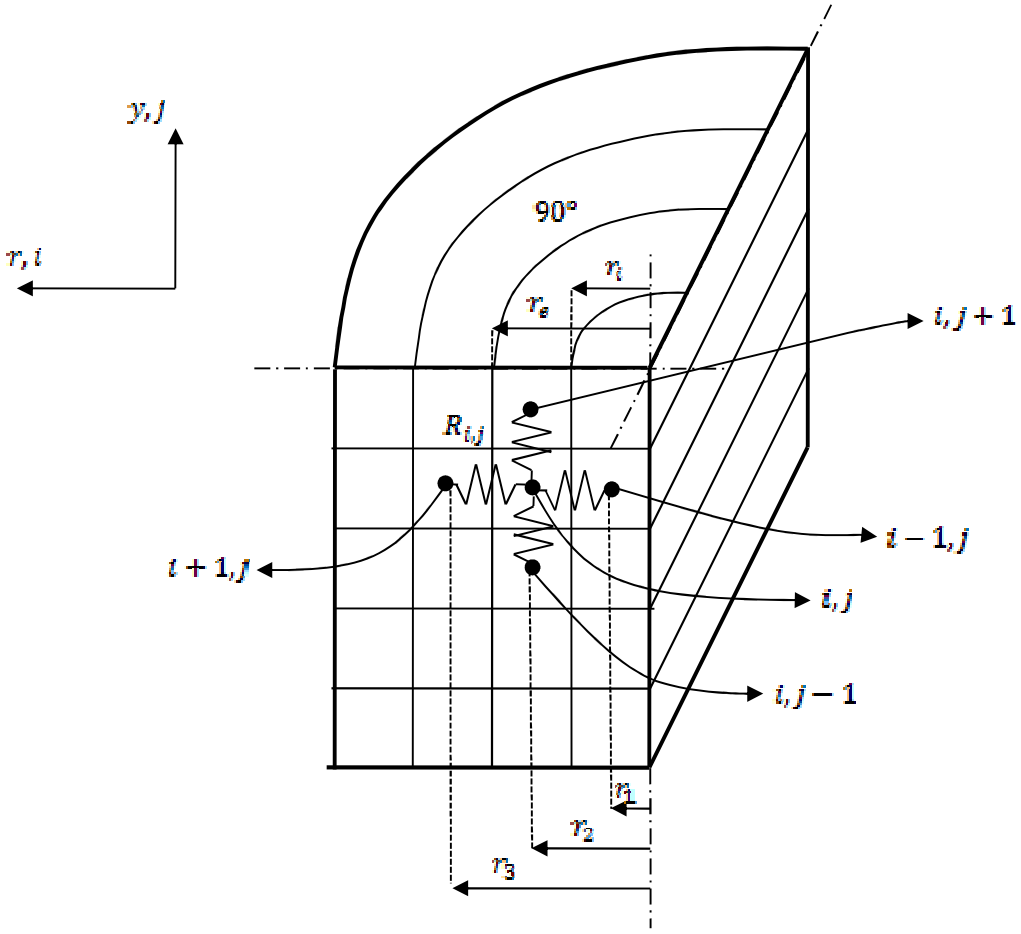
Para descrever um sistema térmico é necessário instalar uma malha de capacitâncias e de taxas de transferência de calor que conduza a um sistema de equações algébricas em que cada nó da rede é representado por uma equação do tipo 135

$$C_{i,j}\frac{T_{i,j}^{t+\Delta t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta t}=K_{i,j}\left(\sum_{i=1}^{m}T_{i,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+K_{i,j}\left(\sum_{j=1}^{n}T_{i,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right) \qquad 2.57$$

..... 135

Para aplicar esta equação para o cilindro finito representado na figura 2.8 é necessário estabelecer a rede nodal. Admitindo que as condições de contorno no recipiente cilíndrico sejam as mesmas e considerando a existência de simetria axial

é possível conceber a rede de nós para um quarto do recipiente, constituído por um setor circular de 90° e metade da altura, como mostrado na figura 2.10. 136
Assim constituído, a malha de nós permite que o nó i,j troque energia com o conjunto de nós imediatamente vizinhos. O calor trocado entre o nó i,j e seus adjacentes resulta em uma malha de conexões, geralmente representada por condutâncias térmicas $K_{i,j}$, que correspondem ao inverso das resistências $R_{i,j}$ representadas na figura 2.10. 136



..... 136
Aplicando a equação 2.57 ao nó i,j da figura 2.10, resulta..... 137

$$C_{i,j}\frac{T_{i,j}^{t+\Delta t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta t}=K_{i-1,j}\left(T_{i-1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+K_{i+1,j}\left(T_{i+1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+K_{i,j-1}\left(T_{i,j-1}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+$$

..... 137

$$+K_{i,j+1}\left(T_{i,j+1}^{t}-T_{i,j}^{t}\right) \qquad 2.58$$

137
Sendo..... 137

$$K_{i-1,j}=\frac{\pi k\Delta y}{\frac{2\ln r_2}{r_1}} \qquad K_{i+1,j}=\frac{\pi k\Delta y}{\frac{2\ln r_3}{r_2}} \qquad K_{i,j-1}=K_{i,j+1}=\frac{\pi k\left(r_e{}^2-r_i{}^2\right)}{4\Delta y}$$

..... 137

$$C_{i,j}=\rho C_p\frac{\pi(r_e{}^2-r_i{}^2)\Delta y}{4}$$

..... 137

Nestas equações, $T_{i,j}^{t+\Delta t}$ representa a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente cilíndrico no instante futuro $t+\Delta t$ (s), $T_{i,j}^{t}$ a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente cilíndrico no instante anterior t (s), Δt a diferença finita no tempo (s), $K_{i,j}$ as condutâncias térmicas entre o nó i,j e os nós adjacentes (W/K), $C_{i,j}$ a capacitância térmica do nó i,j (J/K), k a condutividade térmica do alimento (W/m.K), ρ a massa específica do alimento (kg/m³), C_p o calor específico do alimento (J/kg.K) e Δy a diferença finita na direção axial (m). 137

GEDRAITE (1999) empregou a equação 2.58 para calcular a esterilidade de tratamentos térmicos de alimentos enlatados em recipientes cilíndricos esterilizados em autoclaves estacionárias. 137

Para um recipiente esférico, em que a transferência de calor é apenas radial, a equação básica da difusão do calor tem o seguinte aspecto 137

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad 2.59$$

..137

Como no caso dos recipientes cilíndricos e retangulares, as derivadas parciais da equação 2.59 podem ser aproximadas pelas diferenças finitas para o nó i, resultando 138

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{\alpha\Delta t}{r\Delta r}\left(T_{i+1}^t - T_{i-1}^t\right) + \frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\left(T_{i+1}^t + T_{i-1}^t - 2T_i^t\right) \qquad 2.60$$

..... 138

RODRIGUES ET AL (1998) empregaram a equação 2.60 para prever a temperatura em um recipiente cilíndrico corrigindo a difusividade térmica 138

Ávila Neto e Oliveira (2008) analisaram um modelo dinâmico, baseado na equação 2.60 para processamento térmico de alimentos enlatados. 138

A difusividade térmica reveste-se de importância na esterilização de alimentos quando o mecanismo é o da condução do calor. Como visto no item 2.2, essa propriedade permite prever a variação da temperatura com o tempo e a posição, condição necessária para o cálculo da esterilidade do processamento térmico. Ela está relacionada com a condutividade térmica (k), com o calor específico (c_p) e com a massa específica (ρ) do material que constitui o sistema analisado por meio da expressão 138

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \qquad 2.61$$

..138

Segundo SINGH (1982), a difusividade térmica de um alimento depende da umidade e da temperatura, assim como da composição e da porosidade do mesmo. Como

a temperatura e a umidade do produto podem mudar durante o processamento, a difusividade também é alterada. Assim, na determinação dessa propriedade devem ser escolhidos aqueles métodos que levem em consideração o intervalo de temperatura a ser empregado no tratamento térmico do alimento. 138
A determinação experimental da difusividade térmica tem recebido especial atenção desde o trabalho de DICKERSON (1965). Este autor propôs um equipamento de laboratório para a determinação da condutividade térmica de alimentos a partir de dados da evolução temporal de temperaturas medidas no interior da amostra. O equipamento proposto consiste em um banho de água com agitação onde um cilindro com alta condutividade térmica que contém a amostra é imerso. Tanto a temperatura da superfície, quanto a do interior do cilindro são monitoradas com termopares. 138
RODRIGUES ET AL (1998) mostraram que uma variação de apenas 10% na determinação da difusividade térmica do alimento produz uma variação significativa no valor F do tratamento térmico. 139
Atualmente, para determinação experimental da difusividade térmica de alimentos existem três métodos classicamente utilizados. 139
No caso da temperatura do meio de aquecimento variar com o tempo, GEDRAITE (2005) empregando a equação 2.58, desenvolveu um algoritmo computacional que permite determinar a difusividade térmica medindo-se a variação da temperatura do meio e do alimento com termopares. 140
BETTA ET AL. (2009), empregando equações semelhantes a 2.58, propuseram um método rápido para determinação da difusividade térmica que emprega o mesmo princípio sugerido por Gedraite (2005). 140
RIEDEL (1969) citado por CHOI E OKOS (1986) apresentou uma expressão para estimar a difusividade térmica para alimentos com teor de umidade acima de 40%..... 140
$\alpha = 0{,}088 \times 10^{-6}(\alpha_a - 0{,}088 \times 10^{-6})x_a$ 2.62 140
Nesta equação, a difusividade térmica (α) é dada em (m^2/s), α_a representa a difusividade térmica da água na mesma temperatura e x_a a fração mássica de água presente no material dada em porcentagem..... 140
MARTENS (1980) citado por CHOI E OKOS (1986) mostrou que a difusividade térmica a 20°C, dada em m^2/s, pode ser calculada em função da fração mássica dos componentes básicos dos alimentos — como água (x_a), proteína (x_p), gordura (x_g) e carboidratos expressos em porcentagem, por meio da expressão 140

$\alpha = 0{,}146x_a + 0{,}100x_g + 0{,}075x_p + 0{,}082x_c$ 2.63
.....140
VARGAS ET AL (2007), OLIVARES ET AL (2007) E ANSARI ET AL (2009) propuseram métodos para determinação da difusividade térmica de alimentos. 141
Considerando que o objetivo deste trabalho é sugerir técnicas de operação da autoclave que permitam reduzir a destruição de nutrientes, será dada ênfase à descrição do equipamento. Para isso, será utilizado o trabalho de D'ANDREA NETO E LEONHARDT (2003) APUD LEONHARDT (2003).....141
O principal objetivo de um tratamento térmico é preservar os produtos alimentícios pela destruição de enzimas e da atividade microbiológica, tornando o alimento seguro para consumo. 141
A intensidade do tratamento térmico depende da composição, das características físicas e da microbiota do alimento que será processado. Essas informações somadas àquelas que caracterizam a transferência de calor permitem calcular as condições de tempo e temperatura às quais o alimento deve ser submetido.....141
Para alguns produtos, as propriedades organolépticas podem ser mais importantes na determinação da intensidade do tratamento térmico. Processos usados em enlatamento de peixes, por exemplo, são determinados para amolecer a espinha dorsal do peixe resultando em um supertratamento térmico em termos de destruição de microrganismos. Também no processamento de produtos cárneos, alguns tratamentos são projetados para cozinhar e melhorar a textura, resultando em um supertratamento térmico em termos da destruição de microrganismos. Na pasteurização de pepinos, a destruição de enzimas é mais importante na determinação da intensidade do tratamento térmico do que a destruição de microrganismos. 141
As seguintes informações permitem estabelecer o tratamento térmico mais adequado.....142
- Classificação a que pertence o alimento. Para cada valor de pH e da atividade de água tem-se um tratamento térmico mais adequado. 142
- Cinética das transformações, que permite selecionar as transformações de referência.....142
- Velocidade de transferência de calor que, associada à cinética das transformações — destruição de microrganismos, nutrientes etc. — permite determinar o tempo e temperatura mais adequados. 142

A capacidade de sobrevivência ou de multiplicação dos microrganismos presentes em um alimento depende de uma série de fatores. Entre esses fatores, estão aqueles relacionados com as características próprias do alimento — fatores intrínsecos — e os relacionados com o ambiente em que o alimento se encontra — fatores extrínsecos. 142

São considerados fatores intrínsecos a atividade da água — a_w —, a acidez — pH —, o potencial de óxido-redução — Eh —, a composição química, a presença de fatores antimicrobianos naturais e as interações entre os microrganismos presentes no alimento. 142

Entre os fatores extrínsecos, os mais importantes são a umidade, a temperatura e a composição da atmosfera que envolve o alimento. No enlatamento, os mais importantes são os fatores intrínsecos, pois se assume que a operação de exaustão — retirada de ar — foi bem sucedida e, portanto tem-se vácuo — ausência de ar — no interior do recipiente.....142

Quando as condições de desenvolvimento de algumas bactérias não são adequadas elas esporulam, ou seja, elas se apresentam em uma forma latente — esporo — muito resistente e protegida do meio. Quando o meio apresenta as condições de desenvolvimento, as bactérias esporulantes germinam, desenvolvendo-se. Em pH inferior a 4,5 os esporos não apresentam condições de germinar permanecendo inertes. Porém, quando o pH é igual ou superior a 4,5 as bactérias esporulantes germinam desenvolvendo-se. Assim, alimentos que possuem um pH abaixo de 4,5 — alimentos ácidos — não necessitam de tratamento térmico tão severo quanto aqueles que apresentam um pH igual ou superior a 4,5 — alimentos de baixa acidez. Por outro lado, os alimentos não ácidos necessitam ter seus esporos destruídos e, por isto, devem ser processados em temperaturas superiores a 100 °C. Em outras palavras, devem ser esterilizados. Alimentos ácidos por sua vez são processados em temperaturas menores que 100 °C. Em outras palavras, são pasteurizados. 143

A história do enlatamento de alimentos começa com Nicholas Appert, um confeiteiro francês, que colocou alimentos em garrafas ou jarros de vidros, tampou-as com rolhas e aqueceu-as em banhos de água em ebulição. A maioria dos alimentos assim tratados não se deteriorou e ele anunciou essa descoberta em 1810. Embora Appert fosse um trabalhador minucioso e cuidadoso, a ciência da microbiologia ainda era desconhecida naquele tempo e ele foi incapaz de explicar

por que seu método era eficaz. Ele acreditava que a combinação de calor e a remoção de ar preveniam a tendência à decomposição.....143
Cinqüenta anos depois Louis Pasteur demonstrou que certos microrganismos são responsáveis pela fermentação e decomposição dos alimentos. Essa descoberta explicou por que o método de Appert era eficaz. Atualmente é fato conhecido que todos os alimentos contêm microorganismos que eventualmente irão causar deterioração, a não ser que sejam controlados ou destruídos. Como existem alimentos altamente susceptíveis à deterioração são necessários tratamentos drásticos. Assim surgiu a autoclave.....143
Em 1874, A. K. Shriver, um enlatador de Baltimore, Maryland, inventou a panela de pressão: o primeiro sistema de autoclave que empregava vapor sob pressão para processamento de alimentos em altas temperaturas. Este evento assinalou o começo do processamento comercial de alimentos enlatados. Antes da invenção de Shriver, banhos de água em ebulição eram utilizados para aquecer alimentos enlatados. O período de tempo requerido na água em ebulição para prevenir deterioração dependia do produto alimentício e da experiência prévia do enlatador. Não somente a contaminação ocorria com freqüência, mas ela era tratada com um aumento arbitrário do tempo de processamento em água de ebulição. Com a invenção da autoclave o método passou a ser "mais científico" necessitando de considerações teóricas.....144
De acordo com o "Food and Drug Administration" — FDA — o termo autoclave significa um aparelho fechado ou qualquer outro equipamento usado para o processamento térmico de alimentos. Neste trabalho, procurando restringir o conceito dado pelo FDA, o vocábulo autoclave será empregado para os equipamentos que trabalham sobre pressão no processamento térmico de alimentos enlatados. 144
Hoje em dia as autoclaves são os equipamentos mais empregados para o tratamento térmico de alimentos enlatados, quando o enlatamento é o convencional. Além da indústria de alimentos, autoclaves são encontradas em hospitais, clínicas, laboratórios de microbiologia e em muitos outros tipos de processos industriais em que haja a necessidade da operação de esterilização ou de aquecimento em temperaturas superiores a 100 ºC. Em razão deste uso universal, as autoclaves são encontradas nas mais variadas formas e tamanhos. 144

As autoclaves estacionárias são recipientes fechados — vasos de pressão —, descontínuos, sem sistema de agitação e, dependendo da sua construção, podem ser verticais ou horizontais. O meio de transferência de calor durante o aquecimento geralmente é vapor saturado e, durante o resfriamento, água. Neste caso, durante o resfriamento é necessário o emprego de ar comprimido para manter a pressão necessária equilibrando o aumento da pressão interna ao recipiente. Autoclaves que usam água como meio de transferência de calor — quer no aquecimento ou no resfriamento — funcionam de duas maneiras distintas. No primeiro tipo — autoclaves de imersão — os cestos com recipientes são imersos em água e a temperatura de processo, durante o aquecimento, é atingida com a injeção de vapor saturado. Neste caso, a água deve ser reciclada para não haver o aparecimento de regiões "frias" e "quentes", assegurando uma distribuição uniforme de temperatura. No segundo tipo — autoclaves com aspersão de água na forma de chuveiro — a água é lançada diretamente sobre os recipientes na forma de jatos de água — "chuveiros". Este tipo de autoclave requer o uso de um trocador de calor acoplado cuja função é aquecer a água nas fases de aquecimento e esterilização, ou resfriá-la na fase de resfriamento. 144

Com intuito de melhorar a transferência de calor em alimentos que se aquecem predominantemente por convecção e que apresentam um mecanismo misto de transferência de calor — aquecem por convecção e em seguida por condução — surgiram as autoclaves de agitação, que imprimem um movimento de rotação no recipiente. Estas autoclaves podem ser contínuas ou descontínuas.....145

A autoclave hidrostática é basicamente uma autoclave estacionária. Nela, o alimento a ser processado é transportado continuamente por um sistema de correias. Nestas autoclaves, a pressão necessária para fornecer a temperatura de esterilização é fornecida hidrostaticamente pelas colunas de água dos sistemas de alimentação e de descarga. Geralmente elas são projetadas para que possam processar diversos tamanhos de latas sem a necessidade de grandes modificações no equipamento. Autoclaves hidrostáticas constituem o sistema contínuo mais simples para o processamento térmico de alimentos enlatados.....145

O processamento de alimentos em uma autoclave estacionária é uma operação descontínua. Por outro lado, na grande maioria dos casos as operações de preenchimento, exaustão e recravação são contínuas. Assim, torna-se necessário especificar o número de autoclaves de tal forma a absorver a produção da linha

geral de enlatamento transformando todo o processo em uma linha contínua de produção. As autoclaves necessárias para tornar o processo contínuo são agrupadas em um espaço físico geralmente chamado sala de esterilização. O número de autoclaves de uma sala de esterilização pode ser calculado como segue. 145

Sendo *L* a capacidade da autoclave selecionada — número de latas processadas de cada vez — e *P* a produção desejada — número de latas por minuto —, o tempo de carga de uma autoclave, desprezando o tempo gasto para o manuseio dos cestos, será dado por 146

$$t_c = \frac{L}{P} \qquad 2.64$$

..... 146

Por outro lado, o ciclo operacional de uma autoclave — *C* — pode ser dividido em duas etapas: tempo de carga — t_c — e o tempo de processamento propriamente dito — t_p. Lembrando que após o ciclo operacional da primeira autoclave — $C = t_c + t_p$ — ela deve estar disponível para nova carga, é possível escrever 146

$$C = Nt_c \qquad 2.65$$

..... 146

Nesta equação, *N* representa o número necessário de autoclaves para que o processamento no setor de esterilização seja contínuo. Combinando estas duas últimas equações é possível calcular o número de autoclaves necessárias por meio da expressão 146

$$N = \frac{CP}{L} \qquad 2.66$$

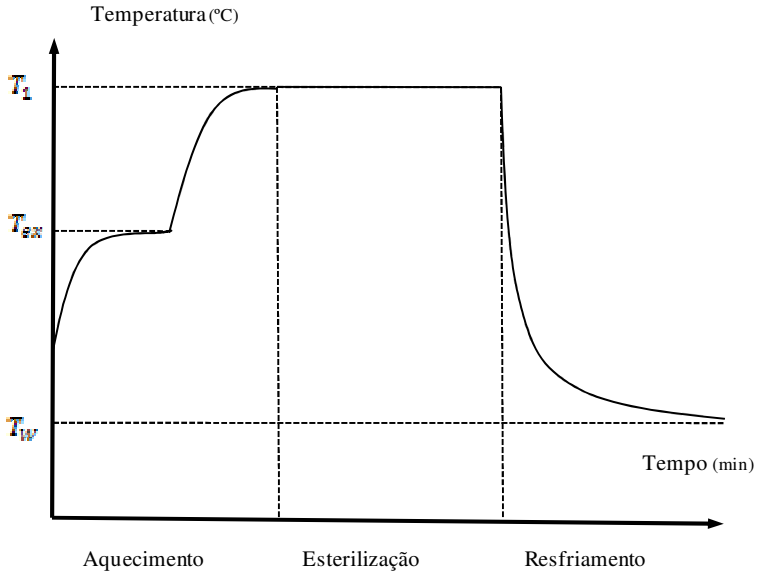
..... 146

Tendo em vista os dados necessários: ciclo operacional, capacidade da autoclave e a produção desejada, o número de autoclaves calculado dificilmente será inteiro. Este fato pode ser corrigido aproximando e somando um ao resultado. O fato das autoclaves serem fabricadas em tamanhos padrões facilita a seleção do tamanho apropriado para uma dada produção. No entanto, na seleção preliminar é necessário ter em mente que o tempo de carga não deve ser muito grande. Tempos de carga superiores a 30 minutos além de provocarem o resfriamento das primeiras latas — com conseqüente redução da temperatura inicial — mantêm o alimento em temperaturas adequadas ao desenvolvimento de microrganismos termoresistentes. 146

A figura 2.11 mostra como varia a temperatura de uma autoclave estacionária durante o processamento térmico de alimentos enlatados. De acordo com esta figura é possível distinguir três fases: aquecimento, esterilização propriamente dita e resfriamento. A fase de aquecimento, por sua vez, pode ser dividida em duas etapas não independentes: exaustão — onde a preocupação é eliminar o ar existente no interior da autoclave — e o aquecimento, para atingir a temperatura determinada para a esterilização. 147

De acordo com CHEN E RAMASWAMY (2002), a operação de uma autoclave pode ser realizada mantendo a temperatura constante durante a fase de esterilização — processos CRT (constant retort temperature) ou variando a temperatura da autoclave com o tempo, de acordo com um perfil pré-determinado — processos VRT (variable retort temperature).....147

O projeto de processos CRT para um dado produto alimentício é definido respondendo a duas perguntas: que temperatura?; e durante quanto tempo?....147



.....147

Para cada combinação temperatura da autoclave tempo de processamento, existe apenas um processo capaz de destruir o microrganismo de referência com a probabilidade de falha recomendada. Em essência, a pergunta a ser respondida é qual combinação garante, ao mesmo tempo, a esterilidade desejada e o menor nível de destruição de nutriente? 148

Em contraste, nos processos VRT, a temperatura da autoclave sofre variações ao longo do tempo, de acordo com um perfil previamente estipulado. O responsável pelo processo deve escolher um dentre vários — teoricamente infinitos — processos

viáveis. A escolha da melhor alternativa é mais difícil, porém executável com a ajuda de modelos matemáticos. 148
Sendo a seleção de processos VRT um problema de otimização, dois passos devem ser considerados (CHEN E RAMASWAMY, 2002): 148
TEIXEIRA ET AL. (1975) foram os primeiros a analisar processos VRT, empregando como função objetivo a retenção de tiamina. Tendo em vista os resultados obtidos — melhoria de apenas 2% —, levaram os autores a sugerir que esse tipo de processo não fossem úteis. Mais tarde, SAGUY E KAREL (1979) afirmaram que os processos VRT ótimos eram muito específicos: cada combinação da geometria da embalagem, do produto analisado e do atributo crítico de qualidade levaria a uma única solução VRT. 148
Esses resultados iniciais desviaram a atenção dos pesquisadores para o assunto. Em 1991, BANGA ET AL, fazendo uso de um processo iterativo, computacionalmente eficiente para a busca de uma curva de temperatura para o processo VRT favorável e examinando a retenção de nutrientes, confirmaram a pequena vantagem da técnica VRT em relação à CRT. Esses mesmos autores, trabalhando com outras funções objetivo: qualidade do alimento em contato com a superfície do recipiente e tempo de processamento, conseguiram uma melhora de 20% na qualidade do alimento em contato com a embalagem. No mesmo estudo, os autores mostraram que é possível obter a mesma letalidade e qualidade superficial do alimento alcançada pela melhor técnica CRT, porém com tempos de processamento inferiores em até 16,5%. 148
Com o desenvolvimento dos microprocessadores e de seus aplicativos, CHEN E RAMASWAMY (2002) mostraram que o processamento VRT com função exponencial melhora a qualidade da superfície e a economia de energia decorrente da redução do tempo de processamento. YOSHIMI (2002), empregando como atributo de qualidade o grau de cozimento do alimento, mostrou que a temperatura da autoclave pode ser otimizada por uma função do tipo rampa. 149
Por outro lado, Vargas et al. . (2000) mostram que é necessário levar em conta um grande número de variáveis na determinação do perfil mais adequado para a temperatura da autoclave, justificando a introdução das distribuições de freqüências das principais variáveis. 149
Como se observa o assunto é amplo e permite a existência de trabalhos que possam indicar qual a melhor técnica de operação da autoclave. 149

Durante o processamento térmico de alimentos enlatados, além da destruição dos microrganismos presentes, ocorrem numerosas transformações químicas e biológicas: umas desejáveis e outras indesejáveis. Favorecer as transformações desejáveis e inibir as indesejáveis fazem parte dos objetivos do responsável pelo projeto do processamento térmico. 149

A cinética da destruição térmica de microrganismos pelo calor úmido mostra que sua resistência térmica fica caracterizada através da curva de destruição térmica e que, tendo em vista o número de fatores que interferem, os parâmetros que caracterizam esta curva devem ser determinados utilizando o próprio alimento. No entanto, o simples conhecimento da curva de destruição térmica dos microrganismos envolvidos não permite resolver o problema. A cinética das transformações indesejáveis que se baseia nos mesmos parâmetros definidos para a destruição de microrganismos, também deve ser conhecida. 150

Durante o processamento térmico de alimentos ocorrem numerosas transformações. Algumas destas transformações são: amolecimento de tecidos devido ao cozimento; ativação de enzimas; crescimento de microrganismos; degradação do aroma e sabor; desnaturação de proteínas; destruição de vitaminas; escurecimento não-enzimático; hidrólise de diversos compostos; inativação de enzimas; morte de microrganismos; oxidação de diversos compostos; respiração de tecidos vivos. 150

Alguns destes fenômenos são complexos e geralmente resultam de uma ou mais reações bioquímicas simples. Assim, a morte de microrganismos pode ser resultante da destruição de enzimas essenciais para o desenvolvimento das células. No entanto, o resultado global é que deve ser analisado. Qualquer que seja a explicação dada, ela não altera a evidência do resultado experimental. 150

Sob este aspecto, o tipo mais comum de reação encontrada para essas transformações é o de primeira ordem, em que o parâmetro analisado — concentração de vitaminas, número de microrganismos, textura etc. — varia exponencialmente com o tempo, ou seja 150

$$\frac{dC}{dt} = kC \qquad 2.67$$

..... 150

Nesta equação, *C* representa o parâmetro analisado; *t* o tempo e *k* a constante de velocidade da transformação analisada. Se a função analisada for crescente — como no caso do crescimento de microrganismos — então a equação 2.67 traduz

o fenômeno. Caso contrário, como a derivada é negativa e a velocidade de reação é uma grandeza essencialmente positiva, a equação 2.68 deve ser escrita como segue.....151

$$\frac{dC}{dt} = -kC \qquad 2.68$$

.....151

A constante de velocidade depende do fenômeno analisado e da temperatura. A forma mais universalmente aceita para descrever a variação da constante de velocidade com a temperatura é devida a Arrenhius (LEVENSPIEL, 1972 e AIBA ET AL. , 1973) cujo modelo obedece à equação.....151

$$k = A \cdot \exp(-E / RT) \qquad 2.69$$

.....151

Nesta equação, *A* representa o fator de freqüência (s^{-1}); *E* a energia de ativação (cal/gmol); *R* a constante dos gases (1,987 cal/K.gmol); e *T* a temperatura (K). A equação 2.69 mostra a variação da constante de velocidade com a temperatura. 151

Bigelow (1921) mostrou que a constante de velocidade pode ser representada em função da temperatura por uma equação do tipo.....151

$$k = k_r \cdot 10^{\frac{T - T_r}{z}} \qquad 2.70$$

.....151

Nesta equação, k_r representa a constante de velocidade na temperatura de referência T_r (°C) e *z* o valor *z* da transformação (K). 151

A equação 2.70 mostra que a variação da constante de velocidade com a temperatura é tanto maior quanto menor for o valor *z* da transformação. De acordo com esta equação o valor *z* da transformação pode ser definido como segue 151

Valor z da transformação	=	Intervalo de temperatura necessário para que a constante de velocidade da transformação seja multiplicada por 10.

.....152

AIBA ET AL. (1973) e BORZANI (1974), comparando a equação de Arrenhius com a de Bigelow, mostraram que no intervalo de temperatura de 100 a 160°C as duas podem ser aplicadas sem que o erro cometido ultrapasse a incerteza experimental verificada na determinação da constante de velocidade da reação.....152

A tabela 2.1 apresenta alguns valores da constante de velocidade, do valor *z* e da energia de ativação para algumas reações. Um exame dessa tabela permite tirar duas observações importantes. 152

FONTE: (LUND, 1977). 152

Essas constatações permitem otimizar o tratamento térmico, ou seja, é possível garantir que as transformações desejáveis ocorram na sua totalidade, ao mesmo tempo em que as transformações indesejáveis são minimizadas. 153

A tabela 2.1 mostra ainda que a constante de velocidade para as transformações indesejáveis é praticamente a mesma. Além disso, ela mostra também que a influência da temperatura na constante de velocidade para as reações indesejáveis é praticamente a mesma. Esta observação permite que se escolha um dado parâmetro — nutrientes, textura, sabor ou cor — para a otimização do processamento térmico. Este é o fato que resultou no emprego da retenção de nutrientes como o parâmetro básico para o trabalho de otimização e, hoje em dia, quase todos os processamentos empregados comercialmente foram desenvolvidos com base na retenção de nutrientes (LUND, 1977). 153

Do ponto de vista prático a definição dos microbiologistas sobre a morte de microrganismos é satisfatória. Isto é: "o microrganismo morre quando perde sua capacidade de se reproduzir". Assim, a grande maioria dos estudos realizados sobre a destruição de microrganismos emprega a "falha de reprodução" como critério de morte. 153

Os resultados destes estudos mostram que quando microrganismos são submetidos ao calor sua destruição é geralmente muito regular. Na maioria dos casos, o número de células viáveis diminui exponencialmente com o tempo de exposição a uma temperatura constante e letal ao microrganismo, como em uma reação de ordem um. 153

$$\frac{dN}{dt} = -kN \qquad 2.71$$

..... 153

Nesta equação, *N* representa o número de sobreviventes — número de células viáveis. A constante de velocidade (*k*) nesse caso é conhecida como velocidade específica de destruição térmica do microrganismo e é função do microrganismo, do meio no qual se encontra o microrganismo e da temperatura. A influência da temperatura na velocidade específica de destruição térmica é representada através da equação 2.70. 153

Integrando a equação 2.71 desde t ($N = N_i$) até um instante t qualquer ($N = N_f$) e rearranjando a equação obtida resulta 154

$$t = \frac{2{,}303}{k} \log \frac{N_i}{N_f} \qquad 2.72$$

..... 154

A equação 2.72 representa a lei logarítmica de destruição térmica de microrganismos pelo calor úmido e permite calcular a relação existente entre o número inicial (N_i) e o número final (N_f) de microrganismos viáveis em uma suspensão, quando essa suspensão é exposta a uma temperatura constante e letal ao microrganismo durante um tempo t. Esta equação não tem significado para $N_f = 0$, pois para atingir essa situação — partindo de um número N_i qualquer de microrganismos — seria necessário um tempo infinito. Porém, nas aplicações comerciais isto não ocorre. A destruição total pode ser alcançada em poucos segundos. Por outro lado, não tem sentido falar em número fracionário de microrganismos. 154

Este problema pode ser contornado admitindo que o número final de microrganismos corresponda à probabilidade de falha da operação de esterilização. O critério para se estabelecer o valor da probabilidade de falha adequada para o processo está diretamente envolvido com o alimento e a resistência térmica do microrganismo presente. STUMBO (1965) estabelece três níveis de probabilidade de falha (N_f). Para alimentos com pH acima de 4,5, *Clostridium botulinum* é o microrganismo que deve ser considerado. Para a espécie mais resistente deste microrganismo foi estabelecido arbitrariamente que o processamento térmico deve ser conduzido até uma probabilidade de falha de 10^{-12}. 154

Devido à presença de microrganismos mais resistentes, nem todo alimento deve ser processado com este nível de destruição. Para microrganismos termófilos, onde não temos microrganismos de interesse quanto à saúde pública, adotou-se uma probabilidade de falha de 10^{-3}. Para microrganismos mesófilos esporulantes a probabilidade de falha adotada foi de 10^{-5}. 154

Além da lei logarítmica de destruição térmica, a resistência térmica de um microrganismo pode ser caracterizada de diferentes formas. BIGELOW (1921) procurou caracterizar a resistência térmica de um microrganismo através do "Tempo de Destruição Térmica" (*TDT*) 155

Tempo de Destruição Térmica (TDT) = Ao intervalo de tempo necessário para que uma dada população microbiana, sob dadas condições, seja destruída quando a aquecemos em uma temperatura constante. 155

Mais tarde, KATZIN ET AL. (1944) introduziram o conceito do "Tempo de Redução Decimal" (*D*) para a caracterização da resistência térmica de microrganismos 155

Tempo de Redução Decimal (D) = Ao intervalo de tempo durante o qual devemos aquecer uma suspensão microbiana, sob dadas condições, em uma temperatura constante para que sua população sofra uma redução de 90%. 155

BALL E OLSON (1957) mostraram que a expressão "sob certas condições" que aparece nestas definições significa definir os seguintes fatores: 155

A resistência térmica dos parâmetros analisados na operação de esterilização de um alimento enlatado fica caracterizada através da cinética da transformação. No caso da morte dos microrganismos, além da velocidade específica de destruição térmica (*k*) foram estabelecidos os conceitos de tempo de destruição térmica (*TDT*) e do tempo de redução decimal (*D*). Estes conceitos foram estendidos para as outras transformações que ocorrem durante o processamento térmico. Assim, a resistência térmica de todos os parâmetros analisados no cálculo de esterilização pode ser caracterizada através da velocidade específica de destruição térmica, do tempo de destruição térmica ou do tempo de redução decimal. 155

Desde que a temperatura varia com o tempo durante o processamento térmico, é necessário conhecer como essas grandezas variam com a temperatura. Esta função é representada através da equação 2.70 no caso da velocidade especifica de destruição térmica. No caso do tempo de destruição térmica e do tempo de redução decimal, a variação desses parâmetros com a temperatura pode ser obtida como segue. 156

Para uma dada temperatura, o tempo de destruição térmica pode ser calculado através da equação 2.72. Fixando o nível de destruição em 10^n, resulta..... 156

$$TDT = \frac{2{,}303n}{k} \qquad 2.73$$

..... 156

Desde que a velocidade específica de destruição térmica do microrganismo é função da temperatura, o tempo de destruição térmica também o será. Combinando a equação 2.70 com a 2.73, obtém-se..... 156

$$TDT = F \cdot 10^{(T_r - T)/z}$$ 2.74

.....156

Nesta equação, ...156

$$F = \frac{2{,}303n}{k_r}$$ 2.75

.....156

representa o valor *F* do microrganismo e corresponde ao tempo de destruição térmica do microrganismo na temperatura de referência. 156

Da mesma forma, o tempo de redução decimal pode ser calculado através da equação 2.72. Lembrando que após o tempo de redução decimal o número de microrganismos é igual a 10% do número inicial — redução de 90% —, a equação 2.72 permite concluir que 156

$$D = \frac{2{,}303}{k}$$ 2.76

.....157

A variação do tempo de redução decimal com a temperatura pode ser obtida substituindo a equação 2.70 na 2.76, resultando 157

$$D = D_r \cdot 10^{(T_r - T)/Z}$$ 2.77

.....157

Nesta equação, ...157

$$D_r = \frac{2{,}303}{k_r}$$ 2.78

.....157

representa o tempo de redução decimal na temperatura de referência. Comparando as equações 2.73 e 2.76, obtém-se 157

$$TDT = nD$$ 2.79

.....157

ou 157

$$F = nD_r$$ 2.80

.....157

A bibliografia especializada denomina as funções representadas pelas equações 2.70, 2.74 e 2.77 de curvas de destruição térmica. Uma vez que em um papel semilogarítmico estas curvas são representadas por linhas retas, conhecendo-se um ponto e sua inclinação temos a função como um todo. Por outro lado, as equações

2.73, 2.76 e 2.79 mostram as relações existentes entre as diferentes grandezas. Assim, conhecendo-se o valor *z* da transformação e um valor da velocidade específica de destruição térmica, do tempo de destruição térmica ou do tempo de redução decimal, pode ser empregada qualquer das três equações. A bibliografia especializada costuma apresentar o valor *z* da transformação em conjunto com um valor do tempo de redução decimal na temperatura de referência (D_r) ou com o valor do tempo de destruição térmica na temperatura de referência (*F*). 157

Na determinação da resistência térmica de nutrientes em cada caso deve ser selecionado o nível de destruição desejado. A relação (N_i/N_f) neste caso é substituída pela relação (C_i/C_f) que deve ser definida em função do alimento desejado. 158

Que temperatura durante? Durante quanto tempo? A resposta a essas perguntas não é tão simples. Inicialmente deve ser estabelecida uma base de comparação que dependerá da transformação que está sendo analisada. Desde que a destruição de microrganismos é a transformação desejável na operação de esterilização, as bases de comparação foram inicialmente estabelecidas tendo em mente a morte de microrganismos. 158

Seja um sistema contendo uma dada população microbiana. Tendo em vista a definição do tempo de destruição térmica, para destruir os microrganismos presentes com uma probabilidade de falha estabelecida, esse sistema deve ser aquecido a uma temperatura constante e letal ao microrganismo considerado durante o tempo de destruição térmica desse microrganismo, nessa temperatura. Qualquer outro tempo de processamento empregado não fornecerá o nível de destruição desejado. Com base nesse conhecimento estabeleceu-se o conceito de esterilidade como segue. 158

Esterilidade (A)	=	Relação entre o tempo de aquecimento a uma dada temperatura e o Tempo de Destruição Térmica do microganismo de referência na mesma temperatura

..... 158

Essa definição permite que se escreva 158

$$A = \left(\frac{t}{TDT} \right)_T \qquad 2.81$$

..... 158

Tendo em vista as equações 2.72 e 2.73, a equação 2.81 pode ser escrita como

..... 158

$$A = \frac{1}{n} \cdot \log \frac{N_i}{N_f}$$ 159

Nesta equação, *n* representa o logaritmo do nível de destruição estabelecido e (N_i/N_f) o nível de destruição obtido quando o sistema é processado em uma temperatura *T* durante *t* minutos. Para *t* < *TDT*, o nível de destruição obtido é inferior ao fixado, a esterilidade é menor que 1,0 e o tratamento térmico conduz a uma subesterilização. Para *t* = *TDT*, o nível de destruição obtido é exatamente igual ao fixado, a esterilidade é unitária e o tratamento térmico fornece a esterilização desejada. Para *t* > *TDT*, o nível de destruição obtido é superior ao fixado, a esterilidade é maior que 1,0 e o tratamento térmico provoca uma super esterilização. 159

A equação 2.81 permite calcular a esterilidade para aqueles tratamentos térmicos em que a temperatura é constante. No entanto, no processamento térmico de alimentos enlatados a temperatura do alimento varia com o tempo. Nesses casos, admite-se que a temperatura seja constante para cada intervalo de tempo *dt*. Desta forma, a esterilidade deve ser calculada para cada intervalo, de acordo com a expressão..... 159

$$dA = \left(\frac{dt}{TDT} \right)_T \qquad 2.82$$

..... 159

Tendo em vista a equação 2.74, a equação 2.82 permite calcular a taxa de variação da esterilidade com o tempo como segue: 159

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{TDT} = \frac{1}{F} \cdot 10^{(T-T_r)/z} \qquad 2.83$$

..... 159

Desta forma, a esterilidade de um tratamento térmico em que a temperatura varia com o tempo pode ser calculada através da integral..... 159

$$A = \int_0^t \frac{1}{TDT} dt = \frac{1}{F} \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.84$$

..... 159

A relação 160

$$L_r = 10^{(T-Tr)/z} \qquad 2.85$$

..... 160

é conhecida como taxa de letalidade ou simplesmente de letalidade e representa a relação entre o intervalo de tempo de processamento na temperatura de referência que corresponde a processar o alimento durante *t* minutos na temperatura *T* de modo a obter, sob o ponto de vista da esterilização, o mesmo efeito. 160

Além da esterilidade outros parâmetros foram estabelecidos. O mais comumente empregado é o valor F_P do tratamento térmico que pode ser definido como segue. 160

Valor F_P do Tratamento Térmico	=	Ao intervalo de tempo que devemos aquecer o sistema a uma temperatura de referência (T_r) constante, de modo a obtermos o mesmo efeito verificado no tratamento térmico realizado

..... 160

Definido desta forma o valor F_P do tratamento térmico pode ser calculado através da cinética da transformação na qual se está interessado. Para a destruição de microrganismos, a equação 2.72 permite escrever 160

$$\int_0^t -k d\theta = \int_{N_i}^{N_f} \frac{dN}{N} \qquad 2.86$$

..... 160

Se a temperatura é constante com o tempo, a velocidade específica de destruição térmica é constante e a equação 2.86, para a temperatura de referência, pode ser escrita como segue 160

$$F_P = \frac{2{,}303}{k_r} \log \frac{N_i}{N_f} \qquad 2.87$$

..... 160

Se, por outro lado, a temperatura do tratamento térmico varia com o tempo, a velocidade específica de destruição térmica também será função do tempo. Neste caso, substituindo a equação 2.70 na equação 2.86 obtém-se 160

$$\int_{N_i}^{N_f} -\frac{dN}{N} = k_r \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt$$ 161

ou ainda: 161

$$F_{PM} = \frac{2{,}303}{k_r} \log \frac{N_i}{N_f} = \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.88$$

..... 161

Esta equação mostra que o valor F_{PM} do tratamento térmico referenciado ao microrganismo é calculado através da integral da letalidade em função do tempo. Comparando-se 2.84 com a equação 2.88, verifica-se:.....161

$F_{PM} = A \cdot F$ 161

Ou ainda, ...161

$A = \left(\frac{F_{PM}}{F} \right)_{Tr}$ 161

Essa última equação mostra que a esterilidade também pode ser entendida como sendo a relação entre o valor F_{PM} do tratamento térmico realizado referenciado ao microrganismo e o valor F do microrganismo de referência na temperatura de referência.....161

O valor F_{PM} do tratamento térmico representa o tempo de aquecimento a uma temperatura de referência constante para obter um dado nível de destruição. Por outro lado, o valor *F* do microrganismo fornece o tempo de aquecimento a uma temperatura de referência constante necessário para obtermos o nível de destruição pré-estabelecido. Assim, quando $F_{PM} < F$ o nível de destruição obtido é inferior ao fixado e o tratamento térmico conduz a uma subesterilização — $A < 1$. Para $F_{PM} = F$ o nível de destruição obtido é igual ao fixado e o tratamento térmico proporciona a esterilização desejada — $A = 1$. Para $F_{PM} > F$ o nível de destruição obtido é superior ao fixado e o tratamento térmico fornece uma super esterilização — $A > 1$. 161

A definição do valor F_P do tratamento não estabelece a transformação adotada. Assim, para a destruição de nutrientes a equação 2.68 permite que se escreva....162

$$\int_0^t -k dt = \int_{C_i}^{C_f} \frac{dC}{C} \qquad 2.89$$

.....162

Se a temperatura é constante com o tempo a constante de velocidade será constante e a equação 2.89, para a temperatura de referência, pode ser escrita como segue.....162

$$F_{PN} = \frac{2{,}303}{k_r} \log \frac{C_i}{C_f} \qquad 2.90$$

.....162

Se, por outro lado, a temperatura varia com o tempo a constante de velocidade também será função do tempo. Neste caso substituindo a equação 2.70 na 2.90, obtém-se 162

$$\int_0^t -\frac{dC}{C} = \int_{C_i}^{C_f} 10^{(T-T_r)/z} dt$$ 162

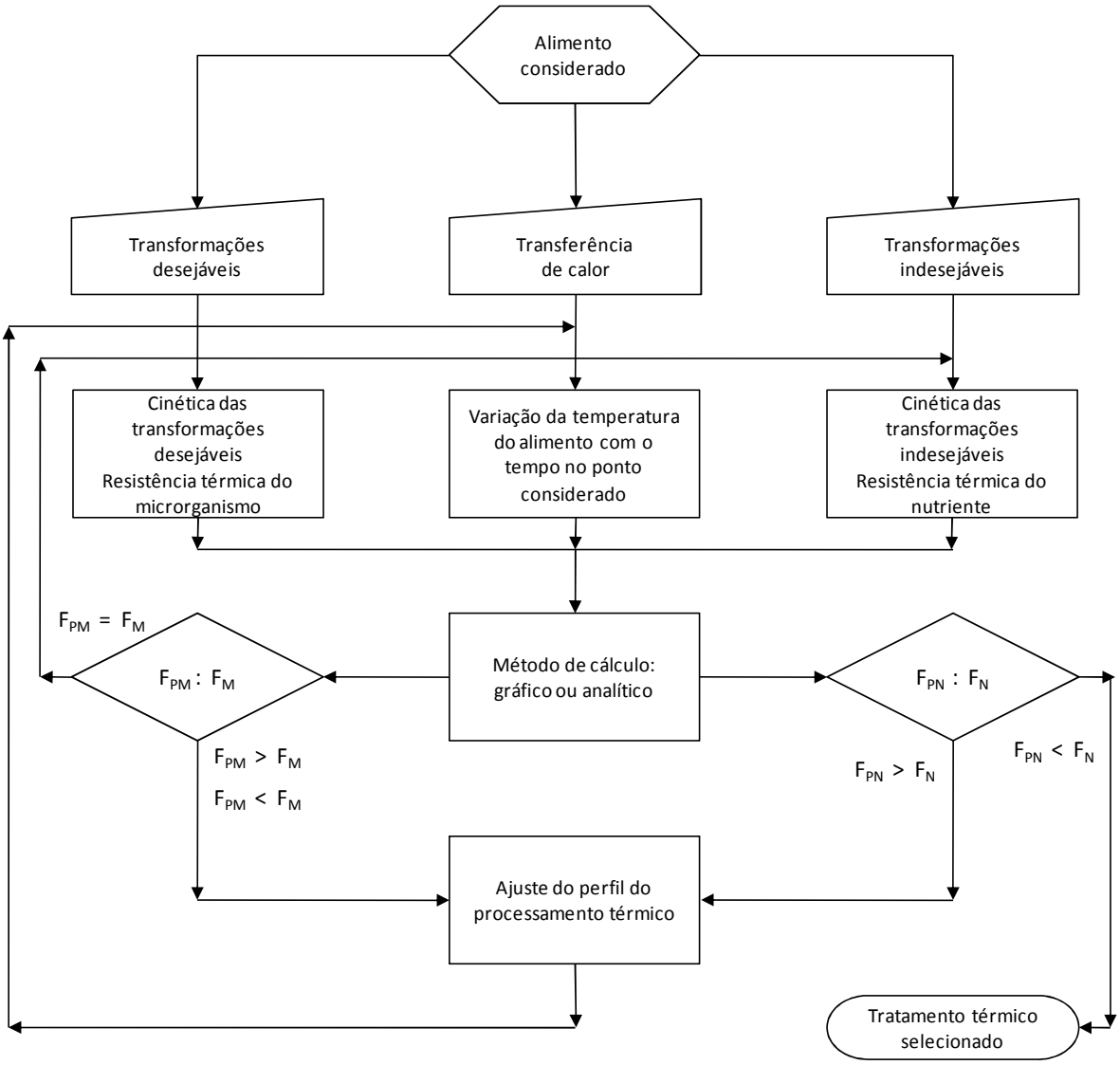
ou ainda 162

$$F_{PN} = \frac{2{,}303}{k_r} \log \frac{C_i}{C_f} = \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.91$$

..... 162

Para calcular a temperatura e o tempo mais recomendado para processos CRT ou para escolher a melhor programação da temperatura da autoclave em processos VRT, o procedimento a ser seguido pode ser representado em um diagrama de blocos como o mostrado na figura 2.12. 162

Inicialmente, além de uma análise do modelo de transferência de calor que deve ser adotado, devem ser selecionadas as transformações desejáveis e indesejáveis que devem ser consideradas em função do alimento que será processado. Na figura 2.12 considerou-se a destruição de microrganismos como desejável e a destruição de nutrientes como transformação indesejável. Vencida esta etapa a aplicação do método de cálculo escolhido aos dados que caracterizam a resistência térmica do microrganismo considerado e as curvas de aquecimento e resfriamento do alimento em causa permite determinar o valor F_p do tratamento térmico em relação ao microrganismo (F_{PM}). Este último valor estabelece a efetividade do tratamento térmico realizado. Uma vez obtida a esterilização desejada, o processo deve ser otimizado quanto à destruição de nutriente. Para isso, é necessário determinar-se o valor F_p do tratamento térmico em relação ao nutriente (F_{PN}), aplicando-se o método de cálculo escolhido aos dados que caracterizam a resistência térmica do nutriente considerado e as curvas de aquecimento e resfriamento que proporcionaram a esterilização desejada. O confronto do nível de destruição obtido (F_{PN}) com aquele estabelecido (F_N) permite estabelecer o tratamento térmico mais adequado. Ou seja, aquele que reduza o nível de destruição de nutrientes e forneça o nível de destruição do microrganismo necessário. 162



.....164

A figura 2.12 mostra ainda que qualquer ajuste no perfil do tratamento térmico, para atender $F_{PM} = F_M$ ou $F_{PN} \leq F_N$ deve ser seguido de novo cálculo do valor F_p do tratamento térmico. 164

O cálculo da esterilidade ou do valor F_P do tratamento térmico pode ser conduzido por diferentes métodos: gráficos ou analíticos. No entanto, os princípios básicos nos quais se fundamentam tais métodos são os mesmos, estando apoiados sobre os conceitos apresentados nos itens 2.5.1 a 2.5.3. Neste item, será discutido o cálculo gráfico apresentando o método geral descrito por BIGELOW ET AL. (1920) e as modificações posteriores introduzidas por BALL (1928). Apesar de STUMBO (1965) salientar que do ponto de vista prático o maior interesse do método geral é seu valor histórico, os conceitos básicos estabelecidos por BIGELOW ET AL. (1920) servem de base para o desenvolvimento de métodos mais elaborados e, além disso, este

tipo de cálculo se aplica a todo e qualquer tipo de tratamento térmico, o que nem sempre ocorre com os demais métodos. 164
Com base na equação 2.84, a esterilidade de um tratamento térmico em que a temperatura varia com o tempo pode ser calculada através da expressão..... 165

$$A = \int_0^t \frac{1}{TDT} dt \qquad 2.92$$

..... 165
Para aquelas transformações em que a curva de destruição térmica pode ser representada por meio da equação 2.74, a esterilidade pode ser avaliada por meio da equação 165

$$A = \frac{1}{F} \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.93$$

..... 165
Com base nas equações 2.92 e 2.93 o tratamento térmico deve ser interrompido quando a esterilidade for unitária. Se ao invés do tempo de esterilização estivermos interessados no valor da esterilidade do tratamento térmico, devemos considerar todo o tempo de processamento. Apesar de apresentado diferentemente, esse método de cálculo corresponde ao método básico geral proposto por BIGELOW ET AL. (1920). 165
As modificações propostas por BALL (1928) não alteram o princípio básico do método, mas apenas a forma de se efetuar o cálculo utilizando ao invés da esterilidade o valor F_P do tratamento térmico que pode ser calculado através da equação 2.88. Neste caso, o tratamento térmico deve ser interrompido quando o valor F_P do tratamento térmico for igual ao valor F da transformação desejada. Se ao invés do tempo de esterilização estivermos interessados no valor F_P do tratamento térmico devemos considerar todo o tempo de processamento. 165
Neste item serão apresentados os valores F_0 recomendados por STUMBO ET AL. (1975) para alimentos de média acidez acondicionados em recipientes metálicos. Para isso as seguintes hipóteses básicas devem ser consideradas..... 166
1. Uma probabilidade de falha de que uma em 10^{12} latas poderá estar contaminada com esporos de *Clostridium botulinum* (STUMBO ET AL. , 1975). 166
2. A população de *Clostridium botulinum* de maior resistência antes da operação de esterilização poderá ser de no máximo de um esporo por grama de alimento

contido no recipiente (RIEMANN, 1962; STEINKRAUS E AYRES, 1964; GREENBERG ET AL. . 1966; e INSALATA ET AL. . 1968). 166
3. A resistência máxima para os esporos de *Clostridium botulinum* a 121,1 ºC pode ser representada por $D_{121,1} = 0,2$ min (ESTY E MEYER, 1922; TOWNSEND ET AL. , 1938; STUMBO, 1949; STUMBO ET AL. , 1950; XEZONES E HUTCHINS, 1965; STUMBO, 1973). 166
4. Valores de *z* — que caracterizam a variação da resistência térmica dos esporos de *Clostridium botulinum* com a temperatura — variando de 7,8 a 10 ºC (ESTY E MEYER, 1922; TOWSEND ET AL. , 1938; STUMBO ET AL. , 1950; XEZONES E HUTCHINS, 1965; STUMBO, 1973). 166
5. Uma probabilidade de falha de que uma em 10^4 latas poderá estar contaminada com esporos de bactérias mais resistentes que *Clostridium botulinum* (STUMBO ET AL. , 1975). 166
6. A população de esporos de bactérias mesofílicas mais resistentes que *Clostridium botulinum* antes da operação de esterilização também poderá ser no máximo de um esporo por grama de alimento contido no recipiente (RIEMANN, 1962; STEINKRAUS E AYRES, 1964; GREENBERG ET AL. . 1966; e INSALATA ET AL. . 1968). 166
7. A resistência máxima a 121,1 ºC para esses esporos mais resistentes pode ser representada por $D_{121,1} = 1,0$ a $1,5$ min (STUMBO, 1945; STUMBO ET AL. , 1945; STUMBO ET AL. , 1950 e SECRIST E STUMBO, 1956). 166
8. Os valores de *z* que caracterizam a variação da resistência térmica dos esporos de bactérias mesofílicas mais resistentes que *Clostridium botulinum* variando de 8,9 a 11,1 ºC (STUMBO ET AL. , 1950 e SECRIST E STUMBO, 1956). 166
Com base nestas hipóteses, STUMBO ET AL. (1975) propuseram a tabela 2.2 que fornece o valor mínimo de F_0 necessário para esterilizar alimentos de média acidez para os quais o microrganismo de referência é *Clostridium botulinum*. 167
A tabela 2.3 que fornece o valor de F_0 necessário para esterilizar alimentos de média acidez para os quais o microrganismo de referência é bactérias mesofílicas formadoras de esporos mais resistentes que *Clostridium botulinum* com moderado grau de segurança. 168
Finalmente, a tabela 2.4 que fornece o valor de F_0 necessário para esterilizar alimentos de média acidez para os quais o microrganismo de referência é uma bactéria mesofílica formadora de esporos mais resistentes que *Clostridium botulinum* com elevado grau de segurança. 169

O objetivo do presente método de trabalho é avaliar o melhor tratamento térmico para um dado conjunto alimento, embalagem e atributo crítico de qualidade. ... 170
Considerando que um processo VRT é capaz de melhorar a qualidade do alimento esterilizado em relação ao processo CRT (TEIXEIRA ET AL. (1975), SAGUY E KAREL (1979), BANGA ET AL. (1991) RAMASWAMY (2002) e YOSHIMI (2002)) — o problema a ser resolvido é determinar o melhor conjunto embalagem e perfil de temperatura da autoclave que resulte em uma melhoria significativa no atributo crítico de qualidade. 170
Na resolução do problema serão adotadas as seguintes hipóteses. 170
Analisando a figura 2.12 a avaliação do tratamento térmico será conduzida com base no seguinte conjunto de dados e equações. 171
Serão empregados três conjuntos de dados. Aqueles que caracterizam a cinética das transformações, a embalagem e a transferência de calor no alimento. 171
α Difusividade térmica do alimento ($m^2.s^{-1}$) 172
Considerando que o alimento se aquece por condução, as equações básicas são aquelas vistas no item 2.2.1, aqui apresentadas resumidamente e acrescidas de outras desenvolvidas especialmente para este trabalho. 172
Serão considerados apenas dois corpos infinitos básicos: a placa plana infinita e o cilindro infinito. 172

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) \exp(-\lambda_i^2 Fo) \qquad 2.4$$

..... 172
Nesta equação, ... 172

$$u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_o} \qquad A_i = \frac{2 sen\, \lambda_i}{\lambda_i + sen\, \lambda_i \cos \lambda_i}$$ 172

$$X = \frac{x}{r_m} \qquad Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2}$$ 172

λ_i representa a raiz i-ésima positiva da equação Bicotλ = λ, com $Bi = \frac{h r_m}{k}$. 172

$$u = \sum_{j=1}^{\infty} A_j J_o(\beta_j R) \exp(-\beta_j^2 Fo) \qquad 2.6$$

..... 173
Nesta equação, ... 173

$$u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} \qquad A_j = \frac{2 Bi^2}{(Bi^2 + \beta_j^2) \beta_j J_1(\beta_j)}$$ 173

$R = \frac{r}{r_m}$ $Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2}$ 173

β_j representa a raiz j-ésima positiva da equação $\beta J_1(\beta) = Bi J_0(\beta)$, com $Bi = \frac{h r_m}{k}$.

