

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

ESTUDO DE DESEMPENHO DE ESGUICHOS PARA TÚNEIS DE PASTEURIZAÇÃO

por

Luís Fernando Fasolo Klein

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2009.

ESTUDO DE DESEMPENHO DE ESGUICHOS PARA TÚNEIS DE PASTEURIZAÇÃO

por

Luís Fernando Fasolo Klein
Engenheiro Mecânico, UFRGS

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 de Energia e Massa

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Aprovada por:

Prof. Dr. Sandro Campos Amico (PPGEM)

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer (PROMEC)

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey (PROMEC)

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 de Junho de 2009.

AGRADECIMENTOS

Eu quero agradecer à Cíntia, pela compreensão e a contribuição durante toda essa etapa, apoiando todas as minhas decisões. Até quando eu pensei em desistir...

Agradeço aos meus pais, Nina e Mario, que sempre deram prioridade à educação dos filhos e hoje tem dois filhos engenheiros pela UFRGS e uma filha indo pelo mesmo caminho. Também o meu reconhecimento para os meus irmãos e demais familiares, pelo suporte.

Ao Daniel Fontana, pela ajuda durante o período das aulas e da dissertação e pelos dias e dias de papo sobre UP e pasteurização.

Um agradecimento ao professor Schneider, que mais uma vez aceitou orientar um trabalho meu e deu todo o suporte para dar a consistência necessária à dissertação. Um reconhecimento especial a não desistência dele, mesmo eu estando à 4.000 km de distância e ficar sem mandar notícias... Ao João Batista, pelo apoio com suas soluções rápidas e eficientes aos problemas enfrentados na montagem da bancada, e à UFRGS também o meu agradecimento.

À Ziemann-Liess deixo aqui um agradecimento especial, pelo incentivo à realização deste mestrado, apoiando o tempo todo com os recursos necessários, e por acreditar no desenvolvimento da tecnologia nacional. E aos colegas Nílson, que acredita no contato com a universidade, e Eleandro, por toda a assistência técnica à elétrica da bancada e aos demais pelo estímulo.

RESUMO

Atualmente na indústria alimentícia é comum a efetivação do processo de pasteurização em túneis, onde um fluido, geralmente água, é utilizado para transferir para o produto a energia térmica necessária. Por causa disso, um dos fatores importantes deste procedimento é a maneira como este fluido é aspergido por sobre o produto a ser pasteurizado. Existem diversas maneiras de fazer esta aspensão, cada uma com as suas características e eficiência no que diz respeito à transferência de energia no processo de pasteurização. O objetivo deste trabalho é avaliar diferentes modelos de esguichos utilizados em túneis de pasteurização de cerveja. Para isso é montada uma bancada para a realização ensaios que avaliem uma das etapas do processo de pasteurização da cerveja, onde são instalados os exemplares dos esguichos e uma garrafa de 600 ml de cerveja instrumentada. Todos os testes são realizados com os mesmos parâmetros (vazão e temperatura do fluido), somente alternando os modelos de esguichos. Usa-se a ANOVA para a comparação dos tempos de aquecimento do fluido interno e calcula-se o número de Nusselt para a convecção interna na garrafa para a avaliação dos esguichos. O resultado encontrado mostra uma independência do desempenho do processo de aquecimento em relação à alteração de modelo de esguicho para três dos quatro modelos avaliados e o último apresenta um desempenho pior.

Palavras-chaves: esguicho, túnel de pasteurização, convecção interna

ABSTRACT

“STUDY ON SPRAYS PERFORMANCE FOR PASTEURIZATION TUNNELS”

Nowadays, in the food industry, it is usual to carry out the pasteurization process in pasteurization tunnels, where a fluid, generally water, is used to transfer the required thermal energy to the product. Because of this, one of the most important aspects of this procedure is how the fluid is sprinkled on the product that needs to be pasteurized. There are many ways to do this, each one has its own characteristics and efficiency regarding the energy transfer to the pasteurization process. The objective of this work is to evaluate distinct spray models that are used in pasteurization tunnels for beer. For this, a workbench is built to carry out experiences that evaluate one of the stages of the beer pasteurization process, where spray models are installed and an instrumented 600 ml bottle beer is used. All the tests are performed using the same specifications (flow rate and fluid temperature), just varying the spray models. ANOVA, to compare the heating times of the internal fluid, and the Nusselt number of the internal convection are used for the sprays evaluation. The result shows the independence of the performance with regard to the change of the spray model for three of the four tested models and the latter shows a worse performance.

Keywords: spray, pasteurization tunnel, internal convection

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	2
1.1	Fundamentos sobre cerveja e pasteurização	7
2.	FUNDAMENTOS	14
2.1	Análise da pasteurização	14
2.2	Transferência de calor	25
2.3	Análise estatística.....	29
3.	TÉCNICA EXPERIMENTAL.....	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE SÍMBOLOS

a	declividade da reta
A	área [m^2]
F	valor observado da estatística do teste F (ANOVA)
$F_{crítico}$	valor crítico de comparação da estatística do teste F (ANOVA)
g	aceleração da gravidade [m/s^2]
h	coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2.K$]
\bar{h}	coeficiente médio de transferência de calor por convecção [$W/m^2.K$]
H	dimensão vertical do recipiente 2D [m]
k	condutividade térmica [$W/m.K$]
L	espessura da parede do vasilhame [m]
Nu	número de Nussel
\overline{Nu}	número de Nussel médio
q	taxa de transferência de calor [W]
r	coordenada polar do eixo radial [m]
R	dimensão horizontal do recipiente 2D [m]
R^2	coeficiente de correlação
Ra	número de Rayleigh
t	tempo [s]
T	temperatura [$^{\circ}C$]
T_{∞}	temperatura da águas dos esguichos [$^{\circ}C$]
T_w	temperatura da parede do vasilhame [$^{\circ}C$]
T_b	temperatura da bebida no interior do vasilhame [$^{\circ}C$]
T_0	temperatura inicial [$^{\circ}C$]
UP	unidade de pasteurização

Letras gregas:

α	difusividade térmica [m^2/s]
θ	diferença de temperatura ($\theta \equiv T - T_{\infty}$) [$^{\circ}C$]
θ_0	diferença inicial de temperatura ($\theta \equiv T_0 - T_{\infty}$) [$^{\circ}C$]
τ	constante de tempo térmica [$1/s$]
ν	viscosidade cinemática [m^2/s]

Sub-índices:

$conv_e$	convecção externa
e	externa
$cond$	condução
$conv_i$	convecção interna
i	interna
$inst$	instantâneo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tina para o cozimento do malte (Fonte: www.cervesia.com.br)	11
Figura 1.2 - Tanques de fermentação e maturação da cerveja (Fonte: www.zl.ind.br).....	11
Figura 2.1 - Gráfico UP x temperatura	15
Figura 2.2 – Túnel de pasteurização para cerveja (fabricante Ziemann-Liess)	16
Figura 2.3 - Gráfico de temperaturas e a evolução do acúmulo de UP do processo de pasteurização	17
Figura 2.4 – Circulação de aproveitamento de energia nas zonas de aquecimento e resfriamento [Holstein-Kappert S.A - Indústria de Máquinas, 1989]	19
Figura 2.5 – Circulação de água nas zonas de pasteurização [Holstein-Kappert S.A - Indústria de Máquinas, 1989].....	19
Figura 2.6 – Ilustração da circulação da bebida devido ao aquecimento por esguicho externo [Horn, et al., 1997]	20
Figura 2.7 – Circuito completo da água no túnel de pasteurização, com a indicação das temperaturas do processo [Holstein-Kappert S.A - Indústria de Máquinas, 1989].....	21
Figura 2.8 – Resultado de simulação numérica onde apresenta-se o gradiente de temperaturas de uma garrafa com temperatura inicial de 298 K sendo aquecida por um esguicho de 323 K, após 100 s [Fontana, 2009].....	22
Figura 2.9 – Modelos de termógrafos utilizados na indústria: marcas Haffmanns (à esquerda) e Steinfurth (à direita) (Fontes: www.haffmanns.nl e www.steinfurth.com)	24
Figura 2.10 – Esquema dos fluxos de calor em regime transiente do aquecimento da garrafa e da bebida, promovido pelo esguicho externo, desde o momento inicial t_0 até um instante t_n	26
Figura 2.11 – Recipiente retangular fechado, com as paredes nas condições de temperatura prescritas, onde pode-se ver a formação de camadas limites térmicas e a movimentação do fluido interno.....	28
Figura 3.1 – Bancada montada para o experimento com os esguichos	30
Figura 3.2 - Localização dos sensores instalados na garrafa de 600 ml, referenciados a partir do fundo (esquerda) e a garrafa instrumentada (direita).....	31
Figura 3.3 - Fluxograma da bancada de testes.....	32
Figura 3.4 - Garrafa no interior do aquário, instalada sobre o suporte	33
Figura 3.5 – Medidor de vazão instalado na tubulação dos esguichos	34
Figura 3.6 – Válvula atuada por ar comprimido e o controlador de processo	35

Figura 3.7 – Aquisidor de sinal instalado na bancada	35
Figura 3.8 – Bandeja utilizada na bancada de testes.....	36
Figura 3.9 – Detalhes dimensionais da bandeja utilizada na bancada	37
Figura 3.10 - Bandeja perfurada esguichando em um túnel de pasteurização (Fonte: Ziemann-Liess).....	37
Figura 3.11 – Tubo quadrado utilizado na bancada (esquerda) e detalhe do orifício do esguicho, indicando o sentido do fluxo de água (direita).....	38
Figura 3.12 - Tubo quadrado com recorte em “U” esguichando em um túnel de pasteurização (Fonte: Ziemann-Liess)	38
Figura 3.13 - Tubo com os esguichos marca Spraying Systems utilizado na bancada.....	39
Figura 3.14 - Esguicho marca Spraying Systems: vista lateral (esquerda) e detalhe do orifício (direita)	39
Figura 3.15- Esguichos marca Spraying Systems montados em um túnel de pasteurização (Fonte: Ziemann-Liess)	39
Figura 3.16 – Tubo com os esguichos marca Bete utilizado na bancada	40
Figura 3.17 - Esguicho marca Bete: vista lateral (esquerda) e detalhe do orifício (direita)	40
Figura 3.18 – Esguicho marca Bete montado em um túnel de pasteurização	40
Figura 3.19 - Vista superior indicando a posição da bandeja e da garrafa no aquário	41
Figura 3.20 – Vista superior indicando a posição dos rasgos nos tubos quadrados em relação à garrafa e as projeções do cone de água na altura onde inicia o nível de água na garrafa	41
Figura 3.21 – Vista superior indicando a posição dos esguichos marca Spraying Systems em relação à garrafa e as projeções do cone de água na altura onde inicia o nível de água na garrafa.....	42
Figura 3.22 – Vista superior indicando a posição dos esguichos marca Bete em relação à garrafa e as projeções do cone de água na altura onde inicia o nível de água na garrafa	42
Figura 4.1 – Esguicho com bandeja.....	43
Figura 4.2 – Esguicho em forma de leque, utilizando o tubo quadrado, vista perpendicular ao fluxo.....	44
Figura 4.3 – Vista do esguicho com tubo quadrado, longitudinal ao fluxo de água.....	44
Figura 4.4 – Esguichos marca Spraying Systems instalados na bancada e a indicação do cone com um ângulo de 90° produzido pelo aspensor.....	45

Figura 4.5 – Esguichos marca Bete instalados na bancada e a indicação do cone com um ângulo de 65° produzido pelo aspersor	46
Figura 4.6 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando a bandeja perfurada.....	47
Figura 4.7 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando o tubo quadrado.	47
Figura 4.8 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando o esguicho marca Spraying Systems.....	48
Figura 4.9 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando o esguicho marca Bete	48
Figura 4.10 – Analogia entre o problema teórico do recipiente 2D (à esquerda) [Bejan, 1995] e a garrafa de cerveja (à direita), com os componentes em comum às duas situações	54
Figura 4.11 – Gráfico $Nu_{inst} \times t$ médio para os experimentos com a bandeja.....	55
Figura 4.12 – Gráfico $Nu_{inst} \times t$ médio para os experimentos com o tubo quadrado	56
Figura 4.13 – Gráfico $Nu_{inst} \times t$ médio para os experimentos com o esguicho marca Spraying Systems	56
Figura 4.14 – Gráfico $Nu_{inst} \times t$ médio para os experimentos com o esguicho marca Bete.....	57
Figura 4.15 – Gráfico $Nu_{inst} \times t$ médio reunindo os resultados dos modelos de esguichos estudados	57
Figura 4.16 – Gráfico $Nu_{inst} \times t$ de todos os esguichos, com uma curva de tendência para cada modelo e a indicação da declividade (α) e do coeficiente de correlação (R^2)	58
Figura 4.17 – Vista superior de um túnel de pasteurização com esguichos de tubos quadrados, mostrando o espaçamento entre os tubos.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação temperatura da cerveja x UP em 1 minuto de exposição	14
Tabela 4.1 – Média e desvio padrão do tempo de aquecimento de 30°C à 40°C, medido pelo sensor central (os valores são em segundos)	50
Tabela 4.2 – Média e desvio padrão da constante de tempo τ para a curva de aquecimento, medido pelo sensor superior (os valores são em segundos)	50
Tabela 4.3 – Média e desvio padrão da constante de tempo τ para a curva de aquecimento, medido pelo sensor inferior (os valores são em segundos)	51
Tabela 4.4 – Tabela da análise dos dados de tempo do sensor central (ANOVA)	51
Tabela 4.5 – Tabela da análise dos dados de tempo do sensor superior (ANOVA)	52
Tabela 4.6 – Tabela da análise dos dados de tempo do sensor inferior (ANOVA)	52

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, para atender a demanda de consumo e se manterem competitivas no mercado, as empresas do ramo de bebidas têm que estar sempre se valendo dos melhores procedimentos. Um deles é sempre procurar adquirir equipamentos que possam atender as suas necessidades de maneira que seja demandado o menor custo possível. Ou seja, processar uma maior quantidade de produtos com uma menor quantidade de matéria-prima e insumos, sem afetar a qualidade desejada. Para isto, os fabricantes destes equipamentos devem empregar cada vez mais tecnologia, investindo em pesquisa para melhoria de processos, atendendo o mercado com equipamentos cada vez mais eficientes. Muito importante também é o fator ecológico, onde minimizar os danos à natureza e diminuir o consumo de insumos (água, energia elétrica, matéria-prima) é cada vez mais colocado como uma exigência para as empresas de bebidas.

Buscando este aprimoramento nos equipamentos, pode-se separar cada um dos seus sistemas e realizar um estudo individual para cada processo, tentando aperfeiçoá-lo para alcançar os objetivos supracitados. Para assim, no somatório de todos os sistemas, cada um com algum aumento no seu desempenho, o equipamento resultante esteja em melhores condições que a versão anterior.

Realizando a análise destes sistemas que compõe o todo, pode propor troca de materiais, modificação de métodos de fabricação, alterações em parâmetros de processos, etc., por exemplo. Também podem ser realizados estudos mais elementares, como aqueles para entender quais os fenômenos físicos que estão acontecendo em cada processo e, assim, investigar onde pode ser feita alguma melhoria.

Neste contexto, pode-se tomar como exemplo o túnel de pasteurização de cerveja, que é utilizado na indústria de bebidas. Este equipamento é utilizado para realizar a pasteurização da cerveja já em sua embalagem final (lata ou garrafa), visando aumentar o seu prazo de validade. O equipamento realiza o processo através de aspersão de água quente nos vasilhames, que, por estar com a temperatura maior que a da bebida, transfere a energia térmica necessária para que ocorra a pasteurização do produto. Assim, no caso do sistema água-cerveja, existe um fenômeno de transferência de calor que pode ser estudado, possivelmente levando ao aperfeiçoamento do sistema.

Entendendo como ocorre esta transferência de calor entre a água e o vasilhame, consegue-se avaliar como realizá-la com uma menor quantidade de água, forçando uma melhora do coeficiente de troca térmica, por exemplo. Com isso, o equipamento precisaria de menos recursos para realizar o mesmo processo, no caso, a pasteurização da cerveja.

Dentro de uma cervejaria, existe um gasto elevado de água para a sua fabricação. Consome-se de 4 a 11 litros de água para a produção de 1 litro de cerveja [Fillaudeau, et al., 2006], sendo que um terço desta quantidade é referente à utilização em processos que não são relativos diretamente à produção da bebida, como limpeza dos equipamentos e tanques, produção de vapor, etc. No setor de engarrafamento ocorre grande parte deste consumo indireto e nele está instalado o túnel de pasteurização, que funciona com grandes tanques armazenando água (quente e fria) para suprir as necessidades do processo.

Para haver um acréscimo de qualidade neste tipo de equipamento, este trabalho tem como proposta fazer um estudo das características de modelos de esguicho montados em túneis de pasteurização em relação ao fenômeno de transferência de calor com a cerveja em seu vasilhame final. Para isso, irá se verificar, dentro de alguns tipos de esguichos disponíveis para este fim, quais deles são os melhores para esta finalidade e, conseqüentemente, qual deles traria um melhor desempenho para o túnel de pasteurização com a mesma quantidade de insumos empregados.

Com o propósito de conseguir resultados neste sentido, serão colhidos dados de temperaturas em uma embalagem de cerveja, para a avaliação da transferência de calor em uma das etapas da pasteurização da cerveja. Para a ponderação destes dados e comparação dos modelos de esguichos, está prevista a investigação das rampas de temperatura no interior do vasilhame e também da intensidade de transferência de calor entre a água do esguicho e a cerveja embalada. Com isso, no final, ter-se-á uma classificação dos modelos de esguicho propostos, em relação a sua contribuição para a melhoria do equipamento analisado, o túnel de pasteurização.

Para iniciar o estudo, foram buscados resultados que fossem relevantes ao estudo de transferência de calor através de esguichos em vários setores e não somente relativos à utilização em túneis de pasteurização.

Intuitivamente, entende-se que deve haver diferenças entre a transferência de calor da água para o produto se esta for esguichada pressurizada ou se simplesmente for derramada por cima. Outro ponto é que, certos tipos de esguichos possuem um formato que levam a fragmentação do jato de água em gotas menores, por outro lado, existem modelos que emitem jatos diretos para o produto. Deve-se procurar a configuração de parâmetros (vazão, pressão, formato de esguicho) que será a mais eficiente. Existem vários trabalhos que utilizaram esguichos para a transferência de calor, com diferentes resultados apresentados. O trabalho de Lewicki, et al., 1983 investigou os fatores que influenciam as condições de transferência de calor de garrafas em um túnel de pasteurização. Foi construído um módulo de um equipamento para investigar as seguintes variáveis: formato das garrafas, intensidade do esguicho, localização da garrafa em relação ao

esguicho e alteração da configuração dos esguichos em relação às garrafas. O resultado encontrado foi que a intensidade do esguicho e a localização da garrafa em relação ao eixo vertical do esguicho são os fatores que mais influenciam o aquecimento da garrafa, enquanto os outros fatores têm menor influência.

Em Chen, et al., 2002 foi realizado um trabalho estatístico em relação a esguichos com água para resfriamento de um bloco de cobre aquecido por resistências. Dentre os fatores avaliados (tamanho médio e velocidade média das gotas e fluxo de gotas), o que mais influencia a troca térmica é a velocidade da gota (quanto maior, melhor a retirada de calor do bloco), seguido pelo fluxo de gotas. Outro resultado informado é que a variação do tamanho das gotas não pareceu ter influência no coeficiente de convecção. Já em Chen, et al., 2004, foram citadas algumas relações matemáticas entre as mesmas variáveis do trabalho anterior e o melhor resultado de troca térmica, para o mesmo caso de resfriamento de blocos com uma resistência elétrica, se deu por um esguicho com gotas menores e com maior velocidade.

Em Dhruv, et al., 2005, foi discutido que, para uma troca térmica mais eficiente no processo de pasteurização de bebidas, deve-se montar o sistema de tal maneira que a água que já passou pelos vasilhames tenha a temperatura a mais próxima possível da água que está sendo esguichada, mantendo assim um grande diferencial de temperatura entre o fluido de transporte de energia e o produto. Ou seja, é preferível uma alta vazão de água esguichada em cima do produto. Ainda neste trabalho, é citada a importância de buscar um escoamento turbulento entre a água e os vasilhames, para uma maior eficiência, mostrando que, além da vazão, é significativa para o processo a forma como o esguicho força o fluido a escoar pelos recipientes.

A conclusão de que a posição do objeto em relação ao esguicho pode influenciar a troca térmica foi apresentada em Silk, et al., 2006, onde o resultado foi que, com esguichos montados em diferentes ângulos em relação ao eixo vertical da superfície a ser testada, ao invés de ficar perpendicular, o filme de líquido sobre a superfície diminui e assim o coeficiente de transferência de calor entre a água e os objetos é maior. Este resultado também foi obtido para experimentos de esguichos resfriando blocos aquecidos por uma resistência elétrica interna.

Um fato a ser comentado é que, durante a pesquisa para este trabalho, não foram encontradas citações de experimentos semelhantes aos comentados anteriormente, que tenham sido realizados para encontrar o efeito de esguichos para o aquecimento de objetos, ao invés de resfriamento, que não fossem relacionados à pasteurização de alimentos. Isso se deve, provavelmente, à maior facilidade de se realizar o experimento considerando o resfriamento (utiliza-se uma fonte elétrica no interior do objeto, onde se consegue facilmente medir a potência retirada para comparação dos diferentes processos), ser um processo mais usual o resfriamento

de componentes (devido ao calor gerado pelo seu funcionamento) e por ser empregado em uma gama muito grande de aplicações (equipamentos mecânicos, eletrônica, instrumentação, etc.).

O tamanho da gota em esguichos foi descrito como um fator importante a ser investigado em Da Cunha, et al., 2007. Neste trabalho sobre a aplicação de defensivos agrícolas em plantações através de aspersão, o diâmetro da gota produzida pelo esguicho afeta a maneira como a água se acumula na planta. Um esguicho que produz gotas muito grandes tende a produzir uma cobertura menos uniforme do que uma pulverização que resulte em uma mesma quantidade de água em porções menores. Trazendo este resultado para o caso das garrafas no túnel de pasteurização, poderá haver uma diferença em relação à área de contato para a troca térmica entre a água e o vasilhame por causa da diferença do tamanho das gotas aspergidas que atingem o vasilhame, por exemplo. Também neste mesmo trabalho, existem resultados sobre a modificação da configuração do padrão do diâmetro médio das gotas com a alteração da pressão e vazão de esguicho.

O uso de esguichos para o resfriamento de componentes eletrônicos foi estudado por Whelan, et al., 2009, onde foram verificados os efeitos da geometria do bocal do esguicho nos resultados de troca térmica e também na pressão de bombeamento do fluido. Em relação a uma faixa de números de Reynolds de 800 a 10000, foram testados experimentalmente seis bocais diferentes, onde o diferencial eram as características do formato de entrada e saída (chanfrado, arredondado ou canto vivo). Os demais parâmetros foram mantidos constantes. O resultado encontrado foi que essa alteração na configuração da forma do bocal produz variações nos coeficientes de troca térmica. Também se verificou que alterando o modelo dos esguichos, varia a pressão de bombeamento necessária para alcançar um mesmo coeficiente. Ou seja, pode-se alcançar a mesma taxa de retirada de calor utilizando uma pressão de aspersão menor apenas com a troca do bocal. Isto refletiria diretamente em economia de energia elétrica, se este resultado fosse aplicado em um sistema de refrigeração.

