

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ELABORAÇÃO DE UM MODELO PARA O CONTROLE DO PROCESSO DE
PASTEURIZAÇÃO EM CERVEJA ENVASADA (*IN-PACKAGE*)

por

Daniel Horacio Girotti Fontana

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2009

ELABORAÇÃO DE UM MODELO PARA O CONTROLE DO PROCESSO DE
PASTEURIZAÇÃO EM CERVEJA ENVASADA (*IN-PACKAGE*)

por

Daniel Horacio Girotti Fontana

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. . Ligia S. Damasceno Ferreira Marzack, PPGEQ/UFRGS

Prof. Dra. Adriane Prisco Petry, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Horacio Antônio Vielmo

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Junho de 2009

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado sob a orientação do Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, a quem expressei minha sincera gratidão por toda sua orientação, compreensão e ajuda para a superação das dificuldades encontradas durante a execução deste trabalho.

Agradeço à Ariane Soraia, tão especial na minha vida, pela cumplicidade e amor que sempre recebi e que sem sua ajuda este trabalho não existiria.

Agradeço aos meus pais, Horacio e Mabel, por tudo que fizeram por mim, de forma incondicional.

À Ziemann-Liess Máquinas e Equipamentos Ltda., que lançou o desafio que foi a base deste trabalho e pelos todos os apoios recebidos para que eu pudesse executar o mestrado. Agradeço em especial aos engenheiros Nilson Bolgenhagen, Marcus Gerhardt, Eleandro Tomasi e Luis Fernando Klein.

Aos colegas do LETA e do GESTE, pelo companheirismo e auxílio. Agradeço de forma especial ao colega Marco Lovatto, pelo auxílio na resolução das simulações computacionais.

Ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP/RS), pela disponibilidade dos recursos computacionais utilizados neste trabalho.

À UFRGS onde, por meio do PROMEC, me disponibilizou esta valiosa oportunidade e por todos os recursos que me foram colocados à disposição.

RESUMO

A pasteurização é um processo térmico de tratamento de alimentos, sendo amplamente difundido na indústria de bebidas. É ela que provê ao produto sua durabilidade dentro dos padrões adequados ao consumo humano. Suas ações também têm impacto direto nas propriedades organolépticas e estabilidade química do produto.

Os produtos geralmente são pasteurizados em equipamentos de grandes dimensões, chamados de túneis pasteurizadores. Nestes equipamentos, os alimentos são pasteurizados no sistema *in-package*, ou seja, já envasados, de forma a eliminar os microorganismos presentes também no vasilhame.

Este trabalho tem por objetivo a investigação dos fenômenos de transferência de calor que ocorrem na pasteurização de cerveja engarrafada bem como a elaboração de um modelo analítico visando permitir um controle do processo térmico. Para a obtenção dos valores dos coeficientes de troca térmica global foi projetada e construída uma bancada de testes que permite recriar as mesmas condições existentes nas máquinas reais.

Com esta bancada são obtidos resultados que permitem analisar os coeficientes globais de transferência de calor e estudadas suas relações com a massa e geometria do vasilhame em estudo. Estes coeficientes alimentam um modelo analítico proposto que possa ser facilmente implementado de forma a consolidar o sistema de controle do processo de pasteurização.

Os coeficientes obtidos atingem uma boa confiabilidade do modelo para este caso em estudo além de permitir um conhecimento mais profundo sobre o processo térmico e seu comportamento fluidodinâmico.

De forma a consolidar o presente trabalho, simulações numéricas são realizadas para permitir a uma visualização mais clara das características de processo através os campos de temperatura e velocidade, para comprovação das observações efetuadas nos estudos experimentais.

O modelo proposto de transferência de calor para o controle do processo, com seus coeficientes, juntamente com o equacionamento da intensidade de pasteurização, permitiram a construção de uma máquina onde os resultados deste estudo são utilizados, atingindo uma eficiência de processo da ordem de 95%, suficiente para a consolidação da solução junto ao mercado.

ABSTRACT

“Formulation of a Model for Controlling the Pasteurization Process of Bottled Beer (*IN-PACKAGE*)”

Pasteurization is one of the most important processes applied in drinking industry. It is the process that provides the product the needed durability in order to ensure a secure consumption for human beings. The effects of pasteurization also affect the organoleptic properties of the products and its chemical stability.

The products are pasteurized in large equipments called tunnel pasteurizers, and the process is also called in-package pasteurization. That means that the product is processed already bottled, in order to eliminate the microorganisms that may be present in the bottle.

This work has the purpose to investigate the physical phenomena's that occurs during beer pasteurization, and to elaborate an analytical model that describes the thermal problem. In order to acquire the global heat transfer coefficients, as the analysis of the thermal resistances involved, it is designed and constructed an analysis machine that creates all the conditions that can be found in real machines.

With this analysis machine, it is obtained the results of the global heat transfer coefficients, and it relations with the mass and the geometry aspect ratio of the bottle. The coefficients will be implemented in the model proposed in order to allow the creation of a pasteurization control system that can be programmed for a real machine, today not featured in the machines offered in the Brazilian market

The obtained coefficients ensures a good reliability of the model for this special purpose as also allows a depth knowledge of the thermal and fluid-dynamic process, for future studies that can be developed in the area.

For the consolidation of the proposed model, investigations are performed using numerical methods for a complete observation of the most important features that has influence in the process.

This work enabled the construction of a real machine with pasteurization process control, using the model together with the obtained heat transfer coefficients. Some results of measures made at this machine are presented, showing that it can ensure a efficiency of 95%. This result turns to be good enough in order to approve the machine for operations in the domestic market.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pag.
2.1 Morte térmica dos microorganismos a uma dada temperatura.....	18
2.2 Curva de Sobrevivência Térmica (Sevilla 2004).....	19
2.3 Dependência da curva de sobrevivência térmica com a temperatura.....	21
2.4 Curva de Resistência Térmica.....	22
2.5 Comportamento da taxa de ganho das Unidades de Pasteurização.....	25
2.6 Vista lateral esquemática de um Pasteurizador de Cestos tipo Gasquet.....	26
2.7 Vista superior esquemática de um Pasteurizador de Cestos tipo Gasquet.....	27
2.8 Pasteurizador de cestos tipo americano.....	28
2.9 Diagrama de pasteurizador tipo túnel de Barry-Wehmiller (Clerk 1958).....	29
2.10 Esquema básico do movimento da garrafa (sistema “ <i>walking beams</i> ”).....	29
2.11 Apoios fixos e apoios móveis que permitem o avanço das garrafas.....	30
2.12 Cilindros atuadores do movimento descrito na figura 2.10.....	30
2.13 Movimentação dos pistões e o movimento relativo da garrafa.....	31
2.14 Parte frontal de um túnel pasteurizador em aço inoxidável, com acionamento por motoredutores planetários.....	32
2.15 Esteira transportadora, com eixo e engrenagens de acionamento (Intralox Co 2008).....	33
2.16 Vasilhames passando por um pasteurizador tipo túnel construído em aço inox e com esteira transportadora (cortesia de Ziemann-Liess Ltda.).....	33
2.17 Vista frontal esquemática de um túnel com sua área inferior utilizada como tanque.....	34
2.18 Vista frontal esquemática de um túnel utilizando reservatório de água quente.....	35
2.19 Planta esquemática de envase de cerveja.....	36
2.20 Vista geral de uma linha de envase de cerveja.....	36
3.1 Zonas de processo de um túnel pasteurizador. Receita para 16UP.....	40
3.2 Esquema básico do processo de transferência de calor.....	40
3.3 Variação da energia interna dada pelo balanço da entrada e saída das taxas de calor.....	43
3.4 Formulação de cálculo da temperatura de todas as garrafas em um túnel pasteurizador.....	46

Figura	Pag.
4.1 Fluxograma da bancada construída.....	52
4.2 Vista lateral do protótipo.....	53
4.3 Garrafas em testes (piso inferior).....	54
4.4 Bico de spray, para cone cheio com ângulo de abertura de 60°.....	54
4.5 Bombas: de água quente, de água fria e bomba principal.....	55
4.6 Tela do sistema de controle da bancada do pasteurizador.....	56
4.7 Termógrafo para medição da temperatura no vasilhame.....	57
4.8 Montagem da sonda em um vasilhame de 600ml.....	58
5.1 Curva de aquecimento do vasilhame (medida no <i>cold spot</i>).....	61
5.2 Valores do fator f ao longo do teste 1.....	62
5.3 Teste 1 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f}	63
5.4 Variação de \bar{f} com a temperatura do banho T_s	63
5.5 Curva de aquecimento para o Teste 2 (tempo de 200s por patamar).....	65
5.6 Curva de aquecimento para o Teste 3 (tempo de 280s por patamar).....	65
5.7 Curva de aquecimento para o Teste 4 (tempo de 360s por patamar).....	66
5.8 Variação de \bar{f} com a temperatura do banho T_s	66
5.9 Teste 2 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f}	67
5.10 Teste 3 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f}	68
5.11 Teste 4 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f}	68
5.12 Variação de \bar{f} com a temperatura do banho T_s	70
5.13 Teste 5 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f}	71
5.14 Teste 6 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f}	71
5.15 Valores do fator exponencial f ao longo do teste de resfriamento.....	73
5.16 Teste Resfriamento - Resultados do modelo teórico com valores de \bar{f}	74
5.17 Fator \bar{f} - Regiões características.....	75
6.1 Modelo auxiliar, compreendendo o (a) vidro e o fluido e (b) modelo com a geometria original do vasilhame.....	80
6.2 Contato do fundo de um vasilhame de cerveja com esteira transportadora.....	81
6.3 Esquema básico das condições de contorno do problema auxiliar.....	82

Figura	Pag.
6.4 Interface entre malha não-estruturada tetraédica e malha prismática (a) Modelo auxiliar, compreendendo o vidro e o fluido e (b) modelo somente fluido.....	88
6.5 Malhas utilizadas (a) Modelo auxiliar, compreendendo o vidro e o fluido e (b) modelo com a geometria original do vasilhame, somente fluido.....	89
6.6 Resultados da temperatura interna do vidro. Temperatura externa de 40°C (313K).....	90
6.7 Média da temperatura interna do casco de vidro com aproximação polinomial....	90
6.8 Evolução do campo de temperatura: (a) em t = 0s, (b) em t = 20s, (c) em t = 60s e (d) em t = 120s.....	91
6.9 Evolução do campo de temperatura – corte transversal a 20mm do fundo, em t = 0s, (b) em t = 20s, (c) em t = 60s e (d) em t = 120s.....	92
6.10 Evolução do campo de temperatura: (a) em t = 150s, (b) em t = 200s, (c) em t = 250s e (d) em t = 300s.....	93
6.11 Pontos selecionados para análise.....	94
6.12 Evolução temporal da temperatura para os pontos do eixo da garrafa.....	94
6.13 Resultados de Engelman e Sani (1983) para diversos pontos da garrafa.....	95
6.14 Evolução temporal da temperatura para os pontos em outras posições radiais.....	95
6.15 Linhas de corrente: (a) t = 10s, (b) t = 20s, (c) t = 30s, (d) t = 40s.....	96
6.16 Linhas de corrente: (a) t = 60s, (b) t = 100s, (c) t = 120s, (d) t = 150s.....	97
6.17 Comparativo entre T _{CS} obtido numericamente com resultados experimentais.....	98
7.1 Visão geral do túnel pasteurizador nacional com controle de processo.....	101
7.2 Vista superior e lateral da máquina.....	101
7.3 Comparativo de curva obtida em máquina real com modelo utilizado.....	103
7.4 Outro exemplo de comparativo de curva medida com curva do modelo utilizado	104
7.5 Tela da IHM mostrando o processo em cada ponto da máquina. Escala da esquerda referente a temperatura (°C) e escala da direita referente as UP's.....	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Pag.
2.1 Faixas de pH relativas às taxas de reprodução dos microorganismos (Gava 1998)	17
3.1 Dados do exemplo de demonstração do controle de UP.....	47
5.1 Valores Utilizados no Teste 1.....	60
5.2 Resultados do Teste 1.....	62
5.3 Análise de Desvios do Teste 1.....	64
5.4 Valores para os Testes de aquecimento 2, 3 e 4.....	64
5.5 Resultados do Teste 2, 3 e 4.....	67
5.6 Análise de Desvios dos Testes 2, 3 e 4.....	69
5.7 Valores para os Teste de aquecimento 5 e 6.....	69
5.8 Resultados do Teste 5 e 6.....	70
5.9 Análise de Desvios dos Testes 5 e 6.....	72
5.10 Valores do Teste de resfriamento.....	72
5.11 Resultados do Teste de Resfriamento.....	73
5.12 Análise de Desvios do Teste de Resfriamento.....	74
5.13 Fator Exponencial Médio para vasilhame de 600ml.....	75
5.14 Propriedades para o Vasilhame de 600ml.....	77
5.15 Coeficiente global de transferência de calor para vasilhame de 600ml.....	77
6.1 Informações das malhas utilizadas.....	89
6.2 Função de Temperatura Interna Obtida no Caso Auxiliar.....	91
6.3 Coordenadas dos pontos de análise, da figura 6.11.....	94
6.4 Desvios entre o modelo numérico e o modelo físico usando \bar{f}	99
7.1 Dados de processo do pasteurizador.....	102
7.2 Resultados da medição mostrada na figura 7.3.....	103
7.3 Eficiência do túnel pasteurizador – Teresina/PI.....	104

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número de microrganismos.....	[]
t	Tempo.....	[s]
K	Constante de morte térmica.....	[1/s]
D	Tempo de redução decimal.....	[s]
E_a	Energia de ativação da reação.....	[J]
R	Constante universal dos gases.....	[kJ / kmol · K]
T	Temperatura.....	[°C]
K_∞	Fator pré-exponencial.....	[1/s]
D_∞	Fator pré-exponencial (baseado no tempo D).....	[1/s]
Z	Fator de resistência térmica.....	[]
L	Índice de letalidade.....	[]
UP	Unidade de pasteurização.....	[UP]
E	Energia interna.....	[J]
q	Taxa de calor.....	[W]
U	Coeficiente global médio de transferência de calor.....	[W / m ² K]
A	Área.....	[m ²]
C_p	Calor específico.....	[J / kg · K]
V	Volume.....	[m ³]
f	Fator constante de tempo de transferência de calor.....	[s]
\overline{Nu}_L	Número de Nusselt médio.....	[]
Ra_L	Número de Rayleigh.....	[]
Gr	Número de Grashof.....	[]
Pr	Número de Prandtl.....	[]
g	Aceleração gravitacional.....	[m/s ²]
L	Comprimento característico.....	[m]
m	Massa.....	[kg]
z	Coordenada espacial.....	[m]
r	Coordenada espacial.....	[m]
gen	Geração interna de energia.....	[J/m ³]
v	Velocidade.....	[m/s]
H	Altura do vasilhame.....	[m]

<i>Dia</i>	Diâmetro do vasilhame.....	[<i>m</i>]
<i>k</i>	Condutividade térmica.....	[<i>W/mK</i>]

LETRAS GREGAS

ρ	Peso específico.....	[<i>kg / m³</i>]
ν	Viscosidade cinemática.....	[<i>m²/s</i>]
α	Difusividade térmica.....	[<i>m²/s</i>]
μ	Viscosidade dinâmica.....	[<i>kg / m · s</i>]
β	Coefficiente de expansão térmica.....	[<i>1/K</i>]
θ	Coordenada espacial.....	[<i>rad</i>]

SUB-ÍNDICES

<i>REF</i>	Referência
<i>RED</i>	Reduzido
<i>CS</i>	Ponto frio (cold spot)
<i>S</i>	Banho (spray)
<i>CT</i>	Contato
<i>liq</i>	Referente ao líquido
<i>vas</i>	Referente ao vasilhame
<i>F</i>	Fluido
<i>V</i>	Vidro
<i>SIST</i>	Referente ao sistema vidro-cerveja

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.3 ESCOPO E ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO	8
2. PASTEURIZAÇÃO.....	10
2.1 SOBRE A PASTEURIZAÇÃO.....	10
2.2 PRINCIPAIS FATORES INFLUENTES.....	12
2.3 PRINCIPAIS MICROORGANISMOS A SEREM ATACADOS PELA PASTEURIZAÇÃO.....	13
2.4 CONSEQÜÊNCIAS DE UMA MÁ PASTEURIZAÇÃO	16
2.5 CINÉTICA DA MORTE TÉRMICA DE MICROORGANISMOS	17
2.6 HISTÓRICO SOBRE MÁQUINAS DE PASTEURIZAÇÃO.....	25
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	39
3.1 MODELAGEM FÍSICA SIMPLIFICADA – CONTROLE PROPOSTO	42
3.2 FORMA DE APLICAÇÃO PARA O CONTROLE	45
4. METODOLOGIA	51
4.1 O PROJETO EXPERIMENTAL.....	51
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
5.1 PLANEJAMENTO DOS TESTES.....	59
5.2 EXECUÇÃO DOS TESTES	60
5.3 TESTE DE AQUECIMENTO.....	60
5.4 TESTE DE AQUECIMENTO – VERIFICAÇÃO DA DEPENDÊNCIA COM O TEMPO	64
5.5 TESTES DE AQUECIMENTO – CONSOLIDAÇÃO DOS VALORES DE \bar{f}	69
5.6 TESTES DE RESFRIAMENTO	72
5.7 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	74
6. ESTUDOS NUMÉRICOS	79
6.1 ESTRATÉGIA UTILIZADA	79
6.2 MODELAGEM MATEMÁTICA – Problema Auxiliar.....	81
6.3 MODELAGEM MATEMÁTICA – Problema Fluido.....	87
6.4 MALHAS UTILIZADAS.....	87
6.5 O PROBLEMA AUXILIAR	89
6.6 RESULTADOS	91

7. A MÁQUINA REAL.....	99
7.1 PASTEURIZADOR COM CONTROLE DE UP.....	99
7.2 MEDIÇÕES DE PROCESSO	101
8. CONCLUSÃO	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1. INTRODUÇÃO

A indústria alimentícia está cada vez mais exigindo equipamentos que aliem grandes volumes de produção com alta precisão nos processos. Estas exigências fazem com que equipamentos que operam em uma linha de produção tenham que garantir altos índices de rentabilidade, garantindo processos com estreitas margens de tolerância.

Na indústria de bebidas, a indústria cervejeira é uma das maiores e mais tradicionais do setor e, talvez, a que envolva o maior número de processos, desde a manipulação da matéria-prima até os procedimentos de estoque do produto final.

A pasteurização é o último processo ao qual a cerveja é submetida. O processo segue a mesma concepção inventada pelo cientista francês Louis Pasteur em 1864, quando ele demonstrou que as doenças causadas pelo vinho eram oriundas da presença de microorganismos. Estes microorganismos eram mortos quando aquecidos até uma temperatura de 55°C (Ziemann-Liess Ltda 1985). No caso da cerveja, a pasteurização basicamente consiste em submeter cerveja já envasada (*in-package*) a um aquecimento gradual até uma temperatura padrão e assim mantida por alguns minutos. Após este período, ela é submetida a um resfriamento gradual até a temperatura ambiente, para armazenamento. A cerveja é pasteurizada já envasada para também efetuar uma eliminação dos microorganismos que podem estar no vasilhame, já que a maioria dos vasilhames de cerveja é do tipo retornável.

Este processo ocorre em um equipamento de grandes dimensões denominado *túnel pasteurizador*. Nestes túneis, os vasilhames sofrem diversos banhos, com temperaturas diferentes, que promovem o aquecimento e o resfriamento gradual das garrafas.

A pasteurização está assumindo cada vez mais um papel importante na qualidade e produtividade das indústrias cervejeiras. Isto se deve-se ao fato dos túneis pasteurizadores estarem encarregados em processar quantidades cada vez maiores de vasilhames, com tolerâncias cada vez menores em relação aos padrões exigidos para o processo. Além disto, as máquinas devem trabalhar praticamente sem nenhuma intervenção humana, exigindo um nível muito alto de automação e de confiabilidade.

Nas últimas décadas, as únicas máquinas disponíveis no mercado que atendem a estas exigências são de origem estrangeira. Porém, o parque industrial das cervejarias ainda possui dezenas de máquinas antigas (ou até mais novas, porém mais simples) que não tem um real controle do processo de pasteurização. Este maquinário se mantém ativo devido ao alto custo das máquinas importadas. A maior parte das máquinas encontradas apenas controla as temperaturas

dos banhos, seguindo um padrão pré-estabelecido. Qualquer variação no funcionamento de uma das máquinas da linha de envase ocasiona desvios na pasteurização exigindo que grandes quantidades de produtos sejam segregadas, de forma sistemática, para análise laboratorial.

Com este panorama caracterizado, a concepção de um modelo matemático que possa ser implementado em um software de controle destas máquinas, permitindo que a mesma possa efetuar adequações nos banhos em função do nível de pasteurização dos vasilhames no seu interior é extremamente bem-vinda. Este modelo já levaria em conta as propriedades de cada vasilhame e produto a ser processado, permitindo a visualização da temperatura e nível de pasteurização de cada vasilhame processado. Estes dados podem, assim, ser acompanhados na tela de IHM (Interface Humano-Máquina) do pasteurizador.

Finalmente, com o modelo consolidado e com bom nível de confiabilidade, fabricantes nacionais de pasteurizadores poderiam aplicá-lo e voltar a concorrer com os túneis pasteurizadores importados.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com a atual situação de dependência do mercado externo, além do relativo pouco estudo acadêmico direcionado aos fenômenos envolvidos no processo de pasteurização de líquidos já envasados, este trabalho visa prover resultados que permitam não apenas a compreensão dos fenômenos envolvidos e suas grandezas, mas também uma solução de curso prático para sua aplicação em programa de gerenciamento das máquinas pasteurizadores do tipo túnel.

O problema básico recai na condução de calor através do casco e na conseqüente convecção natural do fluido interno. Devido às pequenas dimensões do vasilhame e das diferenças de temperatura entre o fluido envasado e a água de cada banho, esguichada pelo túnel (limitada pela resistência ao choque térmico do material do casco), espera-se um comportamento onde exista uma maior velocidade próxima às paredes e a maior parte do fluido dentro da cavidade (o núcleo) é relativamente estagnado e é termicamente estratificado (Bejan 1995).

Estudos anteriores mostram que o escoamento se mantém dentro do regime laminar, sendo que em processos longos, as velocidades caem rapidamente com a diminuição do diferencial de temperatura, podendo chegar ao limite da condução no fluido (Bejan, 1995; Patiño et al. 2001).

É possível a realização de estudos experimentais para a obtenção dos coeficientes globais de transferência de calor, com a medição da temperatura em pontos estratégicos para a pasteurização dentro do vasilhame, geralmente o eixo central do vasilhame (Brandon, et al.

1984; Gava, 1998; Larsen, 2006). Este procedimento é relativamente simples para ser executado em uma bancada e é suficiente para poder calcular a intensidade da pasteurização.

Deseja-se, então, conhecer estes coeficientes e estudá-los para as situações mais comuns que ocorrem no interior dos túneis para o vasilhame de vidro com capacidade para 600ml de cerveja, já que é o mais utilizado no mercado.

O vasilhame também deve ser analisado de forma a quantificar sua real influência, tanto como resistência térmica para a transferência do calor, bem como nos campos de velocidade dentro do vasilhame, devido à sua geometria. Lewicki (1983, 1984 e 1985) mostrou que as relações geométricas do vasilhame podem afetar a estabilidade das condições da transferência de calor, já que sua forma altera as correntes convectivas.

Para uma medição confiável das temperaturas das paredes internas do vasilhame torna-se difícil, já que as dimensões dos medidores de temperatura, por menores que sejam, podem modificar substancialmente o regime de camada limite do ponto em questão, já que se presume que esta camada limite possua uma pequena espessura.

Com a disponibilidade atual de poderosas ferramentas computacionais, estas necessidades são supridas através da obtenção de resultados de simulação numérica dos campos de velocidade e distribuição de temperatura, validados através da comparação da temperatura de alguns pontos do fluido com resultados experimentais. Desta forma, pode-se considerar uma boa confiabilidade nos resultados numéricos.

Esses resultados permitem ainda uma avaliação adequada da intensidade do tratamento térmico na bebida, devendo-se conhecer o comportamento fluidodinâmico e sua influência na distribuição de temperaturas no interior do vasilhame.

Com o conhecimento detalhado dos fenômenos envolvidos pode-se conhecer os efeitos de cada parte do domínio envolvido, composto pelo vidro do vasilhame e pela cerveja, podendo definir qual das partes possui uma maior influência e o porquê disto. Isto leva a concluir a real influência da massa do vasilhame, por exemplo, no processo de transferência de calor.

Uma compilação geral de pasteurização de cerveja, juntamente com um entendimento com maior profundidade dos fenômenos de transporte característicos do processo, sua quantificação e organização também são almejados para este trabalho.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Até o início da década de 80, uma grande quantidade de trabalhos experimentais e teóricos foi dirigida para estudos de pasteurização de alimentos já embalados (*in-packed*). Porém, a literatura em geral se aplica a alimentos sólidos, sendo problemas puramente condutivos. São relativamente poucos os trabalhos voltados a processo de pasteurização, ou que estudam transferência de calor onde o conteúdo de uma cavidade é líquido, como os de Lewicki (1984 e 1985)

Destes poucos trabalhos, a grande maioria estudou líquidos contidos em latas. Neste caso, o recipiente, além de ser um material com alta condutividade, possui espessuras muito pequenas, fazendo com que sua resistência térmica possa ser desprezada, fazendo uma análise da convecção natural interna direta, simplificando muito o estudo.

Dos poucos trabalhos completos, utilizando vasilhames influentes no processo, que fornecem resultados confiáveis dos valores dos coeficientes de troca térmica global é o de Lewicki et al (1983, 1984 e 1985). O autor efetuou um estudo experimental em três etapas principais.

A primeira (Lewicki, et al, 1983) avaliou quais são os reais fatores que influenciam na transferência de calor em vasilhames submetidos aos banhos de um túnel pasteurizador. O autor demonstrou que os túneis pasteurizadores possuem banhos com vazões muito altas. A transferência de calor entre a água do banho e os vasilhames não é afetada com a diminuição destas vazões, até um ponto limite onde, abaixo deste, a eficiência de troca térmica cai severamente. Assim, fica demonstrado que como há pouco conhecimento dos fenômenos de transferência de calor (pelo domínio destes valores pelos fabricantes das máquinas), os túneis são providos de bombas com altas vazões, o que garantem que os banhos estão acima deste ponto limite.

A segunda parte de seu trabalho (Lewicki, 1984), o autor obteve alguns coeficientes globais de transferência de calor e avaliou-se seu comportamento em relação à razão geométrica de alguns vasilhames e em relação ao tempo de processo. O autor instalou sensores de temperatura em diversos pontos de vasilhames com diferentes razão de aspecto (relação diâmetro/altura), inclusive nas paredes interna e externa dos vasilhames. Os resultados confirmaram diversas observações, tais como as inércias no aquecimento dos vasilhames maiores, sendo que estes possuem um coeficiente global de transferência de calor substancialmente menor do que os menores vasilhames, permitindo que possa se estabelecer correlações entre eles.

Na etapa final do seu estudo (Lewicki, 1985) são realizados estudos estatísticos da distribuição dos valores dos coeficientes globais de transferência de calor em diferentes pontos de diferentes vasilhames, alcançando uma compilação extensa de dados do processo de transferência de calor no interior dos vasilhames de uma forma experimental, já que não foi aplicado nenhum método numérico ou um estudo específico do comportamento fluidodinâmico.

Nos estudos de Lewicki, o próprio autor admite que a instrumentação aplicada pode gerar interferências significativas no processo. Por exemplo, os sensores de temperatura instalados na parede interna dos cascos podem ser maiores do que a camada limite, impedindo a aceitação dos valores como precisos. Porém, estes estudos ajudaram a entender a participação de cada componente do problema. Por exemplo, foi obtido que a resistência da convecção forçada externa é cerca de vinte vezes menor do que a da convecção natural interna na garrafa, para banhos feitos com esguichos com alta pressão.

A partir da segunda metade da década de oitenta, encontram-se uma presença muito maior de trabalhos que tratam da convecção natural em fluidos em cavidades, inclusive alguns com a aplicação da pasteurização com vasilhames de vidro. Esta evolução pode ser atribuída ao início das aplicações dos métodos computacionais.

Um dos primeiros trabalhos que aplica estudos de CFD ao problema da pasteurização é o de Engelman e Sani (1983). Os autores efetuaram um estudo transiente da transferência de calor em um vasilhame de vidro contendo cerveja que é aquecido, a partir de uma temperatura inicial, com uma temperatura externa constante. Foi utilizado um algoritmo próprio, obtendo resultados que representam bem observações experimentais, porém apenas de forma qualitativa. Porém, seu foco é direcionado para o método de solução numérica, deixando a precisão da simulação para com o processo de pasteurização em segundo plano. Isto é sugerido nitidamente pela sua condição de contorno para simular a variação de temperatura da parede interna, onde os autores utilizaram uma condição de regime permanente para a transferência de calor pelo vidro, adaptando a lei de Fourier de $k \partial T / \partial x$ para $k \Delta T / \Delta x$, mesmo o vidro não sendo uma dimensão pequena suficiente para ser considerada infinitesimal.

Um estudo mais atual, e que corrige a situação encontrada em Engelman e Sani, é o trabalho de Patiño et al. (2001), onde também foi simulado o fluido contido em um vasilhame de vidro sujeito a um aquecimento dentro de um túnel pasteurizador. A diferença básica é que neste trabalho os autores tentaram calcular a temperatura interna do vasilhame, estimando um coeficiente de convecção natural interna e obtendo a desejada temperatura pela condição de contorno $k \partial T / \partial x = h(T_{interna} - T_{\infty})$. O processo foi simulado com um código comercial e a estimativa de h é confirmada com a comparação com um resultado experimental, obtido do

trabalho de Navarro e Lacoa (1998). Porém o trabalho de Patiño mostra apenas o comportamento fluidodinâmico e distribuição de temperatura para apenas um caso de aquecimento.

Larsen (2006) efetuou um estudo muito semelhante ao de Patiño (2001), porém aplicou a hipótese de desprezar a influência do vasilhame, já que o foco de seu estudo foi baseado na utilização de latas de alumínio com cerveja no seu interior. Um dos resultados obtidos por Larsen é que, ao se considerar as variações nas propriedades em função da temperatura, vasilhames aquecidos a um mesmo diferencial de temperatura (ΔT) inicial podem possuir velocidades de aquecimento ligeiramente diferentes, dependendo do patamar que este diferencial se aplica, ou seja, uma lata submetida a um $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ com temperatura inicial de 10°C é levemente mais lenta do que uma lata sob o mesmo ΔT , porém com temperatura inicial de 20°C . Porém, a diferença, mesmo comprovada em diferentes casos, pode ser desprezada.

Kannan e Sandaka (2008) efetuaram um estudo da transferência de calor em fluidos submetidos ao processo de pasteurização em latas. Mesmo possuindo a hipótese de desprezar a resistência e a massa do vasilhame (que, de fato, é muito pequena se comparada à massa do fluido) os autores efetuaram uma formulação de uma relação para o número de Nusselt médio do processo, associando-o a diferentes razões de aspecto de envases cilíndricos feitos de alumínio. Os resultados foram comprovados com algumas observações experimentais. O trabalho também identifica a existência de uma região inicial, onde o coeficiente de transferência de calor pela convecção interna é dominante, mas que rapidamente decai e o problema tende a ser difusivo-dominante em tempos maiores (relacionados com número de Fourier). As correlações de Nusselt apresentadas são divididas para a região advectivo-dominante e difusivo-dominante.

Varma e Kannan (2006) realizaram um trabalho para diferentes geometrias de envase. Simulações numéricas foram realizadas para diferentes razões de aspecto em recipientes cilíndricos e cônicos visando otimizar a transferência de calor apenas pela variação de geometria. A hipótese de desprezar a influência do vasilhame também é adotada. O estudo numérico adotou o aquecimento dos vasilhames a uma temperatura externa constante, com análise em diferentes pontos em seu interior. Os resultados demonstraram que vasilhames cônicos possuem uma taxa de aquecimento muito mais rápido do que o cilindro no seu ponto mais frio, podendo auxiliar em uma futura evolução do padrão de vasilhames atualmente utilizado pela indústria. Porém, hoje existe toda uma estrutura envolvida para os atuais vasilhames, tanto de alumínio quanto de vidro, dificultando uma mudança rápida na forma dos mesmos.

Kurian et al. (2009) estudou o efeito do aquecimento de fluido em uma cavidade inclinada (desprezando-se novamente o vasilhame). Muitas vezes ocorre a presença de algum vasilhame que entra em um túnel pasteurizador tombado, ou inclinado (apoiado em outros

vasilhames). Os autores realizaram estudos numéricos para avaliar como se dá o aquecimento nestes vasilhames. Os resultados mostraram que o aquecimento é muito mais rápido nos vasilhames tombados, já que a convecção natural se dá em uma altura muito menor. O mesmo acontece com os vasilhames inclinados, porém surgem regiões de estagnação (recirculações) que fazem com que, mesmo em tempos maiores, seja muito difícil a uniformização da temperatura e, conseqüentemente, dos efeitos da pasteurização. Os resultados também incluem a variação do número de Nusselt com o grau de inclinação desde 0° (vasilhame em pé) até 90° (vasilhame deitado).

Yang e Rao (1998) realizaram um estudo com amido de milho dissolvido em água que deve ser pasteurizada. Porém, no aquecimento, o conteúdo tende a possuir um aumento considerável em sua viscosidade aparente, chegando a atingir um estado gelatinoso. O trabalho estudou o problema numericamente estabelecendo o comportamento reológico do conteúdo no processo de pasteurização. Resultados mostraram uma pequena convecção natural logo interrompida e um problema condutivo se instaura. Um modelo teórico foi proposto pelos autores de forma a simular a pasteurização na proteína de milho dissolvida, já que este produto é um dos mais utilizados na indústria de alimentos.

No Brasil, poucos trabalhos são encontrados na área. O trabalho de Dilay, et al. (2005) efetua um estudo termodinâmico de túneis pasteurizadores. Mesmo não possuindo o foco da transferência de calor nos vasilhames em si, efetuou um balanço de energia dentro do complexo sistema de banhos do túnel, efetuando sugestões para a otimização dos equipamentos.

No campo dos trabalhos analíticos, geralmente se recai em situações padrões da literatura. O trabalho de Sparrow e Prakash (1981) efetuou estudos teóricos de fluidos em cavidades totalmente fechadas com convecção forçada externa e convecção natural interna, em regime permanente. Este é um problema clássico, encontrado na maioria da literatura, como em Bejan (1995) e Burmeister (1993).

Outros estudos na área também podem ser citados. Os processos de aquecimento e resfriamentos na pasteurização foram estudados por Brandon, et al. (1984), analisando-se o campo de temperaturas dentro de uma lata, com grandes gradientes na direção radial e uma posterior uniformização do campo de temperaturas, no decorrer do processo. O trabalho de Horn, et al. (1997) descreveu um modelo para convecção transiente e mostrou a importância na seleção do ponto correto para medição da pasteurização, para diferentes geometrias de vasilhames. Zheng e Amano (1999) utilizaram dois métodos para descrever o processo: o LPM (Lumped Parameter Method), o qual descreve o processo como um todo (inclusive partes da máquina, como tubos e trocadores de calor), além do CFD (Computational Fluid Dynamics), empregando

o método dos volumes finitos para calcular as transferências de calor entre a máquina e os vasilhames.

Kumar e Bhattacharya (1991) simularam a convecção natural dentro do casco durante processos de pasteurização e esterilização, resolvendo as equações de conservação de massa, momentum e energia utilizando-se também do método dos elementos finitos. No seu trabalho, foi mostrado que o ponto de menor temperatura no vasilhame geralmente se encontra em uma região entre 10 e 12% da altura do vasilhame, a partir do seu fundo, o que está de acordo com os padrões de medição da pasteurização pelas cervejarias.

1.3 ESCOPO E ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO

De forma a facilitar a leitura e entendimento do trabalho, é apresentado um breve comentário da estrutura do trabalho.

No capítulo 1 é apresentada a motivação da realização deste trabalho bem como uma revisão bibliográfica englobando uma série de trabalhos publicados sobre a pasteurização de produtos alimentícios já envasados, tanto no âmbito computacional como experimental.

O capítulo 2 descreve os fundamentos do processo de pasteurização, desde seu significado físico-químico, até o modelo matemático para sua quantificação. Também é apresentado um histórico das máquinas pasteurizadoras de bebidas utilizadas na história da indústria cervejeira, bem como as características das máquinas atuais mais avançadas.

O capítulo 3 é onde está apresentado o problema a ser estudado. Neste capítulo o problema é posto e discutido, levantando-se os principais fatores que o influenciam. Hipóteses preliminares são apresentadas e discutidas de forma a obter o modelo simplificado do aquecimento dos vasilhames. A partir deste modelo é introduzido o *fator de correlação f* o qual permitirá obter o coeficiente de transferência global de calor do processo.

O capítulo 4 mostra a metodologia que será utilizada de forma a se obter o fator de correlação para um determinado vasilhame. O fator será basicamente obtido através de experimentos laboratoriais com auxílio de uma bancada que reproduz as condições existentes em pasteurizadores reais.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos nos testes experimentais. Estes resultados são analisados visando a obtenção de um padrão dos fatores de correlação, em função do vasilhame utilizado. Estes fatores alimentam o modelo teórico, proposto no Capítulo 3, e os resultados calculados por este modelo são comparados com os resultados experimentais, visando o

fechamento deste equacionamento, o qual deverá permitir calcular a temperatura e nível de pasteurização de um vasilhame em qualquer ponto do processo.

O capítulo 6 apresenta um estudo numérico para o aquecimento de um vasilhame, com o objetivo de estudar a distribuição de temperaturas no seu interior, bem como analisar o comportamento fluidodinâmico e intensidade das correntes de convecção natural que se formam em seu interior. Estas simulações são realizadas através da utilização de um código comercial. Algumas hipóteses especiais são introduzidas no modelo numérico. Assim, para garantir que os dados obtidos nestas simulações possam ser considerados válidos, alguns dos resultados numéricos são comparados com resultados experimentais.