Sendo $J_n(x)$ a função de Bessel de primeira espécie e ordem n, que pode ser representada pela equação.....173

$$J_n(x) = \sum \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k!\,\Gamma(n+k+1)} \qquad 2.7$$

.....173

Serão consideradas apenas duas formas de recipientes: retangulares e cilíndricos. 173

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) A_j J_o(\beta_j R) \exp(-4\lambda_i^2 R_{ij} L) \qquad 2.8$$

.....173

Nesta equação,.....173

$R_{ij} = \frac{(d/l)^2 + (\beta_j/\lambda_i)^2}{(d/l)^2 + (\beta_1/\lambda_1)^2}$ $L = \frac{\alpha t}{S}$ 173

$S = \frac{d^2}{(d/l)^2 + (\beta_1/\lambda_1)^2}$ 174

Neste caso serão consideradas duas situações: o recipiente retangular de altura infinita e recipiente retangular com as três dimensões finitas. 174

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} A_i \cos\left(2\lambda_{ai}\frac{x}{a}\right) Aj \cos\left(2\lambda_{bj}\frac{x}{b}\right) \exp\left(-4R_{ij}L\right) \qquad 2.9$$

.....174

Nesta equação,.....174

$R_{ij} = \frac{\lambda_{ai}^2 b^2 + \lambda_{bj}^2 a^2}{\lambda_{a1}^2 b^2 + \lambda_{b1}^2 a^2}$ $L = \frac{\alpha t}{S}$ 174

$S = \frac{a^2 b^2}{\lambda_{a1}^2 b^2 + \lambda_{b1}^2 a^2}$ 174

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} A_i \cos(2\lambda_{ai}\frac{x}{a}) A_j \cos(2\lambda_{bj}\frac{y}{b}) A_k \cos(2\lambda_{ck}\frac{z}{c}) \exp(-4R_{ijk}L) \qquad 2.10$$

.....174

Nesta equação,.....174

$R_{ijk} = \dfrac{\lambda_{a1}{}^2 b^2 c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2 c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2 b^2}{\lambda_{ai}{}^2 b^2 c^2 + \lambda_{bj}{}^2 a^2 c^2 + \lambda_{ck}{}^2 a^2 b^2}$ 174

$L = \dfrac{\alpha t}{S}$ $\quad S = \dfrac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_{a1}{}^2 b^2 c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2 c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2 b^2}$ 174

Com base nas informações sobre os recipientes é possível selecionar a equação que permite prever a variação da temperatura em função do tempo..... 175

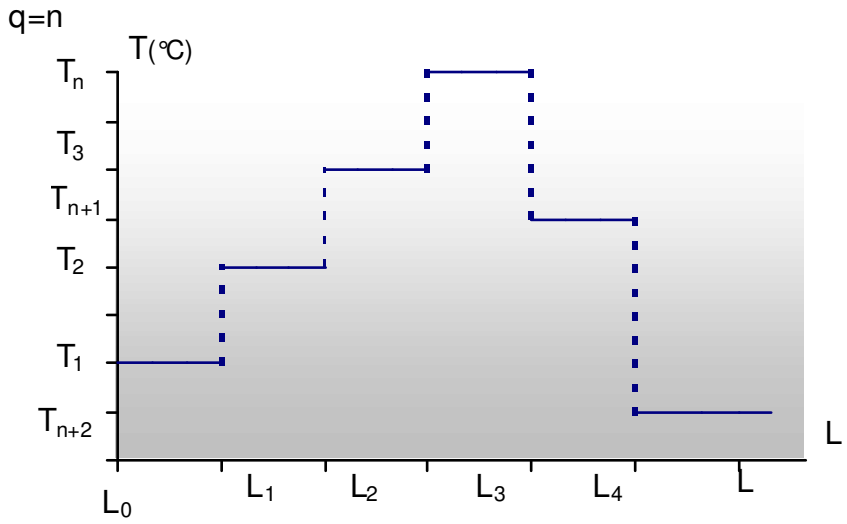
No caso de recipientes cilíndricos as seguintes condições são possíveis..... 175

- Caso $\dfrac{d}{h} < 0{,}25 \rightarrow$ Cilindro infinito. 175
- Caso $0{,}25 \leq \dfrac{d}{h} \leq 4{,}00 \rightarrow$ Cilindro finito..... 175
- Caso $\dfrac{d}{h} > 4{,}00 \rightarrow$ Placa plana infinita..... 175

No caso de recipientes paralelepipédicos, considerando que $c \geq b \geq a$, as seguintes condições são possíveis..... 175

- Caso $\dfrac{c}{a} \geq \dfrac{b}{a} > 4{,}00 \rightarrow$ placa plana infinita de espessura a..... 175
- Caso $\dfrac{c}{a} > 4{,}00$ e $\dfrac{b}{a} \leq 4{,}00 \rightarrow$ Paralelepípedo de seção retangular de dimensões a e b, e altura infinita..... 175
- Caso $4{,}00 > \dfrac{c}{a} > \dfrac{b}{a} \rightarrow$ paralelepípedo finito de dimensões (a, b, c)..... 175

Em se considerando o objetivo do presente trabalho, serão analisados dois tipos de tratamento térmico. O tratamento CRT, em que a temperatura da autoclave obedece ao modelo proposto na figura 2.1. Contraposto a este, será analisado o processo VRT em que a temperatura da autoclave obedece a um modelo do tipo apresentado na figura 3.1. Neste caso, para o intervalo de tempo L_t a temperatura da autoclave é mantida constante em uma temperatura T_m..... 175



.....176

Tanto no caso da figura 2.1, quanto no caso da figura 3.1, no resfriamento ou no segundo intervalo de tempo, a temperatura inicial do alimento não é mais constante. Para empregar as equações apresentadas no item anterior é necessário empregar a equação 2.23 proposta por HAYAKAWA E BALL (1969).....176

$$T = T_q + \sum_{i=1}^{q-1}(T_i - T_0)u(L - L_i) - \sum_{i=1}^{q}(T_i - T_0)u(L - L_{i-1}) \qquad 2.23$$

.....176

O apêndice A apresenta a forma de uso dessa equação. 176

No que diz respeito aos tratamentos térmicos foram selecionados dois conjuntos. Um para análise preliminar e outro para a análise final.....176

Em se considerando que há uma infinidade de processo VRT possíveis, foram selecionados dois tratamentos térmicos. No primeiro, a temperatura da autoclave foi mantida constante em 121,1ºC. No segundo, a temperatura da autoclave inicialmente foi mantida constante em 100ºC e aumentada sempre que a diferença de temperatura entre o ponto frio e a superfície se aproximava de 30ºC. Tanto no processo CRT quanto no VRT, o resfriamento foi conduzido mantendo a temperatura da água de resfriamento constante em 25ºC. 176

Os resultados obtidos nos tratamentos térmicos discutidos na análise preliminar — tratamentos apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 — serviram de base para se estabelecer o processo VRT para as próximas dimensões de embalagens. O procedimento adotado segue os seguintes passos: 177

Para a avaliação do tratamento térmico foi preparada uma planilha do Excel — ver apêndice B. Essa planilha permite calcular a variação da temperatura em função do tempo, para o ponto desejado, empregando-se as equações básicas apresentadas no item 3.3.2 e a equação 2.23. Com base nessa informação, calculou-se, na mesma planilha, o valor F_p do tratamento térmico empregando como temperatura de referência 121,1ºC. Neste caso, adotou-se como método numérico a técnica de divisão da área em trapézios retângulos de altura igual ao intervalo de tempo considerado. Uma vez que a precisão não era o fator limitante, adotou-se como intervalo de tempo 1 minuto. 177
Para cada tratamento térmico, o tempo de processamento foi determinado com base na esterilidade, impondo que o valor F_p do tratamento térmico referenciado ao microrganismo fosse igual ao valor F_M do microrganismo selecionado de acordo com os critérios propostos por STUMBO ET AL. (1975). 178
Tendo obtido a esterilidade desejada, determinou-se o valor F_p do tratamento térmico referenciado ao nutriente tanto para a temperatura do ponto frio, quanto para a temperatura do alimento em contato com a superfície da embalagem. .. 178
Serão analisadas as dimensões de embalagens cilíndricas encontradas no mercado. As embalagens paralelepipédicas serão selecionadas com base no volume das embalagens cilíndricas. 178
No que diz respeito à difusividade térmica serão adotados os valores extremos dessa propriedade encontrados na literatura $\left(1{,}2 \times 10^{-7}\, m^2/s \leq \alpha \leq 2{,}0 \times 10^{-7}\, m^2/s\right)$ e apresentados na tabela 3.1. 178
(Continua) 178
TABELA 3.1 – VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA ENCONTRADOS NA LITERATURA 178
Alimento 178
Difusividade Térmica (m^2/s) 178
Limitações 178
Fonte 178
Grãos de Milho 178
1,02 x 10-7 178
Umidade - 0,9 % 178
ASAE (2000) 178
Abacate 178
1,16 x 10-7 178

Umidade - 75,9% 178
ALVARADO (2001) 178
Hambúrguer 178
1,20 x 10-7 178
- 178
LEONHARDT (2003) 178
Uva 178
1,25 x 10-7 178
Umidade - 81,6% 178
ALVARADO (2001) 178
Maça 178
1,30 x 10-7 178
Umidade - 86,8% 178
ALVARADO (2001) 178
(Conclusão) 179
TABELA 3.1 – VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA ENCONTRADOS NA LITERATURA 179
Alimento 179
Difusividade Térmica (m^2/s) 179
Limitações 179
Fonte 179
Lima 179
1,32 x 10-7 179
Umidade - 90,1% 179
ALVARADO (2001) 179
Pepino 179
1,32 x 10-7 179
Umidade - 83,4% 179
ALVARADO (2001) 179
Polpa de Cupuaçu 179
1,32 x 10-7 179
9° Brix 179
ARAUJO ET AL (2004) 179
Papaia 179
1,33 x 10-7 179

Umidade - 89,5% 179
ALVARADO (2001) 179
Carne Vegetal 179
1,38 x 10-7 179
- 179
LEONHARDT (2003) 179
Goiaba 179
1,40 x 10-7 179
Umidade - 86,4% 179
ALVARADO (2001) 179
Batata 179
1,42 x 10-7 179
Umidade - 60 -70% 179
ALVARADO (2001) 179
Nêspera 179
1,42 x 10-7 179
Umidade - 86,6% 179
ALVARADO (2001) 179
Suco de Laranja 179
1,44 x 10-7 179
5° Brix 179
ROMERO ET AL (1998) 179
Batata Doce 179
1,47 x 10-7 179
Umidade - 60 -70% 179
ALVARADO (2001) 179
Morango 179
1,47 x 10-7 179
Umidade - 91,8% 179
ALVARADO (2001) 179
Ameixa 179
1,49 x 10-7 179
Umidade - 88,7% 179
ALVARADO (2001) 179

Nhame 179
1,50 x 10-7 179
Umidade - 65 -75% 179
ALVARADO (2001) 179
Tomate 179
1,50 x 10-7 179
Umidade - 94,9% 179
ALVARADO (2001) 179
Ensopado de Mariscos 179
1,53 x 10-7 179
- 179
LEONHARDT (2003) 179
Alimento Infantil 179
1,54 x 10-7 179
- 179
PINHO (2004) 179
Beterraba 179
1,54 x 10-7 179
Umidade - 55 -65% 179
ALVARADO (2001) 179
Laranja 179
1,56 x 10-7 179
Umidade - 85,3% 179
ALVARADO (2001) 179
Pêssego 179
1,57 x 10-7 179
Umidade - 87,4% 179
ALVARADO (2001) 179
Melão 179
1,59 x 10-7 179
Umidade - 93,7% 179
ALVARADO (2001) 179
Pinha 179
1,61 x 10-7 179

Umidade - 82,1% 179
ALVARADO (2001) 179
Massa de Tomate 179
1,65 x 10-7 179
18% de sólidos 179
CARBONERA ET AL (2003) 179
Polpa de Bacuri 179
1,67 x 10-7 179
15° Brix 179
MUNIZ ET AL (2006) 179
Pera 179
1,81 x 10-7 179
Umidade - 85,3% 179
ALVARADO (2001) 179
Purê de Ervilha 179
2,00 x 10-7 179
- 179
LEONHARDT (2003) 179
Salsicha 179
4,47 x 10-7 179
- 179
LEONHARDT (2003) 179
Patê de Camarão 179
9,20 x 10-8 179
- 179
LEONHARDT (2003) 179
Considerando que foram selecionados dois conjuntos de tratamentos térmicos, este capítulo também foi dividido em duas partes. No item 4.1 serão apresentados os resultados da análise preliminar, baseados no procedimento descrito no item 3.4.1.1. No item 4.2, serão apresentados os resultados baseados no procedimento descrito no item 3.4.1.2 180
Em se considerando que há uma infinidade de processos VRT possíveis para um conjunto alimento, embalagem e transformações selecionadas, selecionou-se uma embalagem — lata 202x204 —, um alimento — $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2/s$ — e um

microrganismo de referência — *Clostridium botulinum*. Para esse conjunto, inicialmente calculou-se o tempo de processamento para o processo CRT que foi usado como base para comparação com o processo VRT. 180
Para a lata cilíndrica 202x204 o valor F_M recomendado por STUMBO ET AL. (1975), tomando como microrganismo de referência o *Clostridium botulinum*, para alimentos que se aquecem por condução e mantida a temperatura da autoclave constante em 121,1ºC, é 3,49 min. Tendo em vista essa referência, no tratamento térmico CRT, trabalhando com intervalos de tempo de 1 minuto, obteve-se como resultado o processamento mostrado na figura 4.1. Para o tratamento térmico VRT, empregando-se o procedimento sugerido no item 3.4.1.1, obteve-se como resultado o processamento mostrado na figura 4.2. 180
Para esses dois processos calculou-se o valor F_p do tratamento térmico referenciado ao microrganismo, obtendo-se: $F_{pM} = 3{,}86$ min para o tratamento CRT e $F_{pM} = 4{,}34$ min para o tratamento VRT. A diferença encontrada é decorrência do fato de se ter efetuado o cálculo com intervalo de tempo de 1 minuto. 180
Calculando-se o F_p do tratamento térmico referenciado ao nutriente para o ponto frio e para a superfície do alimento em contato com a embalagem para os dois tratamentos, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 4.1. 180

..... 181
O resultado apresentado na tabela 4.1 contraria a informação de BANGA ET AL. (1991). Como se observa, apesar do tratamento térmico proporcionar uma melhoria de 53,2% no valor F_p do tratamento térmico do nutriente calculado no ponto frio e

de 21,7% no tempo de processamento, a qualidade do alimento em contato com a superfície piorou em 83,5%. Com base neste resultado procurou-se um terceiro tratamento térmico, empregando o processo VRT, em que o valor F_P do tratamento térmico referenciado ao nutriente e calculado para a superfície do alimento fosse, no mínino, igual àquele obtido no processo CRT mostrado na figura 4.1. 182
Em se considerando que o objetivo era reduzir o valor F_{PN} do tratamento térmico referente ao nutriente para a superfície do alimento em contato com a embalagem, era necessário escolher um tratamento térmico em que a temperatura da autoclave ficasse menos tempo em temperatura elevada. O tratamento térmico encontrado é mostrado na figura 4.3. 182

..... 183
No tratamento apresentado na figura 4.3, a temperatura inicial da autoclave é mais alta que a temperatura inicial no tratamento térmico apresentado na figura 4.2, mas, no final do processo, atinge valores mais baixos. Para esse tratamento, obteve-se $F_{PM} = 3{,}50$ min e $F_{PN} = 8{,}23$ min, ambos calculados no ponto central, empregando 121,1ºC como temperatura de referência. Para o alimento em contato com a superfície encontrou-se praticamente o mesmo resultado, ou seja, $F_{PN} = 24{,}0$ min. 183
Em relação ao tratamento CRT apresentado na figura 4.1, o tratamento mostrado na figura 4.3, apresentou uma redução no valor F_{PN}, calculado no ponto crítico, de 17,5% e, na superfície, houve um acréscimo de 4,17%. Além disso, houve uma redução no tempo de processamento de 23 min para 19 min, ou seja, de 17,4%. Esses resultados estão de acordo com o relatado na bibliografia (BANGA ET AL. (1991),

DURANCE ET AL. (1996), DURANCE (1997) e YOSHIMI (2002)), mostrando ser possível obter tratamentos térmicos que, além de reduzir o tempo de processamento, ainda melhore a qualidade final do alimento processado. 183
Os resultados obtidos no item anterior mostram que existem uma infinidade de processos VRT para um dado conjunto alimento, embalagem e microrganismo de referência. A existência de modelos matemáticos facilitam o processo de otimização. Uma vez que o objetivo é reduzir o tempo de processamento e o valor nutritivo do alimento em contato com a superfície, adotou-se a metodologia de análise proposta no item 3.4.1.2. 184
Para a lata cilíndrica 603x700 o valor F_M recomendado por STUMBO ET AL. (1975), tomando como microrganismo de referência o *Clostridium botulinum*, para alimentos que se aquecem por condução e mantida a temperatura da autoclave constante em 121,1ºC, é 5,81 min. Para esse conjunto, empregando intervalos de tempo de 1 minuto, obteve-se como resultado, para o tratamento CRT, o processamento mostrado na figura 4.4. Para o tratamento VRT obteve-se o resultado mostrado na figura 4.5. 184

..... 184

.....185

Para esses dois processos calculou-se o valor F_p do tratamento térmico referenciado ao microrganismo, obtendo-se: $F_{PM} = 5{,}91$ min para o tratamento CRT e $F_{PM} = 5{,}88$ min para o tratamento VRT. 185

Calculando-se o valor F_p do tratamento térmico, referenciado ao nutriente, para o ponto frio e para a superfície do alimento em contato com a embalagem, para os dois tratamentos, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 4.2. Como se observa, para o tratamento VRT houve uma redução no valor F_{PN} calculado no ponto crítico de 7,6% e na superfície de 3,4%, em relação ao tratamento CRT.....185

Para demonstrar a possibilidade de se obter tratamentos térmicos diferentes empregando a técnica VRT, obteve-se o tratamento térmico mostrado na figura 4.6 para a lata 603x700, obedecendo ao procedimento proposto no item 3.4.1.2. Para esse processo os resultados obtidos foram: $F_{PM} = 5{,}85\,\mathrm{min}$, valor F_{PN} avaliado para a temperatura central igual a 39,2 min e valor F_{PN} avaliado para a temperatura da superfície igual a 125,6 min. 186

.....186
O tempo de processamento encontrado, tanto na técnica CRT quanto na técnica VRT, para esse tamanho de lata cilíndrica, sugere a conveniência de se estudar o emprego de embalagens flexíveis. Consultando a Volpak, a embalagem flexível que fornece um volume compatível com o volume da lata 603x700 tem as dimensões: 22,6 cm por 31,5 cm e espessura de 4,3 cm — 3061 cm^3 contra 3069 cm^3 fornecidos pela lata. Para essa embalagem, o processo CRT que confere um valor $F_{PM} = 5{,}81\,\mathrm{min}$ é mostrado na figura 4.7. Para esse processo, o valor F_P referenciado ao nutriente, calculado para o ponto frio e para a superfície, é igual a $F_{PN} = 21{,}5\,\mathrm{min}$ e $F_{PN} = 50{,}0\,\mathrm{min}$, respectivamente. 186
A figura 4.8 apresenta um dos muitos processos VRT que podem ser empregados para a embalagem flexível selecionada. Para esse processo, o valor F_P referenciado ao microrganismo é igual 5,83 min. Já o valor F_P referenciado ao nutriente, calculado para o ponto frio e a superfície, é igual a $F_{PN} = 17{,}8\,\mathrm{min}$ e $F_{PN} = 48{,}5\,\mathrm{min}$, respectivamente. 187

.....187

.....188

Ao se procurar aplicar o procedimento proposto neste trabalho com um tamanho de lata intermediário, selecionou-se um quarto conjunto alimento, embalagem e transformações selecionadas: lata 300x407, $\alpha = 1{,}2 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$ e microrganismo de referência com $D_{121{,}1ºC} = 1{,}0\ \text{min}$ e $z = 10ºC$ — $F_{M121{,}1ºC} = 4{,}91\ \text{min}$. Para esse conjunto, o tratamento CRT é apresentado na figura 4.9 e o tratamento VRT, escolhido com base no procedimento sugerido no item 3.4.1.2, na figura 4.10. A tabela 4.3 apresenta o valor F_p calculado para os dois tratamentos térmicos.....188

.....189

.....189

Os resultados apresentados na tabela 4.3 mostram que é possível selecionar um processo VRT que melhore a retenção de nutriente do alimento em contato com a superfície da embalagem. 190

Os resultados obtidos com os quatro conjuntos: alimento, embalagem e transformações selecionadas, mostram que o modelo da difusão pode ser empregado para otimizar processos de esterilização de alimentos que empregam a técnica VRT de operação da autoclave. 190

O desenvolvimento de programas de computador que simulem o tratamento térmico e avaliem o seu efeito letal, facilitariam a otimização dos atuais processamentos térmicos. 190
Como pode ser observado, para os maiores tamanhos de latas cilíndricas o emprego de embalagens flexíveis permite reduzir o tempo de processamento em mais de 50%. 190
Confirmando o observado na bibliografia especializada, é possível, empregando a técnica VRT de operação da autoclave, melhorar o processo de esterilização de alimentos, mostrando que há muito que fazer na pesquisa de melhores tratamentos térmicos. 191
O sistema de análise proposto nesta dissertação, baseado nas equações integradas da difusão do calor, permite aperfeiçoar o tratamento térmico. 191
A técnica proposta pode servir de base para se estabelecer um método de simulação que permita melhorar ainda mais os atuais tratamentos. 191
O tamanho do recipiente influi diretamente na melhoria encontrada e o emprego de embalagens flexíveis contribui para reduzir o tempo de processamento em até 50%, melhorando a qualidade final do alimento conservado. 191
AIBA S.; HUMPHREY, A. E.; MILLIS, F. N. **Biochemical Engineering**. 2nd Ed. University of Tokio Press, p. 243. 1973 192
ALVARADO, J.D. **Metodos para Medir Propriedades Fisicas em Industrias de Alimentos**. 2001 192
ALVARADO, J.D. **Propriedades Fisicas da Fruta: Difusividad y Gravedad** Especifica. 2001 192
ANSARI, F.; ABBAS, K.; JAMILAH, B. An optimized method for thermal diffusivity measurement of peeled off fruits and vegetables. **Journal of Food, Agriculture & Environment**. 2009 192
ARAUJO, J.L., QUEIROZ, A.J.M., FIGUEIREDO, R.M.F. Propriedades Termofísicas da Polpa do Cupuaçu com Diferentes Teores de Sólidos. **Ciênc. Agrotec. Lavras**. 2004 192
ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **Agricultural Engineers Yearbook**. 2000 192
ÁVILA NETO, C. E OLIVEIRA, L. Simulação térmica de alimentos pré-empacotados. **Cong.Bras. Eng. Quím. em Iniciação Científica**. 2008 192

BALL, C.O. **Thermal process time for canned foods**. Bull. 37, Vol. 7, Part. 1. National Research council. Washington, D.C. USA. 1923.....192

DICKERSON, R.W. **Na Apparatus for the Measurement of Thermal Diffusivity of Foods**. 1965. 194

Ghazala, S.; Ramaswamy, H. S.; Smith, J. P. and Simpson, M. V. **Thermal process simulations for sous vide processing of fish and meat foods.** Aspen Publishers. 1989. 195

PINHO, C. R. G. Modelamento Matemático do Processo de Esterilização de Alimentos Condutivos em Embalagem de Vidro. Dissertação de Mestrado. Unicamp. 2004.....199

RAMASWAMY, H.S.; LO,K.V.; TUNG, M.A. Simplified equations for transient temperatures in conductive foods with convective heat transfer at the surface. **Journal of Food Science**, v47, p.2042-2047, 1982. 199

RAHN, O. Injury and death of Bacteria. Biodynamyca Monograph Nº 3. 1945.....200

RAHN, O. **Physical Methods of sterilization of microorganisms**. Bacteriol. 1945a Rev. 9, 1. 200

RIEDEL, L. Zur Theorie der Hitzesterilisierung von Dosenkonserven. Mitt. Kältetech. Inst. Karlsuhe. 1947 200

RIEDEL, L. Measurement of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. Kaltetechnit. 1969 200

RIEMANN , H. Anaerobe toxins. In: Chemical and Biological Hazards in Food. p 279, Iowa State Univ. Press. 1962 200

RODRIGUES ET AL. Comparação entre técnicas numéricas para a resolução do problema de transferência de calor em alimentos enlatados. **Ciênc. Tecnol. Aliment**. (online). 1998.....200

ROMERO ET AL. Termophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by temperature and Water Content. **Journal of Food Engineering**. 1998 200

SAGUY, I.; KAREL, M. Modeling of Quality Deterioration during Food Process. **Journal Food Technology**. 1979 200

SANTEN, N. VAN, De Warmteoverdrcht Naar Cylindervormige Blikken. M. Sc. thesis, Delft. Available at Technological University Delft. 1969 200

SCHMIDT, E. **Versuche zum Wärmeübergang bei Natürlicher Konvektion**. Chem. Ing. Technik. 28:175-180. 1956 200

SCHULTZ, O. T. AND OLSON, F. C. W. Thermal Processing of Canned Foods in Tin Containers. I. Variation of Rate With Can Size for Products Heating by Convection. **Food Research**, 3: 647-651. 1938 200

SCHWIND, R. G. AND G. C. VLIET, **Observation and Interpretation of Natural convection and Stratification in Vessels.** Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute: 51-68. 1964 200

SECRIST, J. L. AND STUMBO, C. R. Application of spore resistance in the newer methods of process evaluation. **Food Technol**. 10: 543. 1956 201

SNYDER JR., 0. P. America's "Safe" Food. Dairy, Food Environ. Sanitation. Vol 10 (12): 719-724. 1990.....201

STEINKRAUS, K. H. AND AYRES, J. C. Incidence of putrefactive anaerobic spores in meat. **J. Food Sci**. 29: 87. 1964 201

SEGERLIND, L.J. **Applied finite element analysis**. Publisher: Wiley. Pages: 422. 1976.201

SINGH, P. Thermal Diffusivity in Food Processing. **Food Technology**. 1982 201

SIMPSON, R., ARIS, Land TORRES, JA. 'Sterilization of conduction-heated foods in oval-shaped. **Journal Food Science**, 54, 1327 – 1331, 1363.1989.....201

STUMBO, C. R. Bacteriological studies relating to thermal processing of canned meats. **Food Research**, 1945 201

STUMBO, C. R. Thermobacteriology as applied to food processing. **Adv. Food Res**. 2:47. (1949) 201

STUMBO, CR. New procedures for evaluating thermal processes for foods in cylindrical containers, **Food Technol**. 1953.....201

STUMBO, C.R. **Thermobacterioly in Food Processing**. Academic Press, New York and London, p. 55. 1965.....201

TEIXEIRA, R.O. Comparação entre Técnicas Numéricas para a Resolução do Problema de Transferência de Calor em Alimentos Enlatados**. Ciência e Tecnologia de Alimentos**. 2006.....202

TEIXEIRA, ET AL. Experimental evaluation of mathematical and computer models for thermal process evaluation. **Journal of Food Science**, 1969 202

TEIXEIRA, A.A.; ZINMEISTER, G.E. AND ZAHRADNIK, J.W. Computer simulation of variable retort control and container geometry as a possible means of improving thiamin retention in thermally processed foods. **Journal of Food Science**, 40, 656-659. 1975 202

THIJSSEN, H.A.C. AND KOCHEN, L.H.P.J.M.. Calculation of optimum sterilization conditions for packed conduction-type foods. **Journal of Food Science**, 45, 1267-1292. 202

THOMPSON, G. E. Time-Temperature Relation in Canned Foods During Sterilization. **Ind. Eng Chem**. 11:657-664. 1919 202

THORNE, S. N. E JOWITT, R. Fluidized Bed Heating; the Influence of the outside Heat Transfer Coefficient on Sterilizing Value Process. Symposium Heat and Mass Transfer Problems in Food Engineering, Wageningen. 1972.....202

TOWSEND, C. T.; ESTY, J. R. AND BASELT, F. C. **Heat-resistance studies on spores of putrefactive anaerobes in relation to determination of safe processes for canned foods**. Food Res. 3:323. 1938 202

TUCKER, G. S.; CLARK, P. Modelling the cooling phase of heat sterilization processes, using heat transfer coefficients. International **Journal of Food Science and Technology**. v. 25, n. 6, p. 668-681, 1990.....203

VARGAS, S.; OLIVEIRA, J.; SMOUT, C.; HENDRICKX, M. Modeling Temperature Variability in Batch Retorts and its Impact on Lethality Distribuition. **Journal of Food Engennering**. 2000.....203

VARGAS, P; ZABALA, D.; RAMOS, A. Thermophysical property influence in model accuracy for the sterilization process. 11th WSEAS International Conference on Applied Mathematics. 2007 203

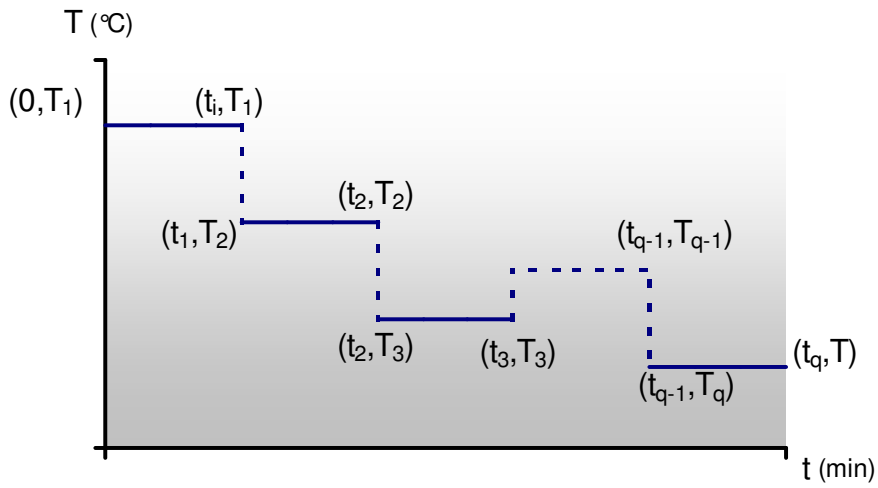
VARZAKAS, T.; LEACH, G.; ISRAILIDES, C.; ARAPOGLOU, D. Theorical and experimental approaches towards the determination of solute effective diffusivities in foods. Enzyme and Microbial Technology. 2005.....203

WELT, B.A. Explicit Finite Difference Methods for Heat Transfer Simulation and Thermal Process Design. **Journal of Food Science**, 1997 203

WIDEFF, K. J., POSSCHTOFF, P. G. E KOLEFF, D. C. **Mathematische Ermittlung der Temperature in Konserven**. Die Lebensmittel - Ind. 10:283-285. 1963 203

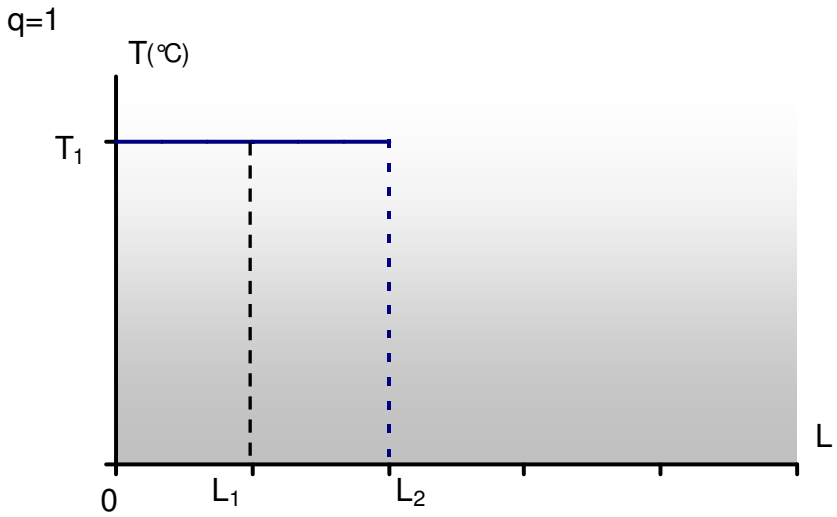
UNTERMANN, F. **Hygiene in meat production and processing**. Fleischwirtsch. 69 (6): 1026-1029. 1989.....203

XEZONES, H. AND HUTCHINGS, I. J. Thermal resistance of Clostridium botulinum (62A) spores as affected by fundamental food constituents. **Food Technol**. 19:1003. 1965 203



.....204

$$T = T_q + \sum_{i=1}^{q-1}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{q}(T_i - T_o)\mu(L - L_{i-1})$$ 204

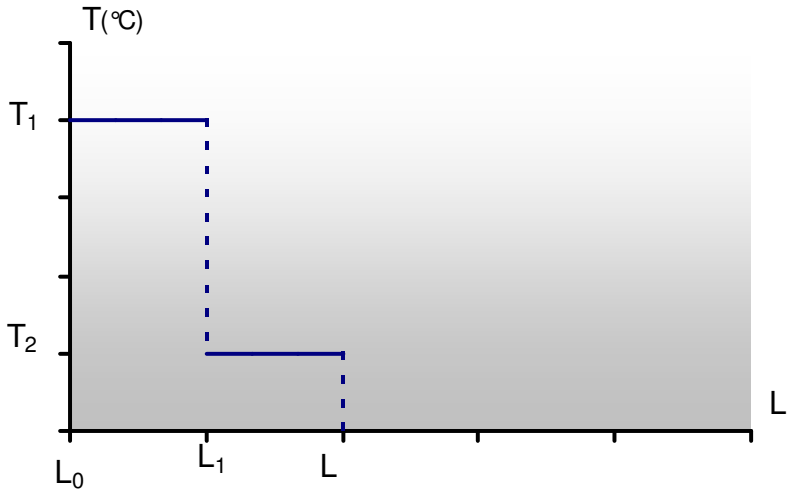


.....204

$$T = T_1 + \sum_{i=1}^{0}(T_1 - T_o)\mu(L - L_1) - \sum_{i=1}^{1}(T_1 - T_0)\mu(L - L_0)$$ 204

$$T = T_1 - (T_1 - T_0)\mu(L)$$

q=2



.....205

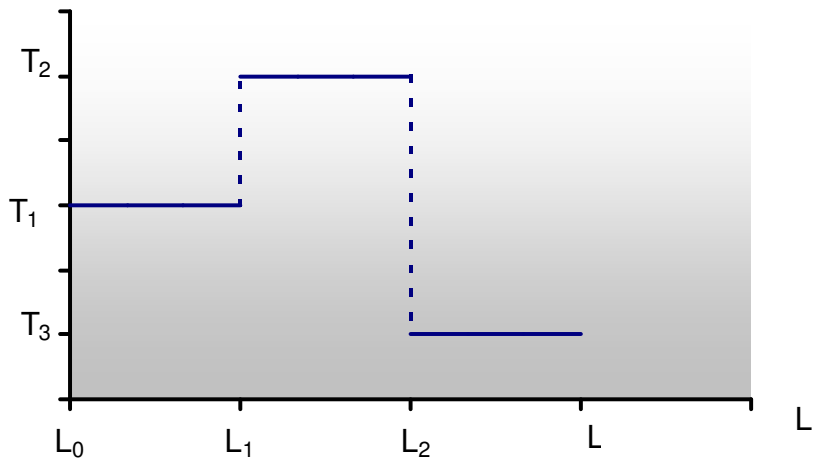
$$T = T_2 + \sum_{i=1}^{1}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{2}(T_i - T_0)\mu(L - L_{i-1})$$ 205

$$T = T_2 + (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) - (T_i - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1)$$ 205

$$T = T_2 + (T_1 - T0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$ 205

$$T = T_2 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$ 205

q=3



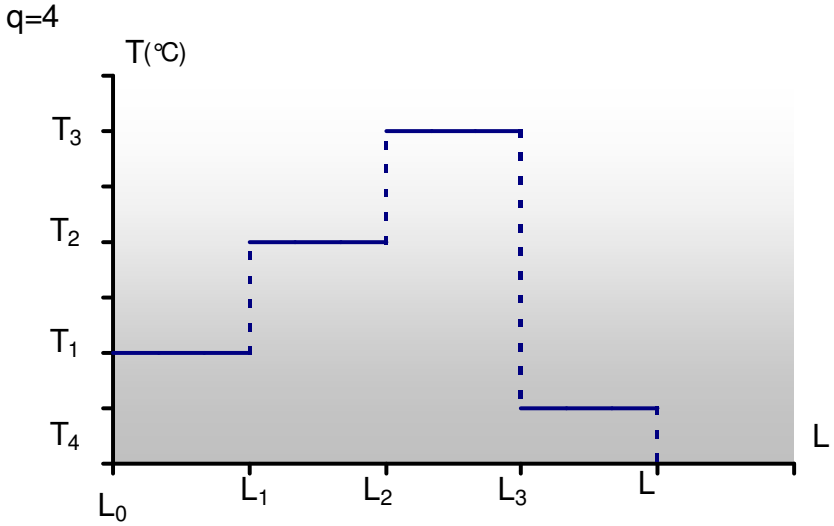
.....206

$$T = T_3 + \sum_{i=1}^{2}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{3}(T_1 - T_0)\mu(L - L_{i-1})$$ 206

$$T = T_3 + (T_1 - T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) - (T_3 - T_0)\mu(L - L_2)$$
.....206

$$T = T_3 + (T_1 - T_0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0 - T_3 + T_0)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L) \quad .....206$$

$$T = T_3 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L) \quad .....206$$



.....207

$$T = T_4 + \sum_{i=1}^{3}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{4}(T_i - T_0)\mu(L - L_{i-1}) \quad .....207$$

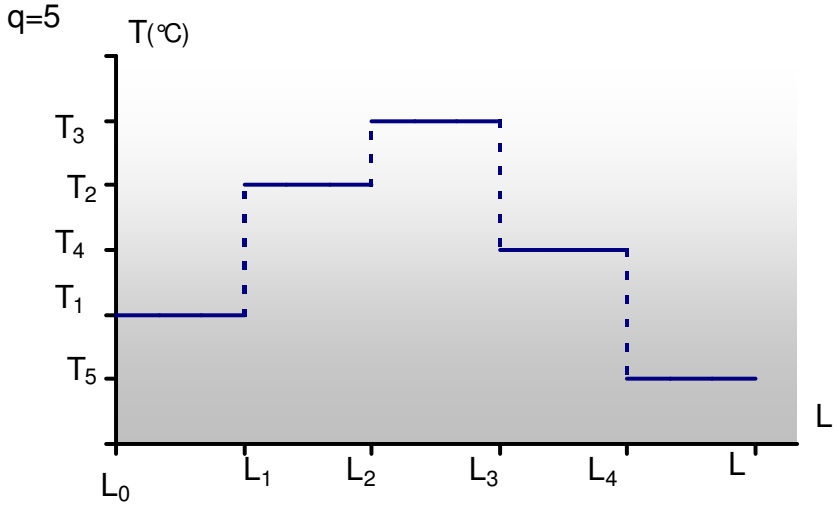
$$T = T_4 + (T_1 - T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_0)\mu(L - L_3) + \quad .....207$$

$$-(T_1 - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) - (T_3 - T_0)\mu(L - L_2) - (T_4 - T_0)\mu(L - L_3) \quad .....207$$

$$T = T_4 + (T_1 - T_0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0 - T_3 + T_0)\mu(L - L_2) + \quad .....207$$

$$+(T_2 - T_0 - T_1 + T_0)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L) \quad .....207$$

$$T = T_4 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_4)\mu(L - L_3) - (T_1 - T_0)\mu(L) \quad .....207$$



.....208

$$T = T_5 + \sum_{i=1}^{4}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{5}(T_i - T_0)\mu(L - L_{i-1})$$ 208

$$T = T_5 + (T_1 - T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_0)\mu(L - L_3) +$$ 208

$$+ (T_4 - T_0)\mu(L - L_4) - (T_1 - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) +$$ 208

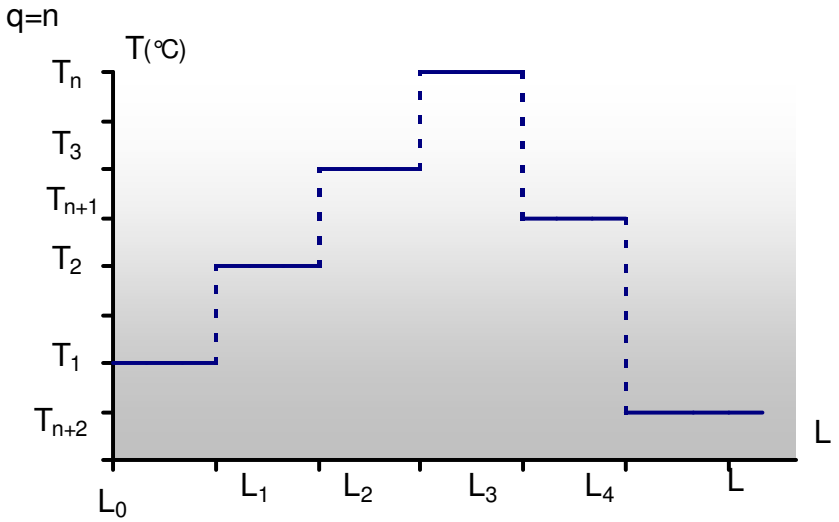
$$- (T_3 - T_0)\mu(L - L_2) - (T_4 - T_0)\mu(L - L_3) - (T_5 - T_0)\mu(L - L_4)$$ 208

$$T = T_5 + (T_1 - T_0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0 - T_3 + T_0)\mu(L - L_2) +$$ 208

$$+ (T_3 - T_0 - T_4 + T_0)\mu(L - L_3) + (T_4 - T_0 - T_5 - T_0)\mu(L - L_4) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$ 208

$$T = T_5 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_4)\mu(L - L_3) +$$ 208

$$+ (T_4 - T_5)\mu(L - L_4) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$ 208



.....209

$T = T_{n+2} + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) + ... +$ 209

$+ (T_n - T_{n+1})\mu(L - L_n) + (T_{n+1} - T_{n+2})\mu(L - L_{n+1}) - (T_2 - T_0)\mu(L)$ 209

Placa Plana Infinita 210

Bi.....210

λ_1 210

λ_2 210

λ_3 210

A_1 210

A_2 210

A_3 210

0,0000 210

0,0000 210

3,1416 210

6,2832 210

1,0000 210

0,0000 210

0,0000 210

0,0100 210

0,0998 210

3,1448 210

6,2848 210

1,0020 210

-0,0020 210
0,0004 210
0,1000 210
0,4328 210
3,2039 210
6,3148 210
1,0159 210
-0,0197 210
0,0050 210
1,0000 210
0,8603 210
3,4256 210
6,4373 210
1,1192 210
-0,1517 210
0,0466 210
10,0000 210
1,4289 210
4,3058 210
7,2281 210
1,2612 210
-0,3934 210
0,2104 210
100,0000 210
1,5552 210
4,6658 210
7,7764 210
1,2731 210
-0,4239 210
0,2539 210
1000,0000 210
1,5708 210
4,7124 210
7,8540 210

1,2732 210
-0,4244 210
0,2546 210
Cilindro Infinito 210
Bi 210
β_1 210
β_2 210
β_3 210
A_1 210
A_2 210
A_3 210
0,0000 210
0,0000 210
3,8317 210
7,0156 210
1,0000 210
0,0000 210
0,0000 210
0,0100 210
0,1412 210
3,8343 210
7,0170 210
1,0031 210
-0,0034 210
0,0013 210
0,1000 210
0,4417 210
3,8577 210
7,0298 210
1,0245 210
-0,0333 210
0,0135 210
1,0000 210
1,2588 210

4,0795 210
7,1558 210
1,2071 210
-0,2901 210
0,1298 210
10,0000 210
2,1795 210
5,0332 210
7,9569 210
1,5677 210
-0,9575 210
0,6784 210
100,0000 210
2,3809 210
5,4652 210
8,5678 210
1,6014 210
-1,0631 210
0,8505 210
1000,0000 210
2,4048 210
5,5201 210
8,6537 210
1,6021 210
-1,0648 210
0,8558 210
Dados Iniciais 210
Valor de Biot 210
1000,0000 210
Diâmetro do Cilindro (cm) 210
15,24 210
Altura da Placa (cm) 210
16,83 210
Relacao (d/h) 210

0,91 210
Raio de Medida (cm) 210
0,00 210
Plano de Medida (cm) 210
0,00 210
Difusividade Térmica (cm^2/min) 210
0,1200 210
Temperatura Inicial (ºC) 210
80,0 210
Intervalo de Tempo (min) 210
1,0 210
Temperatura do Meio 210
T_1 (°C) 210
115,0 210
T_2 (°C) 210
120,0 210
T_3 (°C) 210
125,0 210
T_4 (°C) 210
130,0 210
T_5 (°C) 210
100,0 210
T_6 (°C) 210
25,0 210
Microrganismo de referência 210
Valor z (°C) 210
10,0 210
Temperatura de referência (°C) 210
121,1 210
Valor F_0 (min) 210
5,81 210
Valor Fp (min) 210
5,77 210
Cálculos Preliminares 210

Placa Plana Infinita 210
Cilindro Infinito 210
Valor de λ_1 210
1,5708 210
Valor de β_1 210
2,4048 210
Valor de λ_2 210
4,7124 210
Valor de β_2 210
5,5201 210
Valor de λ_3 210
7,8540 210
Valor de β_3 210
8,6537 210
Valor de A_1 210
1,2732 210
Valor de A_1 210
1,6021 210
Valor de A_2 210
-0,4244 210
Valor de A_2 210
-1,0648 210
Valor de A_3 210
0,2546 210
Valor de A_3 210
0,8558 210
Valor de $\cos(\lambda_1 X)$ 210
1,0000 210
Valor de $Jo(\beta_1 R)$ 210
1,0000 210
Valor de $\cos(\lambda_2 X)$ 210
1,0000 210
Valor de $Jo(\beta_2 R)$ 210
1,0000 210