Ao tentar modelar o problema de garrafas passando pelo interior de um túnel de pasteurização, para encontrar um resultado numérico, aparece um cenário com uma série de variáveis e nem todas são de fácil obtenção. Quando se avalia um grupo de vasilhames, todos encostados uns nos outros, como se estivesse em um túnel de pasteurização e com água sendo esguichada por cima, há uma série de fatores que devem ser levados em conta. Analisando o produto, devem-se procurar quais serão as condições de contorno. Tem-se um processo de convecção na parte externa, com a água escorrendo ao longo da embalagem. Ao mesmo tempo, têm-se outros recipientes encostados, portanto, a condição de convecção não será constante ao longo de todo o contorno. Além de isto poder influenciar significativamente no resultado do

cálculo, deve-se encontrar como descrever esta situação com equações. Na literatura encontra-se uma série de expressões para o cálculo de transferência de calor por convecção, mas cada uma deve ser utilizada em uma determinada configuração (placa plana, cilindro vertical, etc.). Pode-se supor uma delas para simbolizar a situação, apesar de não ser exatamente o cenário real. Em Dilay, et al., 2006, para o cálculo de transferência de calor entre uma garrafa e o esguicho de água, foi utilizado o coeficiente de convecção de uma camada limite turbulenta em uma parede plana, por exemplo. E esta suposição se mostrou eficiente, uma vez que o cálculo foi posteriormente comparado com uma situação experimental, com bons resultados. E, além da convecção, poderá haver transferência de energia na forma de condução (entre as paredes das garrafas encostadas) ou por radiação (em relação às paredes do túnel e a própria água do esguicho no ar) que possam ser significativas ao problema. Não se pode desconsiderá-las sem antes refletir se o resultado não poderá se transformar em um dado inconsistente.

Conectado a este problema, tem-se a parte interna. Por se tratar de cerveja, um líquido, pode-se presumir que haverá um sistema de convecção interna. Mas, como será apresentado na seção 1.1, existem algumas particularidades em relação ao formato da embalagem, que levam a uma circulação de produto pela embalagem, mas com a presença de pontos de estagnação da bebida.

Outro fator que deve ser introduzido no problema é o esguicho. Ele deve ter suas variáveis conhecidas, de modo que se possa modelá-lo de forma que seja representado coerentemente com a realidade. Fatos como a formação de um filme contínuo de água, que cobre todo o produto, ou se este filme tem espessura variável ao longo do perfil vertical da embalagem são fatores que devem ser levados em conta. Hipóteses como considerar o esguicho como uma condição de contorno de temperatura constante ou aplicar uma condição de convecção na parte externa do vasilhame também são avaliações que precisam ser realizadas, para agregar mais precisão ao problema. E deve-se levar em conta que este processo é um problema transiente, pois a transferência de energia acontece ao longo do túnel e com várias temperaturas de esguicho diferentes. Assim, o tempo é uma variável muito importante para configurar a situação. Como se pode ver, a situação proposta inclui muitas variáveis. No entanto é um problema cujos resultados poderão trazer muitos benefícios para o projeto de túneis de pasteurização.

Como foi citado anteriormente, existem vários modelos de esguichos sendo utilizados atualmente em equipamentos. Para este trabalho está sendo prevista a avaliação do desempenho de quatro modelos: bandeja perfurada, tubos com aberturas e dois bicos aspersores, escolhidos porque estão sendo atualmente utilizados em projetos de túneis de pasteurização de cerveja.

Assim, é interessante, para aumentar o conhecimento existente do assunto, a realização de testes práticos, que produzam dados que possam ser utilizados para uma avaliação qualitativa dos tipos de esguichos de interesse.

Para isso, deve-se escolher qual será o fator que levará à classificação do desempenho destes modelos de esguicho. Um fator que pode ser considerado é o coeficiente de transferência de calor por convecção do esguicho em relação à garrafa. Ou seja, em um esguicho onde o valor do coeficiente de troca térmica é maior que o valor de outro modelo de esguicho, pode-se dizer que o desempenho é melhor, pois consegue uma taxa de transferência de calor maior no mesmo período do tempo e com as mesmas condições. Mas, apesar de ser um bom comparativo, a medição do coeficiente de transferência por convecção não é direta, sendo obtido através de medições de outras variáveis do sistema.

A partir daqui, nesta dissertação, na seção 1.1 será apresentada uma revisão em relação aos processos que envolvem a fabricação da cerveja, inclusive para justificar algumas decisões tomadas ao longo do trabalho. Em seguida (Capítulo 2), serão apresentados os fundamentos necessários para o desenvolvimento e análise dos resultados. No Capítulo 3, é mostrada a configuração de uma bancada que foi montada para simular uma etapa do processo de pasteurização e onde os diferentes esguichos pudessem ser avaliados nas mesmas condições. Também apresenta-se a sistemática dos testes, indicando quais dados foram adquiridos, como foi executado o processo e a sua justificativa. Os resultados são apresentados no Capítulo 4 e é feita a avaliação e comparação do desempenho de cada modelo de esguicho. E ao final, no Capítulo 5, é apresentada a conclusão do trabalho, indicando como os resultados mostrados podem ser utilizados em projetos de novos túneis de pasteurização.

1.1 Fundamentos sobre cerveja e pasteurização

Uma grande parte da produção industrial mundial é resultante da fabricação e processamento de alimentos. Em todo o mundo existe uma gama muito grande de comidas e bebidas que são cultivadas, manufaturadas, embaladas e vendidas para satisfazerem as vontades e necessidades da população. Para atender este quesito com eficiência, as unidades fabris estão localizadas de maneira a aperfeiçoar o atendimento aos consumidores, estar perto da fonte das matérias-primas, etc. No entanto, devido a uma série de fatores econômicos e estratégicos, nem sempre é possível estar com o local de manufatura do alimento tão próximo do mercado que irá consumi-lo, e isso pode levar o produto a perder as suas características ou até estragar entre a sua produção e o seu consumo. Outro ponto que deve ser levado em conta é que, para atender às

variações de demanda, muitas vezes é essencial estocar o produto, que também poderá ser perdido se, por ventura, passar muito tempo até o consumo.

Por isso, uma importante área de estudo na indústria alimentícia são as formas de aumentar a preservação dos produtos para que não haja problemas de qualidade ou perdas entre o tempo em que o alimento é processado e o seu consumo pelo cliente. Muitas são as maneiras de se proceder esta conservação e para fazer a escolha da forma mais correta, precisa-se conhecer com segurança quais são os fatores que levam o produto à degradação. Em alguns casos, a temperatura elevada afeta a estrutura do alimento, em outros casos, o contato com o oxigênio leva à proliferação de micro-organismos nocivos que podem alterar as características ou mesmo estragar o produto. Em vegetais, é muito utilizada a refrigeração, por exemplo, para que o item possa conservar as suas características desde a colheita até o consumidor. Em outros produtos, que passam por industrialização, são adicionados conservantes químicos no momento da fabricação, para atenuar a deterioração atingindo um prazo de validade definido pelo fabricante para o consumo. Embalagens especiais também são utilizadas, onde o alimento é mantido sob vácuo ou isolado termicamente. O congelamento também é um processo muito utilizado para a conservação.

Em outros tipos de produtos, onde há uma grande presença de micro-organismos que são necessários para a fabricação do alimento (no processo de fermentação, por exemplo) ou estão presentes por causa do processo (processamento de carne ou leite), é mais comum o uso de processos com elevação de temperatura do produto para a eliminação ou desativação destas estruturas nocivas à conservação. No caso do leite, um processo que é utilizado é a esterilização, onde ele é aquecido a altas temperaturas por um período curto de tempo e, logo em seguida, resfriado para ocorrer um choque térmico no produto. Assim são desativados os organismos que foram introduzidos na coleta e no armazenamento do leite e poderão degradá-lo ou torná-lo nocivo ao ser consumido. Neste caso, o processo não altera nem as propriedades nem o sabor. Em outros produtos, a esterilização não pode ser utilizada porque, apesar de cumprir o papel de elevar o prazo de conservação por eliminar os organismos não desejáveis, leva a uma severa alteração no produto, mudando completamente as suas características. Para estas situações, um processo que pode ser indicado é a pasteurização.

Pasteurização é a técnica que permite inativar ou até eliminar alguns micro-organismos através da elevação da temperatura do produto, estabilizando-o bacteriologicamente sem alterar profundamente suas propriedades. A temperatura e o tempo de exposição, necessários para que ocorra a pasteurização são específicos do produto e do tipo de microrganismos que se deseja eliminar sendo, portanto, definidos através de estudos laboratoriais pelo fabricante do produto.

Este método de conservação deve-se a Louis Pasteur (1822-1895), cientista francês que, entre outros assuntos, pesquisou os métodos de fermentação e seus efeitos. Por volta de 1850, a pedido de vinicultores da França, Pasteur começou a pesquisar qual era a razão pela qual os seus produtos azedavam após algum tempo de armazenamento, e verificou a existência de uma bactéria que era estranha ao processo fermentativo normal do vinho e que era responsável pela deterioração. O cientista propôs o aquecimento gradual da bebida até 48°C para a resolução do problema e surgiram resultados positivos. Prosseguindo com os estudos no uso do calor para eliminar fenômenos indesejáveis, outros cientistas começaram a aplicar estes avanços também na área médica e por volta de 1865, na Inglaterra, passou-se a aplicar o aquecimento de instrumentos e ferimentos para a eliminação de micro-organismos que poderiam causar doenças. E finalmente, em 1870, Louis Pasteur aplicou a técnica de pasteurização pela primeira vez na cerveja, com resultados semelhantes aos obtidos com o vinho. Após isso, cervejarias européias passaram a adotar a pasteurização como parte de seu processo industrial para prolongar a vida útil da cerveja, o que permitiu sua exportação, como por exemplo, da Inglaterra para a Índia, via Cabo da Boa Esperança.

A cerveja é um produto que tem sua origem juntamente com o início da civilização e é consumida até os dias de hoje. É a quinta bebida mais consumida no mundo, atrás de chá, bebidas carbonatadas, leite e café [Fillaudeau, et al., 2006]. Sumérios e egípcios produziam cerveja há mais de 5000 anos e na Babilônia, há 4000 anos, haviam dezesseis tipos da bebida fabricadas com cevada, trigo e mel. O código de Hamurabi (por volta de 2050 a.C.) regulamentava o fabrico e também declarava a pena de morte àqueles que diluíam a cerveja que vendiam. Na América, muito tempo antes do descobrimento, os incas produziam cerveja a partir do grão do milho. Na Idade Média, a cerveja era utilizada como mercadoria para comércio, pagamentos e impostos e, neste período, os monges aperfeiçoaram a tecnologia cervejeira e serviam como vendedores por atacado da bebida.

A palavra cerveja, de origem gaulesa, chegou ao português através do latim *cervisia*. No inglês, a palavra *beer* tem a sua origem do latim *bibere*, que quer dizer beber. Ela é definida como “uma bebida obtida pela fermentação alcoólica de um extrato aquoso de cereais germinados com a adição de lúpulo” [De Clerck, 1957]. A cerveja se distingue de outras bebidas fermentadas, como o vinho, por seu baixo teor alcoólico e da constante presença do “colarinho” pelo desenvolvimento do dióxido de carbono. Em alguns países, existem definições legais para a cerveja. Na Alemanha, a cerveja é definida como “a bebida obtida pela fermentação, e não destilação, de cevada germinada, lúpulo, levedura e água exclusivamente“. Naquele país é proibido fazer cerveja com outros produtos que não sejam os quatro anteriormente mencionados

desde 1516, quando o Duque Guilherme IV, da Baviera, instituiu a Lei da Pureza (*Reinheitsgebot*). A partir de 1906, o *Reinheitsgebot* passou a ser adotado em toda a Alemanha. Mais recentemente, no entanto, algumas concessões foram feitas para a fabricação de tipos especiais de cerveja, onde está liberada a adição de outros componentes, como açúcar, e outros tipos de cereais (como o trigo, por exemplo). Mas a maioria dos cervejeiros alemães continua a seguir as prescrições do *Reinheitsgebot*, consideradas garantia de qualidade.

A fabricação industrial da cerveja pode ser descrita através de três etapas principais [Oetterer, 2004]:

- Fabricação do malte: a cevada é a principal matéria-prima da cerveja, mas ela, como obtida, não fornece um extrato que possa ser fermentado satisfatoriamente. Por isso, ela deve ser germinada para que ocorram algumas reações químicas na semente, de modo que o amido presente se transforme em açúcares solúveis, que poderão ser transformados em álcool posteriormente. O processo inicia com a permanência da cevada por três dias mergulhada em água, até que alcance 45% de umidade. Em seguida, os grãos são deixados em repouso em ambiente com condições de temperatura, umidade e aeração controladas, por aproximadamente oito dias, para ocorrer a germinação. No final desta etapa, os grãos passam a ser conhecidos como malte verde. Após a germinação, o malte verde é submetido a temperatura de 70°C em estufas, até restar 10% de umidade interna e passam a ser chamados de malte seco ou simplesmente malte.

- Mosturação: nesta etapa, o malte é cozido em água quente a 75°C em grandes tinas (Figura 1.1). Em seguida, este caldo é filtrado, onde então é originado o mosto, que é a solução aquosa que foi separada da matéria insolúvel (cascas e outras partes do grão). Em seguida o mosto é misturado ao lúpulo e fervido por duas horas. Esta etapa do processo concede o sabor amargo e o aroma característico da cerveja e esteriliza o mosto para poder receber a levedura (fermento), que é acrescentada ao final da fervura.

Também nesta etapa, uma parte do malte (de 10 a 20%) pode ser substituída por algum outro cereal não germinado (geralmente arroz ou farinha de milho) ou ainda ser acrescentado algum tipo de açúcar no mosto. Estas adições não têm impacto na qualidade da cerveja e servem para diminuir o custo da fabricação e/ou fazer alguma correção na composição do extrato.



Figura 1.1 - Tina para o cozimento do malte (Fonte: www.cervesia.com.br)

- Fermentação: após a mistura do mosto com a levedura, inicia-se uma reação, onde o fermento passa a reduzir os açúcares em álcool e dióxido de carbono. Esta etapa dura em torno de uma semana e é realizado no interior de grandes tanques (Figura 1.2), onde a temperatura é mantida controlada. Aqui, dois tipos de cerveja podem ser obtidos: as cervejas de baixa fermentação, que são fermentadas a baixas temperaturas (5° a 10°C) ficando a levedura na parte de baixo do tanque fermentador, originando cervejas de sabor mais suave como as tipo *Pilsen*. Por outro lado, existem as cervejas de alta fermentação, que fermentam a temperaturas mais altas (de 15° a 20°C) e utiliza uma variedade diferente de fermento que flutua e se desloca para a parte de cima do tanque. Deste método são fabricadas as cervejas de um gosto mais encorpado, como as variedades *Ale* e *Stout*. No final da fermentação, a cerveja ainda permanece nos tanques por mais algumas semanas para a sua maturação, que tem o objetivo de atenuar o amargor causado pelo acréscimo do lúpulo, clarificar a cerveja e estabelecer o sabor final à bebida.



Figura 1.2 - Tanques de fermentação e maturação da cerveja (Fonte: www.zl.ind.br)

Após estas etapas, a cerveja está pronta para ser filtrada (para a retirada de restos de levedura e outros componentes sólidos que deixam a bebida turva e diminuem o seu prazo de validade) e, em seguida, embalada. Um item a ser observado no procedimento de envase, é o acréscimo de dióxido de carbono para o preenchimento do espaço vazio na parte superior da embalagem. Isto é feito para que a cerveja não fique embalada em contato com ar, o que pode levar à degeneração precoce da bebida, por oxidação.

Devido seu processo de fabricação, que utiliza microorganismos para a transformação dos açúcares em álcool que permanecem na bebida após a fermentação, a cerveja é uma bebida “viva”. Estes organismos continuam com o seu metabolismo ativo e a bebida continua a se transformar ao longo do tempo, mesmo após envasada, pois o processo de filtração não retira totalmente as leveduras. Assim, a cerveja deve ser consumida no máximo três semanas após a sua fabricação, em média. Após este período, ela já terá perdido as suas características organolépticas originais porque sua aparência e seu sabor terão sido alterados em relação à bebida recém fabricada. Além disso, também poderá ocorrer a procriação de algum micróbio que seja estranho ao processo e que tenha se instalado na cerveja durante a fabricação e o envasamento e, que ao ser consumida, poderá levar ao desenvolvimento de alguma patologia.

Assim o processo de pasteurização da cerveja serve para estabilizar as enzimas presentes no produto (prolongando o seu prazo de validade) e também eliminar possíveis contaminações presentes. Como falado anteriormente, em alguns casos, o local onde é fabricado o produto é muito próximo do consumidor final e a cerveja é consumida antes que vença seu prazo de validade. Na Europa, algumas marcas de cerveja não são pasteurizadas. Isso porque as distâncias são menores (há um grande número de cervejarias artesanais, que vendem a sua produção basicamente para a população das localidades no entorno da fábrica) e também porque, apesar de seus benefícios para a conservação, o processo de pasteurização altera o sabor e a cor da bebida e isso não é aceito por alguns fabricantes mais conservadores. Mas, cada vez mais, com o aumento das distâncias entre a produção e o consumo e também com o aumento das exigências de conservação do sabor da cerveja ao longo do tempo de armazenamento, o processo de pasteurização é utilizado.

Para se obter uma boa eficiência da pasteurização, devem-se observar alguns requisitos em relação ao processo. Primeiramente deve-se estabelecer qual método de pasteurização será utilizado. Para o caso da cerveja, pode ser feito de duas maneiras: antes de engarrafar ou após. Se for feita antes, a bebida passa pelo interior de trocadores de calor, onde ocorre o processo e, em seguida, é engarrafada. Neste caso o método é chamado de flash-pasteurização. É um método muito eficaz de se realizar a pasteurização, pois se consegue fazer um controle bem preciso do

processo através do ajuste da temperatura da cerveja no trocador. No entanto, para este método deve-se assegurar que não haverá contaminação da bebida durante o enchimento do vasilhame e também que este não traga alguma contaminação em seu interior.

Por isso, dá-se preferência à pasteurização realizada com a cerveja embalada. A bebida, ainda não pasteurizada, é colocada em seu vasilhame e selada, tomando-se o cuidado para não aprisionar ar juntamente com a cerveja. Após, a cerveja é submetida ao processo de pasteurização, que irá eliminar tanto os micro-organismos originários do processo de fabricação ou do processo de envase, vindo do ar ou das embalagens.

Considerando este segundo processo, para se estabelecer o procedimento necessário, deve ser levado em conta o vasilhame onde está armazenada a bebida. O tempo de aquecimento e o tempo de permanência na temperatura de pasteurização são influenciados pelo material e capacidade volumétrica da embalagem. Por exemplo, as tradicionais garrafas de 600 ml (feitas de vidro) são aquecidas mais lentamente do que as latas (com menor volume de bebida e feitas de alumínio, que tem menor resistência térmica que o vidro), portanto o tempo total de processo pode ser muito menor neste último caso. Outro requisito é o correto estabelecimento das temperaturas que serão utilizadas. Altas temperaturas no processo não necessariamente geram resultados melhores de pasteurização da cerveja em menos tempo, pois altas temperaturas podem causar alterações físico-químicas que a inutilizariam e, também, porque não se busca eliminar todos os micro-organismos presentes no produto. De fato não é primordial que isso aconteça e também existem tipos de organismos que são resistentes mesmo às altas temperaturas. Para a definição das temperaturas corretas para a pasteurização é importante conhecer, através de testes laboratoriais, o limite de temperatura que cada tipo de cerveja suporta, o tempo que ela pode permanecer neste patamar sem afetá-la e quais os micróbios nocivos existentes e sua imunidade ao calor. Assim define-se a temperatura letal, isto é, a máxima temperatura que a cerveja pode atingir durante a pasteurização para que os micro-organismos que não podem permanecer na bebida sejam inativados e sem que haja danos ao sabor e à qualidade da cerveja.

Também para dimensionar o processo de pasteurização pela qual a bebida deve sofrer se faz importante uma verificação em todo o processo industrial que a cerveja irá passar. O cultivo controlado de levedos em tanques apropriados e a utilização de colônias sempre novas na fermentação do mosto ao invés de se fazer aproveitamento de colônias já utilizadas anteriormente no processo, eliminam o aparecimento de formas silvestres e estranhas que se necessita que sejam eliminadas mais tarde. Também a revisão dos procedimentos entre a fabricação e o envase, tendo a operação bem conduzida, evitando o contato com ar e mantendo uma rotina de assepsia dos tanques e tubulações, evitam-se contaminações da bebida por

bactérias e fungos. Com estes dois cuidados, podem-se empregar temperaturas letais mais baixas e menores tempos de aquecimento para assegurar uma boa qualidade à cerveja.

2. FUNDAMENTOS

2.1 Análise da pasteurização

Para caracterizar um processo de pasteurização sem precisar especificar todos os passos descritos anteriormente (temperatura limite, embalagem, resistência dos micro-organismos presentes) para cada situação, criou-se em 1950 uma unidade de extermínio, ou inativação biológica, que aglutina todas estas informações, chamada de unidade de pasteurização (UP). A UP foi definida com o efeito causado à bebida quando ela permanece a 60°C por 1 minuto. A partir disso, foi realizada uma série de experimentos, onde foi estabelecida uma expressão para o cálculo da UP em um processo de pasteurização:

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

Com esta equação empírica, pode-se, a partir do tempo t em segundos que a cerveja permaneceu na temperatura T , em °C, calcular qual o efeito inibidor biológico ou quantas UP foram adquiridas. Assim, tem-se uma comparação matemática entre os efeitos de processos que utilizem temperaturas e tempos diferentes. Na Tabela 2.1, consegue-se verificar qual a quantidade de UP adquiridas por uma cerveja no intervalo de 1 minuto em diferentes temperaturas:

Tabela 2.1 – Relação temperatura da cerveja x UP em 1 minuto de exposição

Temperatura	UP	Temperatura	UP
50°C	0,036	61°C	1,393
51°C	0,051	62°C	1,940
52°C	0,070	63°C	2,702
53°C	0,098	64°C	3,764
54°C	0,137	65°C	5,243
55°C	0,190	66°C	7,303
56°C	0,265	67°C	10,190
57°C	0,369	68°C	14,200
58°C	0,515	69°C	19,780
59°C	0,717	70°C	27,550
60°C	1,000	71°C	38,380

Por se tratar de uma equação matemática, consegue-se calcular o valor de UP a partir de qualquer valor de temperatura que for introduzido na variável “T” da Equação

(1). No entanto, em geral nas medições realizadas em cervejarias, não se considera valores de UP adquiridas em temperaturas abaixo de 50°C. Primeiro por se tratar de valores muito baixos (menos que 0,03 UP por minuto de exposição) e, segundo, porque abaixo deste valor são poucos os microorganismos que serão inativados. Assim considera-se que o processo de pasteurização só inicia na cerveja quando ela ultrapasse esta temperatura.