O capítulo 7 consolida as informações obtidas para a formulação do modelo simplificado e mostra o mesmo em funcionamento em uma máquina real, como comprovação prática, tanto qualitativa como quantitativa, dos resultados obtidos. São apresentadas as características adotadas na máquina de forma a garantir um controle de pasteurização adequado, bem como os principais sistemas de controle e instrumentação que auxiliam o modelo a calcular o processo com a precisão necessária.

Resultados do modelo simplificado e os valores dos coeficientes de correlação obtidos são comparados com as curvas de pasteurização obtidas na máquina real para a comprovação efetiva dos resultados.

O capítulo 8 apresenta os comentários finais sobre o estudo realizado, de forma a analisar se os objetivos foram atingidos, bem como apresentar sugestões para a otimização do processo, visando à melhoria contínua das máquinas com controle de processo (focando a redução dos custos de produção e operação), além de propor estudos futuros para complementar os resultados aqui obtido, utilizando-se do modelo teórico proposto.

2. PASTEURIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os fundamentos do processo de pasteurização, desde seu significado físico-químico, até o modelo matemático para sua quantificação. Este estudo tem por objetivo apresentar a real influência da temperatura no controle microbiológico. Esta associação é parte primordial deste trabalho, visto que todo o estudo de engenharia aplicado baseia-se nesta relação.

Também é apresentado um histórico das máquinas pasteurizadoras de bebidas utilizadas na história da indústria cervejeira, bem como as características das máquinas atuais mais avançadas.

2.1 SOBRE A PASTEURIZAÇÃO

Pasteurização é a técnica baseada em usar temperaturas elevadas com a finalidade de pelo menos desativar alguns microrganismos, ou mesmo eliminá-los e, com isso, controlar o nível de atividade bacteriológico nos produtos, sem alterar profundamente suas propriedades (Sevilla 2004).

A pasteurização consiste na aplicação de temperaturas e tempos relativamente baixos, conseguindo um prolongamento moderado da vida útil do produto em troca mantendo uma boa conservação do seu valor nutritivo e das qualidades organolépticas do mesmo. É um tratamento térmico suave, em contraposição com a esterilização, que é um tratamento muito mais intenso. Esta última tem por finalidade a eliminação completa dos microrganismos presentes nos produtos, causando, como efeito colateral, uma profunda alteração em suas propriedades.

A pasteurização deve promover a eliminação dos microrganismos patogênicos, porém apenas diminui os microrganismos alterantes, fazendo com que o processo confira ao produto um efeito limitado. O processo possui diferentes objetivos dependendo do alimento que sofre o processo (Gava 1998):

- em alimentos ácidos, como sucos de fruta, produz uma boa estabilização já que o meio ácido impede a proliferação de microrganismos esporulados (os mais resistentes à ação térmica), respeitando as propriedades do alimento;

- em alimentos pouco ácidos, sendo o exemplo mais importante o leite, a pasteurização consegue a destruição da flora patógena e uma redução da alterante, conseguindo um produto de curta duração que deve ser conservado refrigerado, mas que possui características muito próximas do leite cru.

A pasteurização é utilizada em grande parte dos produtos industrializados. Deve-se a Louis Pasteur, cientista francês (1822-1895) que sistematizou, em sua época, boa parte das técnicas sobre fermentação e controle de microrganismos (Ziemann-Liess Ltda 1985).

Nesta época, a indústria vinícola francesa se encontrava em crise devido a contaminações desconhecidas de seus produtos, causadas por lêvedos e bactérias estranhas ao processo fermentativo normal dos mostos de vinho. As primeiras aplicações práticas das teorias de Pasteur resolveram o problema. Seus resultados foram confirmados com o teste realizado no carregamento de vinho do veleiro *La Sibylle*. A embarcação percorreu todo o globo e, no final da viagem, notou-se que o produto não tinha se deteriorado.

Em 1870, Pasteur aplicou seu método pela primeira vez na cerveja, também com excelentes resultados. Pouco tempo depois, as cervejarias européias passaram a adotar a pasteurização como um processo padrão em sua linha de produção. A pioneira neste quesito foi a cervejaria Tuborg, de Copenhague. Ainda na década de 1880, houve a adoção deste processo pela primeira vez pelas cervejarias na América (Ziemann-Liess Ltda 1985).

Inicialmente os equipamentos eram rudimentares, usando cubas que, preenchidas com garrafas e água, permitiam a entrada de vapor por baixo. As próprias garrafas seguravam suas rolhas com arames. Este processo também se estendeu a outros ramos da indústria alimentícia, cada um aplicando-o da melhor forma para cada microrganismo presente em cada produto.

Nas últimas décadas, a evolução ocorreu de forma mais intensa, graças ao crescimento da bioquímica e pelo surgimento de instrumentos de pesquisa cada vez mais sofisticados, como o microscópio eletrônico. As células começaram a ser profundamente analisadas. Assim, o efeito da pasteurização sobre estes elementos passou a ser mais bem explicado e compreendido.

O metabolismo da célula, isto é, a série de reações químicas no interior da célula por meio das quais ela se alimenta e com isso ela pode sobreviver e se reproduzir, é feito por reações enzimáticas através dos chamados catalisadores biológicos (constituídos de proteínas). Estas proteínas, por sua vez, revelaram a presença de ácidos complexos, como RNA e DNA, chamados de portadores de vida, sempre constituintes de estruturas celulares mais complexas chamadas nucleoproteínas (Ziemann-Liess Ltda, 1985 e Varnam e Sutherland, 1994).

Em cada uma delas residem séries de diferentes reações, possuindo inclusive os caracteres hereditários das células, nos genes e cromossomas. Assim, o primeiro passo da pasteurização é atuar sobre a estabilização destas proteínas, principalmente as secundárias, terciárias e quaternárias: é o que se convencionou chamar de desnaturação protéica. Ao se atingir a temperatura adequada do processo da pasteurização, estes componentes sofrem em primeiro lugar.

Outra atividade celular fundamental atingida pelo processo é a respiração celular. A respiração é realizada através de processos fermentativos (reações oxidativas) que permitem a absorção de energia necessária à manutenção da célula. Estas reações ocorrem no nível das mitocôndrias, componentes celulares sensíveis a temperatura, pH, etc. (Ziemann-Liess Ltda, 1985 e Varnam e Sutherland, 1994). Esse processo oxidativo é uma atividade vegetativa da célula, que, por se sensível à temperatura, pode ser afetada também pela pasteurização.

Também é bastante conhecida a atuação das células sobre os açúcares, carboidratos, gorduras e aminoácidos, dando como resultado ácido láctico e pirúvico, dependendo apenas da maior ou menor quantidade de oxigênio presente no processo. Os carboidratos também são destruídos pela aplicação da temperatura, diminuindo a quantidade de alimento para a célula.

Em resumo, a pasteurização atua primeiro sobre os componentes mais importantes da vida celular através da desnaturação protéica (inativação dos microorganismos, impedindo sua reprodução) e sobre a respiração celular (morte dos microorganismos).

2.2 PRINCIPAIS FATORES INFLUENTES

Se, por um lado, as temperaturas mais baixas – limitadas apenas por seu aspecto bacteriológico – dentro de um determinado tempo realizam uma boa pasteurização, pode então parecer que temperaturas mais altas sejam a melhor solução para o mesmo efeito bacteriológico. Dentro deste raciocínio, subindo cada vez mais a temperatura se obteria a mesma pasteurização, em um tempo menor. Este pensamento é verdadeiro até certo ponto.

Focando sobre a cerveja, em altas temperaturas começam a ocorrer outros fenômenos, principalmente aceleradores de reações químicas e de processos físico-químicos, que podem inutilizar o produto final. A pasteurização permaneceria também ineficaz sobre os microorganismos ditos termo-resistentes que suportam altas temperaturas, próximas da esterilização completa.

Visto que não é objetivo da pasteurização a eliminação completa dos microorganismos, convém analisar os fatores para uma boa pasteurização prejudicando o menos possível o produto a ser pasteurizado (Gava 1998):

- ***Qualidade e quantidade dos microorganismos a destruir:*** com diferenças não só entre as espécies, bem como entre as formas vegetativas e de resistência (esporos). Deve-se saber qual é a resistência térmica de cada grupo;
- ***pH do produto:*** a acidez de um produto determina o processamento requerido. Em alimentos com maior acidez, a pasteurização pode ser mais suave, já que seu baixo pH já elimina os esporos, não havendo a produção de toxinas;
- ***Velocidade de penetração do calor da periferia até o centro do vasilhame:*** influenciada pela forma, tamanho, condutividade térmica do vasilhame e do produto. Irá determinar o tempo que o vasilhame irá chegar até a temperatura desejada;
- ***Temperatura e tempo de pasteurização:*** quanto mais alta a temperatura ou mais longo o tempo de pasteurização, mais eficiente é a destruição dos microorganismos. Porém, em excesso, também mais eficiente é a alteração do produto;
- ***Temperatura inicial do produto:*** influi apenas no tempo que levará até o produto atingir a temperatura de pasteurização.

Estes itens devem ser estabelecidos para cada tipo de cerveja, tanto quantitativo quanto qualitativamente, através de uma análise bacteriológica laboratorial. Com o conhecimento de cada microrganismo, foi possível determinar a temperatura que se chamou de letal porque é a partir deste patamar que os microrganismos são “desativados” em seu crescimento e multiplicação. Buscou-se, então, para cada microrganismo, sua temperatura letal.

2.3 PRINCIPAIS MICROORGANISMOS A SEREM ATACADOS PELA PASTEURIZAÇÃO

Como neste trabalho se está estudando o fenômeno sobre a cerveja são apresentados os principais microorganismos a serem atacados pela pasteurização. Conhecendo estes microorganismos, determina-se a temperatura padrão de pasteurização do produto. A relação de

microorganismos a serem atingidos é avaliada partindo-se de cerveja com pH 4.4 e teor alcoólico de 3.2%, com mosto original de 10°P (significa que 10% da massa da cerveja é matéria-prima), tomando-se uma amostra de 10ml em um frasco de 15ml (esterilizado previamente) tudo submerso em banho-maria de 10 a 15 minutos (Clerk 1958):

A) Lêvedos destruídos a 50°C

- *Saccharomyces cerevisiae* – lêvedo puro de alta fermentação. As células novas são redondas, ovais ou ovalóides, tamanho de 3-7 x 4-14 micra. A temperatura limite para a formação da célula é de 30 a 40°C. A temperatura ótima para sua esporulação é de 30°C.
- *Saccharomyces carlsbergensis* – lêvedo puro de baixa fermentação. As células novas são ovais ou ovalóides, de 3-5 x 7-10 micra.
- *Saccharomyces pastorianus* – lêvedo silvestre. As células novas são ovais ou dilatadas 3-7 x 4-15 micra. As temperaturas limite para a formação de células são de 0.5 a 34°C. As temperaturas para a formação de esporos estão nas zonas de 0.5 a 4°C e 26.5 a 31.5°C. Esse lêvedo silvestre é perigoso, transmitindo um gosto desagradável e amargo a dá um mau cheiro à cerveja. Pode causar também turvação.
- *Hansenula anomala* – esse lêvedo silvestre forma em pouco tempo uma delgada película cinza-opaca franzida. As células, tamanho 3-5 x 7-15 micra, tem forma de salsicha. O microorganismo pode ser encontrado em fábricas de cerveja de baixa fermentação, em quantidade reduzidas e inofensivas. A temperatura ótima para a formação dos esporos, em forma de cartucho, é de 30°C.
- *Mycoderma cerevisiae* – lêvedo silvestre. As células são ovais ou cilíndricas, tamanho de 3-5 x 6.8 – 9.5 micra, apresentadas aos pares ou em correntes curtas. Esse lêvedo forma uma fina película opaca lisa, que aparece nas adegas em tanques mal fechados. O organismo atua sobre o álcool, porém não foram confirmadas influências organolépticas na cerveja, na cor ou no brilho.
- *Candida utilis* – lêvedo silvestre produz grossas películas mucosas, inofensivas nas cervejas de baixa fermentação.

B) Lêvedos destruídos de 54-56°C

- *Saccharomyces ellipsoideus* – lêvedo de vinho, sendo silvestre para o cervejeiro. Células elipsoidais, tamanho 3-6 x 6-11 micra. O lêvedo forma uma película e um anel sobre o mosto. Na temperatura de 25°C existe uma reduzida esporulação em aproximadamente 40 horas. Existem espécies que produzem até 17% de álcool.
- *Saccharomyces turbidans* – lêvedo silvestre. As células novas são ligeiramente ovais ou elipsoidais. A temperatura ótima de esporulação é de 29°C. O lêvedo pode causar infecções perigosas nas cervejas de baixa fermentação, ocasiona turvação e mau sabor.

C) Bactérias destruídas a 50°C

- *Pediococcus perniciosus* e *pediococcus sarcina* – ambos tipos são gram-positivos e aparecem em forma de diplococcus e tetracoccus (sarcina) na cerveja, causando um sabor desagradável. As duas variáveis anaeróbias se desenvolvem facilmente no mosto e na cerveja.

D) Bactérias destruídas a 54°C

- *Acetobacter viscosum* – bactéria causadora de viscosidade. Aparece mais nas cervejarias de baixa fermentação.
- *Lactobacillus pastorianus* – bastonetes de ácido láctico. São estreitos e Gram positivos. O comprimento varia de 1-21 micra o bacilo aparece como unidade, aos pares ou em correntes. O lactobacilo anaerobiano atua somente nas cervejas de alta fermentação, transferindo um gosto repugnante ao “ale”.

E) Bactérias destruídas a 60°C

- *Lactobacillus lindneri* – com as mesmas características do *lactobacillus pastorianus*. Aparece unicamente em cervejarias de baixa fermentação, onde ocasiona turvação e mau sabor na cerveja.

Em resumo, Clerk (1958) confirma que a 60°C e durante 20 minutos de contato, criam-se condições letais para os lêvedos e bactérias, de uma forma geral. Por estas experiências, conclui-se que não se acrescenta mais nada em termos de estabilidade biológica para o produto trabalhar com o pasteurizador em temperaturas mais altas que a indicada.

2.4 CONSEQÜÊNCIAS DE UMA MÁ PASTEURIZAÇÃO

Quando um processo de pasteurização não atingiu os requisitos mínimos para que seja garantida a destruição dos microorganismos, diz-se que o produto sofreu uma subpasteurização. Porém, quando o produto permaneceu tempo demais na temperatura de pasteurização, ou a temperatura aplicada foi alta demais, se reconhece que o produto sofreu uma superpasteurização.

Durante o processo de pasteurização, a cerveja sempre sofre pequenas variações de sabor, aroma e cor. A cerveja também está mais sujeita à alterações em sua estabilidade coloidal (Clerk 1958), isto porque é intrínseco à bebida a presença de inúmeras proteínas na sua composição, que possuem uma tendência natural à aglutinação. Por este motivo, são dosadas na cerveja soluções estabilizantes. Porém, superpasteurizações fazem com que o oxigênio que existe na cerveja promova ou acelere reações químicas que quebrem esta estabilidade, além da ocorrência de uma variação mais forte no sabor.

Cervejas mais aeradas também podem ter forte alteração de cor, também pelas reações com o oxigênio. Alterações de cor pronunciadas podem levar à desconfiança do consumidor, já que o produto não possui uma aparência normal (Clerk 1958).

Outro fator a ser levado em conta é a pressão causada no interior do vasilhame devido à presença de gás carbônico. Os vasilhames são preenchidos sempre deixando um headspace (espaço livre) de 5 a 6% de seu volume. Em temperaturas muito altas ou se o vasilhame foi preenchido com um volume maior, pode ocorrer a quebra do vasilhame no interior da máquina.

Quanto mais fria é a temperatura inicial do produto, maior é a rampa de aquecimento até a temperatura de pasteurização. Visando diminuir o tempo de aquecimento, pode-se pensar em utilizar temperaturas mais altas do meio aquecedor (geralmente água), o que pode provocar choque térmico no vasilhame e sua conseqüente quebra. O choque térmico deve ocorrer com um valor que leve em conta o tipo do material e tamanho do vasilhame.

2.5 CINÉTICA DA MORTE TÉRMICA DE MICROORGANISMOS

As resistências dos microorganismos causadores da deterioração da bebida juntamente com a velocidade da transferência do calor no interior do vasilhame constituem os principais fatores que determinam a duração de um processo térmico (Gava 1998).

Conforme descrito na seção 2.4, a destruição dos microorganismos pelo calor é devida à coagulação de suas proteínas e, especialmente, à inativação dos sistemas enzimáticos necessários ao metabolismo. Existe uma série de fatores que influenciam na termo-resistência dos principais microorganismos, como levedura, mofos e formas vegetativas de algumas bactérias, dos quais podem-se citar:

- **Do organismo:** influenciam fatores como tipo dos organismos a ser atacado, número de células ou esporos, condições de crescimento e idade;
- **Do ambiente:** em geral, se pode dizer que para a pasteurização convém trabalhar a altas temperaturas e pH baixos. Com pH abaixo de 4.5 as bactérias não crescem, o que permite que os tratamentos térmicos possam ser mais suaves. O pH neutro é o que mais favorece a resistência térmica da maioria das bactérias. A combinação tempo-temperatura de pasteurização mantém uma estreita relação com o pH da bebida a ser processada (Tabela 2.1);

Tabela 2.1. Faixas de pH relativas às taxas de reprodução dos microorganismos (Gava 1998).

Intervalos de pH para o crescimento de distintos microrganismos		
	Intervalos de pH	
Microrganismo	Crescimento	Crescimento ótimo
Bactérias	4.5 – 8.5	4.5 – 7.5
Fungos	3.0 – 8.5	5.0 – 7.0
Leveduras	2.5 – 8.5	4.0 – 5.0

- **Composição da Bebida:** a composição da bebida também influencia na resistência dos organismos. Presença de sal, açúcar e gorduras parecem dar uma melhor proteção térmica;

- **Natureza do Calor:** o calor dito úmido é um agente bactericida mais potente que o calor seco. É de conhecimento que a transferência de calor por um meio com certo grau de umidade age na coagulação das proteínas dos organismos, tendo se mostrado mais eficaz que a transferência por um meio seco, onde a morte por calor se dá por um processo oxidativo das células. Como em líquidos envasados, como a cerveja, o calor é transmitido pelo próprio líquido em processo, obtém-se a ocorrência de morte térmica por aplicação de calor úmido.

2.5.1 Curva de Sobrevivência Térmica

É comprovado que a cinética da morte térmica pode ser ajustada para uma equação diferencial de primeira ordem (Sevilla, 2004 e Buzrul, 2006):

$$-\frac{dN}{dt} = K_D N \quad (2.1)$$

onde N é o número de microorganismos vivos, t é o tempo de processo e K_D é a constante da morte térmica de um dado organismo (ou conjunto de organismos) à uma dada temperatura. A Figura 2.1 mostra uma expressão gráfica da equação (1):

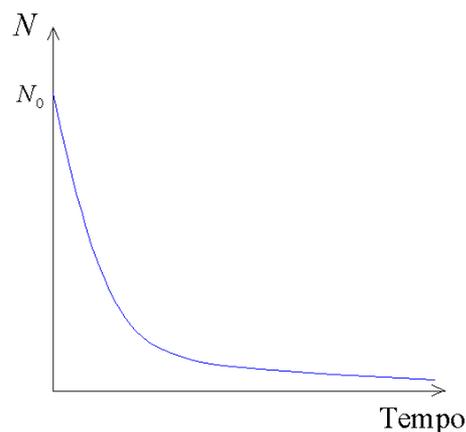


Figura 2.1. Morte térmica dos microorganismos a uma dada temperatura.

Rearranjando os termos da equação (2.1):

$$\frac{dN}{N} = -K_D dt \quad (2.2)$$

Integrando a equação (2.2) ao longo do tempo:

$$\int_{N=N_0}^{N=N} \frac{dN}{N} = -\int_{t=0}^{t=t} K_D dt \quad (2.3)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -K_D t \quad (2.4)$$

onde N_0 é o número inicial de microorganismos presentes na bebida. K_D é invariante com o tempo. Reescrevendo a equação (2.4) em função de N , obtém-se:

$$N = N_0 e^{-K_D t} \quad (2.5)$$

A literatura mostra que a morte térmica dos organismos possui comportamento similar a um decaimento exponencial, assim a equação se ajusta bem ao processo (Sevilla 2004, Gava 1998 e Buzrul 2006).

Com a concepção logarítmica dada pela equação (2.4), se pode traçar a curva de sobrevivência térmica (*Survivor Curve* ou *Thermal Destruction Curve*). É a representação gráfica que coloca na ordenada, em escala logarítmica decimal, o número de células vivas N , e na abscissa o tempo decorrido de processo:

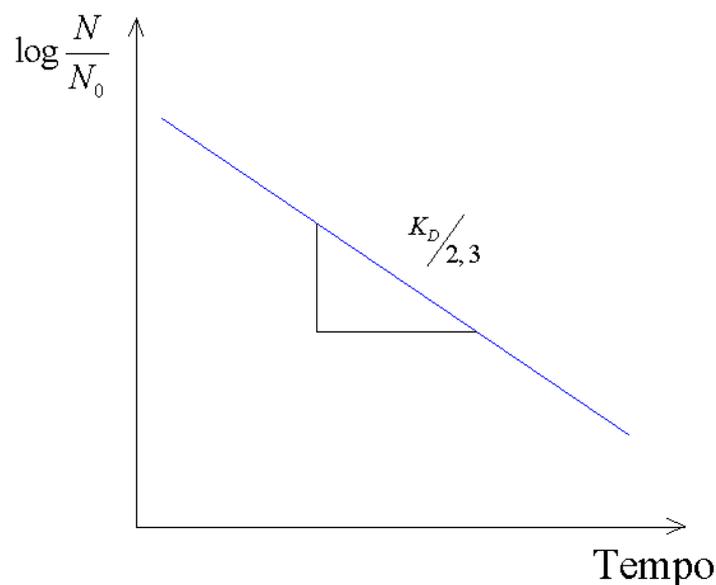


Figura 2.2. Curva de Sobrevivência Térmica (Sevilla 2004).

A inclinação da curva é igual a $K_D/2,3$. Este valor é chamado de tempo de redução decimal D , que representa o tempo necessário para que a população de microorganismos se reduza a 10% da população inicial. Esta declividade é encontrada na mudança de logaritmo natural para logaritmo decimal na equação (2.4):

$$\log_{10} \frac{N}{N_0} = \frac{\log_e \frac{N}{N_0}}{\log_e 10} = \frac{-K_D t}{2,3} \quad (2.6)$$

$$2,3 \log_{10} \frac{N}{N_0} = -K_D t \quad (2.7)$$

Fazendo $t = D$ e $N/N_0 = 0,1$, conforme definição do tempo de redução decimal:

$$\log_{10} 0,1 = \frac{-K_D}{2,3} D \rightarrow D = \frac{K_D}{2,3} \quad (2.8)$$

onde D é a inclinação da reta na curva de destruição térmica da Figura 2.2.

2.5.2 Relação entre Constante de Morte Térmica e Temperatura

É importante ressaltar que a constante de morte térmica K_D depende dos fatores citados anteriormente, como pH, tipo de organismo, composição da bebida, entre outros.

Porém, para um mesmo produto e conjunto de microorganismos, o fator K_D possui forte dependência com a temperatura. Assim, quando se varia a temperatura de processo, também varia a curva de sobrevivência térmica, visto que em temperaturas maiores a velocidade de destruição tende a ser maior. Este fenômeno é mostrado na Figura 2.3.

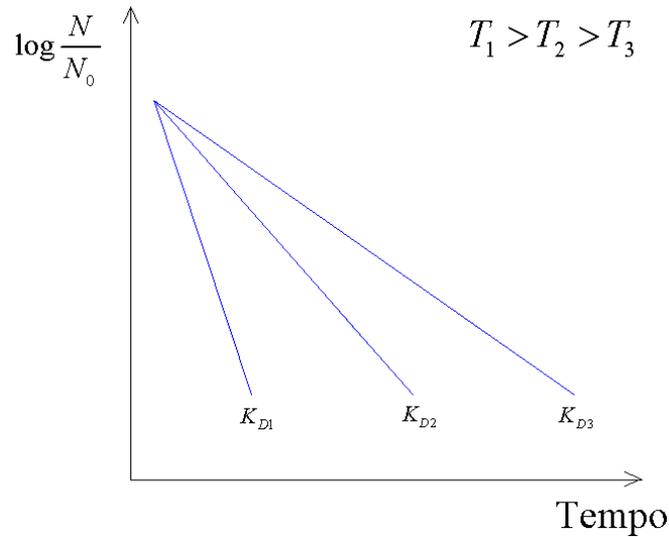


Figura 2.3. Dependência da curva de sobrevivência térmica com a temperatura.

Pela definição de pasteurização, se deduz que quanto maior a temperatura, maior a intensidade do processo. Assim, a inclinação da curva aumenta com o aumento da temperatura. A relação matemática entre K_D e a temperatura é dada pela equação de Arrhenius (Clark 2002):

$$K_D = K_\infty e^{\frac{-Ea}{RT}} \quad (2.9)$$

A equação de Arrhenius relaciona a dependência da velocidade de reações químicas com a temperatura. Da equação (2.9), K_∞ é um fator pré-exponencial e inclui fatores como frequência de colisões das moléculas, entre outros. Seu valor é medido em laboratório e possui a unidade de s^{-1} . Ea é a energia de ativação da reação e R é a constante universal dos gases. Aplicando o logaritmo natural na equação (2.9):

$$\ln K_D = \ln K_\infty - \ln \frac{Ea}{RT} \quad (2.10)$$

Como a inclinação da curva de sobrevivência térmica é $D = 2,3/K_D$, pode-se escrever a equação 2.10 como (Sevilla 2004):

$$\ln \left(\frac{2,3}{D} \right) = \ln \left(\frac{2,3}{D_\infty} \right) - \ln \frac{Ea}{RT} \quad (2.11)$$

$$\ln\left(\frac{2,3}{D}\right) - \ln\left(\frac{2,3}{D_\infty}\right) = -\ln\frac{Ea}{RT} \quad (2.12)$$

$$\ln\frac{2,3/D}{2,3/D_\infty} = -\ln\frac{Ea}{RT} \quad (2.13)$$

Aplicando o exponencial na equação acima:

$$\frac{2,3/D}{2,3/D_\infty} = e^{\frac{-Ea}{RT}} \therefore \frac{D_\infty}{D} = e^{\frac{-Ea}{RT}} \quad (2.14)$$

$$D = D_\infty e^{\frac{Ea}{RT}} \quad (2.15)$$

A equação (2.15) possui a mesma forma da equação de Arrhenius e também é uma relação de velocidade de reação química com a temperatura, porém escrita em função do tempo de redução decimal. O fator D_∞ é o mesmo fator pré-exponencial, porém aqui escrito e forma a demonstrar que a equação está baseada no tempo D .

2.5.3 Curva de Resistência Térmica

A Curva de Resistência Térmica (*Thermal Resistance Curve* ou *Phantom Death Time Curve*) reflete a resistência relativa dos microorganismos a diferentes temperaturas.

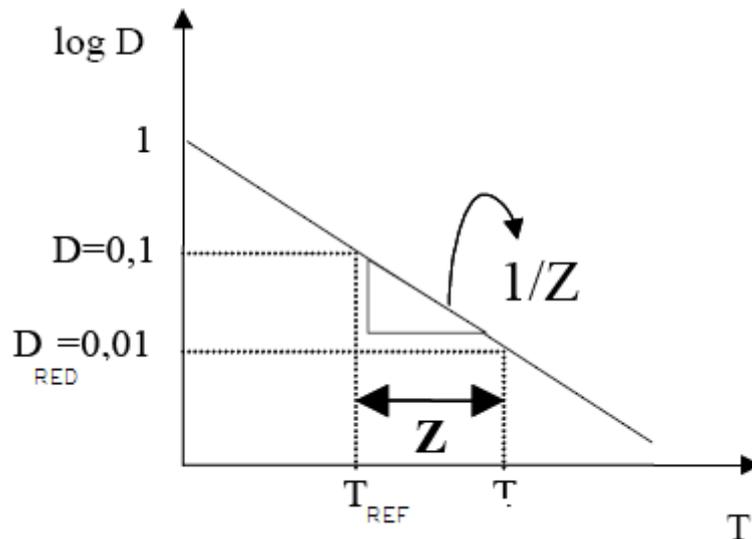


Figura 2.4. Curva de Resistência Térmica.

No eixo das ordenadas está a escala logarítmica do tempo de redução decimal D , enquanto nas ordenadas está a temperatura. O fator z representa o número de graus Celsius que a temperatura deve aumentar (em relação à temperatura de referência inicial - T_{REF}) para que o tempo D se reduza à décima parte do valor inicial (D_{RED}). Do gráfico acima, se estabelece que:

$$\frac{\log D - \log D_{RED}}{T - T_{REF}} = -\frac{1}{z} \quad (2.16)$$

Onde $-1/z$ é a inclinação da curva. Isolando D na equação 2.16, obtém-se:

$$\log\left(\frac{D}{D_{RED}}\right) = \frac{T - T_{REF}}{z} \quad (2.17)$$

$$D = D_{RED} \times 10^{\frac{T - T_{REF}}{z}} \quad (2.18)$$

A equação (2.18) e a equação (2.15) fornecem o comportamento completo do tempo de redução decimal D e permite relacionar a influência das propriedades químicas envolvidas com a variação da temperatura de processo.

Porém, estes estudos se concentram no campo da microbiologia. Neste trabalho, o importante é a obtenção de um fator que traduza de forma direta a intensidade da pasteurização em relação à temperatura da bebida em questão. Para alcançar uma forma mais compacta, reescreve-se a equação (2.18) da seguinte forma:

$$\frac{D}{D_{RED}} = 10^{\frac{T - T_{REF}}{z}} = L \quad (2.19)$$

onde L é o índice de letalidade do processo térmico, ou seja, ao aumentar ou diminuir a temperatura T (em relação à temperatura de referência), o quanto irá variar a velocidade da reação química, representada na equação pela variação do tempo de redução decimal.

O índice de letalidade é bastante utilizado em alimentos de forma geral, porém em bebidas, como a cerveja, costuma-se utilizar a expressão **Unidades de Pasteurização** (UP), que pode ser escrita como:

$$\frac{dUP}{dt} = L = 10^{\frac{T-T_{REF}}{z}} \quad (2.20)$$

Integrando a equação 2.20 em relação ao tempo, para uma temperatura constante:

$$\int dUP = \int 10^{\frac{T-T_{REF}}{z}} dt \quad (2.21)$$

$$UP = 10^{\frac{T-T_{REF}}{z}} t \quad (2.22)$$

Assim, a Unidade de Pasteurização (UP) quantifica a ação do processo de pasteurização como função da temperatura que está ocorrendo o processo e durante quanto tempo ele está ocorrendo. O ganho de UP pode ser alcançada através da aplicação de maiores temperaturas (maior intensidade do processo) ou tempo de processamento maiores (maior tempo da ação destrutiva).

As Unidades de Pasteurização representam o processo de pasteurização variando de forma exponencial com a temperatura (pela equação cinética de primeira ordem apresentada e pela equação de Arrhenius) e, como a concepção da UP é logarítmica, sua variação é linear com o tempo, conforme a curva de sobrevivência térmica.

Conforme Clerk (1958), para a cerveja o valor de z é de 6,94 e a temperatura de referência T_{REF} é de 60°C (já que o microorganismo mais resistente é atacado a 60°C). Assim a equação (2.22) fica:

$$UP = 10^{\frac{T-60}{6,94}} t \quad (2.23)$$

$$UP = 1,393^{T-60} t \quad (2.24)$$

As unidades de pasteurização devem sempre ser medidas no ponto mais frio do líquido no interior do vasilhame, pois, se neste ponto a quantidade de UP é satisfeita, no restante do líquido também estará. Na maioria dos documentos sobre pasteurização, o ponto mais frio é chamado de *Cold Spot*. Assim, pode-se obter uma escrita final para a equação (2.24) da seguinte forma:

$$UP = 1,393^{T_{CS}-60} t \quad (2.25)$$

onde T_{CS} é a temperatura no ponto frio. A equação 2.25 trabalha com a temperatura T em graus Celsius e o tempo t em minutos. Seu comportamento é mostrado no gráfico abaixo (com os valores para cerveja):

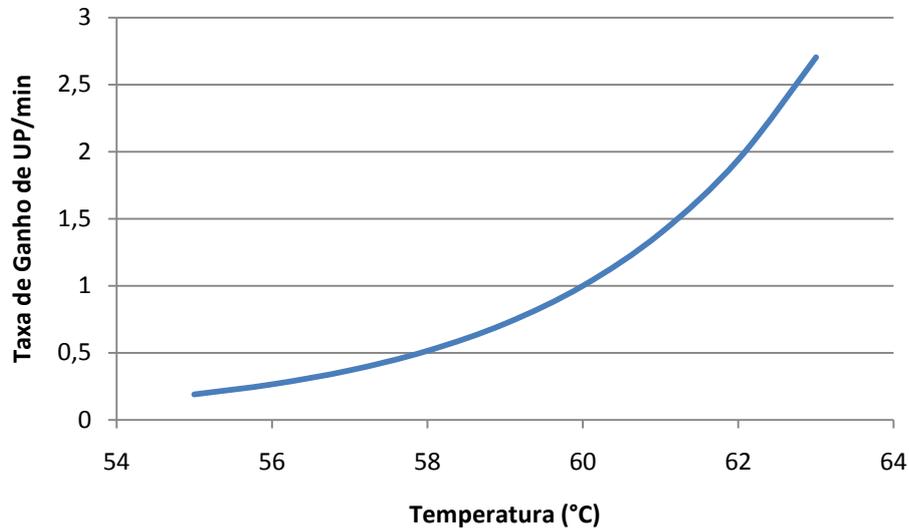


Figura 2.5. Comportamento da taxa de ganho das Unidades de Pasteurização (UP/min).

2.6 HISTÓRICO SOBRE MÁQUINAS DE PASTEURIZAÇÃO

Desde o início do século XX, já existiam formas de aquecer conjuntos de vasilhames de bebidas e mantê-los durante certo tempo na temperatura de pasteurização (Clerk 1958).

Devido às limitações impostas pelo vidro quanto à sua resistência ao choque térmico, os vasilhames sempre devem passar por aquecimentos graduais até a temperatura de pasteurização e, depois do tempo de processo decorrido, devem ser resfriadas lentamente de forma a que no final as garrafas estejam com níveis de temperatura que permitam seu manuseio pelos operadores das máquinas.

Como no início do século passado os níveis de produção industrial eram muito baixos em comparação aos níveis atuais e grande parte das cervejas não eram pasteurizadas (já que grande parte do consumo era local, não havendo necessidades de durabilidade em longos traslados ou em estoques), as cervejarias utilizavam tanques de água aquecidos por vapor.

Este método se baseava na imersão dos vasilhames em tanques dotados de serpentinas de vapor, que aqueciam a água deste tanque de forma lenta até a temperatura de 60°C e assim mantidos por um período de aproximadamente 20 minutos. O resfriamento da água do tanque ocorria com a circulação de algum fluido refrigerante através da serpentina.

Durante as primeiras cinco décadas do século passado, as máquinas chamadas de “pasteurizadores de cestos” eram as mais utilizadas e operavam com o conceito acima descrito. Eram assim chamadas pois transportavam os vasilhames em cestos metálicos, similares às atuais caixas de cerveja.

Havia, basicamente, dois tipos de pasteurizadores de cestos: o tipo Gasquet e o tipo Americano (Clerk 1958).

A) Tipo Gasquet

A máquina Tipo Gasquet consiste em compartimentos separados por chapas defletoras, por onde a água circula graças a uma bomba, instalada na frente da máquina. Normalmente são dez compartimentos, onde entre cada um há injeção de vapor em serpentinas de forma a aquecer a água quando esta passa para um novo compartimento. A Figura 2.6 ilustra esta situação.

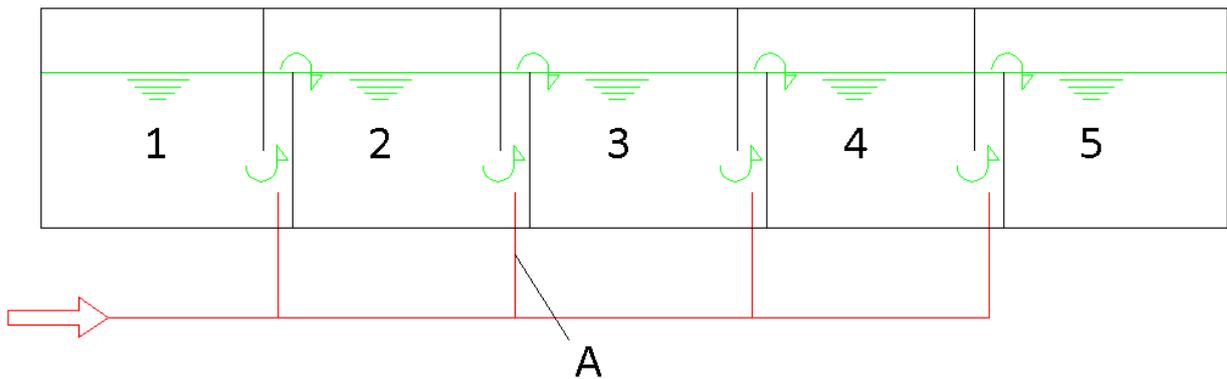


Figura 2.6. Vista lateral esquemática de um Pasteurizador de Cestos tipo Gasquet. As injeções de vapor nas serpentinas estão ilustradas pela tubulação “A”.

O funcionamento do processo da máquina é bastante simples. Um primeiro lote de garrafas é imerso no compartimento 1. A bomba de recirculação faz com que a água do compartimento 1 passe para o 2 e, nesta passagem, tenha um ganho de temperatura pela serpentina de vapor. As garrafas imersas no tanque 1 passam para o tanque 2, e um novo lote abastece o tanque 1.