Valor de cos(λ_3X) 211
1,0000 211
Valor de Jo(β_3R) 211
1,0000 211
Cilindro Finito 211
Termo j 211
R1j 211
R2j 211
R3j 211
A1j 211
A2j 211
A3j 211
E1j 211
E2j 211
E3j 211
1 211
1,0000 211
0,3415 211
0,2888 211
2,040 211
-0,680 211
0,408 211
9,870 211
30,334 211
71,262 211
2 211
4,1626 211
0,6929 211
0,4153 211
-1,356 211
0,452 211
-0,271 211
41,084 211
61,548 211

102,476 211
3 211
9,8523 211
1,3251 211
0,6429 211
1,090 211
-0,363 211
0,218 211
97,239 211
117,703 211
158,631 211

Cálculo da Temperatura em Funcão do Tempo e Valor F_p											
	Placa Plana Infinita			Cilindro Infinito			Cilindro Finito				
Tempo	Fo	u	T	Fo	u	T	L	u	T	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,537	80,0	0,000	0,000
1	0,002	1,000	80,0	0,002	1,000	80,0	0,002	1,433	80,0	0,000	0,000
2	0,003	1,000	80,0	0,004	1,000	80,0	0,003	1,348	80,0	0,000	0,000
3	0,005	1,000	80,0	0,006	1,000	80,0	0,005	1,279	80,0	0,000	0,000
4	0,007	1,000	80,0	0,008	1,000	80,0	0,007	1,224	80,0	0,000	0,000
5	0,008	1,000	80,0	0,010	1,000	80,0	0,008	1,179	80,0	0,000	0,000
6	0,010	1,000	80,0	0,012	1,000	80,0	0,010	1,143	80,0	0,000	0,001
7	0,012	1,000	80,0	0,014	1,000	80,0	0,011	1,113	80,0	0,000	0,001
8	0,014	1,000	80,0	0,017	1,000	80,0	0,013	1,090	80,0	0,000	0,001
9	0,015	1,000	80,0	0,019	1,000	80,0	0,015	1,071	80,0	0,000	0,001
10	0,017	1,000	80,0	0,021	1,000	80,0	0,016	1,056	80,0	0,000	0,001
11	0,019	1,000	80,0	0,023	1,000	80,0	0,018	1,045	80,0	0,000	0,001
12	0,020	1,000	80,0	0,025	1,000	80,0	0,020	1,035	80,0	0,000	0,001
13	0,022	1,000	80,0	0,027	1,000	80,0	0,021	1,028	80,0	0,000	0,001
14	0,024	1,000	80,0	0,029	1,000	80,0	0,023	1,022	80,0	0,000	0,001
15	0,025	1,000	80,0	0,031	1,000	80,0	0,025	1,017	80,0	0,000	0,001
16	0,027	1,000	80,0	0,033	1,000	80,0	0,026	1,013	80,0	0,000	0,001
17	0,029	1,000	80,0	0,035	1,000	80,0	0,028	1,009	80,0	0,000	0,001
18	0,031	1,000	80,0	0,037	1,000	80,0	0,029	1,006	80,0	0,000	0,001
19	0,032	1,000	80,0	0,039	1,000	80,0	0,031	1,003	80,0	0,000	0,002
20	0,034	1,000	80,0	0,041	0,998	80,1	0,033	1,001	80,0	0,000	0,002
21	0,036	1,000	80,0	0,043	0,996	80,1	0,034	0,998	80,1	0,000	0,002
22	0,037	1,000	80,0	0,045	0,994	80,2	0,036	0,995	80,2	0,000	0,002
23	0,039	1,000	80,0	0,048	0,991	80,3	0,038	0,992	80,3	0,000	0,002
24	0,041	1,000	80,0	0,050	0,989	80,4	0,039	0,989	80,4	0,000	0,002
25	0,042	1,000	80,0	0,052	0,986	80,5	0,041	0,985	80,5	0,000	0,002
26	0,044	0,999	80,0	0,054	0,982	80,6	0,042	0,982	80,6	0,000	0,002
27	0,046	0,999	80,0	0,056	0,979	80,7	0,044	0,978	80,8	0,000	0,002
28	0,047	0,998	80,1	0,058	0,975	80,9	0,046	0,973	80,9	0,000	0,002
29	0,049	0,998	80,1	0,060	0,971	81,0	0,047	0,969	81,1	0,000	0,002
30	0,051	0,997	80,1	0,062	0,967	81,2	0,049	0,964	81,3	0,000	0,002
31	0,053	0,996	80,1	0,064	0,962	81,3	0,051	0,958	81,5	0,000	0,003
32	0,054	0,995	80,2	0,066	0,957	81,5	0,052	0,953	81,7	0,000	0,003
33	0,056	0,995	80,2	0,068	0,952	81,7	0,054	0,947	81,9	0,000	0,003
34	0,058	0,994	80,2	0,070	0,946	81,9	0,056	0,940	82,1	0,000	0,003
35	0,059	0,993	80,3	0,072	0,941	82,1	0,057	0,934	82,3	0,000	0,003
36	0,061	0,992	80,3	0,074	0,935	82,3	0,059	0,927	82,6	0,000	0,003
37	0,063	0,991	80,3	0,076	0,929	82,5	0,060	0,920	82,8	0,000	0,003
38	0,064	0,989	80,4	0,079	0,922	82,7	0,062	0,913	83,1	0,000	0,004
39	0,066	0,988	80,4	0,081	0,916	82,9	0,064	0,905	83,3	0,000	0,004
40	0,068	0,987	80,5	0,083	0,909	83,2	0,065	0,897	83,6	0,000	0,004
41	0,069	0,985	80,5	0,085	0,902	83,4	0,067	0,889	83,9	0,000	0,004
42	0,071	0,984	80,6	0,087	0,895	83,7	0,069	0,881	84,2	0,000	0,004
43	0,073	0,982	80,6	0,089	0,888	83,9	0,070	0,873	84,5	0,000	0,004
44	0,075	0,981	80,7	0,091	0,881	84,2	0,072	0,864	84,8	0,000	0,005
45	0,076	0,979	80,7	0,093	0,874	84,4	0,074	0,856	85,1	0,000	0,005
46	0,078	0,977	80,8	0,095	0,866	84,7	0,075	0,847	85,4	0,000	0,005
47	0,080	0,976	80,9	0,097	0,859	84,9	0,077	0,838	85,7	0,000	0,006
48	0,081	0,974	80,9	0,099	0,851	85,2	0,078	0,829	86,0	L_2	L_2-L_1

48	L_2	L_2-L_1	u(L_2-L_1)	u(L_2)	T(ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
49	0,080	0,002	1,433	0,820	86,3	0,000	0,000
50	0,082	0,003	1,348	0,811	86,6	0,000	0,001
51	0,083	0,005	1,279	0,802	86,9	0,000	0,001
52	0,085	0,007	1,224	0,792	87,3	0,000	0,001
53	0,087	0,008	1,179	0,783	87,6	0,000	0,002
54	0,088	0,010	1,143	0,774	87,9	0,000	0,002
55	0,090	0,011	1,113	0,764	88,2	0,001	0,003
56	0,092	0,013	1,090	0,755	88,6	0,001	0,003
57	0,093	0,015	1,071	0,746	88,9	0,001	0,004
58	0,095	0,016	1,056	0,736	89,2	0,001	0,005
59	0,096	0,018	1,045	0,727	89,6	0,001	0,005
60	0,098	0,020	1,035	0,718	89,9	0,001	0,006
61	0,100	0,021	1,028	0,708	90,2	0,001	0,007
62	0,101	0,023	1,022	0,699	90,5	0,001	0,008
63	0,103	0,025	1,017	0,690	90,9	0,001	0,009
64	0,105	0,026	1,013	0,680	91,2	0,001	0,010
65	0,106	0,028	1,009	0,671	91,5	0,001	0,011
66	0,108	0,029	1,006	0,662	91,8	0,001	0,012
67	0,110	0,031	1,003	0,653	92,1	0,001	0,013
68	0,111	0,033	1,001	0,644	92,5	0,001	0,015
69	0,113	0,034	0,998	0,635	92,8	0,001	0,016
70	0,114	0,036	0,995	0,626	93,1	0,002	0,018
71	0,116	0,038	0,992	0,618	93,4	0,002	0,019
72	0,118	0,039	0,989	0,609	93,7	0,002	0,021
73	0,119	0,041	0,985	0,600	94,1	0,002	0,023
74	0,121	0,042	0,982	0,592	94,4	0,002	0,025
75	0,123	0,044	0,978	0,583	94,7	0,002	0,028
76	0,124	0,046	0,973	0,575	95,0	0,002	0,030
77	0,126	0,047	0,969	0,567	95,3	0,003	0,033
78	0,127	0,049	0,964	0,558	95,6	0,003	0,036
79	0,129	0,051	0,958	0,550	96,0	0,003	0,039
80	0,131	0,052	0,953	0,542	96,3	0,003	0,042
81	0,132	0,054	0,947	0,534	96,6	0,004	0,045
82	0,134	0,056	0,940	0,526	96,9	0,004	0,051
83	0,136	0,057	0,934	0,519	97,2	L_3	L_3-L_1

.....212

83	L_3	L_3-L_1	L_3-L_2	u(L_3- L_1)	u(L_3-L_2)	u(L_3)	T(ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
84	0,137	0,059	0,002	0,927	1,433	0,511	97,5	0,004	0,002
85	0,139	0,060	0,003	0,920	1,348	0,503	97,8	0,005	0,007
86	0,141	0,062	0,005	0,913	1,279	0,496	98,1	0,005	0,012
87	0,142	0,064	0,007	0,905	1,224	0,488	98,4	0,005	0,017
88	0,144	0,065	0,008	0,897	1,179	0,481	98,7	0,006	0,023
89	0,145	0,067	0,010	0,889	1,143	0,474	99,0	0,006	0,029
90	0,147	0,069	0,011	0,881	1,113	0,467	99,3	0,007	0,036
91	0,149	0,070	0,013	0,873	1,090	0,459	99,6	0,007	0,043
92	0,150	0,072	0,015	0,864	1,071	0,453	99,8	0,007	0,050
93	0,152	0,074	0,016	0,856	1,056	0,446	100,1	0,008	0,058
94	0,154	0,075	0,018	0,847	1,045	0,439	100,4	0,009	0,067
95	0,155	0,077	0,020	0,838	1,035	0,432	100,7	0,009	0,076
96	0,157	0,078	0,021	0,829	1,028	0,426	101,0	0,010	0,085
97	0,159	0,080	0,023	0,820	1,022	0,419	101,2	0,010	0,096
98	0,160	0,082	0,025	0,811	1,017	0,413	101,5	0,011	0,107
99	0,162	0,083	0,026	0,802	1,013	0,406	101,8	0,012	0,118
100	0,163	0,085	0,028	0,792	1,009	0,400	102,0	0,012	0,131
101	0,165	0,087	0,029	0,783	1,006	0,394	102,3	0,013	0,144
102	0,167	0,088	0,031	0,774	1,003	0,388	102,6	0,014	0,158
103	0,168	0,090	0,033	0,764	1,001	0,382	102,8	0,015	0,173
104	0,170	0,092	0,034	0,755	0,998	0,376	103,1	0,016	0,189
105	0,172	0,093	0,036	0,746	0,995	0,370	103,3	0,017	0,205
106	0,173	0,095	0,038	0,736	0,992	0,364	103,6	0,018	0,223
107	0,175	0,096	0,039	0,727	0,989	0,359	103,9	0,019	0,252

.....213

108	L_4	L_4-L_1	L_4-L_2	L_4-L_3	u(L_4-L_1)	u(L_4-L_2)	u(L_4-L_3)	u(L_4)	T (ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
109	0,178	0,100	0,042	0,002	0,708	0,982	1,433	0,348	104,4	0,021	0,011
110	0,180	0,101	0,044	0,003	0,699	0,978	1,348	0,342	104,6	0,023	0,033
111	0,181	0,103	0,046	0,005	0,690	0,973	1,279	0,337	104,9	0,024	0,057
112	0,183	0,105	0,047	0,007	0,680	0,969	1,224	0,331	105,2	0,025	0,083
113	0,185	0,106	0,049	0,008	0,671	0,964	1,179	0,326	105,4	0,027	0,110
114	0,186	0,108	0,051	0,010	0,662	0,958	1,143	0,321	105,7	0,029	0,138
115	0,188	0,110	0,052	0,011	0,653	0,953	1,113	0,316	105,9	0,030	0,168
116	0,190	0,111	0,054	0,013	0,644	0,947	1,090	0,311	106,2	0,032	0,200
117	0,191	0,113	0,056	0,015	0,635	0,940	1,071	0,306	106,4	0,034	0,252
118	0,193	0,114	0,057	0,016	0,626	0,934	1,056	0,302	106,6	L_5	L_5-L_1

.....213

118	L_5	L_5-L_1	L_5-L_2	L_5-L_3	L_5-L_4	u(L_5-L_1)	u(L_5-L_2)	u(L_5-L_3)	u(L_5-L_4)	u(L_5)	T (ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
119	0,195	0,116	0,059	0,018	0,002	0,618	0,927	1,045	1,433	0,297	106,7	0,036	0,018
120	0,196	0,118	0,060	0,020	0,003	0,609	0,920	1,035	1,348	0,292	107,0	0,039	0,057
121	0,198	0,119	0,062	0,021	0,005	0,600	0,913	1,028	1,279	0,288	107,2	0,041	0,098
122	0,199	0,121	0,064	0,023	0,007	0,592	0,905	1,022	1,224	0,283	107,5	0,044	0,141
123	0,201	0,123	0,065	0,025	0,008	0,583	0,897	1,017	1,179	0,279	107,8	0,046	0,188
124	0,203	0,124	0,067	0,026	0,010	0,575	0,889	1,013	1,143	0,274	108,0	0,049	0,237
125	0,204	0,126	0,069	0,028	0,011	0,567	0,881	1,009	1,113	0,270	108,3	0,052	0,289
126	0,206	0,127	0,070	0,029	0,013	0,558	0,873	1,006	1,090	0,266	108,5	0,055	0,344
127	0,208	0,129	0,072	0,031	0,015	0,550	0,864	1,003	1,071	0,261	108,8	0,058	0,403
128	0,209	0,131	0,074	0,033	0,016	0,542	0,856	1,001	1,056	0,257	109,0	0,062	0,464
129	0,211	0,132	0,075	0,034	0,018	0,534	0,847	0,998	1,045	0,253	109,2	0,065	0,530
130	0,212	0,134	0,077	0,036	0,020	0,526	0,838	0,995	1,035	0,249	109,5	0,069	0,598
131	0,214	0,136	0,078	0,038	0,021	0,519	0,829	0,992	1,028	0,245	109,7	0,073	0,671
132	0,216	0,137	0,080	0,039	0,023	0,511	0,820	0,989	1,022	0,241	110,0	0,077	0,748
133	0,217	0,139	0,082	0,041	0,025	0,503	0,811	0,985	1,017	0,238	110,2	0,081	0,829
134	0,219	0,141	0,083	0,042	0,026	0,496	0,802	0,982	1,013	0,234	110,4	0,086	0,915
135	0,221	0,142	0,085	0,044	0,028	0,488	0,792	0,978	1,009	0,230	110,7	0,090	1,005
136	0,222	0,144	0,087	0,046	0,029	0,481	0,783	0,973	1,006	0,226	110,9	0,095	1,100
137	0,224	0,145	0,088	0,047	0,031	0,474	0,774	0,969	1,003	0,223	111,1	0,100	1,201
138	0,226	0,147	0,090	0,049	0,033	0,467	0,764	0,964	1,001	0,219	111,4	0,106	1,307
139	0,227	0,149	0,092	0,051	0,034	0,459	0,755	0,958	0,998	0,216	111,5	0,110	1,417
140	0,229	0,150	0,093	0,052	0,036	0,453	0,746	0,953	0,995	0,212	111,7	0,114	1,531
141	0,230	0,152	0,095	0,054	0,038	0,446	0,736	0,947	0,992	0,209	111,8	0,118	1,648
142	0,232	0,154	0,096	0,056	0,039	0,439	0,727	0,940	0,989	0,206	111,9	0,121	1,770
143	0,234	0,155	0,098	0,057	0,041	0,432	0,718	0,934	0,985	0,202	112,1	0,125	1,894
144	0,235	0,157	0,100	0,059	0,042	0,426	0,708	0,927	0,982	0,199	112,2	0,128	2,023
145	0,237	0,159	0,101	0,060	0,044	0,419	0,699	0,920	0,978	0,196	112,3	0,131	2,154
146	0,239	0,160	0,103	0,062	0,046	0,413	0,690	0,913	0,973	0,193	112,4	0,134	2,288
147	0,240	0,162	0,105	0,064	0,047	0,406	0,680	0,905	0,969	0,190	112,5	0,137	2,493

.....213

148	L_6	L_6-L_1	L_6-L_2	L_6-L_3	L_6-L_4	L_6-L_5	u(L_6-L_1)	u(L_6-L_2)	u(L_6-L_3)	u(L_6-L_4)	u(L_6-L_5)	u(L_6)	T (ºC)	$10^{(T-To)/z}$	F_p (min)
149	0,244	0,165	0,108	0,067	0,051	0,003	0,394	0,662	0,889	0,958	1,348	0,184	112,6	0,141	0,070
150	0,245	0,167	0,110	0,069	0,052	0,005	0,388	0,653	0,881	0,953	1,279	0,181	112,6	0,142	0,213
151	0,247	0,168	0,111	0,070	0,054	0,007	0,382	0,644	0,873	0,947	1,224	0,178	112,7	0,144	0,357
152	0,248	0,170	0,113	0,072	0,056	0,008	0,376	0,635	0,864	0,940	1,179	0,175	112,7	0,145	0,501
153	0,250	0,172	0,114	0,074	0,057	0,010	0,370	0,626	0,856	0,934	1,143	0,172	112,7	0,145	0,647
154	0,252	0,173	0,116	0,075	0,059	0,011	0,364	0,618	0,847	0,927	1,113	0,170	112,7	0,146	0,792
155	0,253	0,175	0,118	0,077	0,060	0,013	0,359	0,609	0,838	0,920	1,090	0,167	112,7	0,145	0,938
156	0,255	0,177	0,119	0,078	0,062	0,015	0,353	0,600	0,829	0,913	1,071	0,164	112,7	0,145	1,083
157	0,257	0,178	0,121	0,080	0,064	0,016	0,348	0,592	0,820	0,905	1,056	0,162	112,7	0,144	1,227
158	0,258	0,180	0,123	0,082	0,065	0,018	0,342	0,583	0,811	0,897	1,045	0,159	112,7	0,143	1,371
159	0,260	0,181	0,124	0,083	0,067	0,020	0,337	0,575	0,802	0,889	1,035	0,157	112,6	0,142	1,513
160	0,262	0,183	0,126	0,085	0,069	0,021	0,331	0,567	0,792	0,881	1,028	0,154	112,6	0,141	1,654
161	0,263	0,185	0,127	0,087	0,070	0,023	0,326	0,558	0,783	0,873	1,022	0,152	112,5	0,139	1,723
162	0,265	0,186	0,129	0,088	0,072	0,025	0,321	0,550	0,774	0,864	1,017	0,149	112,5	0,137	1,792
163	0,266	0,188	0,131	0,090	0,074	0,026	0,316	0,542	0,764	0,856	1,013	0,147	112,4	0,135	1,860
164	0,268	0,190	0,132	0,092	0,075	0,028	0,311	0,534	0,755	0,847	1,009	0,144	112,3	0,133	1,926
165	0,270	0,191	0,134	0,093	0,077	0,029	0,306	0,526	0,746	0,838	1,006	0,142	112,3	0,131	1,992
166	0,271	0,193	0,136	0,095	0,078	0,031	0,302	0,519	0,736	0,829	1,003	0,140	112,2	0,129	2,056
167	0,273	0,195	0,137	0,096	0,080	0,033	0,297	0,511	0,727	0,820	1,001	0,138	112,1	0,126	2,119
168	0,275	0,196	0,139	0,098	0,082	0,034	0,292	0,503	0,718	0,811	0,998	0,135	111,9	0,119	2,179
169	0,276	0,198	0,141	0,100	0,083	0,036	0,288	0,496	0,708	0,802	0,995	0,133	111,6	0,111	2,234
170	0,278	0,199	0,142	0,101	0,085	0,038	0,283	0,488	0,699	0,792	0,992	0,131	111,2	0,103	2,286
171	0,280	0,201	0,144	0,103	0,087	0,039	0,279	0,481	0,690	0,783	0,989	0,129	110,9	0,095	2,333
172	0,281	0,203	0,145	0,105	0,088	0,041	0,274	0,474	0,680	0,774	0,985	0,127	110,5	0,088	2,377
173	0,283	0,204	0,147	0,106	0,090	0,042	0,270	0,467	0,671	0,764	0,982	0,125	110,1	0,080	2,417
174	0,284	0,206	0,149	0,108	0,092	0,044	0,266	0,459	0,662	0,755	0,978	0,123	109,7	0,073	2,454
175	0,286	0,208	0,150	0,110	0,093	0,046	0,261	0,453	0,653	0,746	0,973	0,121	109,3	0,066	2,487
176	0,288	0,209	0,152	0,111	0,095	0,047	0,257	0,446	0,644	0,736	0,969	0,119	108,8	0,059	2,516
177	0,289	0,211	0,154	0,113	0,096	0,049	0,253	0,439	0,635	0,727	0,964	0,117	108,3	0,053	2,543
178	0,291	0,212	0,155	0,114	0,098	0,051	0,249	0,432	0,626	0,718	0,958	0,115	107,8	0,047	2,566
179	0,293	0,214	0,157	0,116	0,100	0,052	0,245	0,426	0,618	0,708	0,953	0,114	107,3	0,042	2,587
180	0,294	0,216	0,159	0,118	0,101	0,054	0,241	0,419	0,609	0,699	0,947	0,112	106,7	0,036	2,605
181	0,296	0,217	0,160	0,119	0,103	0,056	0,238	0,413	0,600	0,690	0,940	0,110	106,1	0,032	2,621
182	0,297	0,219	0,162	0,121	0,105	0,057	0,234	0,406	0,592	0,680	0,934	0,108	105,5	0,028	2,635
183	0,299	0,221	0,163	0,123	0,106	0,059	0,230	0,400	0,583	0,671	0,927	0,106	104,9	0,024	2,647
184	0,301	0,222	0,165	0,124	0,108	0,060	0,226	0,394	0,575	0,662	0,920	0,105	104,2	0,021	2,657
185	0,302	0,224	0,167	0,126	0,110	0,062	0,223	0,388	0,567	0,653	0,913	0,103	103,6	0,018	2,666
186	0,304	0,226	0,168	0,127	0,111	0,064	0,219	0,382	0,558	0,644	0,905	0,101	102,9	0,015	2,673
187	0,306	0,227	0,170	0,129	0,113	0,065	0,216	0,376	0,550	0,635	0,897	0,100	102,2	0,013	2,680
188	0,307	0,229	0,172	0,131	0,114	0,067	0,212	0,370	0,542	0,626	0,889	0,098	101,4	0,011	2,685
189	0,309	0,230	0,173	0,132	0,116	0,069	0,209	0,364	0,534	0,618	0,881	0,097	100,7	0,009	2,690
190	0,311	0,232	0,175	0,134	0,118	0,070	0,206	0,359	0,526	0,609	0,873	0,095	99,9	0,008	2,694
191	0,312	0,234	0,177	0,136	0,119	0,072	0,202	0,353	0,519	0,600	0,864	0,094	99,2	0,006	2,697
192	0,314	0,235	0,178	0,137	0,121	0,074	0,199	0,348	0,511	0,592	0,856	0,092	98,4	0,005	2,700
193	0,315	0,237	0,180	0,139	0,123	0,075	0,196	0,342	0,503	0,583	0,847	0,091	97,6	0,005	2,702
194	0,317	0,239	0,181	0,141	0,124	0,077	0,193	0,337	0,496	0,575	0,838	0,089	96,8	0,004	2,704
195	0,319	0,240	0,183	0,142	0,126	0,078	0,190	0,331	0,488	0,567	0,829	0,088	96,1	0,003	2,705
196	0,320	0,242	0,185	0,144	0,127	0,080	0,187	0,326	0,481	0,558	0,820	0,086	95,3	0,003	2,707
197	0,322	0,244	0,186	0,145	0,129	0,082	0,184	0,321	0,474	0,550	0,811	0,085	94,4	0,002	2,708
198	0,324	0,245	0,188	0,147	0,131	0,083	0,181	0,316	0,467	0,542	0,802	0,084	93,6	0,002	2,709
199	0,325	0,247	0,190	0,149	0,132	0,085	0,178	0,311	0,459	0,534	0,792	0,082	92,8	0,001	2,709
200	0,327	0,248	0,191	0,150	0,134	0,087	0,175	0,306	0,453	0,526	0,783	0,081	92,0	0,001	2,710
201	0,329	0,250	0,193	0,152	0,136	0,088	0,172	0,302	0,446	0,519	0,774	0,080	91,2	0,001	2,710
202	0,330	0,252	0,195	0,154	0,137	0,090	0,170	0,297	0,439	0,511	0,764	0,078	90,4	0,001	2,711
203	0,332	0,253	0,196	0,155	0,139	0,092	0,167	0,292	0,432	0,503	0,755	0,077	89,6	0,001	2,711
204	0,333	0,255	0,198	0,157	0,141	0,093	0,164	0,288	0,426	0,496	0,746	0,076	88,7	0,001	2,711
205	0,335	0,257	0,199	0,159	0,142	0,095	0,162	0,283	0,419	0,488	0,736	0,075	87,9	0,000	2,712
206	0,337	0,258	0,201	0,160	0,144	0,096	0,159	0,279	0,413	0,481	0,727	0,073	87,1	0,000	2,712
207	0,338	0,260	0,203	0,162	0,145	0,098	0,157	0,274	0,406	0,474	0,718	0,072	86,3	0,000	2,712
208	0,340	0,262	0,204	0,163	0,147	0,100	0,154	0,270	0,400	0,467	0,708	0,071	85,5	0,000	2,712
209	0,342	0,263	0,206	0,165	0,149	0,101	0,152	0,266	0,394	0,459	0,699	0,070	84,7	0,000	2,712
210	0,343	0,265	0,208	0,167	0,150	0,103	0,149	0,261	0,388	0,453	0,690	0,069	83,9	0,000	2,712
211	0,345	0,266	0,209	0,168	0,152	0,105	0,147	0,257	0,382	0,446	0,680	0,068	83,1	0,000	2,712
212	0,347	0,268	0,211	0,170	0,154	0,106	0,144	0,253	0,376	0,439	0,671	0,067	82,3	0,000	2,713
213	0,348	0,270	0,212	0,172	0,155	0,108	0,142	0,249	0,370	0,432	0,662	0,066	81,5	0,000	2,713
214	0,350	0,271	0,214	0,173	0,157	0,110	0,140	0,245	0,364	0,426	0,653	0,065	80,7	0,000	2,713
215	0,351	0,273	0,216	0,175	0,159	0,111	0,138	0,241	0,359	0,419	0,644	0,064	80,0	0,000	2,713
216	0,353	0,275	0,217	0,177	0,160	0,113	0,135	0,238	0,353	0,413	0,635	0,063	79,2	0,000	2,713
217	0,355	0,276	0,219	0,178	0,162	0,114	0,133	0,234	0,348	0,406	0,626	0,062	78,4	0,000	2,713
218	0,356	0,278	0,221	0,180	0,163	0,116	0,131	0,230	0,342	0,400	0,618	0,061	77,7	0,000	2,713

.....215

Placa Plana Infinita 216

Bi.....216

λ_1 216

λ_2 216

λ_3 216

A_1 216

A_2 216

A_3 216

0,0000 216

0,0000 216
3,1416 216
6,2832 216
1,0000 216
0,0000 216
0,0000 216
0,0100 216
0,0998 216
3,1448 216
6,2848 216
1,0020 216
-0,0020 216
0,0004 216
0,1000 216
0,4328 216
3,2039 216
6,3148 216
1,0159 216
-0,0197 216
0,0050 216
1,0000 216
0,8603 216
3,4256 216
6,4373 216
1,1192 216
-0,1517 216
0,0466 216
10,0000 216
1,4289 216
4,3058 216
7,2281 216
1,2612 216
-0,3934 216
0,2104 216

100,0000 216
1,5552 216
4,6658 216
7,7764 216
1,2731 216
-0,4239 216
0,2539 216
1000,0000 216
1,5708 216
4,7124 216
7,8540 216
1,2732 216
-0,4244 216
0,2546 216
Cilindro infinito 216
Bi 216
β_1 216
β_2 216
β_3 216
A_1 216
A_2 216
A_3 216
0,0000 216
0,0000 216
3,8317 216
7,0156 216
1,0000 216
0,0000 216
0,0000 216
0,0100 216
0,1412 216
3,8343 216
7,0170 216
1,0031 216

-0,0034 216
0,0013 216
0,1000 216
0,4417 216
3,8577 216
7,0298 216
1,0245 216
-0,0333 216
0,0135 216
1,0000 216
1,2588 216
4,0795 216
7,1558 216
1,2071 216
-0,2901 216
0,1298 216
10,0000 216
2,1795 216
5,0332 216
7,9569 216
1,5677 216
-0,9575 216
0,6784 216
100,0000 216
2,3809 216
5,4652 216
8,5678 216
1,6014 216
-1,0631 216
0,8505 216
1000,0000 216
2,4048 216
5,5201 216
8,6537 216

1,6021 216
-1,0648 216
0,8558 216
Dados Iniciais 216
Valor de Biot 216
1000,0000 216
Diâmetro do Cilindro (cm) 216
15,24 216
Altura da Placa (cm) 216
16,83 216
Relacao (d/h) 216
0,91 216
Raio de Medida (cm) 216
0,00 216
Plano de Medida (cm) 216
0,00 216
Difusividade Térmica (cm^2/min) 216
0,1200 216
Temperatura Inicial (ºC) 216
80,0 216
Intervalo de Tempo (min) 216
1,0 216
Temperatura do Meio 216
T_1 (°C) 216
121,1 216
T_2 (°C) 216
25,0 216
Microrganismo de referência 216
Valor z (°C) 216
30,0 216
Temperatura de referência (°C) 216
121,1 216
Valor F_0 (min) 216
5,81 216

Valor Fp (min) 216
43,28 216
Cálculos Preliminares 216
Placa Plana Infinita 216
Cilindro Infinito 216
Valor de λ_1 216
1,5708 216
Valor de β_1 216
2,4048 216
Valor de λ_2 216
4,7124 216
Valor de β_2 216
5,5201 216
Valor de λ_3 216
7,8540 216
Valor de β_3 216
8,6537 216
Valor de A_1 216
1,2732 216
Valor de A_1 216
1,6021 216
Valor de A_2 216
-0,4244 216
Valor de A_2 216
-1,0648 216
Valor de A_3 216
0,2546 216
Valor de A_3 216
0,8558 216
Valor de $\cos(\lambda_1 X)$ 216
1,0000 216
Valor de $Jo(\beta_1 R)$ 216
1,0000 216
Valor de $\cos(\lambda_2 X)$ 216

1,0000 216
Valor de Jo(β_2R) 216
1,0000 216
Valor de cos(λ_3X) 216
1,0000 216
Valor de Jo(β_3R) 216
1,0000 216
Cilindro Finito 217
Termo j 217
R1j 217
R2j 217
R3j 217
A1j 217
A2j 217
A3j 217
E1j 217
E2j 217
E3j 217
1 217
1,0000 217
0,3415 217
0,2888 217
2,040 217
-0,680 217
0,408 217
9,870 217
30,334 217
71,262 217
2 217
4,1626 217
0,6929 217
0,4153 217
-1,356 217
0,452 217

-0,271 217
41,084 217
61,548 217
102,476 217
3 217
9,8523 217
1,3251 217
0,6429 217
1,090 217
-0,363 217
0,218 217
97,239 217
117,703 217
158,631 217

Cálculo da Temperatura em Funcão do Tempo e Valor F_p											
	Placa Plana Infinita			Cilindro Infinito			Cilindro Finito				
Tempo	Fo	u	T	Fo	u	T	L	u	T	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,537	80,0	0,043	0,021
1	0,002	1,000	80,0	0,002	1,000	80,0	0,002	1,433	80,0	0,043	0,064
2	0,003	1,000	80,0	0,004	1,000	80,0	0,003	1,348	80,0	0,043	0,107
3	0,005	1,000	80,0	0,006	1,000	80,0	0,005	1,279	80,0	0,043	0,149
4	0,007	1,000	80,0	0,008	1,000	80,0	0,007	1,224	80,0	0,043	0,192
5	0,008	1,000	80,0	0,010	1,000	80,0	0,008	1,179	80,0	0,043	0,235
6	0,010	1,000	80,0	0,012	1,000	80,0	0,010	1,143	80,0	0,043	0,277
7	0,012	1,000	80,0	0,014	1,000	80,0	0,011	1,113	80,0	0,043	0,320
8	0,014	1,000	80,0	0,017	1,000	80,0	0,013	1,090	80,0	0,043	0,363
9	0,015	1,000	80,0	0,019	1,000	80,0	0,015	1,071	80,0	0,043	0,405
10	0,017	1,000	80,0	0,021	1,000	80,0	0,016	1,056	80,0	0,043	0,448
11	0,019	1,000	80,0	0,023	1,000	80,0	0,018	1,045	80,0	0,043	0,491
12	0,020	1,000	80,0	0,025	1,000	80,0	0,020	1,035	80,0	0,043	0,533
13	0,022	1,000	80,0	0,027	1,000	80,0	0,021	1,028	80,0	0,043	0,576
14	0,024	1,000	80,0	0,029	1,000	80,0	0,023	1,022	80,0	0,043	0,619
15	0,025	1,000	80,0	0,031	1,000	80,0	0,025	1,017	80,0	0,043	0,661
16	0,027	1,000	80,0	0,033	1,000	80,0	0,026	1,013	80,0	0,043	0,704
17	0,029	1,000	80,0	0,035	1,000	80,0	0,028	1,009	80,0	0,043	0,747
18	0,031	1,000	80,0	0,037	1,000	80,0	0,029	1,006	80,0	0,043	0,789
19	0,032	1,000	80,0	0,039	1,000	80,0	0,031	1,003	80,0	0,043	0,832
20	0,034	1,000	80,0	0,041	0,998	80,1	0,033	1,001	80,0	0,043	0,874
21	0,036	1,000	80,0	0,043	0,996	80,2	0,034	0,998	80,1	0,043	0,917
22	0,037	1,000	80,0	0,045	0,994	80,3	0,036	0,995	80,2	0,043	0,961
23	0,039	1,000	80,0	0,048	0,991	80,4	0,038	0,992	80,3	0,044	1,004
24	0,041	1,000	80,0	0,050	0,989	80,5	0,039	0,989	80,5	0,044	1,049
25	0,042	1,000	80,0	0,052	0,986	80,6	0,041	0,985	80,6	0,045	1,093
26	0,044	0,999	80,0	0,054	0,982	80,7	0,042	0,982	80,8	0,045	1,139
27	0,046	0,999	80,1	0,056	0,979	80,9	0,044	0,978	80,9	0,046	1,184
28	0,047	0,998	80,1	0,058	0,975	81,0	0,046	0,973	81,1	0,046	1,231
29	0,049	0,998	80,1	0,060	0,971	81,2	0,047	0,969	81,3	0,047	1,278
30	0,051	0,997	80,1	0,062	0,967	81,4	0,049	0,964	81,5	0,048	1,326
31	0,053	0,996	80,2	0,064	0,962	81,6	0,051	0,958	81,7	0,049	1,374
32	0,054	0,995	80,2	0,066	0,957	81,8	0,052	0,953	81,9	0,050	1,424
33	0,056	0,995	80,2	0,068	0,952	82,0	0,054	0,947	82,2	0,050	1,474
34	0,058	0,994	80,3	0,070	0,946	82,2	0,056	0,940	82,4	0,051	1,526
35	0,059	0,993	80,3	0,072	0,941	82,4	0,057	0,934	82,7	0,053	1,578
36	0,061	0,992	80,3	0,074	0,935	82,7	0,059	0,927	83,0	0,054	1,632
37	0,063	0,991	80,4	0,076	0,929	82,9	0,060	0,920	83,3	0,055	1,687
38	0,064	0,989	80,4	0,079	0,922	83,2	0,062	0,913	83,6	0,056	1,743
39	0,066	0,988	80,5	0,081	0,916	83,5	0,064	0,905	83,9	0,058	1,801
40	0,068	0,987	80,5	0,083	0,909	83,7	0,065	0,897	84,2	0,059	1,860
41	0,069	0,985	80,6	0,085	0,902	84,0	0,067	0,889	84,6	0,060	1,920
42	0,071	0,984	80,7	0,087	0,895	84,3	0,069	0,881	84,9	0,062	1,982
43	0,073	0,982	80,7	0,089	0,888	84,6	0,070	0,873	85,2	0,064	2,046
44	0,075	0,981	80,8	0,091	0,881	84,9	0,072	0,864	85,6	0,065	2,111
45	0,076	0,979	80,9	0,093	0,874	85,2	0,074	0,856	85,9	0,067	2,179
46	0,078	0,977	80,9	0,095	0,866	85,5	0,075	0,847	86,3	0,069	2,248
47	0,080	0,976	81,0	0,097	0,859	85,8	0,077	0,838	86,7	0,071	2,319
48	0,081	0,974	81,1	0,099	0,851	86,1	0,078	0,829	87,0	0,073	2,392
49	0,083	0,972	81,2	0,101	0,844	86,4	0,080	0,820	87,4	0,075	2,467
50	0,085	0,970	81,2	0,103	0,836	86,7	0,082	0,811	87,8	0,077	2,545
51	0,086	0,968	81,3	0,105	0,828	87,1	0,083	0,802	88,2	0,080	2,625
52	0,088	0,966	81,4	0,107	0,821	87,4	0,085	0,792	88,5	0,082	2,707
53	0,090	0,963	81,5	0,110	0,813	87,7	0,087	0,783	88,9	0,085	2,791
54	0,092	0,961	81,6	0,112	0,805	88,0	0,088	0,774	89,3	0,087	2,879
55	0,093	0,959	81,7	0,114	0,797	88,3	0,090	0,764	89,7	0,090	2,968
56	0,095	0,957	81,8	0,116	0,789	88,7	0,092	0,755	90,1	0,092	3,061
57	0,097	0,954	81,9	0,118	0,781	89,0	0,093	0,746	90,5	0,095	3,156
58	0,098	0,952	82,0	0,120	0,774	89,3	0,095	0,736	90,8	0,098	3,254
59	0,100	0,949	82,1	0,122	0,766	89,6	0,096	0,727	91,2	0,101	3,355
60	0,102	0,947	82,2	0,124	0,758	90,0	0,098	0,718	91,6	0,104	3,459

61	0,103	0,944	82,3	0,126	0,750	90,3	0,100	0,708	92,0	0,107	3,566
62	0,105	0,942	82,4	0,128	0,742	90,6	0,101	0,699	92,4	0,110	3,676
63	0,107	0,939	82,5	0,130	0,734	90,9	0,103	0,690	92,8	0,114	3,790
64	0,108	0,936	82,6	0,132	0,727	91,2	0,105	0,680	93,1	0,117	3,907
65	0,110	0,934	82,7	0,134	0,719	91,5	0,106	0,671	93,5	0,120	4,027
66	0,112	0,931	82,8	0,136	0,711	91,9	0,108	0,662	93,9	0,124	4,151
67	0,114	0,928	82,9	0,138	0,704	92,2	0,110	0,653	94,3	0,127	4,278
68	0,115	0,925	83,1	0,141	0,696	92,5	0,111	0,644	94,6	0,131	4,409
69	0,117	0,923	83,2	0,143	0,689	92,8	0,113	0,635	95,0	0,135	4,544
70	0,119	0,920	83,3	0,145	0,681	93,1	0,114	0,626	95,4	0,139	4,683
71	0,120	0,917	83,4	0,147	0,674	93,4	0,116	0,618	95,7	0,142	4,825
72	0,122	0,914	83,5	0,149	0,666	93,7	0,118	0,609	96,1	0,146	4,972
73	0,124	0,911	83,6	0,151	0,659	94,0	0,119	0,600	96,4	0,151	5,122
74	0,125	0,908	83,8	0,153	0,652	94,3	0,121	0,592	96,8	0,155	5,277
75	0,127	0,905	83,9	0,155	0,644	94,6	0,123	0,583	97,1	0,159	5,436
76	0,129	0,902	84,0	0,157	0,637	94,9	0,124	0,575	97,5	0,163	5,599
77	0,130	0,899	84,1	0,159	0,630	95,2	0,126	0,567	97,8	0,167	5,766
78	0,132	0,896	84,3	0,161	0,623	95,5	0,127	0,558	98,2	0,172	5,938
79	0,134	0,893	84,4	0,163	0,616	95,8	0,129	0,550	98,5	0,176	6,114
80	0,136	0,890	84,5	0,165	0,609	96,1	0,131	0,542	98,8	0,181	6,295
81	0,137	0,887	84,6	0,167	0,602	96,4	0,132	0,534	99,1	0,185	6,480
82	0,139	0,884	84,8	0,169	0,595	96,6	0,134	0,526	99,5	0,190	6,670
83	0,141	0,881	84,9	0,172	0,588	96,9	0,136	0,519	99,8	0,195	6,865
84	0,142	0,878	85,0	0,174	0,582	97,2	0,137	0,511	100,1	0,200	7,065
85	0,144	0,875	85,1	0,176	0,575	97,5	0,139	0,503	100,4	0,204	7,269
86	0,146	0,872	85,3	0,178	0,568	97,7	0,141	0,496	100,7	0,209	7,479
87	0,147	0,869	85,4	0,180	0,562	98,0	0,142	0,488	101,0	0,214	7,693
88	0,149	0,866	85,5	0,182	0,555	98,3	0,144	0,481	101,3	0,219	7,912
89	0,151	0,863	85,6	0,184	0,549	98,5	0,145	0,474	101,6	0,224	8,137
90	0,153	0,860	85,8	0,186	0,543	98,8	0,147	0,467	101,9	0,230	8,366
91	0,154	0,856	85,9	0,188	0,536	99,1	0,149	0,459	102,2	0,235	8,601
92	0,156	0,853	86,0	0,190	0,530	99,3	0,150	0,453	102,5	0,240	8,841
93	0,158	0,850	86,2	0,192	0,524	99,6	0,152	0,446	102,8	0,245	9,086
94	0,159	0,847	86,3	0,194	0,518	99,8	0,154	0,439	103,1	0,250	9,337
95	0,161	0,844	86,4	0,196	0,512	100,1	0,155	0,432	103,3	0,256	9,592
96	0,163	0,841	86,5	0,198	0,506	100,3	0,157	0,426	103,6	0,261	9,854
97	0,164	0,838	86,7	0,200	0,500	100,5	0,159	0,419	103,9	0,267	10,120
98	0,166	0,835	86,8	0,203	0,494	100,8	0,160	0,413	104,1	0,272	10,392
99	0,168	0,831	86,9	0,205	0,489	101,0	0,162	0,406	104,4	0,278	10,670
100	0,169	0,828	87,1	0,207	0,483	101,3	0,163	0,400	104,7	0,283	10,953
101	0,171	0,825	87,2	0,209	0,477	101,5	0,165	0,394	104,9	0,289	11,242
102	0,173	0,822	87,3	0,211	0,472	101,7	0,167	0,388	105,2	0,294	11,536
103	0,175	0,819	87,4	0,213	0,466	101,9	0,168	0,382	105,4	0,300	11,836
104	0,176	0,816	87,6	0,215	0,461	102,2	0,170	0,376	105,7	0,306	12,142
105	0,178	0,813	87,7	0,217	0,455	102,4	0,172	0,370	105,9	0,311	12,453
106	0,180	0,809	87,8	0,219	0,450	102,6	0,173	0,364	106,1	0,317	12,770
107	0,181	0,806	88,0	0,221	0,445	102,8	0,175	0,359	106,4	0,323	13,093
108	0,183	0,803	88,1	0,223	0,439	103,0	0,177	0,353	106,6	0,328	13,421
109	0,185	0,800	88,2	0,225	0,434	103,2	0,178	0,348	106,8	0,334	13,755
110	0,186	0,797	88,3	0,227	0,429	103,5	0,180	0,342	107,0	0,340	14,095
111	0,188	0,794	88,5	0,229	0,424	103,7	0,181	0,337	107,3	0,346	14,441
112	0,190	0,791	88,6	0,231	0,419	103,9	0,183	0,331	107,5	0,351	14,792
113	0,191	0,788	88,7	0,234	0,414	104,1	0,185	0,326	107,7	0,357	15,149
114	0,193	0,785	88,9	0,236	0,409	104,3	0,186	0,321	107,9	0,363	15,512
115	0,195	0,782	89,0	0,238	0,405	104,5	0,188	0,316	108,1	0,369	15,881
116	0,197	0,778	89,1	0,240	0,400	104,7	0,190	0,311	108,3	0,375	16,256
117	0,198	0,775	89,2	0,242	0,395	104,9	0,191	0,306	108,5	0,380	16,636
118	0,200	0,772	89,4	0,244	0,390	105,1	0,193	0,302	108,7	0,386	17,023
119	0,202	0,769	89,5	0,246	0,386	105,2	0,195	0,297	108,9	0,392	17,415
120	0,203	0,766	89,6	0,248	0,381	105,4	0,196	0,292	109,1	0,398	17,813
121	0,205	0,763	89,7	0,250	0,377	105,6	0,198	0,288	109,3	0,404	18,216
122	0,207	0,760	89,9	0,252	0,372	105,8	0,199	0,283	109,5	0,410	18,626
123	0,208	0,757	90,0	0,254	0,368	106,0	0,201	0,279	109,7	0,415	19,041
124	0,210	0,754	90,1	0,256	0,364	106,2	0,203	0,274	109,8	0,421	19,462
125	**0,212**	**0,751**	**90,2**	**0,258**	**0,359**	**106,3**	**0,204**	**0,270**	**110,0**	**0,427**	**20,106**
126	0,214	0,748	90,4	0,260	0,355	106,5	0,206	0,266	110,2	L_2	L_2-L_1

126	L_2	L_2-L_1	u(L_2-L_1)	u(L_2)	T(ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
127	0,208	0,002	1,433	0,261	110,4	0,438	0,219
128	0,209	0,003	1,348	0,257	110,5	0,444	0,663
129	0,211	0,005	1,279	0,253	110,7	0,450	1,113
130	0,212	0,007	1,224	0,249	110,9	0,456	1,569
131	0,214	0,008	1,179	0,245	111,0	0,461	2,030
132	0,216	0,010	1,143	0,241	111,2	0,467	2,497
133	0,217	0,011	1,113	0,238	111,3	0,473	2,970
134	0,219	0,013	1,090	0,234	111,5	0,478	3,449
135	0,221	0,015	1,071	0,230	111,6	0,484	3,932
136	0,222	0,016	1,056	0,226	111,8	0,490	4,422
137	0,224	0,018	1,045	0,223	111,9	0,495	4,917
138	0,226	0,020	1,035	0,219	112,1	0,501	5,418
139	0,227	0,021	1,028	0,216	112,2	0,506	5,924
140	0,229	0,023	1,022	0,212	112,4	0,512	6,436
141	0,230	0,025	1,017	0,209	112,5	0,517	6,953
142	0,232	0,026	1,013	0,206	112,6	0,523	7,476
143	0,234	0,028	1,009	0,202	112,8	0,528	8,004
144	0,235	0,029	1,006	0,199	112,9	0,533	8,537
145	0,237	0,031	1,003	0,196	113,0	0,539	9,076
146	0,239	0,033	1,001	0,193	113,2	0,544	9,620
147	0,240	0,034	0,998	0,190	113,1	0,541	10,161
148	0,242	0,036	0,995	0,187	112,9	0,535	10,696
149	0,244	0,038	0,992	0,184	112,8	0,528	11,224
150	0,245	0,039	0,989	0,181	112,6	0,521	11,745
151	0,247	0,041	0,985	0,178	112,4	0,512	12,257
152	0,248	0,042	0,982	0,175	112,1	0,503	12,760
153	0,250	0,044	0,978	0,172	111,9	0,492	13,252
154	0,252	0,046	0,973	0,170	111,6	0,481	13,733
155	0,253	0,047	0,969	0,167	111,2	0,469	14,202
156	0,255	0,049	0,964	0,164	110,9	0,455	14,657
157	0,257	0,051	0,958	0,162	110,4	0,442	15,099
158	0,258	0,052	0,953	0,159	110,0	0,427	15,526
159	0,260	0,054	0,947	0,157	109,5	0,412	15,937
160	0,262	0,056	0,940	0,154	109,0	0,396	16,334
161	0,263	0,057	0,934	0,152	108,5	0,381	16,714
162	0,265	0,059	0,927	0,149	108,0	0,365	17,079
163	0,266	0,060	0,920	0,147	107,4	0,349	17,428
164	0,268	0,062	0,913	0,144	106,8	0,333	17,761
165	0,270	0,064	0,905	0,142	106,1	0,317	18,078
166	0,271	0,065	0,897	0,140	105,5	0,301	18,379
167	0,273	0,067	0,889	0,138	104,8	0,286	18,665
168	0,275	0,069	0,881	0,135	104,1	0,271	18,937
169	0,276	0,070	0,873	0,133	103,4	0,257	19,193
170	0,278	0,072	0,864	0,131	102,7	0,243	19,436
171	0,280	0,074	0,856	0,129	101,9	0,229	19,666
172	0,281	0,075	0,847	0,127	101,2	0,216	19,882
173	0,283	0,077	0,838	0,125	100,4	0,204	20,086
174	0,284	0,078	0,829	0,123	99,6	0,192	20,278
175	0,286	0,080	0,820	0,121	98,8	0,181	20,459
176	0,288	0,082	0,811	0,119	98,0	0,170	20,629
177	0,289	0,083	0,802	0,117	97,2	0,160	20,789
178	0,291	0,085	0,792	0,115	96,4	0,150	20,939
179	0,293	0,087	0,783	0,114	95,6	0,141	21,080
180	0,294	0,088	0,774	0,112	94,8	0,132	21,212
181	0,296	0,090	0,764	0,110	93,9	0,124	21,337
182	0,297	0,092	0,755	0,108	93,1	0,117	21,453
183	0,299	0,093	0,746	0,106	92,3	0,109	21,563
184	0,301	0,095	0,736	0,105	91,4	0,103	21,665
185	0,302	0,096	0,727	0,103	90,6	0,096	21,762
186	0,304	0,098	0,718	0,101	89,8	0,090	21,852

187	0,306	0,100	0,708	0,100	89,0	0,085	21,937
188	0,307	0,101	0,699	0,098	88,1	0,080	22,017
189	0,309	0,103	0,690	0,097	87,3	0,075	22,091
190	0,311	0,105	0,680	0,095	86,5	0,070	22,162
191	0,312	0,106	0,671	0,094	85,7	0,066	22,227
192	0,314	0,108	0,662	0,092	84,9	0,062	22,289
193	0,315	0,110	0,653	0,091	84,0	0,058	22,348
194	0,317	0,111	0,644	0,089	83,2	0,055	22,402
195	0,319	0,113	0,635	0,088	82,4	0,051	22,454
196	0,320	0,114	0,626	0,086	81,7	0,048	22,502
197	0,322	0,116	0,618	0,085	80,9	0,046	22,548
198	0,324	0,118	0,609	0,084	80,1	0,043	22,591
199	0,325	0,119	0,600	0,082	79,3	0,040	22,631
200	0,327	0,121	0,592	0,081	78,5	0,038	22,669
201	0,329	0,123	0,583	0,080	77,8	0,036	22,705
202	0,330	0,124	0,575	0,078	77,0	0,034	22,739
203	0,332	0,126	0,567	0,077	76,3	0,032	22,771
204	0,333	0,127	0,558	0,076	75,5	0,030	22,802
205	0,335	0,129	0,550	0,075	74,8	0,029	22,830
206	0,337	0,131	0,542	0,073	74,1	0,027	22,857
207	0,338	0,132	0,534	0,072	73,4	0,026	22,883
208	0,340	0,134	0,526	0,071	72,7	0,024	22,907
209	0,342	0,136	0,519	0,070	72,0	0,023	22,930
210	0,343	0,137	0,511	0,069	71,3	0,022	22,952
211	0,345	0,139	0,503	0,068	70,6	0,021	22,973
212	0,347	0,141	0,496	0,067	69,9	0,020	22,992
213	0,348	0,142	0,488	0,066	69,2	0,019	23,011
214	0,350	0,144	0,481	0,065	68,6	0,018	23,029
215	0,351	0,145	0,474	0,064	67,9	0,017	23,046
216	0,353	0,147	0,467	0,063	67,3	0,016	23,062
217	0,355	0,149	0,459	0,062	66,6	0,015	23,077
218	0,356	0,150	0,453	0,061	66,0	0,015	23,092
219	0,358	0,152	0,446	0,060	65,4	0,014	23,105
220	0,360	0,154	0,439	0,059	64,8	0,013	23,119
221	0,361	0,155	0,432	0,058	64,2	0,013	23,131
222	0,363	0,157	0,426	0,057	63,6	0,012	23,143
223	0,365	0,159	0,419	0,056	63,0	0,012	23,155
224	0,366	0,160	0,413	0,055	62,4	0,011	23,166
225	0,368	0,162	0,406	0,054	61,8	0,011	23,177

.....220

SUMÁRIO

1 Introdução 110

2 Revisão bibliográfica 112

2.1 Introdução 113

2.2 Transferência de calor no enlatamento convencional 116

2.2.1 Transferência de calor por condução 118

2.2.2 Discretização — Método das diferenças finitas 129
2.3 Determinação da difusividade térmica 143
2.4 Autoclaves 146
2.4.1 Introdução 146
2.4.2 Escolha do processamento térmico 147
2.4.3 Principais equipamentos usados no tratamento térmico de alimentos 148
2.4.4 Salas de esterilização 150
2.4.5 Operação da autoclave 152
2.5 Avaliação do tratamento térmico (LEONHARDT E KUNIGK, 2003 APUD LEONHARDT, 2003) 154
2.5.1 Cinética das transformações 155
2.5.2 Resistência térmica de microrganismos 158
2.5.3 Avaliação do tratamento térmico 163
2.5.4 Cálculo gráfico 167
2.5.5 Valor F_O recomendado para alimentos de média acidez 171
3 Método de análise 175
3.1 Formulação do problema 175
3.2 Hipóteses básicas 175
3.3 Teoria 176
3.3.1 Dados iniciais 176
3.3.2 Equações básicas 177
3.3.3 Análise preliminar 180
3.4 Análise 180
3.4.1 Tratamentos térmicos selecionados 181
3.4.2 Avaliação do tratamento térmico 182
3.4.3 Embalagem 183
3.4.4 Difusividade térmica 183
4 Resultados e discussão 185

4.1 Análise preliminar 185
4.2 Análise final 188
5 Conclusão 193
6 Referência Bibliográfica 197
7 Apêndice A 104

1 Introdução

O efeito do processamento térmico sobre a qualidade dos alimentos tem se mostrado de grande importância econômica e nutricional, uma vez que o valor nutritivo, a qualidade, a segurança e a vida-de-prateleira se tornaram fatores extremamente importantes com o avanço nas técnicas de esterilização que empregam o calor. Atualmente, o enlatamento seguido de processamento térmico é considerado um método efetivo de preservação de alimentos.