Pela Tabela 2.1, vê-se que quanto mais alta a temperatura que a cerveja atinge, melhor o efeito inibidor, pois irá adquirir mais UP. Usando-se a Equação (1), pode-se então comparar as diferentes maneiras de se alcançar um mesmo número de UP com diferentes temperaturas. Este caso pode ser visualizado na Figura 2.1.

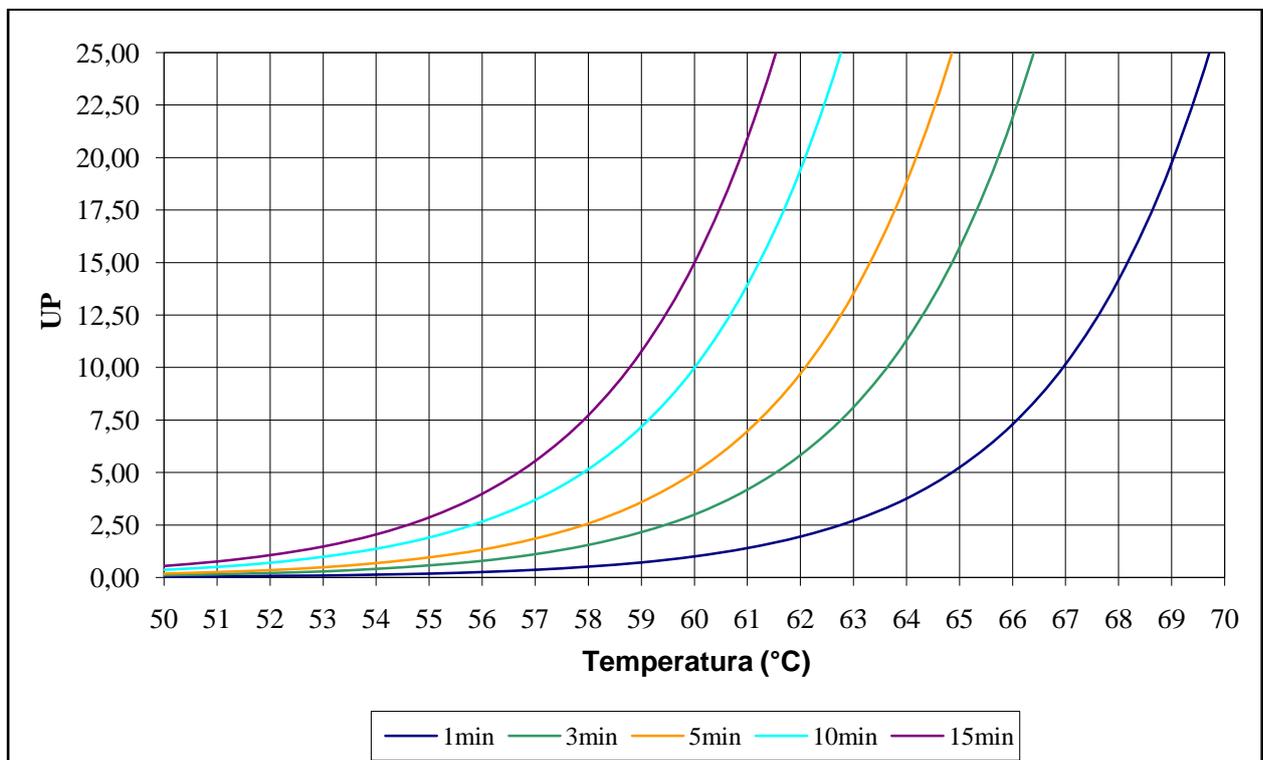


Figura 2.1 - Gráfico UP x temperatura

Para a obtenção de 20 UP, por exemplo, pode-se fazê-lo de várias maneiras, aquecendo a cerveja a diferentes temperaturas. Na temperatura de 69°C, em cerca de 1 minuto a cerveja já atingiu este patamar. No entanto, como foi descrito anteriormente, não é interessante utilizar altas temperaturas. Por isso, pode-se aumentar o tempo de permanência da cerveja em uma temperatura mais baixa e ainda conseguir o mesmo resultado final de 20 UP (neste caso pode-se diminuir a temperatura da bebida para pouco menos de 61°C, para um tempo de 15 minutos).

É sabido, baseado em testes de laboratório, que dentro de uma faixa de 1 a 5 UP já se obtém um bom efeito inibidor para a maioria dos casos em cervejarias, mas é normal se utilizar processos onde o ganho de UP fica entre 8 a 30 para garantir um fator de segurança em caso de algum contaminante mais resistente [Buzrul, 2007]. Assim, atualmente, se identifica o processo de pasteurização que a cerveja precisa passar pelo número de UP que ela deverá adquirir e, é baseado neste número, que é dimensionado o equipamento que será utilizado pela cervejaria.

Dentre as várias maneiras de se executar a pasteurização industrial de cerveja que foram sendo aplicadas ao longo dos anos, uma das que se destaca atualmente é a passagem do produto por um equipamento conhecido como túnel de pasteurização [Meyer, 1941 e De Clerck, 1957]. No túnel de pasteurização, o produto, já em sua embalagem final (garrafa ou lata), é colocado em uma esteira que o transporta através do equipamento, recebendo banhos de água em variadas temperaturas, que configuram o processo de pasteurização (um exemplo de túnel de pasteurização pode ser visto na Figura 2.2). Essa água, após ser esguichada na parte superior do equipamento, entrar em contato com o produto e trocar parte de sua energia térmica com ele, é recolhida em um tanque na parte inferior, sofre uma correção em sua temperatura para retornar à temperatura estabelecida para o processo, e é bombeada novamente para cima dos vasilhames. Estes passam continuamente pelo interior do túnel, entrando novos vasilhames não-pasteurizados e saindo os já processados.

Podem-se destacar três etapas principais pelas quais a cerveja passa dentro do túnel pasteurizador: aquecimento, pasteurização e resfriamento. Um exemplo de um processo de pasteurização integral, mostrando as etapas e as temperaturas da cerveja e da água dos esguichos, pode ser visto no gráfico da Figura 2.3.



Figura 2.2 – Túnel de pasteurização para cerveja (fabricante Ziemann-Liess)

Na etapa do aquecimento, no início do processo, as temperaturas da água de esguicho são dispostas de tal maneira que a cerveja que entra no equipamento a uma temperatura de aproximadamente 5°C, seja aquecida gradualmente, em vários estágios de temperatura de esguicho, até atingir a temperatura de início de processo de pasteurização. Isso é feito para que não haja um choque térmico no produto, que poderia avariar a embalagem (trincar a garrafa de vidro ou estufar a lata de alumínio). Na etapa seguinte, a bebida começa a ser pasteurizada. Aqui também existem vários estágios de temperaturas de esguicho e se atinge os patamares mais altos do todo o processo. O objetivo nesta etapa é que o produto adquira as UP determinadas para a cerveja que está sendo processada e também que ela alcance a temperatura letal definida para os micro-organismos presentes na bebida, garantindo assim a efetivação da pasteurização. Em seguida, as embalagens passam para a etapa de resfriamento, onde são esguichadas com água a temperaturas menores que as da pasteurização para serem resfriadas até próximo da temperatura ambiente, evitando choques térmicos que poderiam avariar a embalagem ao sair do túnel pasteurizador.

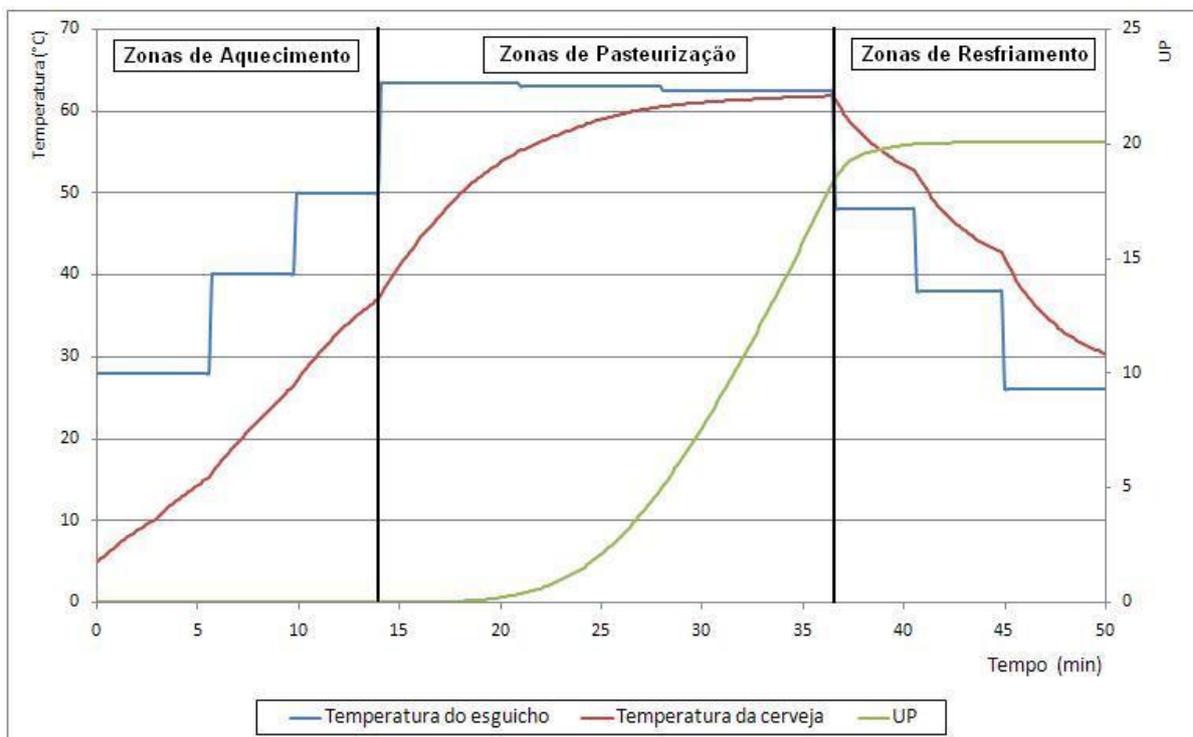


Figura 2.3 - Gráfico de temperaturas e a evolução do acúmulo de UP do processo de pasteurização

Para se ter uma idéia em relação aos valores de temperaturas envolvidas neste processo, pode-se ver a Figura 2.3, onde a etapa de aquecimento, neste caso, é realizada em três níveis de

temperatura (28°C, 40°C e 50°C), a etapa de pasteurização é realizada em três etapas (64°C, 63,5°C e 63°C), assim como a etapa de resfriamento (48°C, 38°C e 26°C). As temperaturas que serão utilizadas na água dos esguichos e a quantidade de patamares são determinadas pelo número de UP e pela temperatura máxima que se deseja que a bebida atinja, a temperatura letal. Ao final da passagem pelo túnel, a cerveja terá adquirido o efeito inibidor de microorganismos desejado, que será a UP total. A UP total é a soma das UP adquiridas em cada etapa, calculadas com a Equação (1), integrando a temperatura da cerveja ao longo do tempo de passagem. Para o exemplo da Figura 2.3, a UP total adquirida é 20. Neste caso, a bebida passa pelas zonas de aquecimento sem ganho de UP (a temperatura dentro da embalagem ainda é baixa), entra nas zonas de pasteurização e inicia a adquirir UP (a temperatura dentro do vasilhame já está acima de 50°C) e chega à zona de resfriamento, onde ainda adquire alguma UP, até a temperatura da cerveja baixar dos 50°C, e após se mantém constante no valor final de 20 UP, pois o processo de pasteurização já foi finalizado e está se resfriando a bebida até a temperatura ambiente.

No processo de pasteurização industrial em túneis, para melhor aproveitamento de energia, há um processo de cruzamento das águas bombeadas para a cerveja nas etapas de aquecimento e resfriamento, que pode ser vista na Figura 2.4. A cerveja, armazenada em tanques após a filtração, é envasada a uma temperatura de 5°C. Após o envase, a cerveja, ainda na temperatura que foi engarrafada, é direcionada para a entrada do túnel de pasteurização e inicia o processo de aquecimento. A temperatura da água dos esguichos da primeira etapa é de 28°C, seguindo o exemplo anterior, e ao passar pelos vasilhames, aquecem a cerveja. Ao fazer esta transferência de energia com a bebida, a água resfria até 26°C e é recolhida no tanque abaixo dos esguichos. Assim, a cerveja que entrou nesta etapa a 5°C, passa para a próxima zona a 15°C. A água a 26°C é utilizada na última etapa de resfriamento, onde é esguichada nas garrafas e as resfria de 42°C para 30°C. Novamente há uma troca de energia com a água, só que neste caso ela absorve calor e tem novamente a sua temperatura elevada para 28°C. Assim, a energia retirada da cerveja pela água de esguicho na etapa de resfriamento é aproveitada na etapa de aquecimento no início do processo. Este modelo de aproveitamento de energia é feito em todas as zonas de aquecimento, que possuem o seu par correspondente nas zonas de resfriamento, como pode ser observado na Figura 2.4.

Na etapa de pasteurização, não há este aproveitamento de energia com uma zona correspondente. A água é esguichada nas garrafas a uma temperatura superior à da bebida e a aquece e tem a sua temperatura reduzida por causa da troca de calor com o produto. Por ser um ciclo fechado, isto é, a água esguichada nesta zona é a mesma recolhida no tanque abaixo dos vasilhames, a energia necessária para a retomada ao patamar de temperatura necessário ao

processo nesta etapa é reposta através de trocadores de calor abastecidos com vapor (ver Figura 2.5).

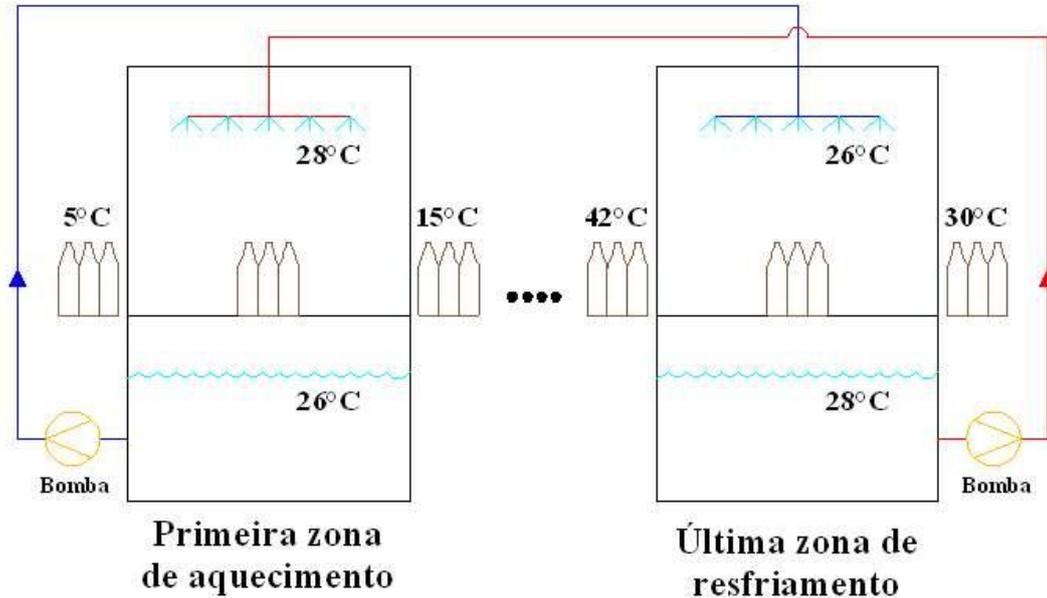


Figura 2.4 – Circulação de aproveitamento de energia nas zonas de aquecimento e resfriamento [Holstein-Kappert S.A - Indústria de Máquinas, 1989]

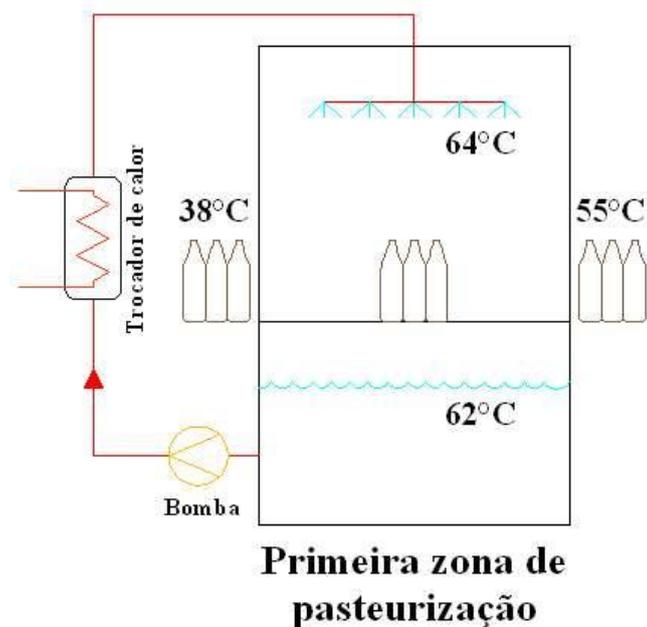


Figura 2.5 – Circulação de água nas zonas de pasteurização [Holstein-Kappert S.A - Indústria de Máquinas, 1989]

Ao passar pelo processo de aquecimento, pasteurização e resfriamento, pode-se verificar um gradiente de temperaturas ao longo do eixo vertical e também ao longo do raio do vasilhame.

Este gradiente é mostrado, por exemplo, no trabalho de Engelman, et al., 1983 e ocorre pelo movimento interno do líquido devido à convecção interna formada pelo aquecimento (ou resfriamento) das paredes da embalagem pelo esguicho.

Ao cobrir a parte externa com esguicho mais quente que a bebida, o fluido interno começa um movimento da parte de baixo para cima na parte mais próxima da parede, formando uma fina camada de bebida em movimento ascendente. Ao chegar à parte superior do vasilhame, o fluxo passa a ser descendente, na parte central, até o fundo. Com isso, tem-se o fluido interno se aquecendo em todo o contorno, próximo à parede, e indo para a parte superior do vasilhame. Ao mesmo tempo, ocorre a mistura com o restante do líquido menos aquecido da garrafa na parte central (ver Figura 2.6). Na etapa de resfriamento ocorre o inverso: o esguicho na parte externa resfria a cerveja que está mais próxima da parede, criando agora um fluxo descendente próxima à parede e um fluxo ascendente no eixo central do vasilhame.

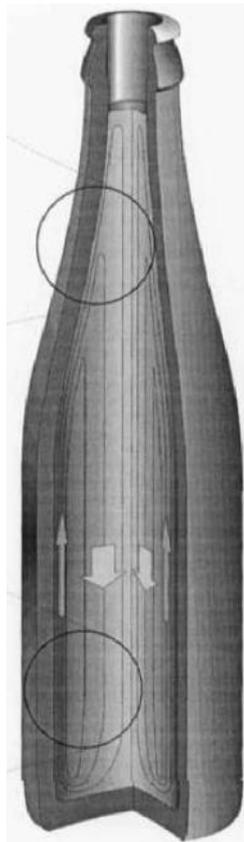


Figura 2.6 – Ilustração da circulação da bebida devido ao aquecimento por esguicho externo [Horn, et al., 1997]

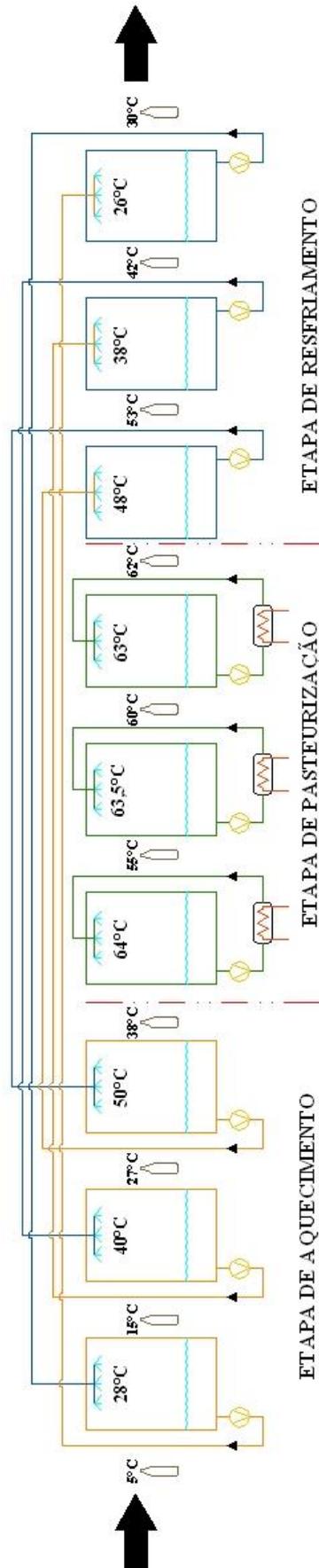


Figura 2.7 – Circuito completo da água no túnel de pasteurização, com a indicação das temperaturas do processo [Holstein-Kappert S.A - Indústria de Máquinas, 1989]

Foi comprovado em alguns trabalhos, como em Lewicki, et al., 1983 e Horn, et al., 1997, que bem próximo do fundo do vasilhame existe um ponto de estagnação da bebida. Ali, as velocidades do fluido são quase nulas quando ele se movimenta ao ser aquecido ou resfriado. Este ponto se localiza de 10 a 20 mm do fundo, no eixo central do vasilhame. Isso é válido independente do tipo (lata ou garrafa) ou da capacidade volumétrica do vasilhame. É neste ponto de estagnação que a bebida leva mais tempo para “perceber” a temperatura externa, pois há uma troca mais lenta de fluido nesta porção da embalagem. Por causa disso, este ponto é chamado de **ponto frio** da garrafa. Ou seja, durante as etapas de aquecimento e pasteurização, onde a água é esguichada sobre a garrafa, acontece a convecção interna e todo o resto da embalagem já está em patamares mais altos de temperatura, no **ponto frio** é onde a temperatura da cerveja fica mais baixa na garrafa durante todo estas duas etapas. É a temperatura deste ponto que aparece nos gráficos de processo de pasteurização (como pôde ser visto na Figura 2.3).

Como visto anteriormente, o cálculo das UP adquiridas pela cerveja é feito a partir da integração da temperatura e tempo que a cerveja sofre durante a passagem pelo túnel de pasteurização. Mas, devido ao fenômeno de convecção interna, não há um valor de temperatura representativo na bebida que possa ser empregado. Se forem tomadas temperaturas em posições diferentes no vasilhame, pode-se chegar a valores de UP adquiridas muito diferentes, para um mesmo processo de pasteurização. Isso porque, em nenhum momento durante a passagem pelo túnel, a bebida chega ao equilíbrio térmico com a água do esguicho externo, por estar passando por etapas com diferentes temperaturas de esguicho, e assim sempre há um gradiente de temperatura no interior do vasilhame (ver Figura 2.8).