O processo acontece sucessivamente até o compartimentos 5 e 6, que possuem a temperatura de pasteurização e o tempo de imersão nestes tanques equivalem ao tempo de pasteurização.

O processo segue da mesma forma do tanque 7 até o 10 (Figura 2.7), porém nestes a água dos compartimentos passa por serpentinas de água fria (ou fluido refrigerante) que irá permitir

um resfriamento gradual dos cestos de vasilhames. Os cestos são colocados em transportadores metálicos e seu carregamento e descarregamento são manuais.

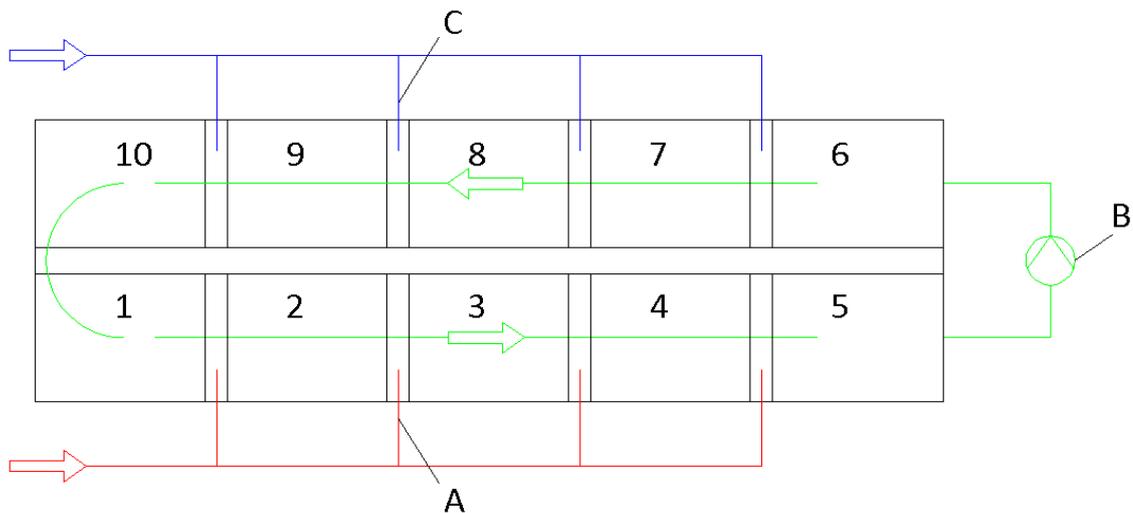


Figura 2.7. Vista superior esquemática de um Pasteurizador tipo Gasquet. (A) injeções de vapor nas serpentinas; (B) injeções de água fria (ou fluido refrigerante); (C) bomba de recirculação.

B) Tipo Americano

Também conhecido como Pasteurizador Tipo Cesto Líquido, possui um sistema mais simples, utilizado com maior frequência por pequenas indústrias. Os cestos são simplesmente suspensos em uma corrente sem fim, a qual carrega os cestos por diferentes compartimentos.

A máquina possui apenas três compartimentos, sendo que apenas o compartimento central é aquecido até a temperatura de pasteurização. Para obter um aquecimento e resfriamento gradual, água fria é adicionada no compartimento de resfriamento (saída) na mesma proporção do volume das garrafas nos cestos que saem da máquina. Este tanque está comunicado com o compartimento de aquecimento (entrada), mantendo uma temperatura intermediária em ambos os tanques. Aquecimento só é aplicado para compensar as perdas do sistema.

O aquecimento e resfriamento não possuem vários níveis de patamares, por isso, o movimento da corrente transportadora é lento, para que a garrafa não sofra choque térmico ao entrar no compartimento à temperatura de pasteurização.

Nesta máquina, também o carregamento e descarregamento são manuais. Um desenho esquemático do processo do pasteurizador tipo americano é mostrado na Figura 2.8.

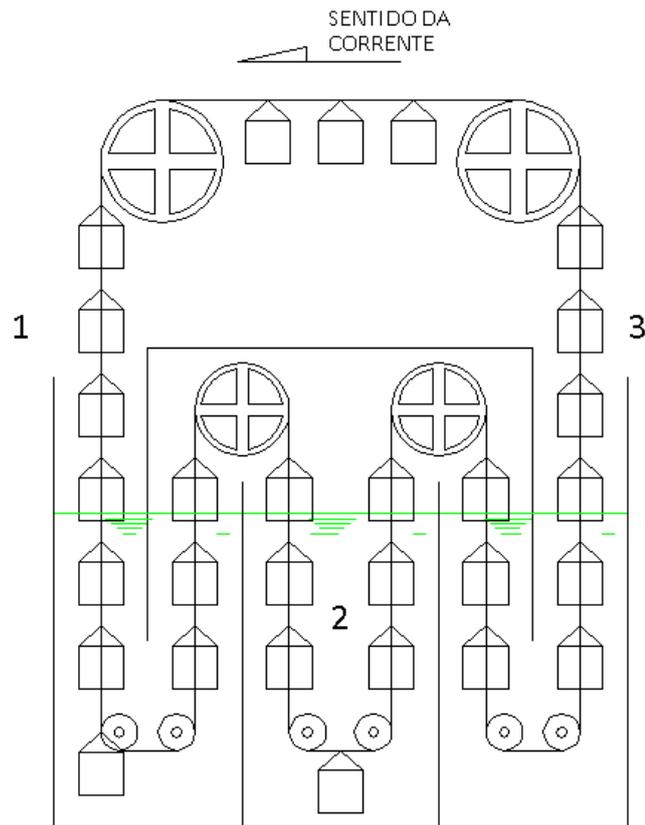


Figura 2.8. Pasteurizador de cestos tipo americano. (1) Entrada da máquina; (2) Zona de Pasteurização; (3) Saída da máquina.

C) Pasteurizadores Tipo Túneis

Os pasteurizadores tipo Gasquet e tipo Americano foram descontinuados no início da década de 50. O conceito que os substituiu é o pasteurizador tipo túnel. Basicamente, os vasilhames (sem cestos) passam através de um longo túnel onde é esguichada água em seu interior. A máquina possui diversos tanques (denominadas zonas) a diferentes temperaturas, fazendo com que a água de molhamento forneça ao processo aquecimento e resfriamento gradual.

Este conceito permitiu a pasteurização em grande escala, tornando-se o modelo dominante em praticamente todas as cervejarias do mundo. Seu sucesso é evidenciado até hoje, pois o conceito básico permanece o mesmo nas máquinas modernas. A Figura 2.9 mostra uma ilustração de um pasteurizador tipo túnel.

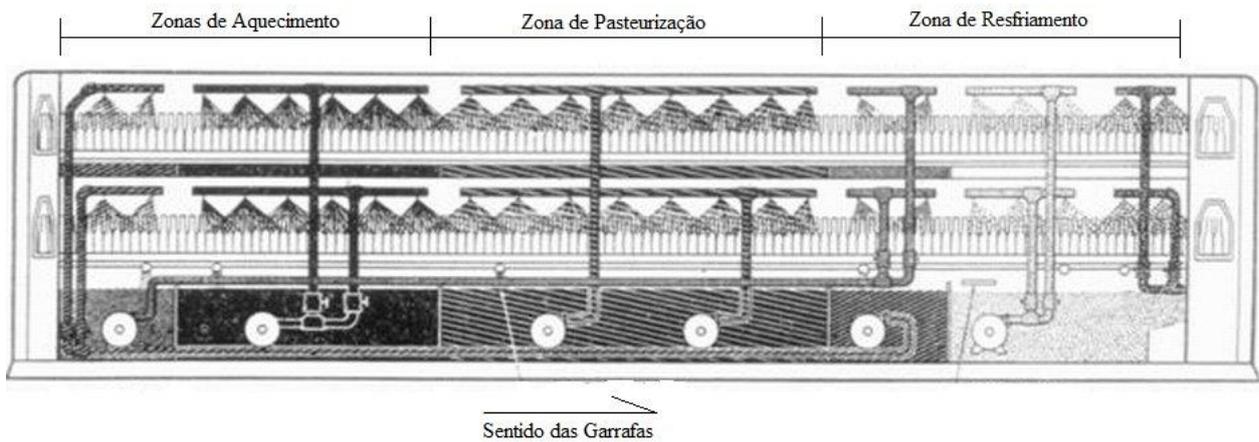


Figura 2.9. Diagrama de pasteurizador tipo túnel de Barry-Wehmler (Clerk 1958).

Na Figura 2.9 é mostrado que cada zona é composta por um tanque com água a uma determinada temperatura e uma bomba que pressuriza a água em um sistema de esguichos que molham as garrafas. Esta água, em contato direto com os vasilhames, garante-se o aquecimento e um resfriamento gradual. Os tanques são aquecidos por injeção direta de vapor em cada tanque. As primeiras máquinas possuíam um controle manual da temperatura dos tanques, com termômetros, onde os operadores da máquina dosavam mais ou menos vapor, conforme necessário.

A máquina que surgiu nos anos 50 foi concebida pela empresa Barry-Wehmler, dos Estados Unidos, depois lançada na Europa pela empresa alemã Holstein-Kappert (Ziemann-Liess Ltda 1985). Estas primeiras máquinas possuíam alimentação e descarga automáticas e eram conduzidas através do túnel por um sistema conhecido como “*walking beams*” (conhecido também como “*passo peregrino*”), conforme esquema da Figura 2.10 e 2.11.

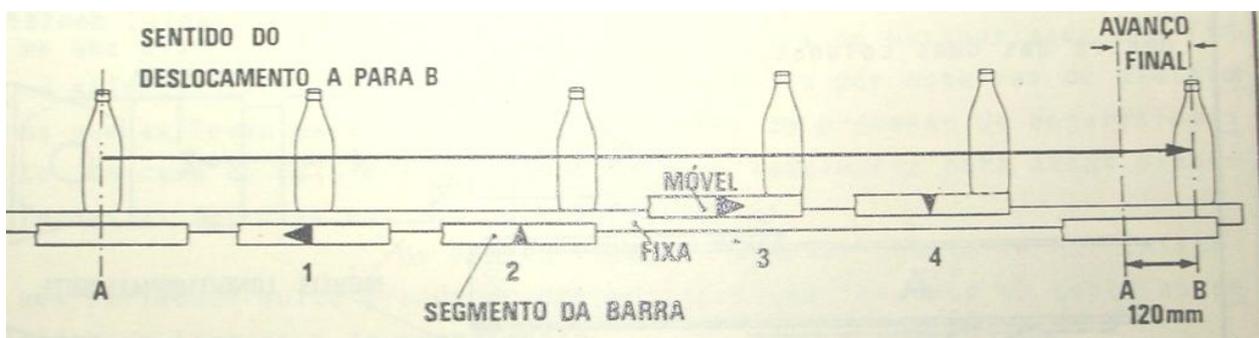


Figura 2.10. Esquema básico do movimento da garrafa - sistema “*walking beams*” (Ziemann-Liess, 1985).

Através deste processo, a garrafa só pode se deslocar para frente. Para melhor entendimento, a Figura 2.10 possui setas indicando os principais movimentos. Sua movimentação sugere quatro posições:

- 1) Retorno: volta da barra móvel, sem tocar na garrafa;
- 2) Subida: suspendendo a garrafa;
- 3) Avanço: deslocamento da garrafa à frente (pela Figura 2.10, o avanço é de 120mm);
- 4) Descida: abaixando a garrafa até os apoios fixos.

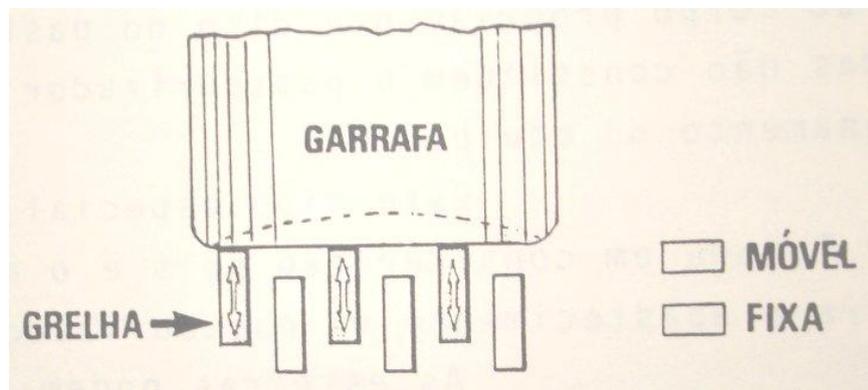


Figura 2.11. Apoios fixos e apoios móveis para o avanço das garrafas (Ziemann-Liess, 1985).

O acionamento do sistema é realizado por uma unidade hidráulica, que bombeiam o fluido para cilindros que executam o movimento do sistema. A unidade hidráulica está localizada fora da máquina e se encarrega do bombeamento de óleo através de motores elétricos ou bombas. São quatro cilindros, dois de cada lado, montados na saída da máquina, conforme Figura 2.12.

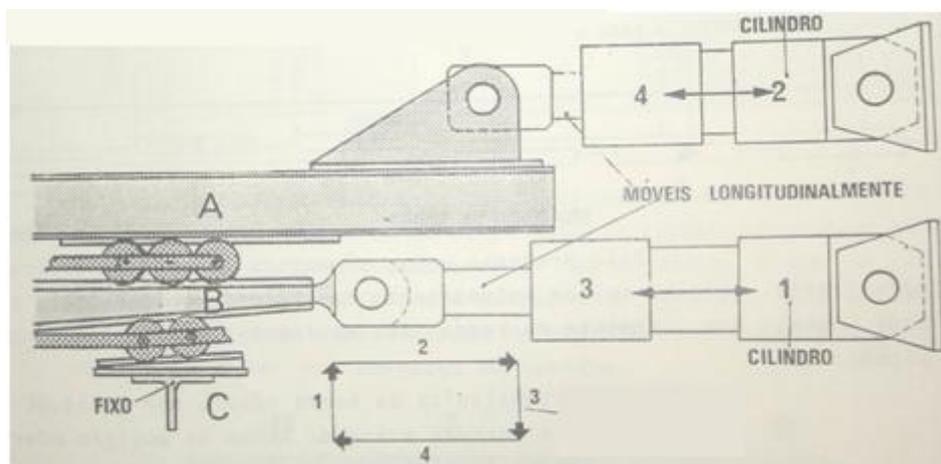


Figura 2.12. Cilindros atuadores do movimento descrito na Figura 2.10.

Da Figura 2.12, define-se a estrutura A de suporte das vigas móveis, B o tirante de regulagem que efetua a subida e descida do sistema sobre o plano inclinado C. Esta figura permite observar com maior clareza os quatro movimentos descritos. A seqüência dos movimentos é detalhada na Figura 2.13.

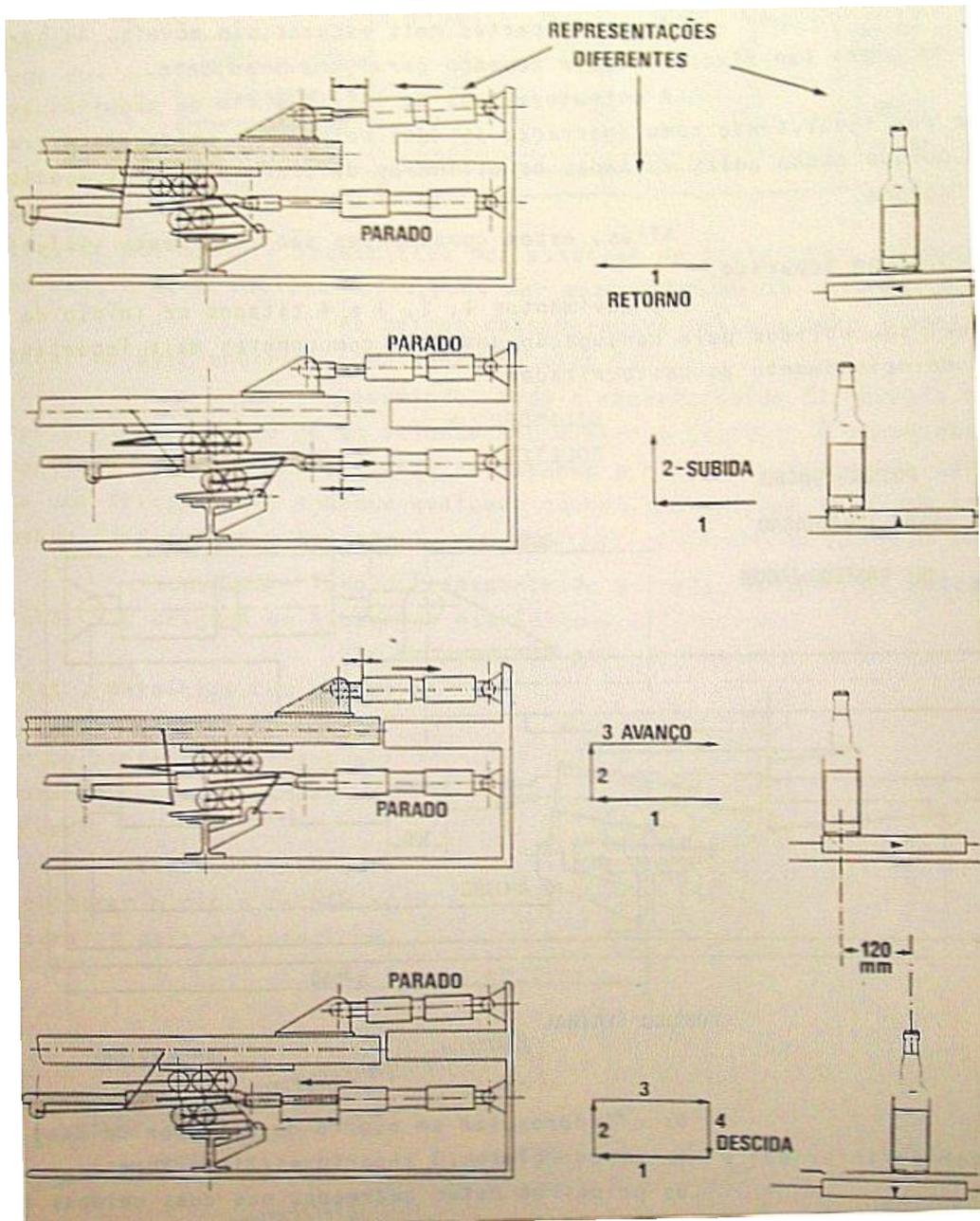


Figura 2.13. Movimentação dos pistões e o movimento relativo da garrafa.

Os primeiros túneis pasteurizadores sofriam de alguns males, especialmente quanto à durabilidade das chapas de aço carbono e da falta de precisão do controle de temperatura de cada tanque. Além disto, o sistema de “walking beams” tornava o equipamento excessivamente

pesado. Os pistões que impulsionam o sistema trabalham com cargas muito altas, o que gerava também altos custos com manutenção.

D) Evolução dos Pasteurizadores Tipo Túnel

Relativo à construção mecânica, os pasteurizadores tipo túnel passaram por importantes evoluções. As duas mais importantes são a modificação do sistema de avanço e o material de construção da máquina.

Os atuais sistemas de avanço dos vasilhames utilizam esteiras acionadas por engrenagens acopladas a um eixo, acionado, por sua vez, por moto redutores. Este sistema, além de aliviar enormemente o peso da máquina, simplificou toda sua concepção mecânica, auxiliando também na sua confiabilidade e reduzindo os custos com manutenção (ver Figura 2.14).



Figura 2.14. Parte frontal de um túnel pasteurizador em aço inoxidável, com acionamento por motoredutores planetários (Ziemann-Liess Ltda).

A utilização de aço inoxidável como matéria-prima, mesmo com a diferença de custo em comparação com o aço carbono, provocou o aumento da vida útil do equipamento, associada a uma baixa manutenção, fazendo do aço inoxidável um investimento altamente rentável.

Outra importante evolução foi a substituição do aquecimento através de injeção direta por trocadores tipo casco e tubo para cada zona de pré-aquecimento e zona de pasteurização, com válvulas de controle automáticas que “dosam” a vazão correta de vapor para cada necessidade da zona, permitindo maior eficiência nas trocas térmicas, além de um controle muito mais apurado da temperatura das zonas.

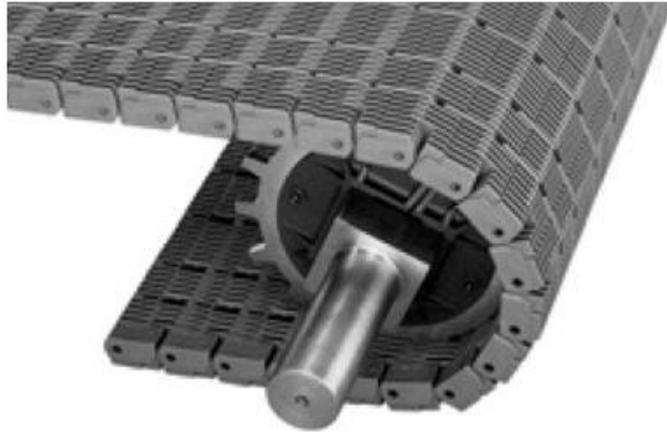


Figura 2.15. Esteira transportadora, com eixo e engrenagens de acionamento (Intralox Co 2008).



Figura 2.16. Vasilhames passando por um pasteurizador tipo túnel totalmente construído em aço inox e com esteira transportadora (cortesia de Ziemann-Liess Ltda.).

Em termos de processo, o avanço dos instrumentos de medição dos dados de processo (sensores de temperatura da água do spray, válvulas de controle, entre outros) e o forte avanço ocorrido no campo da automação e sistemas de controle, proporcionaram a obtenção de um processo com desvios muito pequenos e altos níveis de produção e de confiabilidade (perdas de produto muito baixas).

Os túneis pasteurizadores até então possuíam toda sua parte inferior trabalhando como os tanques das zonas. Por exemplo, se uma máquina possuía uma largura de 4 metros e uma zona possuía 3 metros de comprimento, todos seus 12m^2 de área ocupada era um depósito de água, o

que aumentava muito a inércia do sistema para o aquecimento, requerendo uma potência instalada muito maior. Esta situação é mostrada no esquema da Figura 2.17.

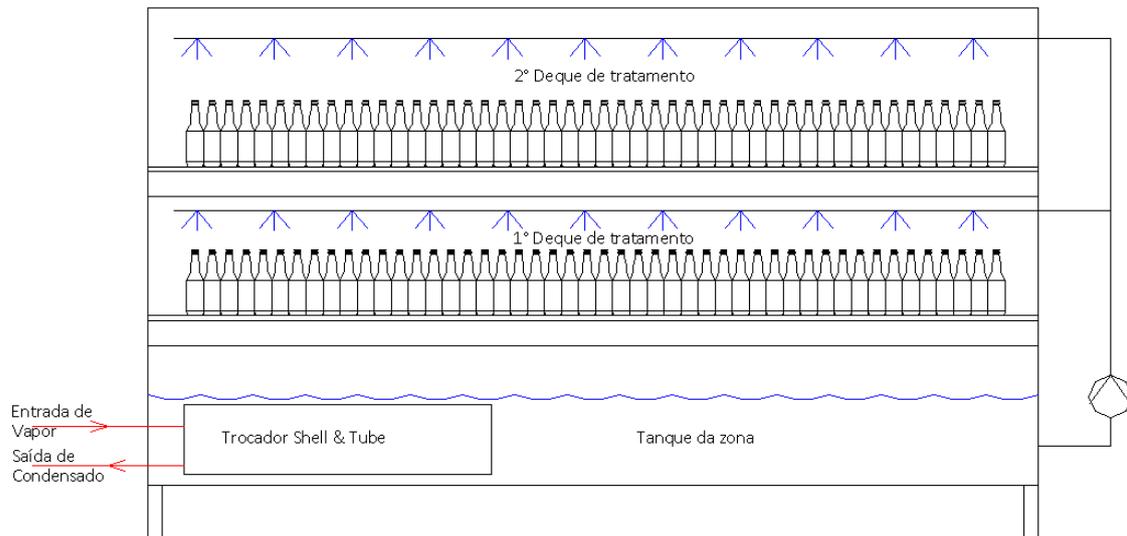


Figura 2.17. Vista frontal esquemática de um túnel com sua área inferior utilizada como tanque.

Já os túneis mais modernos utilizam apenas uma pequena parte da área inferior de cada zona como tanque. Seu volume tem a função apenas de manter a bomba de alimentação dos esguichos afogada. Além disso, parte da área inferior da máquina, que ficou livre, é utilizada para a instalação de um tanque de água quente. Este tanque possui água à 85°C e serve como reservatório de energia, para poder suprir as necessidades de rápido aquecimento da máquina.

Este tanque envia água quente para as zonas, para repor as perdas de energia ao longo do tempo de operação. A água injetada em cada tanque volta ao tanque de água quente pelo transbordo do excesso do tanque da zona. Assim, mantém-se sempre o nível do tanque de água quente, sem necessidade de consumo adicional de água.

Outra vantagem desta concepção é que, como se tem apenas um reservatório de água quente, necessita-se de apenas um trocador de calor para manter a temperatura do tanque, geralmente à placas, e, conseqüentemente, apenas uma estação de vapor, diminuindo as perdas de energia e simplificando a manutenção da máquina. Esta concepção é esquematicamente ilustrada na Figura 2.18.

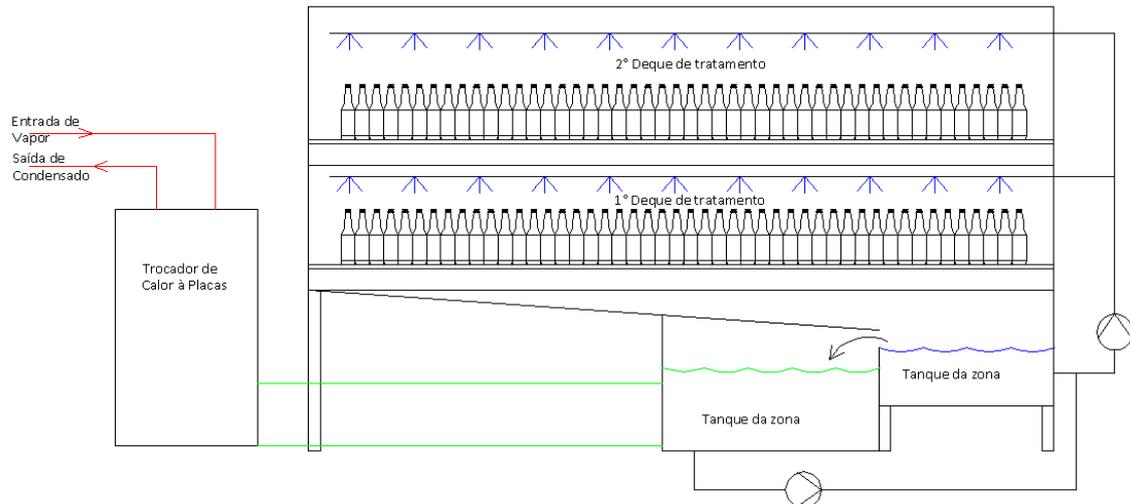


Figura 2.18. Vista frontal esquemática de um túnel utilizando reservatório de água quente.

E) Os túneis Pasteurizadores trabalhando em uma linha de envase

Os túneis pasteurizadores são instalados em uma linha de envase, onde todos os equipamentos são conectados em série, por meio de transportadores, que levam os vasilhames através das diferentes etapas. Cada etapa da linha é realizada por um equipamento específico para determinada função. Os principais equipamentos em uma linha de envase são:

- **Descarga dos vasilhames (De-paletizer):** os vasilhames de vidro retornáveis voltam do comércio e são retirados de suas caixas e colocados no início da linha de envase;
- **Lavadora de garrafas:** equipamento de grandes dimensões que promove a limpeza dos vasilhames à quente, bem como a retirada dos rótulos velhos;
- **Inspetora de garrafas:** equipamento que consegue efetuar uma inspeção em alta velocidade, de forma a verificar se alguma garrafa está danificada, trincada, ou possui algum objeto estranho no seu interior;
- **Enchedora:** é a máquina que preenche o vasilhame com cerveja e instala a rolha metálica. É nesta máquina que boa parte da qualidade do conjunto vasilhame-produto é obtida, como o espaço livre (*headspace*) do vasilhame, citado no Capítulo 2;
- **Pasteurizador:** efetua a eliminação dos microorganismos presentes na bebida, conferindo-lhe uma vida útil adequada para o mercado;
- **Rotuladora:** aplica os rótulos e imprime os dados de lote e validade no vasilhame;
- **Encaixotadora:** Coloca engradados de garrafas em caixas plásticas usuais do comércio;

- **Carregadora (Paletizer):** Carrega as caixas em bases de madeira que, posteriormente, servirão de base nos caminhões que distribuem os produtos.

Na Figura 2.19, segue uma planta ilustrativa de uma linha de envase de vasilhames retornáveis:

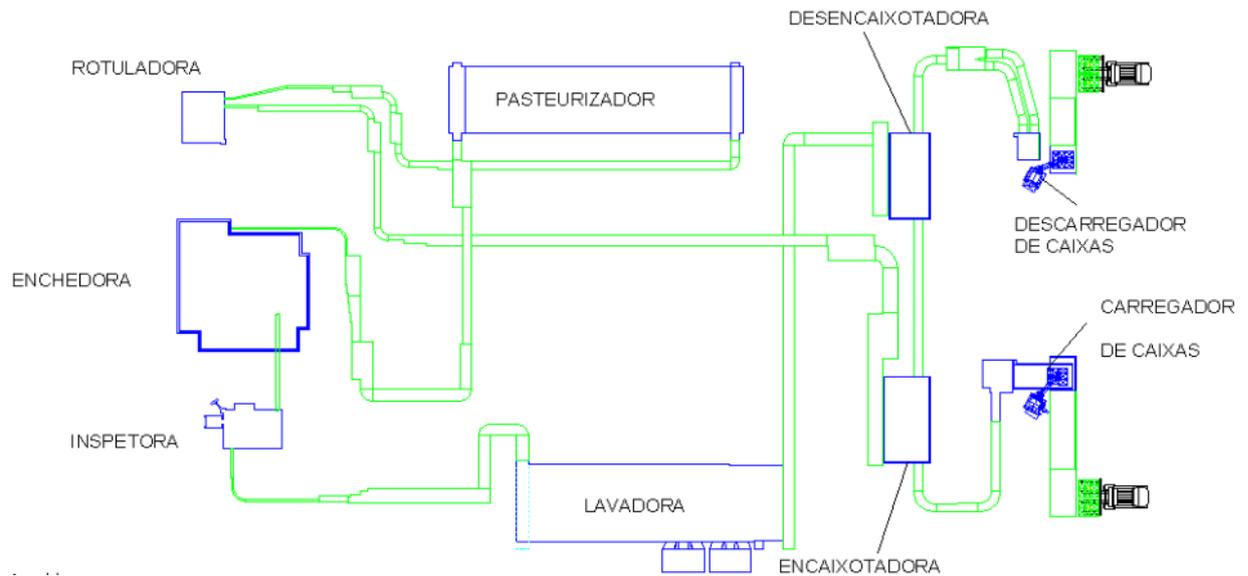


Figura 2.19. Planta esquemática de envase de cerveja.



Figura 2.20. Vista geral de uma linha de envase de cerveja.

É freqüente que alguma das máquinas da linha sofra alguma parada rápida, para ajuste de parâmetros ou reparar algum pequeno defeito, como algum rótulo mal posicionado que tranca a Rotuladora e que o operador da máquina tenha que pará-la por um ou dois minutos para

desobstruí-la. Pequenas ocorrências deste tipo ocorrem devido a inúmeras causas, tanto devido aos equipamentos como pequenos erros de operação.

Os tempos de cada parada variam de alguns segundos a poucos minutos. Porém, as paradas que ocorrem nas máquina após o pasteurizador tendem a impedir a saída de garrafas do mesmo. Assim que as garrafas na saída do túnel ficam impedidas de prosseguir, a máquina pára por meio do sinal de um sensor de acúmulo em sua saída.

Todas estas paradas somadas aumentam o tempo de permanência dos vasilhames na zona de pasteurização o que pode levar a uma superpasteurização e conseqüente descarte do produto. Uma solução tradicional é que, em paradas maiores que um determinado tempo, a máquina libere entrada de água fria no tanque da zona de pasteurização, esfriando-a pelo tempo da parada. Quando a máquina estiver novamente liberada, a zona é reaquecida até sua temperatura nominal.

Apesar de todos estes avanços que as máquinas obtiveram, até o início da década de 90, os túneis pasteurizadores ainda possuíam uma séria deficiência quanto o controle do processo na ocorrência de paradas. Como conseqüência, as variações permitidas para a intensidade da pasteurização eram muito altas.

As unidades de fabricação, fermentação e filtração da cerveja, nesta época, haviam atingido um alto nível de maturidade, obtendo-se processos com alto grau de precisão. Todo este ganho estava em contradição com as deficiências que ocorriam na linha de envase, já que se começava a questionar porque investir em uma grande qualidade em todos os processos da cervejaria se boa parte deste investimento se perdia na pasteurização.

Foi esta situação que motivou algumas empresas e pesquisadores a concentrarem esforços no estudo dos fenômenos de transferência de calor envolvidos visando uma maior precisão dos túneis pasteurizadores.

Os primeiros controles de processos foram desenvolvidos por duas empresas alemãs. No final da década de 90, também começaram a ser oferecidos na Itália e Estados Unidos. Até hoje toda esta tecnologia tem se concentrado nas mãos destas empresas. No Brasil, os túneis pasteurizadores nacionais praticamente foram eliminados do mercado por não oferecerem este tipo de controle, sendo nosso mercado grande comprador das máquinas importadas.

Muitos estudos, como o de Larsen (2006), são realizados em cooperação com estas empresas e apenas alguns dos resultados são publicados. No Brasil, praticamente não há trabalhos envolvidos especificamente com a pasteurização de líquidos envasados. Boa parte dos trabalhos é direcionada para a análise microbiológica dos alimentos nos processos de esterilização e pasteurização. Outra forte corrente encontrada em trabalhos nacionais é o estudo

da pasteurização do leite, porém seu processo de tratamento térmico difere completamente do da cerveja, já que o leite não é pasteurizado em vasilhames.

Com os poucos trabalhos dedicados ao estudo dos túneis pasteurizadores, e a falta da oferta de produtos nacionais com maior precisão do processo, as cervejarias pouco tem a escolher, senão continuar com a aquisição de maquinários estrangeiros.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A principal necessidade das máquinas nacionais é a concepção de uma forma de controle do processo de pasteurização que, sendo um tratamento térmico, deve-se obter o conhecimento dos fenômenos térmicos para seu correto modelamento, juntamente com a obtenção dos valores dos coeficientes de transferência de calor adequados.

Conforme mencionado na Seção 2.6, em um túnel pasteurizador os vasilhames são conduzidos ou por um sistema de movimentação ao longo de diversos banhos, também chamados de zonas, cada uma à determinada temperatura. Esta seqüência de banhos provê aos vasilhames um aquecimento e resfriamento gradual, respeitando os limites de resistência do material do vasilhame quanto ao choque térmico.

O processo em um túnel pasteurizador é dividido basicamente em quatro grupos principais:

- **Zonas de aquecimento:** são os banhos que levam os vasilhames desde sua temperatura inicial até a temperatura de pasteurização. Normalmente são três zonas (três banhos);
- **Zona de pré-pasteurização:** são as zonas onde já ocorre alguma inativação ou morte de microorganismos. Os vasilhames ainda estão sendo aquecidos porém a pasteurização já está iniciada. As máquinas mais simples possuem apenas uma zona deste tipo;
- **Zona de pasteurização:** é a zona onde os vasilhames são mantidos à temperatura de pasteurização durante um período estipulado. As máquinas mais simples possuem apenas uma zona deste tipo;
- **Zonas de resfriamento:** são os banhos que resfriam gradualmente os vasilhames até uma temperatura adequada para a manipulação manual, geralmente 35°C. Normalmente são três zonas (três banhos).

A Figura 3.1 ilustra esta distribuição com uma curva típica de pasteurização de uma máquina real:

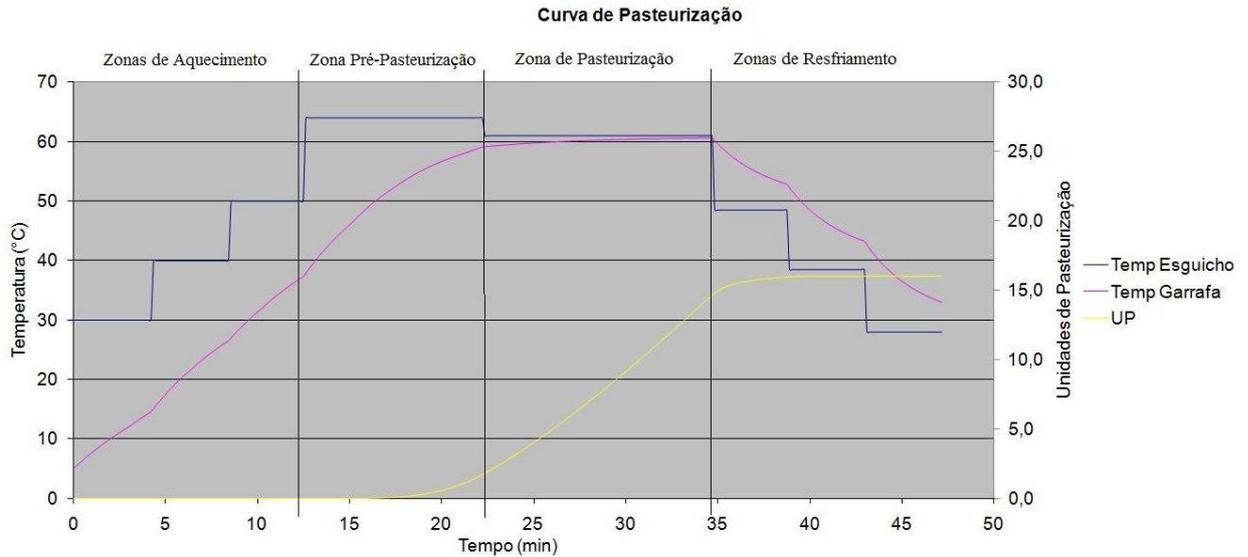


Figura 3.1. Zonas de processo de um túnel pasteurizador. Receita para 16UP.