No entanto, como em um grande número de produtos a transferência de calor ocorre de maneira muito lenta, para que o ponto frio do alimento atinja o valor de esterilização desejado, o produto é aquecido de maneira muito mais intensa na superfície em contato com o recipiente do que seria necessário para que a esterilidade comercial seja atingida, resultando em perdas consideráveis de fatores de qualidade. Ocorrem alterações de cor, sabor, textura e os nutrientes mais termolábeis são destruídos por degradações químicas que são induzidas pelo tratamento térmico. Essa degradação reduz o valor nutritivo do alimento, causa alterações organolépticas, resultando em grandes perdas para o alimento em si.

O conhecimento das propriedades térmicas dos alimentos passou a ser um fator determinante para o processamento térmico e com o advento computacional um maior rigor na determinação dessas propriedades térmicas passou a ser exigido. Por outro lado, o uso de métodos matemáticos mais avançados permite obter modelos mais adequados e, portanto, aperfeiçoar o processamento térmico dos alimentos.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos neste sentido. A grande maioria baseou-se na determinação da condutividade térmica dos alimentos. Poucos se basearam na determinação da difusividade térmica. Essa preferência pela condutividade térmica pode ser explicada ao se constatar que aquela pode ser determinada conhecendo esta, o calor específico e a massa específica.

Também no estudo da transferência de calor, com o desenvolvimento do microcomputador, métodos numéricos são cada vez mais empregados. No enlatamento convencional, em que alimento e recipiente são esterilizados

simultaneamente em autoclaves, os modelos que permitem conhecer a transferência de calor para o alimento, utilizam a equação do balanço diferencial de energia para determinar a variação da temperatura com a posição e o tempo.

Empregando o modelo da difusão e o princípio dos processos divididos, o objetivo deste trabalho é sugerir técnicas de operação da autoclave que permitam reduzir a destruição de nutrientes.

2 Revisão bibliográfica

Uma das principais aplicações da modelagem matemática de transferência de calor no processamento de alimentos é para avaliação dos processos destinados a produzir alimentos enlatados comercialmente estéreis. Nos últimos anos esse campo do conhecimento tem sido freqüentemente alvo de muitos estudos, devido a sua grande importância na indústria. Geralmente são processos complexos, pois, envolve muitas variáveis, o que aumenta a dificuldade de interpretação em si.

Associado a um processo térmico para a inativação de microorganismos sempre existirá uma degradação de nutrientes ou de qualquer outro fator de qualidade. Assim, extremo cuidado é necessário no cálculo do tempo e da temperatura de processo para se evitar tanto o sub como o super processamento.

Desde que Ball, em 1923, publicou seu primeiro modelo matemático para avaliar processos de esterilização de alimentos muitos outros têm sido publicados. Geralmente eles são classificados em dois grupos:

Grupo I: que avaliam a letalidade no ponto frio do produto.
Grupo II: que determinam a avaliação da letalidade média da massa de todo o alimento contido na embalagem.

Os procedimentos do grupo I são divididos em dois subgrupos:

Método Gráfico ou Geral: geralmente mais preciso, pois normalmente utiliza medidas experimentais para o cálculo do valor de esterilização.
Método Analítico: emprega modelos matemáticos para predizer a temperatura do produto em função do tempo, durante o processamento.

Com o advento dos computadores, os métodos numéricos para resolução de equações diferenciais passaram a ser utilizados para resolver problemas mais realísticos e complexos de transferência de calor, como aqueles apresentados pela maioria dos processos de esterilização de alimentos. A idéia básica dos métodos

numéricos é o processo de discretização, que reduz o problema físico contínuo a um número finito de equações que pode ser resolvido por computador. De acordo com WELT (1997), o desenvolvimento de um método confiável de análise do processamento térmico depende da escolha adequada do método numérico e da forma de converter os dados de tempo e temperatura em letalidade.

2.1 Introdução

Segundo CRISTIANINI (1998), vários procedimentos gráficos e matemáticos foram propostos (STUMBO (1949), GILLESPY (1953), STUMBO (1953) e STUMBO (1973)) para estimar a eficiência do processamento térmico na destruição de microorganismos viáveis. De acordo com este autor, BALL E OLSON (1957), TEIXEIRA ET AL. (1969) e HAYAKAWA E BALL (1969) apresentaram métodos para estimar a degradação de nutrientes em alimentos em embalagens cilíndricas durante o processamento térmico.

Vários estudos já foram feitos simulando em computador o processamento térmico de alimentos para otimizar a retenção de nutrientes ao mesmo tempo em que a esterilidade é garantida (TEIXEIRA ET AL. (1969), MANSO ET AL. (1970), OHLSSON (1980) THIJISSEN E KOCHEM (1980) e NADKARNI E HATTON (1985)), mas somente poucos estudos comparam os valores previstos pelo modelo com resultados obtidos experimentalmente (JEN ET AL.(1971), TEIXEIRA ET AL. (1975) apud GHAZALA ET AL.(1989)).

CASTILLO ET AL. (1980) desenvolveram um modelo para predizer retenção de nutrientes através de um modelo de cinética de primeira ordem para a degradação térmica em alimentos processados em bolsas flexíveis através de condução térmica. A validação do modelo foi verificada experimentalmente e o modelo foi capaz de predizer a temperatura no centro da embalagem ao final da fase de aquecimento bem como a retenção de nutrientes com 90% de confiança.

RAMASWAMY ET AL. (1982) apresentam relações simples para predizer valores de funções características. Empregando estas relações, avaliações dos adimensionais de temperatura para várias combinações dos números de Fourier e Biot foram discutidas. Além disso, relações simplificadas para prever a temperatura em um ponto qualquer e também a temperatura média da massa foram obtidas. Estas relações se aplicam a placas planas, cilindros finitos e infinitos e esferas.

NAVEH ET AL. (1984) empregando métodos numéricos e medidas experimentais estudaram a esterilização de alimentos em recipientes de extremidade plana posicionados na base da autoclave.

GHAZALA ET AL. (1989) elaboraram um modelo para alimentos que apresentam um mecanismo de transferência de calor por condução para avaliar a retenção de ácido ascórbico e a ocorrência da reação de Maillard durante o processamento térmico, através do uso de diferenças finitas. Os resultados mostraram boa correlação entre os resultados obtidos experimentalmente e a retenção de ácido ascórbico prevista pelo modelo matemático, sendo o valor de R^2 de 0,94 considerado satisfatório pelos autores.

SIMPSON ET AL. (1989) desenvolveram um modelo matemático utilizando diferenças finitas para esterilização de alimentos que se aquecem por condução em embalagens ovais. A validação experimental realizada mostrou que o método prediz de maneira satisfatória os parâmetros temperatura e retenção de nutrientes, sendo que para os valores de temperatura o valor de R^2 obtido foi 0,9999 e para retenção de nutrientes o erro médio entre valores previstos e valores experimentais foi de 6,3%. Além disso, o programa desenvolvido pode ser modificado para aceitar variações na temperatura da autoclave, condições iniciais de temperatura não uniformes, mudanças nos parâmetros cinéticos e condições heterogêneas do meio.

BHOWMIK E SHIN (1991) construíram um modelo matemático para avaliar o processamento térmico de alimentos processados em recipientes de plástico cilíndricos. O modelo inclui o coeficiente convectivo de transferência de calor para os meios de aquecimento e resfriamento, difusividade térmica do plástico e do alimento e o contato entre os mesmos, sendo que estes influenciam de maneira significativa o valor de esterilização entregue ao produto. As temperaturas estimadas pelo modelo no ponto frio obtiveram boa concordância com aquelas obtidas experimentalmente.

TUCKER E CLARK (1990) elaboraram um modelo matemático capaz de prever a temperatura no interior de produtos condutivos durante a fase de resfriamento baseado na técnica de diferenças finitas. Devido à contribuição para a letalidade ser significativa no início da fase de resfriamento, o modelamento matemático

desta fase do processamento deve ser feito de maneira adequada. Entretanto, esta contribuição em termos percentuais é variável e difícil de quantificar. A máxima diferença entre temperaturas previstas pelo modelo e aquelas obtidas experimentalmente foi de 2,5ºC.

ERDOGDU ET AL. (1998) construíram um modelo matemático utilizando a técnica de diferenças finitas capaz de prever a distribuição de temperatura no interior da amostra durante o cozimento de camarão. O modelo é capaz de considerar condutividade térmica, calor específico e densidade variáveis além de variações nas dimensões da amostra devido ao encolhimento. Os valores de R^2 obtidos na regressão entre valores preditos pelo modelo e valores obtidos experimentalmente foram de 0,99 para medidas feitas no centro da amostra e 0,96 para pontos próximos à superfície da mesma.

JACZYNSKI E PARK (2002) construíram e validaram um método interativo de predição da temperatura para surimi. O modelo é baseado nas cartas de Gurney-Lurie para condução de calor em uma placa infinita. Os dados de entrada do modelo são: temperatura de processo, tempo de processamento, temperatura inicial da amostra e espessura do produto. O modelo proposto apresentou boa correlação entre os valores preditos e os observados experimentalmente (R^2 = 0,999), sendo que a máxima diferença de temperatura verificada foi de 1ºC.

PORNCHALOEMPONG ET AL. (2002) elaboraram um modelo matemático utilizando a técnica de diferenças finitas para otimizar a retenção de qualidade em alimentos condutivos embalados em recipientes cônicos. O modelo assume: transferência de calor apenas por condução, alimento homogêneo e isotrópico, propriedades térmicas e físicas constantes com a temperatura, temperatura inicial do produto uniforme e o coeficiente de transferência de calor pode ser especificado ou assumido como infinito. As condições de processamento foram otimizadas através da simulação de processos térmicos equivalentes, isto é, processos em que um mesmo valor de letalidade é entregue ao produto e os valores de retenção global de qualidade em alimentos são calculados. Os perfis porcentagem de retenção de qualidade em função da temperatura de processamento, obtidos para recipientes cônicos são bastante semelhantes àqueles reportados na literatura para formatos tradicionais de embalagem, tais como recipientes cilíndricos. Este fato confirma que

os resultados obtidos para recipientes cônicos podem ser extrapolados para outros tipos de geometria, conforme esperado pelos autores.

MOHAMED (2003) propôs um modelo computacional para simulação da esterilização de alimentos baseado na solução de Fourier para equação de aquecimento por condução em recipientes finitos de geometria cilíndrica, utilizando o método de elementos finitos.

SAKAI ET AL. (2003) E CHEN ET AL. (2005) propuseram um método para prever a temperatura em latas quando a convecção natural é o mecanismo principal.

MOHAMED (2005) estudou o sistema de controle da autoclave propondo um algoritmo que compensasse os efeitos de variação da temperatura arbitrária da autoclave na letalidade.

2.2 Transferência de calor no enlatamento convencional

No enlatamento convencional durante a operação de esterilização o alimento já envasado é colocado em autoclaves ou pasteurizadores onde é realizado o tratamento térmico. Geralmente esse tratamento é constituído de duas etapas: aquecimento e resfriamento como mostrado na figura 2.1.

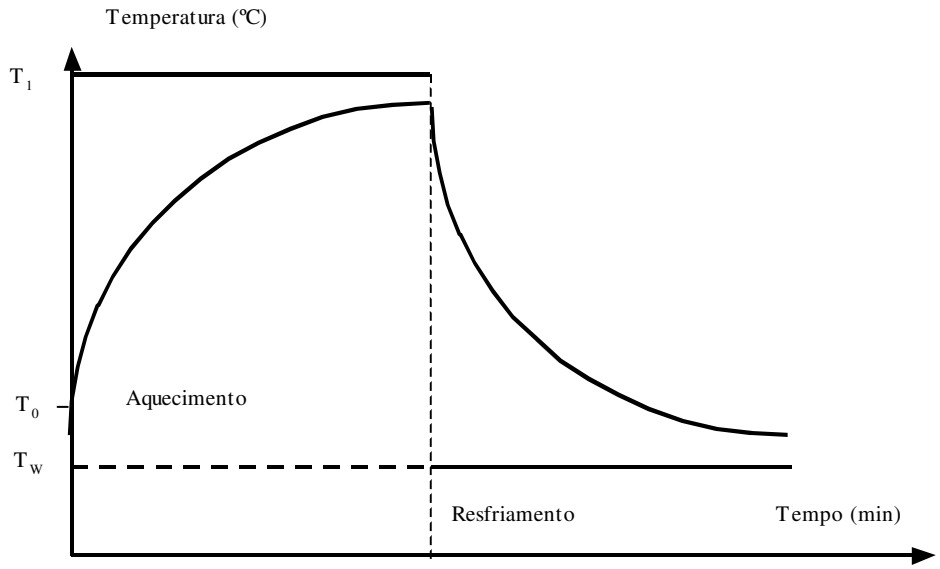


FIGURA 2.1 – ETAPAS DO TRATAMENTO TÉRMICO REALIZADO NO ENLATAMENTO CONVENCIONAL

Em qualquer das etapas a transferência de calor entre o meio e o alimento encontra três resistências associadas em série. A primeira é representada pela transferência de calor entre o meio e a superfície do recipiente. Nos equipamentos comumente utilizados, o mecanismo de transferência de calor nesta primeira etapa é o de convecção. A segunda resistência é oferecida pela parede do recipiente. Neste caso, o mecanismo é o de condução. Finalmente calor é transferido entre a superfície interna do recipiente e o alimento na direção contrária ao gradiente de temperatura.

Neste último caso, o mecanismo pode ser de condução, convecção ou mesmo uma associação destes dois mecanismos. Uma vez que a resistência limitante é a interna, entre a superfície interna do recipiente e o alimento, o estudo da transferência de calor no enlatamento convencional se resume no estudo da transferência de calor no próprio alimento.

A bibliografia especializada é rica em trabalhos que apresentam equações empíricas para a previsão da temperatura em função do tempo no caso de alimentos enlatados através da técnica do enlatamento convencional. BALL (1923) foi quem primeiro introduziu os parâmetros f e j das curvas de aquecimento e de resfriamento de alimentos enlatados e HAYAKAWA (1970), empregando os parâmetros definidos por BALL (1923), apresentou equações que permitem prever com boa precisão o histórico de temperatura para um alimento enlatado.

Também no caso de alimentos que se aquecem por condução, a literatura também apresenta um grande número de trabalhos publicados. Após os trabalhos de HAYAKAWA (1969), HAYAKAWA & BALL (1969), LEONHARDT (1976 e 1976a) é possível prever, com boa precisão, a temperatura em um ponto qualquer e a temperatura média de alimentos que se aquecem por condução em função do tempo, para recipientes cilíndricos e paralelepipédicos.

Considerando que o objetivo deste trabalho é sugerir técnicas de operação da autoclave, o modelo matemático a ser empregado baseia-se na equação básica da difusão do calor. Por este motivo ele será apresentado com detalhes.

2.2.1 Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução em regime variável pode ser descrita matematicamente por meio da equação diferencial parcial da condução e das condições particulares de cada processo. Na ausência de fontes ou sorvedores internos de calor e para difusividade térmica uniforme ela pode ser escrita como segue

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad 2.1$$

A condições particulares de processo geralmente verificadas e que permitem resolver a equação 2.1 são:

- propriedades físicas constantes;
- dimensão característica do corpo (r_m) conhecida;
- condição inicial:

$$para \;\; t = 0 \qquad T = T_0 = f(x, y, z) \qquad 2.2$$

- condição limite:

$$na\ fronteira\ do\ corpo \qquad -k\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}\right) = h(T - T_f) \qquad 2.3$$

Nas equações 2.1 a 2.3, T representa a temperatura do alimento em °C medida em um ponto de coordenadas x, y, z no tempo t, α a difusividade térmica do alimento (m^2/s), T_0 representa a temperatura inicial do alimento (°C), k a condutividade térmica do alimento (W/m.K) e h o coeficiente de transferência de calor entre o meio e o alimento ($W/m^2.K$).

2.2.1.1 Placa plana infinita

Entende-se por placa plana infinita aquela cuja espessura é pequena quando comparada com sua largura e comprimento. Para essa geometria — ver figura 2.2 — é possível considerar transferência de calor unidimensional. Neste caso, a solução da equação 2.1 pode ser escrita como segue

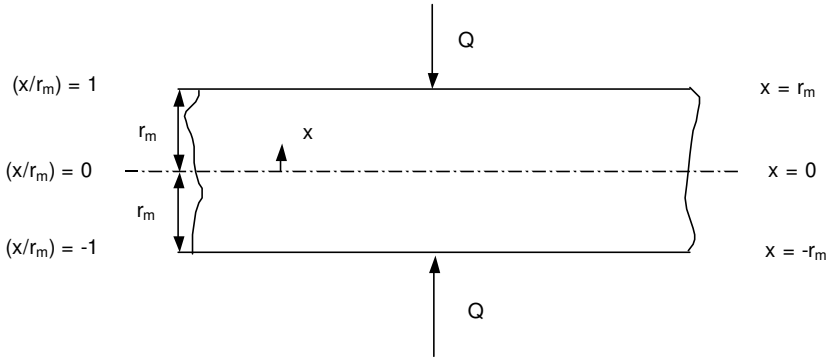


FIGURA 2.2 – MODELO DE PLACA PLANA HORIZONTAL RECEBENDO FLUXO DE CALOR UNIDIRECIONAL

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) \exp(-\lambda_i^2 Fo) \qquad 2.4$$

Nesta equação, tem-se

$$A_i = \frac{2 sen\, \lambda_i}{\lambda_i + sen\, \lambda_i \cos \lambda_i} \qquad u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_o} \qquad X = \frac{x}{r_m} \qquad Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2}$$

Sendo λ_i a raiz i-ésima positiva da equação $Bi \cot \lambda = \lambda$, com $Bi = \frac{h r_m}{k}$.

Para estes adimensionais, *T* representa a temperatura da placa no plano de medida (°C) no instante *t* (s); T_1 a temperatura do meio (°C); T_o a temperatura inicial da placa (°C); *x* a distância do plano de medida ao plano de simetria da placa (m); r_m a meia espessura da placa (m); α a difusividade térmica da placa (m^2/s); *t* o tempo (s); *h* o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o meio e a placa ($W/m^2.K$); *k* a condutividade térmica da placa (W/m.K).

O número de Biot ($Bi = \left({}^{h r_m}/_{k} \right)$) relaciona a resistência interna à transferência de calor com a resistência externa à transferência de calor. Para aqueles casos em que a resistência interna é limitante, o número de Biot tende a infinito. Ao contrário, para os casos em que a resistência externa é limitante, o número de Biot é igual a zero. Para a maioria dos tratamentos térmicos realizados na indústria de alimentos, especialmente aqueles realizados em autoclaves, é possível assumir Bi = ∞.

Desde que $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_i$ representam uma série de números crescentes, quanto maior for o valor de λ menor será o significado do termo da série correspondente. Assim, quanto maior o número de Fourier menor o significado dos últimos termos da série. ISACHENKO ET AL. (1977) mostraram que a série representada pela equação 2.4 converge rapidamente. Assim, para $Fo \geq 0{,}3$ a distribuição de temperatura pode ser calculada, com suficiente precisão, através de seu primeiro termo

$$u = A_1 \cos(\lambda_1 X) \exp(-\lambda_1^2 Fo) \qquad 2.5$$

2.2.1.2 Cilindro infinito

Cilindro infinito é aquele cujo comprimento é muito grande quando comparado com seu diâmetro. Para essa geometria — ver figura 2.3 —, o fluxo de calor também é unidimensional e a solução da equação pode ser escrita como segue

$$u = \sum_{j=1}^{\infty} A_j J_o(\beta_j R) \exp(-\beta_j^2 Fo) \qquad 2.6$$

Nesta equação, tem-se

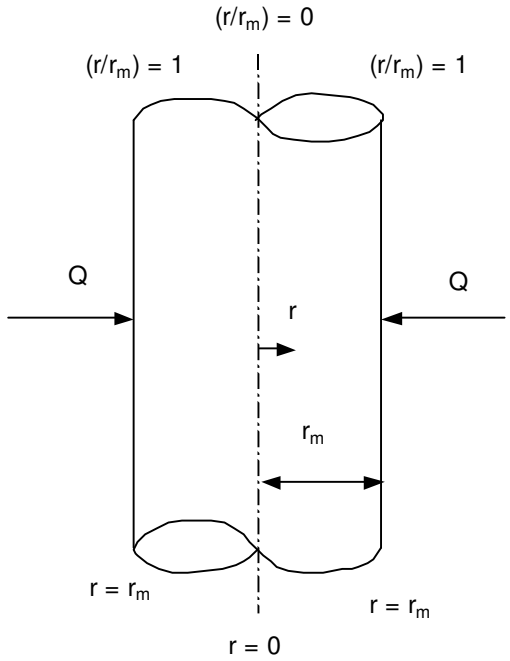


FIGURA 2.3 – MODELO DE CILINDRO INFINITO RECEBENDO UM FLUXO DE CALOR UNIDIRECIONAL

$$u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} \qquad A_j = \frac{2Bi^2}{(Bi^2 + \beta_j^{\,2})\beta_j J_1(\beta_j)} \qquad R = \frac{r}{r_m} \qquad Fo = \frac{\alpha t}{r_m^{\,2}}$$

Sendo β_j a raiz j-ésima positiva da equação $\beta J_1(\beta) = Bi J_0(\beta)$, com $Bi = \left({}^{hr_m}/_{k}\right)$.

Nestes adimensionais, T representa a temperatura do cilindro no plano de medida (°C) no instante t(s); T_1 a temperatura do meio (°C); T_o a temperatura inicial do cilindro (°C); r a distância do ponto de medida ao eixo de simetria do cilindro (m); r_m o raio do cilindro (m); α a difusividade térmica do cilindro (m^2/s); t o tempo (s); h o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o meio e o cilindro ($W/m^2.K$); k a condutividade térmica do cilindro (W/m.K) e $J_n(x)$ a função de Bessel de primeira espécie e ordem n.

Como no caso da placa plana infinita, a série representada pela equação 2.6 também converge rapidamente. Com base nesse conhecimento, ISACHENKO ET AL. (l977) mostraram que para $Fo \geq 0{,}30$ a distribuição de temperatura de um cilindro infinito pode ser calculada com suficiente precisão por meio da equação

$$u = A_1 J_o(\beta_1 R)\exp(-\beta_1^{\,2} Fo) \qquad 2.7$$

2.2.1.3 Corpos de dimensões finitas

A solução da equação 2.1 para corpos de dimensões finitas baseia-se na regra de NEWMAN (1936), que consiste em estabelecer o perfil de temperatura para corpos finitos a partir da solução obtida para corpos infinitos. O método de Newman, também conhecido como regra da multiplicação, baseia-se no fato de que um corpo finito pode ser obtido pela interseção de dois ou mais corpos infinitos. No caso das condições de contorno para os corpos infinitos serem as mesmas verificadas para os corpos finitos, a solução para o corpo finito pode ser obtida multiplicando-se as soluções para os corpos infinitos.

O primeiro a destacar esta propriedade das equações obtidas para corpos infinitos foi NEWMAN (1936). Mais tarde, OLSON E SCHULTZ (1942) utilizaram esta propriedade para estabelecer as equações que permitem prever a temperatura em função do

tempo para 12 corpos diferentes. Para um cilindro finito, LEONHARDT (1976), aplicando a regra da multiplicação às equações 2.4 e 2.6, obteve

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) A_j J_o(\beta_j R) \exp(-4\lambda_i^2 R_{ij} L) \qquad 2.8$$

Nesta equação,

$$A_i = \frac{2 sen\, \lambda_i}{\lambda_i + sen\, \lambda_i \cos \lambda_i} \qquad A_j = \frac{2\, Bi^2}{(Bi^2 + \beta_j^2)\beta_j J_1(\beta_j)}$$

$$R_{ij} = \frac{(d/l)^2 + (\beta_j/\lambda_i)^2}{(d/l)^2 + (\beta_1/\lambda_1)^2} \qquad L = \frac{\alpha t}{S} \qquad S = \frac{d^2}{(d/l)^2 + (\beta_1/\lambda_1)^2}$$

Nestas equações, d representa o diâmetro interno do recipiente cilíndrico (m) e l sua altura interna (m).

LEONHARDT (l976) mostrou ainda que a equação 2.8 deve ser empregada quando $0{,}25 \leq (d/l) \leq 4{,}00$. Para *(d/l)* < 0,25 o corpo pode ser considerado um cilindro infinito e a equação 2.6 deve ser empregada. Para *(d/l)* > 4,0 o comportamento é o de uma placa plana infinita e a equação 2.4 é que deve ser usada.

A equação 2.8 permite calcular a distribuição de temperatura para o cilindro finito de dimensões d e l qualquer que seja o valor de Biot. Admitindo $Bi = \infty$ a temperatura no ponto central de um cilindro finito pode ser avaliada por meio da equação

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} \frac{4 \operatorname{sen} \lambda_i}{\lambda_i \beta_j J_1(\beta_j)} \exp(-4\lambda_i^2 R_{ij} L) \qquad 2.9$$

Para essa equação

$$R_{ij} = \frac{(d/l)^2 + (\beta_j/\lambda_i)^2}{(d/l)^2 + 2{,}344} \qquad S = \frac{d^2}{(d/l)^2 + 2{,}344}$$

Considerando que a série representada pela equação 2.9 é convergente, LEONHARDT (1976) demonstrou ainda que quando $L \geq 0{,}25$ somente o primeiro termo da equação 2.9 deve ser usado, resultando

$$u = 2{,}040 \exp(-\pi^2 L) \qquad 2.10$$

Considerando um paralelepípedo de dimensão *a, b* e *c* e aplicando a regra da multiplicação à equação 2.4, LEONHARDT (l976) propôs como solução a equação

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} A_i \cos(2\lambda_{ai}\frac{x}{a}) A_j \cos(2\lambda_{bj}\frac{y}{b}) A_k \cos(2\lambda_{ck}\frac{z}{c}) \exp(-4R_{ijk}L) \qquad 2.11$$

Nesta equação,

$$A_i = \frac{2sen\lambda_{ai}}{\lambda_{ai} + sen\lambda_{ai}\cos\lambda_{ai}} \qquad A_j = \frac{2sen\lambda_{bj}}{\lambda_{bj} + sen\lambda_{bj}\cos\lambda_{bj}}$$

$$A_k = \frac{2sen\lambda_{ck}}{\lambda_{ck} + sen\lambda_{ck}\cos\lambda_{ck}} \qquad R_{ijk} = \frac{\lambda_{a1}{}^2 b^2c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2b^2}{\lambda_{ai}{}^2 b^2c^2 + \lambda_{bj}{}^2 a^2c^2 + \lambda_{ck}{}^2 a^2b^2}$$

$$L = \frac{\alpha\theta}{S} \qquad S = \frac{a^2b^2c^2}{\lambda_{a1}{}^2 b^2c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2b^2}$$

A equação 2.11 permite calcular a distribuição de temperatura para o paralelepípedo finito qualquer que seja o valor do número de Biot. Admitindo $Bi = \infty$, a temperatura central de um paralelepípedo finito pode ser calculada por meio da equação

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\,\mathrm{sen}\,\lambda_{ai}\, 2\,\mathrm{sen}\,\lambda_{bj}\, 2\,\mathrm{sen}\,\lambda_{ck}}{\lambda_{ai}\lambda_{bj}\lambda_{ck}} \exp(-\pi^2 R_{ijk}L) \qquad 2.12$$

Para essa equação

$$S = \frac{a^2b^2c^2}{a^2b^2 + a^2c^2 + b^2c^2}$$

Como no caso do cilindro finito, LEONHARDT (1976) mostrou que para $L \geq 0{,}25$ somente o primeiro termo da equação deve ser usado, resultando

$$u = \frac{64}{\pi^3}\exp(-\pi^2 L) \qquad 2.13$$

2.2.1.4 Aplicação das equações básicas da condução na determinação da difusividade térmica

Uma análise das soluções obtidas para as diferentes geometrias até aqui estudadas mostra que elas possuem uma mesma forma estrutural, podendo ser representadas por meio da equação

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n exp(-C_n t) \qquad 2.14$$

Nesta equação, A_n representa o coeficiente constante de cada termo da série que depende do formato do corpo e do número de Biot. O parâmetro B_n é função do formato do corpo, das ordenadas do ponto de medida considerado e do número de Biot. Já a constante C_n depende do formato e das propriedades físicas do corpo considerado, do seu tamanho e do número de Biot. Definida desta forma, a equação 2.14 pode ser adotada como a equação geral para a determinação da distribuição de temperatura com o tempo para um corpo qualquer.

Uma vez que a série representada pela equação 2.14 é convergente, para $t > t_L$ — $Fo \geq 0{,}30$ no caso de corpos infinitos ou $L \geq 0{,}25$ no caso de corpos finitos — é possível empregar apenas o primeiro termo da série, ou seja

$$u = A_1 B_1 \exp(-C_1 t) \qquad 2.15$$

Tomando logaritmo em ambos os membros da equação 2.15 é possível escrever

$$\ln u = \ln(A_1 B_1) - C_1 t \qquad 2.16$$

A equação 2.16 mostra que para $t > t_L$ o logaritmo natural do adimensional de temperatura varia linearmente com o tempo, qualquer que seja o ponto de

medida considerado. Se prolongarmos o processo para $t \rightarrow \infty$ todos os pontos do corpo atingem a temperatura T_f e o regime estacionário é estabelecido.

Com base nessas equações, o processo de aquecimento ou resfriamento de um corpo pode ser dividido em três estágios. O primeiro estágio, também conhecido como período desordenado, é caracterizado por ser influenciado pela distribuição inicial de temperatura e a relação entre o adimensional de temperatura (*u*) e o tempo (*t*) é dada pela equação 2.14 levando-se em consideração todos os termos da série. O segundo estágio é denominado de período regular de aquecimento ou resfriamento e a relação entre *u* e *t* é dada pela equação 2.15. O terceiro estágio corresponde ao estado estacionário e a temperatura de todos os pontos do corpo é igual à temperatura do meio de aquecimento ou resfriamento, ou seja, no terceiro estágio o corpo está em equilíbrio térmico com o meio.

Diferenciando ambos os membros da equação 2,16 em relação ao tempo, resulta

$$\frac{1}{u} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -C_1 \qquad 2.17$$

A equação 2.17 mostra que a velocidade específica de aquecimento ou resfriamento de um corpo (C_1) independe do tempo e da ordenada do ponto considerado. Desde que C_1 é função das propriedades físicas, formato e dimensão do corpo, bem como das condições em que o processo ocorre na interface corpo meio considerado — número de Biot —, a velocidade específica de aquecimento ou de resfriamento dependerá apenas destes parâmetros.

Se a variação do adimensional de temperatura com o tempo é determinada experimentalmente e os resultados são representados em um gráfico semelhante ao da figura 2.4, a velocidade específica de aquecimento ou de resfriamento pode ser calculada através da inclinação do trecho retilíneo obtido no segundo estágio. O valor da velocidade específica de aquecimento ou de resfriamento assim obtida pode ser empregado para determinar a difusividade térmica do corpo considerado.

Comparando a equação 2.15 com a equação 2.4 é possível escrever

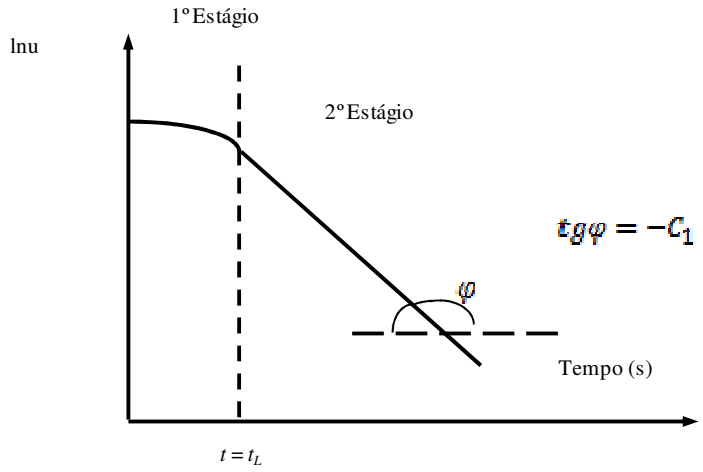


FIGURA 2.4 – VARIAÇÃO DO ADIMENSIONAL DE TEMPERATURA (u) EM FUNÇÃO DO TEMPO (t) DURANTE O AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DE CORPOS – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA EQUAÇÃO 2.14.

$$C_1 t = \lambda_1^2 Fo$$

Ou ainda

$$\alpha = \frac{r_m^2}{\lambda_1^2} C_1 \qquad 2.18$$

A equação 2.18 permite calcular a difusividade térmica de uma placa plana infinita homogênea e isotrópica. De maneira análoga, a difusividade térmica de um cilindro infinito homogêneo e isotrópico será dada por

$$\alpha = \frac{r_m^2}{\beta_1^2} C_1 \qquad 2.19$$

Admitindo *Bi* = ∞, a difusividade térmica de um cilindro ou de um paralelepípedo finito, comparando as equações 2.10 e 2.13 com a equação 2.15, pode ser determinada através da equação

$$\alpha = \frac{S}{\pi^2} C_1 \qquad 2.20$$

Nesta equação, S representa o fator de forma do cilindro ou paralelepípedo finito, definido por ocasião da apresentação das equações para essas geometrias. Com base na equação 2.20, LEONHARDT E DUSSE (l975), propuseram que a difusividade térmica de alimentos enlatados fosse determinada através da equação

$$\alpha = \frac{2{,}303S}{\pi^2 f_h} \qquad 2.21$$

Nesta equação, f_h representa o índice de declive da curva de aquecimento do alimento considerado e S o fator de forma do recipiente empregado. A utilização da equação só é possível se Bi = ∞. Para que esta condição seja válida é necessário que o tratamento térmico seja realizado em autoclave.

2.2.1.5 Distribuição não-uniforme de temperatura — Processos divididos

No enlatamento convencional durante a operação de esterilização, o alimento já envasado é colocado em autoclaves ou pasteurizadores onde é realizado o tratamento térmico. Geralmente esse tratamento é constituído de duas etapas: aquecimento e resfriamento, como mostrado na figura 2.1. No aquecimento, a condição de distribuição uniforme de temperatura no instante inicial geralmente prevalece e a maioria dos autores é unânime em adotar distribuição uniforme de temperatura no interior do recipiente para o instante inicial $t = 0$. Já no resfriamento, se a autoclave ou o pasteurizador não é dotado de sistema de agitação dos recipientes, a hipótese de distribuição inicial de temperatura uniforme não é verdadeira. Dessa forma, não é possível o emprego das equações apresentadas anteriormente.

Em alguns casos, a temperatura do meio pode variar como na figura 2.5. BALL E OLSON (1957) classificaram este tipo de tratamento térmico como sendo um processo dividido. Neste caso, para $t = t_q$ a temperatura inicial do alimento não é uniforme, ou seja, no instante $t = t_{q-1}$ não se tem distribuição uniforme de temperatura.

A solução da equação 2.1 quando não temos distribuição uniforme de temperatura não é simples. Para um cilindro infinito, CARSLAW E JAEGER (1959), admitindo $Bi = \infty$, mostraram que a previsão da temperatura em função do tempo, quando a

condição de distribuição uniforme de temperatura não é verificada, pode ser estimada por meio da equação

$$T_1 - T = \frac{2}{r_m^{\,2}} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_j R)}{J_1^2(\beta_j)} \exp(-\beta_j^{\,2} Fo) \int_0^{r_m} r f(r) J_0(\beta_j R) dr \qquad 2.22$$

Nesta equação, *f(r)* representa uma função de *r* que fornece a distribuição inicial de temperatura.

A integral contida na equação 2.22 deve ser avaliada graficamente, tornando trabalhoso seu emprego. No caso da figura 2.5, HAYAKAWA E BALL (1969) mostraram que é possível prever, com boa precisão, a temperatura (*T*) para $t = t_q$. Para tanto é necessário aplicar o teorema de Duhamel — CARSLAW E JAEGER (1959) — às equações desenvolvidas para a condição de distribuição uniforme de temperatura. A aplicação deste teorema às equações 2.4, 2,6, 2.8 e 2.11 fornece

$$T = T_q + \sum_{i=1}^{q-1} (T_i - T_0) u(L - L_i) - \sum_{i=1}^{q} (T_i - T_0) u(L - L_{i-1}) \qquad 2.23$$

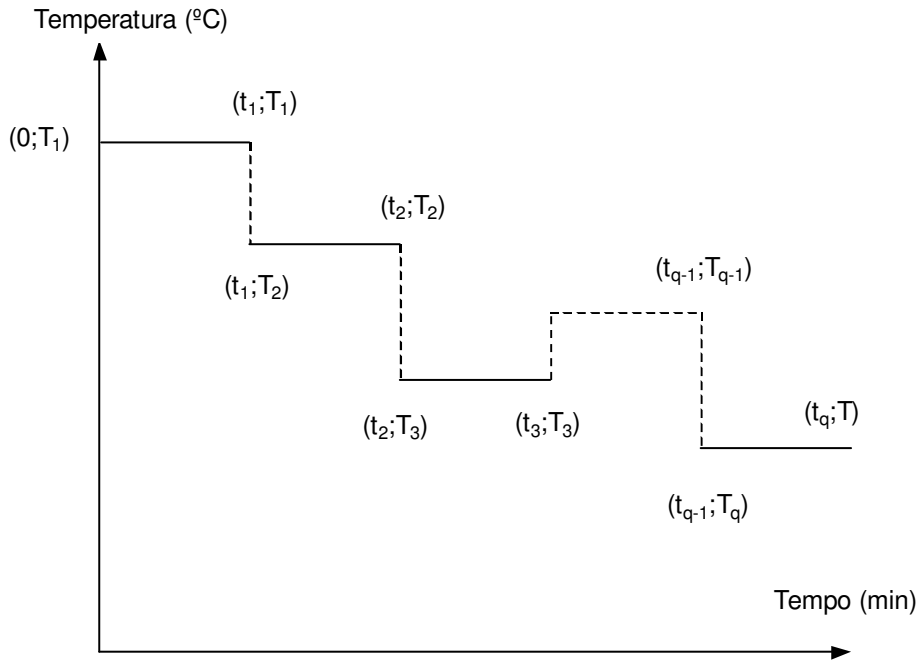


FIGURA 2.5 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MEIO DURANTE UM TRATAMENTO TÉRMICO

2.2.2 Discretização — Método das diferenças finitas

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

Com base neste princípio, a variação da temperatura com o tempo e a posição em um recipiente paralelepipédico pode ser representada pela equação 2.1.

De acordo com o discutido na seção anterior, métodos analíticos podem ser utilizados, em certos casos, para efetuar soluções matemáticas exatas para problemas de transferência de calor por condução bidimensional ou mesmo tridimensional em regime variável. No entanto, dependendo da situação é possível encontrar problemas de transferência de calor por condução que não se encaixam nas soluções apresentadas. Nesses casos, com o desenvolvimento dos computadores pessoais, a melhor solução é frequentemente a que emprega a técnica numérica tal como *diferenças finitas*, *elementos finitos* ou método de *elementos de contorno* (INCROPERA E DEWITT, 2003).

2.2.2.1 Rede nodal

Ao contrário da solução analítica, que permite determinar a temperatura para qualquer ponto, a solução numérica permite a solução apenas para pontos discretos do sistema considerado. Assim, a primeira providência deve ser a escolha desses pontos. A figura 2.6 mostra como um volume de controle qualquer pode ser subdividido em um número de pequenas regiões que são identificadas com um ponto de referência, freqüentemente denominado *ponto nodal*. O conjunto de pontos recebe o nome de rede nodal, ou simplesmente rede ou malha.

Os pontos nodais são designados por um sistema de numeração que, para transferência de calor bidimensional, pode ter a forma mostrada na figura 2.6a. Neste caso, as coordenadas x, y foram designadas pelas letras i e j .

Cada nó representa uma região e sua temperatura é uma medida da temperatura média da região. Assim por exemplo, a temperatura do nó i,j da figura 2.6a pode ser interpretada como sendo a temperatura média da área vizinha sombreada.

A escolha dos pontos nodais depende de questões como: conveniência geométrica e precisão. Quanto maior o número de nós maior a precisão.

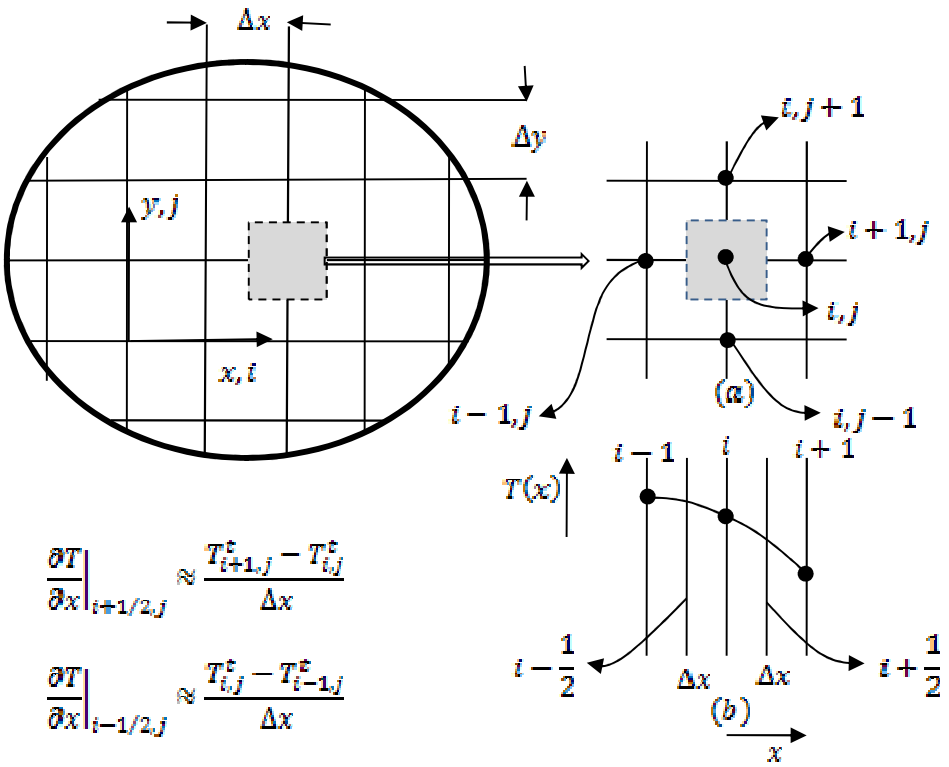


FIGURA 2.6 – REDE NODAL PARA CONDUÇÃO BIDIMENSIONAL. (a) REDE NODAL. (b) APROXIMAÇÃO POR DIFERENÇAS FINITAS.

2.2.2.2 Formas das diferenças finitas da equação da difusão do calor em coordenadas cartesianas

A determinação numérica da distribuição de temperatura exige que uma forma apropriada da equação 2.1 seja escrita para cada um dos pontos nodais em que a temperatura é desconhecida.

Para a derivada parcial em relação ao tempo, a aproximação das diferenças finitas para o nó i,j,k pode ser representada por meio da equação

$$\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^{t}}{\Delta t} \qquad 2.24$$

O índice $t+\Delta t$ é empregado para mostrar que a temperatura no nó i,j,k é função do tempo e a derivada em relação ao tempo corresponde à diferença de temperatura entre o tempo *futuro* $t+\Delta t$ e o tempo *anterior* t .

As *diferenças centrais* $\left(\left[(\partial)^2 T\right)/\partial x^2,\ \partial^2 T/\partial y^2\ e\ \partial^2 T/\partial z^2 \right)$ podem ser aproximadas como segue. Considere a derivada segunda $\partial^2 T/\partial x^2$. A partir da figura 2.6b, o valor desta derivada no nó i,j,k pode ser aproximado por

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right|_{i+1/2,j,k} \approx \frac{\left.\partial T/\partial x\right|_{i+1/2,j,k} - \left.\partial T/\partial x\right|_{i-1/2,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.25$$

Os gradientes de temperatura, como mostrado na figura 2.6, podem ser representados por

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{i+1/2,j,k} \approx \frac{T_{i+1,j,k}^{t} - T_{i,j,k}^{t}}{\Delta x} \qquad 2.26$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{i-1/2,j,k} \approx \frac{T_{i,j,k}^{t} - T_{i-1,j,k}^{t}}{\Delta x} \qquad 2.27$$

Substituindo as equações 2.26 e 2.27 na equação 2.25, resulta

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T^t_{i+1,j,k} + T^t_{i-1,j,k} - 2T^t_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} \qquad 2.28$$

De maneira similar é possível mostrar que

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T^t_{i,j+1,k} + T^t_{i,j-1,k} - 2T^t_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} \qquad 2.29$$

$$\left.\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right|_{i,j,k} \approx \frac{T^t_{mi,j,k+1} + T^t_{i,j,k-1} - 2T^t_{i,j,k}}{(\Delta z)^2} \qquad 2.30$$

Substituindo as equações 2.24, a 2.30 na equação 2.1, resulta

$$\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{T^{t+\Delta t}_{i,j,k} - T^t_{i,j,k}}{\Delta t} = \frac{T^t_{i+1,j,k} + T^t_{i-1,j,k} - 2T^t_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} + \frac{T^t_{i,j+1,k} + T^t_{i,j-1,k} - 2T^t_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} +$$

$$+\frac{T^t_{m+1,n} + T^t_{m-1,n} - 2T^t_{m,n}}{(\Delta z)^2} \qquad 2.31$$

Resolvendo para a temperatura nodal no tempo futuro $t+\Delta t$ e considerando que $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, tem-se

$$T^{t+\Delta t}_{i,j,k} = Fo\left(T^t_{i+1,j,k} + T^t_{i-1,j,k} + T^t_{i,j+1,k} + T^t_{i,j-1,k} + T^t_{i,j,k+1} + T^t_{i,j,k-1}\right) + (1 - 6Fo)T^t_{i,j,k} \qquad 2.32$$

Nesta equação, Fo representa o número de Fourier expresso em termos de diferenças finitas

$$Fo = \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2} \qquad 2.33$$

A equação 2.32 pode ser empregada para determinar a temperatura no tempo $t+\Delta t$ em qualquer nó de um recipiente retangular de dimensões a, b, c. Como condição inicial, admite-se que a temperatura de cada nó é uniforme em todo o recipiente. Como condição de contorno, para tratamentos térmicos realizados em autoclave, admite-se que a temperatura da superfície do recipiente é igual à temperatura do meio de aquecimento ou de resfriamento.

MANSON ET AL. (1970), empregaram a equação 2.32 para avaliar a letalidade e a retenção de nutrientes para alimentos esterilizados em recipientes retangulares.

PINHO (2004), empregando a técnica de elementos finitos, elaborou modelo matemático para a previsão da temperatura de alimento infantil em recipientes de vidro.

Para sistemas bidimensionais em x, y a equação resultante tem a forma

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = Fo\left(T_{i+1,j}^{t} + T_{i-1,j}^{t} + T_{i,j+1}^{t} + T_{i,j-1}^{t}\right) + (1 - 4Fo)T_{i,j}^{t} \qquad 2.34$$

Se o sistema é unidimensional em x para um nó interno i se reduz a

$$T_{i}^{t+\Delta t} = Fo\left(T_{i+1}^{t} + T_{i-1}^{t}\right) + (1 - 4Fo)T_{i}^{t} \qquad 2.35$$

2.2.2.3 Formas das diferenças finitas para a equação da difusão do calor em coordenadas cilíndricas

Para um recipiente cilíndrico em que existe simetria axial, a equação 2.1 toma a forma

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad 2.36$$

Nesta equação, T representa a temperatura (°C), t o tempo (s), r a distância radial (m) e y a distância vertical (m).

Como no caso do recipiente retangular, cada uma das derivadas parciais da equação 2.36 pode ser aproximada pelas diferenças finitas para o nó i,j

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta t} \qquad 2.37$$

$$\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r} \approx \frac{1}{r}\cdot\frac{T_{i-1,j}^{t} - T_{i+1,j}^{t}}{2\Delta r} \qquad 2.38$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{i-1,j}^t + T_{i+1,j}^t - 2T_{i,j}^t}{(\Delta r)^2} \qquad 2.39$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i,j-1}^t + T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t}{(\Delta y)^2} \qquad 2.40$$

Substituindo as equações 2.37a 2.40 na equação 2.36, resulta

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^t - T_{i+1,j}^t}{2r\Delta r} + \frac{T_{i+1,j}^t + T_{i-1,j}^t - 2T_{i,j}^t}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t - 2T_{i,j}^t}{(\Delta y)^2} \qquad 2.41$$

Resolvendo essa última equação para a temperatura nodal no tempo futuro, tem-se

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = T_{i,j}^t + \frac{\alpha \Delta t}{2r\Delta r}\left(T_{i-1,j}^t - T_{i+1,j}^t\right) + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2}\left(T_{i-1,j}^t + T_{i+1,j}^t - 2T_{i,j}^t\right) +$$

$$+ \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2}\left(T_{i,j-1}^t + T_{1,j+1}^t - 2T_{i,j}^t\right) \qquad 2.42$$

Nesta equação, $T_{i,j}^{t+\Delta t}$ representa a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente cilíndrico no instante $t + \Delta t$ (s), $T_{i,j}^t$ a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente no tempo t (s), Δr a diferença finita na direção radial (m), Δy a diferença finita na direção vertical (m) e α a difusividade térmica do alimento (m^2/s).