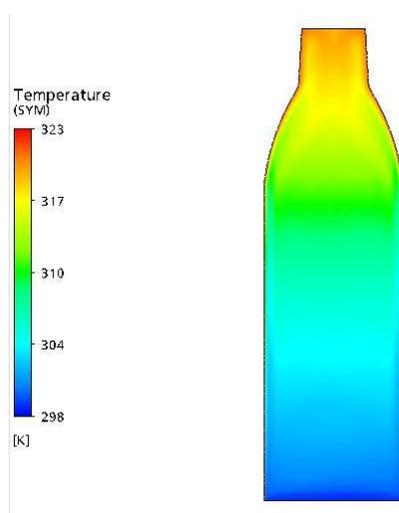


Figura 2.8 – Resultado de simulação numérica onde apresenta-se o gradiente de temperaturas de uma garrafa com temperatura inicial de 298 K sendo aquecida por um esguicho de 323 K, após 100 s [Fontana, 2009]

Por isso, se instituiu que, para a medição de UP adquirida em um processo de pasteurização em túneis de pasteurização, a medição de temperatura deve ser feita no **ponto frio** da embalagem. Se, ao final da passagem da cerveja pelo processo, a UP e a temperatura letal medidas no **ponto frio** chegaram aos padrões desejados, então é garantido que, o restante da bebida no vasilhame também atendeu as exigências.

Nas cervejarias é importante se ter a certeza que a pasteurização está sendo executada conforme o planejado. Por ser um processo contínuo, se isso não estiver acontecendo, pode-se perder uma parte da produção por subpasteurização (que leva a um menor prazo de validade para a bebida) ou sobrepasteurização (que gera alterações organolépticas) antes que se perceba o problema. As causas para a pasteurização não ocorrer como foi determinada podem ser inúmeras: falha de automação do túnel (todos os processos de controle de temperaturas do esguicho atualmente são automatizados e controlados por um CLP – controlador lógico programável), falta de vapor para o abastecimento dos trocadores de calor (pois não haveria energia para repor a temperatura dos esguichos), falha de componentes mecânicos (que possam levar a uma falha de aspensão em algum ponto do túnel), parada de produção na linha de engarrafamento (por exemplo se os vasilhames têm que ficar parados dentro do túnel enquanto se resolve algum problema nos equipamentos da linha de engarrafamento, aumentando o tempo de exposição da cerveja além do que foi planejado) e outras.

São comuns no Brasil, atualmente, linhas de engarrafamento que processam em torno de 40000 litros de cerveja por hora, trabalhando 24 horas por dia, sete dias por semana, parando apenas para manutenções. Se o processo não está atendendo as exigências de UP adquirida, mesmo que somente por alguns minutos, milhares de litros de bebida poderão ter que ser descartados. Para verificar a qualidade da pasteurização e constatar eventuais falhas no processo podem-se fazer testes de laboratório em amostras da cerveja para se detectar a presença dos microorganismos que levam à diminuição da validade (se ocorreu uma subpasteurização), e também testes de degustação, para determinar se houve alguma alteração no sabor da bebida (por sobrepasteurização). Porém estes testes são demorados e dispendiosos. Para realizar um controle mais dinâmico, é utilizado nas indústrias um aparelho chamado de termógrafo (Figura 2.9). Para a realização do teste, nele é fixada uma embalagem com cerveja a baixa temperatura, aproximadamente 5°C, conforme acontece no processo normal. Na parte interna deste vasilhame é fixada uma sonda para a medição da temperatura da bebida no **ponto frio**. Este artefato, então, é colocado no início do túnel de pasteurização e passa pelo processo juntamente com o restante da produção. Na saída do equipamento, o termógrafo é retirado da linha e levado ao laboratório, para a análise dos dados.

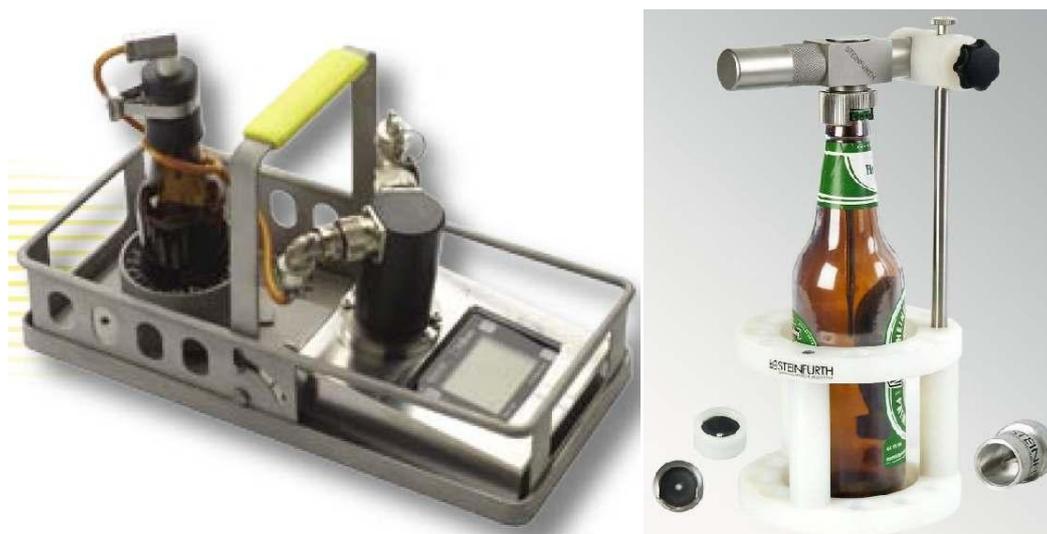


Figura 2.9 – Modelos de termógrafos utilizados na indústria: marcas Haffmanns (à esquerda) e Steinfurth (à direita) (Fontes: www.haffmans.nl e www.steinfurth.com)

Ao passar pelo túnel de pasteurização, o termógrafo armazena os dados de temperatura da cerveja e tempo de passagem, permitindo assim o cálculo de UP adquiridas. Também se verifica se a cerveja atingiu, no ponto mais frio, a temperatura letal, garantindo a efetiva inativação dos microorganismos mais resistentes em toda a embalagem. Em alguns modelos de termógrafos, faz-se também a aquisição da temperatura da água do esguicho, para a conferência do funcionamento das sondas de medição instaladas no túnel, instrumentos utilizados para fazer o controle da temperatura dos esguichos com os trocadores de calor.

Então, para realizar uma inspeção mais dinâmica na produção do engarrafamento, no que diz respeito ao processo de pasteurização, são feitas passagens do termógrafo pelo túnel em intervalos regulares. Se o resultado dos números de UP estiver dentro dos padrões estabelecidos pelo controle de qualidade da cervejaria (geralmente uma banda de resultados, com um valor mínimo e um máximo, é aceita como efetividade do processo), a produção da bebida é liberada. Do contrário, aquela parcela correspondente ao período de tempo em que foi realizada a medição com o termógrafo é retida para análises posteriores.

Quando do dimensionamento de um túnel de pasteurização, existem alguns itens que devem ser levados em conta, como a quantidade de UP que devem ser adquiridas, o número de etapas de aquecimento, pasteurização e resfriamento, a vazão e a temperatura da água em cada etapa. Estes fatores serão determinados pelo tipo de cerveja, pelo tipo de embalagem e também pela exigência do processo de pasteurização necessário (tipos de microorganismos presentes no produto e a população que se deseje que seja eliminada).

Para que o túnel de pasteurização seja eficiente, é importante que o projeto mecânico do equipamento atenda as necessidades requeridas pelo sistema. Um dos aspectos do projeto que deve ser investigado, quanto a sua parcela na eficiência do processo, é a maneira como a água é esguichada em cima do produto, que pode ser feito de várias maneiras: com esguichos (para a aplicação de jatos de água nos vasilhames), com pulverizadores (que fragmentam os jatos antes de atingir os vasilhames) ou por gravidade (onde a água é simplesmente despejada por cima do produto). Atualmente, todos estes modelos de esguichos são utilizados em túneis de pasteurização de cerveja, de acordo com a escolha do fabricante do equipamento. Mesmo após escolher um determinado modelo, ainda pode-se alterar as variáveis do sistema: pressão de bombeamento, vazão de água que passa por cada esguicho ou o formato que o esguicho toma (cone cheio, cone oco, ângulo de abertura do cone), por exemplo. Cada modificação varia a maneira pela qual a água atinge os vasilhames. Resta conhecer como estes pontos afetam a eficiência do processo de pasteurização.

2.2 Transferência de calor

Como foi descrito no item anterior, os vasilhames de cerveja, ao passarem pelo interior de um túnel de pasteurização, sofrem a ação dos esguichos de água, que são responsáveis pela transferência de energia necessária ao processo. Ao serem molhados, os vasilhames têm sua temperatura alterada de acordo com a diferença de temperatura que existir entre a garrafa e a água. Considerando a etapa de aquecimento, a água está mais quente que o vasilhame e parte da energia do esguicho irá passar para a garrafa, aquecendo-a. Isso será feito por um processo de convecção forçada externa, onde a água sai do esguicho, atinge a garrafa e corre por sua lateral, até cair nos tanques do túnel. Nesta passagem, a taxa de calor para o interior do vasilhame será representada em uma equação do tipo:

$$q_{conv,e} = \bar{h}_e A_e (T_\infty - T_{we}(t)) \quad (2)$$

Nesta equação, a taxa de transferência de calor por convecção $q_{conv,e}$ é calculada a partir de um coeficiente de convecção médio \bar{h}_e , que é representativo em toda a área A_e da superfície externa do vasilhame, que está a uma temperatura superficial externa $T_{we}(t)$ (que é função do tempo t), submetido a um esguicho com temperatura T_∞ .

A partir daí, o vasilhame transfere a energia para a parte interna, com um perfil de temperatura que se modifica ao longo do processo de aquecimento, através da espessura do material, seguindo uma equação conforme abaixo:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

considerando uma transferência de calor unidirecional (na direção do eixo r , que é a direção radial no corpo da garrafa, de fora para dentro) e sem geração interna de energia. Na Equação (3), aparece um fator físico do vasilhame que é a difusividade térmica α do material. A partir da resolução deste perfil de temperatura, pode-se calcular a taxa de transferência de calor por condução q_{cond} :

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (4)$$

Onde k é a condutividade térmica do material e A é a área do vasilhame. O perfil de temperaturas T em um determinado ponto de coordenada r ao longo da espessura L é mostrado na Figura 2.10).

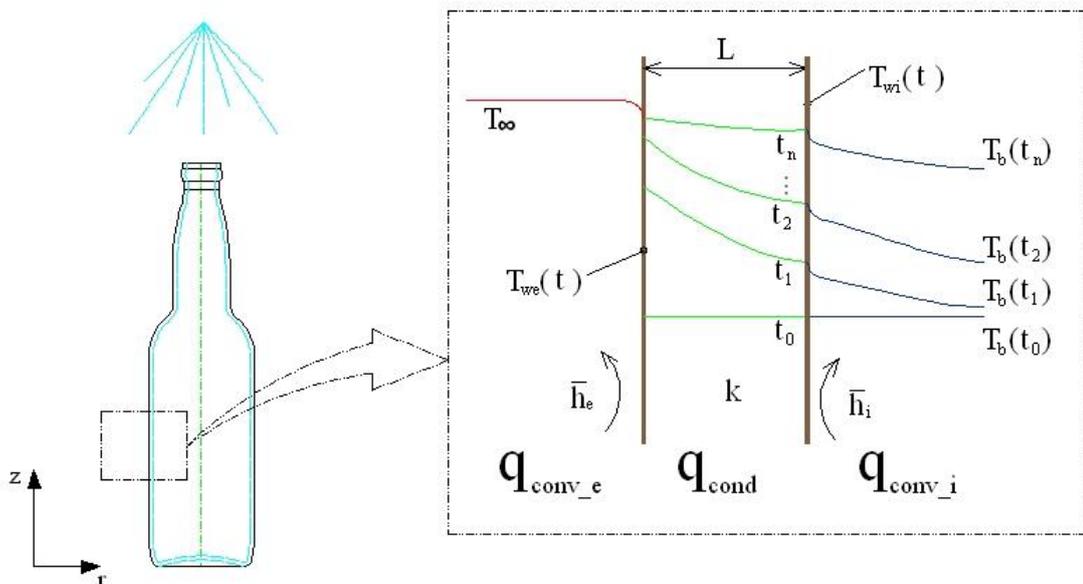


Figura 2.10 – Esquema dos fluxos de calor em regime transiente do aquecimento da garrafa e da bebida, promovido pelo esguicho externo, desde o momento inicial t_0 até um instante t_n

Em seguida, a parede aquecida pelos esguichos passa a transferir energia para a bebida, no interior do vasilhame. Entre a garrafa e o líquido irá acontecer um novo processo de convecção que se dará por uma equação análoga à Equação (2):

$$q_{conv_i} = \bar{h}_i A_i (T_{wi}(t) - T_b(t)) \quad (5)$$

Neste caso, usa-se o coeficiente de convecção médio \bar{h}_i , relativo à parte interna, a área interna da garrafa A_i e as temperaturas da parede interna da embalagem $T_{wi}(t)$ e da bebida $T_b(t)$, para o cálculo da taxa de transferência de calor por convecção q_{conv_i} do vasilhame para a bebida.

Esta transferência de calor para a parte interna irá gerar um movimento ascendente de fluido na porção mais próxima da parede, levando a bebida da parte inferior até a parte superior do vasilhame. Este movimento acontece ao longo de todo o perímetro interno, enquanto as paredes estão sendo aquecidas. Simultaneamente, na porção do eixo central do vasilhame, ocorre um movimento descendente de fluido aquecido do topo até o fundo, gerando uma circulação da bebida no interior do vasilhame (mostrada na Figura 2.6). Esta movimentação é tão mais intensa tanto quanto maior for a diferença de temperatura entre o esguicho e a temperatura da bebida. Assim, observam-se velocidades maiores no início do processo de aquecimento e, a medida que a convecção vai aquecendo a bebida e o processo de circulação vai homogeneizando a temperatura interna do fluido, a movimentação vai se extinguindo.

Para avaliar termicamente esta convecção interna, existem expressões na literatura, pelas quais se pode encontrar um coeficiente de transferência de calor entre o fluido interno e a parede do recipiente. No caso de um ambiente fechado, com as paredes verticais na condição de temperatura prescrita, sendo em um lado a temperatura mais alta que no outro e os fechamentos horizontais tomados como isolados (ver Figura 2.11), e considerando regime permanente, o número de Nussel (Nu), número adimensional que fornece uma medida da transferência de calor por convecção, pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\bar{Nu} = 0,364 \frac{R}{H} Ra^{1/4} \quad (6)$$

onde o \bar{Nu} é um Nussel médio, relativo à parede do recipiente, R e H são as dimensões do recipiente e Ra é o número de Rayleigh.

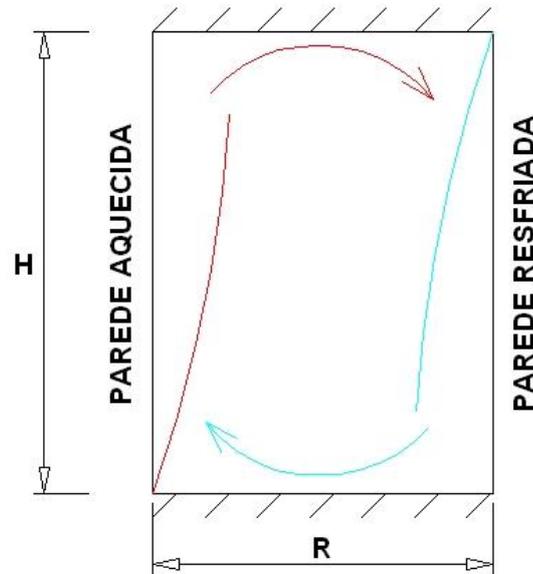


Figura 2.11 – Recipiente retangular fechado, com as paredes nas condições de temperatura prescritas, onde pode-se ver a formação de camadas limites térmicas e a movimentação do fluido interno

O número de Rayleigh, para a Equação (6), pode ser calculado com a seguinte expressão:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu} \quad (7)$$

onde g é a aceleração da gravidade, ΔT é a diferença entre as temperaturas das duas paredes, β é o coeficiente volumétrico de expansão térmica, α é a difusividade térmica e ν é a viscosidade cinemática, sendo estas três propriedades referentes ao fluido que preenche o recipiente. A Equação (6) é válida para casos onde o fator de forma do recipiente é esbelto, ou seja, para recipientes onde a razão H/R é maior que 1 [Bejan, 1995].

Ainda sobre transferência de calor, é interessante comentar o método da capacitância global. Este método consiste em apresentar um modelo para respostas transientes de sistemas com condições superficiais de convecção. Ele pode ser empregado em casos onde o gradiente de temperatura no interior dos objetos é pequeno. Para elucidar o método, pode-se tomar como exemplo um sólido com uma temperatura inicial de T_0 que é inserido em um fluido em uma temperatura T_∞ , menor que T_0 . Neste caso, ao longo do tempo t , o objeto irá diminuir a sua temperatura até atingir o equilíbrio, onde o sólido alcançará a temperatura T_∞ . Como base do método, é feita a suposição de que a temperatura no interior do objeto será uniforme ao longo do tempo t . Deste método será utilizado o conceito de excesso de temperatura, representado pela razão θ/θ_0 , que será calculado conforme a Equação (8):

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T-T_\infty}{T_0-T_\infty} \quad (8)$$

Através desta equação, pode-se verificar que o excesso de temperatura terá valor 1 na condição inicial de $T = T_0$ e terá um decaimento exponencial até 0 quando $T = T_\infty$. Outra forma como é representado o excesso de temperatura é através seguinte equação:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = e^{-\frac{1}{\tau}\tau} \quad (9)$$

onde τ é constante de tempo térmica. Esta constante caracteriza o tempo que o sistema levou para percorrer 63,2% do percurso de um a zero descrito pela razão da Equação (8), para um caso de resfriamento.

2.3 Análise estatística

Como está sendo proposta a realização de testes experimentais para a coleta de dados relativos ao processo de transferência de calor entre a água dos esguichos e a cerveja no interior do vasilhame, é importante a descrição de uma ferramenta que será utilizada para a avaliação dos resultados.

Na parte de análise de dados, para o caso da apreciação dos mesmos em relação a alteração de alguma configuração (como a que está sendo proposta neste trabalho, com a realização de experimentos com a modificação do modelo do esguicho) que se deseja saber se esta alteração causa alguma influência, é proposta a utilização de um instrumento de análise de dados chamada de Análise de Variância ou ANOVA. Essa ferramenta realiza um processo estatístico com uma análise de variância simples, que investiga se as médias de diversas amostras são iguais. Ou seja, se existe ou não diferenças significativas entre os grupos de dados. A partir de uma amostra, onde se quer analisar um dos fatores medidos (como o tempo de aquecimento de um vasilhame de cerveja com diferentes esguichos, por exemplo) e de uma hipótese (alterar os esguichos faz diferença para o tempo de aquecimento), a ANOVA realiza uma estimativa da variância de cada grupo em separado e após calcula uma estimativa da variância entre os grupos. O resultado final é a verificação da hipótese: se o valor estatístico “ F ”, calculado pela ANOVA for maior que o valor de “ $F_{\text{crítico}}$ ”, ou seja, as variâncias nos grupos e entre os grupos não são semelhantes dentro de um intervalo de confiança, a hipótese é verdadeira. Ou seja, as amostras se diferem

significativamente entre si (os tempos de aquecimento variam de acordo com o modelo de esguicho utilizado). Do caso contrário, se o “ F ” for menor que o “ $F_{\text{crítico}}$ ”, a hipótese é falsa e as amostras dos diferentes grupos possuem médias muito semelhantes.

Até aqui foi descrito o conhecimento básico necessário para prosseguir com o trabalho e apresentar como será feita a coleta dos dados para a avaliação do desempenho dos esguichos para túneis de pasteurização.

3. TÉCNICA EXPERIMENTAL

Para este trabalho, foi montada no Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos (LETA), na UFRGS, uma bancada (Figura 3.1) com alguns recursos que se assemelham com uma parcela de um túnel de pasteurização. Com isso, a meta foi simular uma parte do processo de pasteurização que ocorre dentro do equipamento, para a avaliação dos modelos de esguichos propostos. Para abalizar esta avaliação, foram adquiridos dados de temperatura de uma garrafa de cerveja de 600 ml sendo aquecida pelos esguichos na bancada. Os quatro modelos de esguichos propostos para este trabalho foram alternados nos testes.



Figura 3.1 – Bancada montada para o experimento com os esguichos

Com o objetivo de determinar o desempenho dos esguichos, foi definido que seria simulado na bancada uma das etapas de aquecimento do processo de pasteurização em um túnel real. Assim, as condições seriam de iniciar o teste com o fluido no interior da garrafa em uma temperatura próxima de 30°C, esguichar sobre o vasilhame água a uma temperatura de 50°C (constante durante todo o experimento) e finalizar o teste quando o **ponto frio** da garrafa (que é

o ponto de estagnação do fluido, próximo do fundo) alcance 40°C . Esta seria a configuração da passagem de garrafas na terceira zona de aquecimento de um túnel de pasteurização.

Para fazer a aquisição das temperaturas deste aquecimento, foram instalados em uma garrafa três sensores de temperatura: uma termoresistência do tipo Pt100 (que possui uma incerteza na faixa de temperatura dos testes de $\pm 0,55^{\circ}\text{C}$), que está a 25 mm do fundo da garrafa e servirá para medir a temperatura do **ponto frio**, e mais dois termopares do tipo J (com um erro de $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$), que foram encapsulados em uma ponteira de aço e montados na parede do vasilhame, em alturas diferentes, para fazer a medição de temperatura do fluido interno próximo da parede (um esquema da garrafa, com os sensores, pode ser visto na Figura 3.2).