Independente da distribuição da máquina, supondo que um vasilhame com temperatura constante (igual tanto para o vidro como para a cerveja) e com o líquido inicialmente em repouso é inserido na máquina, pode-se montar o seguinte diagrama esquemático na Figura 3.2:

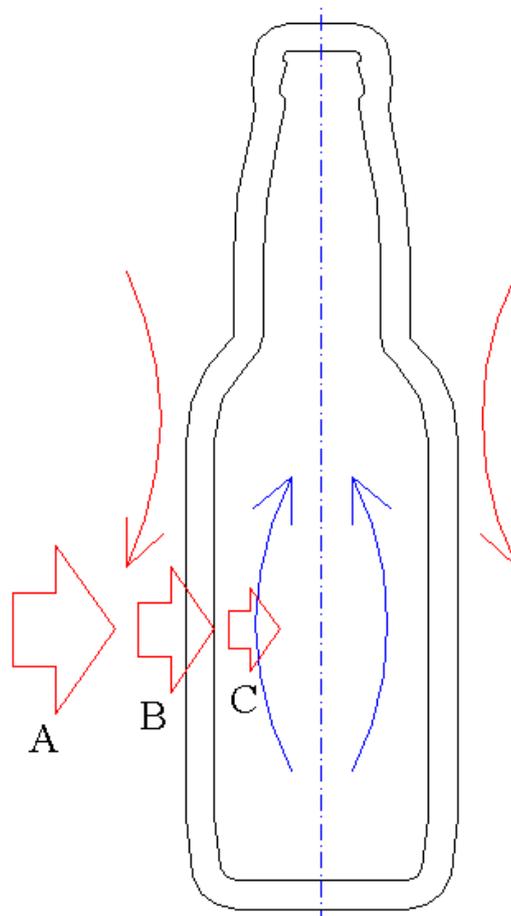


Figura 3.2. Esquema básico do processo de transferência de calor.

Da Figura 3.2, é possível estabelecer que a taxa de calor que entra na garrafa passa por três etapas principais, da seguinte forma:

A) Convecção Forçada Externa

A convecção forçada externa representa a forma em que a taxa de calor passa da água do banho para a superfície externa do vidro do vasilhame. O conjunto é submetido a um banho de água, proveniente de esguichos no teto da máquina com vazões muito altas, da ordem de $30\text{m}^3/\text{h}$ para cada metro quadrado de piso da máquina. Lewicki (1984) mostrou que as vazões dos banhos influenciam o processo até certo ponto, ou seja, a resistência da convecção forçada externa ao vasilhame só é significativa em vazões baixas, da ordem de $10\text{m}^3/\text{h}$ por metro quadrado de máquina. Acima deste ponto, a vazão de água esguichada torna esta resistência desprezível.

Esta observação de Lewicki é tomada como uma das hipóteses fundamentais deste trabalho, assim, a resistência térmica externa do conjunto vidro-cerveja é negligenciada.

B) Condução no Vidro

A energia absorvida pela superfície externa do vasilhame passa por condução até sua superfície interna. Em vasilhames de vidro, a massa do casco possui a mesma ordem de grandeza da massa de cerveja, possuindo uma capacitância térmica considerável. Isto representa uma inércia térmica maior para o problema, ou seja, quanto maior o vasilhame, ou sua parcela em relação à massa total, maior o tempo para que a entalpia absorvida consiga variar de forma significativa a temperatura média do conjunto.

C) Convecção Natural Interna

Após o tempo necessário para que a taxa de calor atravesse a parede do vasilhame, parte desta energia ficará encarregada de aquecer o vasilhame, enquanto parte começará a ser repassada ao fluido, aquecendo-o. O aquecimento tende a ser cada vez mais intenso, pois após vencer as forças viscosas do fluido em questão, as velocidades impostas pelas correntes convectivas tenderão a propiciar uma troca mais eficiente entre o vidro e a cerveja.

O corrente trabalho se concentra no estudo da transferência de calor da água dos banhos para o interior do vasilhame, ao longo de toda a máquina. Desta forma, o problema é posto como a obtenção dos coeficientes de transferência de calor em um líquido, no caso cerveja, confinado em um recipiente de vidro, para os diferentes banhos ao qual é submetido.

O estudo não adota o método das resistências para determinação dos coeficientes de troca térmica em cada etapa mostrada na Figura 3.2, pois o mesmo é formulado para situações em regime permanente. O caso em estudo é um problema essencialmente transiente. Apenas em tempos muito longos pode ser assumido que a variação entre as temperaturas externa e interna do casco e a temperatura média do fluido não variam. Porém, neste tempo todo o conjunto já deve estar à temperatura do banho, não havendo mais transferência de calor.

Pelo fato dos fenômenos serem fortemente transientes e haver um acoplamento entre um domínio sólido e outro fluido, este último com um campo de velocidades desconhecido para poder determinar a forma correta de tratar o problema, o mesmo é conduzido diretamente para um modelo simples, de balanço de energia, que originará o modelo físico almejado e os valores que caracterizam as transferências de energia obtidas experimentalmente.

Finalmente, a modelagem da pasteurização se completa com o modelo que quantifica o processo através de uma temperatura representativa do vasilhame. Esta parte está consolidada e apresentada na seção 2.5.

3.1 MODELAGEM FÍSICA SIMPLIFICADA – CONTROLE PROPOSTO

O objetivo final deste trabalho é a utilização dos coeficientes globais de transferência de calor em um modelo de engenharia simples de fácil programação para utilização prática em máquinas reais. Pela conservação de energia, pode-se estabelecer que a variação da energia interna do sistema vidro-cerveja é igual ao balanço da energia que entra e sai do domínio:

É possível escrever este balanço da seguinte forma, através do esquema mostrado na Figura 3.3:

$$\frac{dE}{dt} = q_{ENTRA} - q_{SAI} + q_{GERADO} \quad (3.1)$$

onde E é energia interna do sistema, t é o tempo, q_{ENTRA} é a taxa de calor que entra no sistema através da superfície de controle, q_{SAI} é a taxa de calor que sai do sistema e q_{GERADO} é o calor gerado dentro do volume de controle. Neste problema não há geração interna de energia. Pela

Figura 3.1, ou ocorre aquecimento ou resfriamento do vasilhame. Considera-se que o sistema esteja em uma etapa apenas de aquecimento, da formulação do coeficiente global de transferência de calor, têm-se:

$$\frac{dE}{dt} = \bar{U}A \cdot [T_S - T_{CS}(t)] \quad (3.2)$$

onde T_S é a temperatura na parede externa do vasilhame (igual à temperatura do banho) e T_{CS} é a temperatura no *ponto frio*, que varia ao longo do processo.

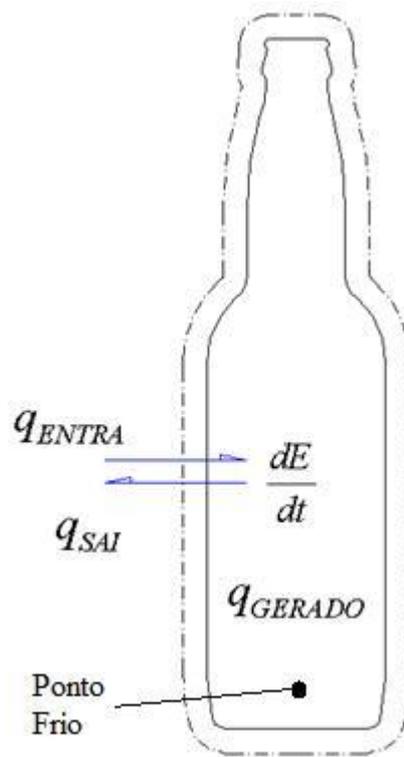


Figura 3.3. Variação da energia interna dada pelo balanço da entrada e saída das taxas de calor.

Pode-se reescrever a equação 3.2 como:

$$(\rho C_p V)_{SIST} dT_{CS} = \bar{U}A \cdot [T_S - T_{CS}(t)] dt \quad (3.3)$$

onde a capacitância térmica $\rho C_p V$ é a média ponderada do sistema vidro-cerveja. A equação 3.3 é similar à formulação da capacitância global. Fisicamente, esta formulação não é adequada, já que dentro do vasilhame há uma distribuição em um campo de temperaturas. A capacitância

global, em contrapartida, assume que todo o domínio está à mesma temperatura (corpo espacialmente isotérmico).

Porém, conforme definido no Capítulo 2, a pasteurização deve ser sempre calculada em relação à temperatura do ponto mais frio do vasilhame, fazendo com que, para este processo em particular, o cálculo de apenas um ponto seja suficiente para sua modelagem. Desta forma, o campo de temperaturas que é gerado em todo o domínio certamente influencia a forma da variação da temperatura deste ponto, porém não é necessário que seja conhecido para a quantificação da pasteurização.

O ponto frio é, então, assumido como o ponto representativo do sistema, para fins de cálculo apenas. Isolando-se dt na equação 3.3:

$$dt = \frac{(\rho C_P V)_{SIST}}{\bar{U}A} \frac{dT_{CS}}{[T_S - T_{CS}(t)]} \quad (3.4)$$

Integrando a equação acima em um intervalo $t \rightarrow (0, t)$, representando o tempo de duração de um banho do processo:

$$\int_{t=0}^{t=t} dt = \int_{T_{CS}=T_{CS}(0)}^{T_{CS}=T_{CS}(t)} \frac{(\rho C_P V)_{SIST}}{\bar{U}A} \frac{dT_{CS}}{[T_S - T_{CS}(t)]} \quad (3.5)$$

Isolando-se o tempo na equação acima:

$$t = -\frac{(\rho C_P V)_{SIST}}{\bar{U}A} \{ \ln[T_S - T_{CS}(t)] - [T_S - T_{CS}(0)] \} \quad (3.6)$$

$$t = -\frac{(\rho C_P V)_{SIST}}{\bar{U}A} \left\{ \ln \frac{[T_S - T_{CS}(t)]}{[T_S - T_{CS}(0)]} \right\} \quad (3.7)$$

De forma a simplificar a escrita da equação 3.10, adota-se $f = \frac{(\rho C_P V)_{SIST}}{\bar{U}A}$. Assim:

$$t = -f \left\{ \ln \frac{[T_S - T_{CS}(t)]}{[T_S - T_{CS}(0)]} \right\} \quad (3.8)$$

$$-\frac{t}{f} = \left\{ \ln \frac{[T_S - T_{CS}(t)]}{[T_S - T_{CS}(0)]} \right\} \quad (3.9)$$

Aplicando o exponencial na equação 3.9:

$$e^{-t/f} = \frac{[T_s - T_{CS}(t)]}{[T_s - T_{CS}(0)]} \quad (3.10)$$

A equação 3.10 nada mais é do que a representação do excesso de temperatura do sistema. A mesma permite relacionar o estado inicial e final da temperatura no ponto frio com o tempo e com o coeficiente global de transferência de calor, incluso no fator f . Visando a implementação da metodologia apresentada na equação 3.10 para um controle de processo, deve-se conhecer:

- **Os valores de f :** depende do conhecimento de \bar{U} , onde este será determinado nos experimentos numéricos e experimentais apresentados adiante neste trabalho;
- **A temperatura inicial no ponto frio $T_{CS}(0)$:** é conhecida pois se impões que inicialmente todo o domínio está a uma temperatura constante;
- **A temperatura do banho T_s :** que se conhece pela leitura dos sensores de temperatura instalados nos tubos de spray de água da zona;
- **O valor de t :** a duração do processo é um dado imposto no problema.

Com o conhecimento de todos os dados acima, pode-se saber qual será a temperatura final no ponto frio do vasilhame $T_{CS}(t)$ em cada instante, apenas isolando-a na equação 3.10:

$$T_{CS}(t) = T_s - [T_s - T_{CS}(0)]e^{-t/f} \quad (3.11)$$

Formulações semelhantes podem ser encontradas em Burmeister (1993) e Bejan (1995).

3.2 FORMA DE APLICAÇÃO PARA O CONTROLE

Pode-se agora partir para uma formulação de controle, utilizando-se do modelo físico de transferência de calor e do modelo de cálculo das Unidades de Pasteurização.

Visando um controle preciso, a equação 3.11 deve ser calculada para pequenos intervalos de tempo, diminuindo distorções que possam ser geradas e refinando o resultado. O valor do tempo ideal a ser adotado é aquele que represente o menor ponto possível em uma máquina, o

que discretizaria a máquina no maior número possível de pontos. Como sugestão, pode-se utilizar o tempo para que a esteira transportadora ande o espaço equivalente ao de uma garrafa. Assim, colocando cada ponto em um gráfico, se teria o status de cada vasilhame na máquina.

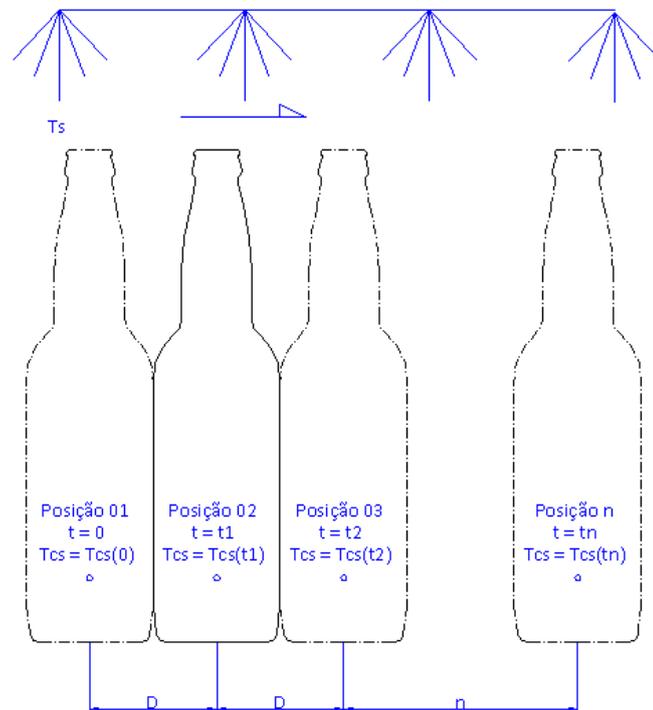


Figura 3.4. Formulação de cálculo da temperatura de todas as garrafas em um túnel pasteurizador.

Utilizando o exemplo da Figura 3.4 para calcular a temperatura na garrafa na posição 2, utiliza-se a $T_{cs}(t_1)$ como temperatura inicial, intervalo de tempo de cálculo $(t_2 - t_1)$ e os dados de f implementados no programa. O processo se repete com o andar da garrafa ao longo de toda a máquina, apenas ajustando a temperatura da água do spray T_s para os diferentes banhos existentes ao longo do processo.

3.2.1 Controle com Ajuste das Unidades de Pasteurização

A equação 3.11 permite que se calcule a temperatura do vasilhame em cada ponto ao longo de toda a máquina, desde que se conheçam os valores de \bar{U} . A partir destas temperaturas, pode-se também saber qual o valor de UP de cada vasilhame, pela equação 2.25. Mas estas equações apenas estão calculando valores, mas ainda sem estabelecer um controle efetivo do processo.

Assim, as equações 2.25 e 3.11 serão combinadas de forma a poder corrigir desvios de UP que ocorram no processo.

Para ilustrar a metodologia desenvolvida, utiliza-se um exemplo simples. Conforme comentado na seção 2.6, a máquina possui zonas chamadas de zonas de processo, ou seja, são banhos onde as garrafas incorporam as unidades de pasteurização desejadas.

Tomando-se apenas uma zona de processo intermediária, assume-se que as paradas causadas pela linha de envase tenham ocasionado um ganho maior de UP nas garrafas entrando nesta zona, estando com a seguinte situação:

Tabela 3.1. Dados do exemplo de demonstração do controle de UP

	Teórico (em regime)	Atual (após ocorrência de paradas)
UP da garrafa – posição n	6	9
UP da garrafa – posição n+20	12	12 (desejado)
Temperatura do ponto frio – posição n	61°C	61,7°C
Tempo de processo restante (de n até n+20)	5 min	5 min

1º ETAPA

Deve ser computado o desvio atual de unidades de pasteurização. Ou seja, o sistema deve calcular a diferença entre o número de UP atual do vasilhame e o número de UP teórico (o valor que o vasilhame deveria ter em regime contínuo). Os valores teóricos deverão ser inseridos como valores de referência no programa:

$$\Delta UP = UP_{ATUAL} - UP_{TEÓRICA} = 9UP - 6UP = 3UP \quad (3.12)$$

2º ETAPA

Calcula-se a quantidade de unidades de pasteurização (UP) que a garrafa pode ganhar, de forma a terminar a zona com o número teórico desejado:

$$UP \text{ a ganhar} = UP_{teórico}^{entrada} - UP_{teórico}^{saída} - \Delta UP = 12UP - 6UP - 3UP = 3UP \quad (3.13)$$

3° ETAPA

Calcular qual temperatura de banho satisfaz o ganho de UP desejado da 2° etapa. Para atingir este objetivo deve-se utilizar de uma aproximação. Na equação 2.25, o cálculo da UP é para uma temperatura constante. Para poder calcular para diferentes temperaturas, basta atualizar a temperatura de T_{CS} em intervalos Δt suficientemente pequeno para evitar distorções.

Obtendo a temperatura do *ponto frio* da garrafa para um dado tempo e para um determinado ganho de UP tem-se:

$$UP = 10^{\frac{T_{CS}-60}{z}} \times t \quad (3.14)$$

Isolando-se a temperatura T_{CS} :

$$T_{CS} = z \times \log\left(\frac{UP}{t}\right) + 60 \quad (3.15)$$

Como se quer corrigir um valor de ΔUP , se deve alterar a temperatura do banho que satisfaça aos valores de UP requeridos. Isto irá alterar a temperatura do vasilhame. Fazendo a seguinte aproximação:

$$\overline{T_{CS}} = \frac{T_{CS}(t) - T_{CS}(0)}{2} = z \log\left(\frac{UP \text{ a ganhar}}{t}\right) + 60 \quad (3.16)$$

Desta forma, assume-se que há uma variação linear de temperatura. Sabe-se que isto não é verdade, mas como o intervalo de tempo deverá ser pequeno (o tempo de atualização de cálculo pode ser colocado como dado de entrada no software), admite-se que esta aproximação irá acarretar desvios negligenciáveis. Inserindo a equação 3.11 na equação acima, fica-se com:

$$\frac{\{T_S - [T_S - T_{CS}(0)]e^{t/f}\} - T_{CS}(0)}{2} = z \log\left(\frac{UP \text{ a ganhar}}{t}\right) + 60 \quad (3.17)$$

Sabendo que $z = 6,94$, isola-se a temperatura desejada do banho T_S para saber que temperatura de banho irá satisfazer a UP a ganhar:

$$T_s = \frac{13,88 \times \log\left(\frac{UP \text{ a ganhar}}{t}\right) + 120 + T_{CS}(0) \times (1 - e^{t/f})}{(1 - e^{t/f})} \quad (3.18)$$

A equação 3.19 fornece o controle de que se precisa para ajustar o processo de acordo com a necessidade de cada vasilhame. Como, de forma geral, as máquinas já possuem sua etapa de processo dividida em seis zonas, o controle pode atuar de acordo com a necessidade de cada lote de vasilhame, já que estas seis zonas ajudam na discretização da temperatura dos banhos.

As equações 2.25, 3.11 e 3.19 devem ser computadas sempre, em intervalos de tempo pequenos, para que a máquina, além de saber qual a temperatura e a UP de cada vasilhame em cada ponto, possa efetuar correções sistemáticas referente sempre ao valor de UP que esteja entrando na zona.

Uma observação importante é que a unidades de pasteurização é uma variável cumulativa. Assim, caso haja vasilhames com valores de UP já acima do tolerado, a máquina não terá outro recurso senão simplesmente resfriar o máximo possível e deixar que a garrafa conclua as zonas de processo com temperaturas de banho semelhantes às das zonas de resfriamento.

3.2.2 O fator f

O fator f é, pela sua concepção, uma constante de tempo aplicada ao processo. Para tal, basta efetuar uma análise dimensional:

$$f = \frac{(\rho C_p V)_{SIST}}{\bar{U}A} = \frac{\frac{kg}{m^3} \frac{kJ}{kgK} m^3}{\frac{kJ/s}{m^2K} m^2} = s \quad (3.19)$$

Neste ponto vale ressaltar também que, mesmo sendo a modelagem semelhante à formulação da capacitância global, a particularização para o processo em interesse é enfatizado pelo fato de o fator f levar em consideração todo o sistema vidro- cerveja $(\rho C_p V)_{SIST}$, além da característica transiente do problema, através do \bar{U} . Escrevendo de forma explícita:

$$f = \frac{(\rho C_p V)_{SIST}}{\bar{U}A} = \frac{m_{liq} C_{liq} + m_{vas} C_{vas}}{\bar{U}A} \quad (3.20)$$

onde m_{liq} é a massa do líquido (no caso da cerveja), C_{liq} é o calor específico do líquido, m_{vas} é a massa do vasilhame e C_{vas} é o calor específico do material do vasilhame (no caso, o vidro). O valor da área na equação acima é uma área média do vasilhame, com valor $A = (A_{ext} + A_{int}) / 2$.

3.2.3 Sobre as Unidades de Pasteurização

Lembra-se que o efeito da pasteurização é cumulativo, ou seja, resfriando-se a garrafa não “ressuscitam-se” os microorganismos, não voltando ao estágio anterior. Por isso, a UP nesta metodologia deve ser calculada em cada ponto e somando-se ao valor de UP do ponto anterior para se ter a UP total acumulada.

4. METODOLOGIA

O problema neste ponto já possui uma modelagem para o fenômeno de transferência de calor bem como seu acoplamento com o problema da pasteurização. Para que este modelo possa ser testado e consolidado para seu uso prático parte-se para a descrição da metodologia utilizada para a obtenção dos valores do coeficiente f , os quais permitirão o cálculo da temperatura do vasilhame no ponto frio a partir da temperatura dos banhos.

Estes coeficientes são obtidos de forma experimental, a partir da construção de uma bancada que representa o funcionamento de um túnel pasteurizador. Neste capítulo serão demonstrados a concepção e funcionamento da bancada, bem como a metodologia de análise aplicada.

4.1 O PROJETO EXPERIMENTAL

O estudo é direcionado para a construção de uma bancada que permita a simulação das condições reais dentro de um túnel pasteurizador.

Conforme apresentado no Capítulo 2, um túnel pasteurizador é um equipamento onde os vasilhames são conduzidos através de uma esteira transportadora, ao longo de diversas seções, denominadas zonas, cada uma com um banho à determinada temperatura. Estes banhos devem proporcionar o aquecimento gradual dos vasilhames até a temperatura de pasteurização, seguido de um resfriamento gradual (Figura 3.1).

É construída uma bancada de testes que permita a reprodução de todas as condições dos banhos ao longo do tempo. A bancada também deve garantir que as condições mecânicas dos banhos sejam as mesmas da máquina real. Desta forma, garante-se que a quantidade de água e forma de molhamento das garrafas permanecerão as mesmas.

4.1.1 Concepção e Funcionamento da Bancada

Um túnel pasteurizador real possui grandes dimensões, geralmente 4m de largura por cerca de 20m de comprimento. Assim, o primeiro desafio é conseguir elaborar um protótipo que reproduza todas as zonas em um espaço pequeno.

A bancada é formulada de forma a representar fisicamente apenas uma zona da máquina, ou seja, uma estrutura de apoio das garrafas, com bomba de molhamento e sistemas de correção

de temperatura com água quente e fria. A Figura 4.1 mostra o fluxo de funcionamento da bancada elaborada:

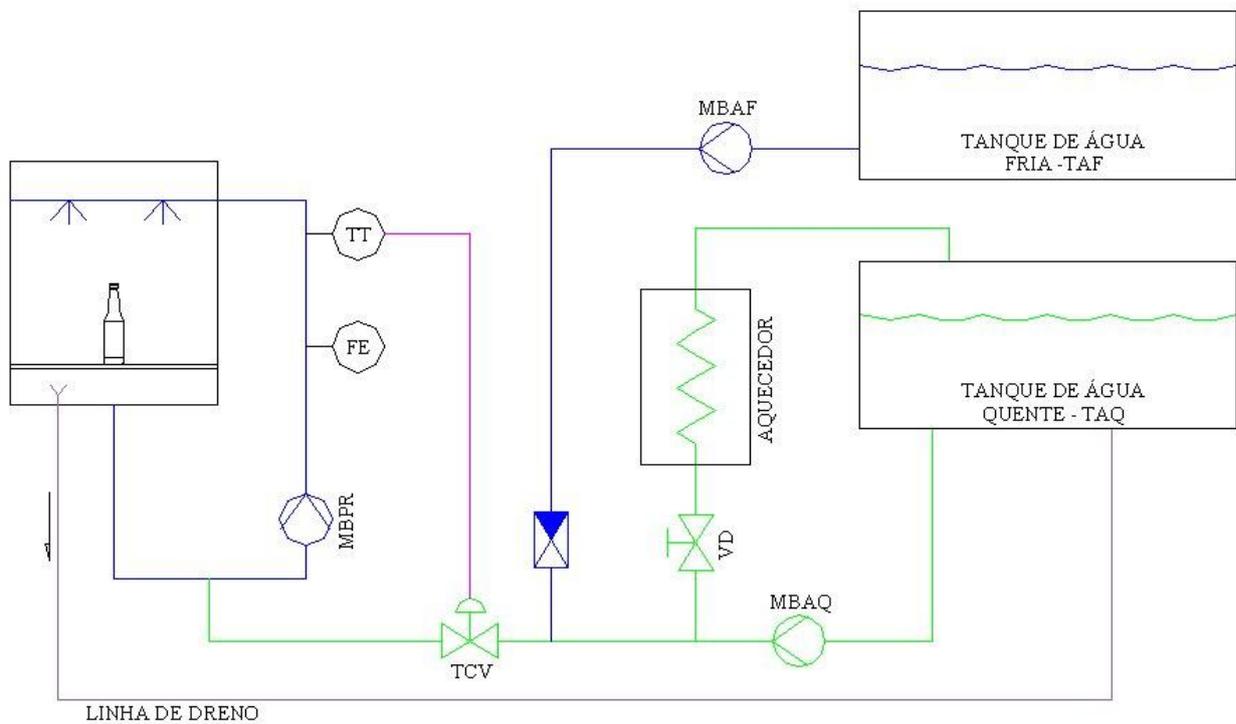


Figura 4.1. Fluxograma da bancada construída.

A bancada é provida de um depósito razoavelmente grande de energia, na forma de um tanque de água quente (TAQ), tal como a máquina real. Esta água é aquecida por meio de aquecedores elétricos, que é a forma mais simples encontrada para o aquecimento este volume, posto que energia elétrica é abundante no seu local de instalação.

As águas quente e fria são bombeadas e injetadas de forma controlada na sucção da bomba principal de molhamento (MBPR). O controle é feito através de uma válvula de controle tipo diafragma (TCV). Desta forma, além de conseguir um controle preciso do valor de temperatura, pode-se simular todas as zonas de aquecimento e de processo apenas alterando-se o valor a ser perseguido pela válvula.

Por exemplo, se uma zona possui a duração de 5 minutos e um banho de 50°C, a válvula irá manter a temperatura desejada pelo tempo prescrito. Após, a válvula lê o próximo valor, que representa da próxima zona (por exemplo, 60°C) e abre de forma a que a mudança seja rápida e controlada. Para o vasilhame é como se o mesmo tivesse passado para a próxima zona.

Para as zonas de resfriamento, a bancada é provida de um sistema similar, ou seja, um tanque de água fresca (TAF) com bombeamento controlado (MBAF) na sucção da bomba principal.

A bomba principal possui um pequeno tanque de onde bombeia a água para o sistema de esguichamento (molhamento), acima das garrafas. Toda a água quente e fria injetada na sua sucção transbordará este pequeno tanque e será recolhida por um depósito de água, para que a mesma possa ser reaproveitada nos próximos testes. Segue a foto do protótipo na Figura 4.2.



Figura 4.2. Vista lateral do protótipo.

A bancada é formulada com o mesmo sistema de molhamento (esguichos ou sprays) da máquina real. A distância dos esguichos em relação às garrafas, bem como a vazão e pressão adotada nos esguichos, são as mesmas utilizadas na máquina real.

Os esguichos são compostos por bicos plásticos que pulverizam a água em forma de um cone cheio, com ângulo de abertura de 60° .

As garrafas são apoiadas em esteira plástica de polipropileno reforçado, a mesma utilizada nas máquinas reais, para garantir a igualdade na condição do apoio do vasilhame.

Conforme pode ser visto na Figura 4.2, a bancada é construída com dois andares, tal como a máquina real. Isto tem por fim observar se há diferenças na pasteurização entre os dois pisos, já que a água esguichada perde parte de sua energia ao passar pelas garrafas no piso superior, além de a forma de molhamento da água passando através da esteira plástica ser diferente.



Figura 4.3. Garrafas em testes (piso inferior).

A Figura 4.4 mostra uma foto do tipo de esguicho utilizado:



Figura 4.4. Bico de spray, para cone cheio com ângulo de abertura de 60°.



Figura 4.5. Bombas: de água quente, de água fria e bomba principal (da esquerda para a direita).

4.1.2 Instrumentação e Controle da Bancada

A bancada possui medidor de vazão (FE) para a bomba principal para garantir que sempre se esteja trabalhando acima do ponto de vazão mínima para desconsiderar a resistência térmica externa à garrafa (conforme Capítulo 3). A vazão adotada é um valor proporcional à vazão da máquina real, ajustada para a área de tratamento do protótipo.

As válvulas de injeção de água quente e fria são controladas através da comparação do valor de *setpoint* do sistema com o valor lido no medidor de temperatura na entrada do sistema de esguichos (TT). Este medidor é do tipo PT-100 com ligação à três fios. O tanque de água quente é aquecido por resistências também até uma temperatura de 85°C.

As válvulas de controle também são ajustadas quanto ao seu sistema de PID (valores proporcional, integral e derivativo) para que o controle da temperatura do banho seja o mais preciso. Além disto, o PID deve garantir que sempre que o *setpoint* mudar, a alteração ocorra com o mínimo de variação indesejadas, como *overshooting* (desvios indesejados em relação à variável de controle).

Todos estes controles são agrupados em um software de controle, desenvolvido especialmente para esta bancada, mostrada na Figura 4.6.

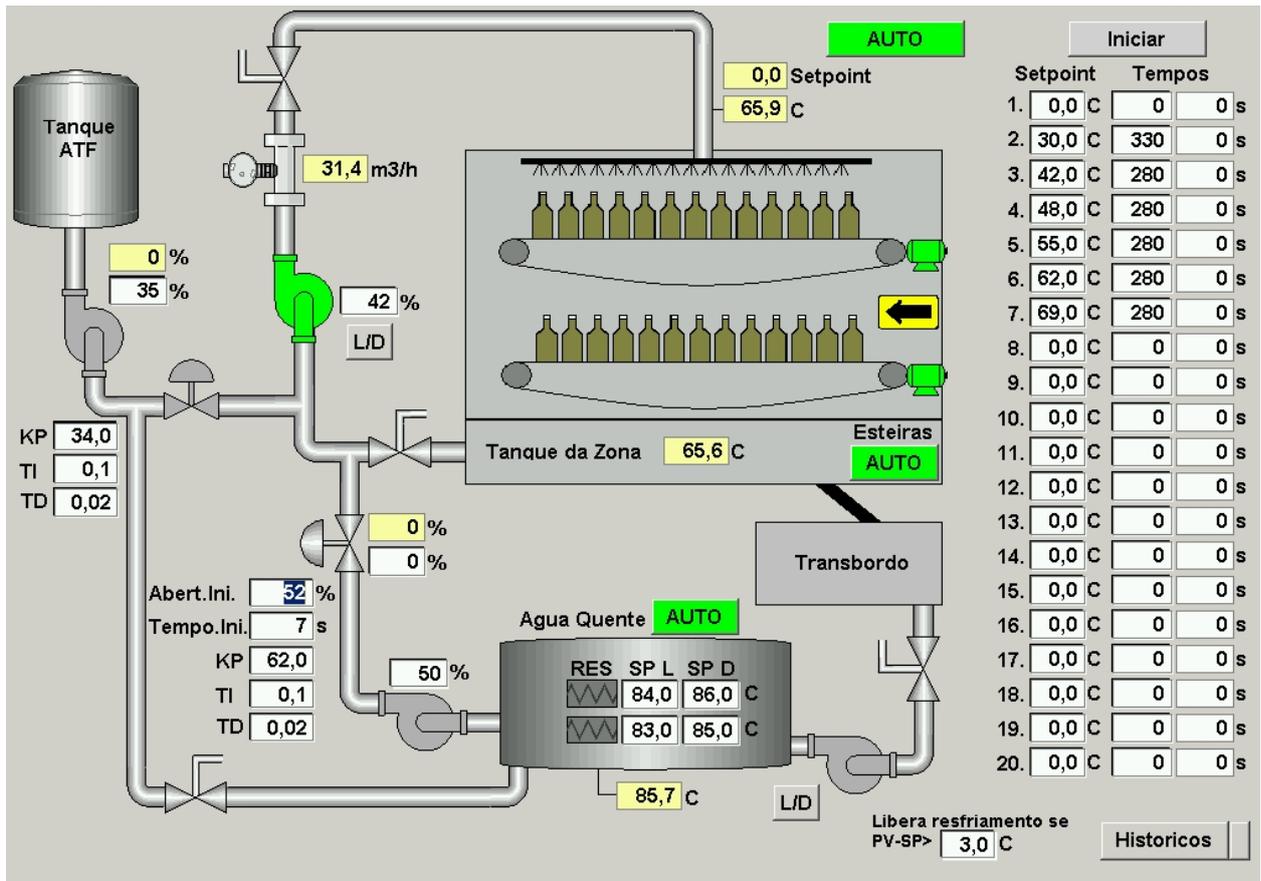


Figura 4.6. Tela do sistema de controle da bancada do pasteurizador.

À direita da tela, pode ser observado que é possível inserir as temperaturas e tempos de cada zona da máquina real e a bancada os executa de forma seqüencial, garantindo a simulação do processo inteiro.

O trabalho de programação do software de controle e os materiais e mão-de-obra para a fabricação da bancada foram realizados pela Ziemann-Liess Máquinas e Equipamentos Ltda.

4.1.3 Medição do Vasilhame

No Capítulo 2 é citado que a medição deve ser realizada no ponto mais frio do vasilhame. Isto é feito para garantir que a quantidade de Unidades de Pasteurização mínima desejada seja atendida em todos os pontos do vasilhame, pois se é garantida no ponto mais frio certamente o estará em todos os outros.

O ponto frio é tomado como estando sempre no eixo central do vasilhame e o mais próximo do fundo do vasilhame. As cervejarias costumam medir a uma distância máxima de 30mm do fundo, pois nesta região até o fundo físico é considerado que não há variações significativas de temperatura.

O equipamento utilizado para a medição na bancada é o mesmo utilizado nas cervejarias, onde é conhecido como termógrafo (Figura 4.7). Trata-se de uma haste metálica fina inserida no vasilhame, até o ponto de medição, conectada a uma central acoplada que envia os sinais, via ondas de rádio, em tempo real para um receptor conectado a um PC.



Figura 4.7. Termógrafo para medição da temperatura no vasilhame.

O medidor também possui uma haste externa que permite a leitura da temperatura do banho próxima há garrafa. A haste de medição interna é do tipo RTD com ligação à 4 fios e a haste externa é do tipo RTD com ligação há 2 fios.

O aparelho já possui uma calibragem de fábrica, com as seguintes características (AMG 2006):

- Faixa de operação: -10°C até 70°C
- Incerteza de medição: $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
- Resolução: $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$

A Figura 4.8 mostra o esquema indicado da montagem da sonda no vasilhame:

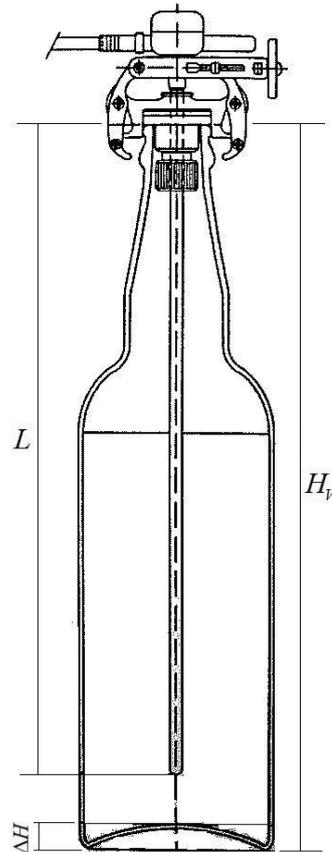


Figura 4.8. Montagem da sonda em um vasilhame de 600ml.

Na Figura 4.8, H_V é a altura do vasilhame, ΔH é a altura do fundo do vasilhame e L é a altura do topo até o ponto de medição (este estando a 30mm do fundo interno).

4.1.4 Fluido Utilizado e Vasilhame

Nos ensaios é utilizada cerveja tipo Pilsen. O vasilhame é preenchido com cerveja até metade do seu pescoço, preservando o espaço de ar padrão (também chamado de *headspace*) adotado nas enchedoras das cervejarias.

Este espaço permite que a pressão no interior do casco se mantenha quase que inalterada. Clerk (1958) cita que para um espaço padrão de 6%, a pressão manométrica se mantém por volta de 1 atm. Porém, caso este espaço seja diminuído, a pressão pode chegar à 6 atm, ocasionando o colapso do vasilhame.