No caso da equação 2.42, devido à presença do grupo adimensional $\left({}^{\alpha \Delta t}/_{2r\Delta r}\right)$ não é possível definir um único grupo de Fourier. Como no caso do recipiente paralelepipédico, a equação 2.42 pode ser empregada para determinar a temperatura no tempo $t + \Delta t$ em qualquer nó de um recipiente cilíndrico de dimensões d, h . Como condição inicial, admite-se que a temperatura de cada nó é uniforme em todo o recipiente. Como condição de contorno, para tratamentos térmicos realizados em autoclave, admite-se que a temperatura da superfície do recipiente é igual à temperatura do meio de aquecimento ou de resfriamento.

TEIXEIRA ET AL (1969) e RODRIGUES ET AL (1998) empregaram a equação 2.42 para prever a temperatura em função do tempo e da posição durante o processo de esterilização de alimentos embalados em recipientes cilíndricos.

2.2.2.4 O método do balanço de energia – coordenadas cartesianas

Considerando que a equação 2.1 representa o balanço diferencial de energia para aquelas situações em que as formas de energia mecânica podem ser desprezadas em relação ao calor, o meio encontra-se parado — não há o transporte convectivo — e não há geração interna de calor, é possível obter a equação que permite calcular a distribuição de temperatura em função do tempo e da posição, a partir de um balanço de energia para um nó genérico da rede nodal. Para realizar o balanço de energia para um corpo retangular, seja o volume de controle representado na figura 2.7.

Uma vez que o sentido real do fluxo de calor é desconhecido, será adotado o sentido indicado na figura 2.7, ou seja, o nó interno está recebendo calor dos nós adjacentes. Considerando que o regime é variável, a equação do balanço de energia pode ser escrita como segue

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{ac} \qquad 2.43$$

A taxa de acúmulo de energia pode ser calculada com base na variação da energia interna do volume de controle representado pelo nó i, j, k

$$\dot{E}_{ac} = \rho C_p \Delta x \Delta y \Delta z \frac{T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^{t}}{\Delta T} \qquad 2.44$$

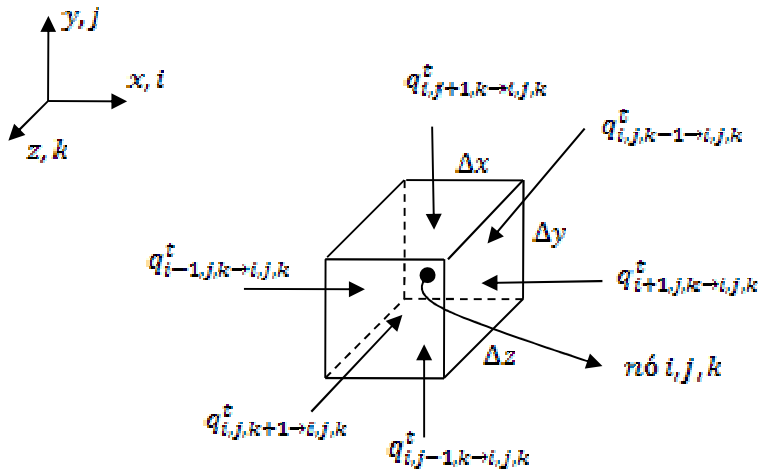


FIGURA 2.7 – VOLUME DE CONTROLE E FLUXOS DE CALOR POR CONDUÇÃO PARA UM NÓ INTERNO A PARTIR DOS NÓS ADJACENTES

Já a taxa de energia que entra no volume de controle representado pelo nó i, j, k corresponde à somatória das taxas de energia transferida entre o nó e os nós adjacentes. Considerando que o mecanismo é o de condução do calor, a taxa de energia transferida do nó $i-1, j, k$ para o nó i, j, k será

$$\dot{Q}^{t}_{i-1,j,k\to 1,j,k} = k\Delta y\Delta z\frac{T^{t}_{i-1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.45$$

Nesta equação, k representa a condutividade térmica do material (W/m.k), $\Delta y\Delta z$ a área de transferência de calor existente entre os nós considerados (m²), e a expressão $\left(\left(T^{t}_{i-1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}\right)/\Delta x\right)$ a aproximação por diferenças finitas do gradiente de temperatura na fronteira entre os dois nós (K/m).

Analogamente é possível escrever as taxas de energia transferidas por condução restantes

$$\dot{Q}^{t}_{i+1,j,k\to 1,j,k} = k\Delta y\Delta z\frac{T^{t}_{i+1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta x} \qquad 2.46$$

$$\dot{Q}^{t}_{i,j-1,k\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta z\frac{T^{t}_{i,j-1,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta y} \qquad 2.47$$

$$\dot{Q}^{t}_{i,j+1,k\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta z\frac{T^{t}_{i,j+1,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta y} \qquad 2.48$$

$$\dot{Q}^{t}_{i,j,k-1\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta y\frac{T^{t}_{i,j,k-1} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta z} \qquad 2.49$$

$$\dot{Q}^{t}_{i,j,k+1\to 1,j,k} = k\Delta x\Delta y\frac{T^{t}_{i,j,k+1} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta z} \qquad 2.50$$

Substituindo as equações 2.44 a 2.50 na equação 2.43 e fazendo $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, resulta

$$\rho C_p \Delta x^3 \frac{T^{t+\Delta t}_{i,j,k} - T^{t}_{1,j,k}}{\Delta t} = k\Delta x\left(T^{t}_{i+1,j,k} + T^{t}_{i-1,j,k} + T^{t}_{i,j+1,k} + T^{t}_{i,j-1,k} + T^{t}_{i,j,k+1} + T^{t}_{i,j,k-1} - 6T^{t}_{1,j,k}\right)$$

Resolvendo esta equação para a temperatura nodal no tempo futuro e lembrando que $\alpha = {}^{k}/_{\rho C_p}$, tem-se como resultado a equação 2.32.

2.2.2.5 O método do balanço de energia – coordenadas cilíndricas

Seja o recipiente cilíndrico mostrado na figura 2.8. Uma vez que há simetria axial, o balanço diferencial de energia para aquelas situações em que as formas de energia mecânica podem ser desprezadas em relação ao calor, o meio encontra-se parado e não há geração interna de calor, é representado pela equação 2.36.

Para estabelecer a equação que represente a equação 2.36 em termos de diferenças finitas, a partir de um balanço de energia, é necessário estabelecer o volume de controle. Considerando que há simetria axial foi selecionado o volume de controle mostrado na figura 2.9. Nesta figura também estão representados os fluxos de transferência de calor por condução que o nó i,j recebe dos nós adjacentes. Como no caso da figura 2.8, uma vez que o sentido real do fluxo de calor é desconhecido, será adotado o sentido indicado na figura 2.9, em que o fluxo interno recebe calor dos fluxos adjacentes.

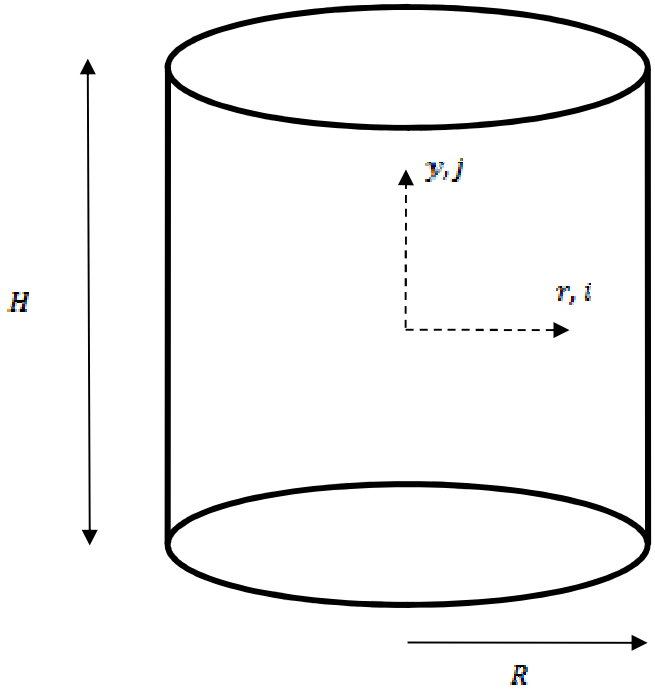


FIGURA 2.8 – RECIPIENTE CILÍNDRICO

Considerando regime variável é possível adotar, para o volume de controle representado na figura 2.9, a equação 2.43 do balanço de energia. Nesta equação, a taxa de acúmulo de energia pode ser calculada com base na variação da energia interna do volume de controle representado pelo nó i, j, k

$$\dot{E}_{ac} = \rho C_p (\Delta r)(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^{t}}{\Delta T} \qquad 2.51$$

Como no caso da figura 2.7, a taxa de energia que entra no volume de controle corresponde à somatória das taxas de energia transferidas entre o nó i, j, k e os nós adjacentes. Considerando o mecanismo de condução, a taxa de energia transferida do nó $i-1, j$ para o nó i, j será

$$\dot{Q}_{i-1,j\to i,j}^{t} = k(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T_{i-1,j}^{t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta r} \qquad 2.52$$

Nesta equação, k representa a condutividade térmica do material (W/m.k), $(r\Delta\theta)(\Delta y)$ a área de transferência de calor existente entre os nós considerados (m²),

e a expressão $\left(\left(T^{t}_{i-1,j,k} - T^{t}_{i,j,k}\right)/_{\Delta r}\right)$ a aproximação por diferenças finitas do gradiente de temperatura na fronteira entre os dois nós (K/m).

Analogamente é possível escrever as taxas de energia transferidas por condução restantes

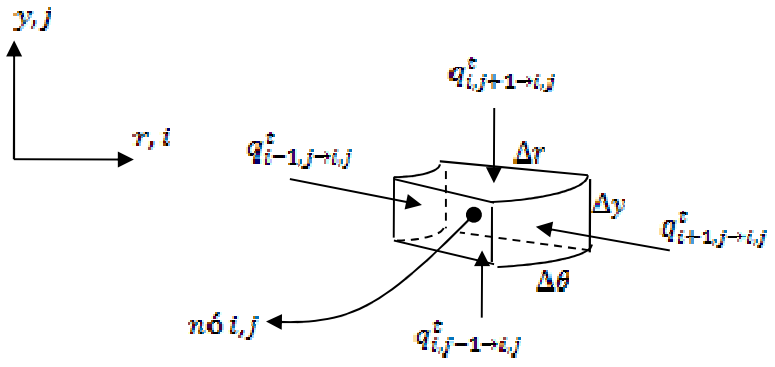


FIGURA 2.9 – VOLUME DE CONTROLE E FLUXOS DE CALOR POR CONDUÇÃO PARA UM NÓ INTERNO A PARTIR DOS NÓS ADJACENTES

$$\dot{Q}^{t}_{i+1,j\to i,j} = k\left((r+\Delta r)\Delta\theta\right)(\Delta y)\frac{T^{t}_{i+1,j} - T^{t}_{i,j}}{\Delta r} \qquad 2.53$$

$$\dot{Q}^{t}_{i,j-1-i,j} = k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T^{t}_{i,j-1} - T^{t}_{i,j}}{\Delta y} \qquad 2.54$$

$$\dot{Q}^{t}_{i,j+1-i,j} = k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T^{t}_{i,j+1} - T^{t}_{i,j}}{\Delta y} \qquad 2.55$$

Substituindo as equações 2.51 a 2.55 na equação 2.43, resulta

$$\rho C_p(\Delta r)(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T^{t+\Delta t}_{i,j,k} - T^{t}_{i,j,k}}{\Delta T} = k(r\Delta\theta)(\Delta y)\frac{T^{t}_{i-1,j} - T^{t}_{i,j}}{\Delta r} + k\left((r+\Delta r)\Delta\theta\right)(\Delta y)\frac{T^{t}_{i+1,j} - T^{t}_{i,j}}{\Delta r} +$$

$$+k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T^{t}_{i,j-1} - T^{t}_{i,j}}{\Delta y} + k(r\Delta r)\Delta\theta\frac{T^{t}_{i,j+1} - T^{t}_{i,j}}{\Delta y}$$

Lembrando que $\alpha = {}^{k}/_{\rho C_p}$, esta última equação toma a forma

$$T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^{t} = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}\left(T_{i-1,j}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}\left(T_{i+1,j}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) + \frac{\alpha \Delta T}{r \Delta r}\left(T_{i+1,j}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) +$$

$$+ \frac{\alpha \Delta T}{\Delta y^2}\left(T_{i,j-1}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) + \frac{\alpha \Delta T}{\Delta y^2}\left(T_{i,j+1}^{t} - T_{i,j}^{t}\right)$$

Fazendo, com base na figura 2.6,

$$\frac{T_{i+1,j}^{t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta r} = \frac{T_{i-1,j}^{t} - T_{i+1,j}^{t}}{2\Delta r}$$

Esta última equação pode ser escrita na forma da equação 2.42.

2.2.2.6 Outra forma da equação 2.42

Ao aplicar o método do balanço de energia verifica-se que cada nó da rede nodal está associado a uma capacitância térmica $C_{i,j}$. Além disso, cada nó recebe dos nós adjacentes uma taxa de energia representada por uma equação do tipo

$$\dot{Q}_{i,j} = K_{i,j}\left(\sum_{i=1}^{m} T_{i,j}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) + K_{i,j}\left(\sum_{j=1}^{n} T_{i,j}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) \qquad 2.56$$

Nesta equação, $\dot{Q}_{i,j}$ representa a taxa de transferência de calor para o nó i,j (W), $K_{i,j}$ a condutância térmica (W/K) entre o nó i,j e o nós adjacentes e $T_{i,j}^{t}$ a temperatura (°C) uniforme do nó i,j no tempo t (s).

A condutância térmica $K_{i,j}$ representa o grau de facilidade com que o calor é transferido entre o nó i,j e os nós adjacentes. Dependendo da geometria as condutâncias podem variar ou permanecer constantes.

Para descrever um sistema térmico é necessário instalar uma malha de capacitâncias e de taxas de transferência de calor que conduza a um sistema de equações algébricas em que cada nó da rede é representado por uma equação do tipo

$$C_{i,j}\frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^{t}}{\Delta t} = K_{i,j}\left(\sum_{i=1}^{m} T_{i,j}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) + K_{i,j}\left(\sum_{j=1}^{n} T_{i,j}^{t} - T_{i,j}^{t}\right) \qquad 2.57$$

Para aplicar esta equação para o cilindro finito representado na figura 2.8 é necessário estabelecer a rede nodal. Admitindo que as condições de contorno no recipiente cilíndrico sejam as mesmas e considerando a existência de simetria axial é possível conceber a rede de nós para um quarto do recipiente, constituído por um setor circular de 90° e metade da altura, como mostrado na figura 2.10.

Assim constituído, a malha de nós permite que o nó i,j troque energia com o conjunto de nós imediatamente vizinhos. O calor trocado entre o nó i,j e seus adjacentes resulta em uma malha de conexões, geralmente representada por condutâncias térmicas $K_{i,j}$, que correspondem ao inverso das resistências $R_{i,j}$ representadas na figura 2.10.

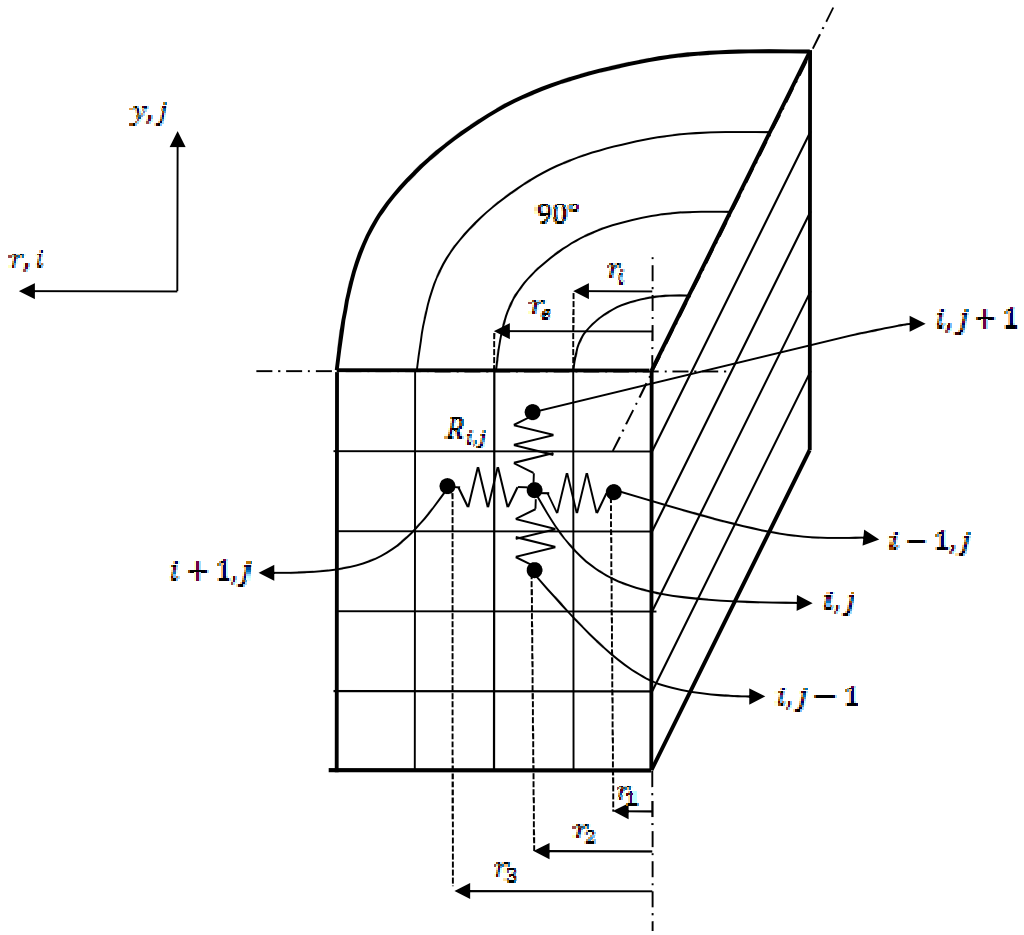


FIGURA 2.10 – REDE NODAL PARA UM CORPO CILÍNDRICO. AS CONDUTÂNCIAS $K_{i,j}$ CORRESPONDEM AO INVERSO DAS RESISTÊNCIAS $R_{i,j}$ REPRESENTADAS.

Aplicando a equação 2.57 ao nó i,j da figura 2.10, resulta

$$C_{i,j}\frac{T_{i,j}^{t+\Delta t}-T_{i,j}^{t}}{\Delta t}=K_{i-1,j}\left(T_{i-1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+K_{i+1,j}\left(T_{i+1,j}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+K_{i,j-1}\left(T_{i,j-1}^{t}-T_{i,j}^{t}\right)+$$

$$+K_{i,j+1}\left(T_{i,j+1}^{t}-T_{i,j}^{t}\right) \qquad 2.58$$

Sendo

$$K_{i-1,j}=\frac{\pi k\Delta y}{\frac{2\ln r_2}{r_1}} \qquad K_{i+1,j}=\frac{\pi k\Delta y}{\frac{2\ln r_3}{r_2}} \qquad K_{i,j-1}=K_{i,j+1}=\frac{\pi k\left(r_e{}^2-r_i{}^2\right)}{4\Delta y}$$

$$C_{i,j}=\rho C_p\frac{\pi(r_e{}^2-r_i{}^2)\Delta y}{4}$$

Nestas equações, $T_{i,j}^{t+\Delta t}$ representa a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente cilíndrico no instante futuro $t+\Delta t$ (s), $T_{i,j}^{t}$ a temperatura (°C) no nó i,j no interior do recipiente cilíndrico no instante anterior t (s), Δt a diferença finita no tempo (s), $K_{i,j}$ as condutâncias térmicas entre o nó i,j e os nós adjacentes (W/K), $C_{i,j}$ a capacitância térmica do nó i,j (J/K), k a condutividade térmica do alimento (W/m.K), ρ a massa específica do alimento (kg/m³), C_p o calor específico do alimento (J/kg.K) e Δy a diferença finita na direção axial (m).

GEDRAITE (1999) empregou a equação 2.58 para calcular a esterilidade de tratamentos térmicos de alimentos enlatados em recipientes cilíndricos esterilizados em autoclaves estacionárias.

2.2.2.7 Formas das diferenças finitas para a equação da difusão do calor em coordenadas esféricas

Para um recipiente esférico, em que a transferência de calor é apenas radial, a equação básica da difusão do calor tem o seguinte aspecto

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad 2.59$$

Como no caso dos recipientes cilíndricos e retangulares, as derivadas parciais da equação 2.59 podem ser aproximadas pelas diferenças finitas para o nó i, resultando

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{\alpha \Delta t}{r \Delta r}\left(T_{i+1}^t - T_{i-1}^t\right) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}\left(T_{i+1}^t + T_{i-1}^t - 2T_i^t\right) \qquad 2.60$$

RODRIGUES ET AL (1998) empregaram a equação 2.60 para prever a temperatura em um recipiente cilíndrico corrigindo a difusividade térmica.

Ávila Neto e Oliveira (2008) analisaram um modelo dinâmico, baseado na equação 2.60 para processamento térmico de alimentos enlatados.

2.3 Determinação da difusividade térmica

A difusividade térmica reveste-se de importância na esterilização de alimentos quando o mecanismo é o da condução do calor. Como visto no item 2.2, essa propriedade permite prever a variação da temperatura com o tempo e a posição, condição necessária para o cálculo da esterilidade do processamento térmico. Ela está relacionada com a condutividade térmica (k), com o calor específico (c_p) e com a massa específica (ρ) do material que constitui o sistema analisado por meio da expressão

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \qquad 2.61$$

Segundo SINGH (1982), a difusividade térmica de um alimento depende da umidade e da temperatura, assim como da composição e da porosidade do mesmo. Como a temperatura e a umidade do produto podem mudar durante o processamento, a difusividade também é alterada. Assim, na determinação dessa propriedade devem ser escolhidos aqueles métodos que levem em consideração o intervalo de temperatura a ser empregado no tratamento térmico do alimento.

A determinação experimental da difusividade térmica tem recebido especial atenção desde o trabalho de DICKERSON (1965). Este autor propôs um equipamento de laboratório para a determinação da condutividade térmica de alimentos a

partir de dados da evolução temporal de temperaturas medidas no interior da amostra. O equipamento proposto consiste em um banho de água com agitação onde um cilindro com alta condutividade térmica que contém a amostra é imerso. Tanto a temperatura da superfície, quanto a do interior do cilindro são monitoradas com termopares.

RODRIGUES ET AL (1998) mostraram que uma variação de apenas 10% na determinação da difusividade térmica do alimento produz uma variação significativa no valor F do tratamento térmico.

Atualmente, para determinação experimental da difusividade térmica de alimentos existem três métodos classicamente utilizados.

- SWEAT (1986) – Determinação da difusividade térmica de alimentos empregando-se a equação 2.61 a partir da determinação experimental da condutividade térmica, do calor específico e da massa específica.
- CHOI E OKOS (1983) – Determinação simultânea da difusividade e da condutividade térmica empregando-se um equipamento de laboratório que contenha uma fonte de calor linear, tipo sonda quente, com um termopar auxiliar fixado paralelamente à fonte quente.
- BALL E OLSON (1957) – Utilização da evolução da diferença entre a temperatura transiente em uma posição central da amostra (T_c) e a temperatura do meio de aquecimento (T_1) em função do tempo. Em geral, o gráfico do $log(T_1 - T_c)$ em função do tempo apresenta uma parte curvilínea no início do processo térmico, seguida de uma parte linear. A inclinação (m) da parte linear pode ser usada para determinar o índice de declive da curva de aquecimento (f_h). O índice de declive da curva de aquecimento relaciona-se com a difusividade térmica por meio de equações similares a equação 2.21[1]. Este método só pode ser utilizado se a

[1] Somente é possível empregar a equação 2.21 para $Bi = \infty$ e para valores suficientemente grandes do tempo — $L \geq 0{,}25$. Essa última restrição está de acordo com Hayakawa (1969). Este autor sugere que sejam empregados os últimos pontos da curva de aquecimento na determinação da difusividade térmica de alimentos.

temperatura do meio de aquecimento T_1 for constante durante todo o processo térmico.

No caso da temperatura do meio de aquecimento variar com o tempo, GEDRAITE (2005) empregando a equação 2.58, desenvolveu um algoritmo computacional que permite determinar a difusividade térmica medindo-se a variação da temperatura do meio e do alimento com termopares.

BETTA ET AL. (2009), empregando equações semelhantes a 2.58, propuseram um método rápido para determinação da difusividade térmica que emprega o mesmo princípio sugerido por Gedraite (2005).

RIEDEL (1969) citado por CHOI E OKOS (1986) apresentou uma expressão para estimar a difusividade térmica para alimentos com teor de umidade acima de 40%

$$\alpha = 0{,}088 \times 10^{-6}(\alpha_a - 0{,}088 \times 10^{-6})x_a \qquad 2.62$$

Nesta equação, a difusividade térmica (α) é dada em (m^2/s), α_a representa a difusividade térmica da água na mesma temperatura e x_a a fração mássica de água presente no material dada em porcentagem.

MARTENS (1980) citado por CHOI E OKOS (1986) mostrou que a difusividade térmica a 20°C, dada em m^2/s, pode ser calculada em função da fração mássica dos componentes básicos dos alimentos — como água (x_a), proteína (x_p), gordura (x_g) e carboidratos expressos em porcentagem, por meio da expressão

$$\alpha = 0{,}146x_a + 0{,}100x_g + 0{,}075x_p + 0{,}082x_c \qquad 2.63$$

CHANG ET AL. (1990) propõem uma técnica para determinação simultânea da difusividade térmica do alimento e o coeficiente de transferência de calor entre o alimento e o líquido de cobertura no caso de alimentos particulados.

VARZAKAS ET AL. (2005) apresentaram uma metodologia experimental para determinação da difusividade térmica efetiva de solutos em materiais alimentícios.

VARGAS ET AL (2007), OLIVARES ET AL (2007) E ANSARI ET AL (2009) propuseram métodos para determinação da difusividade térmica de alimentos.

2.4 Autoclaves

Considerando que o objetivo deste trabalho é sugerir técnicas de operação da autoclave que permitam reduzir a destruição de nutrientes, será dada ênfase à descrição do equipamento. Para isso, será utilizado o trabalho de D'ANDREA NETO E LEONHARDT (2003) APUD LEONHARDT (2003).

2.4.1 Introdução

O principal objetivo de um tratamento térmico é preservar os produtos alimentícios pela destruição de enzimas e da atividade microbiológica, tornando o alimento seguro para consumo.

A intensidade do tratamento térmico depende da composição, das características físicas e da microbiota do alimento que será processado. Essas informações somadas àquelas que caracterizam a transferência de calor permitem calcular as condições de tempo e temperatura às quais o alimento deve ser submetido.

Para alguns produtos, as propriedades organolépticas podem ser mais importantes na determinação da intensidade do tratamento térmico. Processos usados em enlatamento de peixes, por exemplo, são determinados para amolecer a espinha dorsal do peixe resultando em um supertratamento térmico em termos de destruição de microrganismos. Também no processamento de produtos cárneos, alguns tratamentos são projetados para cozinhar e melhorar a textura, resultando em um supertratamento térmico em termos da destruição de microrganismos. Na

pasteurização de pepinos, a destruição de enzimas é mais importante na determinação da intensidade do tratamento térmico do que a destruição de microrganismos.

As seguintes informações permitem estabelecer o tratamento térmico mais adequado.

- Classificação a que pertence o alimento. Para cada valor de pH e da atividade de água tem-se um tratamento térmico mais adequado.
- Cinética das transformações, que permite selecionar as transformações de referência.
- Velocidade de transferência de calor que, associada à cinética das transformações — destruição de microrganismos, nutrientes etc. — permite determinar o tempo e temperatura mais adequados.

2.4.2 Escolha do processamento térmico

A capacidade de sobrevivência ou de multiplicação dos microrganismos presentes em um alimento depende de uma série de fatores. Entre esses fatores, estão aqueles relacionados com as características próprias do alimento — fatores intrínsecos — e os relacionados com o ambiente em que o alimento se encontra — fatores extrínsecos.

São considerados fatores intrínsecos a atividade da água — a_w —, a acidez — pH —, o potencial de óxido-redução — Eh —, a composição química, a presença de fatores antimicrobianos naturais e as interações entre os microrganismos presentes no alimento.

Entre os fatores extrínsecos, os mais importantes são a umidade, a temperatura e a composição da atmosfera que envolve o alimento. No enlatamento, os mais importantes são os fatores intrínsecos, pois se assume que a operação de exaustão — retirada de ar — foi bem sucedida e, portanto tem-se vácuo — ausência de ar — no interior do recipiente.

Quando as condições de desenvolvimento de algumas bactérias não são adequadas elas esporulam, ou seja, elas se apresentam em uma forma latente — esporo — muito resistente e protegida do meio. Quando o meio apresenta as condições de desenvolvimento, as bactérias esporulantes germinam, desenvolvendo-se. Em pH inferior a 4,5 os esporos não apresentam condições de germinar permanecendo inertes. Porém, quando o pH é igual ou superior a 4,5 as bactérias esporulantes germinam desenvolvendo-se. Assim, alimentos que possuem um pH abaixo de 4,5 — alimentos ácidos — não necessitam de tratamento térmico tão severo quanto aqueles que apresentam um pH igual ou superior a 4,5 — alimentos de baixa acidez. Por outro lado, os alimentos não ácidos necessitam ter seus esporos destruídos e, por isto, devem ser processados em temperaturas superiores a 100 °C. Em outras palavras, devem ser esterilizados. Alimentos ácidos por sua vez são processados em temperaturas menores que 100 °C. Em outras palavras, são pasteurizados.

2.4.3 Principais equipamentos usados no tratamento térmico de alimentos

A história do enlatamento de alimentos começa com Nicholas Appert, um confeiteiro francês, que colocou alimentos em garrafas ou jarros de vidros, tampou-as com rolhas e aqueceu-as em banhos de água em ebulição. A maioria dos alimentos assim tratados não se deteriorou e ele anunciou essa descoberta em 1810. Embora Appert fosse um trabalhador minucioso e cuidadoso, a ciência da microbiologia ainda era desconhecida naquele tempo e ele foi incapaz de explicar por que seu método era eficaz. Ele acreditava que a combinação de calor e a remoção de ar preveniam a tendência à decomposição.

Cinqüenta anos depois Louis Pasteur demonstrou que certos microrganismos são responsáveis pela fermentação e decomposição dos alimentos. Essa descoberta explicou por que o método de Appert era eficaz. Atualmente é fato conhecido que todos os alimentos contêm microorganismos que eventualmente irão causar deterioração, a não ser que sejam controlados ou destruídos. Como existem alimentos altamente susceptíveis à deterioração são necessários tratamentos drásticos. Assim surgiu a autoclave.

Em 1874, A. K. Shriver, um enlatador de Baltimore, Maryland, inventou a panela de pressão: o primeiro sistema de autoclave que empregava vapor sob pressão para processamento de alimentos em altas temperaturas. Este evento assinalou o começo do processamento comercial de alimentos enlatados. Antes da invenção de Shriver, banhos de água em ebulição eram utilizados para aquecer alimentos enlatados. O período de tempo requerido na água em ebulição para prevenir deterioração dependia do produto alimentício e da experiência prévia do enlatador. Não somente a contaminação ocorria com freqüência, mas ela era tratada com um aumento arbitrário do tempo de processamento em água de ebulição. Com a invenção da autoclave o método passou a ser "mais científico" necessitando de considerações teóricas.

De acordo com o "Food and Drug Administration" — FDA — o termo autoclave significa um aparelho fechado ou qualquer outro equipamento usado para o processamento térmico de alimentos. Neste trabalho, procurando restringir o conceito dado pelo FDA, o vocábulo autoclave será empregado para os equipamentos que trabalham sobre pressão no processamento térmico de alimentos enlatados.

Hoje em dia as autoclaves são os equipamentos mais empregados para o tratamento térmico de alimentos enlatados, quando o enlatamento é o convencional. Além da indústria de alimentos, autoclaves são encontradas em hospitais, clínicas, laboratórios de microbiologia e em muitos outros tipos de processos industriais em que haja a necessidade da operação de esterilização ou de aquecimento em temperaturas superiores a 100 ºC. Em razão deste uso universal, as autoclaves são encontradas nas mais variadas formas e tamanhos.

As autoclaves estacionárias são recipientes fechados — vasos de pressão —, descontínuos, sem sistema de agitação e, dependendo da sua construção, podem ser verticais ou horizontais. O meio de transferência de calor durante o aquecimento geralmente é vapor saturado e, durante o resfriamento, água. Neste caso, durante o resfriamento é necessário o emprego de ar comprimido para manter a pressão necessária equilibrando o aumento da pressão interna ao recipiente. Autoclaves que usam água como meio de transferência de calor — quer no aquecimento ou no resfriamento — funcionam de duas maneiras distintas.

No primeiro tipo — autoclaves de imersão — os cestos com recipientes são imersos em água e a temperatura de processo, durante o aquecimento, é atingida com a injeção de vapor saturado. Neste caso, a água deve ser reciclada para não haver o aparecimento de regiões "frias" e "quentes", assegurando uma distribuição uniforme de temperatura. No segundo tipo — autoclaves com aspersão de água na forma de chuveiro — a água é lançada diretamente sobre os recipientes na forma de jatos de água — "chuveiros". Este tipo de autoclave requer o uso de um trocador de calor acoplado cuja função é aquecer a água nas fases de aquecimento e esterilização, ou resfriá-la na fase de resfriamento.

Com intuito de melhorar a transferência de calor em alimentos que se aquecem predominantemente por convecção e que apresentam um mecanismo misto de transferência de calor — aquecem por convecção e em seguida por condução — surgiram as autoclaves de agitação, que imprimem um movimento de rotação no recipiente. Estas autoclaves podem ser contínuas ou descontínuas.

A autoclave hidrostática é basicamente uma autoclave estacionária. Nela, o alimento a ser processado é transportado continuamente por um sistema de correias. Nestas autoclaves, a pressão necessária para fornecer a temperatura de esterilização é fornecida hidrostaticamente pelas colunas de água dos sistemas de alimentação e de descarga. Geralmente elas são projetadas para que possam processar diversos tamanhos de latas sem a necessidade de grandes modificações no equipamento. Autoclaves hidrostáticas constituem o sistema contínuo mais simples para o processamento térmico de alimentos enlatados.

2.4.4 Salas de esterilização

O processamento de alimentos em uma autoclave estacionária é uma operação descontínua. Por outro lado, na grande maioria dos casos as operações de preenchimento, exaustão e recravação são contínuas. Assim, torna-se necessário especificar o número de autoclaves de tal forma a absorver a produção da linha geral de enlatamento transformando todo o processo em uma linha contínua de produção. As autoclaves necessárias para tornar o processo contínuo são agrupadas em um espaço físico geralmente chamado sala de esterilização. O

número de autoclaves de uma sala de esterilização pode ser calculado como segue.

Sendo *L* a capacidade da autoclave selecionada — número de latas processadas de cada vez — e *P* a produção desejada — número de latas por minuto —, o tempo de carga de uma autoclave, desprezando o tempo gasto para o manuseio dos cestos, será dado por

$$t_c = \frac{L}{P} \qquad 2.64$$

Por outro lado, o ciclo operacional de uma autoclave — *C* — pode ser dividido em duas etapas: tempo de carga — t_c — e o tempo de processamento propriamente dito — t_p. Lembrando que após o ciclo operacional da primeira autoclave — $C = t_c + t_p$ — ela deve estar disponível para nova carga, é possível escrever

$$C = Nt_c \qquad 2.65$$

Nesta equação, *N* representa o número necessário de autoclaves para que o processamento no setor de esterilização seja contínuo. Combinando estas duas últimas equações é possível calcular o número de autoclaves necessárias por meio da expressão

$$N = \frac{CP}{L} \qquad 2.66$$

Tendo em vista os dados necessários: ciclo operacional, capacidade da autoclave e a produção desejada, o número de autoclaves calculado dificilmente será inteiro. Este fato pode ser corrigido aproximando e somando um ao resultado. O fato das autoclaves serem fabricadas em tamanhos padrões facilita a seleção do tamanho apropriado para uma dada produção. No entanto, na seleção preliminar é necessário ter em mente que o tempo de carga não deve ser muito grande. Tempos de carga superiores a 30 minutos além de provocarem o resfriamento das

primeiras latas — com conseqüente redução da temperatura inicial — mantêm o alimento em temperaturas adequadas ao desenvolvimento de microrganismos termoresistentes.

2.4.5 Operação da autoclave

A figura 2.11 mostra como varia a temperatura de uma autoclave estacionária durante o processamento térmico de alimentos enlatados. De acordo com esta figura é possível distinguir três fases: aquecimento, esterilização propriamente dita e resfriamento. A fase de aquecimento, por sua vez, pode ser dividida em duas etapas não independentes: exaustão — onde a preocupação é eliminar o ar existente no interior da autoclave — e o aquecimento, para atingir a temperatura determinada para a esterilização.

De acordo com CHEN E RAMASWAMY (2002), a operação de uma autoclave pode ser realizada mantendo a temperatura constante durante a fase de esterilização — processos CRT (constant retort temperature) ou variando a temperatura da autoclave com o tempo, de acordo com um perfil pré-determinado — processos VRT (variable retort temperature).

O projeto de processos CRT para um dado produto alimentício é definido respondendo a duas perguntas: que temperatura?; e durante quanto tempo?.

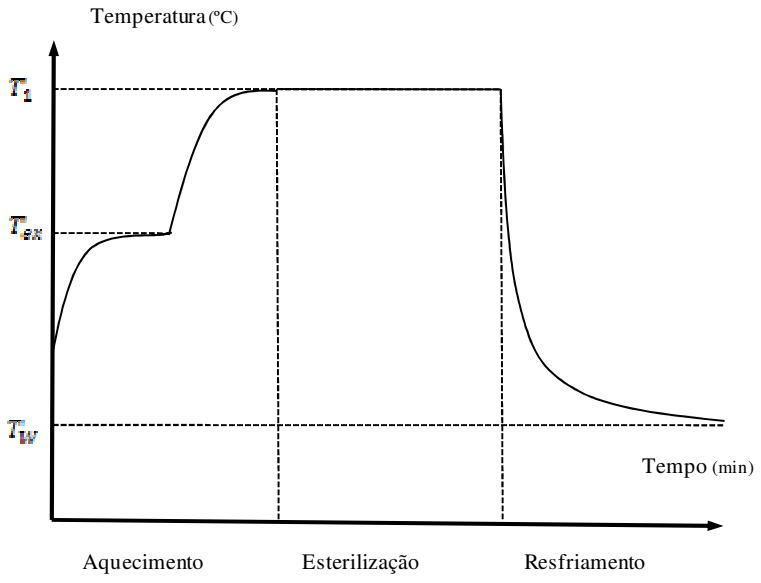


FIGURA 2.11 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE DURANTE O PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS.

Para cada combinação temperatura da autoclave tempo de processamento, existe apenas um processo capaz de destruir o microrganismo de referência com a probabilidade de falha recomendada. Em essência, a pergunta a ser respondida é qual combinação garante, ao mesmo tempo, a esterilidade desejada e o menor nível de destruição de nutriente?

Em contraste, nos processos VRT, a temperatura da autoclave sofre variações ao longo do tempo, de acordo com um perfil previamente estipulado. O responsável pelo processo deve escolher um dentre vários — teoricamente infinitos — processos viáveis. A escolha da melhor alternativa é mais difícil, porém executável com a ajuda de modelos matemáticos.

Sendo a seleção de processos VRT um problema de otimização, dois passos devem ser considerados (CHEN E RAMASWAMY, 2002):

3. desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam o processo com segurança;
4. identificação das condições ótimas baseadas em índices de desempenho tais como uso de energia e perda de propriedades nutricionais e organolépticas.

TEIXEIRA ET AL. (1975) foram os primeiros a analisar processos VRT, empregando como função objetivo a retenção de tiamina. Tendo em vista os resultados obtidos — melhoria de apenas 2% —, levaram os autores a sugerir que esse tipo de processo não fossem úteis. Mais tarde, SAGUY E KAREL (1979) afirmaram que os processos VRT ótimos eram muito específicos: cada combinação da geometria da embalagem, do produto analisado e do atributo crítico de qualidade levaria a uma única solução VRT.

Esses resultados iniciais desviaram a atenção dos pesquisadores para o assunto. Em 1991, BANGA ET AL, fazendo uso de um processo iterativo, computacionalmente eficiente para a busca de uma curva de temperatura para o processo VRT favorável e examinando a retenção de nutrientes, confirmaram a pequena vantagem da técnica VRT em relação à CRT. Esses mesmos autores, trabalhando

com outras funções objetivo: qualidade do alimento em contato com a superfície do recipiente e tempo de processamento, conseguiram uma melhora de 20% na qualidade do alimento em contato com a embalagem. No mesmo estudo, os autores mostraram que é possível obter a mesma letalidade e qualidade superficial do alimento alcançada pela melhor técnica CRT, porém com tempos de processamento inferiores em até 16,5%.

Com o desenvolvimento dos microprocessadores e de seus aplicativos, CHEN E RAMASWAMY (2002) mostraram que o processamento VRT com função exponencial melhora a qualidade da superfície e a economia de energia decorrente da redução do tempo de processamento. YOSHIMI (2002), empregando como atributo de qualidade o grau de cozimento do alimento, mostrou que a temperatura da autoclave pode ser otimizada por uma função do tipo rampa.

Por outro lado, Vargas et al. . (2000) mostram que é necessário levar em conta um grande número de variáveis na determinação do perfil mais adequado para a temperatura da autoclave, justificando a introdução das distribuições de freqüências das principais variáveis.

Como se observa o assunto é amplo e permite a existência de trabalhos que possam indicar qual a melhor técnica de operação da autoclave.

2.5 Avaliação do tratamento térmico

O entendimento e a discussão dos métodos de cálculo do tempo de esterilização — também conhecido como tempo de processamento térmico — para a conservação de alimentos enlatados devem começar com o conhecimento dos microrganismos presentes, já que são eles que devem ser destruídos. A discussão dos métodos empregados basear-se-á no trabalho de LEONHARDT E KUNIGK (2003) APUD LEONHARDT (2003),

Durante o processamento térmico de alimentos enlatados, além da destruição dos microrganismos presentes, ocorrem numerosas transformações químicas e biológicas: umas desejáveis e outras indesejáveis. Favorecer as transformações

desejáveis e inibir as indesejáveis fazem parte dos objetivos do responsável pelo projeto do processamento térmico.

A cinética da destruição térmica de microrganismos pelo calor úmido mostra que sua resistência térmica fica caracterizada através da curva de destruição térmica e que, tendo em vista o número de fatores que interferem, os parâmetros que caracterizam esta curva devem ser determinados utilizando o próprio alimento. No entanto, o simples conhecimento da curva de destruição térmica dos microrganismos envolvidos não permite resolver o problema. A cinética das transformações indesejáveis que se baseia nos mesmos parâmetros definidos para a destruição de microrganismos, também deve ser conhecida.

2.5.1 Cinética das transformações

Durante o processamento térmico de alimentos ocorrem numerosas transformações. Algumas destas transformações são: amolecimento de tecidos devido ao cozimento; ativação de enzimas; crescimento de microrganismos; degradação do aroma e sabor; desnaturação de proteínas; destruição de vitaminas; escurecimento não-enzimático; hidrólise de diversos compostos; inativação de enzimas; morte de microrganismos; oxidação de diversos compostos; respiração de tecidos vivos.

Alguns destes fenômenos são complexos e geralmente resultam de uma ou mais reações bioquímicas simples. Assim, a morte de microrganismos pode ser resultante da destruição de enzimas essenciais para o desenvolvimento das células. No entanto, o resultado global é que deve ser analisado. Qualquer que seja a explicação dada, ela não altera a evidência do resultado experimental.

Sob este aspecto, o tipo mais comum de reação encontrada para essas transformações é o de primeira ordem, em que o parâmetro analisado — concentração de vitaminas, número de microrganismos, textura etc. — varia exponencialmente com o tempo, ou seja

$$\frac{dC}{dt} = kC \qquad 2.67$$

Nesta equação, *C* representa o parâmetro analisado; *t* o tempo e *k* a constante de velocidade da transformação analisada. Se a função analisada for crescente — como no caso do crescimento de microrganismos — então a equação 2.67 traduz o fenômeno. Caso contrário, como a derivada é negativa e a velocidade de reação é uma grandeza essencialmente positiva, a equação 2.68 deve ser escrita como segue

$$\frac{dC}{dt} = -kC \qquad 2.68$$

A constante de velocidade depende do fenômeno analisado e da temperatura. A forma mais universalmente aceita para descrever a variação da constante de velocidade com a temperatura é devida a Arrenhius (LEVENSPIEL, 1972 e AIBA ET AL. , 1973) cujo modelo obedece à equação

$$k = A \cdot \exp(-E / RT) \qquad 2.69$$

Nesta equação, *A* representa o fator de freqüência (s^{-1}); *E* a energia de ativação (cal/gmol); *R* a constante dos gases (1,987 cal/K.gmol); e *T* a temperatura (K). A equação 2.69 mostra a variação da constante de velocidade com a temperatura.

Bigelow (1921) mostrou que a constante de velocidade pode ser representada em função da temperatura por uma equação do tipo

$$k = k_r \cdot 10^{\frac{T - T_r}{z}} \qquad 2.70$$

Nesta equação, k_r representa a constante de velocidade na temperatura de referência T_r (°C) e *z* o valor *z* da transformação (K).

A equação 2.70 mostra que a variação da constante de velocidade com a temperatura é tanto maior quanto menor for o valor *z* da transformação. De acordo com esta equação o valor *z* da transformação pode ser definido como segue

Valor z da transformação	=	Intervalo de temperatura necessário para que a constante de velocidade da transformação seja multiplicada por 10.

AIBA ET AL. (1973) e BORZANI (1974), comparando a equação de Arrenhius com a de Bigelow, mostraram que no intervalo de temperatura de 100 a 160°C as duas podem ser aplicadas sem que o erro cometido ultrapasse a incerteza experimental verificada na determinação da constante de velocidade da reação.

A tabela 2.1 apresenta alguns valores da constante de velocidade, do valor *z* e da energia de ativação para algumas reações. Um exame dessa tabela permite tirar duas observações importantes.

TABELA 2.1 - CONSTANTE DE VELOCIDADE, ENERGIA DE ATIVAÇÃO E VALOR *Z* PARA ALGUMAS REAÇÕES

Reação Considerada	z (ºC)	E (kcal/gmol)	k_{121} (min^{-1})
Amolecimento de tecidos (textura)	25-45	10-30	0,005-0,5
Degradação de aroma e sabor	25-45	10-30	0,005-0,5
Destruição de vitaminas	25-30	20-30	0,002-0,02
Escurecimento não-enzimático	25-45	10-30	0,005-0,5
Inativação de enzimas	6,5-55	12-100	0,2-20
Morte de células vegetativas	4,5-6,5	100-120	1,20-1200
Morte de esporos	6,5-12	53-83	0,5-20

FONTE: (LUND, 1977).

1. O valor da constante de velocidade para as reações indesejáveis — amolecimento dos tecidos, degradação de aroma e sabor, destruição de vitaminas e escurecimento não-enzimático — possui uma ordem de grandeza bem inferior àquela obtida para as reações desejáveis — inativação de enzimas e morte de microrganismos. Esta comprovação experimental permite concluir que em altas temperaturas — por exemplo, 121°C — o processamento térmico é mais efetivo no que diz respeito à destruição de microrganismos e enzimas do que no caso das transformações que destroem o valor nutritivo e qualitativo do alimento.
2. Além disso, verifica-se também que as reações desejáveis são mais influenciadas pela temperatura do que as transformações indesejáveis.

Essas constatações permitem otimizar o tratamento térmico, ou seja, é possível garantir que as transformações desejáveis ocorram na sua totalidade, ao mesmo tempo em que as transformações indesejáveis são minimizadas.

A tabela 2.1 mostra ainda que a constante de velocidade para as transformações indesejáveis é praticamente a mesma. Além disso, ela mostra também que a influência da temperatura na constante de velocidade para as reações indesejáveis é praticamente a mesma. Esta observação permite que se escolha um dado parâmetro — nutrientes, textura, sabor ou cor — para a otimização do processamento térmico. Este é o fato que resultou no emprego da retenção de nutrientes como o parâmetro básico para o trabalho de otimização e, hoje em dia, quase todos os processamentos empregados comercialmente foram desenvolvidos com base na retenção de nutrientes (LUND, 1977).

2.5.2 Resistência térmica de microrganismos

Do ponto de vista prático a definição dos microbiologistas sobre a morte de microrganismos é satisfatória. Isto é: "o microrganismo morre quando perde sua capacidade de se reproduzir". Assim, a grande maioria dos estudos realizados sobre a destruição de microrganismos emprega a "falha de reprodução" como critério de morte.

Os resultados destes estudos mostram que quando microrganismos são submetidos ao calor sua destruição é geralmente muito regular. Na maioria dos casos, o número de células viáveis diminui exponencialmente com o tempo de exposição a uma temperatura constante e letal ao microrganismo, como em uma reação de ordem um

$$\frac{dN}{dt} = -kN \qquad 2.71$$

Nesta equação, N representa o número de sobreviventes — número de células viáveis. A constante de velocidade (k) nesse caso é conhecida como velocidade específica de destruição térmica do microrganismo e é função do microrganismo, do meio no qual se encontra o microrganismo e da temperatura. A influência da

temperatura na velocidade específica de destruição térmica é representada através da equação 2.70.

Integrando a equação 2.71 desde t ($N = N_i$) até um instante t qualquer ($N = N_f$) e rearranjando a equação obtida resulta

$$t = \frac{2{,}303}{k} \log \frac{N_i}{N_f} \qquad 2.72$$

A equação 2.72 representa a lei logarítmica de destruição térmica de microrganismos pelo calor úmido e permite calcular a relação existente entre o número inicial (N_i) e o número final (N_f) de microrganismos viáveis em uma suspensão, quando essa suspensão é exposta a uma temperatura constante e letal ao microrganismo durante um tempo t. Esta equação não tem significado para $N_f = 0$, pois para atingir essa situação — partindo de um número N_i qualquer de microrganismos — seria necessário um tempo infinito. Porém, nas aplicações comerciais isto não ocorre. A destruição total pode ser alcançada em poucos segundos. Por outro lado, não tem sentido falar em número fracionário de microrganismos.

Este problema pode ser contornado admitindo que o número final de microrganismos corresponda à probabilidade de falha da operação de esterilização. O critério para se estabelecer o valor da probabilidade de falha adequada para o processo está diretamente envolvido com o alimento e a resistência térmica do microrganismo presente. STUMBO (1965) estabelece três níveis de probabilidade de falha (N_f). Para alimentos com pH acima de 4,5, *Clostridium botulinum* é o microrganismo que deve ser considerado. Para a espécie mais resistente deste microrganismo foi estabelecido arbitrariamente que o processamento térmico deve ser conduzido até uma probabilidade de falha de 10^{-12}.

Devido à presença de microrganismos mais resistentes, nem todo alimento deve ser processado com este nível de destruição. Para microrganismos termófilos, onde não temos microrganismos de interesse quanto à saúde pública, adotou-se uma probabilidade de falha de 10^{-3}. Para microrganismos mesófilos esporulantes a probabilidade de falha adotada foi de 10^{-5}.