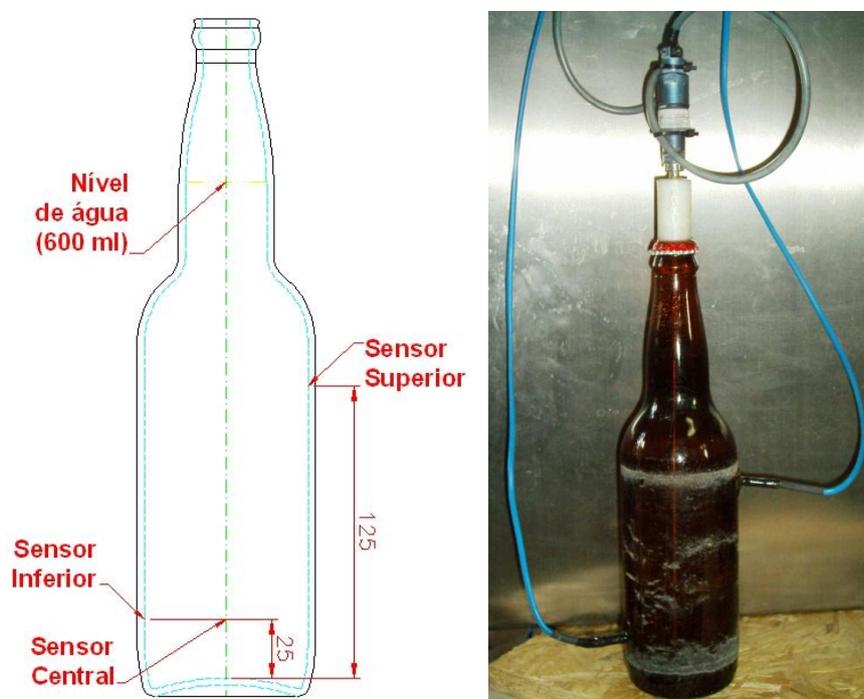


Figura 3.2 - Localização dos sensores instalados na garrafa de 600 ml, referenciados a partir do fundo (esquerda) e a garrafa instrumentada (direita)

A garrafa foi preenchida com água, para as medições das temperaturas internas. Este fluido foi escolhido por não se degradar ao longo dos dias de testes e, assim, após terem sido instalados os sensores, fechada a garrafa e verificada a sua estanqueidade, ela foi utilizada em todos os experimentos com a mesma configuração. Além disso, tem as suas propriedades físicas bem conhecidas, condições necessária para os cálculos posteriores.

Um fluxograma da bancada pode ser visto na Figura 3.3, com as indicações dos componentes citados no texto. A garrafa foi instalada em um aquário (1) de dimensões 0,5 x 0,5 x 0,6m, que fez às vezes de ambiente onde acontecerão os experimentos. Neste aquário foi

instalada a tubulação dos esguichos (que compreende nos tubos onde está instalada a conexão para os diferentes tipos de esguichos propostos para este trabalho (2)) na parte superior e uma motobomba centrífuga marca Schneider BC-91SSC na parte inferior (3) – que succiona a água na parte inferior do aquário e bombeia para os esguichos na parte superior. Esta motobomba possui vazão máxima de 7,6 m³/h e pressão manométrica máxima de 2,4 bar e está dimensionada para atender o valor de vazão definido abastecer os esguichos: 3,0 m³/h. A tubulação foi montada com tubos de PVC no diâmetro de 50 mm, para a tubulação entre o recalque da bomba e os esguichos, e 25 mm, para as demais ligações.

A garrafa fica montada em um suporte (4), para não ficar mergulhada na água acumulada no fundo do aquário. Foi utilizada como base para a garrafa, uma fração de esteira plástica de um túnel de pasteurização, para simular a mesma situação que ocorre no equipamento, onde o que separa os vasilhames dos tanques de água é a esteira. Apesar de estar em contato com a água no fundo do aquário, por se tratar de material plástico (neste caso a esteira é de polipropileno e o apoio é uma peça de PVC), será considerado que não haverá transferência de calor por condução pela parte inferior da garrafa. Também uma tampa foi montada na parte superior, para diminuir a influência da temperatura do ambiente externo do aquário durante os experimentos.

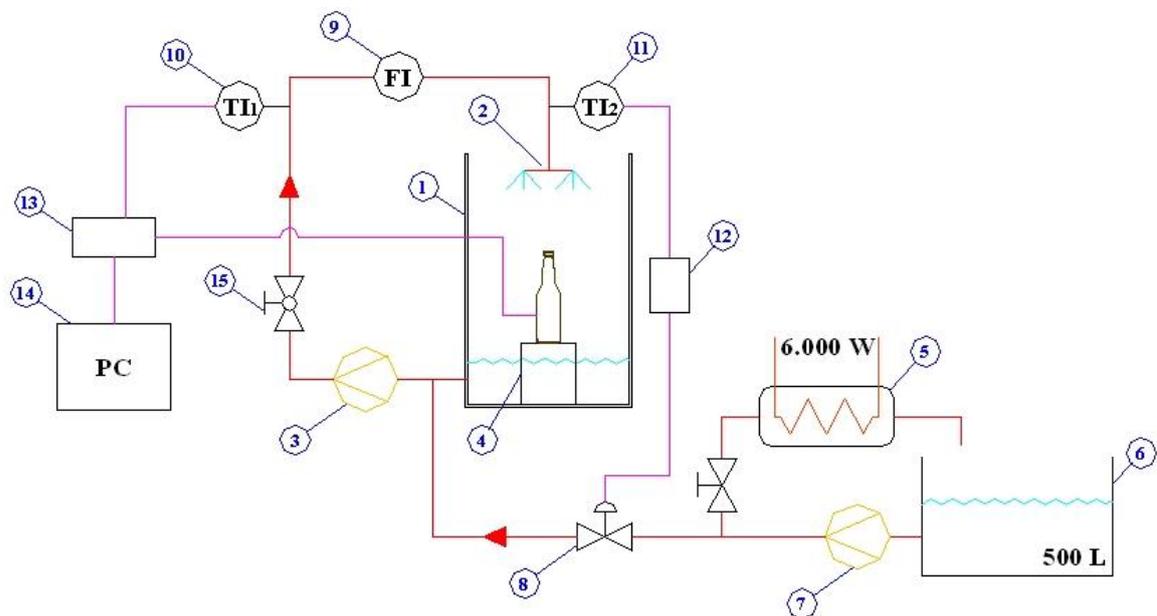


Figura 3.3 - Fluxograma da bancada de testes

Como para a realização dos testes foi necessário aquecer a água de esguicho, a este sistema foi montado um sistema de aquecimento, compreendido por um aquecedor de água residencial, com potência de 6.000W (5), uma caixa d'água (6) com capacidade de 500 L (utilizada para o

armazenamento da água aquecida), uma bomba (7), que succiona água aquecida da caixa e bombeia para a tubulação do esguicho, e uma válvula de sede atuada por ar comprimido marca Burket Type 2702 DN40 (8) (que faz o controle de injeção de água quente no sistema do esguicho).

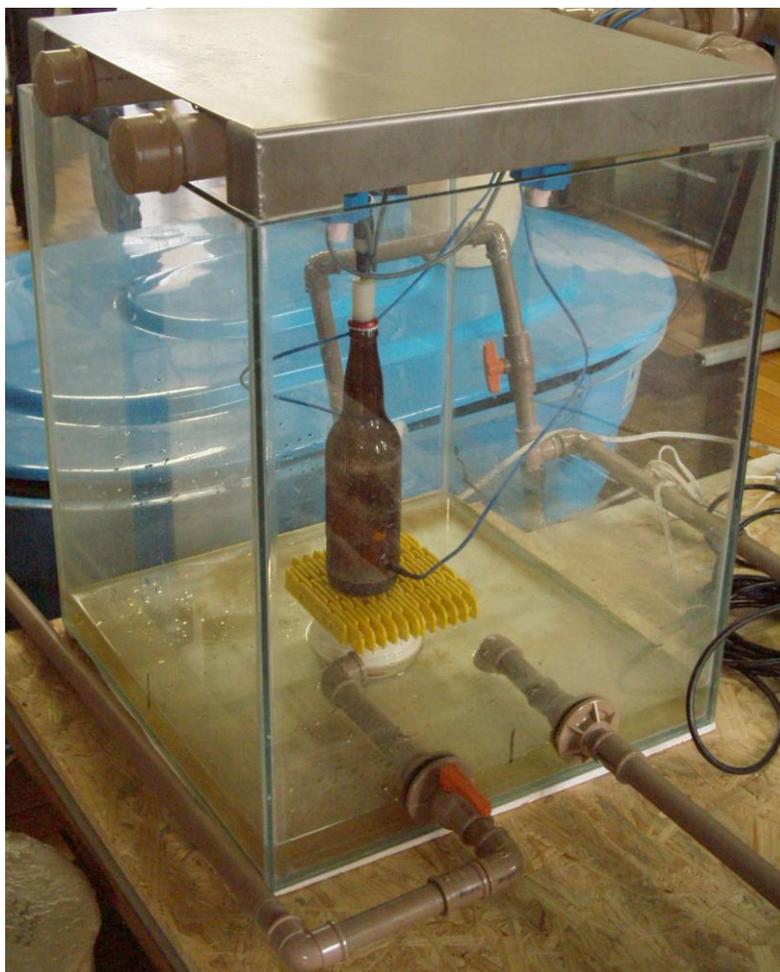


Figura 3.4 - Garrafa no interior do aquário, instalada sobre o suporte

Para verificar que as mesmas condições de vazão de água estavam sendo seguidas na realização dos testes, foi instalado na tubulação dos esguichos um medidor de vazão marca Endress+Hauser (9) (cujo valor de vazão apresenta uma incerteza de 0,5% na leitura), para a verificação da vazão total de água que está sendo esguichada no aquário. O medidor (Figura 3.5) foi montado na tubulação, respeitando as medidas indicadas no manual da fabricante, de manter um trecho reto de cinco vezes o diâmetro interno do tubo montante ao medidor e de duas vezes o diâmetro a jusante, para ocorrer um escoamento laminar no instrumento e manter a incerteza dentro do valor indicado. O ajuste de vazão, para acertar o valor determinado, era através da regulagem de uma válvula de esfera (15) instalada na saída da bomba dos esguichos.

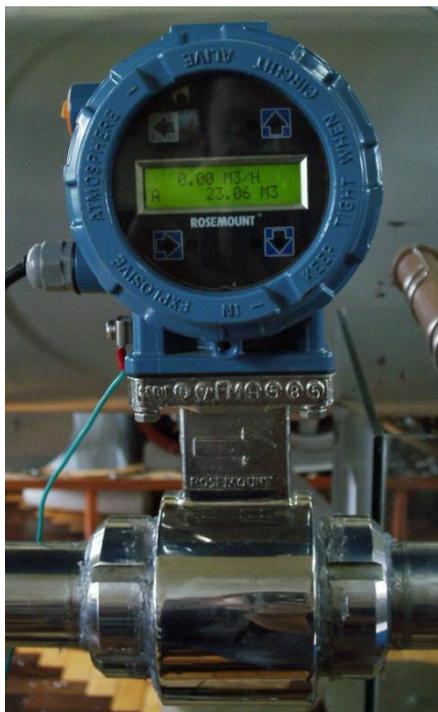


Figura 3.5 – Medidor de vazão instalado na tubulação dos esguichos

Os testes foram realizados da seguinte maneira: primeiramente é aquecida e armazenada uma porção de água na caixa d'água a 60°C, que deverá servir para suprir as necessidades de água quente durante todo o período do teste. Em seguida, liga-se a motobomba que está na tubulação do esguicho, para iniciar a circulação de água no aquário. Através do indicador de temperatura tipo Pt100 (10), que está montado na tubulação do esguicho, tem-se a temperatura atual da água do esguicho. Por estar em início de processo, esta temperatura está abaixo do patamar proposto para o esguicho do teste (50°C). Assim, um segundo Pt100 (11) envia o sinal para um controlador de processo NOVUS modelo 2000 (12), que sinaliza para a válvula atuada (Figura 3.6) que a temperatura do esguicho está abaixo do patamar estabelecido. Esta então modula a sua abertura de acordo com a necessidade de água quente para o controle da temperatura do esguicho selecionada, fechando quando a temperatura chegou aos 50°C e abrindo para tentar mantê-la, quando baixar.



Figura 3.6 – Válvula atuada por ar comprimido e o controlador de processo

Para o início dos testes, o indicador de temperatura da garrafa instrumentada localizado no **ponto frio** (sensor central) deveria estar medindo uma temperatura próxima de 30°C (condição inicial imposta para os testes, simulando a passagem real no túnel). Em seguida, ela é instalada no aquário e ligada a motobomba, para começar a aspersão da água. Neste momento, a temperatura do esguicho está configurada para ser controlada em 50°C. Quando do ligamento da bomba dos esguichos, já está iniciada a aquisição das temperaturas. Os termopares e o Pt100 instalados na garrafa estão ligados em um aquisidor de sinal marca HP (13), que faz a aquisição das informações das sondas a cada dois segundos e envia os dados a um computador (14). A aspersão é mantida, com a temperatura controlada em 50°C, até a temperatura do sensor central indicar que este chegou a 40°C. Então a aquisição das temperaturas é encerrada e o teste finalizado. Assim têm-se os dados de temperaturas dos três sensores de temperatura da garrafa, a temperatura do esguicho e o tempo do teste, armazenados no computador ao final dos experimentos.



Figura 3.7 – Aquisidor de sinal instalado na bancada

Como a proposta deste trabalho é o estudo do desempenho de diferentes tipos de esguichos utilizados em túneis de pasteurização, na parte superior da tubulação no aquário foram instalados os diferentes sistemas de aspersão propostos para serem testados: a bandeja perfurada, os tubos perfurados e dois modelos de esguichos comercializados. Para cada sistema foi proposta a realização dos experimentos repetindo a mesma sistemática de aquecimento da garrafa instrumentada, para fazer uma posterior análise dos dados experimentais. Na tubulação de esguicho da bancada foi montada uma conexão roscada, que possibilita a troca dos diferentes modelos.

Na bandeja perfurada (Figura 3.8), a água é bombeada para a parte superior do aquário, onde existe uma bandeja com furos em sua parte inferior. Assim a água acumula e forma uma pequena coluna de água de 60 mm e passa a ser derramada para cima das garrafas apenas pela gravidade. Cada furo gera um fio de água mais ou menos uniforme, que abrange uma pequena porção de espaço até atingir os vasilhames. O diâmetro dos furos e a sua disposição ao longo da chapa da bandeja (ver na Figura 3.9, as dimensões estão em milímetros) foram retiradas de modelos de túneis de pasteurização existentes no mercado.

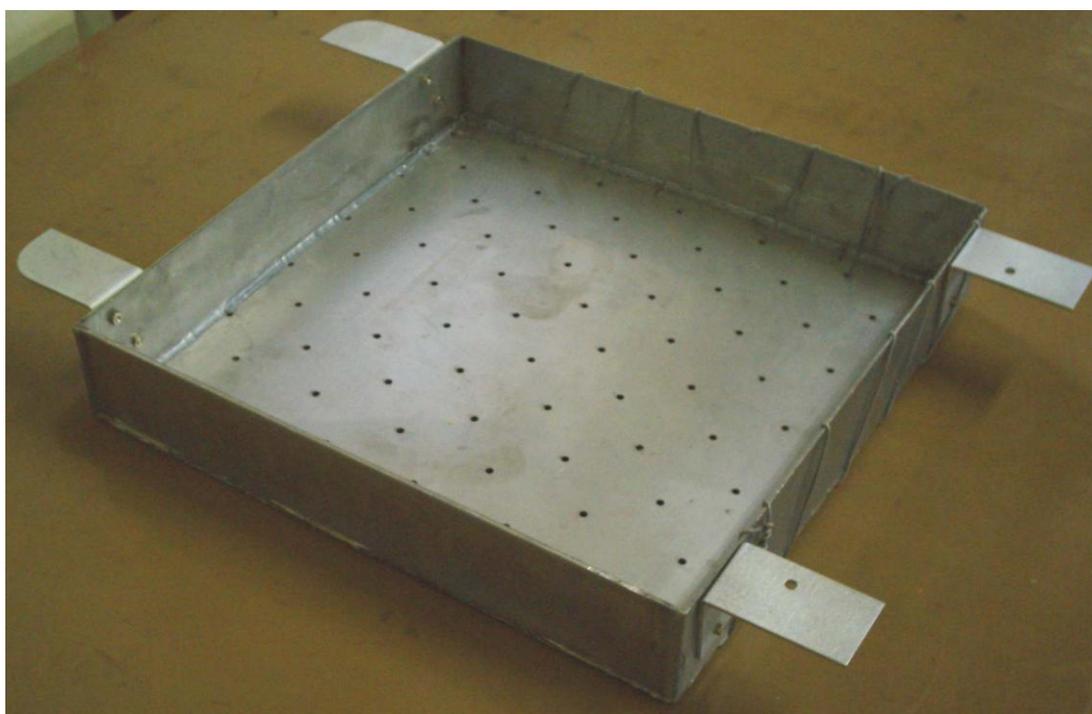


Figura 3.8 – Bandeja utilizada na bancada de testes

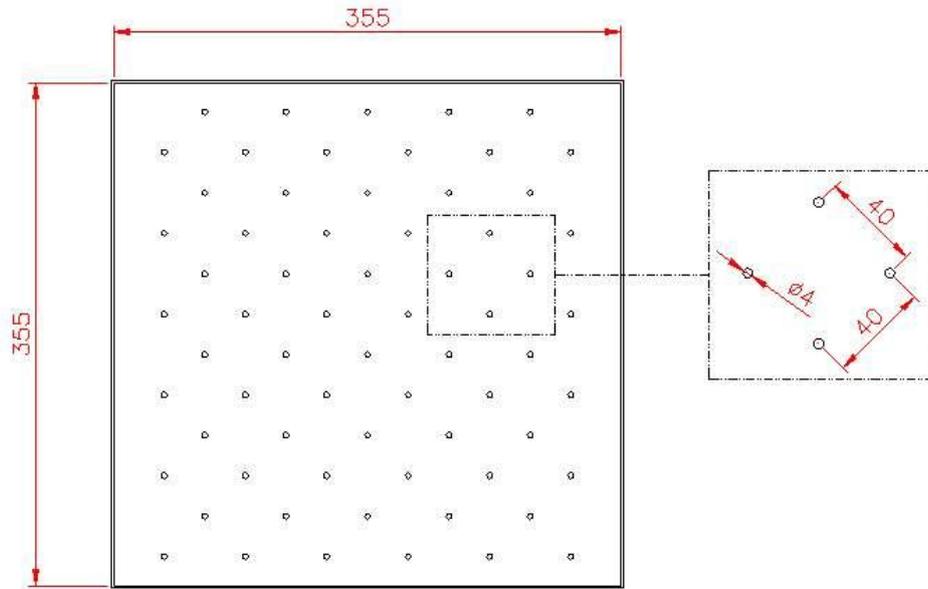


Figura 3.9 – Detalhes dimensionais da bandeja utilizada na bancada

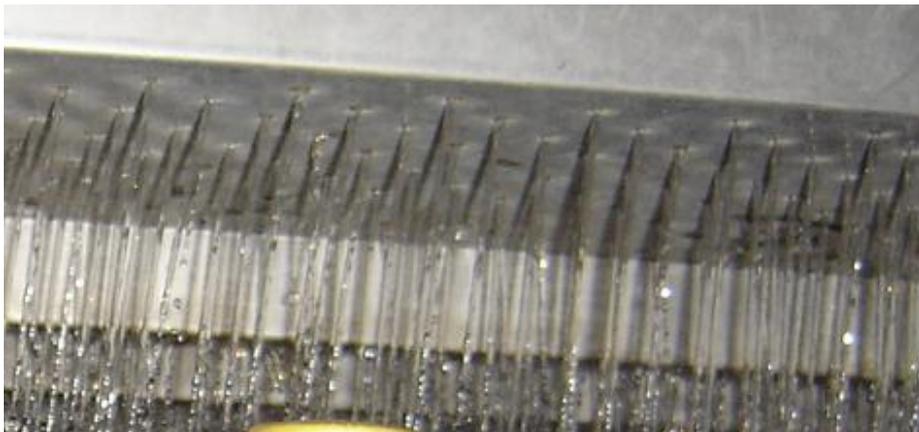


Figura 3.10 - Bandeja perfurada esguichando em um túnel de pasteurização (Fonte: Ziemann-Liess)

No segundo tipo, são utilizados tubos quadrados de aço inox, com as dimensões externas de 35 por 35 mm. Eles têm, na face virada para as garrafas, aberturas por onde a água é esguichada (Figura 3.11). Neste caso, a bomba serve também para pressurizar os esguichos, que são aberturas em formato de “U”, com uma abertura de 1,5 mm, que formam um leque estreito de água, na direção axial do tubo. Serão utilizados dois rasgos em cada tubo e no aquário foram montados dois tubos.

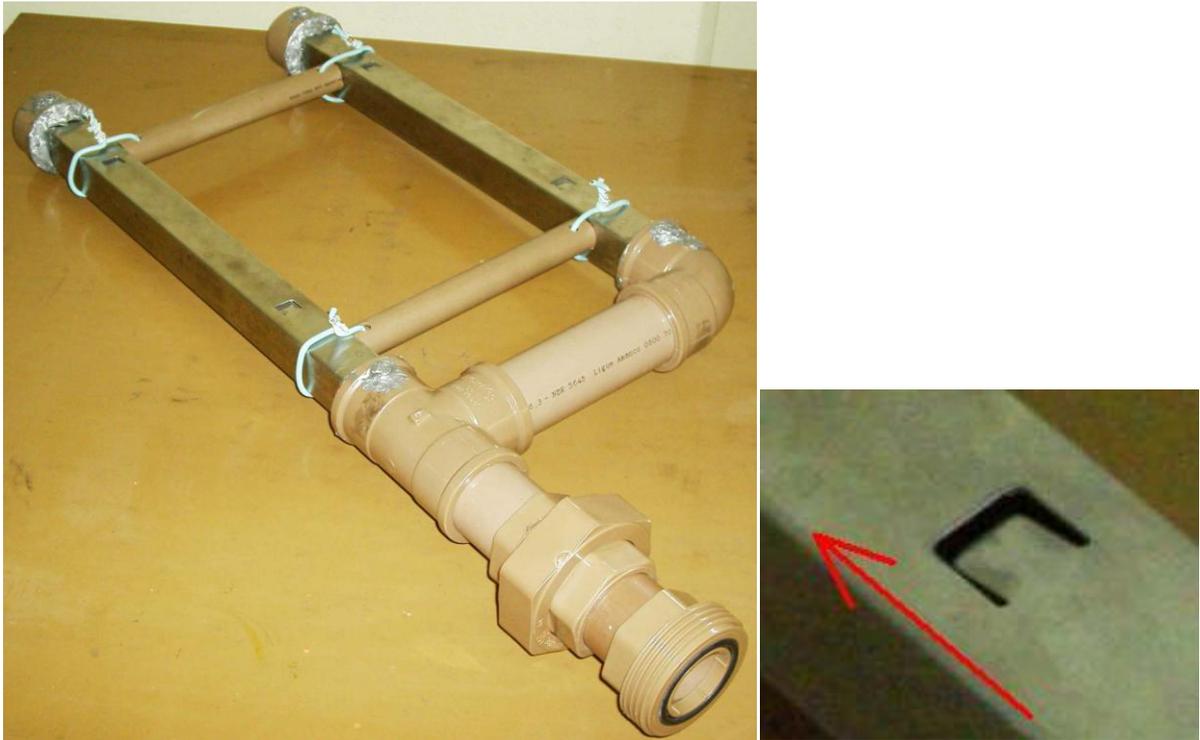


Figura 3.11 – Tubo quadrado utilizado na bancada (esquerda) e detalhe do orifício do esguicho, indicando o sentido do fluxo de água (direita)



Figura 3.12 - Tubo quadrado com recorte em “U” esguichando em um túnel de pasteurização (Fonte: Ziemann-Liess)

O outro modelo utilizado foi o esguicho da marca Spraying Systems, modelo 1/2GGANV-SS72 [www.spray.com.br]. É um modelo que opera com a pressão da bomba para gerar um esguicho no formato de cone cheio (neste caso, o ângulo de abertura do cone é de 90°). Ele é

fixado por meio de um *clip* nos tubos distribuidores (Figuras 3.13 e 3.14), que são instalados transversalmente ao sentido do fluxo dos vasilhames, em um túnel. Na bancada, foram montados quatro esguichos em dois tubos de 50 mm de diâmetro.



Figura 3.13 - Tubo com os esguichos marca Spraying Systems utilizado na bancada

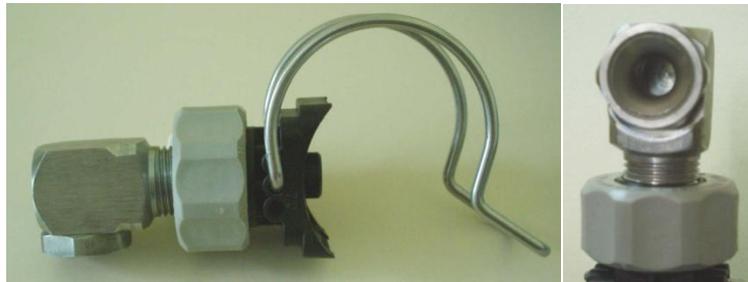


Figura 3.14 - Esguicho marca Spraying Systems: vista lateral (esquerda) e detalhe do orifício (direita)



Figura 3.15- Esguichos marca Spraying Systems montados em um túnel de pasteurização (Fonte: Ziemann-Liess)

O último modelo testado é o esguicho marca Bete (Figuras 3.16 e 3.17), modelo SF 102 [www.bete.com]. Ele é semelhante ao anterior, mas se diferente pelo ângulo de abertura do cone formado pela água pressurizada: neste modelo é de 65°. Também foram instalados quatro esguichos deste modelo em dois tubos, nas bancada.



Figura 3.16 – Tubo com os esguichos marca Bete utilizado na bancada

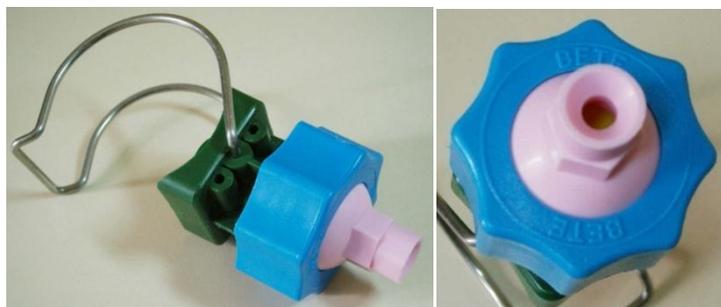


Figura 3.17 - Esguicho marca Bete: vista lateral (esquerda) e detalhe do orifício (direita)



Figura 3.18 – Esguicho marca Bete montado em um túnel de pasteurização

Em todos os testes, a garrafa e seu suporte foram instalados no centro do aquário, de modo a ficarem localizados simetricamente em relação à posição dos esguichos e ao centro da bandeja. A altura dos esguichos em relação à garrafa segue o padrão de distância de túneis de pasteurização de cerveja (450 mm desde o fundo da garrafa até a saída de água dos esguichos, no sentido vertical). A configuração da bandeja e da garrafa no aquário pode ser vista no esquema da Figura 3.19. A projeção do leque na altura do gargalo da garrafa onde inicia o nível de água, juntamente com a posição dos rasgos nos tubos quadrados em relação à garrafa pode ser visualizada na Figura 3.20. Esquemas semelhantes para os esguichos das marcas Spraying Systems e Bete também podem ser vistos nas Figuras 3.21 e 3.22, respectivamente.

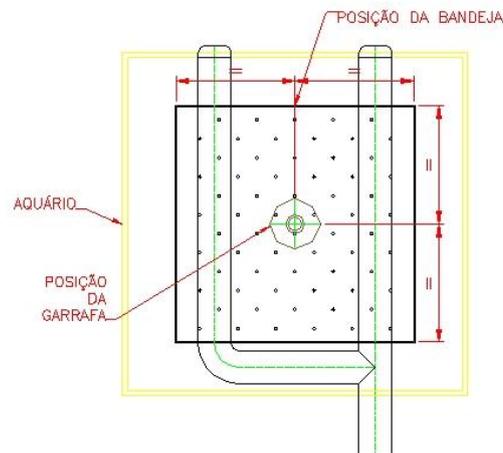


Figura 3.19 - Vista superior indicando a posição da bandeja e da garrafa no aquário

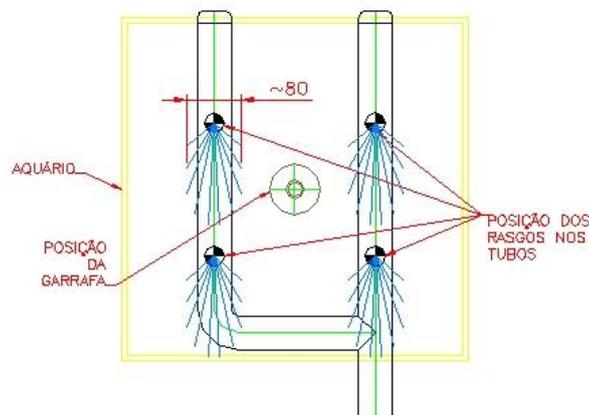


Figura 3.20 – Vista superior indicando a posição dos rasgos nos tubos quadrados em relação à garrafa e as projeções do cone de água na altura onde inicia o nível de água na garrafa

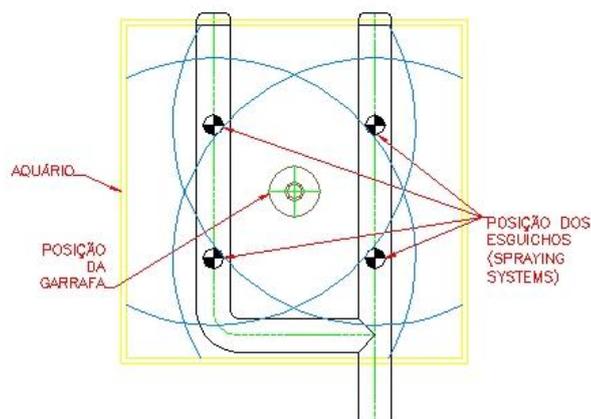


Figura 3.21 – Vista superior indicando a posição dos esguichos marca Spraying Systems em relação à garrafa e as projeções do cone de água na altura onde inicia o nível de água na garrafa

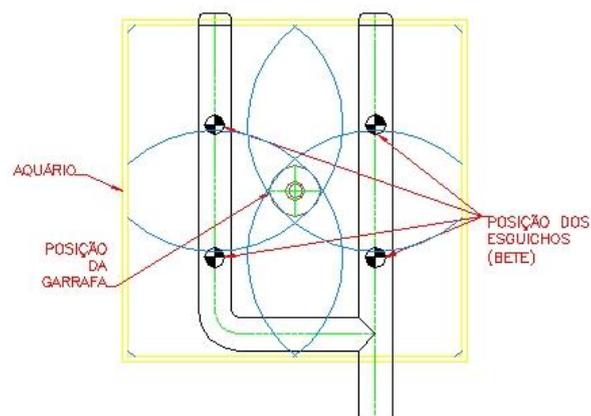


Figura 3.22 – Vista superior indicando a posição dos esguichos marca Bete em relação à garrafa e as projeções do cone de água na altura onde inicia o nível de água na garrafa

Para ter uma quantidade maior de informações para a avaliação, optou-se na realização de três testes iguais para cada modelo de esguicho. Foi mantido o restante dos parâmetros (vazão de água, temperatura de esguicho, posição da garrafa, faixa de aquisição de dados) iguais para todos os testes. Assim consegue-se também verificar questões como repetibilidade, avaliar médias, etc.

Outro ponto que foi previsto nos testes, para se assemelhar com a situação que ocorre em um túnel de pasteurização, foi a quebra da inércia do fluido interno da garrafa. Quando os vasilhames entram no túnel, o líquido no interior está em repouso. A partir do momento em que os esguichos começam atingir as garrafas, inicia a transferência de calor entre a água e os vasilhames e a cerveja começa o movimento interno devido à convecção. Assim, enquanto as embalagens passam de uma etapa para a outra, as temperaturas do esguicho vão aumentando e a

movimentação segue. Para não iniciar os experimentos na bancada em uma situação onde o líquido esteja completamente estagnado, a garrafa tem como condição inicial a sua temperatura mantida abaixo dos 30°C. Assim, quando a garrafa for instalada no suporte e for iniciado o bombeamento da água do esguicho, existe um período até que o **ponto frio** alcance 30°C para começar a movimentação interna e a aquisição dos dados de temperatura já ser feita com circulação do fluido no interior.

Assim foi apresentada a configuração dos experimentos que foram realizados, a bancada e seus recursos. A seguir, serão introduzidos os resultados dos experimentos, o tratamento dos dados e as conclusões que foram tiradas a partir destes resultados, consolidando a avaliação dos esguichos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao realizar os testes, pôde-se verificar como cada modelo de esguicho asperge a água. No caso da bandeja, com a garrafa posicionada no centro da projeção da bandeja, ela recebe os esguichos de água com o posicionamento dos furos cobrindo toda a área da mesma, com uma cobertura uniforme ao longo da área externa do vasilhame pela água, conforme é visto na Figura 4.1. Neste modelo, a água não atinge o vasilhame sob pressão, tendo apenas a gravidade e uma pequena coluna de água que se forma dentro da bandeja como impulso.

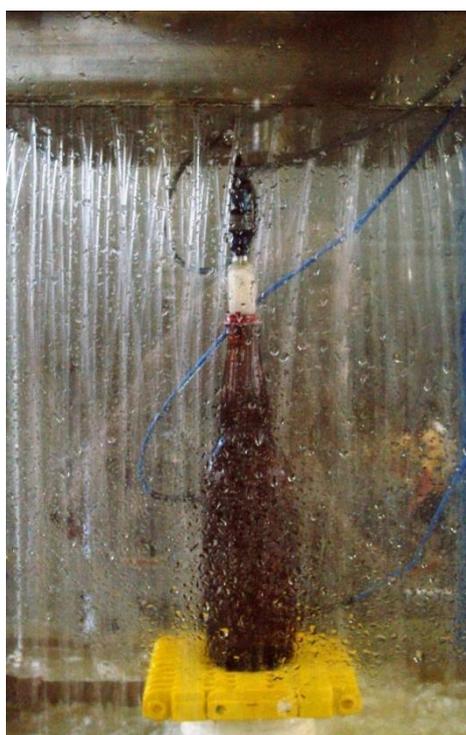


Figura 4.1 – Esguicho com bandeja

Nos testes com o tubo quadrado, o desenvolvimento do leque (ver Figura 4.2), que por ser estreito (conforme pode-se ver na Figura 4.3), abrange uma pequena porção do aquário e, por estar posicionada bem no centro do aquário, a garrafa não é atingida com uniformidade. Não existe a formação de um filme de água constante na área externa, sendo o vasilhame aquecido em grande parte pelo ar quente que a está envolvendo.



Figura 4.2 – Esguicho em forma de leque, utilizando o tubo quadrado, vista perpendicular ao fluxo

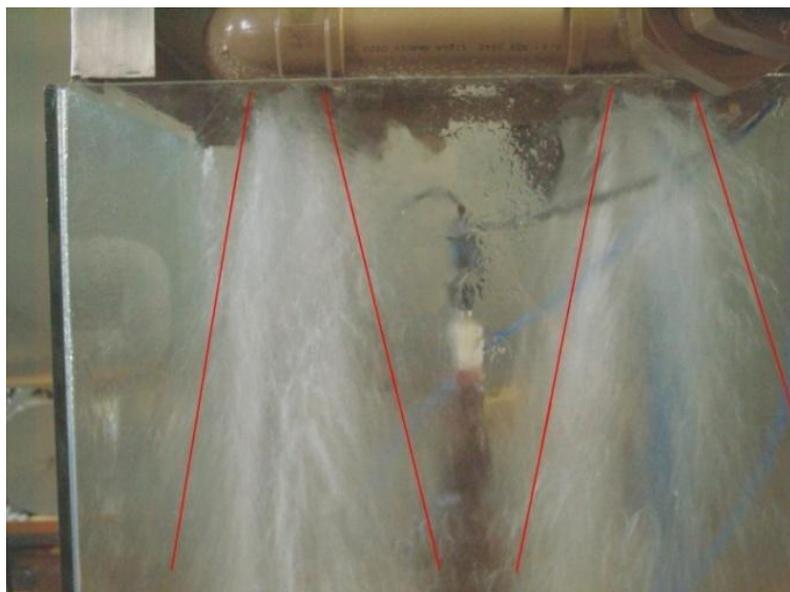


Figura 4.3 – Vista do esguicho com tubo quadrado, longitudinal ao fluxo de água

Como no túnel de pasteurização existe o movimento da garrafa pela esteira através destes leques, a situação da garrafa parada no centro dos tubos não representa com eficiência a situação real. Por isso, neste modelo, foram realizados também mais três experimentos, com a mesma configuração que os anteriores menos a localização da garrafa, que foi deslocada para baixo de um dos tubos quadrados, centralizada entre dois rasgos. Assim, sabendo que a garrafa passa aproximadamente 65% do tempo de permanência no interior do túnel nos intervalos entre os esguichos e apenas no restante do tempo (35%) é que os vasilhames passam sendo atingidos diretamente por algum tubo de esguicho, estes serão parâmetros de ponderação para o cálculo dos resultados dos experimentos realizados com o tubo quadrado para caracterizá-lo neste trabalho de maneira mais semelhante com o túnel de pasteurização real .

No caso do esguicho da marca Spraying Systems, há uma abrangência de toda a área interna do aquário, uma vez que a projeção é um cone cheio de 90°. A garrafa inteira, desde a parte superior, é atingida pelos esguichos (Figura 4.4). O efeito do esguicho da marca Bete sobre a garrafa é bem similar ao do modelo anterior, por serem esguichos semelhantes, que utilizam a pressão da bomba para fragmentar o esguicho em gotas. Neste caso, a alteração que pode ser verificada visualmente é a diminuição da abertura do cone, que para este modelo é 65° (comparar a Figura 4.5 com a Figura 4.4)



Figura 4.4 – Esguichos marca Spraying Systems instalados na bancada e a indicação do cone com um ângulo de 90° produzido pelo aspersor



Figura 4.5 – Esguichos marca Bete instalados na bancada e a indicação do cone com um ângulo de 65° produzido pelo aspersor

As Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 mostram os gráficos da variação das temperaturas lidas por cada sensor instalado na garrafa em relação ao tempo para os diferentes esguichos. Estes gráficos apresentam o comportamento da média dos três experimentos realizados para cada modelo de aspersor. As linhas verticais tracejadas demarcam o período de tempo onde o sensor central indica a temperatura de 30 a 40°C.

O teste foi iniciado com a garrafa na bancada a uma temperatura semelhante à temperatura que uma garrafa estaria na entrada da terceira zona de aquecimento de um túnel de pasteurização (30°C medido no **ponto frio**). O esguicho foi mantido na temperatura que é utilizada nesta zona (50°C) e o teste foi encerrado quando o sensor instalado no eixo da garrafa indicava que a temperatura do **ponto frio** tivesse passado dos 40°C (temperatura que estaria a garrafa na saída da zona de aquecimento e entrada na zona de processo).

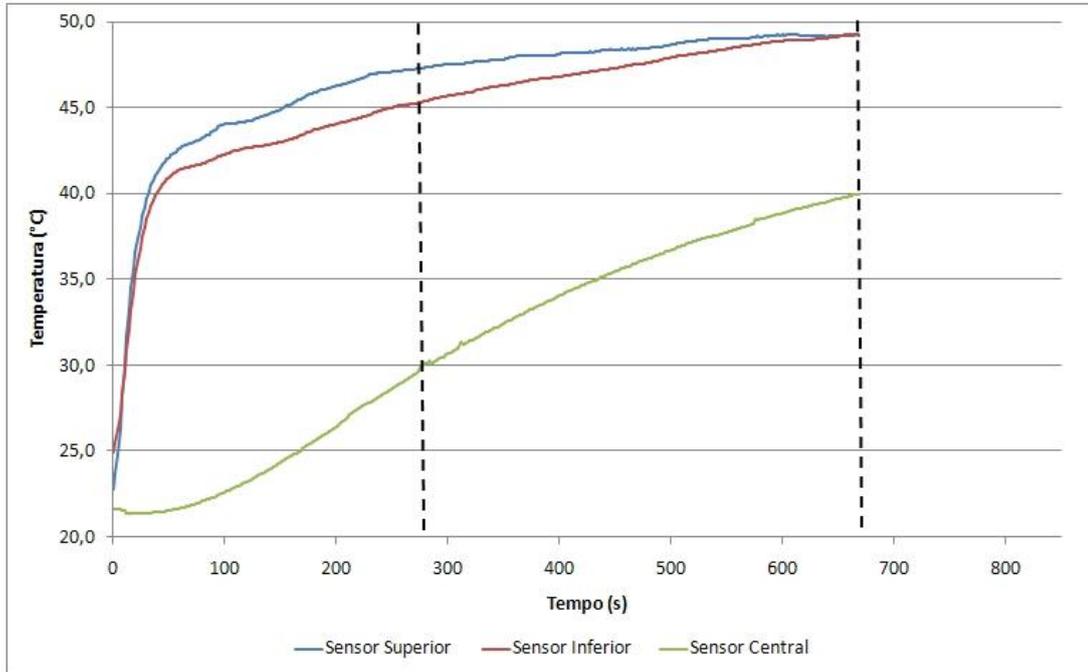


Figura 4.6 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando a bandeja perfurada

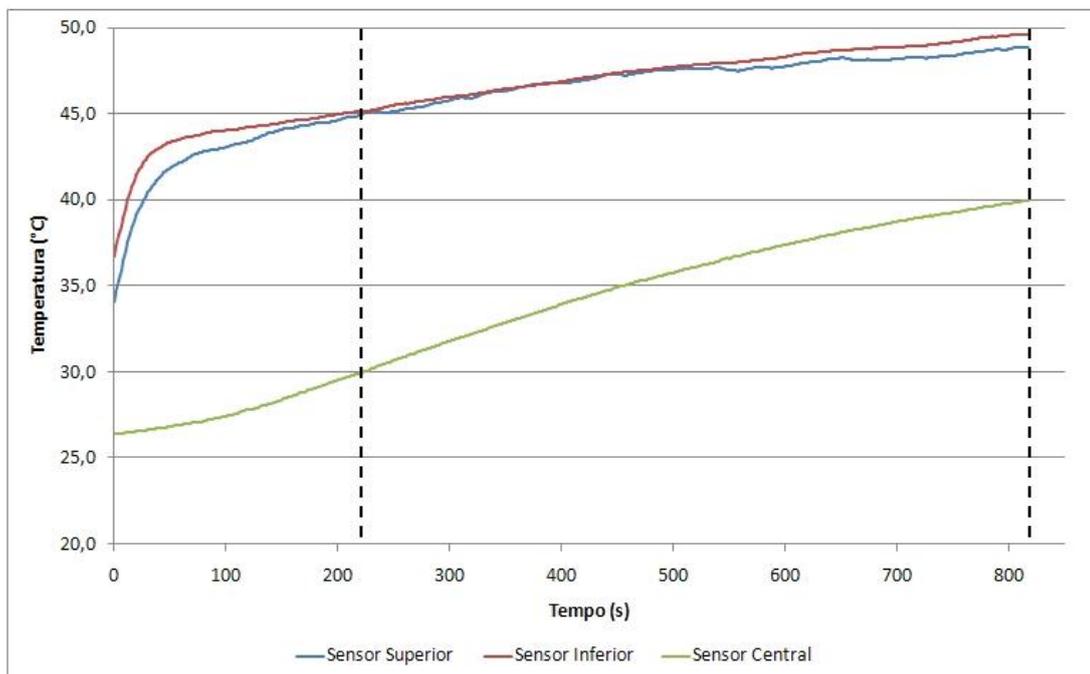


Figura 4.7 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando o tubo quadrado.

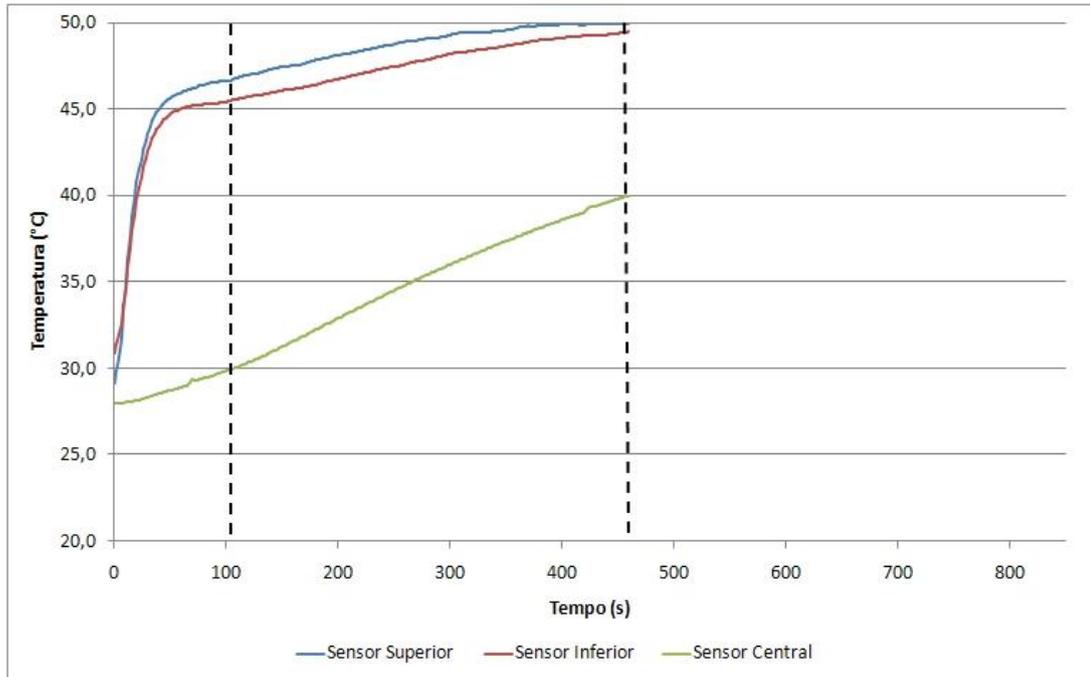


Figura 4.8 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando o esguicho marca Spraying Systems

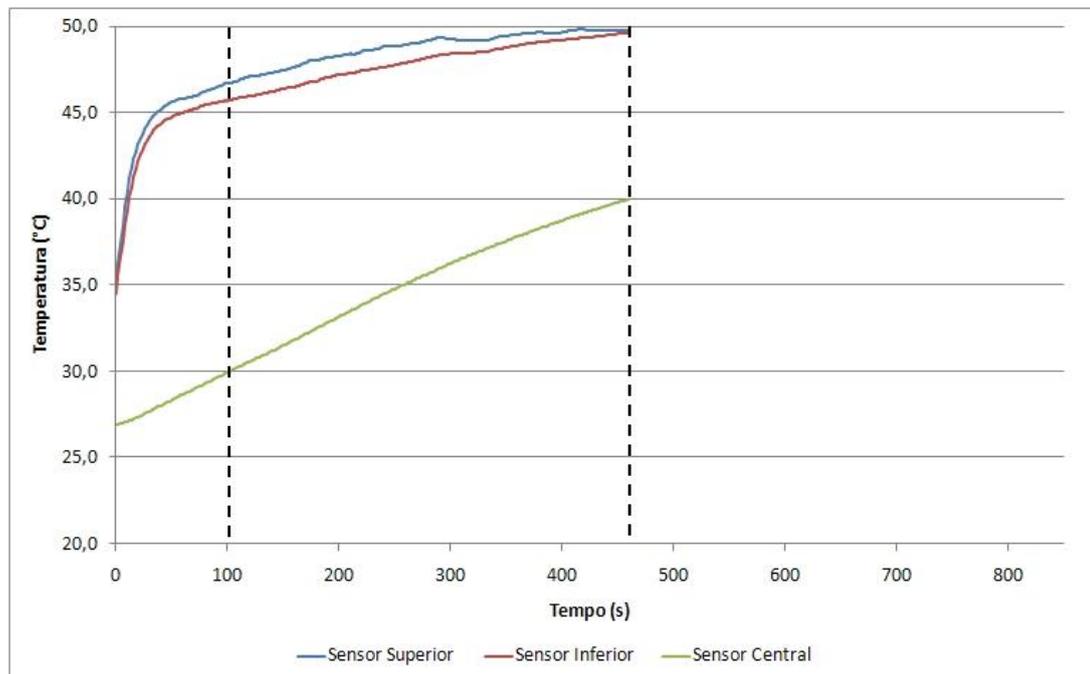


Figura 4.9 – Gráfico das temperaturas médias adquiridas pelos sensores durante aquecimento da garrafa utilizando o esguicho marca Bete

Como era de se esperar, as curvas apresentam comportamentos similar para os diferentes modelos de esguicho: por causa da transferência de calor entre a água e a parede da garrafa, os sensores da parede têm uma elevação de temperatura mais rápida e chegando, ao final do teste, a

uma temperatura já próxima da temperatura do esguicho. Nos casos da bandeja, Spraying Systems e Bete, o sensor superior apresenta ao longo do experimento um diferencial positivo de temperatura em relação ao sensor inferior, ou seja, a temperatura medida por esse sensor é sempre maior que a medida no sensor inferior, para um mesmo instante de tempo. Isto se deve ao aquecimento do fluido interno ao longo de toda a garrafa, que vai absorvendo energia a medida que se dirige para a parte superior do vasilhame devido ao movimento efetuado pela convecção interna. No entanto, este resultado não é observado nos experimentos realizados com o tubo quadrado. Ali tem-se uma inversão: as temperaturas medidas pelo sensor inferior apresentam valores maiores que as temperaturas adquiridas pelo sensor superior. Isto tem explicação a partir da visualização do esguicho durante os experimentos. A água não atinge a garrafa de maneira tão uniforme quanto os modelos anteriores, desde a sua parte superior até o fundo. Este fato gera uma diferença de transferência de calor, onde no caso do tubo quadrado, na parte superior da garrafa, há uma parte onde a convecção com a garrafa se dá em parte por água do esguicho e em parte pelo ar quente que envolve o vasilhame. O sensor no centro tem uma progressão bem mais lenta, com uma demora até que a temperatura se eleve naquele ponto da garrafa, pois como já foi demonstrado anteriormente, é um ponto de estagnação no vasilhame.

Para o início da avaliação dos dados obtidos foi adotado o seguinte critério: para o caso da medição do sensor central, foi tomado como referência de avaliação o período de tempo, em segundos, que passou entre o **ponto frio** ir de 30°C até 40°C. Ou seja, o tempo que seria necessário para a garrafa permanecer na terceira etapa de aquecimento, atendendo assim a curva de aquecimento do processo de pasteurização (conforme pode ser visto na Figura 2.3).

Para avaliar se dentre os dados obtidos, não havia nenhum valor duvidoso espúrio, foi aplicado o critério de rejeição de Chauvenet. A partir das médias e dos desvios padrões, encontrou-se os desvios das amostras e realizada a verificação a partir da comparação destes desvios com o valor de desvio máximo da amostra. Como em nenhuma das medições isto ocorreu, nenhum valor foi rejeitado e todos os experimentos foram considerados para os cálculos posteriores.

Assim foram calculadas as médias e desvios padrões conforme pode ser visto na Tabela 4.1. Vale citar que o desvio padrão foi calculado conforme desvio padrão experimental, pois o número de amostras de experimentos para cada modelo é bem menor que 30.

Tabela 4.1 – Média e desvio padrão do tempo de aquecimento de 30°C à 40°C, medido pelo sensor central (os valores são em segundos)

	Bandeja	Tubo quadrado	Spraying Systems	Bete
<i>Média</i>	394,7	542,6	358,0	361,3
<i>Desvio padrão experimental</i>	11,02	-	29,46	26,63

No caso da média para o tempo de aquecimento utilizando o tubo quadrado, foi feita uma média ponderada entre os valores dos experimentos realizados com a garrafa localizadas no centro do aquário e os realizados com a garrafa instalada abaixo do tubo. A ponderação foi feita com a proporção de tempo que a garrafa permanece sob uma condição e a outra (65% contra 35%, respectivamente). E não foi calculado o desvio padrão deste modelo, pois são experimentos realizados sob diferentes condições e uma ponderação sobre estes valores não seria correto.

Para os dados de temperatura dos sensores montados na parede da garrafa, uma estratégia de análise diferente foi definida. Como o aumento de temperatura nesta região é drástico e tende assintoticamente à temperatura do esguicho, foi proposto encontrar a constante de tempo relativa à curva de temperatura desde o seu início (30°C) até a teórica estabilização com o esguicho (50°C). Neste caso, utilizando a Equação (8), vista no Capítulo 2, chega-se ao valor da temperatura relativa à constante de tempo (ou seja, 63,2% do percurso do excesso de temperatura):

$$0,368 = \frac{T - 50}{30 - 50}$$

$$T \cong 42,6^{\circ}\text{C}$$

Analisando os dados da aquisição das temperaturas pelos sensores superior e inferior e do tempo transcorrido nos experimentos, pode-se encontrar também as médias e desvios padrão de cada constante de tempo para cada modelo (estes valores podem ser vistas nas Tabelas 4.2 e 4.3). Para estes casos também vale a observação feita nos resultados do sensor central, onde foi calculada a média ponderada e não foi calculado o desvio padrão, para o tubo quadrado.

Tabela 4.2 – Média e desvio padrão da constante de tempo τ para a curva de aquecimento, medido pelo sensor superior (os valores são em segundos)

	Bandeja	Tubo quadrado	Spraying Systems	Bete
<i>Média</i>	45,64	73,92	20,38	24,39
<i>Desvio padrão experimental</i>	11,967	-	1,166	3,118

Tabela 4.3 – Média e desvio padrão da constante de tempo τ para a curva de aquecimento, medido pelo sensor inferior (os valores são em segundos)

	Bandeja	Tubo quadrado	Spraying Systems	Bete
<i>Média</i>	102,67	62,30	27,76	35,12
<i>Desvio padrão experimental</i>	11,488	-	2,284	9,209

No entanto, devido às características dos experimentos e também ao número reduzido de repetições, somente com estes dados não se consegue fazer uma análise correta da influência do modelo de esguicho nos tempos de aquecimento, pois foram encontradas médias de tempos próximas e, em alguns casos, desvios padrão altos.

Assim, utilizou-se o método da ANOVA para analisar os dados dos tempos de aquecimento (para o sensor central) e de constantes de tempo (para os sensores superiores e inferiores). Propondo a hipótese de que o modelo do esguicho influencia os tempos de aquecimento, foi aplicado o teste estatístico para os valores, separadamente para cada grupo de dados por sensor (foi realizado o teste para os tempos do sensor central, para o inferior e, após, para o superior). Para este trabalho foi utilizado um intervalo de confiança de 95%. Também cabe salientar que, para representar o modelo do tubo quadrado, foi utilizada a média ponderada calculada anteriormente, e não os resultados dos experimentos.

Os resultados obtidos da análise pela ANOVA foram:

- para o caso do sensor central (os tempos de aquecimento do **ponto frio** desde 30°C até 40°C), o teste verificou que a hipótese é verdadeira: a alteração do modelo do esguicho traz alterações nos tempos de aquecimento (na Tabela 4.4 pode-se verificar que o fator “ F ” é maior que o fator “ $F_{crítico}$ ”). Ou seja, alterar o modelo de esguicho altera o processo de aquecimento da cerveja em túneis de pasteurização, podendo trazer benefícios como, por exemplo, economia de água e diminuição de tempos de passagem.

Tabela 4.4 – Tabela da análise dos dados de tempo do sensor central (ANOVA)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Bandeja	3	1184	394,6667	121,3333
Tubo quadrado	1	542,6	542,6000	-
Spraying Systems	3	1074	358,0000	868,0000
Bete	3	1084	361,3333	709,3333

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	28865,7107	3	9621,9036	16,9932	0,00245107	4,7571
Dentro dos grupos	3397,3333	6	566,2222			
Total	32263,0440	9				

- o resultado da ANOVA para os dados dos sensores superior e inferior também mostraram influência do modelo de esguicho na transferência de calor na parede da garrafa (Tabela 4.5 e Tabela 4.6). Como no caso anterior, a mudança do tipo de esguicho pode aumentar o fluxo de calor nesta parte da garrafa, fazendo com que seja possível uma circulação com maior velocidade do líquido no interior, por convecção natural, ajudando no resultado final de aquecimento da cerveja como um todo.

Tabela 4.5 – Tabela da análise dos dados de tempo do sensor superior (ANOVA)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Bandeja	3	136,91	45,6367	143,2060		
Tubo quadrado	1	73,92	73,9200	-		
Spraying Systems	3	61,13	20,3767	1,3602		
Bete	3	73,16	24,3867	9,7241		
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2831,2552	3	943,7517	18,3502	0,00199841	4,7571
Dentro dos grupos	308,5808	6	51,4301			
Total	3139,8360	9				

Tabela 4.6 – Tabela da análise dos dados de tempo do sensor inferior (ANOVA)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Bandeja	3	308,02	102,6733	131,9804		
Tubo quadrado	1	62,3	62,3000	-		
Spraying Systems	3	83,27	27,7567	5,2146		
Bete	3	105,35	35,1167	84,8065		
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	10276,1762	3	3425,3921	46,2887	0,00015298	4,7571
Dentro dos grupos	444,0032	6	74,0005			
Total	10720,1794	9				

Após executar o teste com a ANOVA com os tempos de aquecimento para cada sensor e comprovar que os diferentes modelos de esguichos testados na bancada provocam diferentes reações em relação à transferência de calor para a garrafa, procurou-se qualificar esta diferença e pesquisar os modelos em relação a esta troca de energia.

Como foram adquiridos dados de temperaturas internas à garrafa, o próximo passo deste trabalho foi de utilizar estas informações para encontrar a intensidade da troca de calor por convecção interna natural da água no interior da garrafa.

A situação do aquecimento da garrafa através do esguicho de água é um problema claramente transiente. Ou seja, a cada instante de tempo do experimento as condições de temperatura e fluxo de calor para o interior do vasilhame se alteram. Além disso, a garrafa proporciona uma geometria peculiar ao problema, pois nela se apresenta a formação de uma camada de fluido ascendente na parede do vasilhame, ao redor de todo o perímetro interno, e a formação de um fluxo descendente no eixo central, completando assim a circulação interna do líquido no interior da garrafa. Apesar de não ser exatamente a mesma situação que está se analisando aqui, um modelo teórico que pode ser tomado como ajuda para este trabalho é o que foi citado no Capítulo 2, sobre um recipiente 2D, retangular, sob a condição de temperatura prescrita nas duas paredes e com a parte superior e a inferior sem transferência de calor (ou seja, isoladas), para regime permanente. Ali há a transferência de calor entre as duas placas, com um fluido servindo de meio para a convecção interna.

Conforme pode ser visto na Figura 4.10, uma analogia com a garrafa foi realizada. Assim como aparece uma parede quente no caso do recipiente, na garrafa existe a parede de vidro, que tem a temperatura mais elevada que o resto do sistema, por estar sendo aquecida pelo esguicho. Pelo outro lado, considerando uma seção da garrafa, consegue-se enxergar a região central da garrafa como uma semelhança da situação teórica, onde temos um fluxo de fluido “frio” movimentando-se de cima para baixo, completando a circulação com a parte quente, apesar de não existir fisicamente, no caso da garrafa, a parede fria. Outro ponto em comum entre as duas situações é o fato de o fundo e a parte superior estarem isolados termicamente.

Por esta semelhança, definiu-se que seria utilizado este modelo para o cálculo da intensidade da transferência de calor por convecção interna no caso da garrafa. E, para este modelo, o parâmetro a ser calculado é o \overline{Nu} , resultado da Equação (6), que irá servir para a avaliação qualitativa do desempenho dos esguichos. Mas vale salientar que o caso do modelo teórico serve para uma situação de regime permanente. Para a situação deste trabalho, que apresenta um regime transiente dentro da garrafa, foi feita uma proposição. O \overline{Nu} será calculado para cada momento de tempo que foram adquiridas as temperaturas, ou seja, será um número de Nussel “instantâneo” ou \overline{Nu}_{inst} , e cada instante foi considerado uma situação de regime permanente. Com isso, consegue-se ter um gráfico $\overline{Nu}_{inst} \times t$, durante o período de aquecimento do **ponto frio** de 30 até 40°C para cada modelo de esguicho.

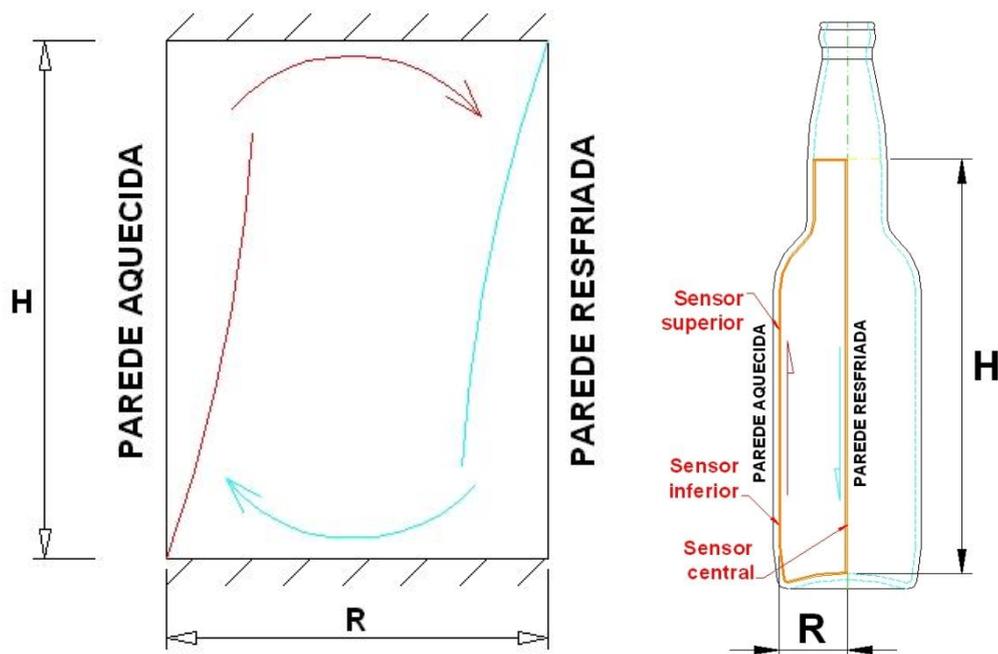


Figura 4.10 – Analogia entre o problema teórico do recipiente 2D (à esquerda) [Bejan, 1995] e a garrafa de cerveja (à direita), com os componentes em comum às duas situações

Também deve ser comentado que o \overline{Nu}_{inst} encontrado nesta etapa do trabalho, por causa das considerações feitas para adequá-lo ao modelo teórico, não deve ser confundido com o valor utilizado para calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção h e assim encontrar o fluxo de calor absorvido pela cerveja. De fato, o objetivo é apenas ter um número de informações que reúna as condições do problema e caracterize a situação, mostrando as diferenças que cada modelo de esguicho exerce sobre a convecção interna.

O cálculo de \overline{Nu}_{inst} foi assim montado:

- deve-se encontrar o ΔT da expressão para Ra (Equação (7)), isto é, a diferença de temperatura entre a placa quente e a placa fria. Adaptando para a situação da garrafa, a temperatura quente será representada pela média entre as temperaturas medidas pelo sensor superior e inferior para aquele instante de tempo. Ou seja, será considerado que esta média irá representar a temperatura ao longo da parede interna da garrafa. Para a temperatura da placa fria, o parâmetro proposto é a temperatura medida pelo sensor central, considerando que esta é a temperatura do fluido que foi resfriado pela virtual placa fria;

- as propriedades físicas relativas ao fluido interno (β , ρ , ν , etc) para o cálculo de Ra e \overline{Nu}_{inst} não foram considerados constantes. Como, para a faixa de temperatura dos testes, algumas propriedades têm alterações significativas de valor, todas elas foram ajustadas segundo o valor da temperatura média do fluido na parede da garrafa em cada instante de tempo;

- como mostra a Figura 4.10, o dimensional do recipiente considerado para o cálculo é a altura de líquido que existe dentro da garrafa (medida "H") e o raio interno da garrafa (medida "R"), que será a região onde irá ocorrer a circulação de fluido;

Assim, utilizando a equação $\overline{Nu} = 0,364 \frac{R}{H} Ra^{1/4}$ e os dados de temperatura adquiridos nos experimentos, as informações de $\overline{Nu}_{inst} \times t$ para cada um dos três experimentos para cada modelo de esguicho foram colocadas em forma de gráfico. Como os dados mostraram uma coerência significativa, para simplificação da análise, cada tipo de esguicho foi caracterizado com uma curva média, que é uma curva $\overline{Nu}_{inst} \times t$ com a média dos valores de cada teste no período de tempo calculado na Tabela 4.1 para cada modelo de esguicho.

A seguir será apresentada uma descrição dos resultados obtidos para cada modelo de esguicho.

Bandeja

Neste caso, o gráfico $\overline{Nu}_{inst} \times t$ encontrado para o período de tempo em que o **ponto frio** foi de 30°C até 40°C pode ser visto na Figura 4.11 a seguir.

Como era de se esperar, o \overline{Nu}_{inst} tem um comportamento de declínio ao longo do tempo do experimento. Isto se deve ao aumento da temperatura no centro da garrafa e a aproximação do seu valor com o valor medido nas paredes da garrafa. Ou seja, o ΔT diminui e cai a intensidade da troca térmica com o fluido interno.

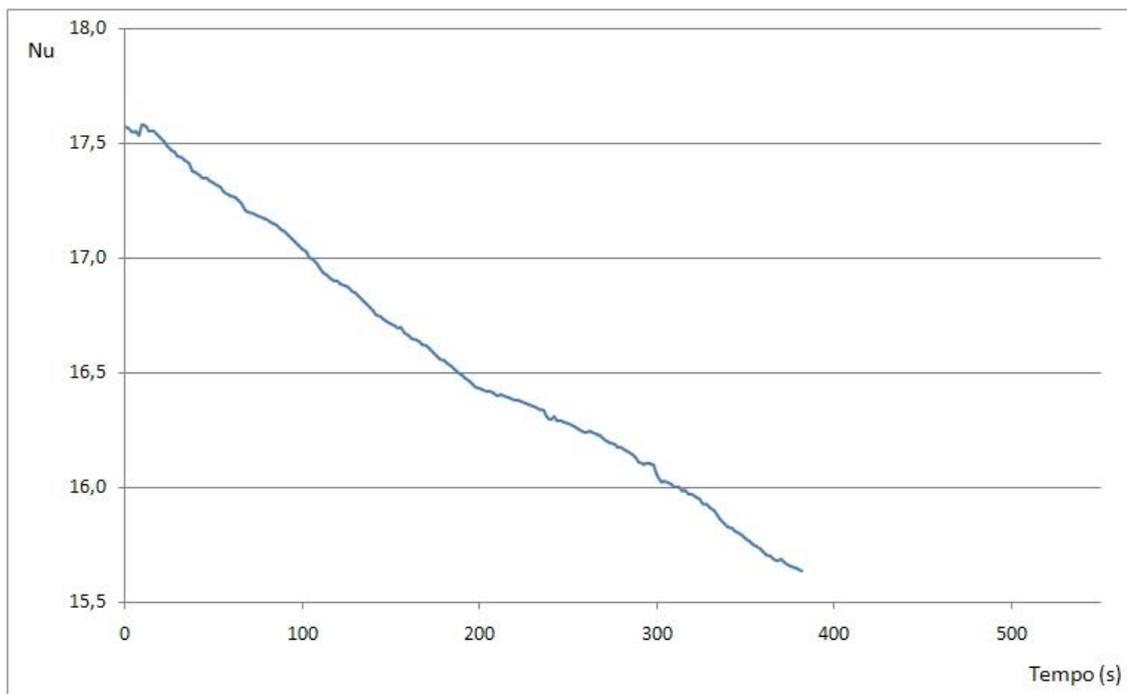


Figura 4.11 – Gráfico $\overline{Nu}_{inst} \times t$ médio para os experimentos com a bandeja

Esguicho tubo quadrado

O gráfico que mostra o desempenho deste modelo nos experimentos pode ser visto na Figura 4.12. Aqui, novamente, foi feita a média ponderada dos experimentos.

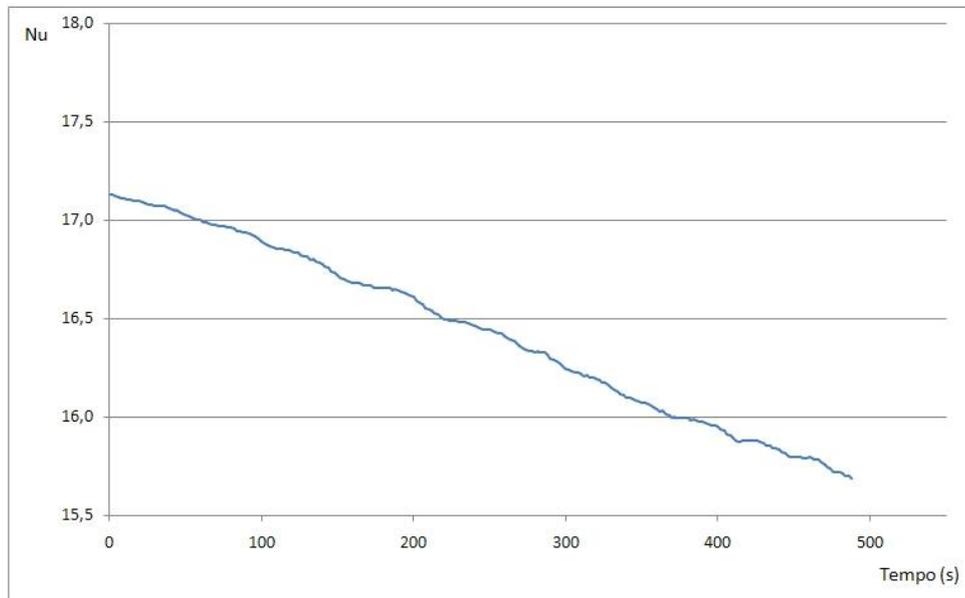


Figura 4.12 – Gráfico \overline{Nu}_{inst} x t médio para os experimentos com o tubo quadrado

Esguicho marca Spraying Systems

Segue na Figura 4.13 o gráfico \overline{Nu}_{inst} x t para o esguicho da marca Spraying Systems.

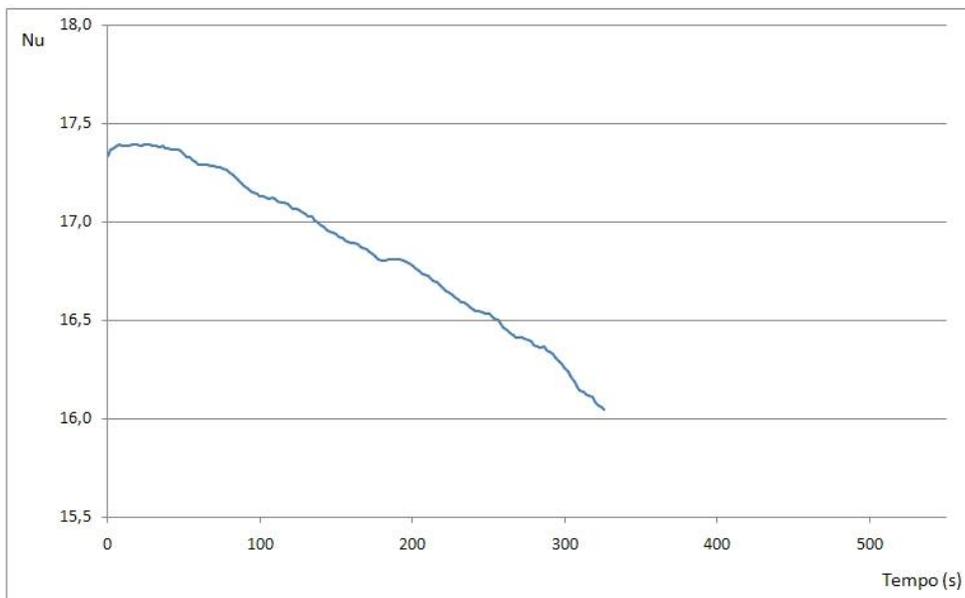


Figura 4.13 – Gráfico \overline{Nu}_{inst} x t médio para os experimentos com o esguicho marca Spraying Systems

Esguicho marca Bete

A curva com a média do \overline{Nu}_{inst} para este modelo aparece em seguida, na Figura 4.14.

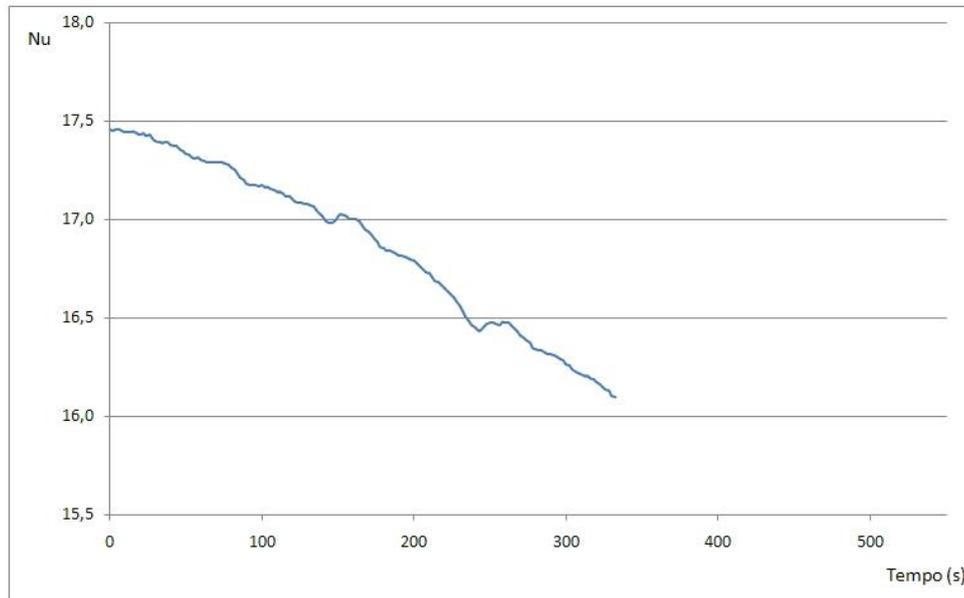


Figura 4.14 – Gráfico \overline{Nu}_{inst} x t médio para os experimentos com o esguicho marca Bete

Comparação dos resultados

Pode-se ver na Figura 4.15, o gráfico onde foram reunidas todas as curvas médias de \overline{Nu}_{inst} relativas aos diferentes modelos de esguichos.

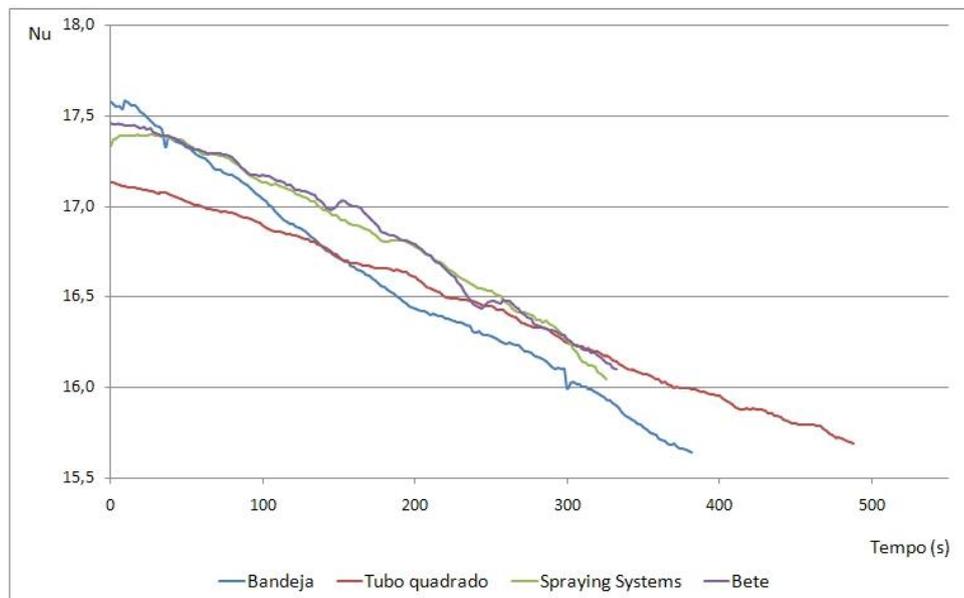


Figura 4.15 – Gráfico \overline{Nu}_{inst} x t médio reunindo os resultados dos modelos de esguichos estudados

Como se pode ver, praticamente não há diferença entre as curvas. Para os modelos da marca Spraying Systems, Bete e a bandeja, o tempo para que foi calculada a intensidade de troca térmica e a curva de decaimento desta intensidade são muito semelhantes. Na Figura 4.16, onde são apresentadas retas de tendência das curvas da Figura 4.15, pode-se ver que apenas a curva do modelo do tubo quadrado ficou um pouco diferentes dos demais, apresentando um tempo médio maior de realização do aquecimento.

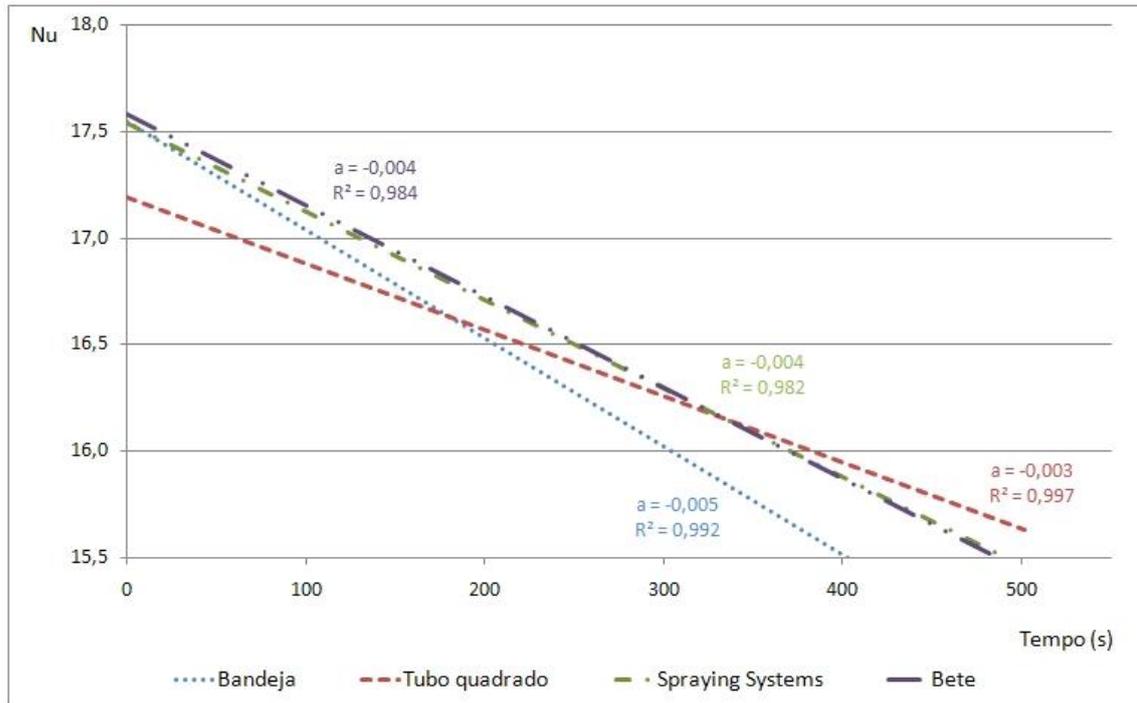


Figura 4.16 – Gráfico $\overline{Nu} \times t$ de todos os esguichos, com uma curva de tendência para cada modelo e a indicação da declividade (a) e do coeficiente de correlação (R^2)

A seguir, são apresentadas algumas considerações finais, antes da conclusão do trabalho.

Considerações finais

Na seção anterior, demonstrou-se que o esguicho que utiliza o tubo quadrado tem um desempenho inferior aos outros três modelos. No entanto, os testes realizados na bancada não levam em consideração um aspecto encontrado no túnel de pasteurização: o movimento das garrafas. Os vasilhames são transportados no sentido transversal aos tubos, atravessando períodos de esguicho e intervalos sem esguicho (ver Figura 4.17). Estes intervalos sem esguicho diretamente na garrafa e com o jato atingindo a garrafa foi aproximado neste trabalho por uma média ponderada, para representar com maior significância a situação real no túnel de pasteurização. O que deve ser levado em conta é que, comparando a situação real com a dos

experimentos, onde falta o movimento da garrafa através dos tubos, talvez até este tipo tenha o desempenho equivalente (ou mais próximo) com o restante dos modelos testados aqui.

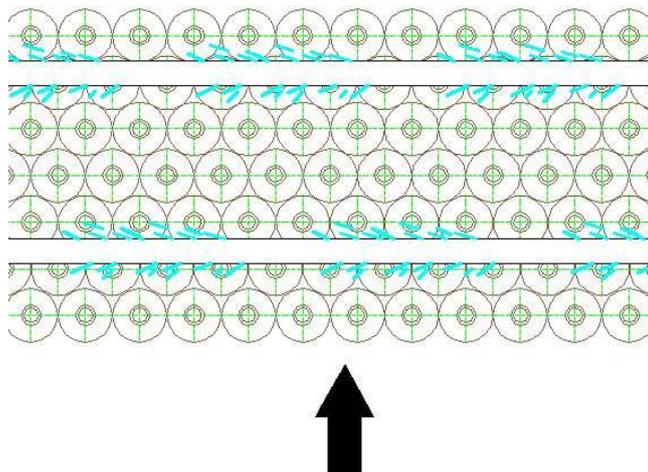


Figura 4.17 – Vista superior de um túnel de pasteurização com esguichos de tubos quadrados, mostrando o espaçamento entre os tubos

Para avaliar se os resultados encontrados neste trabalho podem ser aplicados para os projetos de túneis de pasteurização reais, deve ser levado em conta o fato que não foi encontrado entre os fabricantes de túneis de pasteurização de cerveja, uma avaliação do modelo de esguicho utilizado em relação ao seu desempenho na troca térmica com da água com os vasilhames. Não há unanimidade sobre qual o modelo de esguicho que deva ser utilizado. Fazendo uma avaliação sobre projetos existentes, foram encontrados vários motivos para a preferência por um determinado modelo: facilidade de manutenção, baixo preço de instalação e reposição e outros. Todos relacionados com o projeto mecânico do equipamento e não com a eficiência do processo de pasteurização. Um mesmo fabricante disponibiliza diferentes modelos de esguicho para a escolha do cliente. Acredita-se que, se houvesse uma diferença significativa entre os modelos no que diz respeito ao desempenho de troca térmica, que levasse a um acréscimo de desempenho ao túnel de pasteurização, isso já haveria se disseminado entre os fabricantes e sido adotado em todos os projetos de túneis de pasteurização.

E, para finalizar, deve ser feito um comentário em relação às incertezas dos dados experimentais do trabalho apresentado. Ao longo do texto do trabalho foram apresentados os valores de erros e incertezas de medição que estão ligados aos instrumentos utilizados (como termoresistências e termopares). Mas, eles não foram aplicados nos cálculos aqui demonstrados. Isto ocorreu por se tratar de resultados comparativos, visando apenas uma resposta qualitativa e não quantitativa e sem aplicação em outros setores, como cálculos de transferência de calor ou eficiências.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é a realização de um estudo buscando chegar a uma avaliação da influência do modelo de esguicho na transferência de calor para vasilhames em túneis de pasteurização de cerveja. Para isto, foi proposta a montagem de uma bancada de testes, que teve os recursos de uma etapa de um túnel e onde se pôde simular uma parte do processo de pasteurização (uma etapa de aquecimento). Esta bancada também possui a possibilidade de alteração do sistema de aspersão, para possibilitar o estudo dos quatro diferentes modelos de esguicho indicados para este trabalho sendo submetidos aos mesmos parâmetros.

Com estes pontos definidos, os testes foram realizados e temperaturas internas de uma garrafa de cerveja de 600 ml foram coletadas. Estes dados serviram para avaliar o comportamento da convecção do fluido na parte interna do vasilhame. Este julgamento foi feito através da comparação de gráficos de intensidade da transferência de calor gerados para cada modelo de esguicho.

O confronto dos gráficos, realizado no Capítulo 4, mostrou os resultados de cada modelo muito parecidos entre si. Apesar do teste ANOVA realizado com os dados de tempos de aquecimento ter mostrado que o tipo de esguicho provocava diferença no comportamento de temperatura dos pontos medidos pelos sensores localizados na parte superior da parede interna e também no fundo da garrafa, uma análise posterior, avaliando o efeito na convecção interna realizado pelos esguichos, mostrou que os resultados são similares para todos os modelos. Na verdade, para esta situação criada neste trabalho, o único modelo que produz um resultado inferior dos demais, é o que utiliza o tubo quadrado, com o tempo de aquecimento mais alto que os demais.

Ao contrário do que foi demonstrado em outros trabalhos citados no Capítulo 1, que chegaram a resultado onde a variação de alguns parâmetros, como vazão e posição da garrafa em relação ao eixo vertical do esguicho ou velocidade de gota para resfriamento de blocos de cobre, a conclusão deste trabalho foi que, para a configuração criada aqui, a alteração do modelo de esguicho não altera a intensidade de troca de calor da parede da garrafa com o fluido interno significativamente.

Assim, baseado nos experimentos aqui realizados e nos fatos supracitados, pode-se dizer que a alteração de modelo de esguicho, dentre os tipos estudados, não modifica a curva de aquecimento da cerveja durante o processo de pasteurização em túneis. Uma das razões para este resultado pode estar no vasilhame da cerveja. Ao fazer a análise do fluxo de calor, verifica-se que existe um sistema de convecção entre o esguicho e a área externa da garrafa que leva ao aquecimento da garrafa (apenas considerando o vidro, sem ainda analisar o fluido interno). Este

aquecimento é muito rápido, confirmado pelo baixo calor específico do vidro e pelos baixos valores da constante de tempo encontrados para os sensores localizados na parede da garrafa. Ou seja, mesmo com alguma variação entre os modelos de esguicho, em todos os casos, logo no início do teste de aquecimento, a garrafa já está a uma temperatura muito próxima da temperatura do esguicho. Isso se reflete em uma situação que se pode simplificar a condição de contorno do fluido interno na garrafa como temperatura constante em toda a área interna do vasilhame para todos os modelos de esguicho. Assim, qualquer que seja a forma que o esguicho impulse a água para cima dos vasilhames, em pouco tempo de processo a condição de troca térmica com a cerveja se iguala para todos os casos, já que a temperatura do esguicho é a mesma. Isso também indicaria que, para o caso de simulações numéricas ou cálculos de fluxo de calor, supor uma condição de temperatura constante na parte externa da garrafa é uma aproximação bem razoável, como foi feito em trabalhos anteriores.

Outra explicação pode ser destacada pela inércia do sistema interno da garrafa. A transferência de calor do vasilhame para a cerveja se dá por convecção natural que, sabidamente, é caracterizada por baixos coeficientes de troca térmica. Também são pequenas as diferenças de temperatura que ocorrem no processo de pasteurização entre o esguicho e a cerveja (esta diferença, em projetos de túneis de pasteurização, fica em no máximo 25°C, quando a cerveja está passando de uma etapa de aquecimento para outra, e vai diminuindo ao longo da etapa). Estes dois fatores, somados à diferença de volume de líquido movimentado pela convecção na parede em relação ao volume de líquido que permanece estagnado ou com velocidades muito baixas (esta diferença pode ser comprovada em resultados de simulações numéricas realizados nesta área em trabalhos anteriores), geram resultados muito parecidos de curvas de aumento de temperatura da cerveja mesmo com a alteração do modelo de aspersor utilizado.

Após a análise dos resultados obtidos, para o fechamento deste trabalho, cabe enumerar algumas sugestões de pontos a serem analisados sobre este assunto a partir daqui:

- este estudo foi realizado utilizando uma garrafa de cerveja 600 ml. Mas existem outros tipo de vasilhames de cerveja no mercado, que também utilizam o túnel de pasteurização, como garrafas de diferentes capacidades e latas de alumínio. Comprovar que o resultado aqui também é válido ou não para embalagens feitas com materiais diferentes e que armazenam um volume diferente de cerveja pode introduzir modificações nos projetos de túneis para estes vasilhames;

- com a mesma bancada se conseguiria produzir os resultados de perfis de temperatura interna e estudo de transferência de calor em outros campos, como resfriamento de componentes eletrônicos, por exemplo. O equipamento não está restrito à estudos apenas para a área de pasteurização de cerveja;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bejan, A. 1995. **“Convection Heat Transfer”**. 2ª Edição. New York : John Wiley & Son, Inc., 1995. 0-471-57972-6.
- Buzrul, S. 2007. **“A suitable model of microbial survival curves for beer pasteurization”**. LWT- Food Science and Technology . 2007, Vol. 40, pp. 1330-1336.
- Chen, R.H., Chow, L.C. e Navedo, J.E. 2002. **“Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling”**. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002, Vol. 45, pp. 4033-4043.
- Chen, R.H., Chow, L.C. e Navedo, J.E. 2004. **“Optimal spray characteristics in water spray cooling”**. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004, Vol. 47, pp. 5095-5099.
- Da Cunha, J.A.R., Teixeira, M.M. e Fernandes, H.C. 2007. **“Avaliação do Espectro de Gotas de Pontas de Pulverização Hidráulicas Utilizando a Técnica da Difração do Raio Laser”**. Engenharia Agrícola. Jaboticabal : s.n., 2007. Vol. 27, pp. 10-15.
- De Clerck, J. 1957. **“A textbook of brewing”**. London : Chapman & Hall, 1957. Vol. I.
- Dhruv, A.S. e Wu, A.R. 2005. **“Bottle pasteurizer and method”**. 11/245,627 Estados Unidos, 7 de Outubro de 2005.
- Dilay, E., et al. 2006. **“Modeling, simulation and optimization of a beer pasteurization tunnel”**. Journal of Food Engineering. 2006, Vol. 77, pp. 500-513.
- Engelman, M.S. e Sani, R.L. 1983. **“Finite-element simulation of an in-package pasteurization process”**. Numerical Heat Transfer. 1983, Vol. 6, pp. 41-54.
- Fillaudeau, L., Blanpain-Avet, P. e Daufin, G. 2006. **“Water, wastewater and waste management in brewing industries”**. Journal of Cleaner Production. 2006, Vol. 14, pp. 463 – 471.
- Fontana, D.H.G. 2009. **“Elaboração de um modelo de controle do processo de pasteurização de cervejas já envasadas (“in-package”)**”. Dissertação de mestrado. 2009, PROMEC.
- Holstein-Kappert S.A - Indústria de Máquinas. 1989. **“Manual de Operação e Catálogo de Peças de Reposição PII 45/240”**. São Paulo : s.n., 1989.
- Horn, C. S., et al. 1997. **“Modelling and simulation of pasteurization and staling effects during tunnel pasteurization of bottled beer”**. Institution of Chemical Engineers. 1997, Vols. 75 - Part C, pp. 23-33.

Lewicki, P.P., Walczak, W. e Goss, B. 1983. **“Heat transfer in a tunnel pasteurizer. Part I. Factors affecting the rate of heating of liquid in a bottle”**. Journal of Food Engineering. 1983, Vol. 2, pp. 309-322.

Meyer, G.L.N. 1941. **“Pasteurizer. 2.262.030”** United States Patent Office, 1941.

Oetterer, M. 2004. **“Tecnologia de obtenção da cerveja”**. Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, USP. 2004.

Silk, E.A., Kim, J. e Kiger, K. 2006. **“Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination”**. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006, Vol. 49, pp. 4910-4920.

Whelan, B.P. e Robinson, A.J. 2009. **“Nozzle geometry effects in liquid jet array impingement”**. Applied Thermal Engineering. 2009, Vol. 29, pp. 2211-2221.

www.cervesia.com.br/historia_da_cerveja.asp. [Acessado em: 15 de Março de 2009.]

www.zl.ind.br. [Acessado em: 5 de Abril de 2009.]