O vasilhame utilizado é o padrão de cerveja (Tipo A), sendo fabricado em vidro pirex, com capacidade líquida de 600ml de produto. Este vasilhame é o escolhido por representar o tipo mais utilizado pelas cervejarias brasileiras.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo os resultados experimentais são apresentados e analisados, incluindo as incertezas de medições. Os valores do coeficiente exponencial f são obtidos e irão alimentar o modelo simplificado apresentado no Capítulo 3, o qual deverá permitir calcular a temperatura e nível de pasteurização de um vasilhame em qualquer ponto do processo. Mais adiante, os resultados são ainda comparados com curvas de pasteurização obtidas em máquinas reais visando uma comprovação efetiva dos resultados.

5.1 PLANEJAMENTO DOS TESTES

Para efetuar o plano de testes, efetua-se uma análise teórica preliminar. As correlações para o número de Nusselt mais utilizadas para a convecção na engenharia possuem a forma:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = C Ra_L^n \quad (5.1)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_{CT} - T_{CS})L^3}{\nu\alpha} \quad (5.2)$$

Todos os adimensionais são relativos aos valores médios para o comprimento característico L . As propriedades são todas relativas ao fluido, para a temperatura de filme $(T_{CT} + T_{CS})/2$. A temperatura T_{CT} é a temperatura da superfície interna (de contato entre sólido e líquido) e T_{CS} é a temperatura do ponto frio. Tipicamente, $n = 1/4$ para regime laminar e $n = 1/3$ para regime turbulento

O fator de correlação f incorpora o coeficiente global de transferência de calor \overline{U} que, por sua vez, incorpora o valor de \overline{h} , referente à convecção natural. O importante a ser observado das equações 5.1 e 5.2 é que, assumindo-se inicialmente a hipóteses de propriedades constantes, o único fator influente é o motor térmico gerado por $(T_{CT} - T_{CS})$.

Desta forma, os testes são planejados tratando cobrir o maior número de casos de diferenciais de temperatura entre o conjunto do vasilhame e a temperatura do banho. Pode-se, então, obter valores de f que permitam discretizar com bastante refinamento o processo térmico apresentado na Figura 3.1.

Os testes serão executados com maior ênfase no aquecimento do vasilhame (onde a T_S é maior do que a $T_{GARRAFA}$). O processo de resfriamento será investigado com menor ênfase, já que nas zonas de resfriamento a quantidade de UP necessária já foi adquirida pelo vasilhame e sua função é apenas esfriar os mesmos para maior segurança na sua manipulação.

Voltando às equações 5.1 e 5.2, as propriedades do produto possuem variação com a temperatura e serão automaticamente tomadas em conta já que o fator f irá englobar todos estes efeitos.

5.2 EXECUÇÃO DOS TESTES

Os testes foram executados colocando-se o termógrafo ao lado de outras garrafas dentro da bancada de testes e a mesma é colocada em funcionamento. Assim que a bancada é ligada, os controles de temperatura já entram em funcionamento de acordo com a lista de patamares a ser executada pelo software de controle.

A bancada só é ligada quando a temperatura do tanque de água quente TAQ estiver na sua temperatura de operação, de 85°C, de forma a garantir que a bancada possui um grande reservatório de energia para a execução dos experimentos. O mesmo acontece com o resfriamento, onde o tanque de água fria (TAF) deve estar completamente cheio.

Após os testes estarem terminados, haverá um arquivo com os registros da evolução da temperatura do banho e da temperatura no ponto frio ao longo do tempo. A equação 3.11 permitirá a obtenção do valor exponencial, isolando-se f , para cada instante de tempo, permitindo a consolidação do modelo. Com os valores em mãos, também é possível conhecer os valores do coeficiente global de transferência de calor, conforme equação 3.21.

5.3 TESTE DE AQUECIMENTO

O primeiro teste submeteu o vasilhame sob análise a um banho com quatro temperaturas diferentes. Cada patamar de temperatura foi aplicada por um mesmo período. Os patamares escolhidos foram os mesmos utilizados em uma máquina real, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Valores Utilizados no Teste 1.

Patamar	Temperatura do banho (T_S)	Tempo cada Patamar
1	30°C	280s
2	40°C	280s
3	50°C	280s
4	60°C	280s

O tempo de 280s foi escolhido por ser um tempo padrão utilizado nas máquinas pasteurizadoras reais. Este tempo foi adotado como referência para a maioria dos testes. A temperatura inicial do vasilhame $T_{CS}(0)$ é de 16,3°C.

O teste foi executado, obtendo-se a curva de aquecimento da Figura 5.1:

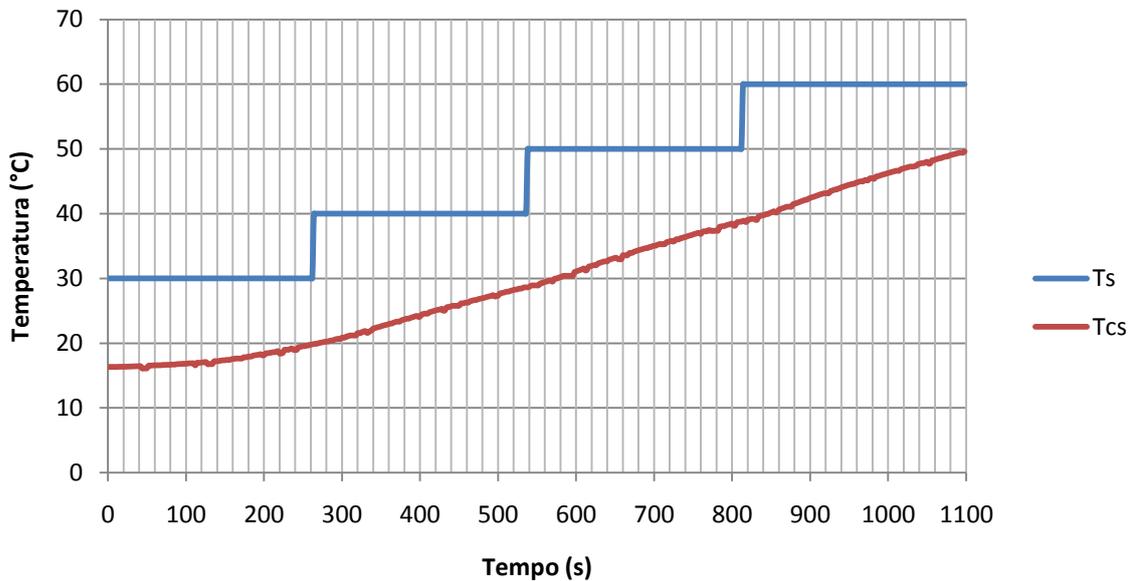


Figura 5.1. Curva de aquecimento do vasilhame (medida no ponto frio).

A curva apresentou um comportamento esperado. Existe uma inércia inicial, até que a taxa de calor que entra no vasilhame comece a afetar o ponto frio e as correntes convectivas se estabelecem. O gráfico acima permite entender porque o tempo de 280s era adotado como um tempo padrão, pois o mesmo permite um aquecimento linear da garrafa, sendo que cada novo patamar permita que o motor térmico seja “reposto”, mantendo a evolução de forma linear, facilitando seu cálculo, principalmente nas máquinas em que não há controle de processo.

O atraso é definido como o tempo desde o início do processo até quando o mesmo comece a influenciar a T_{CS} . Para estabelecer uma referência, define-se o período de atraso como sendo o tempo onde a variação da temperatura do ponto frio não exceda 1°C. Graficamente, é o tempo onde a declividade da curva deste ponto é nula. Neste teste, o tempo de atraso foi de aproximadamente 140s.

O fator f foi calculado, isolando-o apenas e calculando para cada tempo de aquisição do instrumento, conforme mostrado na Figura 5.2.

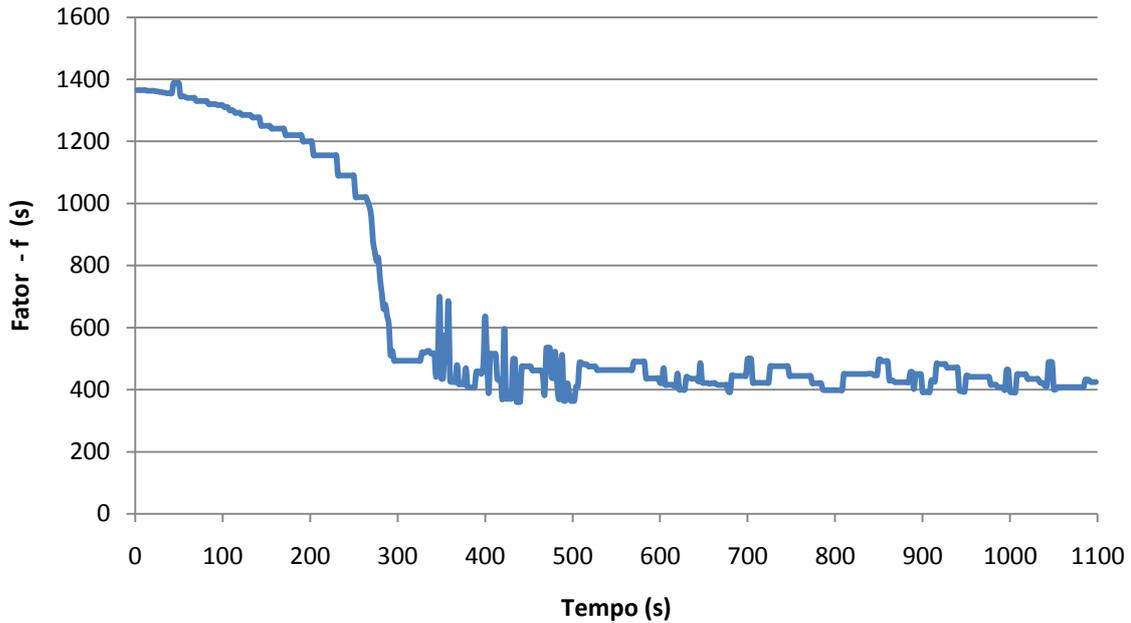


Figura 5.2. Valores do fator f ao longo do Teste 1.

O gráfico 5.2 permite observar que os valores de f iniciam em um valor elevado mantendo-se neste patamar pelo período semelhante ao do atraso, no ponto em análise. Após, seu valor decai bruscamente até uma flutuação em uma faixa constante.

O importante é ressaltar que, no período de maior constância de f , há variações nos valores do diferencial de temperatura. Isto leva a crer que a diferença entre $T_S(t) - T_{CS}(t)$ não implica em uma alteração nos valores. Porém, nota-se que há uma tendência que o valor de f decaia lentamente ao longo de todo o processo, à medida que T_S aumenta.

A conclusão do teste é que a grande influência é devida a *intensidade do banho* e não da temperatura inicial da garrafa.

Visando obter valores representativos de f para a formação posterior de uma tabela, são obtidos os valores médios para cada patamar (\bar{f}). Seguem os resultados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2. Resultados do Teste 1.

Patamar	T_S (°C)	T_{CS} Inicial (°C)	T_{CS} Final (°C)	Tempo (s)	\bar{f} (s)
Período Atraso	30	16,3	17,3	176	1389
1	30	17,3	19,9	104	700
2	40	19,9	28,6	280	481
3	50	28,6	38,9	280	463
4	60	38,9	49,6	280	458

Os valores médios foram testados aplicando-os na equação 3.11 e comparados com os resultados experimentais:

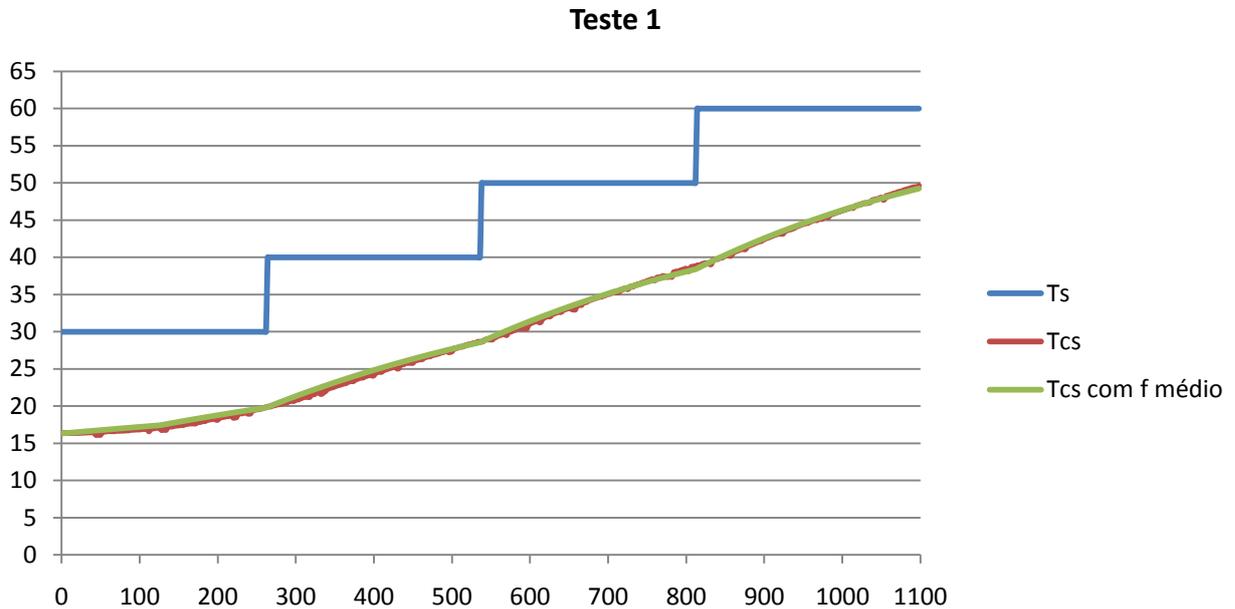


Figura 5.3. Teste 1 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f} .

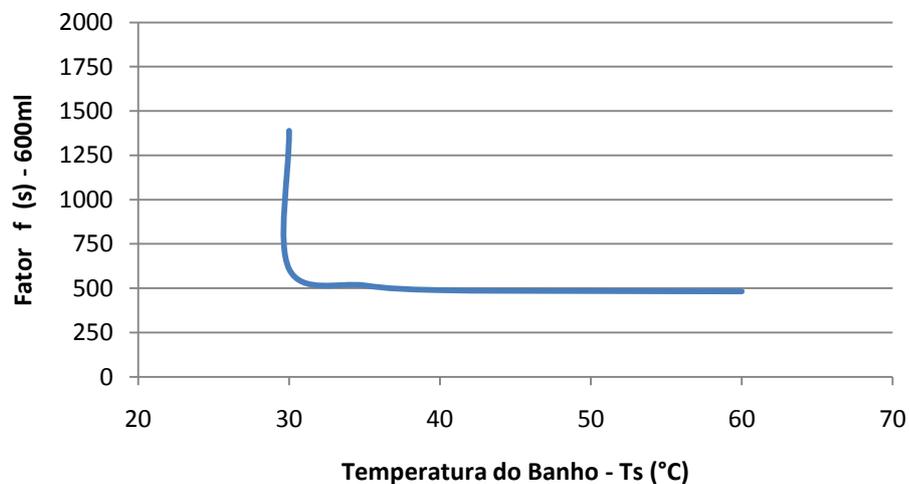


Figura 5.4. Variação de \bar{f} com a temperatura do banho T_s .

Os resultados são satisfatórios, obtendo-se uma boa correlação tanto quantitativa quanto qualitativa, ou seja, a forma da curva pode ser adequadamente representada pela equação 3.11. Assim, o objetivo dos testes seguintes é testar o vasilhame em diferentes condições de forma a consolidar uma tabela com valores de \bar{f} para o fechamento do modelo. Os desvios obtidos durante o teste são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Análise de Desvios do Teste 1.

	Curva calculada com \bar{f}
Desvio Máximo	0,94°C ±0,2
Desvio Padrão	0,198°C

Nota-se que o desvio padrão para todo o processo ficou abaixo da incerteza do instrumento, o que significa que a incerteza da execução do experimento é equivalente à incerteza do instrumento (do sensor de temperatura). Assim, atribui-se os desvios obtidos como apenas inerentes à qualidade de medição do instrumento. Os desvios são considerados baixos e o desvio padrão obtido não alteraria significativamente um resultado de pasteurização, conforme será mostrado ao longo do capítulo.

5.4 TESTE DE AQUECIMENTO – VERIFICAÇÃO DA DEPENDÊNCIA COM O TEMPO

Foram realizados três testes idênticos, apenas variando-se o tempo de cada patamar, de forma a averiguar se o fator f se altera. É esperado que não haja mudanças já que este fator depende das propriedades do vasilhame e da cerveja (com variações pequenas ao longo do tempo) e do patamar de temperatura do banho, e não do diferencial de temperatura.

Tabela 5.4. Valores para os Testes de aquecimento 2, 3 e 4.

Patamar	Temperatura do banho (T_S em °C)	Patamar	Temperatura do banho (T_S em °C)
1	30	8	51
2	33	9	54
3	36	10	57
4	39	11	60
5	42	12	63
6	45	13	66
7	48	14	69

O Teste 2 adotou patamares com duração de 200s, o Teste 3 de 280s e o Teste 4 com duração de 360s. Colocou-se pequenas diferenças de temperatura entre patamares para avaliar se de fato não há alguma relação também com o diferencial de temperatura $T_S(t) - T_{Cs}(t)$, não observado no Teste 1. Cada teste foi executado incorporando um tempo entre suas execuções, para recompor os estados iniciais da bancada e do vasilhame. As curvas de aquecimento obtidas estão mostradas nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7:

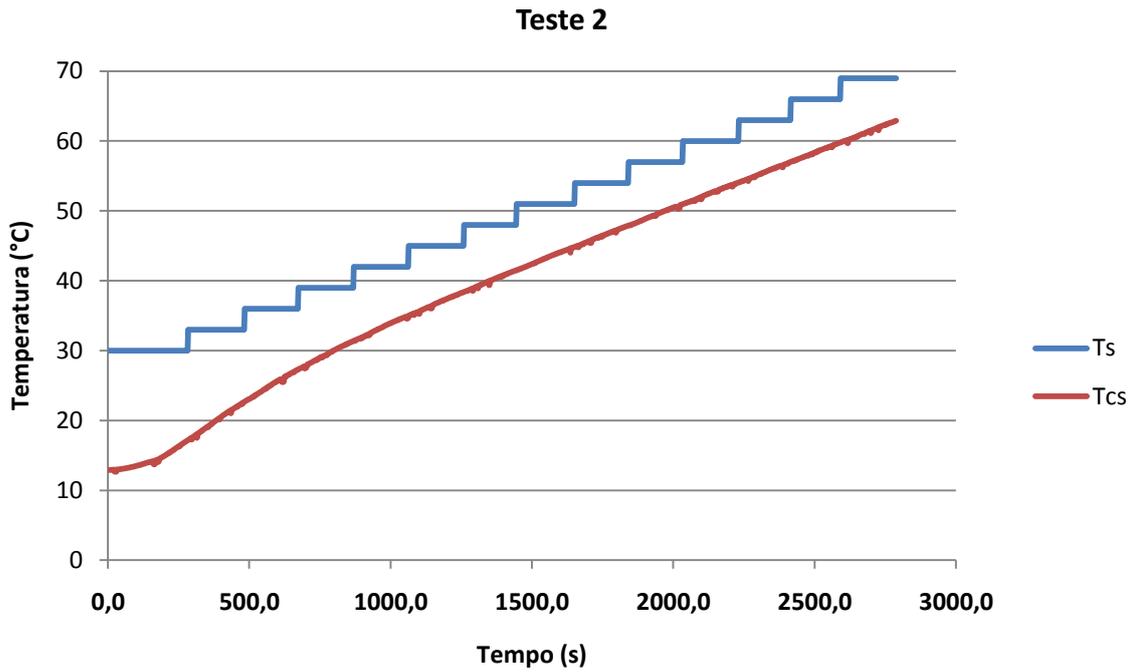


Figura 5.5. Curva de aquecimento para o Teste 2 (tempo de 200s por patamar).

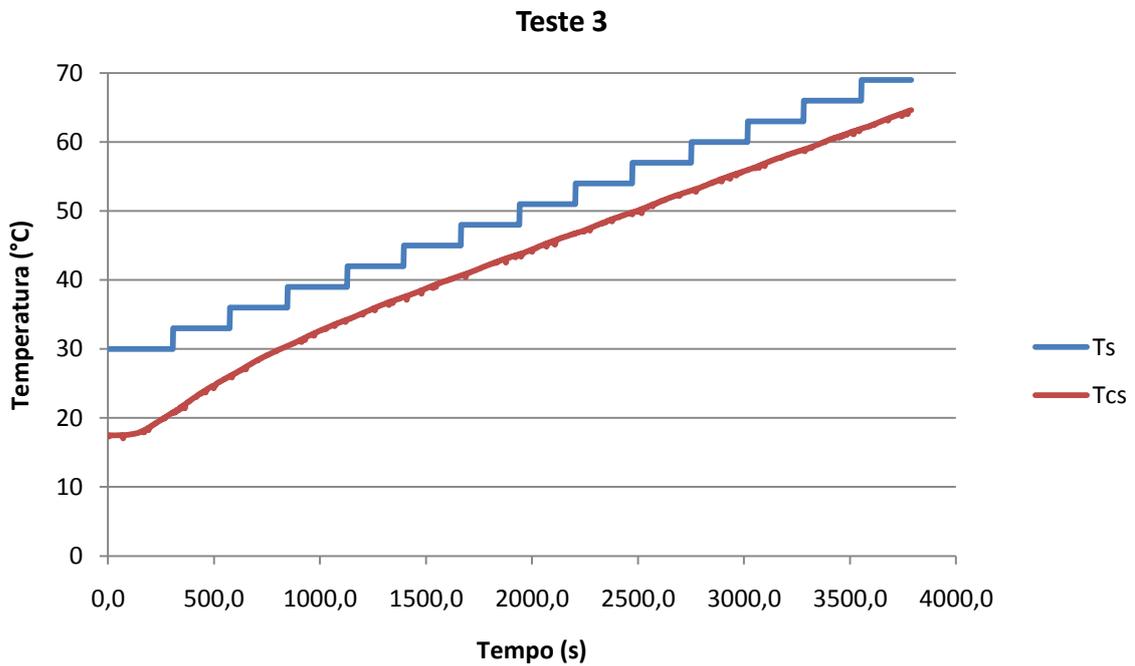


Figura 5.6. Curva de aquecimento para o Teste 3 (tempo de 280s por patamar).

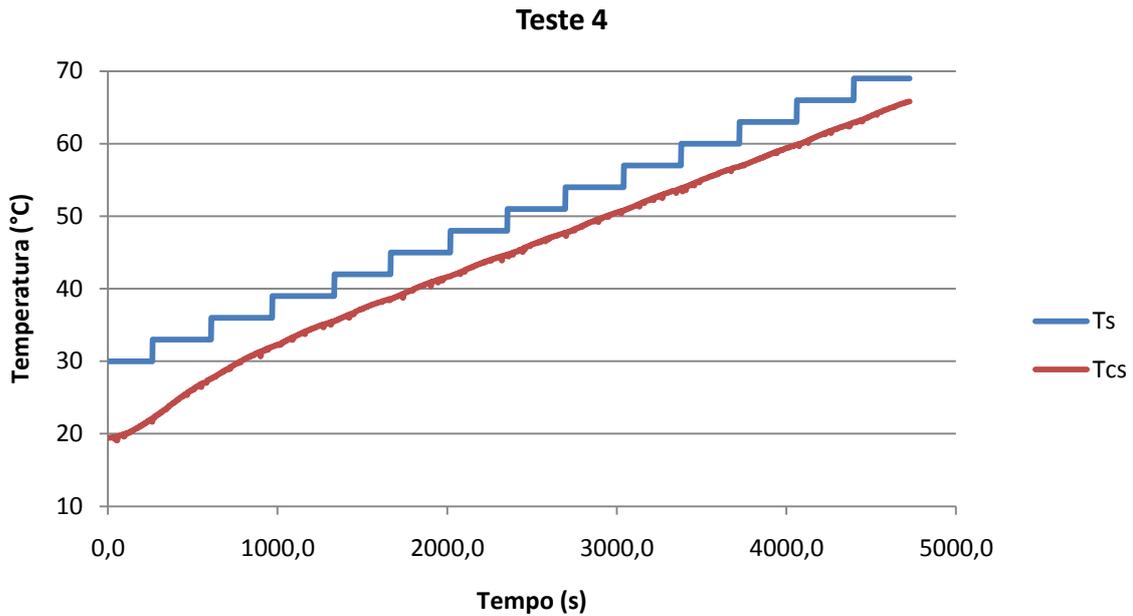


Figura 5.7. Curva de aquecimento para o Teste 4 (tempo de 360s por patamar).

Os gráficos 5.5 a 5.7 mostram um mesmo comportamento, previamente observado no gráfico 5.3 do Teste 1, porém as pequenas variações entre as temperaturas do patamares faz com que a garrafa tenha maior facilidade para T_{CS} alcançar à T_S . Isto se observa por uma curvatura pronunciada após o período de inércia até se estabilizar novamente em uma curva de aquecimento com declividade constante.

O procedimento para a obtenção dos valores de \bar{f} foi o mesmo do Teste 1. Novamente, os valores de \bar{f} ficaram dependente apenas da faixa da temperatura do banho de cada patamar, sendo seus valores praticamente idênticos nos três testes, conforme gráfico 5.8.

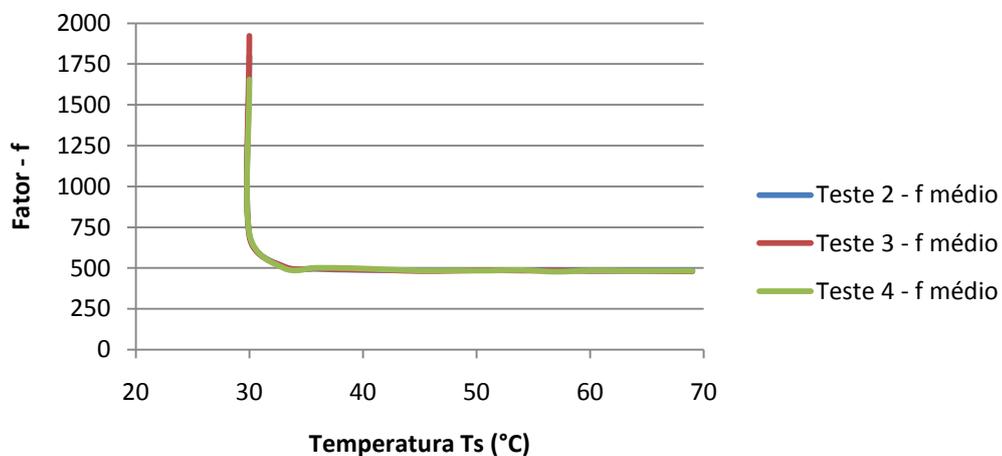


Figura 5.8. Variação de \bar{f} com a temperatura do banho T_S .

Tabela 5.5. Resultados do Teste 2, 3 e 4.

Patamar	T_s (°C)	Teste 2 (280s)		Teste 3 (200s)		Teste 4 (360s)	
		$T_s(t) - T_{cs}(t)$ (°C)	\bar{f} (s)	$T_s(t) - T_{cs}(t)$ (°C)	\bar{f} (s)	$T_s(t) - T_{cs}(t)$ (°C)	\bar{f} (s)
Inércia	30	12,5	1800	17,09	1923	10,58	1655
1	30	12	701	16,08	697	9,87	710
2	33	12,15	510	15,79	511	10,82	500
3	36	9,93	495	13,29	498	8,36	501
4	39	8,54	490	11,66	492	6,98	499
5	42	7,74	488	10,58	488	6,42	491
6	45	7,46	488	9,99	482	6,37	485
7	48	7,33	487	9,59	484	6,23	485
8	51	7,23	487	9,47	487	6,26	484
9	54	7,22	487	9,12	485	6,25	487
10	57	7,47	488	9,09	485	6,21	477
11	60	7,03	484	9,01	483	6,11	485
12	63	7,07	484	8,9	484	6,09	483
13	66	7,08	485	8,95	482	6,13	483
14	69	7,06	484	9,17	480	6,06	482

A Tabela 5.5 e o gráfico 5.8 permitem observar valores de \bar{f} muito próximos entre os três testes, mesmo que cada teste tenha $T_s(t) - T_{cs}(t)$ e tempos de duração diferentes. Isto ocorreu preferencialmente após o período de atraso. Investigando os valores de \bar{f} , há de fato uma relação direta com T_s , conforme observado no Teste 1. Esta conclusão também foi obtida por Larsen (2006). Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, seguem os resultados da equação 3-12 com os valores obtidos para \bar{f} .

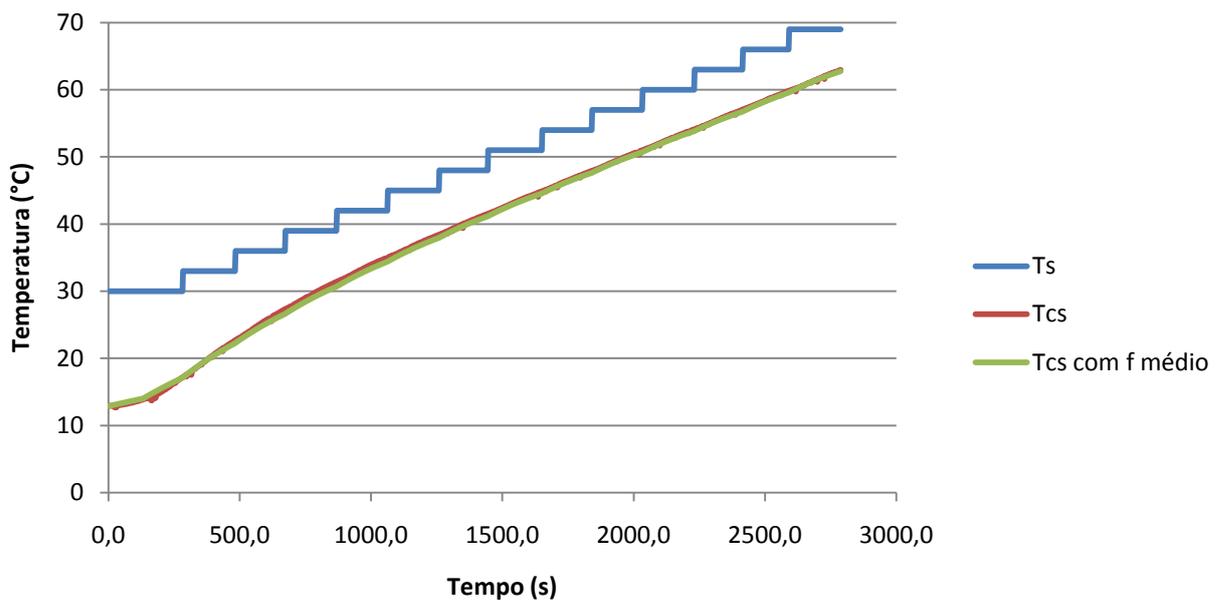


Figura 5.9. Teste 2 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f} .

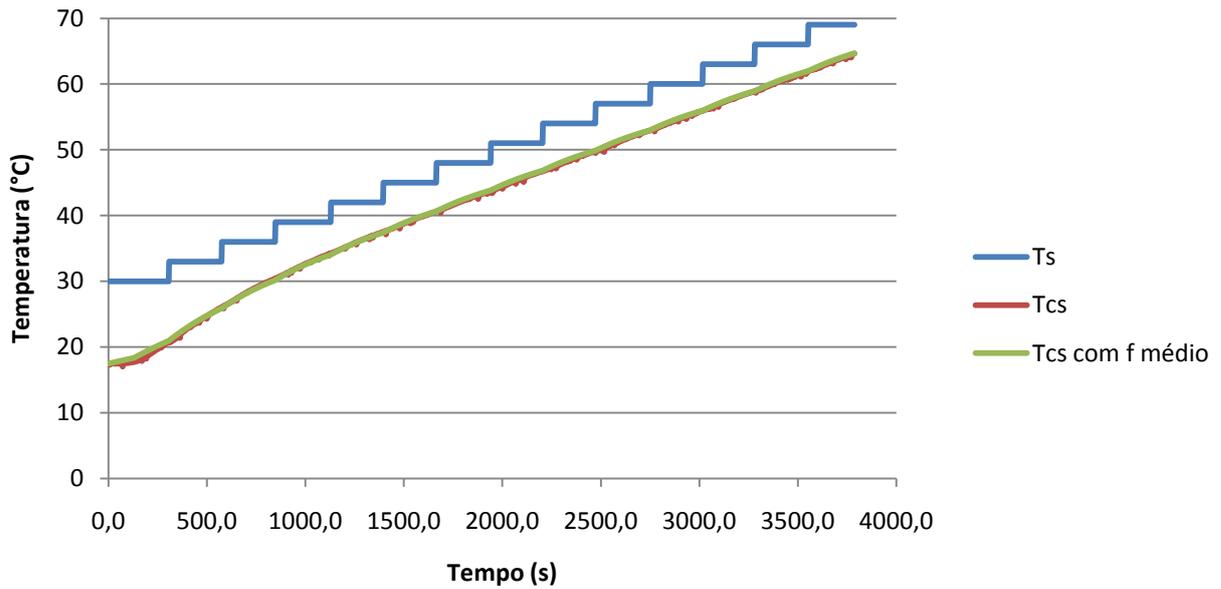


Figura 5.10. Teste 3 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f} .

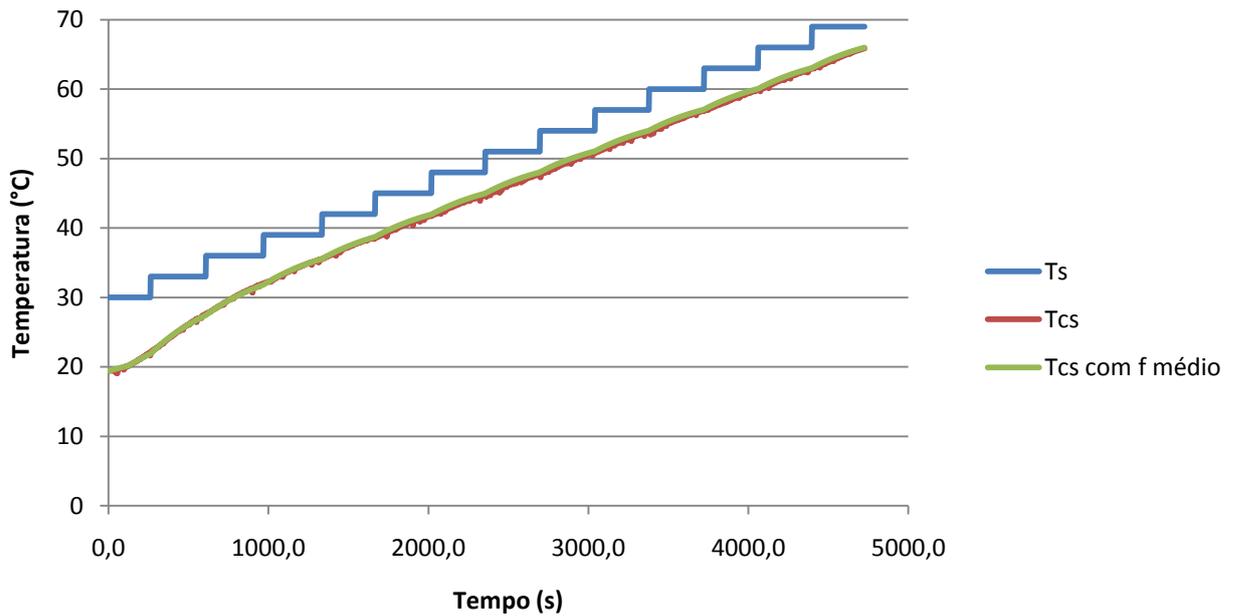


Figura 5.11. Teste 4 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f} .

Ainda, \bar{f} é uma constante de tempo característico das propriedades do vasilhame e do produto, não sendo esperada sua variação conforme o tempo de exposição. Isto foi o que se observou na Tabela 5.5, onde os testes possuíram tempos de patamares diferentes em 30% (em relação ao padrão de 280s) e os valores da constante de tempo foram praticamente os mesmos.

A Tabela 5.6 mostra as análises dos desvios de cada teste:

Tabela 5.6. Análise de Desvios dos Testes 2, 3 e 4.

	Teste 2	Teste 3	Teste 4
	Curva calculada com \bar{f}	Curva calculada com \bar{f}	Curva calculada com \bar{f}
Desvio Máximo	1,04°C±0,2	1,1°C±0,2	0,93°C±0,2
Desvio Padrão	0,18°C	0,15°C	0,17°C

As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, que comparam a curva de aquecimento calculada com a experimental, mostram uma boa proximidade comprovada pelo cálculo dos desvios listados na Tabela 5.6. As grandezas destes desvios são consideradas adequados para o cálculo de pasteurização.

Os picos de desvio ocorreram no início do processo, mais precisamente na transição entre a inércia e aquecimento comportado (declividade constante). Estes picos de desvio foram amortecidos ao longo do tempo, o que resultou no valor bastante reduzido do desvio padrão.

5.5 TESTES DE AQUECIMENTO – CONSOLIDAÇÃO DOS VALORES DE \bar{f}

Os testes anteriores proveram valores para o fator exponencial médio \bar{f} muito semelhantes, o que já permitiria a elaboração de uma tabela com valores padrões para o vasilhame de 600ml.

De forma a consolidar estas informações, foram efetuados dois testes adicionais de aquecimento, semelhantes aos anteriores, porém os patamares de temperatura dos banhos evoluem sem uma ordem pré-definida, com o fim de diversificar o máximo possível de situações garantindo que os fatores \bar{f} podem mesmo ser tabelados.

Foram planejados os Teste 5 e o Teste 6, conforme detalhados na Tabela 5.7:

Tabela 5.7. Valores para os Teste de aquecimento 5 e 6.

Patamar	Tempo de cada Patamar (s)	Temperatura do banho (T _S em °C)	
		Teste 5	Teste 6
1	280	30	31
2	280	42	38
3	280	49	44
4	280	57	50,5
5	280	65,5	57,5
6	280	-	63,5

O procedimento para a obtenção dos valores de \bar{f} foi o mesmo dos testes anteriores. O gráfico 5.12 mostra o comportamento de \bar{f} para cada teste. A temperatura inicial da garrafa para ambos os testes é de 18,8°C:

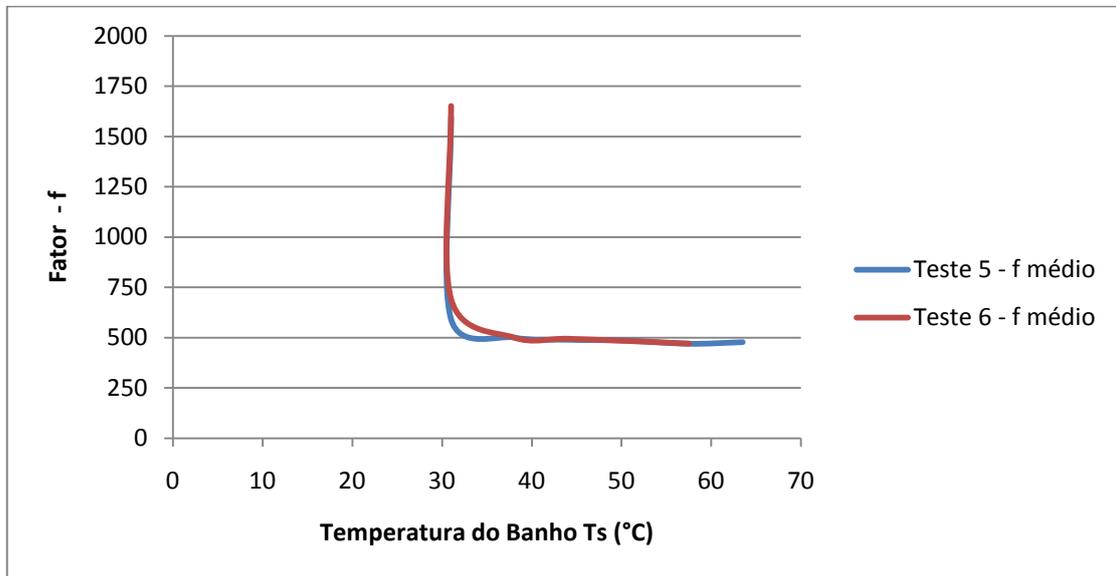


Figura 5.12. Variação de \bar{f} com a temperatura do banho T_s .

Tabela 5.8. Resultados do Teste 5 e 6.

Patamar	Teste 5			Teste 6		
	T_s (°C)	$T_s(t) - T_{CS}(t)$ (°C)	\bar{f} (s)	T_s (°C)	$T_s(t) - T_{CS}(t)$ (°C)	\bar{f} (s)
Inércia	30	11,42	1651	31	11,96	1594
1	30	10,8	692	31	10,94	592
2	42	19,49	501	38	14,61	501
3	49	19,1	495	44	14,64	490
4	57	18,64	484	50,5	14,73	486
5	65,5	18,27	471	57,5	15,21	470
6	-	-	-	63,5	14,42	478

Os valores do fator exponencial para os testes 5 e 6 foram, novamente, praticamente os mesmos obtidos nos testes anteriores. Nota-se apenas a ocorrência de uma variação maior dos valores no período de atraso. Apresenta-se nas Figuras 5.13 e 5.14 as curvas de aquecimento obtidas nos testes:

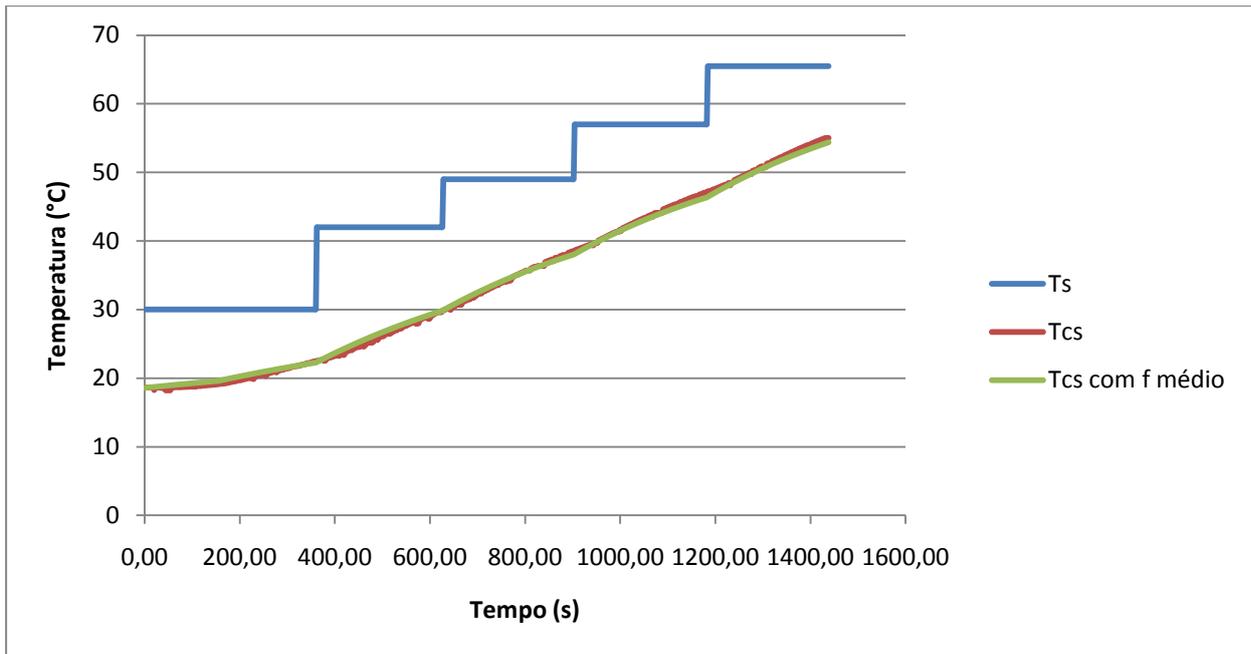


Figura 5.13. Teste 5 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f} .

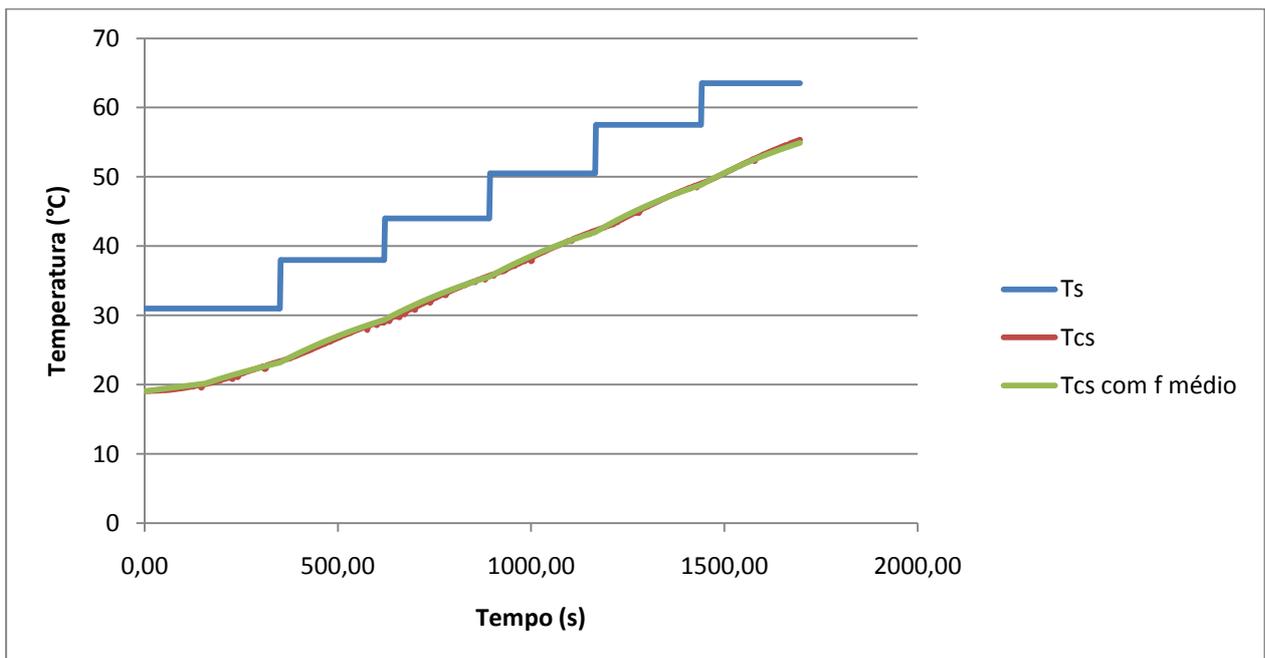


Figura 5.14. Teste 6 - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f} .

Devido à constância obtida nos resultados até este ponto, não foram executados mais testes de aquecimento. Os resultados obtidos em cada teste devem formar uma tabela e os mesmos colocados à prova, aplicando-os ao modelo da equação 3.11, simulando curvas obtidas em máquinas reais. Para concluir o estudo dos presentes testes, apresenta-se a análise de desvios, na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Análise de Desvios dos Testes 5 e 6.

	Teste 5	Teste 6
	Curva calculada com \bar{f}	Curva calculada com \bar{f}
Desvio Máximo	0,96°C±0,2	0,78°C±0,2
Desvio Padrão	0,21°C	0,13°C

5.6 TESTES DE RESFRIAMENTO

Antes da comparação dos valores de \bar{f} com curvas de máquinas reais, foram obtidos alguns coeficientes para resfriamento das garrafas de 600ml. O resfriamento é a parte menos crítica do processo, já que ele apenas deve apenas resfriar os vasilhames até uma temperatura de saída que não ofereça riscos aos operadores das máquinas.

Se os vasilhames deixassem o túnel pasteurizador à temperaturas relativamente altas (maiores do que 45°C) os mesmos estariam sujeitos ao colapso, já que há uma pressão externa mecânica de contato entre os vasilhames dentro da linha de envase, e uma pressão interna, devido ao gás carbônico presente na bebida.

Assim, o teste foi conduzido visando reproduzir os banhos de resfriamento após a pasteurização (Figura 3.1). O vasilhame foi inicialmente aquecido até a temperatura de 61°C e posteriormente passa por dois banhos de resfriamento. Assim, neste teste a garrafa não apresentou o período de atraso característico, mas a intenção foi de fato reproduzir as condições de resfriamento da máquina e não comparar o aquecimento com o resfriamento diretamente.

Tabela 5.10. Valores do Teste de resfriamento

Patamar	Temperatura do banho (T _S)	Tempo cada Patamar
1	48°C	280s
2	38°C	280s

Os valores de \bar{f} foram novamente obtidos da mesma forma que nos testes de aquecimento. Seus valores diferiram dos valores de aquecimento para o mesmo patamar, sendo substancialmente menores. Pela equação 3.19, quanto menor o valor de f maior o valor do coeficiente global de transferência de calor. Isto sugere que, ao inverter-se o processo de aquecimento para resfriamento, houve um desordenamento das correntes convectivas, que facilitou a mistura das porções de fluido a diferentes temperaturas no interior da garrafa, aumentando-se assim a troca térmica. Os valores de f obtidos são mostrados 5.15, a seguir:

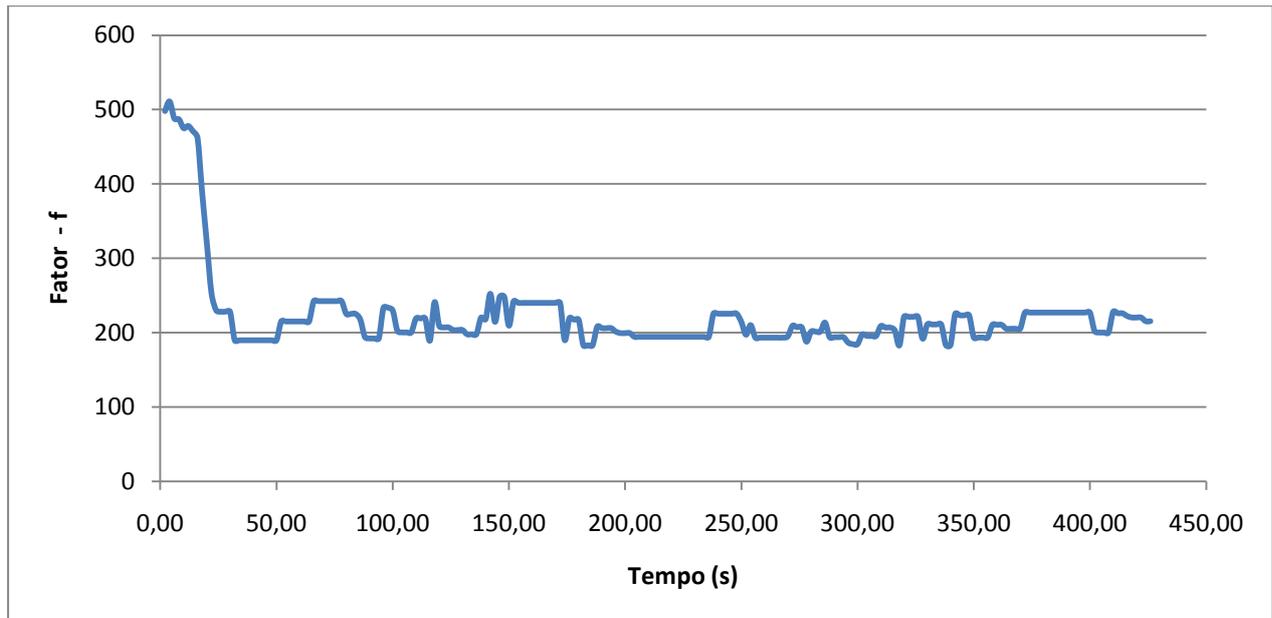


Figura 5.15. Valores do fator f ao longo do teste de resfriamento.

Observa-se que os valores de iniciaram próximo ao valor de f obtido para o patamar de temperatura de banho de 60°C e decaiu até uma flutuação em torno de um valor constante. Foram obtidos os valores médios (\bar{f}), obtendo-se os seguintes resultados.

Tabela 5.11. Resultados do Teste de Resfriamento.

Patamar	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{CS} Inicial ($^{\circ}\text{C}$)	T_{CS} Final ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo (s)	\bar{f} (s)
Período Atraso	48	61,1	60,1	38	481
1	48	60,1	52,8	242	228
2	38	52,8	43,4	280	218

O valor do período de atraso também foi menor, pois o processo de aquecimento já havia gerado um campo de velocidades, mantendo o fluido em movimento. Isto também explica que o valor dos fatores obtidos não caracterizou um período de transição, conforme observado no aquecimento. O mesmo deve existir, porém seu período de duração deve tender a ser muito curto. Os valores do fator para os períodos de resfriamento são muito próximos, mesmo havendo diferenças na temperatura dos patamares, ao contrário do observado no aquecimento.

Neste caso, também se pode efetuar uma organização de valores de \bar{f} em uma tabela, para utilização no modelo proposto. Na Figura 5.16 está a curva de resfriamento da garrafa.

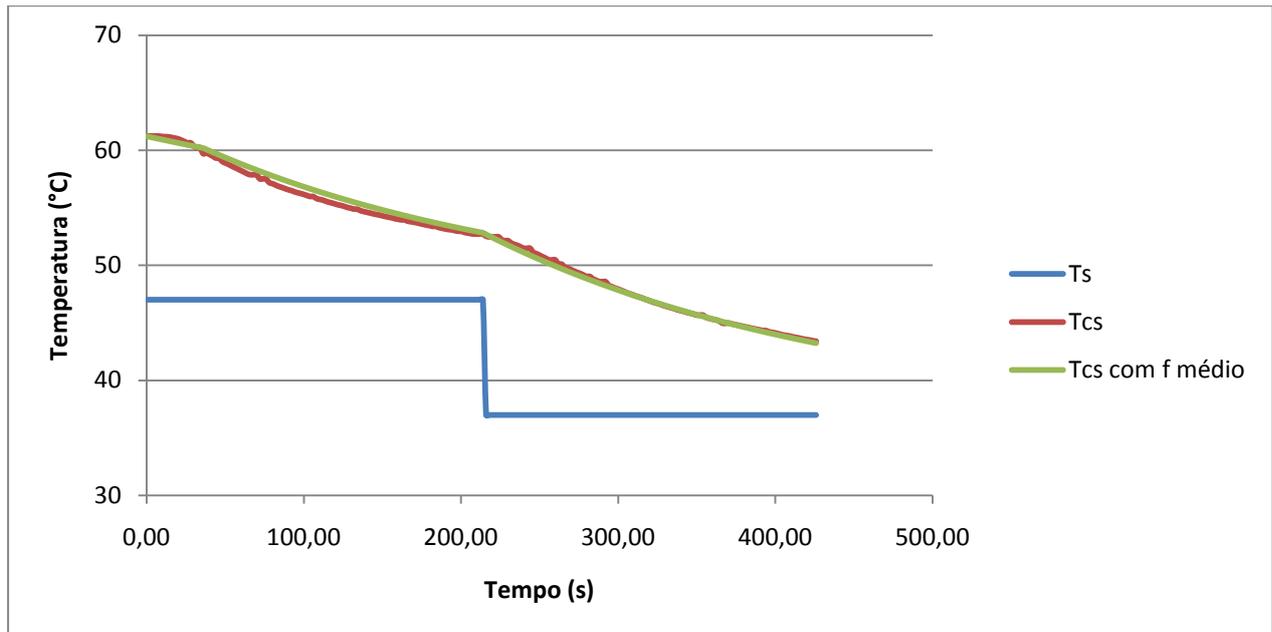


Figura 5.16. Teste Resfriamento - Resultados do modelo teórico, utilizando valores de \bar{f} .

Os valores dos desvios entre o modelo calculado e os dados experimentais são mostrados a seguir:

Tabela 5.12. Análise de Desvios do Teste de Resfriamento.

	Curva calculada com \bar{f}
Desvio Máximo	0,74°C±0,2
Desvio Padrão	0,22°C

5.7 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a execução dos testes, os resultados mostraram que o modelo físico simplificado, apresentado no Capítulo 3, pode ser implementado juntamente com uma tabela de coeficientes, característico para cada tipo de vasilhame, com desvios muito baixos, obtendo uma fidelidade suficiente para garantir o processo de pasteurização. Neste trabalho, o modelo está completo com os dados para o vasilhame de 600ml.

Entretanto, alguns comportamentos observados durante os testes merecem uma discussão mais aprofundada, de forma a satisfazer o objetivo de uma compreensão mais clara dos fenômenos que ocorrem dentro do túnel pasteurizador, não atendo-se somente a uma obtenção de valores numéricos.

5.7.1 Sobre os Valores de f

Os valores médios do fator exponencial obtidos em todos os testes foram agrupados de forma a montar uma tabela de valores que permita ser introduzida em um software de controle como uma receita, para cada vasilhame. Neste caso, que trabalha-se apenas com o vasilhame de 600ml, os valores foram agrupados originando a Tabela 5.13.

Tabela 5.13. Fator Exponencial Médio para vasilhame de 600ml.

Intensidade do Banho	\bar{f}
Inércia	1679s
Transição	608s
30-40°C	516s
40-50°C	489s
50-60°C	484s
60-70°C	482s
Resfriamento	223s

O principal objetivo deste trabalho foi atingido, onde um modelo teórico simples foi apresentado no Capítulo 3 e seus coeficientes de correlação entre a temperatura do banho T_S e a temperatura do ponto frio da garrafa, T_{CS} , foram obtidos, com um grau de incerteza baixo o suficiente o processo em estudo. Focando a atenção nos fatores de aquecimento, a Tabela 5.13 divide o processo basicamente em três etapas, conforme o gráfico 5.17.

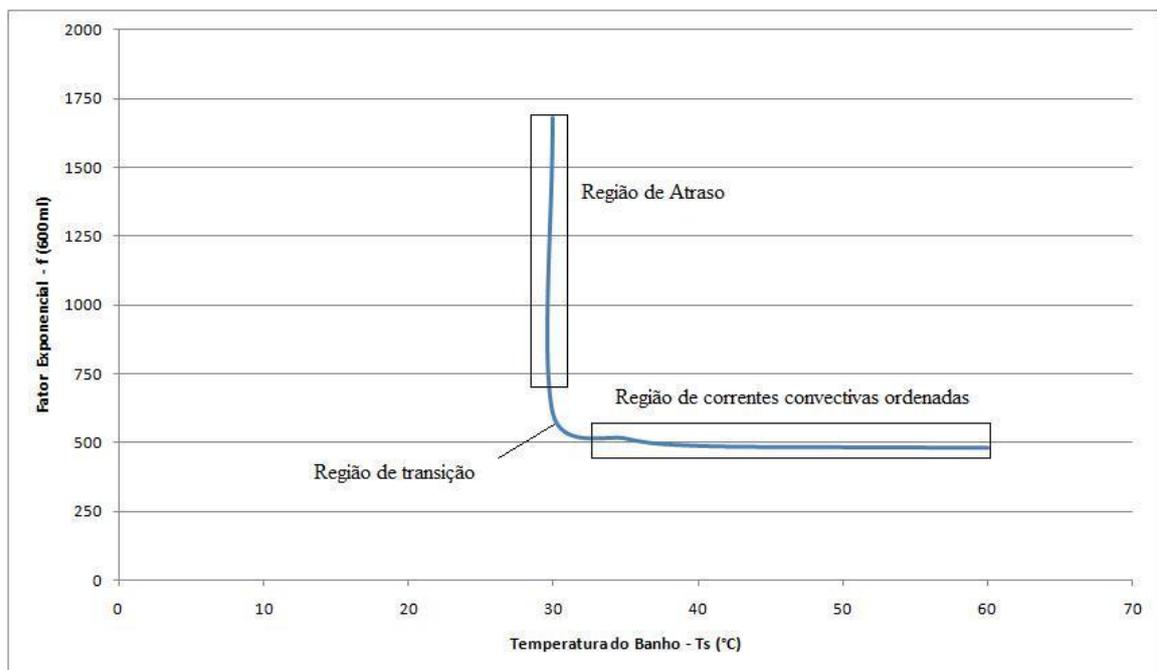


Figura 5.17. Fator \bar{f} - Regiões características.

A) Região de Atraso (média de 0 a 140s)

Nesta região os valores de f são muito altos. Do Capítulo 3, foi estabelecido que:

$$f = \frac{(\rho C_P V)_{SIST}}{\bar{U}A} = \frac{m_{liq} C_{liq} + m_{vas} C_{vas}}{\bar{U}A} \quad (5.3)$$

A equação acima é a equação 3.20. Pode-se levar a crer que nesta região os valores do coeficiente global de transferência de calor \bar{U} para o ponto frio é muito baixo. Porém nesta região o equacionamento não representa um significado físico real, sendo apenas uma curva de ajuste matemático. Isto porque o modelo simplificado é baseado em uma formulação similar à capacitância global, onde não haveria um período de atraso (já que o domínio deve ser considerado isotérmico, nesta modelagem).

Pode-se interpretar os altos valores de f como uma indicação de que o vasilhame absorve boa parte da energia fornecida nos primeiros instantes, sendo a região do domínio com variação mais significativa de temperatura.

Segundo Bejan (1995), no início de um processo de convecção natural de um líquido enclausurado, boa parte da entalpia que passa pelo vidro é transportada diretamente pelo jato $\rho_{liq} w \delta_T$ (onde ρ_{liq} é o peso específico do líquido, w é a velocidade na direção axial e δ_T é a espessura da camada limite). Assim o calor, enquanto não há a formação de correntes convectivas naturais, somente pode chegar ao ponto frio através da difusão térmica através da cerveja, que é um processo lento.

B) Região de Transição (média de 140 a 200s)

Entende-se como a região onde as correntes convectivas começam a se ordenar, de acordo com a geometria da garrafa. A energia passada inicialmente pelo vidro à camada limite do fluido junto à parede começa a chegar ao ponto frio. Na região de atraso, admite-se que haja apenas convecção natural perto da parede (camada limite). Já no período de transição, pode-se supor que a região da parede possua uma convecção mais intensa e que no núcleo já exista uma movimentação maior da massa do fluido, com baixa velocidade (preservando a quantidade de movimento do sistema).

Nesta região, o coeficiente de transferência de calor por convecção começa a tornar-se uma parcela cada vez mais importante do coeficiente global de transferência de calor. Nesta região, considera-se que a modelagem já permita a obtenção de valores reais de \bar{U} .

C) Região de Convecção Ordenada

Nesta região, as correntes convectivas se estabelecem de acordo com a geometria do vasilhame e, pela regularidade de f , indicam um comportamento inercial que faz com que, mesmo com a diminuição do diferencial de temperatura, elas mantenham a mesma intensidade. Por isso, sugere-se que o valor de \bar{U} que seja constante (novamente, devido à constância de f).

É certo que algumas das variações do fator exponencial f sejam devidas a mudanças no valor das propriedades da cerveja, que é dependente da temperatura. Porém, já que as propriedades físicas da cerveja são praticamente idênticas às da água (Clerk 1958), a variação do calor específico da água entre 20°C e 60°C é de apenas 0,12%, podendo ser desconsiderada.

5.7.2 Valores do Coeficiente Global de Transferência de Calor

Neste ponto do trabalho, tem-se posse dos valores de f para o vasilhame em estudo. São obtidos, então, os valores do coeficiente global de transferência de calor \bar{U} , apresentados na Tabela 5.15. Isto é uma resposta direta da equação 5.3, isolando-se \bar{U} , para cada faixa de \bar{f} da Tabela 5.13. A Tabela 5.14 apresenta as propriedades do vasilhame em estudo.

Tabela 5.14. Propriedades para o Vasilhame de 600ml.

Massa	0,5kg	Volume total	660ml
Diâmetro médio	75mm	Área de troca térmica	0,046m ²
Altura total	280mm	Material	Vidro
Altura útil	225mm	Calor específico	750 J/KgK
Espessura média	3,8mm	Condutividade térmica	0,75 W/mK
Volume interno útil	600ml	Peso específico	2210 kgf/m ³

Tabela 5.15. Coeficiente global de transferência de calor para vasilhame de 600ml.

Banho	\bar{f} (s)	\bar{U} (W/m ² K)
Transição	608s	103,1
30-40°C	516s	121,4
40-50°C	489s	128,2
50-60°C	484s	129,5
60-70°C	482s	130,1

O cálculo do \bar{U} incorpora as incertezas de medição do instrumento utilizado e o desvio existente no modelo calculado. Lewicki (1984) apresentou alguns resultados para \bar{U} , porém os vasilhames por ele utilizados eram menores (capacidade de 500ml) e com formas e massa um pouco diferentes. Os valores encontrados, na fase de convecção ordenada foram de $125,9 \pm 9,14$ W/m²K. Estes valores são muito próximos aos encontrados neste trabalho.

Um fato que chama atenção nos resultados obtidos é que o valor de \bar{U} sempre aumenta, mesmo que a taxa cada vez menores. Lewicki também mostra que os valores do coeficiente global de transferência de calor aumentam até um valor máximo em um período de até 9 minutos, isto para o vasilhame utilizado pelo autor e para uma temperatura de banho sempre constante. Após este período inicia-se uma queda nos valores de \bar{U} , tendendo a zero em tempos muito grandes (maiores do que 25 minutos). Isto se explica já que em tempos muito grandes todo o vasilhame estará à mesma temperatura do banho.

5.7.3 Sobre o Coeficiente de Convecção natural - h

O coeficiente de transferência por convecção natural h é um efeito de parede e tende a ser baixo no início, quando a energia ainda não atravessou a espessura do vidro e, após atravessá-la, começa a aumentar.

No modelo requerido pela pasteurização, toma-se como base de cálculo o ponto frio da garrafa, onde o mesmo não está próximo à parede, não sendo adequado estabelecer-se um valor de h utilizando-se dos resultados obtidos até então. Para o conhecimento de h deve-se conhecer a temperatura interna da parede do casco de vidro.

De fato, neste trabalho o importante é o efeito global do processo ao longo do tempo, representado por \bar{U} . Novamente, a quantificação das parcelas condutivas e convectivas não são tão importantes para a modelagem do problema sob o ponto de vista da construção do modelo de controle.

O Capítulo 6 mostra resultados onde está incluído uma estimativa para a temperatura interna do vidro, permitindo uma avaliação melhor do comportamento de cada parte do domínio (vidro e cerveja) ao longo do tempo.

6. ESTUDOS NUMÉRICOS

O Capítulo 5 atingiu o objetivo principal deste trabalho, fornecendo ao modelo simplificado de pasteurização os coeficientes de correlação para utilização do mesmo.

Mesmo com o conhecimento dos valores dos coeficientes de correlação e dos coeficientes globais de transferência de calor, também é do interesse deste trabalho avançar um pouco mais sobre o tema, ampliando o conhecimento dos fenômenos envolvidos nas garrafas estudando-se o comportamento fluidodinâmico bem como visualizar como as temperaturas se distribuem no interior do vasilhame.

Por este motivo segue um estudo numérico para o vasilhame de 600ml.

6.1 ESTRATÉGIA UTILIZADA

Conforme discutido no Capítulo 3, o problema possui duas partes principais, mas acopladas entre si: as equações que regem o comportamento do problema condutivo no vasilhame e as equações que regem o problema convectivo no líquido no interior do mesmo.

Desta forma, o ideal é realizar as análises numéricas simulando-se juntamente estes domínios. Para isto, é utilizado um programa comercial de volumes finitos ANSYS CFX, disponível no Centro Nacional de Super-computação (CESUP/RS).

Simulações preliminares do sistema com os dois domínios geraram resultados com desvios e flutuações de valores em diversos pontos de ambos os domínios que inutilizaram os resultados. A principal causa para a ocorrência destas perturbações atribuiu-se à utilização de uma malha não estruturada, composta por elementos tetraédricos.

Porém, simulando-se novamente ambos os domínios, porém simplificando a geometria do vasilhame para a de um cilindro reto, constatou-se que estes problemas não ocorriam. Desta forma, adotou-se a estratégia de dividir a simulação em duas partes:

- **Simulação Auxiliar**

Nesta etapa, simularam-se ambos os domínios, vidro e fluido sendo um cilindro com o mesmo diâmetro do vasilhame de 600ml, porém com uma altura equivalente ao volume útil interno da garrafa (neste caso, 600ml), conforme Figura 6.1a. Esta simplificação da geometria de

fato tende a alterar o comportamento fluidodinâmico do problema, mas apenas 8% do volume útil encontra-se na região modificada.

Esta simulação preliminar permite a obtenção da temperatura interna do vidro, que serve de condição de contorno à etapa seguinte.

- **Simulação do Fluido (Cerveja)**

Com a simulação do cilindro auxiliar e a consequente obtenção da temperatura interna do casco de vidro, esta última foi estudada ao longo do tempo, gerando uma função representativa desta temperatura. Esta função foi aplicada como condição de temperatura prescrita no lado externo do fluido, representado na Figura 6.1b.

Esta forma de levar adiante os estudos numéricos pode introduzir alguns erros, porém, conforme será mostrado ao longo do capítulo, os resultados permitiram a obtenção de conclusões importantes para o entendimento do processo com adequada proximidade com o fenômeno real.

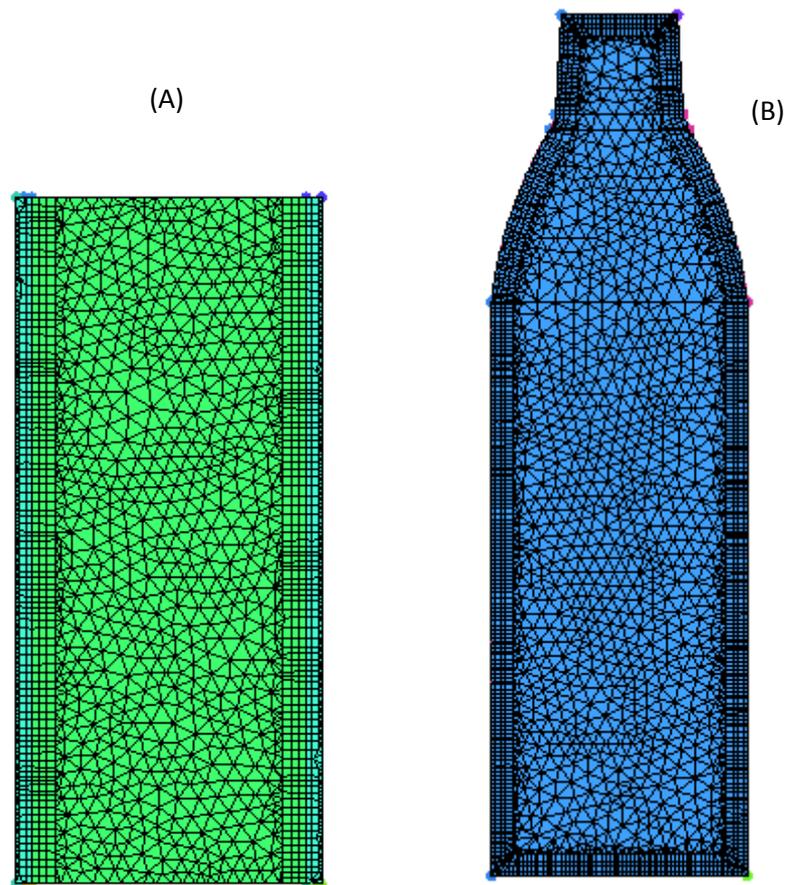


Figura 6.1. (a) Modelo auxiliar, compreendendo o vidro e o fluido e (b) modelo com a geometria original do vasilhame.

6.2 MODELAGEM MATEMÁTICA – Problema Auxiliar

Como o casco de vidro do vasilhame é submetido a um intenso banho de água com temperatura conhecida T_S e, desprezando a resistência da convecção externa (Lewicki, 1984), adotou-se, então, que a temperatura externa do casco esteja à mesma temperatura do banho.

O topo da garrafa foi considerado como uma parede adiabática, devido à garrafa possuir um pequeno espaço interno com gás carbônico, o qual possui uma condutividade térmica muito baixa, além de possuir uma pequena área de contato com a água do spray.

O fundo da garrafa foi considerado novamente como uma parede adiabática pelas seguintes razões:

- A espessura do casco no fundo é de, aproximadamente, três vezes maior do que nas laterais;
- A condutividade térmica do vidro possui um valor cerca de cinco vezes menor do que a condutividade do líquido;
- O banho ocorre preferencialmente pelas laterais, devido à sua maior área de contato com o fluido e pela forma que a água é esguichada sobre o vasilhame;
- O vasilhame é apoiado em uma esteira transportadora, normalmente feita em polipropileno reforçado. Esta esteira possui uma geometria onde apenas poucos pontos estão em contato com o fundo do vasilhame. Além disto, sua condutividade térmica é muito baixa, da ordem de $0,12 \text{ W/mK}$.

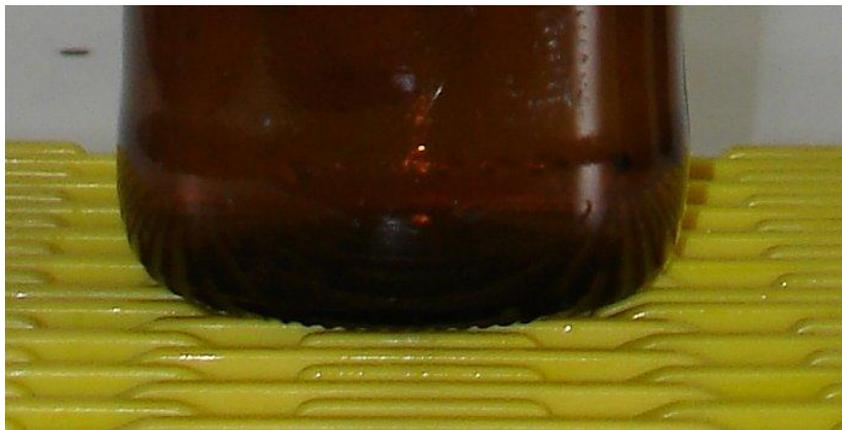


Figura 6.2. Contato do fundo de um vasilhame de cerveja com esteira transportadora.

O problema auxiliar foi montado conforme mostrado na Figura 6.3.

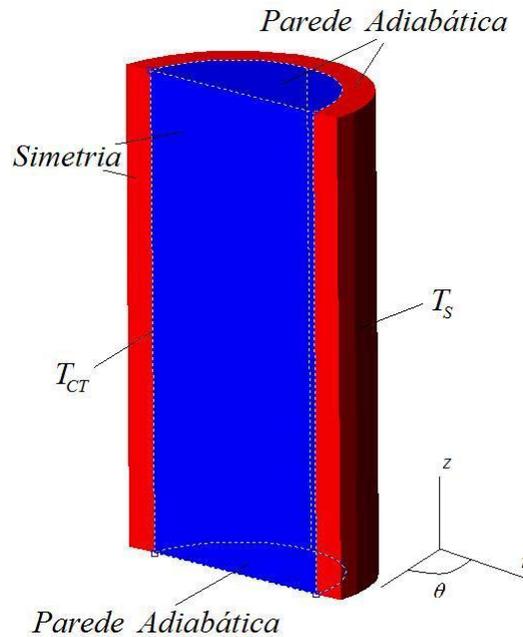


Figura 6.3. Esquema básico das condições de contorno do problema auxiliar.

A simetria do problema é aproveitada, o que permitiu a simulação de apenas metade da geometria, de forma a diminuir o esforço computacional. Na Figura 6.3, T_{CT} é a temperatura da superfície de contato entre o vidro e a cerveja e não é uma condição imposta e sim calculada pela simulação.

Adotando-se, por conveniência da geometria, coordenadas cilíndricas, a equação da difusão do calor fica:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_v r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k_v \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + gen = \rho_v C_{p,v} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.1)$$

onde r , θ e z são as coordenadas cilíndricas do problema, k_v é a condutividade térmica do vidro, T é a temperatura, gen é o termo de geração de calor, ρ_v é o peso específico do material, $C_{p,v}$ é o calor específico do material e t é o tempo. As seguintes hipóteses são adotadas:

- Material sólido isotrópico e Homogêneo
- Condutividade k constante em todo o material
- Sem geração interna de energia
- Transiente

Material Isotrópico e Homogêneo

Considera-se que o vidro é um material isotrópico, ou seja, que não há variação de suas propriedades em diferentes direções. Todas suas propriedades, por tanto, são uniformes em todo o domínio ocupado pelo material (neste caso, vidro).

Também é considerado que o material seja homogêneo, sendo uma substância pura ocupando seu domínio, não havendo nenhuma falha interna que possa modificar o problema da condução.

Geração de energia interna nula

O termo de geração é considerado nulo, pois não há a ocorrência nenhum tipo de reação química ou alteração nas propriedades do material que possam justificar a consideração do termo de geração.

Aplicando as hipóteses acima mencionadas, a equação da difusão do calor se reescreve da seguinte forma:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{\alpha_V} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.2)$$

onde α_V é a difusividade térmica do material, dada por $\alpha_V = k_V / \rho_V C_{P,V}$, com as condições de contorno baseadas na Figura 6.4:

$$T(r = R, \theta, z, t) = T_S$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, \theta, z = 0, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, \theta, z = H_V, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta}(r, \theta = 0^\circ, z, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta}(r, \theta = 180^\circ, z, t) = 0$$

Para o domínio da cerveja, seu modelamento é realizado pelas equações da conservação de massa (6.3), balanço de forças (6.4, 6.5 e 6.6) e energia (6.7):

$$\frac{\partial \rho_{liq}}{\partial t} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \rho_{liq} \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{liq} \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) + \rho_{liq} g_r \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} \rho_{liq} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu_{liq} \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) + \rho_{liq} g_\theta \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \rho_{liq} \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{liq} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + g_z [1 - \beta(T - T_0)] \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\rho_{liq} C_{P,liq} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{liq} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + gen \quad (6.7)$$

onde ρ_{liq} é o peso específico do fluido, $C_{P,liq}$ é o calor específico do fluido e k_{liq} é a condutividade do fluido. Na equação 6.6 é utilizada a hipótese de Boussinesq, que é o termo de empuxo devido ao diferencial de temperatura e acopla as equações da conservação de massa e momentum com a equação da energia.

As seguintes hipóteses são adotadas:

- Fluido incompressível
- Fluido newtoniano
- Propriedades constantes (exceto o peso específico)
- Sem geração interna de energia (termo $gen = 0$)

- Regime laminar
- Problema Transiente

Fluido incompressível e Newtoniano

O fluido adotado nas simulações é a água, que possui propriedades quase idênticas às da cerveja (Clerk 1958). A cerveja utilizada no Capítulo 5 (Pilsen) é formada basicamente por água, com uma pequena parcela de matéria-prima diluída. As baixas velocidades que ocorrem dentro do vasilhame permitem a utilização do modelo de incompressibilidade.

Tratando-se, então, a cerveja como água, adota-se que a mesma possui as propriedades de fluido newtoniano, ou seja, não há variação de sua viscosidade com a aplicação das forças de corpo e forças de campo.

Regime Laminar

Na modelagem foi considerado escoamento em regime laminar. Para esta conclusão, é realizada uma estimativa do número de Rayleigh, dado por:

$$Ra_H = \frac{g\beta_F\Delta TH^3}{\alpha_F\nu_F} \quad (6.8)$$

Sabendo que a temperatura máxima que a cerveja atinge é de 60°C, assumiu-se, por hipótese que a parede interna da garrafa esteja a 60°C e que o centro da garrafa esteja a 30°C, em um vasilhame padrão de 600ml (ver propriedades na Tabela 5.14), obtemos:

$$Ra_H \cong 4,3 \times 10^{10} \quad (6.9)$$

As propriedades são tomadas na temperatura de filme $(T + T_{CL})/2$. Berkovsky e Polevikov apresentaram resultados para convecção natural interna, onde para o regime laminar, tem como condições:

$$\begin{aligned}
2 < \frac{H}{Dia} < 10 \\
Pr < 10^5 \\
Ra_H < 10^{13}
\end{aligned}
\tag{6.10}$$

No caso em análise, a relação H/Dia (altura/diâmetro) possui o valor de 3,7 e o líquido possui $Pr = 4,0$. Com os valores de referência, todas as condições de regime laminar são satisfeitas. Como a garrafa, pelo limite imposto pelo choque térmico, não pode atingir diferenças de temperatura maiores do que 30°C , não há caso da pasteurização em túneis destes vasilhames que o regime de escoamento não seja laminar.

Finalmente, apresentam-se as condições de contorno para o domínio da cerveja, conforme Figura 6.3:

Condições em z

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, \theta, z = 0, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, \theta, z = H_V, t) = 0$$

$$v(r, \theta, z = 0, t) \rightarrow v_r = v_\theta = v_z = 0$$

$$v(r, \theta, z = H_V, t) \rightarrow v_r = v_\theta = v_z = 0$$

Condições em θ

$$\frac{\partial T}{\partial \theta}(r, \theta = 0^\circ, z, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta}(r, \theta = 180^\circ, z, t) = 0$$

$$v(r = 0, \theta = 0^\circ, z, t) \rightarrow v_\theta = 0$$

$$v(r = 0, \theta = 180^\circ, z, t) \rightarrow v_\theta = 0$$

A superfície de contato entre o vidro e a cerveja possui condição de não-deslizamento. A condição inicial do problema é $T(r, \theta, z) = T_0$, onde T_0 é a temperatura inicial conhecida e aplicada em todo o domínio.

6.3 MODELAGEM MATEMÁTICA – Problema Fluido

Com a obtenção, pelo problema auxiliar, da temperatura de contato T_{CT} , o problema do fluido é modelado pelas equações 6.3 a 6.7, apresentadas anteriormente, porém aplicando-se as seguintes condições de contorno:

Condições em z

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, \theta, z = 0, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, \theta, z = H_v, t) = 0$$

$$v(r, \theta, z = 0, t) \rightarrow v_r = v_\theta = v_z = 0$$

$$v(r, \theta, z = H_v, t) \rightarrow v_r = v_\theta = v_z = 0$$

Condições em θ

$$\frac{\partial T}{\partial \theta}(r, \theta = 0^\circ, z, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta}(r, \theta = 180^\circ, z, t) = 0$$

$$v(r = 0, \theta = 0^\circ, z, t) \rightarrow v_\theta = 0$$

$$v(r = 0, \theta = 180^\circ, z, t) \rightarrow v_\theta = 0$$

Condições em r

$$T(r = R - e_v, \theta, z, t) = T_{CT}$$

$$v(r = R - e_v, \theta, z, t) \rightarrow v_r = v_\theta = v_z = 0$$

6.4 MALHAS UTILIZADAS

Os problemas visualizados na simulação de ambos os domínios acoplados, com a geometria original do vasilhame, são típicos de malha.

Devido a limitações encontradas na formulação do problema com uma malha estruturada, prosseguiu-se o estudo conforme descrito na seção anterior, utilizando-se malhas não-estruturadas, tetraédrica no interior do domínio do fluido e elementos estruturados prismáticos,

tanto na superfície de interface entre os domínios no caso auxiliar, como nas bordas do domínio do fluido, no segundo caso, conforme Figura 6.4.

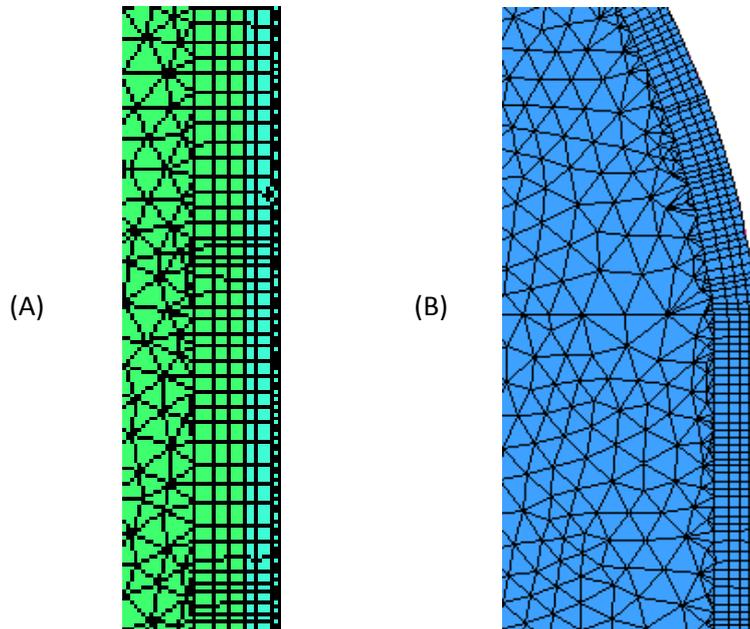


Figura 6.4. Interface entre malha não-estruturada tetraédica e malha prismática (a) Modelo auxiliar, compreendendo o vidro e o fluido e (b) modelo somente fluido.

A utilização de elementos prismáticos regulares foi adotada visando um melhor resultado nas regiões onde há a formação da camada limite do problema.

Tanto a simulação do problema auxiliar como do problema do fluido foram realizadas com duas malhas diferentes, porém o resultado entre ambas é praticamente idêntico, garantindo-se que o problema atingiu a independência de malha.

Terminou-se por adotar a malha mais refinada para ambos os casos, devido aos recursos computacionais avançados, disponíveis no CESUP/RS.

Na Tabela 6.1 seguem as principais características das malhas utilizadas:

Tabela 6.1. Informações das malhas utilizadas.

	Problema Auxiliar (Cilíndrico)	Problema do fluido apenas
Total de nós	60.639	187.181
Total de elementos	165.300	486.929
Total de elementos tetraédricos	93.290	224.929
Total de elementos prismáticos	72.010	262.000

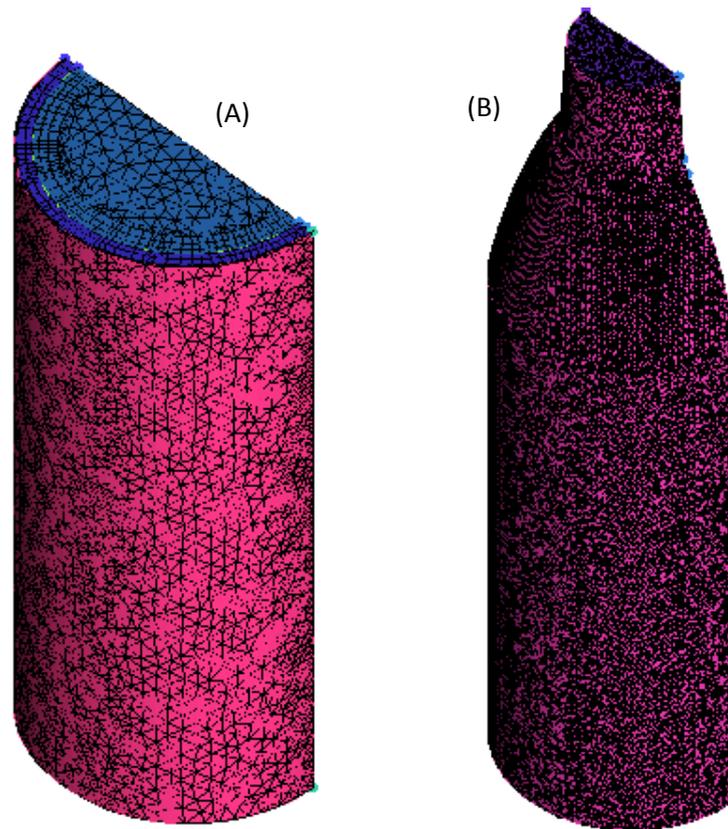


Figura 6.5. Malhas utilizadas (a) Modelo auxiliar, compreendendo o vidro e o fluido e (b) modelo com a geometria original do vasilhame, somente fluido.

Ambas as malhas são construídas, tendo um tamanho de elemento tetraédrico máximo de 0,002m e um tamanho de elemento prismático máximo de 0,001m.

Foi utilizado como critério de convergência de 10^{-4} , baseado nos resíduos médios RMS do cálculo das equações. Foi adotado um esquema de discretização *High Resolution* (discretização de segunda ordem dos termos advectivos).

6.5 O PROBLEMA AUXILIAR

Foi simulado um caso com temperatura externa de 40°C e a temperatura inicial do conjunto vidro-cerveja é constante e igual a 25°C . Estes valores foram escolhidos de forma a gerar um diferencial de temperatura de 15°C , representando um valor médio dos diferenciais que ocorrem na máquina real ($\sim 5^{\circ}\text{C}$ a 25°C). Este aquecimento foi simulado por um período de 300s.

Após a simulação, os valores da temperatura interna do vidro foram estudados ao longo do tempo para quatro pontos, distribuídos de forma equidistante ao longo da altura do cilindro. Os resultados são mostrados na Figura 6.7:

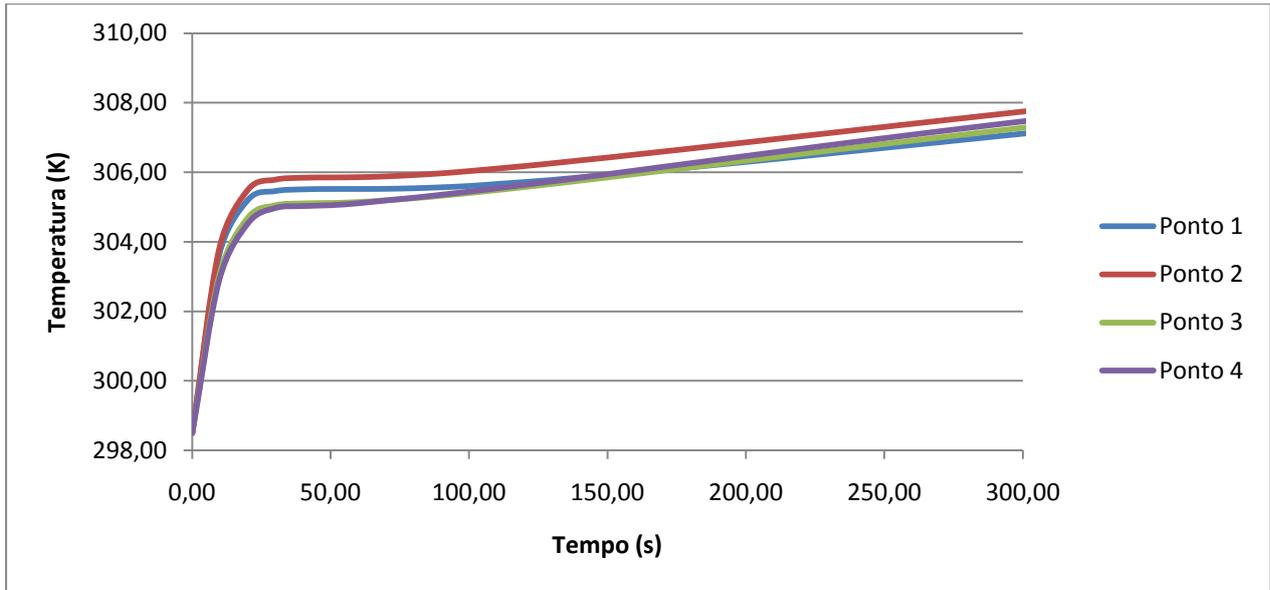


Figura 6.6. Resultados da temperatura interna do vidro. Temperatura externa de 40°C (313K).

Nota-se que os resultados são muito próximos, praticamente independentemente da altura. Com base nesta observação, foi efetuada uma média do gráfico acima e obtida sua função, que servirá de condição de contorno para o problema do fluido.

Os pontos do gráfico 6.6 são medidos nas alturas de 40mm, 80mm, 120mm e 160mm, a partir do fundo do cilindro. A função utilizada é da forma polinomial, que possui o melhor ajuste dentre as curvas estudadas, conforme Figura 6.7.

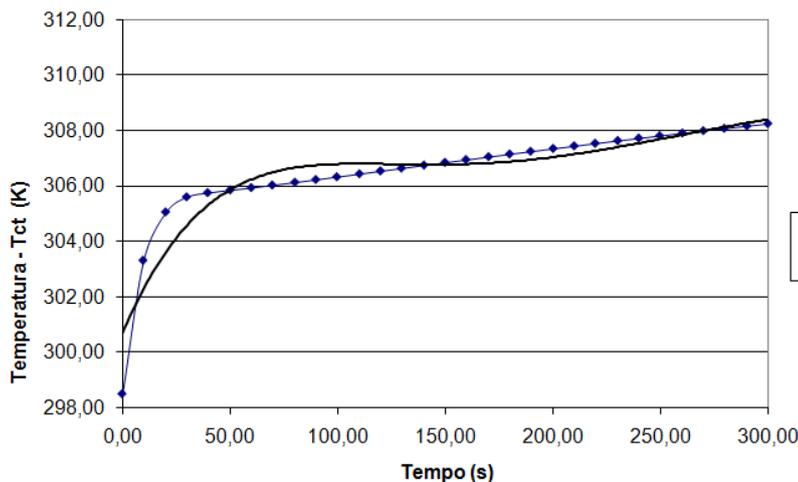


Figura 6.7. Média da temperatura interna do casco de vidro com aproximação polinomial.

Na Tabela 6.2 é apresentada a correlação utilizada, bem como os desvios decorrentes desta aproximação:

Tabela 6.2. Função de Temperatura Interna Obtida no Caso Auxiliar.

Temperatura Externa	Equação obtida	Coefficiente de Correlação (R^2)	Desvio Padrão
40°C	$8 \times 10^{-8} t^3 - 9 \times 10^{-5} t^2 + 0,037t + 303,2$	0,94	0,53

Esta função foi, a seguir, aplicada como a condição de contorno externa do problema com fluido apenas, sendo que o mesmo também estará a uma temperatura inicial de 25°C.

6.6 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados do modelo com a geometria original do vasilhame, aplicando os valores de T_{CT} obtidos da simulação auxiliar. Assim como o problema auxiliar, o problema foi simulado por um período de 300s.

6.6.1 Campos de Temperatura

A Figura 6.8 mostra os campos de temperatura em diferentes passos de tempo, visualizados no plano de simetria do vasilhame.

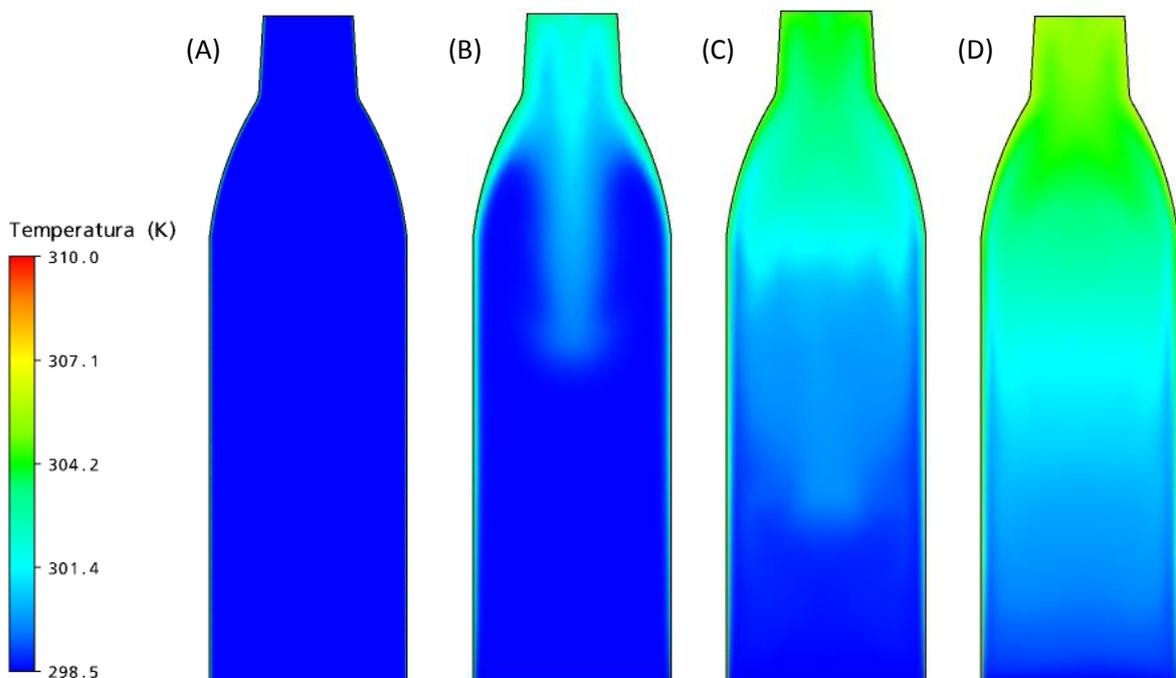


Figura 6.8. Evolução do campo de temperatura: (a) em $t = 0s$, (b) em $t = 20s$, (c) em $t = 60s$ e (d) em $t = 120s$.

É notório, pela Figura 6.8, o transporte de toda a energia passada ao fluido pelo vidro pela porção de fluido junto à parede, conforme observação prévia a partir do gráfico de \bar{f} e do comentário feito por Bejan (1995). Esta energia começa a se acumular na parte superior do vasilhame até que as correntes convectivas comecem a descer, difundindo-a em toda a massa interna do fluido, de forma lenta.

A Figura 6.8 mostra ainda que apenas em tempos próximos a $t = 110s$ a energia começa a alterar, de forma ainda tênue, a temperatura no ponto frio. Isto está de acordo com os valores de atraso obtidos nos testes de bancada e mostrado claramente no gráfico 5.7 (onde o atraso apresenta tempo médio de 140s).

Ainda, visto que a energia recebida pelo fluido é totalmente transportada pelo jato de fluido junto à parede, se há alguma difusão no sentido radial, da parede para o centro, é tão baixa que pode ser negligenciada. Isto é mostrado na Figura 6.9, que são os campos de temperatura em um corte transversal, a 20mm do fundo (onde, teoricamente, se define o ponto frio).

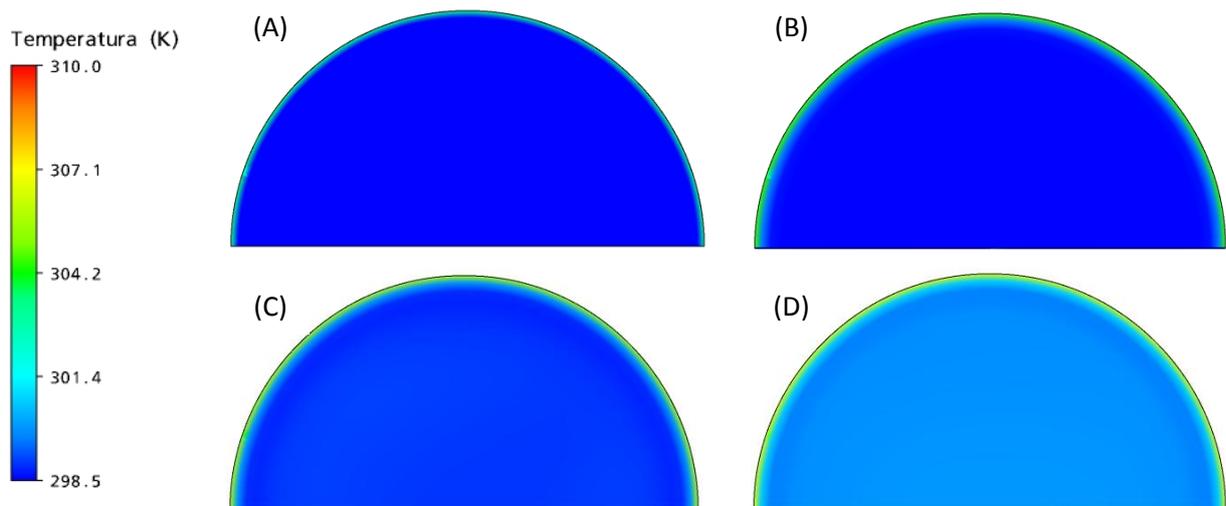


Figura 6.9. Evolução do campo de temperatura – corte transversal a 20mm do fundo.

(a) em $t = 0s$, (b) em $t = 20s$, (c) em $t = 60s$ e (d) em $t = 120s$.

Observa-se que a partir de $t = 60s$, existe uma região de maior temperatura junto à parede e há um aumento de temperatura no centro do vasilhame, permanecendo uma estreita faixa de fluido à baixa temperatura, justificando que as alterações no eixo da garrafa é devido ao fluido aquecido que desce em direção ao fundo da mesma.

A Figura 6.10 mostra os campos de temperatura para o plano de simetria até 300s.

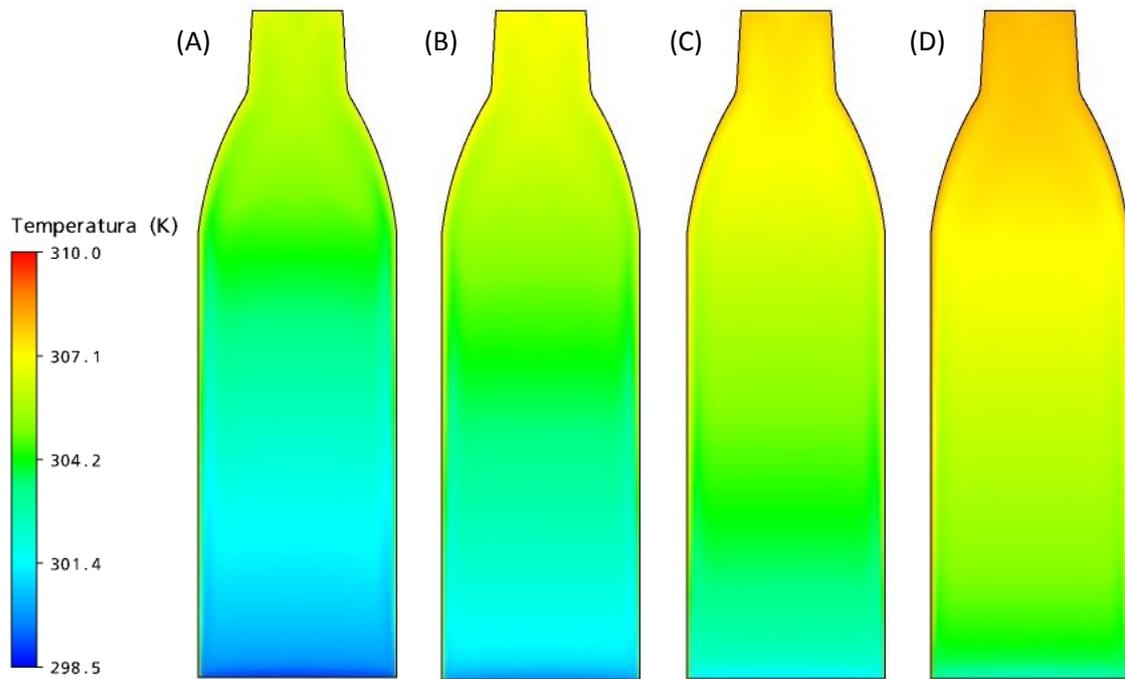


Figura 6.10. Evolução do campo de temperatura: (a) em $t = 150s$, (b) em $t = 200s$, (c) em $t = 250s$ e (d) em $t = 300s$.

O ponto frio definido pela bibliografia para o processo de pasteurização, de fato deve ser o mais próximo do fundo da garrafa. Mesmo que para uma medida com maior confiabilidade, a sonda deve ser colocada também no centro do vasilhame, pequenos desvios na direção radial podem ser aceitos, já que somente próximo da parede é que têm-se de fato gradientes maiores.

Foram selecionados alguns pontos internos do vasilhame de forma a analisar seu comportamento ao longo do tempo, conforme Figura 6.11.

Tabela 6.3. Coordenadas dos pontos de análise, da Figura 6.11.

Ponto	Altura (mm)	Posição Radial (mm)
E1	20	0
E2	40	0
E3	60	0
E4	80	0
E5	100	0
E6	120	0
E7	140	0
E8	160	0
E9	180	0
E10	200	0
R1	20	10
R2	20	20
R3	100	10
R4	100	20

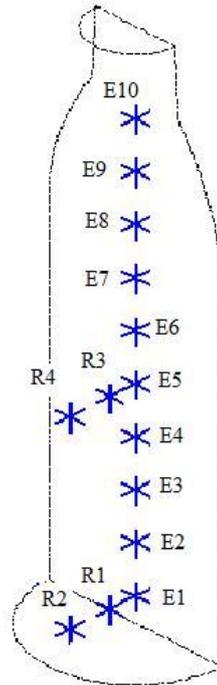


Figura 6.11. Pontos seleccionados para análise.

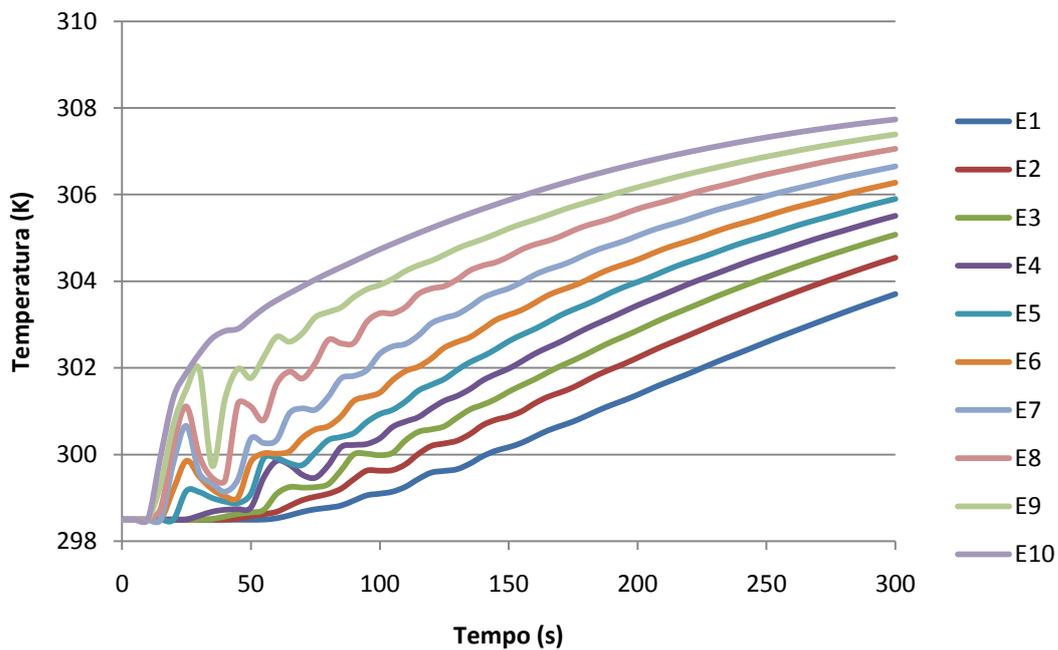


Figura 6.12. Evolução temporal da temperatura para os pontos do eixo da garrafa.

A Figura 6.12 mostra a evolução temporal dos pontos no eixo central, com resultados esperados, onde quanto mais alto o ponto de análise maior a taxa de aquecimento. O período de transição para o ponto frio (ponto E1) é mais suave e mais lento do que nos pontos mais altos.

Mas um comportamento curioso é caracterizado pelas oscilações de alguns pontos no início do processo. Estas oscilações podem ser causadas por recirculações ou vórtices dentro da garrafa enquanto as correntes convectivas estão se organizando. Isto seria a caracterização do período de transição descrito na Figura 5.17.

Estas oscilações também foram encontradas por Engelman e Sani (1983), onde também foram analisados pontos em diferentes alturas e posições radiais. Seus resultados são reproduzidos na Figura 6.13.

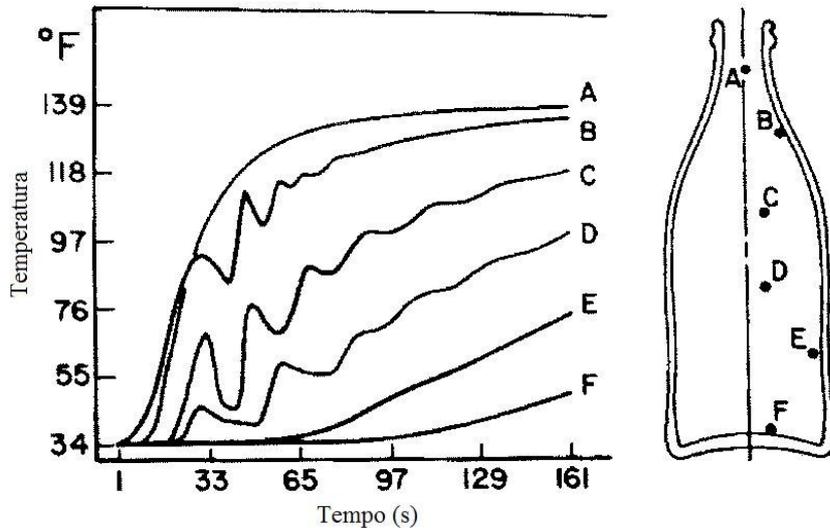


Figura 6.13. Resultados de Engelman e Sani (1983) para diversos pontos da garrafa.

A Figura 6.14 mostra a evolução temporal das temperaturas para os pontos com variação na sua posição radial:

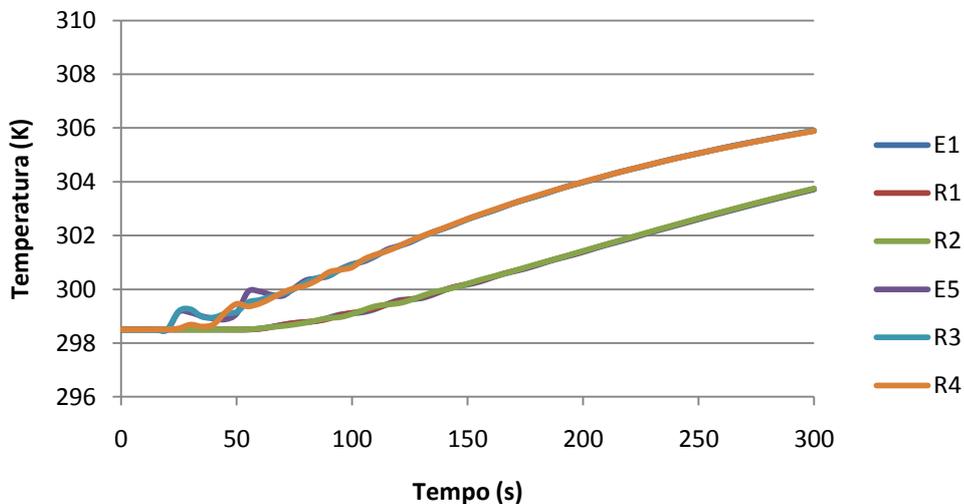


Figura 6.14. Evolução temporal da temperatura para os pontos em outras posições radiais.

Os resultados mostrados em 6.14 consolidam a observação de que praticamente não há variação de temperatura na direção radial. Por exemplo, os pontos na altura do ponto frio (E1-R1-R2) possuem praticamente a mesma evolução temporal. Apenas a uma altura maior (pontos E5-R3-R4) é que a temperatura de fato aumenta.

6.6.2 Linhas de Corrente

As Figuras 6.15 e 6.16 mostram as linhas de corrente para diferentes passos de tempo, visualizadas no plano de simetria do vasilhame.

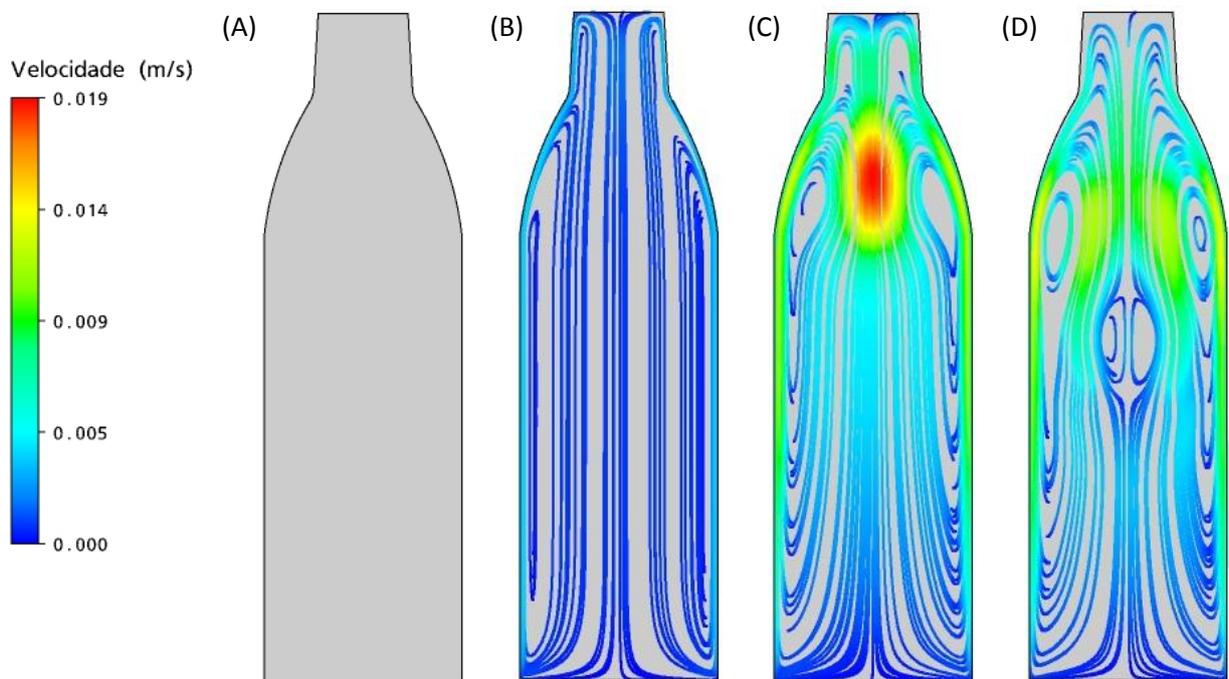


Figura 6.15. Linhas de corrente: (a) $t = 10s$, (b) $t = 20s$, (c) $t = 30s$ e (d) $t = 40s$.

As linhas de corrente mostradas na Figura 6.15 consolidam as conclusões preliminares da seção 5.7 e pela análise prévia dos campos de temperatura. O período de atraso caracteriza-se pelo período de vencimento da inércia inicial do fluido até que o mesmo consiga atingir um nível mínimo de quantidade de movimento para estabelecer as correntes térmicas, como na Figura 6.15 (d).

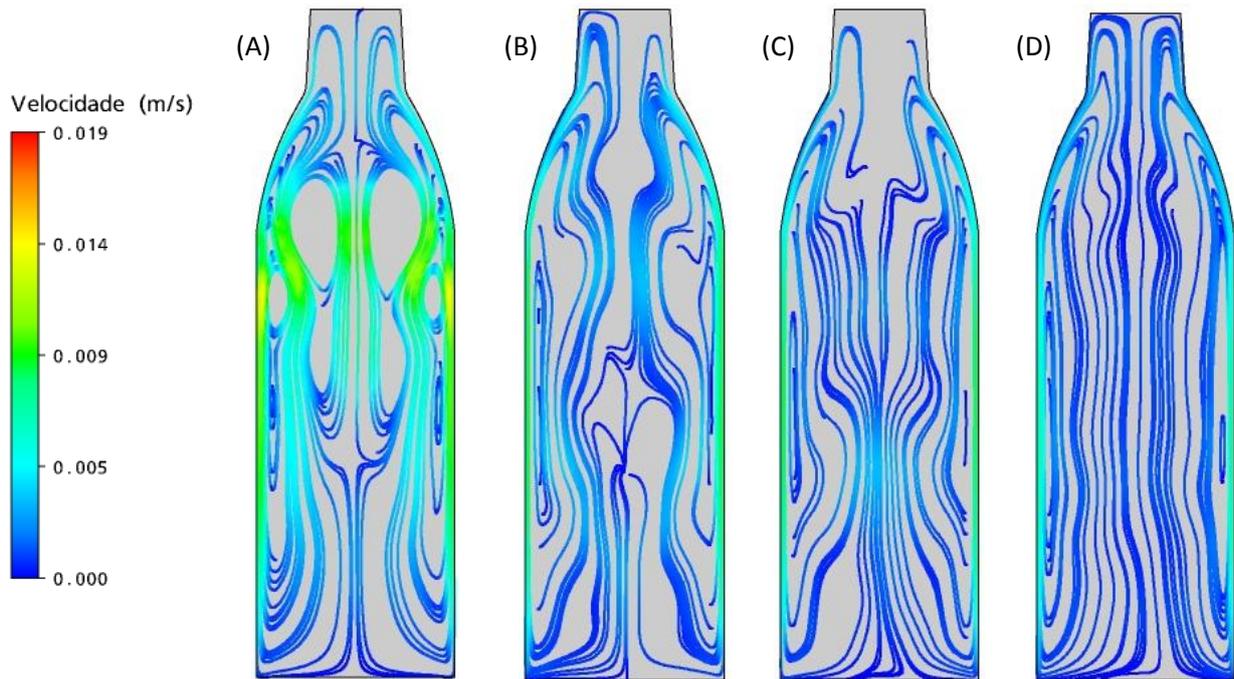


Figura 6.16. Linhas de corrente: (a) $t = 60s$, (b) $t = 100s$, (c) $t = 120s$ e (d) $t = 150s$.

Após este período, há um desarranjo no comportamento fluido dinâmico dentro da garrafa causado pelos jatos verticais próximos à parede que chegam ao topo e no retorno, pela geometria do casco, gera-se uma espécie de *vena contracta* que acelera o escoamento. Após um breve período, as correntes devido à convecção natural se reorganizam e se mantêm praticamente inalteradas, tanto em sua forma quanto velocidade durante todo tempo de processo simulado, como na Figura 6.16(d).

É a caracterização do período de transição, observado no Capítulo 5, que é o de reorganização das correntes, aqui claramente visualizado. Nesta simulação, o tempo de rearranjo ficou em aproximadamente 50s, próximos dos 60s estimados na seção 5.7, com os testes de bancada.

6.6.3 Teste da Simulação Numérica

Nesta simulação foram adotadas algumas hipóteses simplificativas no seu equacionamento, bem como estratégias como obtenção da condição de contorno através de simulação de um caso auxiliar, além de esta condição ser novamente aproximada por uma função. Todas estas hipóteses e estratégias podem levar a crer que os resultados possam ser

totalmente invalidados. Assim, calculou-se o caso simulado com os fatores exponenciais médios obtidos em bancada (Figura 6.17).

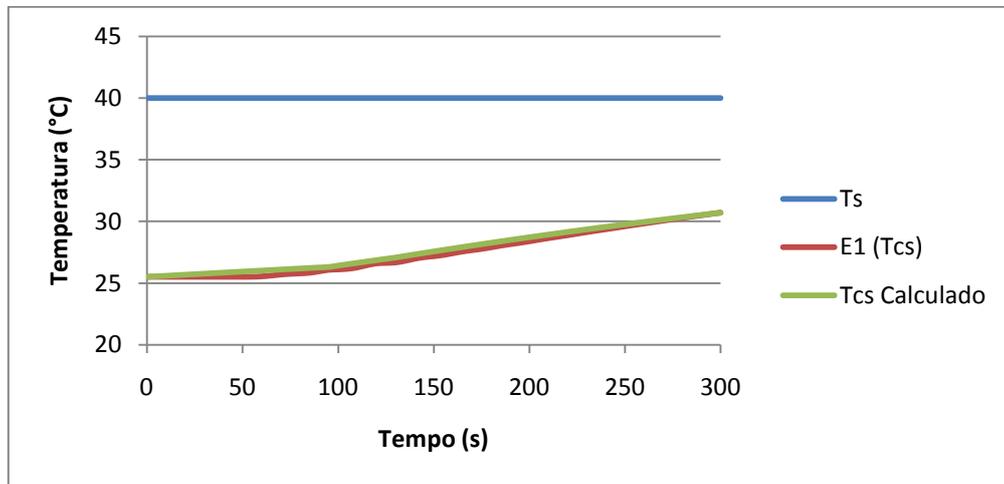


Figura 6.17. Comparativo entre T_{CS} obtido numericamente com resultados experimentais.

A proximidade das curvas e dos tempos obtidos para os períodos inercial e de transição convergem para que os resultados deste capítulo possam ser tomados como adequados. Abaixo seguem os desvios obtidos no comparativo da Figura 6.16.

Tabela 6.4. Desvios entre o modelo numérico e o modelo físico usando \bar{f} .

Desvio Máximo	0,48°C
Desvio Médio	0,27°C
Desvio Padrão	0,14°C

O desvio padrão possui valor muito próximo daqueles obtidos experimentalmente, fazendo com que a simulação possa ser relacionada aos experimentos em bancada com boa precisão.

Finalmente, a intenção desta simulação numérica é consolidar o entendimento dos fenômenos que ocorrem em um vasilhame no interior de um túnel pasteurizador. Neste aspecto, as conclusões de ordem qualitativa são confirmadas diversas vezes, na comparação com os resultados experimentais do Capítulo 5, o que satisfaz um dos principais objetivos deste trabalho.

7. A MÁQUINA REAL

Com o modelo simplificado desenvolvido, os valores do fator exponencial obtidos nos testes e os estudos adicionais, como as simulações numéricas, provendo um conhecimento bastante avançado de todo o fenômeno térmico, que é a base da pasteurização, uma empresa nacional tomou a iniciativa de lançar o desafio de construir uma nova máquina que colocasse em prática o modelo de controle de processo desenvolvido durante a elaboração deste trabalho.

As principais características adotadas na máquina em termos de processo, bem como os resultados obtidos no seu funcionamento são descritos neste capítulo.

7.1 PASTEURIZADOR COM CONTROLE DE UP

A empresa, nacional com sede no Rio Grande do Sul, sempre foi um tradicional fabricante de pasteurizadores, porém sem controle de processo. Este produto, que vinha sendo fornecido desde a década de 70, terminou por não obter mais encomendas significativas.

Visando voltar a dispor de túneis pasteurizadores em seu portfólio de produtos, a empresa lançou o desafio para a realização do projeto de um túnel totalmente novo, que atendesse a vários requisitos de mercado, sendo o controle de processo o mais importante deles.

Uma equipe completa foi formada para a execução do projeto mecânico e elétrico, sendo que o controle de processo foi desenvolvido com os resultados e modelos apresentados neste trabalho. O modelo foi implementado dentro do programa de controle da máquina e os valores do fator exponencial colocados como uma matriz dentro do mesmo.

A máquina é desenvolvida para pasteurizar cerveja Pilsen, envasada em vasilhames de vidro de 600ml, e com uma produção nominal de 62.000 garrafas/hora, resultando em uma máquina de dois andares, com 5m de largura, 25m de comprimento e 3,2m de altura.

A máquina foi totalmente projetada em aço inoxidável e em sistema modular, que permitiu uma maior facilidade de transporte e montagem. O sistema de transporte de vasilhames ocorre através de uma esteira plástica, igual à utilizada no protótipo descrito no Capítulo 4. Seu acionamento é realizado através de motoredutores planetários, localizados na saída da máquina.

Cada zona da máquina possui um banho, composto por uma bomba que pressuriza sprays, conforme mostrado na Figura 2.18. A Figura 7.1 mostra uma visão geral da máquina, instalada em uma cervejaria em Teresina, Piauí.



Figura 7.1. Visão geral do túnel pasteurizador nacional com controle de processo.

No seu dimensionamento, foram definidos os patamares de temperatura em função da velocidade da máquina. A velocidade de um pasteurizador é definida pelo volume de produção nominal de projeto. A Figura 7.2 mostra um desenho esquemático lateral e superior da máquina.

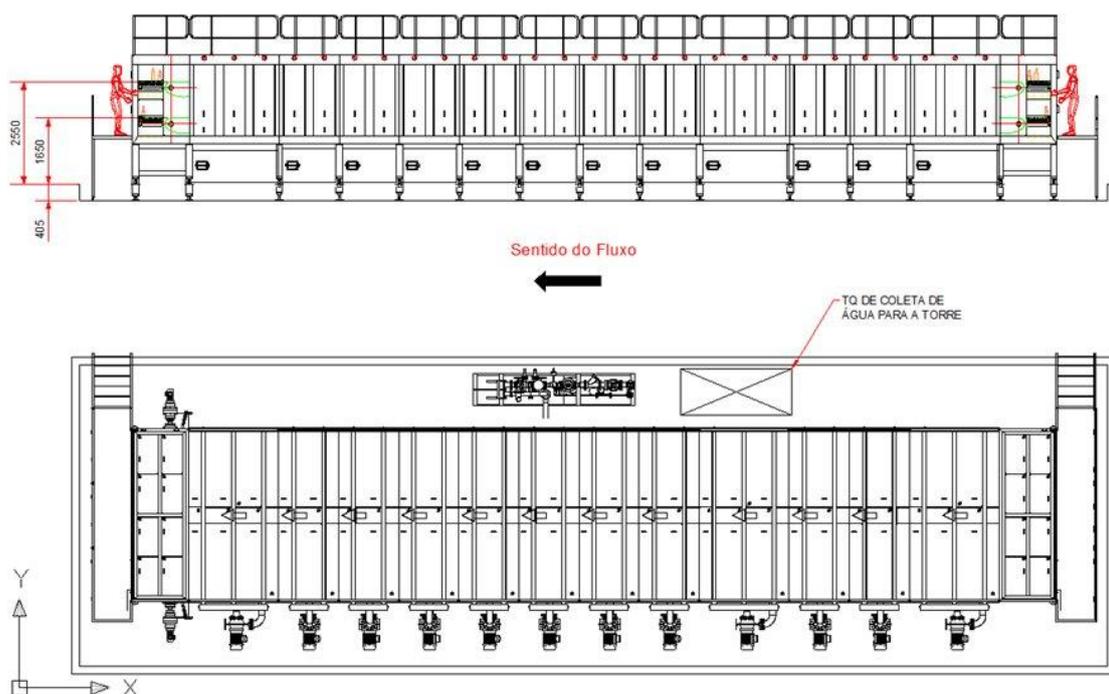


Figura 7.2. Vista superior e lateral da máquina.

Do Capítulo 2, a máquina se divide em zonas de aquecimento, processo e resfriamento. A região de processo, onde os vasilhames de fato são pasteurizados, são divididos em seis zonas (seis banhos), ao contrário de apenas dois. Isto é feito para discretizar a curva de pasteurização o melhor possível. O ideal é que cada garrafas tivesse um banho específico para seu estado de temperatura e de UP, permitindo um ajuste perfeito. Porém, como na prática de projeto isto é impossível, as seis zonas permitem que os banhos possam se ajustar para atender da melhor forma a necessidade de correção de desvios de UP para determinados feixes de garrafas.

Assim, como descrito na seção 3.1.1, que a correção da temperatura do banho seria feita através do cálculo do desvio (em relação à curva teórica) da quantidade de UP da garrafa que está entrando na zona, a máquina permite até seis correções para cada faixa de vasilhames.

7.2 MEDIÇÕES DE PROCESSO

A máquina é definida com os seguintes parâmetros principais, dados na Tabela 7.1:

Tabela 7.1. Dados de processo do pasteurizador.

Produção nominal	62.000 garrafas/hora
Velocidade da esteira	0,52 m/min
Tempo total do vasilhame dentro do túnel	45 min (2700s)
Valor de UP requerido	12
Desvio máximo em regime	12 \pm 2
Desvio máximo com paradas	12 -2/+4 (até 20 minutos de paradas)

O desvio máximo em regime é quanto o valor final de UP poderá variar em torno do valor prescrito quando a máquina opera em regime, ou seja, sem paradas causadas pela linha. O desvio máximo com paradas é quanto o processo de pasteurização poderá desviar-se com a existência de paradas na linha, conforme descrito na seção 2.6. Este desvio deve ser obedecido quando a soma das paradas não ultrapassar 20 minutos. Acima deste valor, considera-se que a soma das paradas é excessiva e não haverá uma garantia precisa da faixa de resultados que a máquina dará.

A curva nominal da máquina é então comparada com a curva calculada, utilizando o modelo e os valores de correlação obtidos nos Capítulos 3 e 5 deste trabalho.

A Figura 7.3 exibe uma amostra obtida utilizando o mesmo termógrafo utilizado nos testes em bancada, juntamente com o resultado calculado pela máquina. Este exemplo demonstra um bom resultado do modelo para o processo de pasteurização, principalmente porque o mesmo

modelo é testado na sua condição mais severa, ou seja, com paradas de linha bastante pronunciadas.

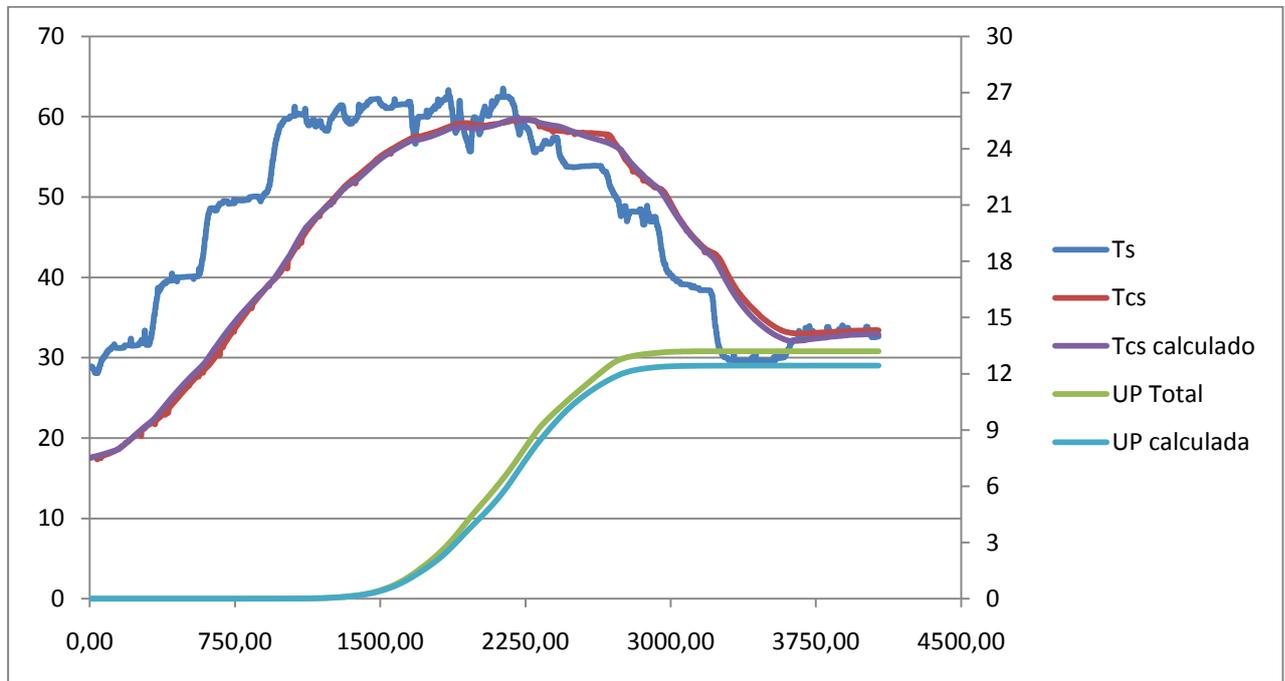


Figura 7.3. Comparativo de curva obtida em máquina real com modelo utilizado.

Estas paradas podem ser vistas pelo tempo total de processo, que é de 4074s (ou 67,9 minutos). A máquina efetuou as correções da temperatura dos banhos, gerando as oscilações de T_S que se observam na Figura 7.3. Estas correções seguem o modelo apresentado na seção 3.1.1, sempre tentando manter os vasilhames dentro dos valores da curva teórica (que foi introduzida no programa de controle da máquina como os valores de referência a serem perseguidos).

No caso da Figura 7.3, os seguintes resultados obtidos estão na Tabela 7.2:

Tabela 7.2. Resultados da medição mostrada na Figura 7.3.

UP final calculada	12,43
UP final medida	13,2
Temperatura máxima calculada	60,1°C
Temperatura máxima obtida	60,3°C ($\pm 0,2$ do instrumento)
Desvio máximo de temperatura	1,7°C ($\pm 0,2$ do instrumento)

Na Figura 7.4 é apresentada outra medição realizada na mesma máquina, porém com outra situação de conjunto de paradas de linha. As paradas de linha podem ocorrer por diversos motivos e possuir duração variada. Desta forma, não há nenhuma possibilidade de se estabelecer padrões de paradas.

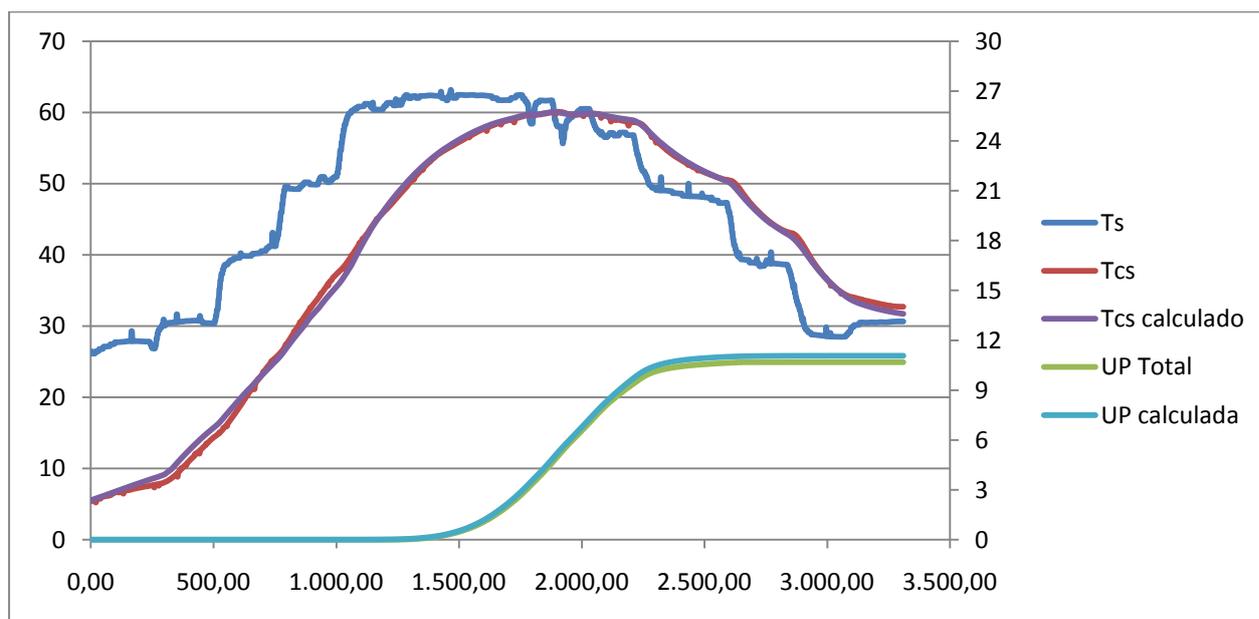


Figura 7.4. Outro exemplo de comparativo de curva medida com curva do modelo utilizado.

A Figura 7.4 mostra outra combinação de paradas de linha influenciando o túnel pasteurizador. Nesta figura, notam-se as correções necessárias perto do final da região de processo, e um tempo maior no primeiro patamar de resfriamento.

Novamente o modelo mostrou-se capaz de garantir o produto dentro da tolerância especificada para a máquina. A máquina, por ser a primeira a utilizar este controle, foi testada de forma exaustiva, efetuando-se mais de cem medições e apresentando níveis de eficiência, conforme Tabela 7.3:

Tabela 7.3. Eficiência do túnel pasteurizador – Teresina/PI.

Medições dentro da faixa de tolerância – paradas de até 20 minutos	96%
Medições dentro da faixa de tolerância - paradas maiores de 20 minutos	83%
Refugo de medidas fora da faixa de tolerância	0%

Entende-se por eficiência de processo a quantidade de medições com valor total de UP dentro da faixa requerida, relativo ao número total de medições.

Pelos valores da Tabela 7.3, o modelo de cálculo proposto, com seu conjunto de valores de \bar{f} adequadamente obtidos e testados, permitiram um nível de confiabilidade satisfatório, que atendem aos requisitos da maioria das cervejarias nacionais. Mesmo em paradas longas, a máquina ainda conseguiu atender a maioria das medidas dentro da faixa de tolerância.

Ainda, as garrafas relativas ao percentual de medidas que não atenderam aos valores especificados, foram analisadas em laboratório e nenhuma apresentou inadequação para envio ao mercado, não gerando descarte de produto.

Na Figura 7.5 segue uma captura da imagem da tela da IHM da máquina, onde se pode observar que as diversas paradas foram corrigidas, mantendo todos os feixes de garrafas dentro da faixa de tolerância, representada pelas linhas pontilhadas no final do gráfico.

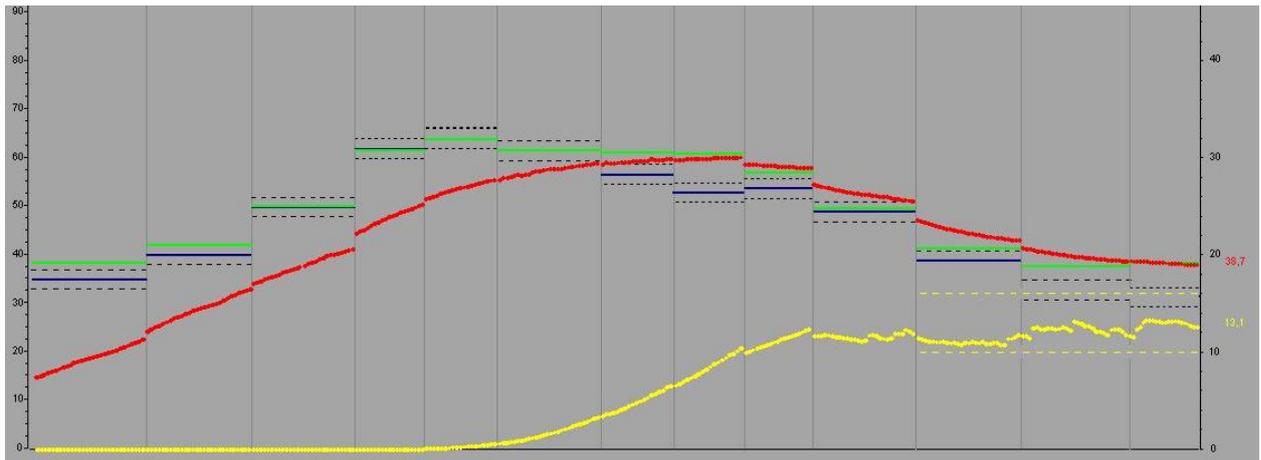


Figura 7.5. Tela da IHM mostrando o processo em cada ponto da máquina. Escala da esquerda referente a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e escala da direita referente ao número de UP's.

Da Figura 7.5, a linha vermelha representa a temperatura das garrafas, a linha amarela a quantidade de unidades de pasteurização, as linhas verdes o valor da temperatura dos banhos e as linhas azuis o valor calculado pelo controle para os banhos, a serem seguidos pela máquina.

Com estes valores, e pela existência de um controle em tempo real de cada posição da máquina, o primeiro túnel pasteurizador com controle de processo nacional foi aprovado e é ofertado amplamente ao mercado.

8. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi elaborada uma modelagem analítica para permitir o cálculo da temperatura e da intensidade de pasteurização de cerveja já envasada, em vasilhames de vidro, durante o processo em máquinas chamadas de túneis pasteurizadores. O equacionamento é montado basicamente pelo balanço das taxas de calor que entram e saem do conjunto vasilhame-cerveja com a variação da energia interna do mesmo.

O modelamento permite calcular a temperatura do vasilhame, em um ponto pré-determinado como *cold-spot* (ponto mais frio do vasilhame), através da temperatura dos banhos efetuados pela máquina, que são conhecidas. Deste equacionamento resultou um modelo simples, ficando ainda por obter os fatores que correlacionam estas temperaturas.

O fator de correlação é função das características do vasilhame e do produto processado e foi obtido através de testes experimentais executados em uma bancada especialmente construída visando simular todas as condições de funcionamento de um túnel pasteurizador. Nesta bancada, mede-se a temperatura do banho através de instrumentos simples, como sensores PT-100, e mede-se também a temperatura do ponto frio, no interior do vasilhame, através de uma sonda calibrada, com sua extremidade posicionada geometricamente neste ponto de interesse. Em todo o trabalho foi utilizado o vasilhame de cerveja padrão de 600ml, por ser o vasilhame mais utilizado na indústria cervejeira nacional.

Os fatores f (que efetuam a correlação necessária) foram obtidos para diferentes situações, basicamente alterando-se o diferencial de temperatura entre o banho e a temperatura inicial da garrafa além de alterações em outros fatores, como o tempo de exposição em cada banho, resultando em uma ampla gama de resultados que cobriram as situações mais comuns em túneis pasteurizadores reais.

Os testes revelam que os fatores f possuem um comportamento padrão, com pouca variação entre as diferentes situações. Analisando-se diferentes relações de f com a temperatura do banho, temperatura inicial do conjunto vidro-cerveja, entre outros, apenas com a temperatura do banho T_S conseguiu-se estabelecer uma relação definida para f . Desta forma, foram obtidos valores médios de f para cada patamar de temperatura de banho. O modelo analítico apresentado anteriormente é alimentado com estes valores e cada experimento realizado é reproduzido por este modelo. Foram obtidos desvios bastante baixos, o que permitiu que o modelo fosse de fato utilizado em um programa de controle de uma máquina real.

O principal objetivo deste trabalho é atingido, permitindo que máquinas nacionais, que não ofereciam este controle de processo, possam agora incorporá-lo evitando a dependência do mercado apenas de poucos fabricantes estrangeiros.

As relações de \bar{f} com as temperaturas dos banhos permitiram a identificação da existência de três etapas principais que ocorrem dentro da garrafa, durante o processo de pasteurização:

- Etapa de atraso: representa o tempo que a energia, proveniente do banho, leva para chegar até o ponto frio da garrafa e modificar seu estado inicial;
- Etapa de transição: caracteriza-se pela quebra definitiva da inércia em todos os pontos do conjunto vidro-cerveja e pela formação das correntes convectivas no seu interior;
- Etapa “desenvolvida”: é a etapa onde as correntes convectivas estão desenvolvidas e são comportadas, mantendo-se assim por grande parte do processo.

Estas diferentes etapas possuem também valores de \bar{f} associados. Com a completa caracterização dos valores, estes foram organizados em uma tabela e, juntamente com o equacionamento, o modelo analítico foi fechado.

Os valores dos fatores de correlação também permitiram o cálculo do coeficiente global de transferência de calor \bar{U} , sempre em relação ao ponto frio. Estes valores foram comparados com alguns trabalhos que estudaram o problema com vasilhames de vidro, como Lewicki et al (1983, 1984, 1985). Os valores obtidos foram muito próximos, sendo que esta proximidade poderia ser ainda maior, já que o vasilhame utilizado por Lewicki não é exatamente o mesmo utilizado neste trabalho.

O segundo objetivo deste trabalho foi o de prover uma maior compreensão dos fenômenos envolvidos. Para isto, partiu-se para uma análise numérica com a utilização de um programa comercial. Como o problema é composto por uma parte condutiva (vidro) e outra convectiva (cerveja) acoplada, o ideal é simular todo o conjunto. Porém, dificuldades em utilizar uma malha não-estruturada com a geometria original do vasilhame, lançou-se mão de uma estratégia particular de modelagem, que permita a utilização de malha não-estruturada sem a ocorrência dos problemas numéricos encontrados anteriormente.

Os resultados de campos de temperatura e velocidade foram obtidos para um caso comum de aquecimento de vasilhames. Análises do campo de temperatura permitiram a clara visualização da demora para que a energia, passada ao fluido através do vidro, chegue ao ponto

mais frio do vasilhame. Isto ocorre devido a que toda a energia absorvida pelo fluido é transportada pela camada limite para as regiões mais altas do vasilhame e a grande massa central de fluido movimentada-se com baixas velocidades, difundindo aos poucos a energia absorvida em todos os pontos do domínio. Este transporte pela massa central de fluido varia pouco com o raio, sendo que o grande diferencial de temperatura está entre a parede interna do vidro e a parte externa da camada limite, não havendo difusão de energia da camada limite para o eixo central do vasilhame.

A região de transição também é claramente caracterizada nos ensaios numéricos, onde o vasilhame já possui um campo de velocidades mas ainda não há uma organização das correntes convectivas. Após este período, as correntes se uniformizam e assim se mantêm, caracterizando-se principalmente pela estabilidade do valor de f . Para validação da simulação, onde foram necessárias aplicações de estratégias e hipóteses que podem sugerir desvios grandes dos resultados, o mesmo caso foi simulado pelo modelo analítico com os valores de \bar{f} obtidos nos ensaios de bancada. Os desvios obtidos foram baixos o suficiente para consolidar o modelo.

As simulações permitiram comprovar o comportamento de f , através da clara visualização das três regiões de comportamento. Também pode ser comprovado o local do ponto frio da garrafa (o mais próximo do fundo da garrafa), estando de acordo com a literatura de pasteurização. Finalmente, estes resultados proveram valores adequados para a parede interna do vasilhame, que são de difícil obtenção em ensaios experimentais.

Os resultados deste trabalho terminaram por ser utilizados para a construção de um túnel pasteurizador nacional com controle de processo, desafio assumido por um tradicional fabricante nacional de máquinas para cervejarias. Foi utilizado o mesmo equacionamento apresentado e o mesmo conjunto de valores de \bar{f} . Medições em vasilhames processados pela máquina foram comparadas com os resultados obtidos pelo modelo de cálculo da temperatura bem como da intensidade de pasteurização das garrafas, apresentando desvios baixos o suficiente para que a máquina conseguisse sempre corrigir os banhos, mantendo os vasilhames dentro dos limites de tolerância exigidos. A máquina é dada como aprovada pelo cliente, que é uma das mais importantes cervejarias do Brasil.

Perspectivas futuras ficam por conta da elaboração de um modelo computacional com uma malha estruturada para a obtenção de resultados eficazes, sem a necessidade de testes experimentais. Estes modelos numéricos podem ser utilizados para a obtenção dos coeficientes de correlação para outros vasilhames usuais na indústria de bebidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akterian, S.G. "Studying and Controlling Thermal Sterilization of Convection-heated Canned Foods using Functions of Sensitivity." *Journal of Food Engineering*, 1996: 329-338.

AMG. "Manual PX400 - Analisador de Pasteurização Wireless." *Manual de Operação*, 2006.

Bejan, A. *Convective Heat Transfer*. 2ª Edição. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1995.

Brandon, H., R. Gardner, J. Huling, e G Staack. "Time-dependent Modeling of In-Package Pasteurization." *Technical Quarterly Master Brewers Association of the Americas*, 1984: 153-159.

Burmeister, L.C. *Convective Heat Transfer*. 2ª Edição. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1993.

Buzrul, S. "A Suitable Model of Microbial Survival Curves for Beer Pasteurization." *LWT - Food Science and Technology*, 2006: In Press.

Clark, J. "Rate Constants and the Arrhenius Equation." *Chem Guide*. 2002. <http://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/arrhenius.html> (acesso em Maio de 2007).

Clerk, J. *A Textbook of Brewing*. 1ª Edição. Vol. 1. London: Chapman & Hall Ltd, 1958.

Dilay, E., J.V.C. Vargas, S.C. Amico, e J.C. Ordonez. "Modelling, Simulation and Optimization of a Beer Pasteurization Tunnel." *Journal of Food Engineering*, 2005: 500-513.

Engelman, M.S., e R.L. Sani. "Finite-Element Simulation of an In-Package Pasteurization Process." *Numerical Heat Transfer*, 1983: 41-54.

Gava, A.J. *Princípio de Tecnologia de Alimentos*. 1ª Edição. São Paulo: Nobel, 1998.

Horn, C.S., M. Franke, F.B. Blakemore, e W. Stannek. "Modelling and Simulation of Pasteurization and Staling Effects during Tunnel Pasteurization of Bottled Beer." *Food and Bioproducts Processing*, 1997: 23-33.

Incropera, F.P., e D.P. DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4ª. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1996.

Intralox Co. "Intralox Engineering Manual." Nova Orleans, 2008.

Kannan, A., e P.Ch.G. Sandaka. "Heat Transfer Analysis of Canned Food Sterilization in a Still Retort." *Journal of Food Engineering*, 2008: 213-228.

Kumar, A., e M. Bhattacharya. "Transient Temperature and Velocity Profiles in a Canned Non-newtonian Liquid Food during Sterilization in a Still-cook Retort." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991: 1083-1096.

Kurian, V., M.N. Varma, e A. Kannan. "Numerical Studies on Laminar Natural Convection Inside Inclined Cylinders of Unity Aspect Ratio." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009: 822-838.

Larsen, K.H. *Beer Pasteurization Models*. Dissertação de Mestrado, Technical University of Denmark, 2006.

Lewicki, P.P. "Heat Transfer in a Tunnel Pasteurizer. Part II: Heat Transfer Coefficients." *Journal of Food Engineering*, 1984: 91-115.

Lewicki, P.P. "Heat Transfer in a Tunnel Pasteurizer. Part III. Application of the Schultz-Olson Theory." *Journal of Food Engineering*, 1985: 265-289.

Lewicki, P.P., W. Walczak, e B. Goss. "Heat Transfer in a Tunnel Pasteurizer. Part I. Factors Affecting the Rate of Heating of Liquid in a Bottle." *Journal of Food Engineering*, 1983: 309-322.

Navarro, M., e U. Lacoa. "Desarrollo de un Modelo de Simulación para el Proceso de Pasteurización de la Cerveza." Séptimo Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia. Salta, 1998. 228-232.

Özisik, M.N. *Heat Conduction*. 2ªEdição. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1993.

Patiño, L.A., H. Espinoza, e O. Velásquez. "Numerical Study of Beer Heat Transfer in the Pasteurization Process." *Revista Ciencia y Ingenieria*, 2001: 19-25.

Pimentel, A.S., e G. Arbilla. "Cinética Não-Isotérmica na Análise Térmica de Sólidos." *Química Nova*, 1998: 50-59.

Sevilla, J.M.F. "Pasteurización." Apostila de Curso de Graduação, Madrid, 2004.

Sparrow, E.M., e C. Prakash. "Interaction Between Internal Natural Convection in an Enclosure and an External Natural Convection Boundary-Layer Flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981: 895-907.

Varma, M.N., e A. Kannan. "CFD Studies on Natural Convective Heating of Canned Food in Conical and Cylindrical Containers." *Journal of Food Engineering*, 2006: 1024-1036.

Varnam, A.H., e J.P. Sutherland. *Bebidas: Tecnologia, Química y Microbiologia*. 1ªEdição. Zaragoza: Acribia, 1994.

Yang, W.H., e M.A. Rao. "Transient Natural Convection Heat Transfer to Starch Dispersion in a Cylindrical Container: Numerical Solution and Experiment." *Journal of Food Engineering*, 1998: 395-415.

Zheng, Y.H., e R.S. Amano. "Numerical Modeling of Turbulent Heat Transfer and Fluid Flow in a Tunnel Pasteurization Process." *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Nashville, 1999. 219-227.

Ziemann-Liess Ltda. "Túneis Pasteurizadores." *Descritivo de Produtos*, Canoas, 1985.