Além da lei logarítmica de destruição térmica, a resistência térmica de um microrganismo pode ser caracterizada de diferentes formas. BIGELOW (1921) procurou caracterizar a resistência térmica de um microrganismo através do "Tempo de Destruição Térmica" (*TDT*)

Tempo de Destruição Térmica (TDT)	=	Ao intervalo de tempo necessário para que uma dada população microbiana, sob dadas condições, seja destruída quando a aquecemos em uma temperatura constante.

Mais tarde, KATZIN ET AL. (1944) introduziram o conceito do "Tempo de Redução Decimal" (*D*) para a caracterização da resistência térmica de microrganismos

Tempo de Redução Decimal (D)	=	Ao intervalo de tempo durante o qual devemos aquecer uma suspensão microbiana, sob dadas condições, em uma temperatura constante para que sua população sofra uma redução de 90%.

BALL E OLSON (1957) mostraram que a expressão "sob certas condições" que aparece nestas definições significa definir os seguintes fatores:

a) concentração de microrganismos;
b) nível de destruição;
c) meio de suspensão;
d) idade da cultura;
e) meio em que o microrganismo é cultivado; e
f) meio em que é feito o aquecimento.

2.5.2.1 Curvas de destruição térmica

A resistência térmica dos parâmetros analisados na operação de esterilização de um alimento enlatado fica caracterizada através da cinética da transformação. No caso da morte dos microrganismos, além da velocidade específica de destruição térmica (*k*) foram estabelecidos os conceitos de tempo de destruição térmica (*TDT*) e do tempo de redução decimal (*D*). Estes conceitos foram estendidos para as

outras transformações que ocorrem durante o processamento térmico. Assim, a resistência térmica de todos os parâmetros analisados no cálculo de esterilização pode ser caracterizada através da velocidade específica de destruição térmica, do tempo de destruição térmica ou do tempo de redução decimal.

Desde que a temperatura varia com o tempo durante o processamento térmico, é necessário conhecer como essas grandezas variam com a temperatura. Esta função é representada através da equação 2.70 no caso da velocidade especifica de destruição térmica. No caso do tempo de destruição térmica e do tempo de redução decimal, a variação desses parâmetros com a temperatura pode ser obtida como segue.

Para uma dada temperatura, o tempo de destruição térmica pode ser calculado através da equação 2.72. Fixando o nível de destruição em 10^n, resulta

$$TDT = \frac{2{,}303n}{k} \qquad 2.73$$

Desde que a velocidade específica de destruição térmica do microrganismo é função da temperatura, o tempo de destruição térmica também o será. Combinando a equação 2.70 com a 2.73, obtém-se

$$TDT = F \cdot 10^{(T_r - T)/z} \qquad 2.74$$

Nesta equação,

$$F = \frac{2{,}303n}{k_r} \qquad 2.75$$

representa o valor *F* do microrganismo e corresponde ao tempo de destruição térmica do microrganismo na temperatura de referência.

Da mesma forma, o tempo de redução decimal pode ser calculado através da equação 2.72. Lembrando que após o tempo de redução decimal o número de microrganismos é igual a 10% do número inicial — redução de 90% —, a equação 2.72 permite concluir que

$$D = \frac{2{,}303}{k} \qquad 2.76$$

A variação do tempo de redução decimal com a temperatura pode ser obtida substituindo a equação 2.70 na 2.76, resultando

$$D = D_r \cdot 10^{(T_r - T)/Z} \qquad 2.77$$

Nesta equação,

$$D_r = \frac{2{,}303}{k_r} \qquad 2.78$$

representa o tempo de redução decimal na temperatura de referência. Comparando as equações 2.73 e 2.76, obtém-se

$$TDT = nD \qquad 2.79$$

ou

$$F = nD_r \qquad 2.80$$

A bibliografia especializada denomina as funções representadas pelas equações 2.70, 2.74 e 2.77 de curvas de destruição térmica. Uma vez que em um papel semilogarítmico estas curvas são representadas por linhas retas, conhecendo-se um ponto e sua inclinação temos a função como um todo. Por outro lado, as equações 2.73, 2.76 e 2.79 mostram as relações existentes entre as diferentes grandezas. Assim, conhecendo-se o valor *z* da transformação e um valor da velocidade específica de destruição térmica, do tempo de destruição térmica ou do tempo de redução decimal, pode ser empregada qualquer das três equações. A bibliografia especializada costuma apresentar o valor *z* da transformação em conjunto com um valor do tempo de redução decimal na temperatura de referência (D_r) ou com o valor do tempo de destruição térmica na temperatura de referência (*F*).

Na determinação da resistência térmica de nutrientes em cada caso deve ser selecionado o nível de destruição desejado. A relação (N_i/N_f) neste caso é substituída pela relação (C_i/C_f) que deve ser definida em função do alimento desejado.

2.5.3 Avaliação do tratamento térmico

Que temperatura durante? Durante quanto tempo? A resposta a essas perguntas não é tão simples. Inicialmente deve ser estabelecida uma base de comparação que dependerá da transformação que está sendo analisada. Desde que a destruição de microrganismos é a transformação desejável na operação de esterilização, as bases de comparação foram inicialmente estabelecidas tendo em mente a morte de microrganismos.

2.5.3.1 Esterilidade e valor F_{PM} do tratamento térmico

Seja um sistema contendo uma dada população microbiana. Tendo em vista a definição do tempo de destruição térmica, para destruir os microrganismos presentes com uma probabilidade de falha estabelecida, esse sistema deve ser aquecido a uma temperatura constante e letal ao microrganismo considerado durante o tempo de destruição térmica desse microrganismo, nessa temperatura. Qualquer outro tempo de processamento empregado não fornecerá o nível de destruição desejado. Com base nesse conhecimento estabeleceu-se o conceito de esterilidade como segue.

Esterilidade (A)	=	Relação entre o tempo de aquecimento a uma dada temperatura e o Tempo de Destruição Térmica do microganismo de referência na mesma temperatura

Essa definição permite que se escreva

$$A = \left(\frac{t}{TDT} \right)_T \qquad 2.81$$

Tendo em vista as equações 2.72 e 2.73, a equação 2.81 pode ser escrita como

$$A = \frac{1}{n} \cdot \log \frac{N_i}{N_f}$$

Nesta equação, *n* representa o logaritmo do nível de destruição estabelecido e (N_i/N_f) o nível de destruição obtido quando o sistema é processado em uma temperatura *T* durante *t* minutos. Para *t < TDT*, o nível de destruição obtido é inferior ao fixado, a esterilidade é menor que 1,0 e o tratamento térmico conduz a uma subesterilização. Para *t = TDT*, o nível de destruição obtido é exatamente igual ao fixado, a esterilidade é unitária e o tratamento térmico fornece a esterilização desejada. Para *t > TDT*, o nível de destruição obtido é superior ao fixado, a esterilidade é maior que 1,0 e o tratamento térmico provoca uma super esterilização.

A equação 2.81 permite calcular a esterilidade para aqueles tratamentos térmicos em que a temperatura é constante. No entanto, no processamento térmico de alimentos enlatados a temperatura do alimento varia com o tempo. Nesses casos, admite-se que a temperatura seja constante para cada intervalo de tempo *dt*. Desta forma, a esterilidade deve ser calculada para cada intervalo, de acordo com a expressão

$$dA = \left(\frac{dt}{TDT} \right)_T \qquad 2.82$$

Tendo em vista a equação 2.74, a equação 2.82 permite calcular a taxa de variação da esterilidade com o tempo como segue:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{TDT} = \frac{1}{F} \cdot 10^{(T-T_r)/z} \qquad 2.83$$

Desta forma, a esterilidade de um tratamento térmico em que a temperatura varia com o tempo pode ser calculada através da integral

$$A = \int_0^t \frac{1}{TDT} dt = \frac{1}{F} \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.84$$

A relação

$$L_r = 10^{(T-Tr)/z} \qquad 2.85$$

é conhecida como taxa de letalidade ou simplesmente de letalidade e representa a relação entre o intervalo de tempo de processamento na temperatura de referência que corresponde a processar o alimento durante *t* minutos na temperatura *T* de modo a obter, sob o ponto de vista da esterilização, o mesmo efeito.

Além da esterilidade outros parâmetros foram estabelecidos. O mais comumente empregado é o valor F_P do tratamento térmico que pode ser definido como segue.

Valor F_P do Tratamento Térmico	=	Ao intervalo de tempo que devemos aquecer o sistema a uma temperatura de referência (T_r) constante, de modo a obtermos o mesmo efeito verificado no tratamento térmico realizado

Definido desta forma o valor F_P do tratamento térmico pode ser calculado através da cinética da transformação na qual se está interessado. Para a destruição de microrganismos, a equação 2.72 permite escrever

$$\int_0^t -k d\theta = \int_{N_i}^{N_f} \frac{dN}{N} \qquad 2.86$$

Se a temperatura é constante com o tempo, a velocidade específica de destruição térmica é constante e a equação 2.86, para a temperatura de referência, pode ser escrita como segue

$$F_P = \frac{2{,}303}{k_r} \log \frac{N_i}{N_f} \qquad 2.87$$

Se, por outro lado, a temperatura do tratamento térmico varia com o tempo, a velocidade específica de destruição térmica também será função do tempo. Neste caso, substituindo a equação 2.70 na equação 2.86 obtém-se

$$\int_{N_i}^{N_f} -\frac{dN}{N} = k_r \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt$$

ou ainda:

$$F_{PM} = \frac{2{,}303}{k_r} \log \frac{N_i}{N_f} = \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.88$$

Esta equação mostra que o valor F_{PM} do tratamento térmico referenciado ao microrganismo é calculado através da integral da letalidade em função do tempo. Comparando-se 2.84 com a equação 2.88, verifica-se:

$$F_{PM} = A \cdot F$$

Ou ainda,

$$A = \left(\frac{F_{PM}}{F} \right)_{Tr}$$

Essa última equação mostra que a esterilidade também pode ser entendida como sendo a relação entre o valor F_{PM} do tratamento térmico realizado referenciado ao microrganismo e o valor F do microrganismo de referência na temperatura de referência.

O valor F_{PM} do tratamento térmico representa o tempo de aquecimento a uma temperatura de referência constante para obter um dado nível de destruição. Por outro lado, o valor F do microrganismo fornece o tempo de aquecimento a uma temperatura de referência constante necessário para obtermos o nível de destruição pré-estabelecido. Assim, quando $F_{PM} < F$ o nível de destruição obtido é inferior ao fixado e o tratamento térmico conduz a uma subesterilização — $A < 1$. Para $F_{PM} = F$ o nível de destruição obtido é igual ao fixado e o tratamento térmico proporciona a esterilização desejada — $A = 1$. Para $F_{PM} > F$ o nível de destruição obtido é superior ao fixado e o tratamento térmico fornece uma super esterilização — $A > 1$.

2.5.3.2 Valor F_{PN} do tratamento térmico

A definição do valor F_P do tratamento não estabelece a transformação adotada. Assim, para a destruição de nutrientes a equação 2.68 permite que se escreva

$$\int_0^t -kdt = \int_{C_i}^{C_f} \frac{dC}{C} \qquad 2.89$$

Se a temperatura é constante com o tempo a constante de velocidade será constante e a equação 2.89, para a temperatura de referência, pode ser escrita como segue

$$F_{PN} = \frac{2,303}{k_r} \log \frac{C_i}{C_f} \qquad 2.90$$

Se, por outro lado, a temperatura varia com o tempo a constante de velocidade também será função do tempo. Neste caso substituindo a equação 2.70 na 2.90, obtém-se

$$\int_0^t -\frac{dC}{C} = \int_{C_i}^{C_f} 10^{(T-T_r)/z} dt$$

ou ainda

$$F_{PN} = \frac{2,303}{k_r} \log \frac{C_i}{C_f} = \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.91$$

2.5.4 Cálculo gráfico

Para calcular a temperatura e o tempo mais recomendado para processos CRT ou para escolher a melhor programação da temperatura da autoclave em processos VRT, o procedimento a ser seguido pode ser representado em um diagrama de blocos como o mostrado na figura 2.12.

Inicialmente, além de uma análise do modelo de transferência de calor que deve ser adotado, devem ser selecionadas as transformações desejáveis e indesejáveis

que devem ser consideradas em função do alimento que será processado. Na figura 2.12 considerou-se a destruição de microrganismos como desejável e a destruição de nutrientes como transformação indesejável. Vencida esta etapa a aplicação do método de cálculo escolhido aos dados que caracterizam a resistência térmica do microrganismo considerado e as curvas de aquecimento e resfriamento do alimento em causa permite determinar o valor F_p do tratamento térmico em relação ao microrganismo (F_{PM}). Este último valor estabelece a efetividade do tratamento térmico realizado. Uma vez obtida a esterilização desejada, o processo deve ser otimizado quanto à destruição de nutriente. Para isso, é necessário determinar-se o valor F_p do tratamento térmico em relação ao nutriente (F_{PN}), aplicando-se o método de cálculo escolhido aos dados que caracterizam a resistência térmica do nutriente considerado e as curvas de aquecimento e resfriamento que proporcionaram a esterilização desejada. O confronto do nível de destruição obtido (F_{PN}) com aquele estabelecido (F_N) permite estabelecer o tratamento térmico mais adequado. Ou seja, aquele que reduza o nível de destruição de nutrientes e forneça o nível de destruição do microrganismo necessário.

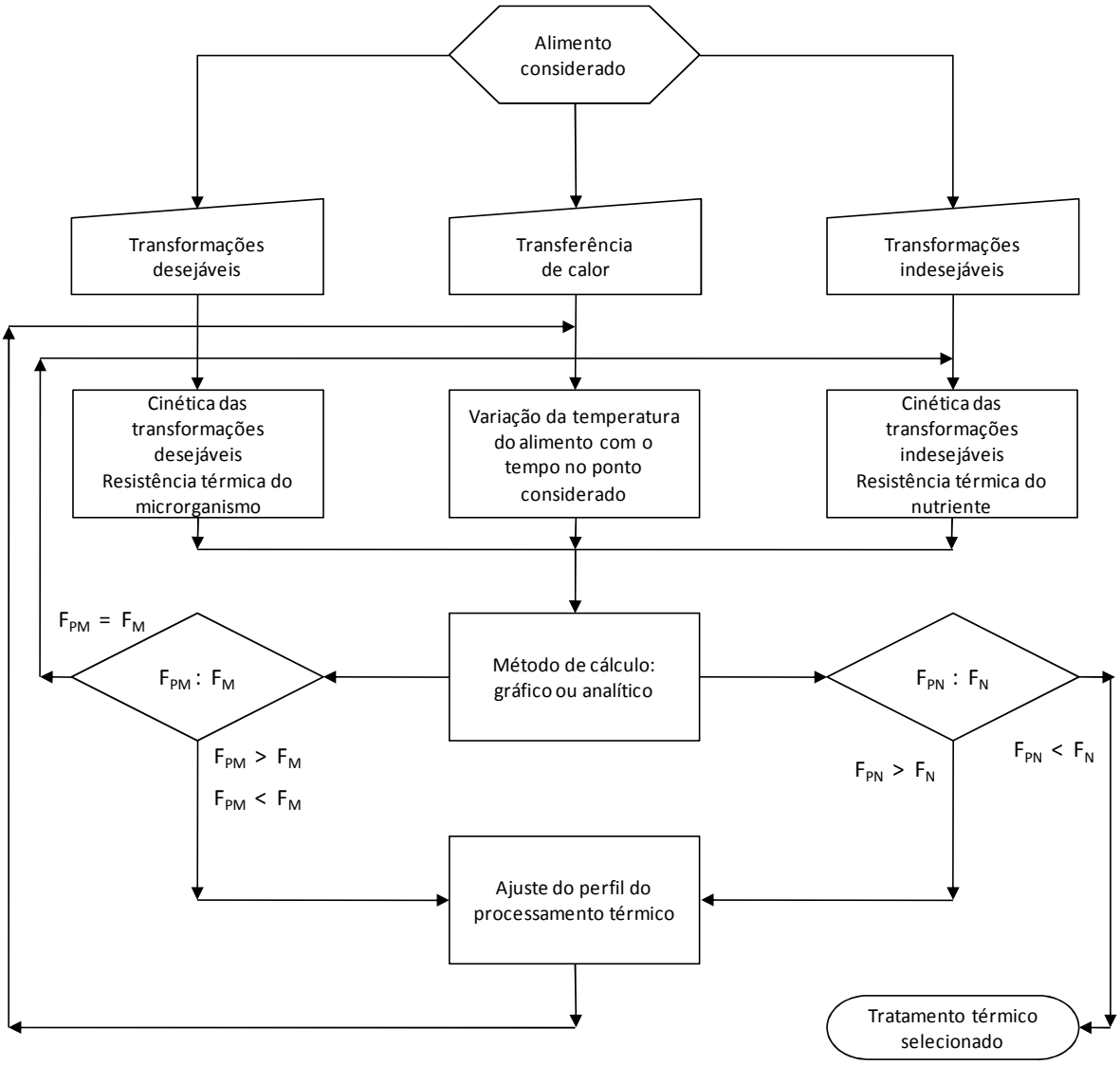


FIGURA 2.12 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCEDIMENTO EMPREGADO NA SELEÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO ADEQUADO

A figura 2.12 mostra ainda que qualquer ajuste no perfil do tratamento térmico, para atender $F_{PM} = F_M$ ou $F_{PN} \leq F_N$ deve ser seguido de novo cálculo do valor F_p do tratamento térmico.

O cálculo da esterilidade ou do valor F_P do tratamento térmico pode ser conduzido por diferentes métodos: gráficos ou analíticos. No entanto, os princípios básicos nos quais se fundamentam tais métodos são os mesmos, estando apoiados sobre os conceitos apresentados nos itens 2.5.1 a 2.5.3. Neste item, será discutido o cálculo gráfico apresentando o método geral descrito por BIGELOW ET AL. (1920) e as modificações posteriores introduzidas por BALL (1928). Apesar de STUMBO (1965) salientar que do ponto de vista prático o maior interesse do método geral é seu

valor histórico, os conceitos básicos estabelecidos por BIGELOW ET AL. (1920) servem de base para o desenvolvimento de métodos mais elaborados e, além disso, este tipo de cálculo se aplica a todo e qualquer tipo de tratamento térmico, o que nem sempre ocorre com os demais métodos.

Com base na equação 2.84, a esterilidade de um tratamento térmico em que a temperatura varia com o tempo pode ser calculada através da expressão

$$A = \int_0^t \frac{1}{TDT} dt \qquad 2.92$$

Para aquelas transformações em que a curva de destruição térmica pode ser representada por meio da equação 2.74, a esterilidade pode ser avaliada por meio da equação

$$A = \frac{1}{F} \int_0^t 10^{(T-T_r)/z} dt \qquad 2.93$$

Com base nas equações 2.92 e 2.93 o tratamento térmico deve ser interrompido quando a esterilidade for unitária. Se ao invés do tempo de esterilização estivermos interessados no valor da esterilidade do tratamento térmico, devemos considerar todo o tempo de processamento. Apesar de apresentado diferentemente, esse método de cálculo corresponde ao método básico geral proposto por BIGELOW ET AL. (1920).

As modificações propostas por BALL (1928) não alteram o princípio básico do método, mas apenas a forma de se efetuar o cálculo utilizando ao invés da esterilidade o valor F_P do tratamento térmico que pode ser calculado através da equação 2.88. Neste caso, o tratamento térmico deve ser interrompido quando o valor F_P do tratamento térmico for igual ao valor F da transformação desejada. Se ao invés do tempo de esterilização estivermos interessados no valor F_P do tratamento térmico devemos considerar todo o tempo de processamento.

2.5.5 Valor F_0 recomendado para alimentos de média acidez

Neste item serão apresentados os valores F_0 recomendados por STUMBO ET AL. (1975) para alimentos de média acidez acondicionados em recipientes metálicos. Para isso as seguintes hipóteses básicas devem ser consideradas.

1. Uma probabilidade de falha de que uma em 10^{12} latas poderá estar contaminada com esporos de *Clostridium botulinum* (STUMBO ET AL. , 1975).
2. A população de *Clostridium botulinum* de maior resistência antes da operação de esterilização poderá ser de no máximo de um esporo por grama de alimento contido no recipiente (RIEMANN, 1962; STEINKRAUS E AYRES, 1964; GREENBERG ET AL. . 1966; e INSALATA ET AL. . 1968).
3. A resistência máxima para os esporos de *Clostridium botulinum* a 121,1 ºC pode ser representada por $D_{121,1} = 0,2$ min (ESTY E MEYER, 1922; TOWNSEND ET AL. , 1938; STUMBO, 1949; STUMBO ET AL. , 1950; XEZONES E HUTCHINS, 1965; STUMBO, 1973).
4. Valores de *z* — que caracterizam a variação da resistência térmica dos esporos de *Clostridium botulinum* com a temperatura — variando de 7,8 a 10 ºC (ESTY E MEYER, 1922; TOWSEND ET AL. , 1938; STUMBO ET AL. , 1950; XEZONES E HUTCHINS, 1965; STUMBO, 1973).
5. Uma probabilidade de falha de que uma em 10^4 latas poderá estar contaminada com esporos de bactérias mais resistentes que *Clostridium botulinum* (STUMBO ET AL. , 1975).
6. A população de esporos de bactérias mesofílicas mais resistentes que *Clostridium botulinum* antes da operação de esterilização também poderá ser no máximo de um esporo por grama de alimento contido no recipiente (RIEMANN, 1962; STEINKRAUS E AYRES, 1964; GREENBERG ET AL. . 1966; e INSALATA ET AL. . 1968).
7. A resistência máxima a 121,1 ºC para esses esporos mais resistentes pode ser representada por $D_{121,1} = 1,0$ a $1,5$ min (STUMBO, 1945; STUMBO ET AL. , 1945; STUMBO ET AL. , 1950 e SECRIST E STUMBO, 1956)
8. Os valores de *z* que caracterizam a variação da resistência térmica dos esporos de bactérias mesofílicas mais resistentes que *Clostridium botulinum* variando de 8,9 a 11,1 ºC (STUMBO ET AL. , 1950 e SECRIST E STUMBO, 1956).

Com base nestas hipóteses, STUMBO ET AL. (1975) propuseram a tabela 2.2 que fornece o valor mínimo de F_0 necessário para esterilizar alimentos de média acidez para os quais o microrganismo de referência é *Clostridium botulinum*.

TABELA 2.2 - VALOR MÍNIMO DE F_0 PARA ESTERILIZAÇÃO COMERCIAL DE ALIMENTOS DE MÉDIA ACIDEZ CONTIDOS EM RECIPIENTES METÁLICOS QUE PERMITEM ASSEGURAR UM ALTO GRAU DE SEGURANÇA EM RELAÇÃO A CÉLULAS DE *Clostridium botulinum*.

Tamanho da lata	Temperatura da Autoclave (ºC)							
	110,0		115,5		121,1		126,7	
	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.
202 x 204	5,60	5,92	4,18	4,26	3,49	3,39	3,27	3,20
202 X214	5,67	5,98	4,22	4,29	3,60	3,45	3,40	3,26
202 X 308	5,70	6,03	4,27	4,33	3,70	3,52	3,46	3,30
202 X 314	5,72	6,05	4,32	4,36	3,74	3,56	3,48	3,32
211 X 200	5,68	5,99	4,23	4,29	3,62	3,46	3,41	3,26
211 X 210	5,75	6,06	4,57	4,36	3,87	3,60	3,60	3,32
211 x 212	5,75	6,07	4,57	4,36	3,89	3,63	3,63	3,33
211 x 214	5,76	6,08	4,57	4,37	3,91	3,65	3,66	3,34
211 x 300	5,79	6,09	4,57	4,37	3,92	3,67	3,68	3,34
211 x 304	5,84	6,11	4,57	4,39	3,98	3,70	3,71	3,35
211 x 306	5,84	6,12	4,57	4,40	4,00	3,72	3,73	3,36
211 x 400	5,86	6,16	4,65	4,44	4,08	3,78	3,80	3,38
211 x 413	5,93	6,20	4,71	4,46	4,13	3,83	3,86	3,42
211 x 414	5,93	6,20	4,72	4,46	4,13	3,83	3,86	3,42
211 x 600	6,00	6,25	4,78	4,50	4,17	3,89	3,91	3,46
300 x 206	5,76	6,08	4,58	4,37	3,90	3,64	3,64	3,34
300 x 308	5,93	6,18	4,74	4,45	4,13	3,81	3,89	3,40
300 x 400	5,96	6,21	4,80	4,47	4,19	3,86	3,99	3,43
300 x 407	6,01	6,23	4,84	4,50	4,24	3,89	4,04	3,45
301 x 411	6,04	6,25	4,88	4,52	4,31	3,92	4,11	3,47
303 x 406	6,05	6,26	4,89	4,52	4,35	3,93	4.14	3,48
303 x 509	6,15	6,31	4,96	4,56	4,47	4,01	4,22	3,52
307 x 113	5,75	6,07	4,28	4,36	3,71	3,56	3,48	3,33
307 x 203	5,79	6,12	4,60	4,39	3,93	3,68	3,68	3,36
307 x 214	5,93	6,19	4,77	4,45	4,15	3,82	3,94	3,41
307 x 306	6,02	6,23	4,86	4,50	4,30	3,89	4,10	3,45
307 x 400	6,10	6,27	4,93	4,52	4,44	3,96	4,18	3,49
307 x 409	6,16	6,30	4,98	4,55	4,55	4,01	4,23	3,52
307 x 510	6,25	6,35	5,08	4,60	4,64	4,08	4,32	3,56
307 x 512	6,27	6,35	5,09	4,60	4,65	4,09	4,33	3,57
307 x 704	6,39	6,40	5,15	4,67	4,71	4,17	4,42	3,60
401 x 205	5,91	6,21	4,70	4,47	4,12	3,82	3,85	4,42
401 x 211	6,03	6,25	4,86	4,51	4,27	3,90	4,07	3,46
401 x 411	6,48	6,38	5,21	4,68	4,82	4,17	4,54	3,58
401 x 602	6,53	6,44	5,34	4,78	5,01	4,27	4,68	3,62
404 x 200	5,86	5,18	4,65	4,45	3,97	3,76	3,71	3,39
404 x 211	6,05	6,26	4,88	4,53	4,32	3,93	4,12	3,48
404 x 307	6,27	6,33	5,08	4,58	4,63	4,05	4,34	3,55
404 x 309	6,33	6,33	5,10	4,59	4,67	4,07	4,38	3,56
404 x 700	6,58	6,49	5,46	4,83	5,12	4,34	4,84	3,67
603 x 700	7,15	6,66	6,20	4,77	5,81	4,67	5,47	3,82

A tabela 2.3 que fornece o valor de F_0 necessário para esterilizar alimentos de média acidez para os quais o microrganismo de referência é bactérias mesofílicas formadoras de esporos mais resistentes que *Clostridium botulinum* com moderado grau de segurança.

TABELA 2.3 - VALOR RECOMENDADO DE F_0 PARA ESTERILIZAÇÃO COMERCIAL DE ALIMENTOS DE MÉDIA ACIDEZ CONTIDOS EM RECIPIENTES METÁLICOS QUE PERMITEM ASSEGURAR UM GRAU DE SEGURANÇA MODERADO PARA ESPOROS MAIS RESISTENTES QUE *Clostridium botulinum* ($D_{121,1}$ = 1,0 MIN E Z = 10ºC).

Tamanho da lata	Temperatura da Autoclave (ºC)							
	110,0		115,5		121,1		126,7	
	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.
202 x 204	5,48	5,98	4,92	5,98	4,53	5,98	4,22	5,98
202x 214	5,51	6,11	4,98	6,11	4,60	6,11	4,32	6,11
202 x308	5,53	6,21	5,06	6,21	4,67	6,21	4,39	6,21
202 x 314	5,58	6,26	5,11	6,26	4,71	6,26	4,44	6,26
211 x 200	5,46	6,14	5,00	6,14	4,62	6,14	4,34	6,14
211 x 210	5,50	6,28	5,11	6,28	6,68	6,28	4,43	6,28
211 x 212	5,52	6,30	5,12	6,30	4,70	6,30	4,45	6,30
211 x 214	5,54	6,32	5,13	6,32	4,71	6,32	4,47	6,32
211 x 300	5,56	6,35	5,14	6,35	4,72	6,35	4,48	6,35
211 x 304	5,60	6,39	5,17	6,39	4,75	6,39	4,51	6,39
211 x 306	5,60	6,40	5,18	6,40	4,76	6,40	4,52	6,40
211 x 400	5,63	6,49	5,23	6,49	4,82	6,49	4,59	6,49
211 x 413	5,70	6,57	5,29	6,57	4,89	6,57	4,66	6,57
211 x 414	5,71	6,58	5,30	6,58	4,90	6,58	4,67	6,58
211 x 600	5,80	6,68	5,37	6,68	4,98	6,68	4,75	6,68
300 x 206	5,55	6,33	5,14	6,33	4,72	6,33	4,47	6,33
300 x 308	5,65	6,52	5,22	6,52	4,83	6,52	4,60	6,52
300 x 400	5,68	6,59	5,25	6,59	4,87	6,59	4,65	6,59
300 x 407	5,71	6,64	5,28	6,64	4,91	6,64	4,69	6,64
301 x 411	5,74	6,68	5,30	6,68	4,94	6,68	4,73	6,68
303 x 406	5,73	6,68	5,29	6,68	4,93	6,68	4,73	6,68
303 x 509	5,80	6,80	5,37	6,80	5,03	6,80	4,82	6,80
307 x 113	5,62	6,31	5,16	6,31	4,77	6,31	4,49	6,31
307 x 203	5,62	6,41	5,21	6,41	4,79	6,41	4,54	6,41
307 x 214	5,66	6,55	5,23	6,55	4,85	6,55	4,62	6,55
307 x 306	5,69	6,63	5,25	6,63	4,89	6,63	4,68	6,63
307 x 400	5,72	6,71	5,29	6,71	4,94	6,71	4,74	6,71
307 x 409	5,75	6,67	5,33	6,77	4,99	6,77	4,79	6,77
307 x 510	5,81	6,87	5,40	6,87	5,07	6,87	4,87	6,87
307 x 512	5,82	6,88	5,41	6,88	5,08	6,88	4,88	6,88
307 x 704	5,90	6,99	5,49	6,99	5,17	6,99	4,97	6,99
401 x 205	5,72	6,59	5,30	6,59	4,91	6,59	4,68	6,59
401 x 211	5,73	6,66	5,31	6,66	4,93	6,66	4,72	6,66
401 x 411	5,79	6,93	5,40	6,93	5,10	6,93	4,90	6,93
401 x 602	5,87	7,06	5,48	7,06	5,19	7,06	5,00	7,06
404 x 200	5,76	6,55	5,30	6,65	4,93	6,55	4,68	6,55
404 x 211	5,76	6,70	5,32	6,70	4,96	6,70	4,75	6,70
404 x 307	5,76	6,83	5,35	6,83	5,03	6,83	4,82	6,83
404 x 309	5,76	6,84	5,35	6,84	5,04	6,84	4,84	6,84
404 x 700	5,95	7,16	5,55	7,16	5,27	7,16	5,08	7,16
603 x 700	6,09	7,50	5,72	7,50	5,49	7,50	5,30	7,50

Finalmente, a tabela 2.4 que fornece o valor de F_0 necessário para esterilizar alimentos de média acidez para os quais o microrganismo de referência é uma bactéria mesofílica formadora de esporos mais resistentes que *Clostridium botulinum* com elevado grau de segurança.

TABELA 2.4 - VALOR RECOMENDADO DE F_0 PARA ESTERILIZAÇÃO COMERCIAL DE ALIMENTOS DE MÉDIA ACIDEZ CONTIDOS EM RECIPIENTES METÁLICOS QUE PERMITEM ASSEGURAR UM GRAU DE SEGURANÇA RIGOROSO PARA ESPOROS MAIS RESISTENTES QUE *Clostridium botulinum* ($D_{121,1}$ = 1,5 MIN E Z = 10ºC).

Tamanho da lata	Temperatura da Autoclave (ºC)							
	110,0		115,5		121,1		126,7	
	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.	Cond.	Conv.
202 x 204	8,28	8,98	7,64	8,98	6,98	8,98	6,45	8,98
202x 214	8,43	9,16	7,72	9,16	7,09	9,16	6,58	9,16
202 x308	8,56	9,31	7,81	9,31	7,19	9,31	6,70	9,31
202 x 314	8,62	9,38	7,86	9,38	7,25	9,38	6,76	9,38
211 x 200	8,47	9,21	7,75	9,21	7,12	9,21	6,62	9,21
211 x 210	8,62	9,42	7,79	9,42	7,20	9,42	6,74	9,42
211 x 212	8,62	9,45	7,80	9,45	7,21	9,45	6,77	9,45
211 x 214	8,54	9,49	7,81	9,49	7,23	9,49	6,79	9,49
211 x 300	8,49	9,52	7,83	9,52	7,25	9,52	6,81	9,52
211 x 304	8,54	9,58	7,86	9,58	7,28	9,58	6,86	9,58
211 x 306	9,57	9,61	7,87	9,61	7,30	9,61	6,88	9,61
211 x 400	8,68	9,73	7,98	9,73	7,39	9,73	6,97	9,73
211 x 413	8,81	8,96	8,10	8,96	7,49	8,96	7,09	8,96
211 x 414	8,82	9,87	8,11	9,87	7,50	9,87	7,09	9,87
211 x 600	8,95	10,02	8,25	10,02	7,62	10,02	7,22	10,02
300 x 206	8,66	9,49	7,84	9,49	7,25	9,49	6,80	9,49
300 x 308	8,71	9,78	8,03	9,78	7,39	9,78	7,00	9,78
300 x 400	8,70	9,88	8,11	9,88	7,46	9,88	7,08	9,88
300 x 407	9,75	9,95	8,16	9,95	7,51	9,95	7,14	9,95
301 x 411	8,81	10,02	8,20	10,02	7,56	10,02	7,19	10,02
303 x 406	8,81	10,03	8,18	10,03	7,55	10,03	7,19	10,03
303 x 509	8,93	10,20	8,31	10,20	7,68	10,20	7,32	10,20
307 x 113	8,70	9,46	7,97	9,46	7,35	9,46	6,85	9,46
307 x 203	8,71	9,61	7,94	9,61	7,36	9,61	6,91	9,61
307 x 214	8,69	9,82	8,07	9,82	7,42	9,82	7,03	9,82
307 x 306	8,74	9,94	8,12	9,94	7,48	9,94	7,11	9,94
307 x 400	8,80	10,06	8,18	10,06	7,55	10,06	7,20	10,06
307 x 409	8,83	10,16	8,24	10,16	7,62	10,16	7.27	10,16
307 x 510	8,97	10,31	8,32	10,31	7,74	10,31	7,39	10,31
307 x 512	8,98	10,32	8,33	10,32	7,75	10,32	7,41	10,32
307 x 704	9,11	10,48	8,46	10,48	7,88	10,48	7,54	10,48
401 x 205	8,83	9,98	8,12	9,98	7,52	9,98	7,11	9,98
401 x 211	8,79	10,00	8,19	10,00	7,55	10,00	7,17	10,00
401 x 411	8,96	10,40	8,30	10,40	7,76	10,40	7,44	10,40
401 x 602	9,07	10,59	8,42	10,59	7,90	10,59	7,59	10,59
404 x 200	9,00	9,83	8,15	9,83	7,56	9,83	7,11	9,83
404 x 211	8,85	10,06	8,23	10,06	7,59	10,06	7,22	10,06
404 x 307	8,90	10,24	8,24	10,24	7,67	10,24	7,32	10,24
404 x 309	8,90	10,27	8,25	10,27	7,68	10,27	7,34	10,27
404 x 700	9,13	10,74	8,51	10,74	8,01	10,74	7,71	10,74
603 x 700	9,39	11,24	8,72	11,24	8,34	11,24	8,05	11,24

3 Método de análise

O objetivo do presente método de trabalho é avaliar o melhor tratamento térmico para um dado conjunto alimento, embalagem e atributo crítico de qualidade.

3.1 Formulação do problema

Considerando que um processo VRT é capaz de melhorar a qualidade do alimento esterilizado em relação ao processo CRT (TEIXEIRA ET AL. (1975), SAGUY E KAREL (1979), BANGA ET AL. (1991) RAMASWAMY (2002) e YOSHIMI (2002)) — o problema a ser resolvido é determinar o melhor conjunto embalagem e perfil de temperatura da autoclave que resulte em uma melhoria significativa no atributo crítico de qualidade.

3.2 Hipóteses básicas

Na resolução do problema serão adotadas as seguintes hipóteses.

1. A transformação desejável é a destruição de esporos de *Clostridium botulinum*. Para isso, o valor F_M adotado será o sugerido por STUMBO ET AL. (1975) e apresentado na tabela 2.2, para cada tamanho de lata.
2. O valor de z que caracteriza a variação da resistência térmica do *Clostridium botulinum* com a temperatura é igual a 10°C.
3. A velocidade das transformações indesejáveis é praticamente a mesma e o valor z dessas transformações também é praticamente o mesmo, permitindo que a escolha de uma dada transformação desejada represente as demais (LUND, 1977). Assim, a transformação indesejável escolhida foi a destruição de vitaminas.
4. O valor de z que caracteriza a variação da resistência térmica do nutriente com a temperatura é igual a 30°C.
5. A variação da resistência térmica do microrganismo e do nutriente de referência obedece às equações 2.70, 2.74 e 2.77, de tal forma que o valor F_p do tratamento térmico pode ser calculado por meio da equação 2.88.
6. Para o nutriente, serão avaliados dois valores do valor F_p do tratamento térmico: o primeiro será baseado na temperatura do alimento no ponto

crítico e o segundo na temperatura do alimento em contato com a superfície da embalagem.

7. O mecanismo de transferência de calor é o de condução, com a adoção de difusividades térmicas equivalentes para alimentos que apresentem outro mecanismo de transferência de calor. Esse modelo alcança desempenhos comparáveis aos demais modelos, porém com equações mais simples (LAROUSSE E BROWN, 1997).
8. No instante inicial, a temperatura do alimento é uniforme.
9. A temperatura da superfície do alimento em contato com a embalagem atinge instantaneamente a temperatura do meio e é homogênea durante todo o processamento térmico, ou seja, é possível admitir que $Bi = \infty$.
10. A determinação da difusividade térmica do alimento a partir da curva de aquecimento do alimento permite admitir que essa propriedade seja isotrópica e não varie com a temperatura na faixa de temperatura empregada durante o tratamento térmico.

3.3 Teoria

Analisando a figura 2.12 a avaliação do tratamento térmico será conduzida com base no seguinte conjunto de dados e equações.

3.3.1 Dados iniciais

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

3.3.1.1 Cinética das transformações

T_r Temperatura de referência (°C)

z_M Valor z do microrganismo (°C)

z_N Valor z do nutriente (°C)

F_M Valor F do microrganismo (min)

3.3.1.2 Embalagem

a Largura do recipiente paralelepipédico (m)

b Profundidade do recipiente paralelepipédico (m)

c Altura do recipiente paralelepipédico (m)

d Diâmetro do recipiente cilíndrico (m)

h Altura do recipiente cilíndrico (m)

3.3.1.3 Transferência de calor

α Difusividade térmica do alimento ($m^2.s^{-1}$)

3.3.2 Equações básicas

Considerando que o alimento se aquece por condução, as equações básicas são aquelas vistas no item 2.2.1, aqui apresentadas resumidamente e acrescidas de outras desenvolvidas especialmente para este trabalho.

3.3.2.1 Corpos infinitos

Serão considerados apenas dois corpos infinitos básicos: a placa plana infinita e o cilindro infinito.

3.3.2.1.1 Placa plana infinita

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) \exp(-\lambda_i^2 Fo) \qquad 2.4$$

Nesta equação,

$$u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_o} \qquad A_i = \frac{2 sen\, \lambda_i}{\lambda_i + sen\, \lambda_i \cos \lambda_i}$$

$$X = \frac{x}{r_m} \qquad Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2}$$

λ_i representa a raiz i-ésima positiva da equação Bicotλ = λ, com $Bi = \frac{h r_m}{k}$.

3.3.2.1.2 Cilindro infinito

$$u = \sum_{j=1}^{\infty} A_j J_o(\beta_j R)\exp(-\beta_j^2 Fo) \qquad 2.6$$

Nesta equação,

$$u = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} \qquad A_j = \frac{2Bi^2}{(Bi^2 + \beta_j^2)\beta_j J_1(\beta_j)}$$

$$R = \frac{r}{r_m} \qquad Fo = \frac{\alpha t}{r_m^2}$$

β_j representa a raiz j-ésima positiva da equação $\beta J_1(\beta) = Bi J_0(\beta)$, com $Bi = \frac{h r_m}{k}$.

Sendo $J_n(x)$ a função de Bessel de primeira espécie e ordem n, que pode ser representada pela equação

$$J_n(x) = \sum \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k!\,\Gamma(n+k+1)} \qquad 2.7$$

3.3.2.2 Corpos finitos

Serão consideradas apenas duas formas de recipientes: retangulares e cilíndricos.

3.3.2.2.1 Recipientes cilíndricos

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} A_i \cos(\lambda_i X) A_j J_o(\beta_j R)\exp(-4\lambda_i^2 R_{ij} L) \qquad 2.8$$

Nesta equação,

$$R_{ij} = \frac{(d/l)^2 + (\beta_j/\lambda_i)^2}{(d/l)^2 + (\beta_1/\lambda_1)^2} \qquad L = \frac{\alpha t}{S}$$

$$S = \frac{d^2}{(d/l\ )^2 + (\ \beta_1 / \lambda_1\ )^2}$$

3.3.2.2.2 Recipientes paralelepipédicos

Neste caso serão consideradas duas situações: o recipiente retangular de altura infinita e recipiente retangular com as três dimensões finitas.

3.3.2.2.2.1 Paralelepípedo de seção retangular (a,b) e altura (c) infinita

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} A_i \cos\left(2\lambda_{ai}\frac{x}{a}\right) Aj \cos\left(2\lambda_{bj}\frac{x}{b}\right) \exp\left(-4R_{ij}L\right) \qquad 2.9$$

Nesta equação,

$$R_{ij} = \frac{\lambda_{ai}{}^2 b^2 + \lambda_{bj}{}^2 a^2}{\lambda_{a1}{}^2 b^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2} \qquad L = \frac{\alpha t}{S}$$

$$S = \frac{a^2 b^2}{\lambda_{a1}{}^2 b^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2}$$

3.3.2.2.2.2 Paralelepípedo retangular de dimensão (a,b,c)

$$u = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} A_i \cos(\ 2\lambda_{ai}\frac{x}{a}\ ) A_j \cos(\ 2\lambda_{bj}\frac{y}{b}\ ) A_k \cos(\ 2\lambda_{ck}\frac{z}{c}) \exp(-4R_{ijk}L) \qquad 2.10$$

Nesta equação,

$$R_{ijk} = \frac{\lambda_{a1}{}^2 b^2 c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2 c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2 b^2}{\lambda_{ai}{}^2 b^2 c^2 + \lambda_{bj}{}^2 a^2 c^2 + \lambda_{ck}{}^2 a^2 b^2}$$

$$L = \frac{\alpha t}{S} \qquad S = \frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_{a1}{}^2 b^2 c^2 + \lambda_{b1}{}^2 a^2 c^2 + \lambda_{c1}{}^2 a^2 b^2}$$

3.3.3 Análise preliminar

Com base nas informações sobre os recipientes é possível selecionar a equação que permite prever a variação da temperatura em função do tempo.

3.3.3.1 Recipientes cilíndricos

No caso de recipientes cilíndricos as seguintes condições são possíveis.

- Caso $\frac{d}{h} < 0{,}25 \rightarrow$ Cilindro infinito.
- Caso $0{,}25 \leq \frac{d}{h} \leq 4{,}00 \rightarrow$ Cilindro finito.
- Caso $\frac{d}{h} > 4{,}00 \rightarrow$ Placa plana infinita.

3.3.3.2 Recipientes paralelepipédicos

No caso de recipientes paralelepipédicos, considerando que $c \geq b \geq a$, as seguintes condições são possíveis.

- Caso $\frac{c}{a} \geq \frac{b}{a} > 4{,}00 \rightarrow$ placa plana infinita de espessura a.
- Caso $\frac{c}{a} > 4{,}00$ e $\frac{b}{a} \leq 4{,}00 \rightarrow$ Paralelepípedo de seção retangular de dimensões a e b, e altura infinita.
- Caso $4{,}00 > \frac{c}{a} > \frac{b}{a} \rightarrow$ paralelepípedo finito de dimensões (a, b, c).

3.4 Análise

Em se considerando o objetivo do presente trabalho, serão analisados dois tipos de tratamento térmico. O tratamento CRT, em que a temperatura da autoclave obedece ao modelo proposto na figura 2.1. Contraposto a este, será analisado o processo VRT em que a temperatura da autoclave obedece a um modelo do tipo apresentado na figura 3.1. Neste caso, para o intervalo de tempo L_i a temperatura da autoclave é mantida constante em uma temperatura T_m.

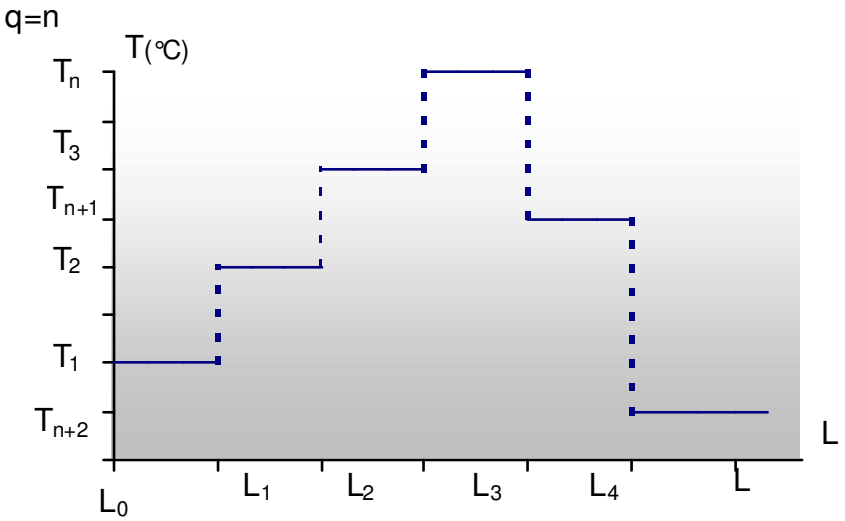


FIGURA 3.1 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE EM UM PROCESSO VRT.

Tanto no caso da figura 2.1, quanto no caso da figura 3.1, no resfriamento ou no segundo intervalo de tempo, a temperatura inicial do alimento não é mais constante. Para empregar as equações apresentadas no item anterior é necessário empregar a equação 2.23 proposta por HAYAKAWA E BALL (1969)

$$T = T_q + \sum_{i=1}^{q-1}(T_i - T_0)u(L - L_i) - \sum_{i=1}^{q}(T_i - T_0)u(L - L_{i-1}) \qquad 2.23$$

O apêndice A apresenta a forma de uso dessa equação.

3.4.1 Tratamentos térmicos selecionados

No que diz respeito aos tratamentos térmicos foram selecionados dois conjuntos. Um para análise preliminar e outro para a análise final.

3.4.1.1 Análise preliminar

Em se considerando que há uma infinidade de processo VRT possíveis, foram selecionados dois tratamentos térmicos. No primeiro, a temperatura da autoclave foi mantida constante em 121,1ºC. No segundo, a temperatura da autoclave inicialmente foi mantida constante em 100ºC e aumentada sempre que a diferença

de temperatura entre o ponto frio e a superfície se aproximava de 30ºC. Tanto no processo CRT quanto no VRT, o resfriamento foi conduzido mantendo a temperatura da água de resfriamento constante em 25ºC.

3.4.1.2 Análise final

Os resultados obtidos nos tratamentos térmicos discutidos na análise preliminar — tratamentos apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 — serviram de base para se estabelecer o processo VRT para as próximas dimensões de embalagens. O procedimento adotado segue os seguintes passos:

1. inicialmente estabelece-se o processo CRT que forneça a esterilidade desejada;
2. com base nesse processo calcula-se um tempo de tratamento térmico 20% inferior ao tempo de tratamento térmico que forneceu a esterilidade desejada;
3. com esse tempo procura-se estabelecer uma programação de temperatura para a autoclave que obedeça ao padrão apresentado na figura 3.1;
4. para isso, inicia-se o processo com uma temperatura T_1, obedecendo ao tempo calculado anteriormente, varia-se a temperatura da autoclave de modo que o valor F_{PN}, calculado na superfície do recipiente, seja 20% inferior àquele obtido no tratamento CRT;
5. com o auxílio da planilha apresentada no apêndice B, calcula-se o valor F_{PM} que deve ser igual ao sugerido por STUMBO ET AL. (1975);
6. simultaneamente é calculado o F_{PN} na superfície do recipiente que deve ser inferior àquele obtido no tratamento CRT;
7. o tratamento selecionado é aquele que obedece às duas condições anteriores.

3.4.2 Avaliação do tratamento térmico

Para a avaliação do tratamento térmico foi preparada uma planilha do Excel — ver apêndice B. Essa planilha permite calcular a variação da temperatura em função do tempo, para o ponto desejado, empregando-se as equações básicas apresentadas no item 3.3.2 e a equação 2.23. Com base nessa informação, calculou-se, na mesma planilha, o valor F_P do tratamento térmico empregando

como temperatura de referência 121,1ºC. Neste caso, adotou-se como método numérico a técnica de divisão da área em trapézios retângulos de altura igual ao intervalo de tempo considerado. Uma vez que a precisão não era o fator limitante, adotou-se como intervalo de tempo 1 minuto.

Para cada tratamento térmico, o tempo de processamento foi determinado com base na esterilidade, impondo que o valor F_P do tratamento térmico referenciado ao microrganismo fosse igual ao valor F_M do microrganismo selecionado de acordo com os critérios propostos por STUMBO ET AL. (1975).

Tendo obtido a esterilidade desejada, determinou-se o valor F_P do tratamento térmico referenciado ao nutriente tanto para a temperatura do ponto frio, quanto para a temperatura do alimento em contato com a superfície da embalagem.

3.4.3 Embalagem

Serão analisadas as dimensões de embalagens cilíndricas encontradas no mercado. As embalagens paralelepipédicas serão selecionadas com base no volume das embalagens cilíndricas.

3.4.4 Difusividade térmica

No que diz respeito à difusividade térmica serão adotados os valores extremos dessa propriedade encontrados na literatura $\left(1{,}2 \times 10^{-7}\, m^2/_s \leq \alpha \leq 2{,}0 \times 10^{-7}\, m^2/_s\right)$ e apresentados na tabela 3.1.

(Continua)

TABELA 3.1 – VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA ENCONTRADOS NA LITERATURA

Alimento	Difusividade Térmica (m^2/s)	Limitações	Fonte
Grãos de Milho	1,02 x 10-7	Umidade - 0,9 %	ASAE (2000)
Abacate	1,16 x 10-7	Umidade - 75,9%	ALVARADO (2001)
Hambúrguer	1,20 x 10-7	-	LEONHARDT (2003)
Uva	1,25 x 10-7	Umidade - 81,6%	ALVARADO (2001)
Maça	1,30 x 10-7	Umidade - 86,8%	ALVARADO (2001)

(Conclusão)

TABELA 3.1 – VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA ENCONTRADOS NA LITERATURA

Alimento	Difusividade Térmica (m^2/s)	Limitações	Fonte
Lima	1,32 x 10-7	Umidade - 90,1%	ALVARADO (2001)
Pepino	1,32 x 10-7	Umidade - 83,4%	ALVARADO (2001)
Polpa de Cupuaçu	1,32 x 10-7	9° Brix	ARAUJO ET AL (2004)
Papaia	1,33 x 10-7	Umidade - 89,5%	ALVARADO (2001)
Carne Vegetal	1,38 x 10-7	-	LEONHARDT (2003)
Goiaba	1,40 x 10-7	Umidade - 86,4%	ALVARADO (2001)
Batata	1,42 x 10-7	Umidade - 60 -70%	ALVARADO (2001)
Nêspera	1,42 x 10-7	Umidade - 86,6%	ALVARADO (2001)
Suco de Laranja	1,44 x 10-7	5° Brix	ROMERO ET AL (1998)
Batata Doce	1,47 x 10-7	Umidade - 60 -70%	ALVARADO (2001)
Morango	1,47 x 10-7	Umidade - 91,8%	ALVARADO (2001)
Ameixa	1,49 x 10-7	Umidade - 88,7%	ALVARADO (2001)
Nhame	1,50 x 10-7	Umidade - 65 -75%	ALVARADO (2001)
Tomate	1,50 x 10-7	Umidade - 94,9%	ALVARADO (2001)
Ensopado de Mariscos	1,53 x 10-7	-	LEONHARDT (2003)
Alimento Infantil	1,54 x 10-7	-	PINHO (2004)
Beterraba	1,54 x 10-7	Umidade - 55 -65%	ALVARADO (2001)
Laranja	1,56 x 10-7	Umidade - 85,3%	ALVARADO (2001)
Pêssego	1,57 x 10-7	Umidade - 87,4%	ALVARADO (2001)
Melão	1,59 x 10-7	Umidade - 93,7%	ALVARADO (2001)
Pinha	1,61 x 10-7	Umidade - 82,1%	ALVARADO (2001)
Massa de Tomate	1,65 x 10-7	18% de sólidos	CARBONERA ET AL (2003)
Polpa de Bacuri	1,67 x 10-7	15° Brix	MUNIZ ET AL (2006)
Pera	1,81 x 10-7	Umidade - 85,3%	ALVARADO (2001)
Purê de Ervilha	2,00 x 10-7	-	LEONHARDT (2003)
Salsicha	4,47 x 10-7	-	LEONHARDT (2003)
Patê de Camarão	9,20 x 10-8	-	LEONHARDT (2003)

4 Resultados e discussão

Considerando que foram selecionados dois conjuntos de tratamentos térmicos, este capítulo também foi dividido em duas partes. No item 4.1 serão apresentados os resultados da análise preliminar, baseados no procedimento descrito no item 3.4.1.1. No item 4.2, serão apresentados os resultados baseados no procedimento descrito no item 3.4.1.2.

4.1 Análise preliminar

Em se considerando que há uma infinidade de processos VRT possíveis para um conjunto alimento, embalagem e transformações selecionadas, selecionou-se uma embalagem — lata 202x204 —, um alimento — $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2/s$ — e um microrganismo de referência — *Clostridium botulinum*. Para esse conjunto, inicialmente calculou-se o tempo de processamento para o processo CRT que foi usado como base para comparação com o processo VRT.

Para a lata cilíndrica 202x204 o valor F_M recomendado por STUMBO ET AL. (1975), tomando como microrganismo de referência o *Clostridium botulinum*, para alimentos que se aquecem por condução e mantida a temperatura da autoclave constante em 121,1ºC, é 3,49 min. Tendo em vista essa referência, no tratamento térmico CRT, trabalhando com intervalos de tempo de 1 minuto, obteve-se como resultado o processamento mostrado na figura 4.1. Para o tratamento térmico VRT, empregando-se o procedimento sugerido no item 3.4.1.1, obteve-se como resultado o processamento mostrado na figura 4.2.

Para esses dois processos calculou-se o valor F_p do tratamento térmico referenciado ao microrganismo, obtendo-se: $F_{PM} = 3{,}86$ min para o tratamento CRT e $F_{PM} = 4{,}34$ min para o tratamento VRT. A diferença encontrada é decorrência do fato de se ter efetuado o cálculo com intervalo de tempo de 1 minuto.

Calculando-se o F_p do tratamento térmico referenciado ao nutriente para o ponto frio e para a superfície do alimento em contato com a embalagem para os dois tratamentos, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 4.1.

FIGURA 4.1 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O TRATAMENTO TÉRMICO CRT – LATA 202X204, $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$.

FIGURA 4.2 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROCESSO VRT – LATA 202X204, $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$.

TABELA 4.1 – VALOR F_p DO TRATAMENTO TÉRMICO PARA O NUTRIENTE NOS DOIS PROCESSAMENTOS REALIZADOS

Processamento Térmico	Valor F_p do tratamento térmico (min)	
	Calculado no ponto frio	Calculado na superfície
CRT	9,98	23,0
VRT	4,67	42,2

O resultado apresentado na tabela 4.1 contraria a informação de BANGA ET AL. (1991). Como se observa, apesar do tratamento térmico proporcionar uma melhoria de 53,2% no valor F_p do tratamento térmico do nutriente calculado no ponto frio e de 21,7% no tempo de processamento, a qualidade do alimento em contato com a superfície piorou em 83,5%. Com base neste resultado procurou-se um terceiro tratamento térmico, empregando o processo VRT, em que o valor F_p do tratamento térmico referenciado ao nutriente e calculado para a superfície do alimento fosse, no mínino, igual àquele obtido no processo CRT mostrado na figura 4.1.

Em se considerando que o objetivo era reduzir o valor F_{pN} do tratamento térmico referente ao nutriente para a superfície do alimento em contato com a embalagem, era necessário escolher um tratamento térmico em que a temperatura da autoclave ficasse menos tempo em temperatura elevada. O tratamento térmico encontrado é mostrado na figura 4.3.

FIGURA 4.3 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROCESSO VRT COM MENORES VALORES DE TEMPERATURA – LATA 202X204, $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$.

No tratamento apresentado na figura 4.3, a temperatura inicial da autoclave é mais alta que a temperatura inicial no tratamento térmico apresentado na figura 4.2, mas, no final do processo, atinge valores mais baixos. Para esse tratamento, obteve-se $F_{PM} = 3{,}50$ min e $F_{PN} = 8{,}23$ min, ambos calculados no ponto central, empregando 121,1ºC como temperatura de referência. Para o alimento em contato com a superfície encontrou-se praticamente o mesmo resultado, ou seja, $F_{PN} = 24{,}0$ min.

Em relação ao tratamento CRT apresentado na figura 4.1, o tratamento mostrado na figura 4.3, apresentou uma redução no valor F_{PN}, calculado no ponto crítico, de 17,5% e, na superfície, houve um acréscimo de 4,17%. Além disso, houve uma redução no tempo de processamento de 23 min para 19 min, ou seja, de 17,4%. Esses resultados estão de acordo com o relatado na bibliografia (BANGA ET AL. (1991), DURANCE ET AL. (1996), DURANCE (1997) e YOSHIMI (2002)), mostrando ser possível obter tratamentos térmicos que, além de reduzir o tempo de processamento, ainda melhore a qualidade final do alimento processado.

4.2 Análise final

Os resultados obtidos no item anterior mostram que existem uma infinidade de processos VRT para um dado conjunto alimento, embalagem e microrganismo de referência. A existência de modelos matemáticos facilitam o processo de otimização. Uma vez que o objetivo é reduzir o tempo de processamento e o valor nutritivo do alimento em contato com a superfície, adotou-se a metodologia de análise proposta no item 3.4.1.2.

Para a lata cilíndrica 603x700 o valor F_M recomendado por STUMBO ET AL. (1975), tomando como microrganismo de referência o *Clostridium botulinum*, para alimentos que se aquecem por condução e mantida a temperatura da autoclave constante em 121,1ºC, é 5,81 min. Para esse conjunto, empregando intervalos de

tempo de 1 minuto, obteve-se como resultado, para o tratamento CRT, o processamento mostrado na figura 4.4. Para o tratamento VRT obteve-se o resultado mostrado na figura 4.5.

FIGURA 4.4 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O TRATAMENTO TÉRMICO CRT – LATA 603X700, $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$.

FIGURA 4.5 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROCESSO VRT – LATA 603X700, $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$.

Para esses dois processos calculou-se o valor F_p do tratamento térmico referenciado ao microrganismo, obtendo-se: $F_{PM} = 5{,}91$ min para o tratamento CRT e $F_{PM} = 5{,}88$ min para o tratamento VRT.

Calculando-se o valor F_p do tratamento térmico, referenciado ao nutriente, para o ponto frio e para a superfície do alimento em contato com a embalagem, para os dois tratamentos, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 4.2. Como se observa, para o tratamento VRT houve uma redução no valor F_{PN} calculado no ponto crítico de 7,6% e na superfície de 3,4%, em relação ao tratamento CRT.

TABELA 4.2 – VALOR F_p DO TRATAMENTO TÉRMICO PARA O NUTRIENTE NOS DOIS PROCESSAMENTOS REALIZADOS

Processamento Térmico	Valor F_p do tratamento térmico (min)	
	Calculado no ponto frio	Calculado na superfície
CRT	43,3	126,0
VRT	40,0	121,7

Para demonstrar a possibilidade de se obter tratamentos térmicos diferentes empregando a técnica VRT, obteve-se o tratamento térmico mostrado na figura 4.6

para a lata 603x700, obedecendo ao procedimento proposto no item 3.4.1.2. Para esse processo os resultados obtidos foram: $F_{PM} = 5{,}85\,\mathrm{min}$, valor F_{PN} avaliado para a temperatura central igual a 39,2 min e valor F_{PN} avaliado para a temperatura da superfície igual a 125,6 min.

FIGURA 4.6– VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OUTRO PROCESSO VRT – LATA 603X700, $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$.

O tempo de processamento encontrado, tanto na técnica CRT quanto na técnica VRT, para esse tamanho de lata cilíndrica, sugere a conveniência de se estudar o emprego de embalagens flexíveis. Consultando a Volpak, a embalagem flexível que fornece um volume compatível com o volume da lata 603x700 tem as dimensões: 22,6 cm por 31,5 cm e espessura de 4,3 cm — 3061 cm^3 contra 3069 cm^3 fornecidos pela lata. Para essa embalagem, o processo CRT que confere um valor $F_{PM} = 5{,}81\,\mathrm{min}$ é mostrado na figura 4.7. Para esse processo, o valor F_P referenciado ao nutriente, calculado para o ponto frio e para a superfície, é igual a $F_{PN} = 21{,}5\,\mathrm{min}$ e $F_{PN} = 50{,}0\,\mathrm{min}$, respectivamente.

A figura 4.8 apresenta um dos muitos processos VRT que podem ser empregados para a embalagem flexível selecionada. Para esse processo, o valor F_P referenciado ao microrganismo é igual 5,83 min. Já o valor F_P referenciado ao nutriente, calculado para o ponto frio e a superfície, é igual a $F_{PN} = 17{,}8\,\mathrm{min}$ e $F_{PN} = 48{,}5\,\mathrm{min}$, respectivamente.

FIGURA 4.7 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROCESSO CRT – EMBALAGEM FLEXÍVEL (22,6 CM X 31,5 CM X 4,3 CM), $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$

FIGURA 4.8 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROCESSO VRT – EMBALAGEM FLEXÍVEL (22,6 CM X 31,5 CM X 4,3 CM), $\alpha = 2{,}0 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$

Ao se procurar aplicar o procedimento proposto neste trabalho com um tamanho de lata intermediário, selecionou-se um quarto conjunto alimento, embalagem e transformações selecionadas: lata 300x407, $\alpha = 1{,}2 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$ e microrganismo de referência com $D_{121{,}1°C} = 1{,}0\ \text{min}$ e $z = 10°C$ – $F_{M121{,}1°C} = 4{,}91\ \text{min}$. Para esse conjunto, o tratamento CRT é apresentado na figura 4.9 e o tratamento VRT, escolhido com base no procedimento sugerido no item 3.4.1.2, na figura 4.10. A tabela 4.3 apresenta o valor F_p calculado para os dois tratamentos térmicos.

TABELA 4.3 – VALOR F_p DO TRATAMENTO TÉRMICO PARA A LATA 300X407

Processamento térmico	Valor F_{PM} (min)	Valor F_{PN} (min)	
		Calculado no ponto frio	Calculado na superfície
CRT	5,06	24,36	62,0
VRT	4,95	24,26	60,3

FIGURA 4.9 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROCESSO CRT – LATA 300X407, $\alpha = 1{,}2 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$

FIGURA 4.10 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA AUTOCLAVE E DO ALIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O PROCESSO VRT – LATA 300X407, $\alpha = 1{,}2 \times 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$

Os resultados apresentados na tabela 4.3 mostram que é possível selecionar um processo VRT que melhore a retenção de nutriente do alimento em contato com a superfície da embalagem.

Os resultados obtidos com os quatro conjuntos: alimento, embalagem e transformações selecionadas, mostram que o modelo da difusão pode ser empregado para otimizar processos de esterilização de alimentos que empregam a técnica VRT de operação da autoclave.

O desenvolvimento de programas de computador que simulem o tratamento térmico e avaliem o seu efeito letal, facilitariam a otimização dos atuais processamentos térmicos.

Como pode ser observado, para os maiores tamanhos de latas cilíndricas o emprego de embalagens flexíveis permite reduzir o tempo de processamento em mais de 50%.

5 Conclusões

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

O sistema de análise proposto nesta dissertação, baseado nas equações integradas da difusão do calor, permite aperfeiçoar o tratamento térmico.

A técnica proposta pode servir de base para se estabelecer um método de simulação que permita melhorar ainda mais os atuais tratamentos.

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

6 Referência Bibliográfica

AIBA S.; HUMPHREY, A. E.; MILLIS, F. N. **Biochemical Engineering**. 2nd Ed. University of Tokio Press, p. 243. 1973

ALVARADO, J.D. **Metodos para Medir Propriedades Fisicas em Industrias de Alimentos**. 2001

ALVARADO, J.D. **Propriedades Fisicas da Fruta: Difusividad y Gravedad** Especifica. 2001

ANSARI, F.; ABBAS, K.; JAMILAH, B. An optimized method for thermal diffusivity measurement of peeled off fruits and vegetables. **Journal of Food, Agriculture & Environment**. 2009

ARAUJO, J.L., QUEIROZ, A.J.M., FIGUEIREDO, R.M.F. Propriedades Termofísicas da Polpa do Cupuaçu com Diferentes Teores de Sólidos. **Ciênc. Agrotec. Lavras**. 2004

ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **Agricultural Engineers Yearbook**. 2000

ÁVILA NETO, C. E OLIVEIRA, L. Simulação térmica de alimentos pré-empacotados. **Cong.Bras. Eng. Quím. em Iniciação Científica**. 2008

BALL, C.O. **Thermal process time for canned foods**. Bull. 37, Vol. 7, Part. 1. National Research council. Washington, D.C. USA. 1923

BALL, C.O. **Mathematical Solution of Problems of Thermal Processing of Canned Foods**. Public Health University of California, 1928

BALL, C.O.; C.W. OLSON. **Sterilization in Food Technology. Theory, Practice and Calculation**. McGraw-Hill, New York, 1957

BANGA, J.; PEREZ-MARTIN, R.; GALLARDO, J. Optimization of the thermal processing of conduction-heated canned foods. **Journal of Food Engineering**, 1991

BARAKAT, H. Z. AND CLARK, J. A. Analytical and Experimental Study of the Transient Laminar Natural Convection Flows in Partially Filled Containers. Proceedings Third International Heat Transfer Conference. Vol. II, 152-162. 1966

BETTA, G.; RINALDI, M.; BARBANTI, D.; MASSINI, R. A quick method for thermal estimation: Application to several foods. **Journal of Food Engeneering**. 2009

BLAISDELL, J. L. Natural Convection Heating of Liquids in Unagitated Food Containers. **Ph. D. thesis**. Michigan State University. 1963

BIGELOW, W.D. AND ESTY, J.R. **Thermal death point in relation to time of typical thermophilic organisms**. .J. Infect. Diseases. 27, 602. 1920

BIGELOW, W. The logarithmic nature of thermal death time curves. **The Journal of Infectious Diseases**, 1921

BIMBENET, J. J. AND MICHIELS, L. **Transfers of Chaleur Par Convection au Cours de la Stérilisation des Conserves**. Fourth International Congress of Food Science and Technology, Madrid. 1974

BIRD R.B.; STEWART W.E.; LIGHTFOOT E.N. **Transport Phenomena**. Wiley & Sons, New York, 1960.

BIRD, R. B., STEWART, W. E. AND LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte.** Editorial Reverté, S. A. Barcelona. 1970

BHOWMIK, S. R.; SHIN, S. Thermal Sterilization of Conduction-Heated Foods in Plastic Cylindrical Cans Using Convective Boundary Condition. **Journal of Food Science**. v. 56, n. 3, p. 827-830,1991.

BORZANI, W. Influência da temperatura na constante de velocidade de destruição térmica de microrganismos: equações de Arrhenius e de Bigelow. Rev. Bras. de Tecnol. 5:1. 1974

CARSLAW, H.S. E JAEGER, J.C. **Conduction of heat in solids**. JC. Publication: Oxford: Clarendon Press, 2nd ed. 1959

CARBONERA ET AL. Determinação Experimental da Difusividade Térmica de uma Massa de Tomate Comercial. **Brazilian Journal of Food Technology**. 2003

CASTILLO, PF; BARREIRO, JÁ; SALAS, GR. Prediction of nutrient retention in thermally processed heat conduction food packaged in retortable. **Journal of Food Science**, 1980.

CHANG, S; TOLEDO, R. Simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient during sterilization of carrot dices in a packed bed. **Food Sci. Technology**. 1990

CHARM, S. E. **The Fundamental of Food Engineering**. The AVI Publishing Co., Inc. Westport Connecticut. 1963

CHEN, F.; RAMASWAMY, H. Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms. **Journal of Food Engineering**. 2002.

CHOI, Y.; OKOS, M.R. **The thermal properties of liquid foods-review**.Paper N.83-6516, 1983. In Proceedings of the Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers. Chicago.

CHOI, Y.; OKOS, M. Effect of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: LE MAGUER, M.; JELEN, P. Food Engineering and Process Applications, Transport Phenomena. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1986. v. 1.

CRISTIANINI. Efeito da alta pressão hidrostática sobre a inativação de microrganismos**. Food and Technology**, v.1, p.3-11, 1998.

CUNHA, C. **Métodos Numéricos para as Engenharias e Ciências Aplicadas**. Editora UNICAMP, Campinas, 1993.

DATTA A.K.; TEIXEIRA A.A. Numerically Predicted Transient Temperature and Velocity Profiles During Natural Convection Heating of Canned Liquid Foods. **J. Food Science**, 53: 191-195, 1988.

DICKERSON, R.W. **Na Apparatus for the Measurement of Thermal Diffusivity of Foods**. 1965.

ERDOGDU, F.; BALABAN, M.; CHAU. Cook-related yield loss for pacific white (Penaeus vannamei) shrimp previously treated with phosphates: effects of shrimp size and internal temperature distribution**. Journal of Food Engineering**. 1998

ESTY, J. R. AND MEYER, K. F. The heat resistance of B. botulinus and allied anaerobes. J. Infectious Disease, 31:650.1922

EVANS, L. B, REID, R. C. AND DRAKE, E. M. **Transient Natural convection in a vertical Cylinder.** A.I.Ch.E.JI. 14:251-259. 1968

FRAZIER, W.C. **Food Microbiology**, 2nd edition, McGraw Hill, New York, p. 171. 1968

Ghazala, S.; Ramaswamy, H. S.; Smith, J. P. and Simpson, M. V. **Thermal process simulations for sous vide processing of fish and meat foods.** Aspen Publishers. 1989.

GEDRAIT, R. **Desenvolvimento e Implementação de Algorítmo Computacional para Garantir um Determinado Nível de Letalidade Acumulada para Microorganismos Presentes em Alimentos Industrializados.** Dissertação – Mestrado Universidade de São Paulo, 1999

GEDRAIT, R. **Desenvolvimento e Implementação do Algoritmo Computacional para calcular o valor da difusividade térmica em alimentos industrializados aquecidos pelo mecanismo de condução.** Tese Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.

GILLESPY, T.G. Estimation of sterilizing values of processes as applied to canned foods. II. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 1953

GREENBERG, R.A., TOMPKIN, R.B., BLASDEL, B.O. KITTAKA, R.S. AND ANELLIS, A. Incidence of mesophilic Clostridium spores in raw pork, beef, and checken in processing plants in the United States and Canada. Appl. Microbiol. 14; 789. 1966

HAYAKAWA, K. Novos parâmetros para cálculo de valores de esterilização para estimar nutrientes. **Can. Inst. Food Technol. J**, 1969.

HAYAKAWA, K E BALL, CO. Charts for calculating average temperature of thermally conductive food. **Food Technol**. 1969

HAYAKAWA, K. Experimentals Formulas for Accurate Estimation of Transient Temperatures of Foods and Their Appllication to Thermal Process Evaluation. **Food Technol**., 24: 1407-1417, 1970.

HAYAKAWA, K., 1971 E BALL, CO. Estimating food temperatures during various processing or handling treatments. **Journal of Food Science**. 36, 378-385. 1971

HAYAKAWA, K. New Parametric Values for Thermal Process Estimation by Using Temperatures and Z Values Expressed in Degree Celsius Units. **Lebensm.-Wiss. u - Technol.,** 14: 60-64, 1981.

HAUG, R. I., STEVENSON, W. M. AND WINTER, E. R. F. **An Interferometric Study of Thermal Stratification by Natural Convection in a Container Liquid**. Wärme und Stoffüberttrangung 1:251-254. 1968

HEWITT, L.F. **Oxidation-Reduction Potentials**. In: Bacteriology and Biochemistry, 6th Ed. F&Livingston, Ltd, Edinburgh. 1950

HIDDINK, J. **Natural Convection Heating of Liquids, With reference to Sterilization of Cannes Food**. Center or Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 1975

INCROPERA, FRANK P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 4ª Ed. 1998

INCROPERA, F E DEWITT, D, **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 5ª Ed. 2003

INSALATA, N. H.; WITZEMAN, J. S.; BERMAN, J. H. AND BORKER, E. **A study of the incidence of the spores of Clostridium botulinum in frozen vacuum pouch-pack vegetables.** Proc., 96th Ann. Meet., Am. Pub. Health Assoc., p 124. 1968

ISACHENKO, V.P.; OSIPOVA, V.A. AND AS SUKOMEL. Freely convective heat transfer at the external surface of a vertical isothermal cylinder. **Journal of Engineering Physics and Thermophysics**. 1977

JAY, J.M. **Modern Food Microbiology**. 2nd Ed. Von Norstrand Reinold Company. p. 15. 1970

JAY, .M. **Modern Food Microbiology**. 3rd Ed. Von Nostrand Reinold Company. p. 15. 1986

JAKOB, M. **Heat Transfer**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1958

JONES, D. E A. Heat penetration by Convection. **Food Technology**. 1:63-65. 1931

JACZYNSKI, J.; PARK, J. W. Temperature Prediction during Thermal Processing of Surimi Seafood. **Journal of Food Science**. v. 67, n. 8, p. 3053-3057, 2002

JEN, Y.; MANSON, J.E.; STUMBO, C.R.; ZAHRDNIK, J.W. **A Procedure for Estimating Sterilization of and Quality Degradation in Thermally Processed Foods**. J. Food Sci**.,** 36: 692-698, 1971

KATZIN, L.I., STANDHOLZER, L.A. AND STRONG, M.E. **Application of the decimal reduction time principle to a study of the resistance of coliform bacteria to pastereurization.** J. Bacteriol. 445, 265. 1944

KIIS, A. **The Sterilization of Tins Heated by Convection. Estondkaya Sel'skoohoz**, Akad. Sborn Nautch Trudov 38:276-279. 1964

KITSON, J. A. Syrup Stratification in Canned Fruit Slows Heat Processing. **Food Can**. 22:34-36. 1962

KORNACHKI, J. L. AND GABIS, D. A. **Microrganisms and regrigeration temperatures**. Dairy, Food Environ. Sanitation. vol 10 (4): 192-195. 1990

LAROUSSE, J. E BROWN, B.E. **Food canning technology**. Wiley-VCH. New York. 1997

LEONHARDT, G.F. **Enlatamento – Sua Tecnologia e Engenharia**. Apostila – Depto. Engenharia Química e de Alimentos da Escola de Engenharia Mauá, 2003

LEONHARDT, G.F. Estimation of the Central Temperature of Thermally Conductive Foods in Cylindrical and rectangular Cans During Heat Processing. **Journal Food Science.** 41:685. 1976

LEONHARDT, G. F. Estimation of the Average Temperature of Thermally Conductive Foods in Cylindrical and rectangular Cans During Heat Processing. **Journal Food Science**. 41:690. 1976a

LEONHARDT, G. F. E DUSSE, R. (1975). Determinação da difusividade Térmica de Alimentos. **Rev. Bras. de Tecnol**. 6:189.

LEONHARDT, G. F. E WESTPHALEN, D. L. Modelo Matemático Para a Previsão da Temperatura de Alimentos Enlatados. **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, São Paulo, V-2, pp 1389 - 1394. 1994

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. 2nd. Ed. John Wiley & Sons, Inc. p. 21. 1972

LUND, D.B. **Design of thermal processes for maximizing nutrient retention**. Food Technol. 31(2): 71. 1977

LUIKOV, A. V. **Analytical Heat Diffusion Theory**. Ed. James P. Hartnett, Academic Press, New York. 1968

MARTENS, T. Mathematical Model of Heat Processing in flat containers. Ph.D Thesis, Katholeike University of Leuven. 1980

MATULEVICIUS, E. S. **Thermal Stratification in Enclosed Fluids Due to Convection**. Sc. D. thesis. Massachusetts Institute off Technology, Cambridge. 1970

MULVANEY, T. R., NICHOLAS, R. C. AND PFLUG, I. J. Product-Induced Stratification of Covering Syrups. **Food Technology**. 14:207-211. 1960

MANSO ET AL. First Results on Angular Distributions of Thermal Dileptons. **Physical Review Letters**, 25: 316, 1970

MORRIS, E.O. **Effect of environment on microorganisms**. Vol. 1:24444-36, Hawthorn, J. and Leitch, J.M. Editors. Butter Worths, London. 1962

MUNIZ, M.B., QUEIROZ, A.J.M., FIGUEIREDO, R.M.F., DUARTE, M.E.M. Caracterização Termofísica de Polpas de Bacuri**. Ciência e Tecnologia de Alimentos**. vol. 26. 2006

NADKARNI, MM; HATTON, TA. Optimal nutrient retention during the thermal processing of conduction-heated canned foods. **Journal of Food Science**, 1985

NEWMAN, A. B. Heating and cooling rectangular and cylindrical solids. AB Newman - Industrial & Engineering Chemistry, pp 545–548.1936

NICHOLAS, R. C., PFLUG, I. J. AND MULTANEV, T. R. Convection in Syrup-Packed Products. Food Technology. 14:205-206. 1960a

NICHOLAS, R. C., PFLUG, I. J. AND MULTANEV, T. R. Convection Heating Studies of Water-Syrup Layers Systems. Food Technology. 14:212-214. 1960b

NORONHA, J.; HENDRICKX, M.; VAN LOEY, A.; TOBBAK, P. **New Semi-Empirical Aproach to Handle Time-Variable Boundary Conditions During Sterilization of Non-Conductive Heating Foods**. J. Food Eng., 24: 249-268, 1995.

OLIVARES, M.; GUZMAN, J.; SOLAR, L. Thermal Diffusivity of Nonhomogeneous Food. **Journal of Food Processing and Preservation**. 2007

OKADA, M. Natural Convection in Can- Shaped Space, Referred to the Law of Similitude. Jap. Soc. Sci. Fisheries Bull. 9, 64. 1940

OHLSSON, T. Temperature dependence of sensory quality changes during thermal processing. **Journal of Food Science**, 1980

OLSON, F. C. W. AND JACKSON, J. M. Heating Curves: Theory and practical Application. Ind. Eng. Chem. 34:347. 1942

OLSON, F.C.W. E SCHULTZ, O.T. **Temperatures in solids during heating or cooling.** pp 874–877. Ind. Eng. Chem.1942

PATASHNIK, M.A. **Simplified Procedure for Thermal Process Evaluation**. Food Technol**.,** 7: 1-16, 1953.

PFLUG I.J. **Evaluating the Lethality of Heat Processes Using a Method** Employing Hick's Table. Food Eng**.,** 33: 1153-1156, 1968.

PORNCHALOEMPONG, P.; BALABAN, M. O.; TEIXEIRA, A.A.; CHAU, K. V. Numerical simulation of conduction heating in conically shaped bodies. **Journal of Food Process Engineering**, Oxford, v. 25, n. 6, p. 539-555, 2002.

PINHO, C. R. G. Modelamento Matemático do Processo de Esterilização de Alimentos Condutivos em Embalagem de Vidro. Dissertação de Mestrado. Unicamp. 2004

PURI, V. M.; ANANTHESWARAN, R.C. The finite-element method in food processing: A review. **Journal of food engineering**, 1993 - vol. 19, no3, pp. 247-274 (5 p.1/2).

RAMASWAMY, H.S.; LO,K.V.; TUNG, M.A. Simplified equations for transient temperatures in conductive foods with convective heat transfer at the surface. **Journal of Food Science**, v47, p.2042-2047, 1982.

RAHN, O. Injury and death of Bacteria. Biodynamyca Monograph Nº 3. 1945

RAHN, O. **Physical Methods of sterilization of microorganisms**. Bacteriol. 1945a Rev. 9, 1.

RIEDEL, L. Zur Theorie der Hitzesterilisierung von Dosenkonserven. Mitt. Kältetech. Inst. Karlsuhe. 1947

RIEDEL, L. Measurement of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. Kaltetechnit. 1969

RIEMANN , H. Anaerobe toxins. In: Chemical and Biological Hazards in Food. p 279, Iowa State Univ. Press. 1962

RODRIGUES ET AL. Comparação entre técnicas numéricas para a resolução do problema de transferência de calor em alimentos enlatados. **Ciênc. Tecnol. Aliment**. (online). 1998

ROMERO ET AL. Termophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by temperature and Water Content. **Journal of Food Engineering**. 1998

SAGUY, I.; KAREL, M. Modeling of Quality Deterioration during Food Process. **Journal Food Technology**. 1979

SANTEN, N. VAN, De Warmteoverdrcht Naar Cylindervormige Blikken. M. Sc. thesis, Delft. Available at Technological University Delft. 1969

SCHMIDT, E. **Versuche zum Wärmeübergang bei Natürlicher Konvektion**. Chem. Ing. Technik. 28:175-180. 1956

SCHULTZ, O. T. AND OLSON, F. C. W. Thermal Processing of Canned Foods in Tin Containers. I. Variation of Rate With Can Size for Products Heating by Convection. **Food Research**, 3: 647-651. 1938

SCHWIND, R. G. AND G. C. VLIET, **Observation and Interpretation of Natural convection and Stratification in Vessels.** Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute: 51-68. 1964

SECRIST, J. L. AND STUMBO, C. R. Application of spore resistance in the newer methods of process evaluation. **Food Technol**. 10: 543. 1956

SNYDER JR., 0. P. America's "Safe" Food. Dairy, Food Environ. Sanitation. Vol 10 (12): 719-724. 1990

STEINKRAUS, K. H. AND AYRES, J. C. Incidence of putrefactive anaerobic spores in meat. **J. Food Sci**. 29: 87. 1964

SEGERLIND, L.J. **Applied finite element analysis**. Publisher: Wiley. Pages: 422. 1976

SINGH, P. Thermal Diffusivity in Food Processing. **Food Technology**. 1982

SIMPSON, R., ARIS, Land TORRES, JA. 'Sterilization of conduction-heated foods in oval-shaped. **Journal Food Science**, 54, 1327 – 1331, 1363.1989.

STUMBO, C. R. Bacteriological studies relating to thermal processing of canned meats. **Food Research**, 1945

STUMBO, C.R., GROSS, C.E. AND VINTON, C. **Bacteriological studies relating to thermal processing of canned meats**. 2. Influence of meat-curing agents upon the thermal resistance of spores of a putrefactive anaerobic bacterium in meat. Food Res. 10:283. 1945

STUMBO, C. R. Thermobacteriology as applied to food processing. **Adv. Food Res**. 2:47. (1949)

STUMBO, C. R.; MURPHY, J. R. AND COCHRAN, J. Nature of thermal death curves for P.A. 3679 and Clostridium botulinum. **Food Technol**. 4:321. 1950

STUMBO, CR. New procedures for evaluating thermal processes for foods in cylindrical containers, **Food Technol**. 1953.

STUMBO, C.R. **Thermobacterioly in Food Processing**. Academic Press, New York and London, p. 55. 1965

STUMBO C.R. **Thermobacteriology in Food Processing**. 2nd Ed. Academic Press, New York, 1973.

STUMBO, C. R.; PUROHIT, K. S.; RAMAKRISHNAN, T. V. Thermal Process Lethality Guide For Low-Acid Foods In Metal Containers. **Journal of Food Science**. 1975

SWEAT, V.E. **Thermal Properties of foods. Engineering Properties of Foods**. New York, Marcel Dekker, p.49-87. 1986

TEIXEIRA, A.A.; TUCKER, G.S.; BALABAN, M.O.; BICHIER, J. Innovations in Conduction-Heating Models for On-line Retort Control of Canned Foods with any J-values. In**: Advances in Food Engeneering.** R.P. Singh and M.A. Wirakartakusumah (Ed). CRC PRESS, 1992

TEIXEIRA, R.O. Comparação entre Técnicas Numéricas para a Resolução do Problema de Transferência de Calor em Alimentos Enlatados**. Ciência e Tecnologia de Alimentos**. 2006

TEIXEIRA, ET AL. Experimental evaluation of mathematical and computer models for thermal process evaluation. **Journal of Food Science**, 1969

TEIXEIRA, A.A.; ZINMEISTER, G.E. AND ZAHRADNIK, J.W. Computer simulation of variable retort control and container geometry as a possible means of improving thiamin retention in thermally processed foods. **Journal of Food Science**, 40, 656-659. 1975

THIJSSEN, H.A.C. AND KOCHEN, L.H.P.J.M.. Calculation of optimum sterilization conditions for packed conduction-type foods. **Journal of Food Science**, 45, 1267-1292.

THOMPSON, G. E. Time-Temperature Relation in Canned Foods During Sterilization. **Ind. Eng Chem**. 11:657-664. 1919

THORNE, S. N. E JOWITT, R. Fluidized Bed Heating; the Influence of the outside Heat Transfer Coefficient on Sterilizing Value Process. Symposium Heat and Mass Transfer Problems in Food Engineering, Wageningen. 1972

TOWSEND, C. T.; ESTY, J. R. AND BASELT, F. C. **Heat-resistance studies on spores of putrefactive anaerobes in relation to determination of safe processes for canned foods**. Food Res. 3:323. 1938

TUCKER, G. S.; CLARK, P. Modelling the cooling phase of heat sterilization processes, using heat transfer coefficients. International **Journal of Food Science and Technology**. v. 25, n. 6, p. 668-681, 1990

VARGAS, S.; OLIVEIRA, J.; SMOUT, C.; HENDRICKX, M. Modeling Temperature Variability in Batch Retorts and its Impact on Lethality Distribuition. **Journal of Food Engennering**. 2000

VARGAS, P; ZABALA, D.; RAMOS, A. Thermophysical property influence in model accuracy for the sterilization process. 11th WSEAS International Conference on Applied Mathematics. 2007

VARZAKAS, T.; LEACH, G.; ISRAILIDES, C.; ARAPOGLOU, D. Theorical and experimental approaches towards the determination of solute effective diffusivities in foods. Enzyme and Microbial Technology. 2005

WELT, B.A. Explicit Finite Difference Methods for Heat Transfer Simulation and Thermal Process Design. **Journal of Food Science**, 1997

WIDEFF, K. J., POSSCHTOFF, P. G. E KOLEFF, D. C. **Mathematische Ermittlung der Temperature in Konserven**. Die Lebensmittel - Ind. 10:283-285. 1963

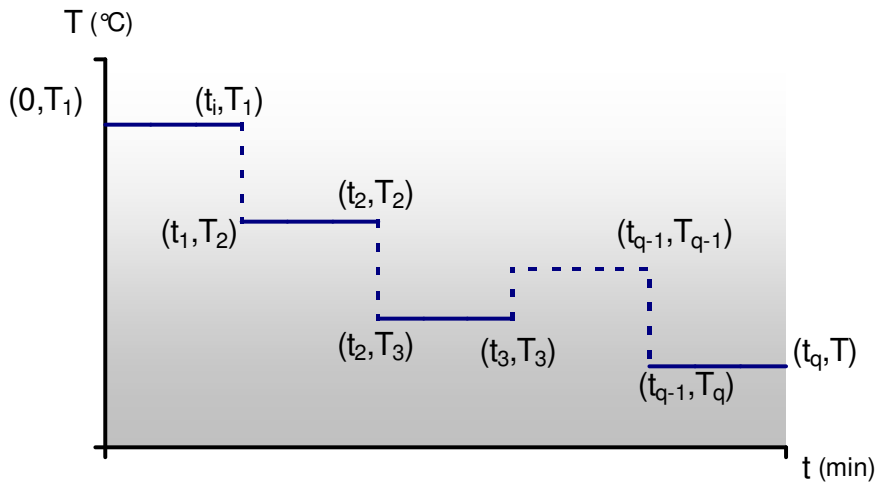
UNTERMANN, F. **Hygiene in meat production and processing**. Fleischwirtsch. 69 (6): 1026-1029. 1989

XEZONES, H. AND HUTCHINGS, I. J. Thermal resistance of Clostridium botulinum (62A) spores as affected by fundamental food constituents. **Food Technol**. 19:1003. 1965

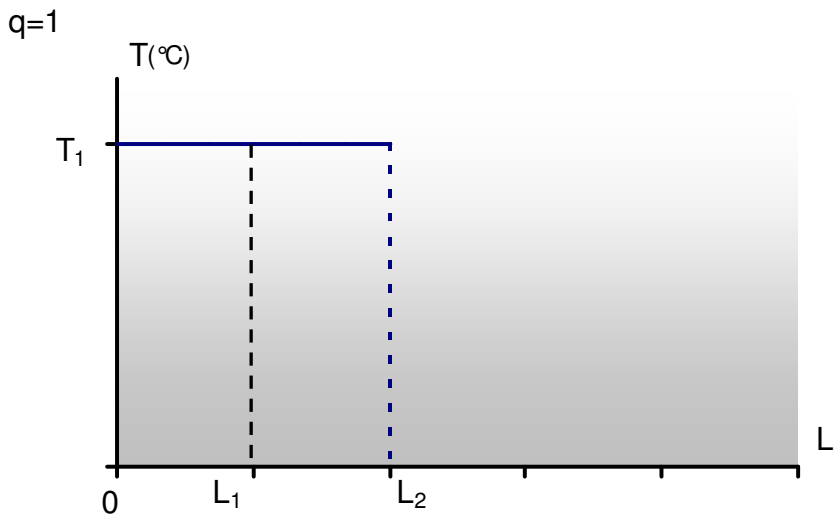
YOSHIMI, T. Temperature Profile Optimum Quality during Heat Sterilization of Heat Conductive Food. **Journal of Food Technology**. 2002

ZIENKIEWICZ, O.C. **The Finite Element Method**. 4ªEd. 1988

Apêndice A – Distribuição Não Uniforme de Temperatura

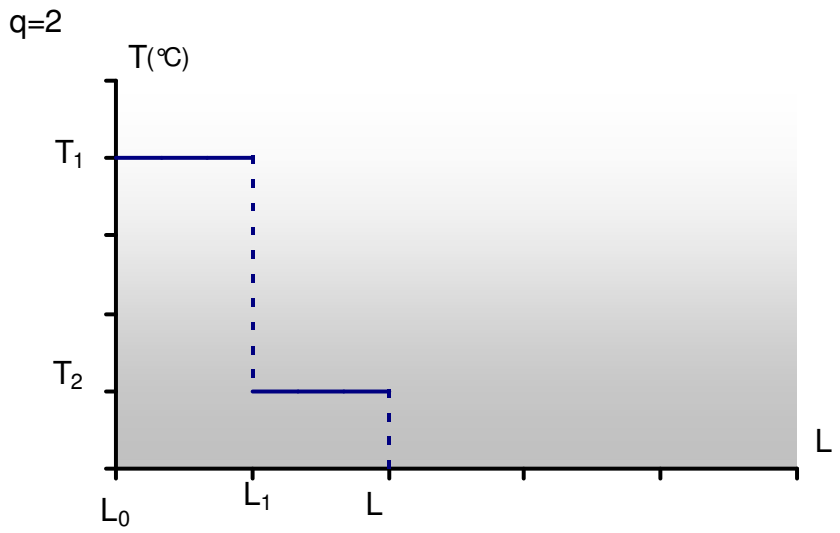


$$T = T_q + \sum_{i=1}^{q-1} (T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{q} (T_i - T_o)\mu(L - L_{i-1})$$



$$T = T_1 + \sum_{i=1}^{0} (T_1 - T_o)\mu(L - L_1) - \sum_{i=1}^{1} (T_1 - T_0)\mu(L - L_0)$$

$$T = T_1 - (T_1 - T_0)\mu(L)$$

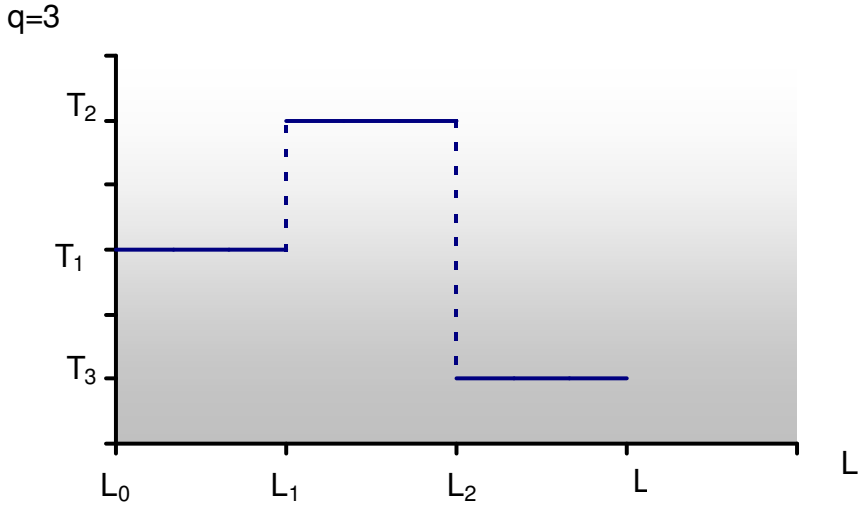


$$T = T_2 + \sum_{i=1}^{1}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{2}(T_i - T_0)\mu(L - L_{i-1})$$

$$T = T_2 + (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) - (T_i - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1)$$

$$T = T_2 + (T_1 - T0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$

$$T = T_2 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$

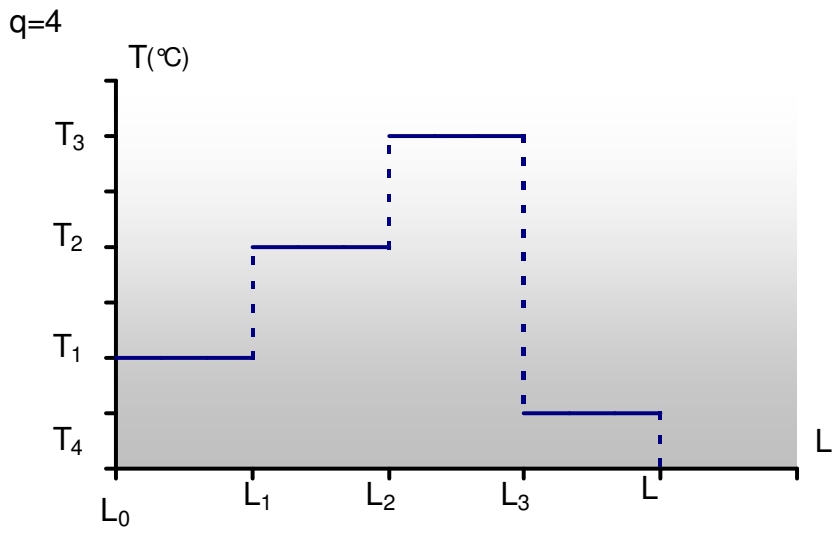


$$T = T_3 + \sum_{i=1}^{2}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{3}(T_1 - T_0)\mu(L - L_{i-1})$$

$$T = T_3 + (T_1 - T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) - (T_3 - T_0)\mu(L - L_2)$$

$$T = T_3 + (T_1 - T_0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0 - T_3 + T_0)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$

$$T = T_3 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$



$$T = T_4 + \sum_{i=1}^{3}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{4}(T_i - T_0)\mu(L - L_{i-1})$$

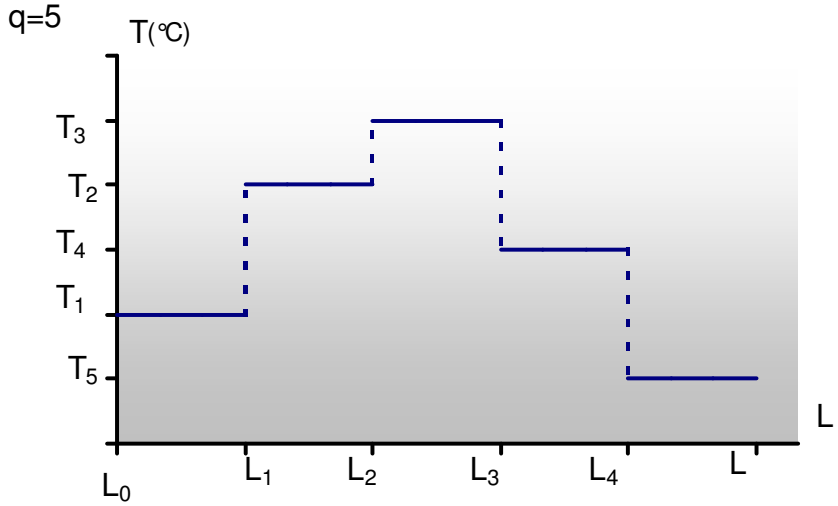
$$T = T_4 + (T_1 - T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_0)\mu(L - L_3) +$$

$$-(T_1 - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) - (T_3 - T_0)\mu(L - L_2) - (T_4 - T_0)\mu(L - L_3)$$

$$T = T_4 + (T_1 - T_0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0 - T_3 + T_0)\mu(L - L_2) +$$

$$+(T_2 - T_0 - T_1 + T_0)\mu(L - L_2) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$

$$T = T_4 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_4)\mu(L - L_3) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$



$$T = T_5 + \sum_{i=1}^{4}(T_i - T_0)\mu(L - L_i) - \sum_{i=1}^{5}(T_i - T_0)\mu(L - L_{i-1})$$

$$T = T_5 + (T_1 - T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_0)\mu(L - L_3) +$$

$$+ (T_4 - T_0)\mu(L - L_4) - (T_1 - T_0)\mu(L - L_0) - (T_2 - T_0)\mu(L - L_1) +$$

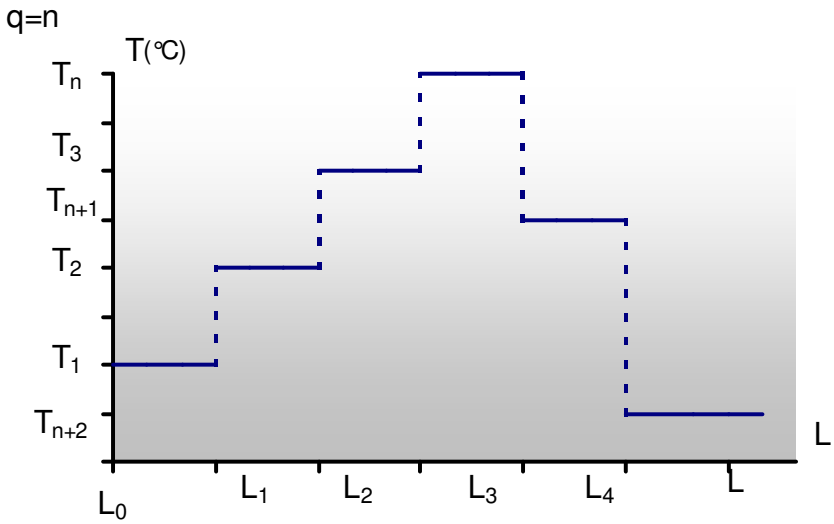
$$- (T_3 - T_0)\mu(L - L_2) - (T_4 - T_0)\mu(L - L_3) - (T_5 - T_0)\mu(L - L_4)$$

$$T = T_5 + (T_1 - T_0 - T_2 + T_0)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_0 - T_3 + T_0)\mu(L - L_2) +$$

$$+ (T_3 - T_0 - T_4 + T_0)\mu(L - L_3) + (T_4 - T_0 - T_5 - T_0)\mu(L - L_4) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$

$$T = T_5 + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) + (T_3 - T_4)\mu(L - L_3) +$$

$$+ (T_4 - T_5)\mu(L - L_4) - (T_1 - T_0)\mu(L)$$



$$T = T_{n+2} + (T_1 - T_2)\mu(L - L_1) + (T_2 - T_3)\mu(L - L_2) + \ldots +$$

$$+ (T_n - T_{n+1})\mu(L - L_n) + (T_{n+1} - T_{n+2})\mu(L - L_{n+1}) - (T_2 - T_0)\mu(L)$$

Apêndice B – Planilha para Cálculo da Temperatura em Função do Tempo e do Valor Fp para Cilindro Finito

Placa Plana Infinita

Bi	λ_1	λ_2	λ_3	A_1	A_2	A_3
0,0000	0,0000	3,1416	6,2832	1,0000	0,0000	0,0000
0,0100	0,0998	3,1448	6,2848	1,0020	-0,0020	0,0004
0,1000	0,4328	3,2039	6,3148	1,0159	-0,0197	0,0050
1,0000	0,8603	3,4256	6,4373	1,1192	-0,1517	0,0466
10,0000	1,4289	4,3058	7,2281	1,2612	-0,3934	0,2104
100,0000	1,5552	4,6658	7,7764	1,2731	-0,4239	0,2539
1000,0000	1,5708	4,7124	7,8540	1,2732	-0,4244	0,2546

Cilindro Infinito

Bi	β_1	β_2	β_3	A_1	A_2	A_3
0,0000	0,0000	3,8317	7,0156	1,0000	0,0000	0,0000
0,0100	0,1412	3,8343	7,0170	1,0031	-0,0034	0,0013
0,1000	0,4417	3,8577	7,0298	1,0245	-0,0333	0,0135
1,0000	1,2588	4,0795	7,1558	1,2071	-0,2901	0,1298
10,0000	2,1795	5,0332	7,9569	1,5677	-0,9575	0,6784
100,0000	2,3809	5,4652	8,5678	1,6014	-1,0631	0,8505
1000,0000	2,4048	5,5201	8,6537	1,6021	-1,0648	0,8558

Dados Iniciais

Valor de Biot	1000,0000
Diâmetro do Cilindro (cm)	15,24
Altura da Placa (cm)	16,83
Relacao (d/h)	0,91
Raio de Medida (cm)	0,00
Plano de Medida (cm)	0,00
Difusividade Térmica (cm^2/min) ..	0,1200
Temperatura Inicial (ºC)	80,0
Intervalo de Tempo (min)	1,0

Temperatura do Meio

T_1 (°C)	115,0
T_2 (°C)	120,0
T_3 (°C)	125,0
T_4 (°C)	130,0
T_5 (°C)	100,0
T_6 (°C)	25,0

Microrganismo de referência

Valor z (°C)	10,0
Temperatura de referência (°C)....	121,1
Valor F_0 (min)	5,81
Valor Fp (min)	5,77

Cálculos Preliminares

Placa Plana Infinita		Cilindro Infinito	
Valor de λ_1	1,5708	Valor de β_1	2,4048
Valor de λ_2	4,7124	Valor de β_2	5,5201
Valor de λ_3	7,8540	Valor de β_3	8,6537
Valor de A_1	1,2732	Valor de A_1	1,6021
Valor de A_2	-0,4244	Valor de A_2	-1,0648
Valor de A_3	0,2546	Valor de A_3	0,8558
Valor de cos(λ_1X)	1,0000	Valor de Jo(β_1R)	1,0000
Valor de cos(λ_2X)	1,0000	Valor de Jo(β_2R)	1,0000

Valor de $\cos(\lambda_3 X)$ ..... 1,0000 Valor de $Jo(\beta_3 R)$ 1,0000

Cilindro Finito

Termo j	R1j	R2j	R3j	A1j	A2j	A3j	E1j	E2j	E3j
1	1,0000	0,3415	0,2888	2,040	-0,680	0,408	9,870	30,334	71,262
2	4,1626	0,6929	0,4153	-1,356	0,452	-0,271	41,084	61,548	102,476
3	9,8523	1,3251	0,6429	1,090	-0,363	0,218	97,239	117,703	158,631

Cálculo da Temperatura em Funcão do Tempo e Valor F_p											
	Placa Plana Infinita			Cilindro Infinito			Cilindro Finito				
Tempo	Fo	u	T	Fo	u	T	L	u	T	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,537	80,0	0,000	0,000
1	0,002	1,000	80,0	0,002	1,000	80,0	0,002	1,433	80,0	0,000	0,000
2	0,003	1,000	80,0	0,004	1,000	80,0	0,003	1,348	80,0	0,000	0,000
3	0,005	1,000	80,0	0,006	1,000	80,0	0,005	1,279	80,0	0,000	0,000
4	0,007	1,000	80,0	0,008	1,000	80,0	0,007	1,224	80,0	0,000	0,000
5	0,008	1,000	80,0	0,010	1,000	80,0	0,008	1,179	80,0	0,000	0,000
6	0,010	1,000	80,0	0,012	1,000	80,0	0,010	1,143	80,0	0,000	0,001
7	0,012	1,000	80,0	0,014	1,000	80,0	0,011	1,113	80,0	0,000	0,001
8	0,014	1,000	80,0	0,017	1,000	80,0	0,013	1,090	80,0	0,000	0,001
9	0,015	1,000	80,0	0,019	1,000	80,0	0,015	1,071	80,0	0,000	0,001
10	0,017	1,000	80,0	0,021	1,000	80,0	0,016	1,056	80,0	0,000	0,001
11	0,019	1,000	80,0	0,023	1,000	80,0	0,018	1,045	80,0	0,000	0,001
12	0,020	1,000	80,0	0,025	1,000	80,0	0,020	1,035	80,0	0,000	0,001
13	0,022	1,000	80,0	0,027	1,000	80,0	0,021	1,028	80,0	0,000	0,001
14	0,024	1,000	80,0	0,029	1,000	80,0	0,023	1,022	80,0	0,000	0,001
15	0,025	1,000	80,0	0,031	1,000	80,0	0,025	1,017	80,0	0,000	0,001
16	0,027	1,000	80,0	0,033	1,000	80,0	0,026	1,013	80,0	0,000	0,001
17	0,029	1,000	80,0	0,035	1,000	80,0	0,028	1,009	80,0	0,000	0,001
18	0,031	1,000	80,0	0,037	1,000	80,0	0,029	1,006	80,0	0,000	0,001
19	0,032	1,000	80,0	0,039	1,000	80,0	0,031	1,003	80,0	0,000	0,002
20	0,034	1,000	80,0	0,041	0,998	80,1	0,033	1,001	80,0	0,000	0,002
21	0,036	1,000	80,0	0,043	0,996	80,1	0,034	0,998	80,1	0,000	0,002
22	0,037	1,000	80,0	0,045	0,994	80,2	0,036	0,995	80,2	0,000	0,002
23	0,039	1,000	80,0	0,048	0,991	80,3	0,038	0,992	80,3	0,000	0,002
24	0,041	1,000	80,0	0,050	0,989	80,4	0,039	0,989	80,4	0,000	0,002
25	0,042	1,000	80,0	0,052	0,986	80,5	0,041	0,985	80,5	0,000	0,002
26	0,044	0,999	80,0	0,054	0,982	80,6	0,042	0,982	80,6	0,000	0,002
27	0,046	0,999	80,0	0,056	0,979	80,7	0,044	0,978	80,8	0,000	0,002
28	0,047	0,998	80,1	0,058	0,975	80,9	0,046	0,973	80,9	0,000	0,002
29	0,049	0,998	80,1	0,060	0,971	81,0	0,047	0,969	81,1	0,000	0,002
30	0,051	0,997	80,1	0,062	0,967	81,2	0,049	0,964	81,3	0,000	0,002
31	0,053	0,996	80,1	0,064	0,962	81,3	0,051	0,958	81,5	0,000	0,003
32	0,054	0,995	80,2	0,066	0,957	81,5	0,052	0,953	81,7	0,000	0,003
33	0,056	0,995	80,2	0,068	0,952	81,7	0,054	0,947	81,9	0,000	0,003
34	0,058	0,994	80,2	0,070	0,946	81,9	0,056	0,940	82,1	0,000	0,003
35	0,059	0,993	80,3	0,072	0,941	82,1	0,057	0,934	82,3	0,000	0,003
36	0,061	0,992	80,3	0,074	0,935	82,3	0,059	0,927	82,6	0,000	0,003
37	0,063	0,991	80,3	0,076	0,929	82,5	0,060	0,920	82,8	0,000	0,003
38	0,064	0,989	80,4	0,079	0,922	82,7	0,062	0,913	83,1	0,000	0,004
39	0,066	0,988	80,4	0,081	0,916	82,9	0,064	0,905	83,3	0,000	0,004
40	0,068	0,987	80,5	0,083	0,909	83,2	0,065	0,897	83,6	0,000	0,004
41	0,069	0,985	80,5	0,085	0,902	83,4	0,067	0,889	83,9	0,000	0,004
42	0,071	0,984	80,6	0,087	0,895	83,7	0,069	0,881	84,2	0,000	0,004
43	0,073	0,982	80,6	0,089	0,888	83,9	0,070	0,873	84,5	0,000	0,004
44	0,075	0,981	80,7	0,091	0,881	84,2	0,072	0,864	84,8	0,000	0,005
45	0,076	0,979	80,7	0,093	0,874	84,4	0,074	0,856	85,1	0,000	0,005
46	0,078	0,977	80,8	0,095	0,866	84,7	0,075	0,847	85,4	0,000	0,005
47	0,080	0,976	80,9	0,097	0,859	84,9	0,077	0,838	85,7	0,000	0,006
48	0,081	0,974	80,9	0,099	0,851	85,2	0,078	0,829	86,0	L_2	L_2-L_1

48	L_2	L_2-L_1	u(L_2-L_1)	u(L_2)	T (ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
49	0,080	0,002	1,433	0,820	86,3	0,000	0,000
50	0,082	0,003	1,348	0,811	86,6	0,000	0,001
51	0,083	0,005	1,279	0,802	86,9	0,000	0,001
52	0,085	0,007	1,224	0,792	87,3	0,000	0,001
53	0,087	0,008	1,179	0,783	87,6	0,000	0,002
54	0,088	0,010	1,143	0,774	87,9	0,000	0,002
55	0,090	0,011	1,113	0,764	88,2	0,001	0,003
56	0,092	0,013	1,090	0,755	88,6	0,001	0,003
57	0,093	0,015	1,071	0,746	88,9	0,001	0,004
58	0,095	0,016	1,056	0,736	89,2	0,001	0,005
59	0,096	0,018	1,045	0,727	89,6	0,001	0,005
60	0,098	0,020	1,035	0,718	89,9	0,001	0,006
61	0,100	0,021	1,028	0,708	90,2	0,001	0,007
62	0,101	0,023	1,022	0,699	90,5	0,001	0,008
63	0,103	0,025	1,017	0,690	90,9	0,001	0,009
64	0,105	0,026	1,013	0,680	91,2	0,001	0,010
65	0,106	0,028	1,009	0,671	91,5	0,001	0,011
66	0,108	0,029	1,006	0,662	91,8	0,001	0,012
67	0,110	0,031	1,003	0,653	92,1	0,001	0,013
68	0,111	0,033	1,001	0,644	92,5	0,001	0,015
69	0,113	0,034	0,998	0,635	92,8	0,001	0,016
70	0,114	0,036	0,995	0,626	93,1	0,002	0,018
71	0,116	0,038	0,992	0,618	93,4	0,002	0,019
72	0,118	0,039	0,989	0,609	93,7	0,002	0,021
73	0,119	0,041	0,985	0,600	94,1	0,002	0,023
74	0,121	0,042	0,982	0,592	94,4	0,002	0,025
75	0,123	0,044	0,978	0,583	94,7	0,002	0,028
76	0,124	0,046	0,973	0,575	95,0	0,002	0,030
77	0,126	0,047	0,969	0,567	95,3	0,003	0,033
78	0,127	0,049	0,964	0,558	95,6	0,003	0,036
79	0,129	0,051	0,958	0,550	96,0	0,003	0,039
80	0,131	0,052	0,953	0,542	96,3	0,003	0,042
81	0,132	0,054	0,947	0,534	96,6	0,004	0,045
82	0,134	0,056	0,940	0,526	96,9	0,004	0,051
83	0,136	0,057	0,934	0,519	97,2	L_3	L_3-L_1

83	L_3	L_3-L_1	L_3-L_2	u(L_3- L_1)	u(L_3-L_2)	u(L_3)	T(ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
84	0,137	0,059	0,002	0,927	1,433	0,511	97,5	0,004	0,002
85	0,139	0,060	0,003	0,920	1,348	0,503	97,8	0,005	0,007
86	0,141	0,062	0,005	0,913	1,279	0,496	98,1	0,005	0,012
87	0,142	0,064	0,007	0,905	1,224	0,488	98,4	0,005	0,017
88	0,144	0,065	0,008	0,897	1,179	0,481	98,7	0,006	0,023
89	0,145	0,067	0,010	0,889	1,143	0,474	99,0	0,006	0,029
90	0,147	0,069	0,011	0,881	1,113	0,467	99,3	0,007	0,036
91	0,149	0,070	0,013	0,873	1,090	0,459	99,6	0,007	0,043
92	0,150	0,072	0,015	0,864	1,071	0,453	99,8	0,007	0,050
93	0,152	0,074	0,016	0,856	1,056	0,446	100,1	0,008	0,058
94	0,154	0,075	0,018	0,847	1,045	0,439	100,4	0,009	0,067
95	0,155	0,077	0,020	0,838	1,035	0,432	100,7	0,009	0,076
96	0,157	0,078	0,021	0,829	1,028	0,426	101,0	0,010	0,085
97	0,159	0,080	0,023	0,820	1,022	0,419	101,2	0,010	0,096
98	0,160	0,082	0,025	0,811	1,017	0,413	101,5	0,011	0,107
99	0,162	0,083	0,026	0,802	1,013	0,406	101,8	0,012	0,118
100	0,163	0,085	0,028	0,792	1,009	0,400	102,0	0,012	0,131
101	0,165	0,087	0,029	0,783	1,006	0,394	102,3	0,013	0,144
102	0,167	0,088	0,031	0,774	1,003	0,388	102,6	0,014	0,158
103	0,168	0,090	0,033	0,764	1,001	0,382	102,8	0,015	0,173
104	0,170	0,092	0,034	0,755	0,998	0,376	103,1	0,016	0,189
105	0,172	0,093	0,036	0,746	0,995	0,370	103,3	0,017	0,205
106	0,173	0,095	0,038	0,736	0,992	0,364	103,6	0,018	0,223
107	0,175	0,096	0,039	0,727	0,989	0,359	103,9	0,019	0,252

108	L_4	L_4-L_1	L_4-L_2	L_4-L_3	u(L_4-L_1)	u(L_4-L_2)	u(L_4-L_3)	u(L_4)	T(ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
109	0,178	0,100	0,042	0,002	0,708	0,982	1,433	0,348	104,4	0,021	0,011
110	0,180	0,101	0,044	0,003	0,699	0,978	1,348	0,342	104,6	0,023	0,033
111	0,181	0,103	0,046	0,005	0,690	0,973	1,279	0,337	104,9	0,024	0,057
112	0,183	0,105	0,047	0,007	0,680	0,969	1,224	0,331	105,2	0,025	0,083
113	0,185	0,106	0,049	0,008	0,671	0,964	1,179	0,326	105,4	0,027	0,110
114	0,186	0,108	0,051	0,010	0,662	0,958	1,143	0,321	105,7	0,029	0,138
115	0,188	0,110	0,052	0,011	0,653	0,953	1,113	0,316	105,9	0,030	0,168
116	0,190	0,111	0,054	0,013	0,644	0,947	1,090	0,311	106,2	0,032	0,200
117	0,191	0,113	0,056	0,015	0,635	0,940	1,071	0,306	106,4	0,034	0,252
118	0,193	0,114	0,057	0,016	0,626	0,934	1,056	0,302	106,6	L_5	L_5-L_1

118	L_5	L_5-L_1	L_5-L_2	L_5-L_3	L_5-L_4	u(L_5-L_1)	u(L_5-L_2)	u(L_5-L_3)	u(L_5-L_4)	u(L_5)	T(ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
119	0,195	0,116	0,059	0,018	0,002	0,618	0,927	1,045	1,433	0,297	106,7	0,036	0,018
120	0,196	0,118	0,060	0,020	0,003	0,609	0,920	1,035	1,348	0,292	107,0	0,039	0,057
121	0,198	0,119	0,062	0,021	0,005	0,600	0,913	1,028	1,279	0,288	107,2	0,041	0,098
122	0,199	0,121	0,064	0,023	0,007	0,592	0,905	1,022	1,224	0,283	107,5	0,044	0,141
123	0,201	0,123	0,065	0,025	0,008	0,583	0,897	1,017	1,179	0,279	107,8	0,046	0,188
124	0,203	0,124	0,067	0,026	0,010	0,575	0,889	1,013	1,143	0,274	108,0	0,049	0,237
125	0,204	0,126	0,069	0,028	0,011	0,567	0,881	1,009	1,113	0,270	108,3	0,052	0,289
126	0,206	0,127	0,070	0,029	0,013	0,558	0,873	1,006	1,090	0,266	108,5	0,055	0,344
127	0,208	0,129	0,072	0,031	0,015	0,550	0,864	1,003	1,071	0,261	108,8	0,058	0,403
128	0,209	0,131	0,074	0,033	0,016	0,542	0,856	1,001	1,056	0,257	109,0	0,062	0,464
129	0,211	0,132	0,075	0,034	0,018	0,534	0,847	0,998	1,045	0,253	109,2	0,065	0,530
130	0,212	0,134	0,077	0,036	0,020	0,526	0,838	0,995	1,035	0,249	109,5	0,069	0,598
131	0,214	0,136	0,078	0,038	0,021	0,519	0,829	0,992	1,028	0,245	109,7	0,073	0,671
132	0,216	0,137	0,080	0,039	0,023	0,511	0,820	0,989	1,022	0,241	110,0	0,077	0,748
133	0,217	0,139	0,082	0,041	0,025	0,503	0,811	0,985	1,017	0,238	110,2	0,081	0,829
134	0,219	0,141	0,083	0,042	0,026	0,496	0,802	0,982	1,013	0,234	110,4	0,086	0,915
135	0,221	0,142	0,085	0,044	0,028	0,488	0,792	0,978	1,009	0,230	110,7	0,090	1,005
136	0,222	0,144	0,087	0,046	0,029	0,481	0,783	0,973	1,006	0,226	110,9	0,095	1,100
137	0,224	0,145	0,088	0,047	0,031	0,474	0,774	0,969	1,003	0,223	111,1	0,100	1,201
138	0,226	0,147	0,090	0,049	0,033	0,467	0,764	0,964	1,001	0,219	111,4	0,106	1,307
139	0,227	0,149	0,092	0,051	0,034	0,459	0,755	0,958	0,998	0,216	111,5	0,110	1,417
140	0,229	0,150	0,093	0,052	0,036	0,453	0,746	0,953	0,995	0,212	111,7	0,114	1,531
141	0,230	0,152	0,095	0,054	0,038	0,446	0,736	0,947	0,992	0,209	111,8	0,118	1,648
142	0,232	0,154	0,096	0,056	0,039	0,439	0,727	0,940	0,989	0,206	111,9	0,121	1,770
143	0,234	0,155	0,098	0,057	0,041	0,432	0,718	0,934	0,985	0,202	112,1	0,125	1,894
144	0,235	0,157	0,100	0,059	0,042	0,426	0,708	0,927	0,982	0,199	112,2	0,128	2,023
145	0,237	0,159	0,101	0,060	0,044	0,419	0,699	0,920	0,978	0,196	112,3	0,131	2,154
146	0,239	0,160	0,103	0,062	0,046	0,413	0,690	0,913	0,973	0,193	112,4	0,134	2,288
147	0,240	0,162	0,105	0,064	0,047	0,406	0,680	0,905	0,969	0,190	112,5	0,137	2,493

148	L_6	L_6-L_1	L_6-L_2	L_6-L_3	L_6-L_4	L_6-L_5	u(L_6-L_1)	u(L_6-L_2)	u(L_6-L_3)	u(L_6-L_4)	u(L_6-L_5)	u(L_6)	T (ºC)	$10^{(T-To)/z}$	F_p (min)
149	0,244	0,165	0,108	0,067	0,051	0,003	0,394	0,662	0,889	0,958	1,348	0,184	112,6	0,141	0,070
150	0,245	0,167	0,110	0,069	0,052	0,005	0,388	0,653	0,881	0,953	1,279	0,181	112,6	0,142	0,213
151	0,247	0,168	0,111	0,070	0,054	0,007	0,382	0,644	0,873	0,947	1,224	0,178	112,7	0,144	0,357
152	0,248	0,170	0,113	0,072	0,056	0,008	0,376	0,635	0,864	0,940	1,179	0,175	112,7	0,145	0,501
153	0,250	0,172	0,114	0,074	0,057	0,010	0,370	0,626	0,856	0,934	1,143	0,172	112,7	0,145	0,647
154	0,252	0,173	0,116	0,075	0,059	0,011	0,364	0,618	0,847	0,927	1,113	0,170	112,7	0,146	0,792
155	0,253	0,175	0,118	0,077	0,060	0,013	0,359	0,609	0,838	0,920	1,090	0,167	112,7	0,145	0,938
156	0,255	0,177	0,119	0,078	0,062	0,015	0,353	0,600	0,829	0,913	1,071	0,164	112,7	0,145	1,083
157	0,257	0,178	0,121	0,080	0,064	0,016	0,348	0,592	0,820	0,905	1,056	0,162	112,7	0,144	1,227
158	0,258	0,180	0,123	0,082	0,065	0,018	0,342	0,583	0,811	0,897	1,045	0,159	112,7	0,143	1,371
159	0,260	0,181	0,124	0,083	0,067	0,020	0,337	0,575	0,802	0,889	1,035	0,157	112,6	0,142	1,513
160	0,262	0,183	0,126	0,085	0,069	0,021	0,331	0,567	0,792	0,881	1,028	0,154	112,6	0,141	1,654
161	0,263	0,185	0,127	0,087	0,070	0,023	0,326	0,558	0,783	0,873	1,022	0,152	112,5	0,139	1,723
162	0,265	0,186	0,129	0,088	0,072	0,025	0,321	0,550	0,774	0,864	1,017	0,149	112,5	0,137	1,792
163	0,266	0,188	0,131	0,090	0,074	0,026	0,316	0,542	0,764	0,856	1,013	0,147	112,4	0,135	1,860
164	0,268	0,190	0,132	0,092	0,075	0,028	0,311	0,534	0,755	0,847	1,009	0,144	112,3	0,133	1,926
165	0,270	0,191	0,134	0,093	0,077	0,029	0,306	0,526	0,746	0,838	1,006	0,142	112,3	0,131	1,992
166	0,271	0,193	0,136	0,095	0,078	0,031	0,302	0,519	0,736	0,829	1,003	0,140	112,2	0,129	2,056
167	0,273	0,195	0,137	0,096	0,080	0,033	0,297	0,511	0,727	0,820	1,001	0,138	112,1	0,126	2,119
168	0,275	0,196	0,139	0,098	0,082	0,034	0,292	0,503	0,718	0,811	0,998	0,135	111,9	0,119	2,179
169	0,276	0,198	0,141	0,100	0,083	0,036	0,288	0,496	0,708	0,802	0,995	0,133	111,6	0,111	2,234
170	0,278	0,199	0,142	0,101	0,085	0,038	0,283	0,488	0,699	0,792	0,992	0,131	111,2	0,103	2,286
171	0,280	0,201	0,144	0,103	0,087	0,039	0,279	0,481	0,690	0,783	0,989	0,129	110,9	0,095	2,333
172	0,281	0,203	0,145	0,105	0,088	0,041	0,274	0,474	0,680	0,774	0,985	0,127	110,5	0,088	2,377
173	0,283	0,204	0,147	0,106	0,090	0,042	0,270	0,467	0,671	0,764	0,982	0,125	110,1	0,080	2,417
174	0,284	0,206	0,149	0,108	0,092	0,044	0,266	0,459	0,662	0,755	0,978	0,123	109,7	0,073	2,454
175	0,286	0,208	0,150	0,110	0,093	0,046	0,261	0,453	0,653	0,746	0,973	0,121	109,3	0,066	2,487
176	0,288	0,209	0,152	0,111	0,095	0,047	0,257	0,446	0,644	0,736	0,969	0,119	108,8	0,059	2,516
177	0,289	0,211	0,154	0,113	0,096	0,049	0,253	0,439	0,635	0,727	0,964	0,117	108,3	0,053	2,543
178	0,291	0,212	0,155	0,114	0,098	0,051	0,249	0,432	0,626	0,718	0,958	0,115	107,8	0,047	2,566
179	0,293	0,214	0,157	0,116	0,100	0,052	0,245	0,426	0,618	0,708	0,953	0,114	107,3	0,042	2,587
180	0,294	0,216	0,159	0,118	0,101	0,054	0,241	0,419	0,609	0,699	0,947	0,112	106,7	0,036	2,605
181	0,296	0,217	0,160	0,119	0,103	0,056	0,238	0,413	0,600	0,690	0,940	0,110	106,1	0,032	2,621
182	0,297	0,219	0,162	0,121	0,105	0,057	0,234	0,406	0,592	0,680	0,934	0,108	105,5	0,028	2,635
183	0,299	0,221	0,163	0,123	0,106	0,059	0,230	0,400	0,583	0,671	0,927	0,106	104,9	0,024	2,647
184	0,301	0,222	0,165	0,124	0,108	0,060	0,226	0,394	0,575	0,662	0,920	0,105	104,2	0,021	2,657
185	0,302	0,224	0,167	0,126	0,110	0,062	0,223	0,388	0,567	0,653	0,913	0,103	103,6	0,018	2,666
186	0,304	0,226	0,168	0,127	0,111	0,064	0,219	0,382	0,558	0,644	0,905	0,101	102,9	0,015	2,673
187	0,306	0,227	0,170	0,129	0,113	0,065	0,216	0,376	0,550	0,635	0,897	0,100	102,2	0,013	2,680
188	0,307	0,229	0,172	0,131	0,114	0,067	0,212	0,370	0,542	0,626	0,889	0,098	101,4	0,011	2,685
189	0,309	0,230	0,173	0,132	0,116	0,069	0,209	0,364	0,534	0,618	0,881	0,097	100,7	0,009	2,690
190	0,311	0,232	0,175	0,134	0,118	0,070	0,206	0,359	0,526	0,609	0,873	0,095	99,9	0,008	2,694
191	0,312	0,234	0,177	0,136	0,119	0,072	0,202	0,353	0,519	0,600	0,864	0,094	99,2	0,006	2,697
192	0,314	0,235	0,178	0,137	0,121	0,074	0,199	0,348	0,511	0,592	0,856	0,092	98,4	0,005	2,700
193	0,315	0,237	0,180	0,139	0,123	0,075	0,196	0,342	0,503	0,583	0,847	0,091	97,6	0,005	2,702
194	0,317	0,239	0,181	0,141	0,124	0,077	0,193	0,337	0,496	0,575	0,838	0,089	96,8	0,004	2,704
195	0,319	0,240	0,183	0,142	0,126	0,078	0,190	0,331	0,488	0,567	0,829	0,088	96,1	0,003	2,705
196	0,320	0,242	0,185	0,144	0,127	0,080	0,187	0,326	0,481	0,558	0,820	0,086	95,3	0,003	2,707
197	0,322	0,244	0,186	0,145	0,129	0,082	0,184	0,321	0,474	0,550	0,811	0,085	94,4	0,002	2,708
198	0,324	0,245	0,188	0,147	0,131	0,083	0,181	0,316	0,467	0,542	0,802	0,084	93,6	0,002	2,709
199	0,325	0,247	0,190	0,149	0,132	0,085	0,178	0,311	0,459	0,534	0,792	0,082	92,8	0,001	2,709
200	0,327	0,248	0,191	0,150	0,134	0,087	0,175	0,306	0,453	0,526	0,783	0,081	92,0	0,001	2,710
201	0,329	0,250	0,193	0,152	0,136	0,088	0,172	0,302	0,446	0,519	0,774	0,080	91,2	0,001	2,710
202	0,330	0,252	0,195	0,154	0,137	0,090	0,170	0,297	0,439	0,511	0,764	0,078	90,4	0,001	2,711
203	0,332	0,253	0,196	0,155	0,139	0,092	0,167	0,292	0,432	0,503	0,755	0,077	89,6	0,001	2,711
204	0,333	0,255	0,198	0,157	0,141	0,093	0,164	0,288	0,426	0,496	0,746	0,076	88,7	0,001	2,711
205	0,335	0,257	0,199	0,159	0,142	0,095	0,162	0,283	0,419	0,488	0,736	0,075	87,9	0,000	2,712
206	0,337	0,258	0,201	0,160	0,144	0,096	0,159	0,279	0,413	0,481	0,727	0,073	87,1	0,000	2,712
207	0,338	0,260	0,203	0,162	0,145	0,098	0,157	0,274	0,406	0,474	0,718	0,072	86,3	0,000	2,712
208	0,340	0,262	0,204	0,163	0,147	0,100	0,154	0,270	0,400	0,467	0,708	0,071	85,5	0,000	2,712
209	0,342	0,263	0,206	0,165	0,149	0,101	0,152	0,266	0,394	0,459	0,699	0,070	84,7	0,000	2,712
210	0,343	0,265	0,208	0,167	0,150	0,103	0,149	0,261	0,388	0,453	0,690	0,069	83,9	0,000	2,712
211	0,345	0,266	0,209	0,168	0,152	0,105	0,147	0,257	0,382	0,446	0,680	0,068	83,1	0,000	2,712
212	0,347	0,268	0,211	0,170	0,154	0,106	0,144	0,253	0,376	0,439	0,671	0,067	82,3	0,000	2,713
213	0,348	0,270	0,212	0,172	0,155	0,108	0,142	0,249	0,370	0,432	0,662	0,066	81,5	0,000	2,713
214	0,350	0,271	0,214	0,173	0,157	0,110	0,140	0,245	0,364	0,426	0,653	0,065	80,7	0,000	2,713
215	0,351	0,273	0,216	0,175	0,159	0,111	0,138	0,241	0,359	0,419	0,644	0,064	80,0	0,000	2,713
216	0,353	0,275	0,217	0,177	0,160	0,113	0,135	0,238	0,353	0,413	0,635	0,063	79,2	0,000	2,713
217	0,355	0,276	0,219	0,178	0,162	0,114	0,133	0,234	0,348	0,406	0,626	0,062	78,4	0,000	2,713
218	0,356	0,278	0,221	0,180	0,163	0,116	0,131	0,230	0,342	0,400	0,618	0,061	77,7	0,000	2,713

Placa Plana Infinita

Bi	λ_1	λ_2	λ_3	A_1	A_2	A_3
0,0000	0,0000	3,1416	6,2832	1,0000	0,0000	0,0000
0,0100	0,0998	3,1448	6,2848	1,0020	-0,0020	0,0004
0,1000	0,4328	3,2039	6,3148	1,0159	-0,0197	0,0050
1,0000	0,8603	3,4256	6,4373	1,1192	-0,1517	0,0466
10,0000	1,4289	4,3058	7,2281	1,2612	-0,3934	0,2104
100,0000	1,5552	4,6658	7,7764	1,2731	-0,4239	0,2539
1000,0000	1,5708	4,7124	7,8540	1,2732	-0,4244	0,2546

Cilindro infinito

Bi	β_1	β_2	β_3	A_1	A_2	A_3
0,0000	0,0000	3,8317	7,0156	1,0000	0,0000	0,0000
0,0100	0,1412	3,8343	7,0170	1,0031	-0,0034	0,0013
0,1000	0,4417	3,8577	7,0298	1,0245	-0,0333	0,0135
1,0000	1,2588	4,0795	7,1558	1,2071	-0,2901	0,1298
10,0000	2,1795	5,0332	7,9569	1,5677	-0,9575	0,6784
100,0000	2,3809	5,4652	8,5678	1,6014	-1,0631	0,8505
1000,0000	2,4048	5,5201	8,6537	1,6021	-1,0648	0,8558

Dados Iniciais

Valor de Biot	1000,0000
Diâmetro do Cilindro (cm)	15,24
Altura da Placa (cm)	16,83
Relacao (d/h)	0,91
Raio de Medida (cm)	0,00
Plano de Medida (cm)	0,00
Difusividade Térmica (cm^2/min) ..	0,1200
Temperatura Inicial (ºC)	80,0
Intervalo de Tempo (min)	1,0

Temperatura do Meio

T_1 (°C)	121,1
T_2 (°C)	25,0

Microrganismo de referência

Valor z (°C)	30,0
Temperatura de referência (°C)....	121,1
Valor F_0 (min)	5,81
Valor Fp (min)	43,28

Cálculos Preliminares

Placa Plana Infinita		Cilindro Infinito	
Valor de λ_1	1,5708	Valor de β_1	2,4048
Valor de λ_2	4,7124	Valor de β_2	5,5201
Valor de λ_3	7,8540	Valor de β_3	8,6537
Valor de A_1	1,2732	Valor de A_1	1,6021
Valor de A_2	-0,4244	Valor de A_2	-1,0648
Valor de A_3	0,2546	Valor de A_3	0,8558
Valor de $\cos(\lambda_1 X)$	1,0000	Valor de $Jo(\beta_1 R)$	1,0000
Valor de $\cos(\lambda_2 X)$	1,0000	Valor de $Jo(\beta_2 R)$	1,0000
Valor de $\cos(\lambda_3 X)$	1,0000	Valor de $Jo(\beta_3 R)$	1,0000

Cilindro Finito

Termo j	R1j	R2j	R3j	A1j	A2j	A3j	E1j	E2j	E3j
1	1,0000	0,3415	0,2888	2,040	-0,680	0,408	9,870	30,334	71,262
2	4,1626	0,6929	0,4153	-1,356	0,452	-0,271	41,084	61,548	102,476
3	9,8523	1,3251	0,6429	1,090	-0,363	0,218	97,239	117,703	158,631

Cálculo da Temperatura em Funcão do Tempo e Valor F_p											
	Placa Plana Infinita			Cilindro Infinito			Cilindro Finito				
Tempo	Fo	u	T	Fo	u	T	L	u	T	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,000	80,0	0,000	1,537	80,0	0,043	0,021
1	0,002	1,000	80,0	0,002	1,000	80,0	0,002	1,433	80,0	0,043	0,064
2	0,003	1,000	80,0	0,004	1,000	80,0	0,003	1,348	80,0	0,043	0,107
3	0,005	1,000	80,0	0,006	1,000	80,0	0,005	1,279	80,0	0,043	0,149
4	0,007	1,000	80,0	0,008	1,000	80,0	0,007	1,224	80,0	0,043	0,192
5	0,008	1,000	80,0	0,010	1,000	80,0	0,008	1,179	80,0	0,043	0,235
6	0,010	1,000	80,0	0,012	1,000	80,0	0,010	1,143	80,0	0,043	0,277
7	0,012	1,000	80,0	0,014	1,000	80,0	0,011	1,113	80,0	0,043	0,320
8	0,014	1,000	80,0	0,017	1,000	80,0	0,013	1,090	80,0	0,043	0,363
9	0,015	1,000	80,0	0,019	1,000	80,0	0,015	1,071	80,0	0,043	0,405
10	0,017	1,000	80,0	0,021	1,000	80,0	0,016	1,056	80,0	0,043	0,448
11	0,019	1,000	80,0	0,023	1,000	80,0	0,018	1,045	80,0	0,043	0,491
12	0,020	1,000	80,0	0,025	1,000	80,0	0,020	1,035	80,0	0,043	0,533
13	0,022	1,000	80,0	0,027	1,000	80,0	0,021	1,028	80,0	0,043	0,576
14	0,024	1,000	80,0	0,029	1,000	80,0	0,023	1,022	80,0	0,043	0,619
15	0,025	1,000	80,0	0,031	1,000	80,0	0,025	1,017	80,0	0,043	0,661
16	0,027	1,000	80,0	0,033	1,000	80,0	0,026	1,013	80,0	0,043	0,704
17	0,029	1,000	80,0	0,035	1,000	80,0	0,028	1,009	80,0	0,043	0,747
18	0,031	1,000	80,0	0,037	1,000	80,0	0,029	1,006	80,0	0,043	0,789
19	0,032	1,000	80,0	0,039	1,000	80,0	0,031	1,003	80,0	0,043	0,832
20	0,034	1,000	80,0	0,041	0,998	80,1	0,033	1,001	80,0	0,043	0,874
21	0,036	1,000	80,0	0,043	0,996	80,2	0,034	0,998	80,1	0,043	0,917
22	0,037	1,000	80,0	0,045	0,994	80,3	0,036	0,995	80,2	0,043	0,961
23	0,039	1,000	80,0	0,048	0,991	80,4	0,038	0,992	80,3	0,044	1,004
24	0,041	1,000	80,0	0,050	0,989	80,5	0,039	0,989	80,5	0,044	1,049
25	0,042	1,000	80,0	0,052	0,986	80,6	0,041	0,985	80,6	0,045	1,093
26	0,044	0,999	80,0	0,054	0,982	80,7	0,042	0,982	80,8	0,045	1,139
27	0,046	0,999	80,1	0,056	0,979	80,9	0,044	0,978	80,9	0,046	1,184
28	0,047	0,998	80,1	0,058	0,975	81,0	0,046	0,973	81,1	0,046	1,231
29	0,049	0,998	80,1	0,060	0,971	81,2	0,047	0,969	81,3	0,047	1,278
30	0,051	0,997	80,1	0,062	0,967	81,4	0,049	0,964	81,5	0,048	1,326
31	0,053	0,996	80,2	0,064	0,962	81,6	0,051	0,958	81,7	0,049	1,374
32	0,054	0,995	80,2	0,066	0,957	81,8	0,052	0,953	81,9	0,050	1,424
33	0,056	0,995	80,2	0,068	0,952	82,0	0,054	0,947	82,2	0,050	1,474
34	0,058	0,994	80,3	0,070	0,946	82,2	0,056	0,940	82,4	0,051	1,526
35	0,059	0,993	80,3	0,072	0,941	82,4	0,057	0,934	82,7	0,053	1,578
36	0,061	0,992	80,3	0,074	0,935	82,7	0,059	0,927	83,0	0,054	1,632
37	0,063	0,991	80,4	0,076	0,929	82,9	0,060	0,920	83,3	0,055	1,687
38	0,064	0,989	80,4	0,079	0,922	83,2	0,062	0,913	83,6	0,056	1,743
39	0,066	0,988	80,5	0,081	0,916	83,5	0,064	0,905	83,9	0,058	1,801
40	0,068	0,987	80,5	0,083	0,909	83,7	0,065	0,897	84,2	0,059	1,860
41	0,069	0,985	80,6	0,085	0,902	84,0	0,067	0,889	84,6	0,060	1,920
42	0,071	0,984	80,7	0,087	0,895	84,3	0,069	0,881	84,9	0,062	1,982
43	0,073	0,982	80,7	0,089	0,888	84,6	0,070	0,873	85,2	0,064	2,046
44	0,075	0,981	80,8	0,091	0,881	84,9	0,072	0,864	85,6	0,065	2,111
45	0,076	0,979	80,9	0,093	0,874	85,2	0,074	0,856	85,9	0,067	2,179
46	0,078	0,977	80,9	0,095	0,866	85,5	0,075	0,847	86,3	0,069	2,248
47	0,080	0,976	81,0	0,097	0,859	85,8	0,077	0,838	86,7	0,071	2,319
48	0,081	0,974	81,1	0,099	0,851	86,1	0,078	0,829	87,0	0,073	2,392
49	0,083	0,972	81,2	0,101	0,844	86,4	0,080	0,820	87,4	0,075	2,467
50	0,085	0,970	81,2	0,103	0,836	86,7	0,082	0,811	87,8	0,077	2,545
51	0,086	0,968	81,3	0,105	0,828	87,1	0,083	0,802	88,2	0,080	2,625
52	0,088	0,966	81,4	0,107	0,821	87,4	0,085	0,792	88,5	0,082	2,707
53	0,090	0,963	81,5	0,110	0,813	87,7	0,087	0,783	88,9	0,085	2,791
54	0,092	0,961	81,6	0,112	0,805	88,0	0,088	0,774	89,3	0,087	2,879
55	0,093	0,959	81,7	0,114	0,797	88,3	0,090	0,764	89,7	0,090	2,968
56	0,095	0,957	81,8	0,116	0,789	88,7	0,092	0,755	90,1	0,092	3,061
57	0,097	0,954	81,9	0,118	0,781	89,0	0,093	0,746	90,5	0,095	3,156
58	0,098	0,952	82,0	0,120	0,774	89,3	0,095	0,736	90,8	0,098	3,254
59	0,100	0,949	82,1	0,122	0,766	89,6	0,096	0,727	91,2	0,101	3,355
60	0,102	0,947	82,2	0,124	0,758	90,0	0,098	0,718	91,6	0,104	3,459

61	0,103	0,944	82,3	0,126	0,750	90,3	0,100	0,708	92,0	0,107	3,566
62	0,105	0,942	82,4	0,128	0,742	90,6	0,101	0,699	92,4	0,110	3,676
63	0,107	0,939	82,5	0,130	0,734	90,9	0,103	0,690	92,8	0,114	3,790
64	0,108	0,936	82,6	0,132	0,727	91,2	0,105	0,680	93,1	0,117	3,907
65	0,110	0,934	82,7	0,134	0,719	91,5	0,106	0,671	93,5	0,120	4,027
66	0,112	0,931	82,8	0,136	0,711	91,9	0,108	0,662	93,9	0,124	4,151
67	0,114	0,928	82,9	0,138	0,704	92,2	0,110	0,653	94,3	0,127	4,278
68	0,115	0,925	83,1	0,141	0,696	92,5	0,111	0,644	94,6	0,131	4,409
69	0,117	0,923	83,2	0,143	0,689	92,8	0,113	0,635	95,0	0,135	4,544
70	0,119	0,920	83,3	0,145	0,681	93,1	0,114	0,626	95,4	0,139	4,683
71	0,120	0,917	83,4	0,147	0,674	93,4	0,116	0,618	95,7	0,142	4,825
72	0,122	0,914	83,5	0,149	0,666	93,7	0,118	0,609	96,1	0,146	4,972
73	0,124	0,911	83,6	0,151	0,659	94,0	0,119	0,600	96,4	0,151	5,122
74	0,125	0,908	83,8	0,153	0,652	94,3	0,121	0,592	96,8	0,155	5,277
75	0,127	0,905	83,9	0,155	0,644	94,6	0,123	0,583	97,1	0,159	5,436
76	0,129	0,902	84,0	0,157	0,637	94,9	0,124	0,575	97,5	0,163	5,599
77	0,130	0,899	84,1	0,159	0,630	95,2	0,126	0,567	97,8	0,167	5,766
78	0,132	0,896	84,3	0,161	0,623	95,5	0,127	0,558	98,2	0,172	5,938
79	0,134	0,893	84,4	0,163	0,616	95,8	0,129	0,550	98,5	0,176	6,114
80	0,136	0,890	84,5	0,165	0,609	96,1	0,131	0,542	98,8	0,181	6,295
81	0,137	0,887	84,6	0,167	0,602	96,4	0,132	0,534	99,1	0,185	6,480
82	0,139	0,884	84,8	0,169	0,595	96,6	0,134	0,526	99,5	0,190	6,670
83	0,141	0,881	84,9	0,172	0,588	96,9	0,136	0,519	99,8	0,195	6,865
84	0,142	0,878	85,0	0,174	0,582	97,2	0,137	0,511	100,1	0,200	7,065
85	0,144	0,875	85,1	0,176	0,575	97,5	0,139	0,503	100,4	0,204	7,269
86	0,146	0,872	85,3	0,178	0,568	97,7	0,141	0,496	100,7	0,209	7,479
87	0,147	0,869	85,4	0,180	0,562	98,0	0,142	0,488	101,0	0,214	7,693
88	0,149	0,866	85,5	0,182	0,555	98,3	0,144	0,481	101,3	0,219	7,912
89	0,151	0,863	85,6	0,184	0,549	98,5	0,145	0,474	101,6	0,224	8,137
90	0,153	0,860	85,8	0,186	0,543	98,8	0,147	0,467	101,9	0,230	8,366
91	0,154	0,856	85,9	0,188	0,536	99,1	0,149	0,459	102,2	0,235	8,601
92	0,156	0,853	86,0	0,190	0,530	99,3	0,150	0,453	102,5	0,240	8,841
93	0,158	0,850	86,2	0,192	0,524	99,6	0,152	0,446	102,8	0,245	9,086
94	0,159	0,847	86,3	0,194	0,518	99,8	0,154	0,439	103,1	0,250	9,337
95	0,161	0,844	86,4	0,196	0,512	100,1	0,155	0,432	103,3	0,256	9,592
96	0,163	0,841	86,5	0,198	0,506	100,3	0,157	0,426	103,6	0,261	9,854
97	0,164	0,838	86,7	0,200	0,500	100,5	0,159	0,419	103,9	0,267	10,120
98	0,166	0,835	86,8	0,203	0,494	100,8	0,160	0,413	104,1	0,272	10,392
99	0,168	0,831	86,9	0,205	0,489	101,0	0,162	0,406	104,4	0,278	10,670
100	0,169	0,828	87,1	0,207	0,483	101,3	0,163	0,400	104,7	0,283	10,953
101	0,171	0,825	87,2	0,209	0,477	101,5	0,165	0,394	104,9	0,289	11,242
102	0,173	0,822	87,3	0,211	0,472	101,7	0,167	0,388	105,2	0,294	11,536
103	0,175	0,819	87,4	0,213	0,466	101,9	0,168	0,382	105,4	0,300	11,836
104	0,176	0,816	87,6	0,215	0,461	102,2	0,170	0,376	105,7	0,306	12,142
105	0,178	0,813	87,7	0,217	0,455	102,4	0,172	0,370	105,9	0,311	12,453
106	0,180	0,809	87,8	0,219	0,450	102,6	0,173	0,364	106,1	0,317	12,770
107	0,181	0,806	88,0	0,221	0,445	102,8	0,175	0,359	106,4	0,323	13,093
108	0,183	0,803	88,1	0,223	0,439	103,0	0,177	0,353	106,6	0,328	13,421
109	0,185	0,800	88,2	0,225	0,434	103,2	0,178	0,348	106,8	0,334	13,755
110	0,186	0,797	88,3	0,227	0,429	103,5	0,180	0,342	107,0	0,340	14,095
111	0,188	0,794	88,5	0,229	0,424	103,7	0,181	0,337	107,3	0,346	14,441
112	0,190	0,791	88,6	0,231	0,419	103,9	0,183	0,331	107,5	0,351	14,792
113	0,191	0,788	88,7	0,234	0,414	104,1	0,185	0,326	107,7	0,357	15,149
114	0,193	0,785	88,9	0,236	0,409	104,3	0,186	0,321	107,9	0,363	15,512
115	0,195	0,782	89,0	0,238	0,405	104,5	0,188	0,316	108,1	0,369	15,881
116	0,197	0,778	89,1	0,240	0,400	104,7	0,190	0,311	108,3	0,375	16,256
117	0,198	0,775	89,2	0,242	0,395	104,9	0,191	0,306	108,5	0,380	16,636
118	0,200	0,772	89,4	0,244	0,390	105,1	0,193	0,302	108,7	0,386	17,023
119	0,202	0,769	89,5	0,246	0,386	105,2	0,195	0,297	108,9	0,392	17,415
120	0,203	0,766	89,6	0,248	0,381	105,4	0,196	0,292	109,1	0,398	17,813
121	0,205	0,763	89,7	0,250	0,377	105,6	0,198	0,288	109,3	0,404	18,216
122	0,207	0,760	89,9	0,252	0,372	105,8	0,199	0,283	109,5	0,410	18,626
123	0,208	0,757	90,0	0,254	0,368	106,0	0,201	0,279	109,7	0,415	19,041
124	0,210	0,754	90,1	0,256	0,364	106,2	0,203	0,274	109,8	0,421	19,462
125	**0,212**	**0,751**	**90,2**	**0,258**	**0,359**	**106,3**	**0,204**	**0,270**	**110,0**	**0,427**	**20,106**
126	0,214	0,748	90,4	0,260	0,355	106,5	0,206	0,266	110,2	L_2	L_2-L_1

126	L_2	L_2-L_1	u(L_2-L_1)	u(L_2)	T(ºC)	$10^{(T-Tr)/z}$	F_p (min)
127	0,208	0,002	1,433	0,261	110,4	0,438	0,219
128	0,209	0,003	1,348	0,257	110,5	0,444	0,663
129	0,211	0,005	1,279	0,253	110,7	0,450	1,113
130	0,212	0,007	1,224	0,249	110,9	0,456	1,569
131	0,214	0,008	1,179	0,245	111,0	0,461	2,030
132	0,216	0,010	1,143	0,241	111,2	0,467	2,497
133	0,217	0,011	1,113	0,238	111,3	0,473	2,970
134	0,219	0,013	1,090	0,234	111,5	0,478	3,449
135	0,221	0,015	1,071	0,230	111,6	0,484	3,932
136	0,222	0,016	1,056	0,226	111,8	0,490	4,422
137	0,224	0,018	1,045	0,223	111,9	0,495	4,917
138	0,226	0,020	1,035	0,219	112,1	0,501	5,418
139	0,227	0,021	1,028	0,216	112,2	0,506	5,924
140	0,229	0,023	1,022	0,212	112,4	0,512	6,436
141	0,230	0,025	1,017	0,209	112,5	0,517	6,953
142	0,232	0,026	1,013	0,206	112,6	0,523	7,476
143	0,234	0,028	1,009	0,202	112,8	0,528	8,004
144	0,235	0,029	1,006	0,199	112,9	0,533	8,537
145	0,237	0,031	1,003	0,196	113,0	0,539	9,076
146	0,239	0,033	1,001	0,193	113,2	0,544	9,620
147	0,240	0,034	0,998	0,190	113,1	0,541	10,161
148	0,242	0,036	0,995	0,187	112,9	0,535	10,696
149	0,244	0,038	0,992	0,184	112,8	0,528	11,224
150	0,245	0,039	0,989	0,181	112,6	0,521	11,745
151	0,247	0,041	0,985	0,178	112,4	0,512	12,257
152	0,248	0,042	0,982	0,175	112,1	0,503	12,760
153	0,250	0,044	0,978	0,172	111,9	0,492	13,252
154	0,252	0,046	0,973	0,170	111,6	0,481	13,733
155	0,253	0,047	0,969	0,167	111,2	0,469	14,202
156	0,255	0,049	0,964	0,164	110,9	0,455	14,657
157	0,257	0,051	0,958	0,162	110,4	0,442	15,099
158	0,258	0,052	0,953	0,159	110,0	0,427	15,526
159	0,260	0,054	0,947	0,157	109,5	0,412	15,937
160	0,262	0,056	0,940	0,154	109,0	0,396	16,334
161	0,263	0,057	0,934	0,152	108,5	0,381	16,714
162	0,265	0,059	0,927	0,149	108,0	0,365	17,079
163	0,266	0,060	0,920	0,147	107,4	0,349	17,428
164	0,268	0,062	0,913	0,144	106,8	0,333	17,761
165	0,270	0,064	0,905	0,142	106,1	0,317	18,078
166	0,271	0,065	0,897	0,140	105,5	0,301	18,379
167	0,273	0,067	0,889	0,138	104,8	0,286	18,665
168	0,275	0,069	0,881	0,135	104,1	0,271	18,937
169	0,276	0,070	0,873	0,133	103,4	0,257	19,193
170	0,278	0,072	0,864	0,131	102,7	0,243	19,436
171	0,280	0,074	0,856	0,129	101,9	0,229	19,666
172	0,281	0,075	0,847	0,127	101,2	0,216	19,882
173	0,283	0,077	0,838	0,125	100,4	0,204	20,086
174	0,284	0,078	0,829	0,123	99,6	0,192	20,278
175	0,286	0,080	0,820	0,121	98,8	0,181	20,459
176	0,288	0,082	0,811	0,119	98,0	0,170	20,629
177	0,289	0,083	0,802	0,117	97,2	0,160	20,789
178	0,291	0,085	0,792	0,115	96,4	0,150	20,939
179	0,293	0,087	0,783	0,114	95,6	0,141	21,080
180	0,294	0,088	0,774	0,112	94,8	0,132	21,212
181	0,296	0,090	0,764	0,110	93,9	0,124	21,337
182	0,297	0,092	0,755	0,108	93,1	0,117	21,453
183	0,299	0,093	0,746	0,106	92,3	0,109	21,563
184	0,301	0,095	0,736	0,105	91,4	0,103	21,665
185	0,302	0,096	0,727	0,103	90,6	0,096	21,762
186	0,304	0,098	0,718	0,101	89,8	0,090	21,852

187	0,306	0,100	0,708	0,100	89,0	0,085	21,937
188	0,307	0,101	0,699	0,098	88,1	0,080	22,017
189	0,309	0,103	0,690	0,097	87,3	0,075	22,091
190	0,311	0,105	0,680	0,095	86,5	0,070	22,162
191	0,312	0,106	0,671	0,094	85,7	0,066	22,227
192	0,314	0,108	0,662	0,092	84,9	0,062	22,289
193	0,315	0,110	0,653	0,091	84,0	0,058	22,348
194	0,317	0,111	0,644	0,089	83,2	0,055	22,402
195	0,319	0,113	0,635	0,088	82,4	0,051	22,454
196	0,320	0,114	0,626	0,086	81,7	0,048	22,502
197	0,322	0,116	0,618	0,085	80,9	0,046	22,548
198	0,324	0,118	0,609	0,084	80,1	0,043	22,591
199	0,325	0,119	0,600	0,082	79,3	0,040	22,631
200	0,327	0,121	0,592	0,081	78,5	0,038	22,669
201	0,329	0,123	0,583	0,080	77,8	0,036	22,705
202	0,330	0,124	0,575	0,078	77,0	0,034	22,739
203	0,332	0,126	0,567	0,077	76,3	0,032	22,771
204	0,333	0,127	0,558	0,076	75,5	0,030	22,802
205	0,335	0,129	0,550	0,075	74,8	0,029	22,830
206	0,337	0,131	0,542	0,073	74,1	0,027	22,857
207	0,338	0,132	0,534	0,072	73,4	0,026	22,883
208	0,340	0,134	0,526	0,071	72,7	0,024	22,907
209	0,342	0,136	0,519	0,070	72,0	0,023	22,930
210	0,343	0,137	0,511	0,069	71,3	0,022	22,952
211	0,345	0,139	0,503	0,068	70,6	0,021	22,973
212	0,347	0,141	0,496	0,067	69,9	0,020	22,992
213	0,348	0,142	0,488	0,066	69,2	0,019	23,011
214	0,350	0,144	0,481	0,065	68,6	0,018	23,029
215	0,351	0,145	0,474	0,064	67,9	0,017	23,046
216	0,353	0,147	0,467	0,063	67,3	0,016	23,062
217	0,355	0,149	0,459	0,062	66,6	0,015	23,077
218	0,356	0,150	0,453	0,061	66,0	0,015	23,092
219	0,358	0,152	0,446	0,060	65,4	0,014	23,105
220	0,360	0,154	0,439	0,059	64,8	0,013	23,119
221	0,361	0,155	0,432	0,058	64,2	0,013	23,131
222	0,363	0,157	0,426	0,057	63,6	0,012	23,143
223	0,365	0,159	0,419	0,056	63,0	0,012	23,155
224	0,366	0,160	0,413	0,055	62,4	0,011	23,166
225	0,368	0,162	0,406	0,054	61,8	0,011	23,177

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo