

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Lívia Barreto Arruda Campos**  
**Raianne da Costa Vasconcellos**



**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO TÚNEL PASTEURIZADOR  
DE UMA CERVEJARIA ARTESANAL**

RIO DE JANEIRO  
2023

Lívia Barreto Arruda Campos  
Raianne da Costa Vasconcellos

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO TÚNEL PASTEURIZADOR DE UMA  
CERVEJARIA ARTESANAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheira de Alimentos e Química Industrial.

Orientador: Ricardo Schmitz Ongaratto

Rio de Janeiro

2023

## CIP - Catalogação na Publicação

V149a Campos, Livia Barreto Arruda e Vasconcellos, Raianne da Costa  
Avaliação De Desempenho Do Túnel Pasteurizador De Uma Cervejaria Artesanal / Livia Barreto Arruda Campos e Raianne da Costa Vasconcellos. -- Rio de Janeiro, 2023.  
73 f.

Orientador: Ricardo Schmitz Ongaratto.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Química Industrial e Engenharia de Alimentos, 2023.

1. determinação de UP. 2. pasteurização. 3. cerveja artesanal. 4. túnel pasteurizador. I. Ongaratto, Ricardo Schmitz, orient. II. Título.

Lívia Barreto Arruda Campos  
Raianne da Costa Vasconcellos

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO TÚNEL PASTEURIZADOR DE UMA  
CERVEJARIA ARTESANAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Química da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do grau de Engenharia de  
Alimentos e Química Industrial.

Aprovado em \_\_\_\_ de Junho de 2023.

---

Ricardo Schmitz Ongaratto, D. Sc., UFRJ

---

Bernardo Dias Ribeiro, D. Sc., UFRJ

---

Felipe Souto da Silva, D. Sc., UFRJ

Rio de Janeiro  
2023

## AGRADECIMENTOS

Foram anos de uma jornada intensa e enriquecedora, com muitas vitórias e alegrias, mas também com muitos momentos difíceis, porém sobretudo com muito aprendizado. Dentre muitas coisas que aprendemos na UFRJ, acho que a principal delas é que não se chega a lugar nenhum sozinho, e por isso a lista de agradecimentos é extensa, e não conseguiríamos citar todas as pessoas aqui, mas o nosso muito obrigada a cada uma delas!

Primeiramente gostaríamos de agradecer em especial aos nossos pais, Mara, Artur, Marlene e Marcelo, que sempre nos incentivaram a conquistar nossos sonhos e nos ampararam nos momentos de dificuldade. Vocês sempre estiveram ao nosso lado, nos dando amor, suporte e encorajamento de maneira incondicional. Sua dedicação e sacrifícios ao longo desses anos foram fundamentais para que pudéssemos alcançar nossos objetivos. Somos imensamente gratas por todo o amor e apoio que nos deram.

E aos nossos queridos irmãos, Alice, Iago e Marcella, que desde pequenos nos ensinam a importância de compartilhar e do companheirismo. Agradecemos por serem nossos amigos e nossa inspiração. Seus constantes incentivos durante todo o percurso acadêmico foram fundamentais para superar desafios e persistir. Vocês são pessoas incríveis, e somos gratas por tê-los ao nosso lado.

Não podemos deixar de mencionar nossos amigos, que passaram a ser nossa segunda família. Nosso muito obrigada por tantas vezes nos consolarem depois de uma prova difícil, nos ajudarem a não perdermos a confiança em nós mesmas, e compartilharam tantos momentos de alegrias, seja eles em chopadas ou por passarmos naquela matéria difícil, e vibrarem juntos a cada conquista. Em especial a Vivian, Thays, Luciana, Maria Clara, Izabella, João, Henrique, Ana, Aymés, Victor, João Carlos, Raíssa, Elisa, Julia e Gustavo, que sempre estiveram lá, e nos ajudaram a ter um pouco de leveza até nos dias mais pesados, sendo essenciais para nosso equilíbrio emocional, nosso muito obrigada por todos esses anos! Levamos essas amizades conosco para o resto da vida.

Ao nosso ex companheiro de trabalho, Pedro, que acabou se tornando um grande amigo, muito obrigada por todo incentivo dado para conclusão desse trabalho.

Aos nossos namorados Diogo e Bruno, por todo o amor, e por todo apoio, paciência, compreensão e companheirismo nessa reta final, nosso muito obrigada! Vocês estiveram ao nosso lado em cada momento de incerteza, encorajando-nos a persistir e nos dando forças para

enfrentar os obstáculos. A presença de vocês fez desta jornada uma experiência ainda mais especial.

Não podemos deixar de agradecer ao professor orientador, Ricardo, por toda paciência, disponibilidade e atenção durante todo esse processo, e também por não ter desistido de nós. Sabemos que o trajeto foi longo, mas você confiou que seria concluído com êxito em todos os momentos. Seu comprometimento em nos ajudar a desenvolver e aprimorar nosso trabalho foi essencial. Nosso mais profundo obrigada por toda colaboração e orientação valiosa, conhecimento e dedicação.

Também gostaríamos de agradecer a banca examinadora, assim como a todos os outros professores da UFRJ que cruzaram nossos caminhos. Seus conhecimentos, orientações e desafios contribuíram significativamente para nossa formação acadêmica e crescimento pessoal. Somos gratas pela oportunidade de aprender com vocês e levar seus ensinamentos adiante.

Gostaríamos de expressar nossa gratidão à equipe de produção da empresa onde foram conduzidas as análises desse trabalho, Arthur, Fábio e Rafael, por toda paciência, ajuda e parceria durante a condução dos experimentos. Sua disposição para colaborar com nossas atividades foi de extrema importância para o desenvolvimento do trabalho. Muito obrigada!

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a nossa jornada acadêmica e profissional, nosso mais sincero agradecimento. Agradecemos por termos pessoas tão incríveis ao nosso redor, que nos apoiaram incondicionalmente e tornaram esta conquista possível. Agradecemos por acreditarem em nós e por fazerem parte da nossa trajetória.

Por fim, queríamos agradecer a todos os profissionais que atuaram, atuam e irão atuar dentro da UFRJ, desde os terceirizados até ao reitor. A faculdade existe, e resiste, também graças a cada um de vocês. Ter tido a oportunidade de fazer parte do corpo discente de uma das maiores faculdades do Brasil nos enche de orgulho! Acreditamos muito no poder transformador da educação, portanto, nosso muito obrigada a cada profissional que torna possível que esse poder seja propagado!

*“A distância mais curta entre dois pontos pode ser a linha reta,  
mas é nos caminhos curvos que se encontram as melhores coisas da vida.”*

- Lygia Fagundes Telles

## RESUMO

CAMPOS, Livia Barreto Arruda; VASCONCELLOS, Raianne da Costa; **Avaliação de Desempenho do Túnel Pasteurizador de uma Cervejaria Artesanal**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos e Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Desde a invenção da cerveja, seu processo produtivo vem sendo aprimorado. Com o avanço industrial a fabricação da cerveja foi ganhando escala e, com desenvolvimento de novos métodos e conceitos científicos, foi possibilitada a obtenção de um produto com uma maior qualidade e estabilidade. Um grande marco deve-se à descoberta de Louis Pasteur, que criou o processo de pasteurização, que consiste basicamente em aquecer o alimento a uma determinada temperatura por determinado tempo e, posteriormente, promover seu resfriamento. Como o processo de pasteurização é específico para cada tipo de alimento, devido à complexidade singular de cada um, é necessário que todos os parâmetros envolvidos no processo estejam estimados adequadamente. No intuito de verificar se o túnel pasteurizador de uma fábrica de cerveja artesanal estava realizando uma pasteurização eficaz, foram realizados testes para a determinação de Unidades de Pasteurização (UP) que a cerveja obtinha durante o processo. Para isso foram realizadas três análises, utilizando-se a equação geral da pasteurização, empregando valores de temperatura e tempo do *set point* do sistema, valores medidos pelo sistema e valores obtidos com o auxílio de um *Data Logger*. A partir dos resultados obtidos observou-se que o túnel utilizado pela fábrica aparenta não estar com seus valores de *set point* definidos adequadamente para atingir a UP desejada. Além disso, notou-se que a vazão de entrada no pasteurizador não era constante, fazendo com que o equipamento não operasse de maneira consistente e ocorressem variações na pasteurização entre lotes. Observou-se, também, que seus sensores de medição de temperatura poderiam estar apresentando falhas, já que a partir dos dados coletados pelo *Data Logger* foi possível identificar temperaturas superiores às indicadas pelo sistema do pasteurizador. De posse desse cenário, recomenda-se fazer uma inspeção e manutenção do pasteurizador utilizado pela fábrica, a fim de certificar que o processo seja controlado adequadamente. Além disso, é importante garantir que a vazão de entrada utilizada seja a ideal para o processo, promovendo assim uma pasteurização eficiente, resultando em cervejas que possuam padronização nesta etapa da operação.

**Palavras-chave:** determinação de UP; pasteurização; cerveja artesanal; túnel pasteurizador.

## ABSTRACT

CAMPOS, Livia Barreto Arruda; VASCONCELLOS, Raianne da Costa; **Avaliação de Desempenho do Túnel Pasteurizador de uma Cervejaria Artesanal**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos e Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Since the invention of beer, which is estimated to have happened around 8.000 years B.C., its production process has been improved. With the industrial advance, beer production has gained scale, and with the development of new methods and scientific concepts, it became possible to obtain a product with greater quality and stability. A major milestone is due to the Louis Pasteur's discovery, who created the pasteurization process, which basically consists in heating food to a certain temperature for a certain amount of time, and subsequently promoting its cooling. As the pasteurization process is specific for each type of food, due to the unique complexity of each one, it is necessary that all the parameters involved in the process are properly estimated. In order to verify if the pasteurizer tunnel of a craft brewery was performing an effective pasteurization, tests were conducted to determine the Pasteurization Units (PU) that the beer gained through the process. To do this, three analyzes were carried out, using the general pasteurization equation, employing temperature and time values from the system set point, values measured by the system and values obtained with the help of a Data Logger. From the results obtained, it was observed that the tunnel used by the factory does not seem to have its set point values set properly to achieve the desired PU. In addition, it was noted that the inflow into the pasteurizer was not constant, causing the equipment to not operate consistently and variations in pasteurization occurred between batches. It was also observed that its temperature measurement sensors could be faulty, since from the data collected by the Data Logger it was possible to identify higher temperatures than those indicated by the pasteurizer system. Given this scenario, it is recommended to perform an inspection and maintenance of the pasteurizer used by the factory, in order to certify that the process is properly controlled. In addition, it is important to ensure that the flow used is ideal for the process, thus promoting an efficient pasteurization, resulting in beers that have standardization in this stage of the operation.

**Keywords:** PU determination; pasteurization; craft beer; pasteurizer tunnel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malte com diferentes tipos de torra .....	20
Figura 2 - Lúpulo <i>in natura</i> .....	21
Figura 3 - Levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> seca utilizada na fabricação de cerveja .....	22
Figura 4 - Representação básica do processo produtivo da cerveja .....	23
Figura 5 - Curva de Sobrevivência Térmica.....	31
Figura 6 - Curva de Resistência Térmica .....	33
Figura 7 – Representação esquemática do pasteurizador tipo Gasquet (vista lateral).....	37
Figura 8 - Representação esquemática do pasteurizador tipo Americano .....	37
Figura 9 – Exemplo de túnel pasteurizador .....	38
Figura 10 - Curva das zonas de um túnel pasteurizador, considerando uma receita para 16UP .....	39
Figura 11 - Esquema dos mecanismos de transferência de calor apresentando a convecção forçada externa (A), a condução no vidro (B) e a convecção natural (C) .....	41
Figura 12 – <i>Data Logger</i> modelo HOBO U12-015 utilizado nos experimentos .....	42
Figura 13 - Captura de tela do Software de Análise de Dados HOBOWare após finalização das medidas .....	43
Figura 14 - Esquema de distribuição dos tanques e suas respectivas zonas.....	44
Figura 15 - Túnel pasteurizador.....	44
Figura 16 - Painel de controle do túnel pasteurizador .....	45
Figura 17 - Termômetro utilizado para medição de temperatura dos banhos .....	46
Figura 18 - <i>Data Logger</i> preso ao vasilhame para leitura das temperaturas de banho.....	47
Figura 19 – Envasadora (à esquerda) e entrada do túnel pasteurizador (à direita).....	48
Figura 20 - Planilha em Excel fornecida pelo fabricante do <i>Data Logger</i> .....	49
Figura 21 - Gráfico de tempo x temperatura do teste do tempo de resposta do Data Logger ..	50
Figura 22 – Gráfico de tempo por temperatura do teste 6 .....	54
Figura 23 - Gráfico de tempo por temperatura do teste 2.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo de resposta do <i>Data Logger</i> .....	51
Tabela 2 - Duração dos testes para avaliação do tempo de residência por zona .....	52
Tabela 3 – Resultado Teste-t de Student .....	53
Tabela 4 - Média do tempo de residência em cada zona e seu desvio padrão.....	55
Tabela 5 – Dados utilizados no teste ANOVA.....	56
Tabela 6 – Resultado do teste ANOVA.....	56
Tabela 7 – Dados de <i>set point</i> para determinação da UP .....	57
Tabela 8 - Ganho de UP para os valores de <i>set point</i> do túnel pasteurizador .....	57
Tabela 9 – Dados de tempo e temperatura para cada teste .....	58
Tabela 10 - Ganho de UP para os valores de temperatura medidos pelo sistema e para o tempo total de passagem em cada teste, média de UP e desvio padrão .....	58
Tabela 11 - Ganho de UP para os valores de tempo e temperatura medidos pelo <i>Data Logger</i> .....	59
Tabela 12 - Valores máximos de temperatura obtidos pelo <i>Data Logger</i> na zona de pasteurização para cada teste e suas relações com o valor de <i>set point</i> .....	59
Tabela 13 - Resultados da determinação do ganho de UP .....	60

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

UP	Unidades de Pasteurização
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CS	Cold Spot

## LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número de micro-organismos vivos
t	Tempo (s ou min)
$K_D$	Constante de morte térmica ( $s^{-1}$ )
$N_0$	Número inicial de micro-organismos
$t_0$	tempo inicial (s ou min)
D	Tempo de redução decimal ( $s^{-1}$ )
$K_\infty$	Fator pré exponencial ( $s^{-1}$ )
$E_a$	Energia de ativação (KJ)
R	Constante universal do gases (J/mol.K)
T	Temperatura ( $^{\circ}C$ ou K)
$D_\infty$	Fator pré exponencial ( $s^{-1}$ )
z	Fator z ( $^{\circ}C$ , $^{\circ}F$ ou K)
$T_{REF}$	Temperatura de referência inicial ( $^{\circ}C$ , $^{\circ}F$ ou K)
$D_{REF}$	Tempo de redução à décima parte do valor inicial ( $s^{-1}$ )
L	Índice de letalidade do processo térmico
$T_{CS}$	Temperatura no <i>cold spot</i> ( $^{\circ}C$ )
$T_Q$	Temperatura do banho de água quente ( $^{\circ}C$ )
$T_F$	Temperatura do banho de água fria ( $^{\circ}C$ )
$T_{SP}$	Temperatura do <i>set point</i> ( $^{\circ}C$ )

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. História da Cerveja.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Matérias-primas da cerveja .....</b>	<b>19</b>
2.2.1. Água .....	19
2.2.2. Malte.....	20
2.2.3. Lúpulo.....	20
2.2.4. Levedura .....	21
<b>2.3. Processo produtivo da cerveja .....</b>	<b>22</b>
2.3.1. Moagem.....	23
2.3.2. Mosturação .....	24
2.3.3. Filtração .....	24
2.3.4. Fervura e resfriamento.....	24
2.3.5. Fermentação.....	24
2.3.6. Maturação .....	25
2.3.7. Envase.....	25
2.3.8. Processo de pasteurização da cerveja .....	25
<b>2.4. A pasteurização no processo cervejeiro .....</b>	<b>26</b>
2.4.1. Principais fatores que influenciam na pasteurização .....	26
2.4.2. Consequências de uma má pasteurização .....	27
2.4.3. Principais micro-organismos a serem inativados pela pasteurização.....	27
2.4.4. Resistência e cinética da morte térmica dos micro-organismos .....	28
2.4.5. Curva de sobrevivência .....	30
2.4.6. Relação entre a Constante de Morte Térmica e a Temperatura.....	31
2.4.7. Curva de Resistência Térmica .....	33
2.4.8. Definição das Unidades de Pasteurização na Produção de Cerveja .....	34
<b>2.5. Tipos de pasteurizadores.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6. Transferência de calor na pasteurização .....</b>	<b>38</b>
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1. Materiais .....</b>	<b>42</b>
3.1.1. Data Logger .....	42
3.1.2. Túnel Pasteurizador .....	44
<b>3.2. Métodos.....</b>	<b>45</b>

3.2.1.	Determinação do tempo de resposta do <i>Data Logger</i> .....	45
3.2.2.	Determinação do tempo de residência do vasilhame por zona.....	46
3.2.3.	Avaliação do perfil de temperatura da cerveja – determinação da UP.....	48
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1.	Tempo de resposta do <i>Data Logger</i> .....	50
4.2.	Influência da posição de entrada do vasilhame no tempo de permanência no pasteurizador.....	52
4.3.	Determinação do tempo de residência do vasilhame por zona.....	53
4.4.	Avaliação do perfil de temperatura da cerveja – determinação da UP.....	56
4.4.1.	Determinação de UP – dados de <i>set point</i> .....	56
4.4.2.	Determinação de UP – dados do painel de controle do pasteurizador .....	57
4.4.3.	Determinação de UP – dados do <i>Data Logger</i> .....	58
4.5.	Avaliação do processo de pasteurização .....	60
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>63</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>
<b>APENDICE A – Gráficos dos testes para avaliação das temperaturas das zonas do pasteurizador .....</b>		<b>67</b>
<b>APENDICE B – Gráficos para determinação dos patamares para o cálculo dos tamanhos das zonas do pasteurizador, com o vasilhame entrando pelo lado direito.....</b>		<b>71</b>
<b>APENDICE C – Tabelas dos resultados dos testes de determinação de UP, calculados a partir dos dados de temperatura medidos pelo sistema do pasteurizador e tempos de duração do processo .....</b>		<b>74</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A pasteurização de alimentos foi desenvolvida pelo químico francês Louis Pasteur, em 1862. Esse processo possui uma teoria simples e consiste, basicamente, em aquecer o alimento por um determinado intervalo de tempo e, na sequência, promover seu resfriamento (ARROIO, 2009). Dessa forma, o processo da pasteurização na indústria cervejeira é amplamente utilizado a fim de promover a redução de agentes deteriorantes da cerveja, buscando garantir um produto estável e aumentar sua vida de prateleira.

Com o avanço industrial foi gerando-se a necessidade de aumentar a escala de processo, visando uma otimização e possibilitando que maiores volumes fossem pasteurizados ao mesmo tempo, sem perder a qualidade dessa etapa da produção. Dessa forma foi percebendo-se que por mais que o processo consista em etapas simples, vários fatores influenciavam nos valores de temperatura e tempo empregados (LEWICKI, WALCZAK e GOSS, 1983). Alguns desses fatores são: a matriz do alimento a ser pasteurizado; se o produto será pasteurizado envazado e em qual tipo de vasilhame estará contido; o micro-organismo principal a ser inativado; entre outros. Percebeu-se, também, que o processo de pasteurização é específico para cada tipo de alimento, justamente por conta dos fatores citados.

A forma mais comum de garantir que a pasteurização esteja adequada ao processo é a verificação de que o alimento não perca suas características organolépticas desejadas, o que geralmente é garantido através da realização de uma análise sensorial, e que os micro-organismos que são alvos sejam devidamente inativados. Sendo assim, é um objetivo da indústria otimizar o tratamento térmico, de modo a reduzir as perdas sensoriais, garantindo a segurança microbiológica do alimento (BRIGGS, BOULTON, *et al.*, 2004).

Para que ocorra a devida inativação microbiana, é necessário obedecer ao índice de letalidade do processo térmico, que é específico para cada micro-organismo e para cada temperatura empregada. No caso de bebidas, na literatura encontra-se o termo Unidade de Pasteurização (UP), que relaciona esse índice de letalidade com a variação das temperaturas utilizadas e com o tempo de exposição (BUZRUL, 2006).

Ao longo da história diversos equipamentos foram desenvolvidos, até chegarmos no tipo mais empregado atualmente na indústria cervejeira, que são os túneis pasteurizadores. Estes promovem a pasteurização do produto já envasado e de forma contínua, estando-se acoplado à envasadora. Visto que o processo de pasteurização depende da aplicação correta de diversos parâmetros, este trabalho teve como objetivo principal, a partir da determinação de UP, avaliar

a eficiência de um túnel pasteurizador contínuo de uma cervejaria artesanal, localizada em Três Rios, no Rio de Janeiro.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. História da Cerveja**

Sendo uma das bebidas alcoólicas mais antigas do mundo, a cerveja está presente na alimentação e na cultura de diversos povos (MORADO, 2009). Mesmo não tendo conhecimento de suas origens, estima-se que as primeiras cervejas foram produzidas na Suméria, Babilônia e Egito a 8000 a.C. (AQUARONE, BORZANI, *et al.*, 2001). Acredita-se que a cerveja conseguiu ser muito disseminada pelo mundo por conta do seu alto valor nutritivo e pelo fato de existirem inúmeras variedades de receitas, alterando sabor, textura, amargor e aroma, tornando-a uma bebida dinâmica e até mesmo sagrada em alguns ritos e religiões (MORADO, 2009).

Na idade média, a cerveja foi sendo aprimorada principalmente nos mosteiros, pois eram locais de desenvolvimento e preservação de conhecimento e técnicas. Por seu trabalho e dedicação, além do fato de serem alfabetizados, os religiosos tornaram-se importantes pesquisadores de cerveja, tendo evoluído seu método de fabricação e introduzido a ideia de conservação a frio da bebida. Com a Revolução Industrial, a produção de cerveja foi ganhando escala, a partir do estabelecimento de fábricas cada vez maiores e processos mais complexos (AQUARONE, BORZANI, *et al.*, 2001).

Em meados do século XIX, novos métodos e conceitos científicos foram introduzidos na fabricação de cerveja, o que possibilitou a obtenção de um produto com uma maior qualidade e estabilidade. Um desses avanços se deve a Louis Pasteur, que descobriu a ação dos microorganismos responsáveis pela deterioração da bebida, que podiam ser encontrados tanto na linha de produção como na água e no ar. Com essa descoberta, limpeza e higiene tornaram-se fundamentais na indústria cervejeira (CARVALHO, 2009).

No Brasil, a cerveja foi trazida pela Companhia das Índias Orientais no século XVII, porém só com a abertura dos portos e com a chegada de novos imigrantes no século XIX a produção de cerveja artesanal começou a ganhar mais força. Nesse início, a produção tinha muitas dificuldades, principalmente em relação à refrigeração por se tratar de um país tropical. Além disso, a escassez de matérias-primas e a falta de controle dos processos também fizeram com que a produção de cerveja no Brasil demorasse mais a se desenvolver (MORADO, 2009).

No início do século XX, algumas microcervejarias começaram a surgir, sendo impulsionadas pela industrialização. Já no final deste mesmo século, a cultura da cerveja se tornou mais forte em todo o mundo, impactando, conseqüentemente, a indústria cervejeira brasileira. Cervejarias se proliferaram pelo país, consolidando a indústria e o mercado nacional,

de modo que em 2010 o Brasil se tornou o terceiro maior fabricante mundial de cerveja (SINDICERV, 2020), permanecendo nesta posição até os dias de hoje (GONÇALVES, 2022).

## **2.2. Matérias-primas da cerveja**

No Brasil, a cerveja é definida como sendo a bebida obtida pela fermentação alcoólica de mosto oriundo de malte de cevada e água potável, por ação de levedura com adição de lúpulo (BRASIL, 2009). A cerveja é constituída de cerca de 90% de água, tornando este o principal ingrediente na fabricação do produto. O malte, é obtido através da germinação de cereais, que posteriormente são secos e torrados, de acordo com o tipo de cerveja que está sendo produzido. Esses diferentes tipos de maltes influenciam diretamente no tipo de cerveja que irá se obter (MORADO, 2009).

O lúpulo tem como principal função equilibrar o gosto adocicado do malte da cevada, conferir amargor e aroma, além de atuar como conservante. Já as leveduras, são os micro-organismos responsáveis pela fermentação, ou seja, a quebra dos açúcares provenientes do malte, em álcool e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (MORADO, 2009).

Existem diversos tipos de leveduras. As mais comuns para a fabricação da cerveja dividem-se em dois grandes grupos, as leveduras de alta fermentação, chamadas de Ales (*Saccharomyces cerevisiae*), e as leveduras de baixa fermentação, chamadas de Lagers (*Saccharomyces pastorianus*). As leveduras além de serem responsáveis por transformar os açúcares em álcool e dióxido de carbono, também conferem aromas e sabores à cerveja, de acordo com o tipo utilizado (MORADO, 2009).

Além desses dois principais grupos, existe a cerveja do tipo Lambic. Para a produção deste tipo, o fermentador fica com sua parte superior aberta e os fungos presentes no ambiente realizam a fermentação, por isso é chamada de fermentação selvagem ou espontânea (MORADO, 2009).

### **2.2.1. Água**

A água é o principal ingrediente da cerveja. Para o processo cervejeiro, a água deve ser insípida, inodora e o seu pH deve estar entre 6,5 e 8, permitindo a ação das enzimas do malte (MATOS, 2011). Ainda deve ser livre de turbidez, apresentar alcalinidade preferencialmente inferior a 25 mg/L e possuir concentração de cálcio aproximada de 50 mg/L (KUNZE, 2004).

### 2.2.2. Malte

O malte (Figura 1) é obtido a partir de germinação de cereais sob determinadas condições de temperatura, aeração e umidade, sendo uma etapa de extrema importância para a qualidade da cerveja. Os maltes mais utilizados na produção da cerveja são os de trigo e cevada, sendo que a sua composição é responsável pelo sabor e a cor do produto final (MORADO, 2009).

**Figura 1 - Malte com diferentes tipos de torra**



Fonte: (CLUBE DO MALTE, 2021)

O processo de malteação é realizado em quatro etapas, sendo elas (EBLINGER, 2009):

- Maceração: nesta fase o grão é umidificado, possibilitando o início do processo de desenvolvimento do embrião;
- Germinação: nesta etapa, o grão sofre a germinação propriamente dita, que possibilita a formação de enzimas e modifica a estrutura do amido;
- Secagem: quando o grão atinge o ponto desejado, a secagem é a etapa que interrompe o processo de germinação. Secagem com temperaturas mais amenas resultam em maltes mais claros. Já os maltes mais escuros são expostos a tostadores com temperaturas mais altas;
- Crivagem: por fim, o malte passa pela crivagem onde é separado de raízes que são formadas na etapa de germinação.

### 2.2.3. Lúpulo

O lúpulo, classificado como *Humulus lupulus*, é uma planta trepadeira, na qual suas flores são usadas para a fabricação da cerveja, seja *in natura* ou na forma de extrato (Figura 2). O lúpulo tem papel fundamental na conservação da bebida, uma vez que alguns de seus componentes possuem ações bacteriostáticas, inibindo o crescimento de bactérias (EBLINGER, 2009).

**Figura 2 - Lúpulo *in natura***



Fonte: (SIQUEIRA)

O lúpulo é o último componente a ser dosado no mosto. Algumas espécies apresentam o amargor como característica predominante e outros apresentam aromas mais destacados. É responsabilidade do cervejeiro fazer o *blend* dos diferentes lúpulos para formar o perfil desejado da cerveja (KUNZE, 2004).

#### 2.2.4. Levedura

As leveduras são micro-organismos unicelulares, estando distribuídas em mais de 600 espécies (AQUARONE, BORZANI, *et al.*, 2001). Esses seres vivos são classificados como fungos microscópicos, que convertem o açúcar em álcool, dióxido de carbono e outros compostos que influenciam o sabor de alimentos e de bebidas fermentadas.

Na indústria cervejeira as leveduras utilizadas são do gênero *Saccharomyces*, sendo *Saccharomyces cerevisiae* e *Saccharomyces pastorianus* as principais espécies. As *Saccharomyces cerevisiae* (Figura 3) são conhecidas por fermentarem na superfície do tanque e em temperaturas mais elevadas, em torno de 15° a 25° C. Essas leveduras de alta fermentação produzem majoritariamente cervejas mais alcoólicas e densas, conhecidas como Ales. Já *Saccharomyces pastorianus*, floculam no fundo do fermentador e trabalham em temperaturas mais baixas, entre 7° e 15° C. Essa espécie de levedura resulta em cervejas mais leves, neutras e com mais espuma, conhecidas como Lagers. Para a fermentação alcoólica é necessário aproximadamente 5 a 15 milhões de células de levedura por mililitro de mosto (AQUARONE, BORZANI, *et al.*, 2001).

**Figura 3 - Levedura *Saccharomyces cerevisiae* seca utilizada na fabricação de cerveja**



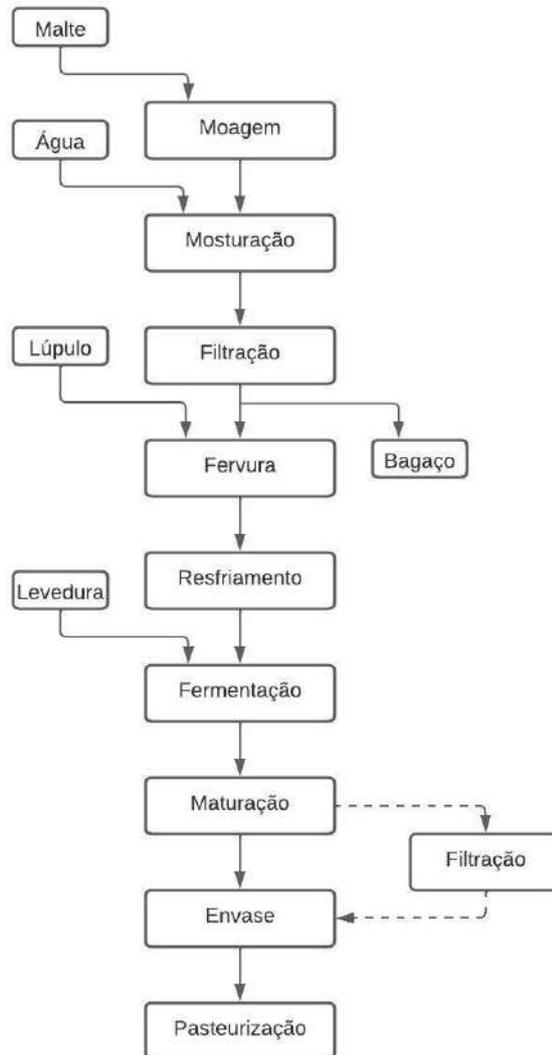
Fonte: (BELEZA DA TERRA PRODUTOS NATURAIS LTDA)

Como todo micro-organismo, seu crescimento e reprodução são favorecidos por alguns fatores como temperatura, pH, umidade, quantidade de oxigênio no meio e a qualidade do substrato. Esses fatores variam para cada espécie de levedura, exigindo condições específicas para melhor crescimento. É de extrema importância que a cultura de levedura seja a mais pura possível, ou seja, isenta de leveduras “selvagens” e de micro-organismos contaminantes. Por isso, a assepsia das linhas em uma unidade de produção de cerveja é fundamental para evitar contaminações e mudança no perfil da cerveja (MORADO, 2009).

### **2.3. Processo produtivo da cerveja**

Atualmente existem diversos tipos de processos para a produção de cerveja, pois estes podem variar de acordo com o estilo da bebida a ser produzida. Isso faz com que algumas condições como rampa de temperatura, tempo de maturação e fermentação, insumos, entre outras sejam alteradas. Porém, o processo básico consiste nas seguintes etapas: moagem do malte, mosturação, filtração, fervura, tratamento do mosto, fermentação, maturação, clarificação, pasteurização e, por fim, o envase (Figura 4).

**Figura 4 - Representação básica do processo produtivo da cerveja**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

### 2.3.1. Moagem

A moagem é a primeira etapa a ser realizada e tem como objetivo quebrar os grãos de malte liberando o amido, a fim de obter partículas menores do grão para que enzimas atuem na brassagem, que é a etapa de mosturação do processo. A moagem ideal é aquela em que o endosperma é exposto e quebrado, mantendo as cascas inteiras. Essas cascas devem ser preservadas, pois serão utilizadas como camada filtrante no processo de filtração do mosto (ARAÚJO, 2016).

### 2.3.2. Mosturação

O malte e os adjuntos são misturados com água quente para conseguir realizar a hidrólise das proteínas e amido a partir da ação de enzimas que foram desenvolvidas durante a malteação da cevada. A mistura é feita em um tanque chamado tanque de mosturação, onde, sob condições específicas de temperatura e agitação, os grãos de amido absorvem água, incham e liberam amilose e amilopectina para depois permitir a ação das enzimas. As enzimas mais importantes são as amilases, que atuam na quebra do amido para produzir açúcares, e as proteases, que decompõem as proteínas em compostos simples que são necessários para a atividade metabólica da levedura, fornecendo corpo à cerveja e estabilidade à espuma (KUNZE, 2004).

### 2.3.3. Filtração

Na terceira etapa é realizada a filtração, processo que consiste em separar o mosto do bagaço do malte. Em cervejarias de grande porte, a filtração é realizada em filtros de placas. Já em cervejarias de menor escala é realizado no próprio tanque de mosturação. Após encerrar a filtração do mosto primário, é adicionada água ao bagaço do malte, a fim de extrair amidos que ainda estejam depositados nas cascas, obtendo-se o mosto secundário (MORADO, 2009).

### 2.3.4. Fervura e resfriamento

Após a filtração, ocorre o aquecimento do mosto em uma caldeira de fervura a aproximadamente 100° C, ocorrendo inativação das enzimas, esterilização do mosto, coagulação e precipitação das proteínas e formação de compostos responsáveis pela cor e sabor do produto.

Terminada a fervura, ocorre a clarificação ou separação dos resíduos provenientes da adição de lúpulo e aglutinação de proteínas após a fervura. Esse processo ocorre na tina de clarificação. O mosto clarificado é resfriado em trocadores de calor até a temperatura de fermentação, que pode variar de acordo com o tipo de levedura utilizada (AQUARONE, BORZANI, *et al.*, 2001).

### 2.3.5. Fermentação

O mosto, após passar pelo processo de resfriamento, é transferido para um fermentador de aço inoxidável, previamente sanitizado e com uma saída de CO<sub>2</sub> que não permita a entrada de oxigênio. A fermentação da cerveja consiste na inoculação da levedura no mosto resfriado, a qual age sobre os açúcares transformando-os em álcool e dióxido de carbono. Os processos

de fermentação são específicos para cada tipo de cerveja e devem ser levados em conta alguns fatores como temperatura, tempo de processo, tipo e quantidade de levedura. A formação de diacetil, quantidade de álcool gerado e o fim da produção de CO<sub>2</sub> indicam o término da fermentação e início da maturação (ARAÚJO, 2016).

#### 2.3.6. Maturação

Durante a maturação ocorre a sedimentação das leveduras e precipitação de proteínas e outras partículas em suspensão, promovendo a redução da concentração de diacetil, acetaldeído e ácido sulfídrico, além de clarificar e melhorar o sabor da cerveja. O objetivo da maturação é melhorar as características do sabor e aroma. Esta etapa é feita em baixas temperaturas, aproximadamente a 4°C, para promover a sedimentação das leveduras, proteínas e polifenóis e assim poder retirar esses compostos e obter uma cerveja clara. A duração da maturação depende do estilo de cerveja a ser produzido (ARAÚJO, 2016).

Após a maturação, a cerveja pode passar por uma segunda filtração com o objetivo de remover quase que totalmente as leveduras e partículas ainda presentes na cerveja (MORADO, 2009). Esse processo pode ocorrer ou não, dependendo do tipo de cerveja que se deseja obter.

#### 2.3.7. Envase

A etapa de envase deve ser extremamente controlada, pois a cerveja sai do recipiente, que é um ambiente controlado onde foi processada, e é exposta ao ambiente externo. É de fundamental importância a assepsia das instalações e dos vasilhames para assegurar a qualidade e a estabilidade da cerveja, dado que é uma bebida muito sensível, sujeita à deterioração rápida. Com o desenvolvimento dos sistemas avançados de refrigeração e processos de pasteurização, a cerveja depois de envasada torna-se mais estável, permitindo assim sua distribuição para lugares distantes da cervejaria (MORADO, 2009).

#### 2.3.8. Processo de pasteurização da cerveja

O processo de pasteurização da cerveja consiste no aquecimento da bebida em torno de 60°C, por um determinado período de tempo. Essa técnica tem como principal finalidade desativar ou até mesmo eliminar a ação de micro-organismos que poderiam alterar suas características sensoriais, proporcionando estabilidade microbiológica e, conseqüentemente, prolongando a vida útil do produto, sem alterar profundamente suas propriedades (MORADO, 2009).

A fim de dimensionar o efeito do processo de pasteurização, diversos estudos foram realizados sobre a relação entre a temperatura e o tempo em que o produto está sendo submetido. Originou-se assim o termo Unidade de Pasteurização (UP), sendo definido como o valor unitário do resultado de uma pasteurização de 1 minuto a uma temperatura de 60° C. Esse conceito será tratado mais profundamente ao longo desse trabalho.

No processo de pasteurização da cerveja não é recomendável a utilização de temperaturas muito elevadas, pois corre-se o risco de desenvolver características sensoriais indesejáveis, conhecidos como *off-flavors*. No entanto, quanto menos elevada a temperatura de pasteurização, maior o risco de sobrevivência dos micro-organismos indesejáveis (KUNZE, 2004).

## **2.4. A pasteurização no processo cervejeiro**

### **2.4.1. Principais fatores que influenciam na pasteurização**

Para que a pasteurização ocorra de maneira eficiente, é necessário analisar diversos aspectos que influenciam diretamente este processo. O tipo de cerveja a ser produzida, o tipo de pasteurizador em que esse processo irá ocorrer e até mesmo o modelo de vasilhame escolhido são exemplos de fatores que devem ser levados em consideração ao avaliar essa etapa do processo produtivo.

Para cervejas com uma maior concentração de lúpulo, é comum que se utilize uma quantidade menor de UP no processo de pasteurização. Isso porque o lúpulo pode ser considerado um conservante natural, pois possui alfa-ácidos, que conferem uma ação bacteriostática contra bactérias gram-positivas e gram-negativas (EBLINGER, 2009). Além disso, cervejas que tem a adição de lúpulo ao final do processo de produção, o chamado *Dry Hop*, são cervejas mais aromáticas. Ao submeter esse tipo de cerveja ao processo de pasteurização, é comum que se perca significativamente essa característica sensorial (BRIGGS, BOULTON, *et al.*, 2004). Para que o aroma e o frescor do produto sejam mantidos, o fabricante pode optar por uma pasteurização mais branda, certificando-se que os micro-organismos indesejáveis serão devidamente inativados. Isso geralmente ocorre em indústrias de cervejas artesanais de pequena ou média escala de produção, onde o produto não terá uma vida útil tão longa quanto as demais cervejas produzidas em larga escala.

Um fator importante para a determinação da temperatura e tempo de permanência no pasteurizador é a velocidade de penetração do calor das extremidades até o centro do vasilhame.

Esta é influenciada não só pelas dimensões e propriedades térmicas do vasilhame, mas também pela composição da cerveja (BRIGGS, BOULTON, *et al.*, 2004).

Com o levantamento desses fatores, pode-se definir a temperatura e o tempo de exposição do produto no pasteurizador, certificando-se que, ao final do processo, terá uma pasteurização eficaz, ou seja, os micro-organismos em questão serão inativados de maneira que a vida útil do produto terá sido estendida, com o menor impacto possível nas suas características sensoriais.

#### 2.4.2. Consequências de uma má pasteurização

Quando não se atinge o ganho de UP necessário para que se garanta a inativação ou eliminação dos micro-organismos, diz-se que o produto sofreu uma subpasteurização. Entretanto, quando a temperatura de pasteurização aplicada for alta demais ou o vasilhame permanecer muito tempo na zona de pasteurização, ou seja, o produto ganhou mais UP do que o ideal, pode-se dizer que ocorreu uma superpasteurização.

Em processos em que ocorre uma subpasteurização, a cerveja tem a sua vida útil comprometida, por conta da permanência de micro-organismos deteriorantes no produto, ocasionando mudanças sensoriais como o aparecimento de *off flavors* (BRIGGS, BOULTON, *et al.*, 2004).

Durante a pasteurização, a cerveja sofre pequenas variações de sabor, aroma e cor, além de estar sujeita a alterações em suas estabilidades coloidais, dado que a bebida possui diversos tipos de proteínas em sua composição. Em alguns casos, são dosadas soluções estabilizantes para evitar a aglutinação dessas proteínas que possuem uma tendência natural à aglutinação. Contudo, superpasteurizações fazem com que o oxigênio que está incorporado no líquido promova reações químicas que quebram esta estabilidade. Além disso, uma cerveja superpasteurizada pode apresentar uma adstringência adicional ou até mesmo aromas de queimado ou caramelado, conhecido como “*bread-like-flavor*” (MORADO, 2009).

#### 2.4.3. Principais micro-organismos a serem inativados pela pasteurização

A cerveja é considerada um produto desfavorável à multiplicação de micro-organismos, devido a diversos fatores como: presença de etanol, um dos produtos de interesse da fermentação; utilizar lúpulo na sua fabricação, planta com propriedades bacteriostáticas; alta concentração de dióxido de carbono; possuir pH baixo e apresentar baixa concentração de oxigênio (DRAGONE, MUSSATTO, *et al.*, 2007).

Ainda que em condições desfavoráveis, alguns grupos de micro-organismos conseguem se multiplicar, causando alterações sensoriais indesejáveis que afetam negativamente a qualidade do produto final. Esses micro-organismos são chamados de deteriorantes da cerveja (SUZUKI, IJIMA, *et al.*, 2006).

Dentre esses micro-organismos existem bactérias gram-positivas, gram-negativas e leveduras selvagens. As bactérias gram-positivas ácido lácticas pertencentes aos gêneros *Lactobacillus* e *Pediococcus* são consideradas as mais perigosas na indústria da cerveja, pois são responsáveis por aproximadamente 70% dos incidentes de deterioração microbiológica. No grupo das bactérias gram-negativas tem-se o destaque dos gêneros *Pectinatus* e *Megasphaera*. As leveduras selvagens causam problemas menos sérios do que as bactérias. O grande malefício de sua presença é a discriminação, pois elas são facilmente confundidas com as leveduras utilizadas na fabricação da cerveja (SAKAMOTO e KONINGS, 2003).

As bactérias dos gêneros *Lactobacillus* e *Pediococcus* produzem diacetil, o que causa turbidez indesejada, tornam o produto mais ácido e conferem à cerveja um sabor amanteigado. As bactérias do gênero *Pectinatus* podem gerar acetaldeído, o que confere à cerveja um sabor característico de maçã verde, que se não for o desejado, é considerado um *off-flavor*. Já as bactérias do gênero *Megasphaera* podem conferir à cerveja um sabor característico de podre, devido à produção de sulfeto de hidrogênio, ácido butírico e outros ácidos graxos (BOULTON e QUAIN, 2001).

Dentro do grupo das leveduras selvagens o gênero *Saccharomyces* é considerado o mais perigoso, isso porque, por serem anaeróbicas facultativas, conseguem se reproduzir mesmo em meios com baixa concentração de oxigênio. Na indústria cervejeira a busca pela redução da concentração de oxigênio vem sendo amplamente almejada, por proporcionar a redução da oxidação do produto a longo prazo, o que favorece a reprodução de espécies anaeróbicas ou anaeróbicas facultativas. Dentro desse gênero existem espécies que produzem 4-vinil guaiacol, que conferem um aroma fenólico indesejável à cerveja (BOULTON e QUAIN, 2001).

#### 2.4.4. Resistência e cinética da morte térmica dos micro-organismos

A destruição dos micro-organismos durante a pasteurização ocorre pois, por ser um processo térmico, suas proteínas sofrem coagulação e ocorre a inativação dos sistemas enzimáticos, afetando diretamente o metabolismo das células. A esse processo dá-se o nome de desnaturação proteica (GAVA, 1998).

Os principais fatores que influenciam na duração de um processo térmico são a resistência dos micro-organismos deteriorantes e a velocidade de transferência de calor para o interior do vasilhame.

A resistência térmica dos micro-organismos é influenciada por uma série de fatores, sendo os principais (GAVA, 1998):

- Organismo: fatores como espécies de micro-organismos, número de células ou esporos, condições de crescimento e idade;

- Meio ambiente: composição e concentração do líquido, pois a presença de sais, açúcares e gorduras parecem oferecer uma melhor proteção térmica às células; pH do líquido a ser pasteurizado, pois é sabido que em pH abaixo de 4,5 a maioria das bactérias patogênicas não crescem, o que permite que o tratamento térmico possa ocorrer com temperaturas mais brandas;

- Natureza do calor: o calor úmido é um agente bactericida mais potente que o calor seco. Isso ocorre, pois, a morte dos micro-organismos através do calor seco se dá por um processo oxidativo, enquanto com o calor úmido a morte ocorre devido à desnaturação proteica, como citado anteriormente.

O binômio temperatura e tempo também é extremamente importante na hora de projetar o processo de pasteurização. De forma geral, o tempo necessário para destruir determinados micro-organismos e/ou seus esporos, sob uma mesma condição, diminui com o aumento da temperatura (GAVA, 1998).

A temperatura de 60°C aplicada por 15 minutos é amplamente utilizada como regra de relação ideal para pasteurização (DEL VECCHIO, DAYHARSH e BASELT, 1951). Embora a temperatura padrão utilizada no processo térmico da pasteurização seja considerada uma temperatura baixa, é aconselhável estudar o produto que será pasteurizado para sempre buscar aplicar os menores valores possíveis de temperatura, garantindo um processo mais eficiente, com menor gasto energético e com a menor alteração sensorial possível do produto (BUZRUL, 2006).

A morte de um micro-organismo é definida como a impossibilidade de reprodução. Existem diversas evidências que comprovam que a morte das bactérias segue uma escala logarítmica quando submetidas ao calor. Isso significa que se as condições térmicas são constantes, logo a mesma porcentagem de micro-organismos será destruída em um dado intervalo de tempo (GAVA, 1998).

#### 2.4.5. Curva de sobrevivência

Ao se traçar o gráfico onde na ordenada tem-se o número de células vivas remanescentes e na abscissa o tempo de aquecimento a uma temperatura constante, obtém-se a curva de morte térmica dos micro-organismos para essa temperatura. A literatura mostra que a cinética da morte térmica pode ser ajustada para uma equação diferencial de primeira ordem (Equação 1) (BUZRUL, 2006):

$$-\frac{dN}{dt} = K_D N \quad (1)$$

onde  $N$  é o número de micro-organismos vivos,  $t$  é o tempo de duração do processo e  $K_D$  é a constante de morte térmica de um dado organismo a uma dada temperatura.

Rearranjando os termos da Equação (1) e integrando ao longo do tempo obtém-se a Equação (4):

$$\frac{dN}{N} = -K_D dt \quad (2)$$

$$\int_{N=N_0}^{N=N} \frac{dN}{N} = - \int_{t=t_0}^{t=t} K_D dt \quad (3)$$

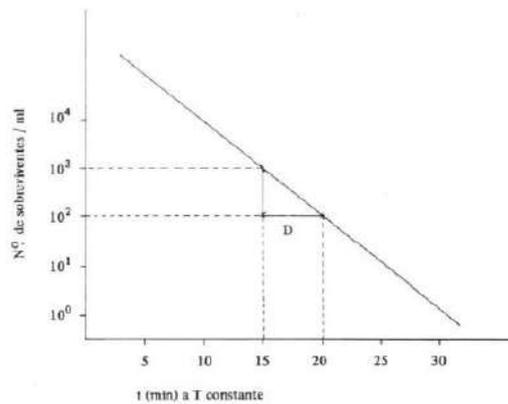
$$\ln \frac{N}{N_0} = -K_D(t - t_0) \quad (4)$$

onde  $N_0$  é o número inicial de micro-organismos presentes no meio. Reescrevendo a Equação (4), colocando-a em função de  $N$  e considerando  $t_0$  igual a zero, tem-se:

$$N = e^{-K_D t} N_0 \quad (5)$$

Por se tratar de uma destruição em ordem logarítmica, os pontos formam uma linha reta, cuja inclinação é chamada de tempo de redução decimal, comumente conhecida por  $D$  (Figura 5). O valor  $D$  pode ser definido como o tempo, em minutos, a uma dada temperatura, necessário para destruir 90% dos organismos de uma população inicial ou para reduzir uma população a um décimo do número original (GAVA, 1998).

**Figura 5 - Curva de Sobrevivência Térmica**



Fonte: (GAVA, 1998)

Mudando a Equação (4) de logaritmo natural para logaritmo decimal, obtém-se:

$$2,3 \log_{10} \frac{N}{N_0} = -K_D t \quad (6)$$

Fazendo  $t = D$  e  $N/N_0 = 0,1$ , conforme a definição do tempo de redução decimal, conclui-se que o valor  $D$  é inversamente proporcional à constante de morte térmica, tal qual definido na Equação (7).

$$D = \frac{2,3}{K_D} \quad (7)$$

#### 2.4.6. Relação entre a Constante de Morte Térmica e a Temperatura

É importante ressaltar que a constante de morte térmica ( $K_D$ ) depende dos fatores citados previamente, como características do meio, tipo de organismo, entre outros. Para um mesmo

produto e conjunto de micro-organismos, o fator  $K_D$  possui forte dependência com a temperatura. Assim, quando se varia a temperatura de processo, também se varia a curva de sobrevivência térmica, dado que em temperaturas maiores a velocidade de destruição tende a ser maior (CLARK, 2013).

Como a velocidade de destruição é maior com o aumento da temperatura, é esperado que a inclinação da curva de sobrevivência térmica também aumente. A relação matemática entre  $K_D$  e a dependência com a temperatura é dada pela equação de Arrhenius (CLARK, 2013), que relaciona a dependência da velocidade de reações químicas com a temperatura.

$$K_D = K_\infty e^{-Ea/RT} \quad (8)$$

Onde  $Ea$  é a energia de ativação da reação,  $R$  é a constante universal dos gases e  $K_\infty$  é um fator pré exponencial que inclui fatores como frequência de colisões das moléculas e outros. Seu valor pode ser medido em laboratório e possui unidade de  $s^{-1}$ . Aplicando o logaritmo natural na Equação (8), tem-se:

$$\ln K_D = \ln K_\infty - \ln \frac{Ea}{RT} \quad (9)$$

Como a inclinação da curva de sobrevivência térmica é dada pela Equação (7), pode-se reescrever a Equação (9) como:

$$\ln \left( \frac{2,3}{D} \right) = \ln \left( \frac{2,3}{D_\infty} \right) - \ln \frac{Ea}{RT} \quad (10)$$

$$\ln \frac{\left( \frac{2,3}{D} \right)}{\left( \frac{2,3}{D_\infty} \right)} = - \ln \frac{Ea}{RT} \quad (11)$$

onde  $D_\infty$  é o mesmo fator pré-exponencial, porém escrito de forma a ressaltar que a equação está baseada no tempo  $D$ . Aplicando o exponencial na Equação (11), obtém-se:

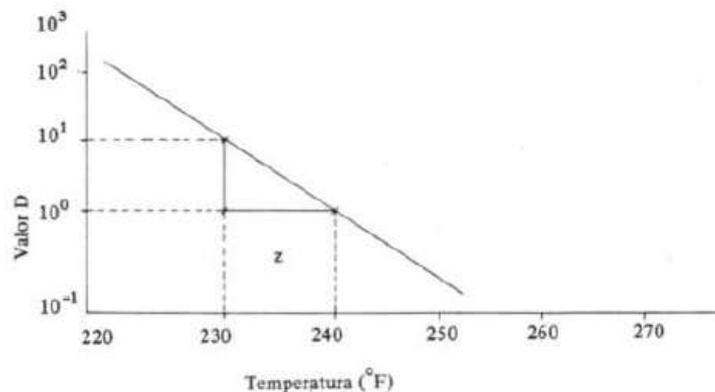
$$\frac{\left(\frac{2,3}{D}\right)}{\left(\frac{2,3}{D_{\infty}}\right)} = e^{\frac{-Ea}{RT}} \quad (12)$$

$$D = D_{\infty} e^{\frac{Ea}{RT}} \quad (13)$$

#### 2.4.7. Curva de Resistência Térmica

A curva de resistência térmica (Figura 6) apresenta a resistência relativa das bactérias a diferentes temperaturas letais. Ela é construída colocando-se na ordenada o logaritmo do tempo de redução decimal ( $D$ ), que é determinado para um micro-organismo em várias temperaturas letais, usando as mesmas condições e, na abscissa, a temperatura correspondente (GAVA, 1998).

**Figura 6 - Curva de Resistência Térmica**



Fonte: (GAVA, 1998)

O fator  $z$  representa o número de graus, na escala de temperatura que se esteja trabalhando, que a temperatura deve aumentar, em relação à temperatura de referência inicial ( $T_{REF}$ ), para que o tempo  $D$  se reduza à décima parte do valor inicial ( $D_{RED}$ ), ou seja, atravessasse um ciclo logarítmico, conforme representado pela Equação (14) (GAVA, 1998).

$$\frac{\log D - \log D_{RED}}{T - T_{REF}} = -\frac{1}{z} \quad (14)$$

Onde  $-1/z$  é a inclinação da reta.

Ao isolar  $D$  na Equação (14), obtém-se:

$$\log\left(\frac{D_{RED}}{D}\right) = \frac{T - T_{REF}}{z} \quad (15)$$

$$D_{RED} = D 10^{\frac{T - T_{REF}}{z}} \quad (16)$$

Para poder relacionar as equações acima, descritas de forma direta com a intensidade da pasteurização em relação à temperatura da bebida em questão, reescreve-se a Equação (16) de forma a se obter o fator  $L$ . Esse fator representa o índice de letalidade do processo térmico, conforme a Equação (17).

$$\frac{D_{RED}}{D} = 10^{\frac{T - T_{REF}}{z}} = L \quad (17)$$

A Equação (17) expressa que a variação de temperatura em relação à temperatura de referência, será diretamente proporcional à variação da velocidade da reação química, que é representada na Equação (17) pela variação do tempo de redução decimal.

#### 2.4.8. Definição das Unidades de Pasteurização na Produção de Cerveja

O índice de letalidade é comumente utilizado para análises em alimentos de uma forma geral, porém, em bebidas, como a cerveja, costuma-se utilizar o termo Unidades de Pasteurização (UP), que pode ser descrito como:

$$\frac{dUP}{dt} = L = 10^{\frac{T - T_{REF}}{z}} \quad (18)$$

Integrando ambos os lados da Equação (18) em relação ao tempo, para uma temperatura constante, obtêm-se:

$$\int dUP = \int 10^{\frac{T-T_{REF}}{z}} dt \quad (19)$$

$$UP = 10^{\frac{T-T_{REF}}{z}} t \quad (20)$$

Dessa forma, a UP quantifica o processo de pasteurização em relação à temperatura e o tempo em que ele está ocorrendo. O ganho de UP pode ser atingido através da aplicação de maiores temperaturas, pois dessa forma o processo será mais intenso ou com tempo de processos mais longos, sendo maior o tempo da ação destrutiva.

Pela Equação (20) pode-se observar que as UPs variam de forma exponencial com a temperatura e de forma linear com o tempo. Uma UP é definida como o grau de pasteurização obtido pelo alimento, com ele sendo exposto a uma temperatura de 60°C por 1 minuto (BUZRUL, 2006).

Para a pasteurização da cerveja, o valor  $z$  utilizado é 6,94, isso porque é o valor relatado para leveduras selvagens (BOULTON e QUAIN, 2001) e a temperatura de referência é 60°C, devido ao fato de que os principais micro-organismos deteriorantes da cerveja são destruídos nessa temperatura (FONTANA, 2009). Dessa forma tem-se que:

$$UP = 10^{\frac{T-60}{6,94}} t \quad (21)$$

$$UP = 1,393^{T-60} t \quad (22)$$

As unidades de pasteurização devem ser sempre medidas no ponto mais frio do líquido, pois se for garantido que no ponto mais frio a quantidade de UP é satisfeita, consegue-se garantir que em todo o líquido será. O ponto mais frio do líquido fica localizado à uma altura que não ultrapassa 25 mm, para o modelo de garrafa utilizada, medidos a partir da base inferior do vasilhame (LEWICKI, WALCZAK e GOSS, 1983).

É comum encontrarmos na literatura o nome *cold spot* para nomenclatura do ponto mais frio. Assim, podemos reescrever a Equação (22) como:

$$UP = 1,393^{T_{cs}-60}t \quad (23)$$

onde  $T_{CS}$  é a temperatura no ponto frio em °C e  $t$  é o tempo em minutos.

Embora análises laboratoriais indiquem que valores entre 1 e 5 UPs sejam eficientes para atingir a estabilidade desejada com a pasteurização, as cervejarias geralmente utilizam valores entre 8 e 30 UPs, para garantir uma margem de segurança em casos de possíveis contaminantes mais resistentes (BUZRUL, 2006).

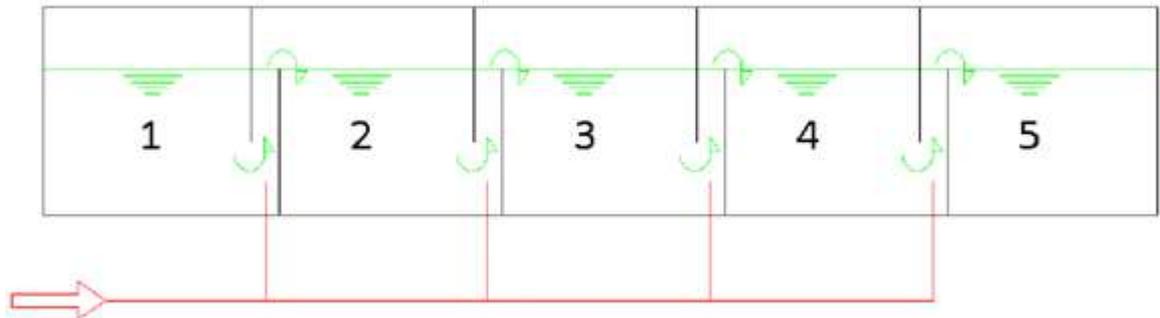
## 2.5. Tipos de pasteurizadores

Ao longo do tempo, estudos sobre pasteurização foram evoluindo e diversos tipos de máquinas foram desenvolvidas em busca da ampliação da capacidade de processar grandes volumes de produto. Devido às características físicas do vidro, é necessário que esse aquecimento seja feito de forma gradual, até atingir a temperatura de pasteurização e, depois do processo, o resfriamento deve ser feito da mesma forma (CLERK, 1958).

Durante a primeira metade do século XX, as máquinas utilizadas eram chamadas de pasteurizadores de cesto e cumpriam os requisitos necessários para que o processo de pasteurização acontecesse sem choque de temperatura. Havia dois principais tipos de pasteurizadores de cestos: o pasteurizador tipo Gasquet e o tipo Americano (CLERK, 1958).

Os pasteurizadores do tipo Gasquet (Figura 7) consistem em um maquinário com tanques, por onde a água circula com o auxílio de uma bomba. Entre cada tanque, uma injeção de vapor em serpentinas é realizada a fim de aquecer a água quando passa para um novo compartimento. O funcionamento do equipamento consiste na imersão de um primeiro lote de garrafas no primeiro compartimento. A bomba de recirculação faz com que a água deste primeiro tanque passe para o segundo e assim sucessivamente, até chegar à temperatura de pasteurização nos compartimentos do meio do equipamento. As garrafas também passam de um compartimento para outro, adicionando sempre um novo lote no primeiro tanque. Os compartimentos do final do equipamento também possuem serpentinas, porém de água fria, permitindo o resfriamento gradual do produto (FONTANA, 2009).

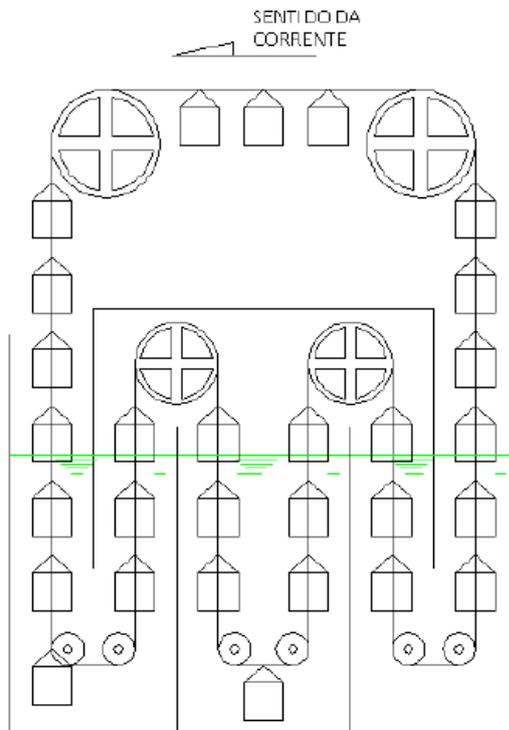
**Figura 7 – Representação esquemática do pasteurizador tipo Gasquet (vista lateral)**



Fonte: (FONTANA, 2009)

Já o pasteurizador do tipo Americano (Figura 8) é um equipamento um pouco mais simples, mas que mantém o princípio de aquecimento e resfriamento gradual. A máquina possui cestos que ficam suspensos e estão interligados através de uma corrente contínua. Esses cestos passam por 3 compartimentos, cada um com uma temperatura de banho, sendo o do meio o tanque com a temperatura de pasteurização do processo (FONTANA, 2009).

**Figura 8 - Representação esquemática do pasteurizador tipo Americano**



Fonte: (FONTANA, 2009)

Entretanto, para a aplicação em grandes escalas esses modelos apresentam algumas limitações, principalmente pelo fato de que o carregamento e o descarregamento são realizados manualmente. Isso fez com que no início da década de 50 esses pasteurizadores passassem a ser substituídos pelo modelo de túnel (Figura 9). Nesse tipo de máquina os vasilhames passam por um longo túnel onde a água é esguichada, possibilitando criar um gradiente de temperatura, tanto de aquecimento até a temperatura de pasteurização, quanto de resfriamento, após passar pela zona de pasteurização (FONTANA, 2009). Esse conceito possibilitou a pasteurização em grande escala, tornando-se o modelo majoritariamente utilizado na indústria cervejeira.

**Figura 9 – Exemplo de túnel pasteurizador**



Fonte: (BALARDIN MONTAGEM E MANUTENÇÃO INDUSTRIAL, 2023)

## **2.6. Transferência de calor na pasteurização**

O processo de pasteurização é um tratamento térmico, conforme explicado anteriormente. Dessa forma, para seu correto controle e modelamento é importante ter o conhecimento dos fenômenos térmicos envolvidos, juntamente com a obtenção dos respectivos valores dos coeficientes de transferência de calor.

Em um túnel pasteurizador, que é o tipo de pasteurizador que será utilizado nesse trabalho, os vasilhames são conduzidos através de uma esteira por diversos banhos, também chamados de zonas, cada uma correspondendo a uma determinada temperatura. Com isso, o vasilhame é aquecido e resfriado de forma gradual (KLEIN, 2009).

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

- Zonas de aquecimento: são os banhos que aquecem o vasilhame até que ele chegue na temperatura de pasteurização. Pode existir mais de uma zona de aquecimento, com temperaturas diferentes, de forma que o aquecimento seja gradual.

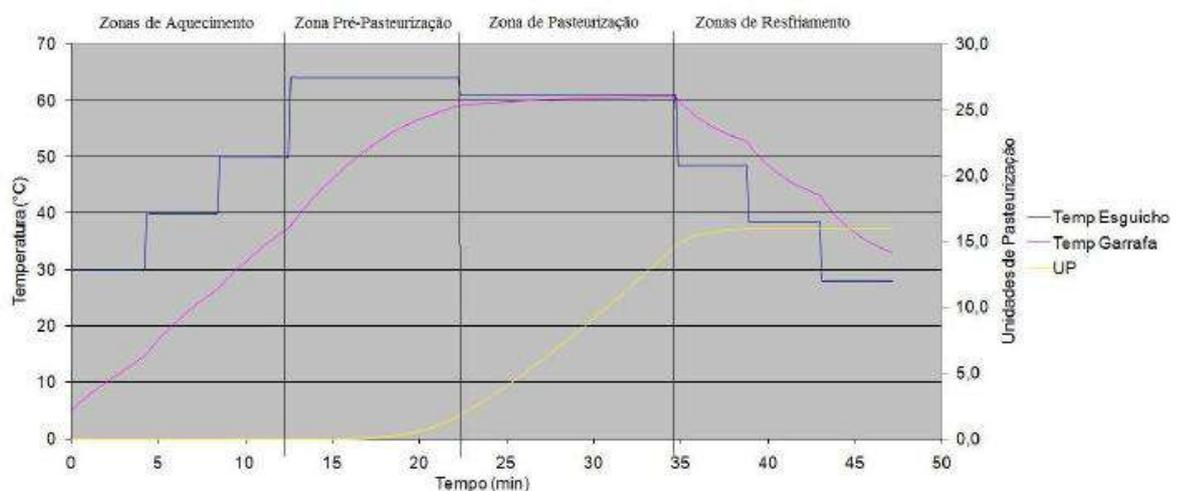
- Zona de pré pasteurização: são as zonas onde se inicia a inativação ou morte de micro-organismos.

- Zona de pasteurização: é a zona onde os vasilhames são aquecidos à temperatura de pasteurização e permanecem nela durante um tempo determinado.

- Zonas de resfriamento: são os banhos que resfriam gradualmente os vasilhames até uma temperatura adequada à manipulação manual e que evitam que possa haver algum tipo de choque térmico no vasilhame, podendo levar a sua ruptura ao deixar o túnel pasteurizador. Normalmente essa temperatura é de 35°C.

A Figura 10 exemplifica essa distribuição com uma curva típica de pasteurização.

**Figura 10 - Curva das zonas de um túnel pasteurizador, considerando uma receita para 16UP**



Fonte: (FONTANA, 2009)

Considerando um túnel pasteurizador e supondo que um vasilhame com o líquido inicialmente em repouso, com temperatura constante (sendo ela igual para o vidro e para a cerveja), seja inserido nele, pode-se analisar e estabelecer que a taxa de transferência de calor do processo envolve três principais mecanismos: convecção forçada externa, condução no vidro e convecção natural interna (ENGELMAN e SANI, 1983).

Na convecção forçada externa a água do banho forma um filme ao redor do vasilhame, que tem sua temperatura alterada de acordo com a diferença de temperatura que existir entre

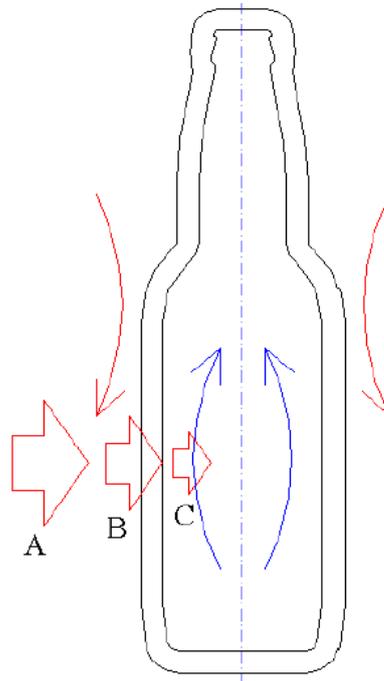
ele e a temperatura do banho. Na etapa de aquecimento, por exemplo, a água do banho estará mais quente que o vasilhame, dessa forma, parte da energia da água irá passar para a garrafa, aquecendo-a. A transferência de calor desse processo se dá através do mecanismo de convecção forçada. A resistência da convecção forçada externa ao vasilhame só é significativa em vazões baixas, da ordem de 10 m<sup>3</sup>/h por metro quadrado de máquina. Acima deste ponto, a vazão de água dos esguichos torna esta resistência desprezível (LEWICKI, 1984).

Durante a condução no vidro, a energia absorvida pela superfície externa do vasilhame é transferida até a superfície interna pelo mecanismo de condução. É no vidro do vasilhame que se encontra a maior resistência térmica da transferência de calor (A. ÇENGEL e J. GHAJAR, 2015), ou seja, quanto maior for o vasilhame, ou quanto maior for sua proporção em relação à massa total do conjunto vasilhame-líquido, maior será o tempo necessário para que a entalpia absorvida seja capaz de variar significativamente a temperatura média do conjunto.

Por fim, após um tempo, parte da energia absorvida pelo vasilhame já atravessou a espessura dele. A partir daí parte da energia será responsável por aquecer o próprio vasilhame e parte começará a aquecer o fluido. O aquecimento do vasilhame faz com que ocorra uma convecção natural complexa no fluido, pois com o passar do tempo o aquecimento vai se tornando mais intenso e as forças viscosas do fluido em questão vão sendo vencidas. Com isso, zonas de recirculação são estabelecidas pelas velocidades impostas pelas correntes convectivas (PUPPIM, 2015). Isso tende a propiciar uma troca de calor mais eficiente entre o vasilhame e a cerveja.

Um esquema representando todos os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo da pasteurização pode visto na Figura 11.

**Figura 11 - Esquema dos mecanismos de transferência de calor apresentando a convecção forçada externa (A), a condução no vidro (B) e a convecção natural (C)**



Fonte: (FONTANA, 2009)

Sabendo que o processo de transferência de calor, bem como outros fatores previamente explicados, afeta o resultado de uma pasteurização, neste presente trabalho iremos avaliar a eficiência de um túnel pasteurizador de uma cervejaria artesanal, localizada em Três Rios, no Rio de Janeiro, a fim de avaliar se o processo empregado está sendo adequado para obtenção da qualidade desejada no produto final.

### 3. METODOLOGIA

A escolha pela análise do processo de pasteurização da cerveja se deu pela relevância dessa etapa para qualidade do produto. Por ser o processo que garante que o produto estará livre de micro-organismos indesejáveis, garantindo um tempo de prateleira maior, caso exista alguma inconsistência no processo, a qualidade do produto poderá estar comprometida, seja pela presença de agentes deteriorante ou por alterações nas características sensoriais do produto, podendo até mesmo gerar inconsciências entre lotes.

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Data Logger

O *Data Logger* utilizado nos experimentos é do fabricante Onset, modelo Hobo U12-015 (Figura 12). Ele é um dispositivo que registra dados de temperatura, e pode ser utilizado em processos que utilizam autoclave, incubadoras e pasteurizadores, sendo seguro para utilização em alimentos, pois é feito inteiramente de aço inoxidável. Possui dimensões de 17,5 x 101,6 mm e suporta temperaturas de -40°C a 125°C. Sua precisão é de  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$  (na faixa de 0°C a 50°C), opera em pressões de até 2200 psi e possui um tempo de resposta de até 10 minutos em 1 m/s de fluxo de ar ou até 3,5 minutos na água, conforme instruções do fabricante. O equipamento possui uma memória disponível de 64 KB, o que fornece aproximadamente 43.000 medições. A utilização do equipamento está associada ao Software Análise de Dados HOBOWare.

**Figura 12 – *Data Logger* modelo HOBOW U12-015 utilizado nos experimentos**

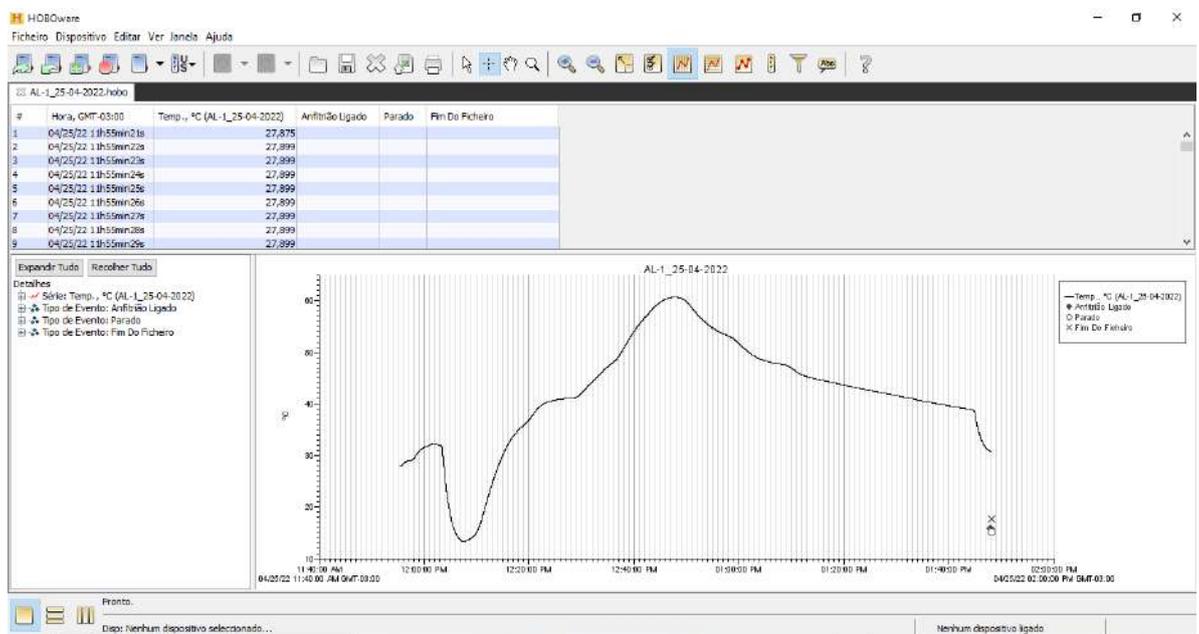


Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

Conectando o *Data Logger* através de sua entrada USB ao computador é possível sincronizar o aparelho com o software. É através dele que se realiza o início e o final da coleta dos dados de temperatura. Define-se também a taxa em que irá ser realizada o registro da temperatura, podendo ser feita em intervalos de 1 segundo até 18 horas. Também é possível configurar se a coleta dos dados será feita de forma instantânea, assim que iniciado o equipamento, ou se irá iniciar em data e hora específica. O término da coleta pode ser feito de forma manual, ao sincronizar o equipamento com o software, ou também pode ser configurado para terminar quando a memória estiver cheia ou nunca parar as medições e sobrescrever os dados mais antigos.

Ao sincronizar o equipamento com o software e encerrar as coletas de dados é fornecido ao usuário a opção de escolher se a temperatura será exibida em °C ou °F. Após a escolha é exibida na tela uma tabela com todos os dados coletados, contendo as informações de data, hora, temperatura correspondente e um gráfico de tempo por temperatura (Figura 13). É possível também optar por exportar esses dados de data/hora e temperatura obtidos para uma planilha Excel, o que proporciona uma facilidade para trabalhar e analisar os dados.

**Figura 13 - Captura de tela do Software de Análise de Dados HOBOWare após finalização das medidas**

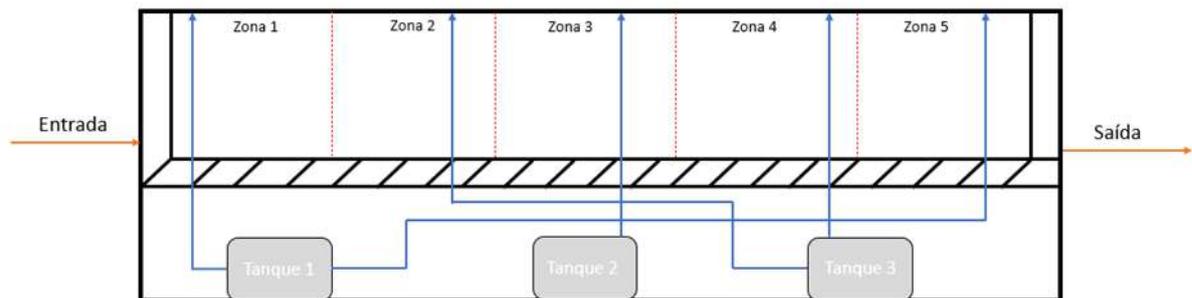


Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

### 3.1.2. Túnel Pasteurizador

O túnel pasteurizador que será avaliado é um pasteurizador contínuo com capacidade para pasteurização de 800 a 1.333 garrafas/h. Ele possui 3,74 m de largura, 4,00 m de profundidade (considerando as esteiras) e 1,87 m de altura (SERRA INOX, 2016). Está dividido em cinco seções, possuindo cada uma delas temperaturas de água de molhamento distintas. As duas primeiras seções são zonas de aquecimento, a terceira sendo a zona de pasteurização e as duas últimas zonas de resfriamento. O equipamento possui 3 tanques de armazenamento de água, sendo um dos tanques responsável pelo abastecimento de água dos esguichos das zonas 1 e 5, um outro pelas zonas 2 e 4, e um dedicado para a zona 3, que é a zona de pasteurização. A distribuição dos tanques e suas respectivas zonas são ilustradas na Figura 14, enquanto na Figura 15 é apresentada uma foto do equipamento.

**Figura 14 - Esquema de distribuição dos tanques e suas respectivas zonas**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

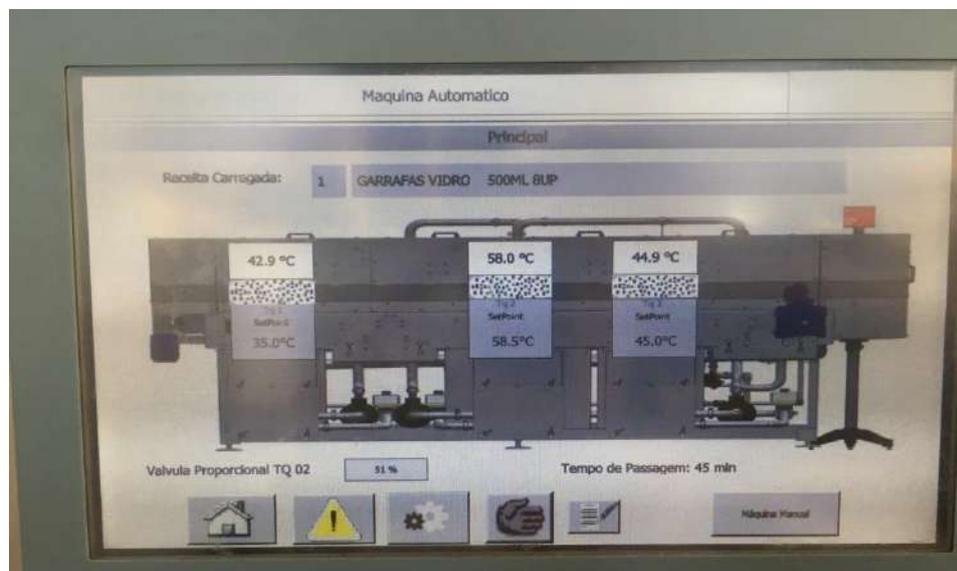
**Figura 15 - Túnel pasteurizador**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

O pasteurizador possui um painel de controle onde é possível definir e visualizar as temperaturas de *set point* ( $T_{SP}$ ) de banho para cada zona e a receita carregada, que define o tipo de vasilhame que está sendo pasteurizado e a respectiva UP desejada no processo. Também é possível visualizar as temperaturas de banho em cada zona medidas pelo equipamento e o tempo de duração do processo, que é definido como o tempo de passagem de uma garrafa pelo túnel pasteurizador, e tem seu valor fixado em 45 minutos, conforme pode ser observado na Figura 16.

**Figura 16 - Painel de controle do túnel pasteurizador**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Determinação do tempo de resposta do *Data Logger*

Sendo o *Data Logger* um dos principais equipamentos de aquisição de dados para esse trabalho, era necessário entender melhor seu funcionamento, principalmente no quesito tempo de resposta. Segundo o manual, seu tempo de resposta quando submerso em água é menor que 3,5 minutos. Isso significa que, quando submetido à uma mudança de temperatura, ele demora cerca de 3,5 minutos para se estabilizar nesta.

Para tentar determinar com mais exatidão esse tempo de resposta, realizaram-se três testes que consistiam em colocar o *Data Logger* em um banho de água em ebulição ( $T_Q = 100^\circ \text{C}$ ) e logo depois submergir o equipamento em um banho de gelo ( $T_F = 0^\circ \text{C}$ ). O tempo de permanência do *Data Logger* em ambos os banhos foi de 10 minutos. Esse tempo foi definido

em função da informação do tempo de resposta fornecido pelo fabricante. Para auxiliar no controle de temperatura dos banhos, foi utilizado um termômetro digital (Figura 17).

**Figura 17 - Termômetro utilizado para medição de temperatura dos banhos**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

### 3.2.2. Determinação do tempo de residência do vasilhame por zona

Para avaliarmos o perfil de temperatura da cerveja e, conseqüentemente, a avaliação de ganho total de UP no processo, é necessário saber por quanto tempo o vasilhame permanece em cada zona do pasteurizador, isso porque cada uma delas possui uma temperatura específica de banho. Entretanto, no manual do pasteurizador que foi utilizado neste esse trabalho, havia apenas a informação da profundidade total da máquina, que é de 4,00m considerando as esteiras de entrada e saída dos vasilhames. A fim de provar que o tempo de residência que uma garrafa permanece dentro de cada zona do túnel é o mesmo, foram realizados oito testes com o *Data Logger* preso do lado de fora da garrafa para medir a temperatura de cada banho.

Com o auxílio de um elástico, prendeu-se o *Data Logger* na boca da garrafa, de forma que sua extremidade ficasse para fora, em contato com os esguichos do pasteurizador, conforme mostra a Figura 18.

**Figura 18 - *Data Logger* preso ao vasilhame para leitura das temperaturas de banho**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

O pasteurizador em questão é alimentado pela esteira que sai da envasadora com seu fluxo de garrafas vindo da esquerda para a direita, conforme mostra a Figura 19. Dependendo da velocidade de envase, ocorrem variações na alimentação de garrafas no pasteurizador. Em baixas vazões há o acúmulo de garrafas do lado direito da máquina, enquanto em vazões mais altas o equipamento é preenchido adequadamente.

Observou-se, portanto, que o pasteurizador era preenchido de maneira mais homogênea pelo lado direito, o que poderia afetar o tempo de passagem do vasilhame pela máquina. Por esse motivo, dos oito experimentos, três foram realizados com o vasilhame entrando pelo lado esquerdo do pasteurizador e cinco pelo lado direito, com o intuito de avaliar se a posição de entrada do vasilhame no pasteurizador afetaria o tempo de residência por zona.

Marcou-se o tempo de entrada e de saída da garrafa no túnel pasteurizador para identificar o início e fim do processo. Os dados obtidos pelo *Data Logger* foram exportados para uma planilha de Excel e através destes, traçou-se os perfis de temperaturas posteriormente avaliados.

**Figura 19 – Envasadora (à esquerda) e entrada do túnel pasteurizador (à direita)**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

### 3.2.3. Avaliação do perfil de temperatura da cerveja – determinação da UP

Os testes realizados em seguida tinham como objetivo determinar quantas UPs a cerveja estava adquirindo ao longo do processo de pasteurização.

O primeiro parâmetro a se definir foi o estilo de cerveja utilizada nos experimentos. Esse fator influencia diretamente os resultados dos testes, pois o *Data Logger* utilizado neste trabalho tinha seus parâmetros definidos, como tempo de resposta e precisão, em água. Portanto o indicado seria realizar os testes para determinação de UP em um meio com propriedades físicas mais próximas possíveis à água. Tendo isso em vista, a cerveja escolhida para esse estudo foi uma cerveja do tipo Lager. Esse estilo possui densidade e viscosidade baixas, se comparado a outros tipos de cerveja. Além disso, a cerveja escolhida passa por uma centrífuga, reduzindo ainda mais os materiais particulados suspensos no líquido.

Outro parâmetro importante para esses testes foi garantir que coleta dos dados de temperatura da cerveja fosse realizada no ponto mais frio do líquido. Isso porque, garantindo que esse ponto atinja a temperatura necessária para o ganho de UP definido para aquele processo, pode-se afirmar que todo o líquido terá atingido o mesmo ganho, conforme explicado anteriormente nesse trabalho.

Sendo assim, o *Data Logger* foi posto dentro da garrafa contendo a cerveja escolhida com o auxílio de um arame e uma haste de borracha, de modo que sua extremidade ficasse na altura do *cold spot*. Conforme mencionado anteriormente, o ponto frio fica aproximadamente a uma

distância de 25 mm do fundo da garrafa (LEWICKI, WALCZAK e GOSS, 1983). Com um arrolhador, a garrafa foi tampada e posta no túnel pasteurizador para a realização dos testes.

Foram realizados seis experimentos com o *Data Logger* dentro do vasilhame e em todos eles a garrafa foi colocada no lado direito do pasteurizador. Em todos os testes foram coletadas as  $T_{SP}$ , as temperaturas dos banhos indicadas no painel de controle, os tempos de entrada e de saída do vasilhame e os dados do *Data Logger* extraídos pelo sistema HOB0.

A partir dos dados coletados foram feitos três cálculos distintos para a determinação da UP absorvida pela cerveja ao longo do processo. A primeira determinação foi feita aplicando-se na Equação (22) os dados de temperatura e tempo de *set point* do sistema. Para a segunda determinação também foi utilizada a Equação (22), porém com os dados de temperatura de banho indicados no painel de controle do pasteurizador e os dados de tempo de duração dos testes. Já para a terceira determinação utilizou-se os mesmos dados de tempo que na segunda e os dados de temperatura obtidos pelo *Data Logger*. Nesta determinação de UP foi utilizada uma planilha (Figura 20), fornecida pelo fabricante do equipamento, onde era necessário informar o intervalo de tempo que o *Data Logger* registra as temperaturas, que nesse caso foi de 1 segundo.

**Figura 20 - Planilha em Excel fornecida pelo fabricante do *Data Logger***

UPs:		11,14	ESTILO:	GARRAFA 500 mL
Intervalo		1 segundos	LOTE:	
			PASTEURIZAÇÃO:	8 UPS
Tempo	°C	UPs	Somatória UP	
0:00:00	18,32	0,0000000165	0,0000000165	
0:00:01	18,25	0,0000000160	0,0000000325	
0:00:02	18,15	0,0000000156	0,0000000481	
0:00:03	18,08	0,0000000152	0,0000000633	
0:00:04	18,01	0,0000000148	0,0000000781	
0:00:05	17,92	0,0000000144	0,0000000925	
0:00:06	17,84	0,0000000141	0,0000001066	
0:00:07	17,77	0,0000000137	0,0000001203	
0:00:08	17,70	0,0000000134	0,0000001337	
0:00:09	17,63	0,0000000131	0,0000001468	
0:00:10	17,53	0,0000000127	0,0000001595	
0:00:11	17,49	0,0000000124	0,0000001720	

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

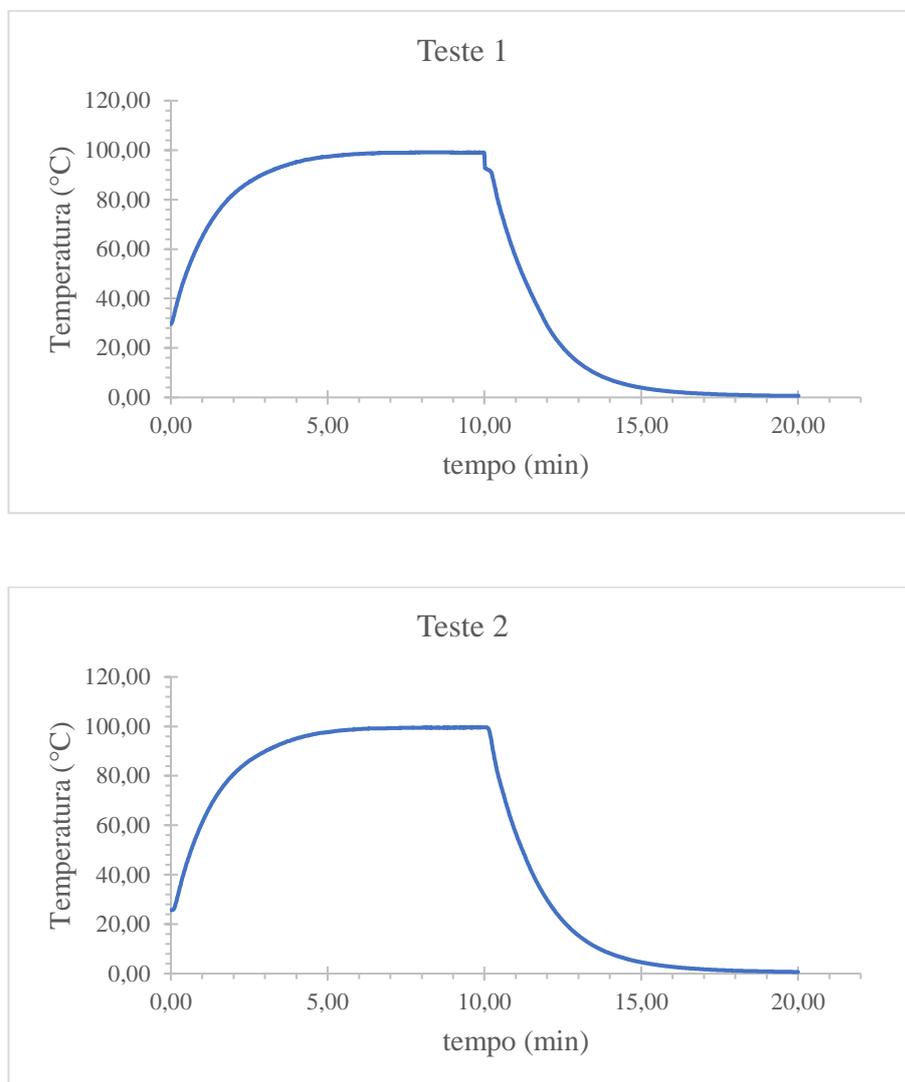
Essa planilha realiza o cálculo de ganho de UP ponto a ponto utilizando uma equação semelhante à Equação (22), com uma pequena modificação, onde a temperatura T utilizada na equação é uma média da temperatura medida no ponto de análise e no ponto subsequente.

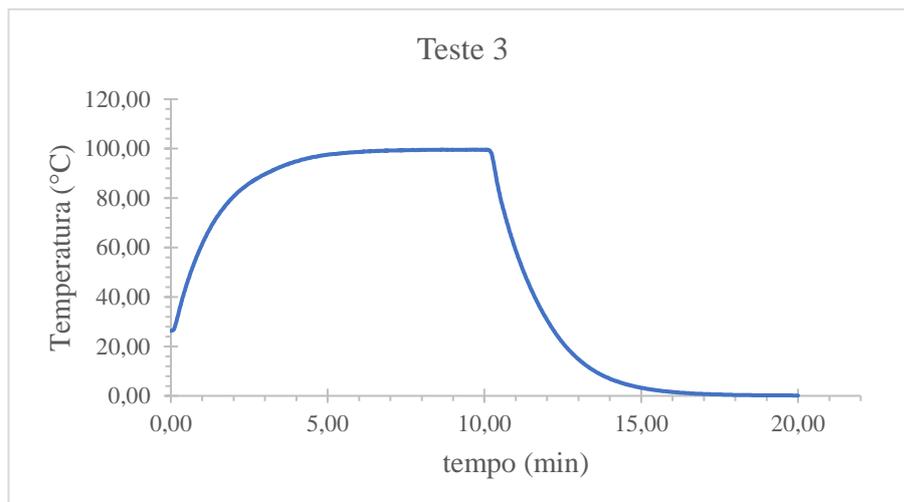
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Tempo de resposta do *Data Logger*

Com os dados de tempo e temperatura dos três testes realizados, para uma melhor compreensão do tempo de resposta do *Data Logger*, traçou-se seus respectivos perfis de temperatura (Figura 21).

**Figura 21 - Gráfico de tempo x temperatura do teste do tempo de resposta do Data Logger**





Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

Para determinação do tempo de resposta do *Data Logger* analisou-se separadamente o perfil de aquecimento e de resfriamento de cada teste. Foi utilizada uma conversão de escala de temperatura em °C para temperatura em percentual, sendo 0% a temperatura inicial e 100% a temperatura do novo estado estacionário. Definiu-se que a estabilidade era atingida quando o valor de temperatura atingisse 90%, como informado pelo fabricante. Consequentemente o tempo de resposta foi o tempo em que o *Data Logger* registrou essa temperatura. Na Tabela 1 encontram-se os resultados dos tempos de resposta.

**Tabela 1 – Tempo de resposta do *Data Logger***

Teste	Tempo Resp (min)	
	90% T <sub>Q</sub>	90% T <sub>F</sub>
1	3,3	3,4
2	3,4	3,5
3	3,4	3,5

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

A média para o tempo de resposta no banho quente foi de 3,4 minutos e para o banho frio foi de 3,5 minutos. Ambos os resultados condizem com o tempo de resposta informado pelo fabricante do equipamento. Com isso, pode-se concluir que o *Data Logger* funciona adequadamente para as medições dos testes realizados na sequência.

#### 4.2. Influência da posição de entrada do vasilhame no tempo de permanência no pasteurizador

O tempo de duração dos oito testes realizados para determinação do tempo de residência do vasilhame por zona encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2 - Duração dos testes para avaliação do tempo de residência por zona**

Teste	Hora entrada	Hora saída	$\Delta t$ (min)
1*	14:26	15:18	00:52
2*	15:52	16:43	00:51
3*	17:13	18:06	00:53
4**	15:01	16:05	01:04
5**	09:11	10:12	01:01
6**	10:21	11:17	00:56
7*	10:29	11:17	00:48
8*	12:32	13:20	00:48

\* Entrada do vasilhame pelo lado direito

\*\* Entrada do vasilhame pelo lado esquerdo

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

A análise feita a partir desses resultados tinha como objetivo determinar se a posição de entrada do vasilhame afetava o tempo de duração da pasteurização. É possível notar que nos testes em que o vasilhame entrou pelo lado esquerdo do pasteurizador o tempo total de passagem pelo equipamento foi maior. Porém, para determinar se seria possível assumir que as médias dos tempos dos testes realizados pelo lado esquerdo e direito eram significativamente diferentes entre si, utilizou-se um teste de hipóteses.

Como foram realizados três testes com o vasilhame entrando pelo lado esquerdo e cinco testes com o vasilhame entrando pelo lado direito do pasteurizador, para realizar o teste de hipóteses sem o resultado fosse enviesado devido a diferença na quantidade de dados, foram excluídos os maiores e menores tempos dos cinco testes em que o vasilhame entrou pelo lado direito do pasteurizador. Com auxílio do Excel realizou-se o Teste-t de Student e o nível de significância escolhido foi de 0,05. O resultado do teste pode ser observado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Resultado Teste-t de Student**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	<i>Lado direito</i>	<i>Lado esquerdo</i>
Média	00:50	01:00
Variância	2,090E-06	7,877E-06
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
gl	3	
Stat t	-3,810	
p(T<=t) uni-caudal	0,016	
t crítico uni-caudal	2,353	
p(T<=t) bi-caudal	0,032	
t crítico bi-caudal	3,182	

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

Como o p-valor encontrado foi menor do que o nível de significância definido, pode-se descartar a hipótese nula. Ou seja, pode-se dizer que existe diferença significativa a 0,05 entre as médias dos tempos de duração da pasteurização, quando se leva em consideração a posição de entrada do vasilhame no equipamento.

Conforme mencionado na metodologia, essa diferença nas médias de tempo de duração do processo pode ser explicada pela forma que o pasteurizador é alimentado. Em baixas vazões de envase ocorre um acúmulo de vasilhames do lado direito do pasteurizador, o que faz com que seu preenchimento não seja homogêneo.

#### **4.3. Determinação do tempo de residência do vasilhame por zona**

A partir dos dados de temperatura e tempo coletados nos experimentos, traçou-se os gráficos para cada teste realizado, a fim de identificar visualmente os patamares de temperatura correspondentes a cada banho. E a partir disso, definir o tempo de residência do vasilhame em cada uma dessas zonas.

Analisando-se os gráficos dos testes, pode-se notar que quando o vasilhame entra pelo lado esquerdo do pasteurizador não é possível identificar com clareza os patamares de temperatura de cada zona. Como exemplo pode ser observado na Figura 22 o gráfico do teste 6. No Apêndice A podem ser visualizados todos os outros sete gráficos obtidos.

**Figura 22 – Gráfico de tempo por temperatura do teste 6**

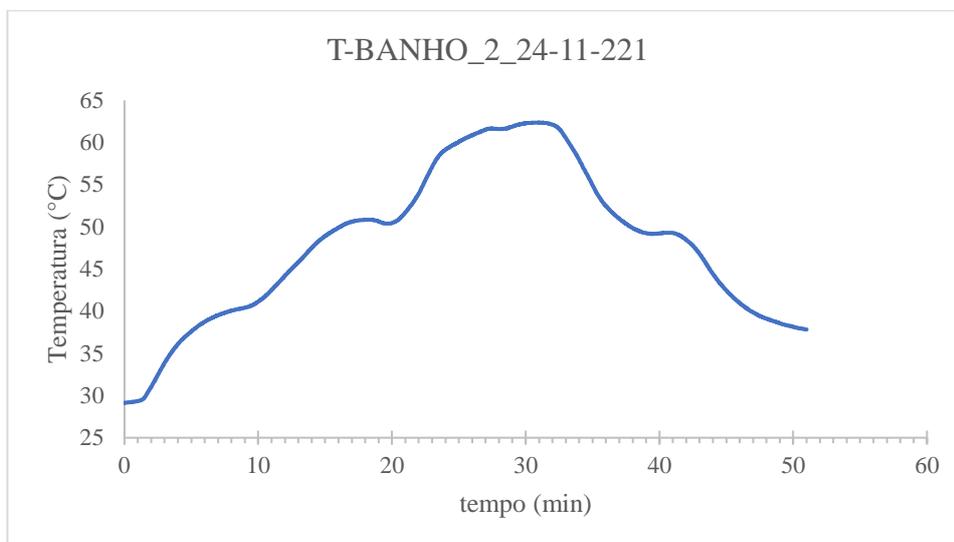


Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

Não é possível afirmar os motivos que geraram o perfil apresentado nos gráficos em que o vasilhame entra pelo lado esquerdo do equipamento. Isso porque como não era o objetivo inicial do presente trabalho não foram realizados novos testes para avaliar esse comportamento. Como não foi possível determinar os patamares de temperatura de banho, não se pode identificar quanto tempo o vasilhame permaneceu em cada zona. Portanto, os resultados obtidos nos testes em que o vasilhame entrou pelo lado esquerdo do equipamento não foram utilizados nessa análise.

Em contrapartida, o comportamento do perfil de temperatura observado nos cinco testes em que o vasilhame entrou pelo lado direito foi diferente. Neste caso, foi possível identificar os patamares que representam as diferentes seções ao longo do equipamento (Figura 23).

**Figura 23 - Gráfico de tempo por temperatura do teste 2**



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

A partir da definição dos patamares nos gráficos de cada teste, que podem ser observados no Apêndice B, foi possível estimar o tempo de permanência do vasilhame em cada uma das zonas. Com estes dados calculou-se a média de tempo de residência por zona de pasteurização (Tabela 4).

**Tabela 4 - Média do tempo de residência em cada zona e seu desvio padrão**

Testes	tempo de residência por zona (min)					tempo total
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 5	
1	12,000	9,000	12,500	8,517	9,983	52,000
2	9,600	10,400	12,017	9,000	9,983	51,000
3	9,000	11,000	13,983	9,017	9,850	52,850
7	11,000	8,183	7,383	9,433	12,000	48,000
8	8,000	8,950	12,050	10,100	8,900	48,000
Média	<b>9,920</b>	<b>9,507</b>	<b>11,587</b>	<b>9,213</b>	<b>10,143</b>	<b>50,370</b>
D.P	1,423	1,034	2,220	0,530	1,013	2,0218

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

Para comprovar que era possível assumir que o tempo de permanência do vasilhame era igual para todas as zonas, realizou o teste estatístico ANOVA, com auxílio do Excel. O nível de significância utilizado foi de 0,05 e os dados utilizados pelo teste podem ser observados na Tabela 5. Posteriormente, na Tabela 6 pode-se visualizar o resultado do teste.

**Tabela 5 – Dados utilizados no teste ANOVA**

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Zona 1	5	49,600	9,920	2,532
Zona 2	5	47,533	9,507	1,336
Zona 3	5	57,933	11,587	6,161
Zona 4	5	46,067	9,213	0,351
Zona 5	5	50,717	10,143	1,283

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

**Tabela 6 – Resultado do teste ANOVA**

<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	16,896	4,000	4,224	1,811	0,166	2,866
Dentro dos grupos	46,654	20,000	2,333			
Total	63,551	24,000				

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

Como o p-valor obtido no teste foi maior que o nível de significância utilizado, pode-se afirmar que não existe uma diferença significativa a 0,05 entre as médias dos tempos de residência do vasilhame em cada zona. Logo, pode-se considerar que o vasilhame permaneceu tempos iguais em cada seção.

#### **4.4. Avaliação do perfil de temperatura da cerveja – determinação da UP**

Partindo da premissa comprovada no tópico anterior de que em média uma garrafa permanecerá tempos iguais dentro de cada zona, os seis testes realizados tinham como objetivo a determinação da UP absorvida pela cerveja no processo de pasteurização, utilizando três formas distintas de análise. Em todos os testes a receita definida no painel de controle do pasteurizador era para obtenção de 8 UP para uma garrafa de 500mL.

##### **4.4.1. Determinação de UP – dados de *set point***

Em todos os seis testes realizados o *set point* do tempo e das temperaturas de processo de cada zona, obtidos através do painel de controle do túnel pasteurizador, foram iguais. O tempo de passagem total definido no sistema foi de 45 minutos. Esses dados podem ser observados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Dados de *set point* para determinação da UP**

zona	T <sub>SP</sub> (°C)	t por zona (min)
1	35,0	9,0
2	45,0	9,0
3	58,5	9,0
4	45,0	9,0
5	35,0	9,0

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

De posse desses dados calculou-se o ganho de UP no *set point*. Como o valor de *set point* foi o mesmo em todos os seis testes, o ganho de UP total também foi o mesmo. O resultado obtido pode ser visualizado na Tabela 8.

**Tabela 8 - Ganho de UP para os valores de *set point* do túnel pasteurizador**

zonas	ganho de UP	somatório de UP
1	0,00	0,00
2	0,06	0,06
3	5,47	5,54
4	0,06	5,60
5	0,00	5,60

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

O ganho de UP no processo de pasteurização, calculado a partir dos valores de *set point* do sistema é de 5,60. É possível observar que o valor calculado de ganho de UP a partir dos dados de *set point* do painel de controle não condizem com o valor de UP esperado pelo sistema, que era de 8UP. Isso nos leva a acreditar que os valores de tempo e temperatura do sistema estão subestimados, apresentando valores menores do que deveriam apresentar.

#### 4.4.2. Determinação de UP – dados do painel de controle do pasteurizador

Para essa determinação os dados utilizados foram as temperaturas de banho medidas pelo painel de controle do pasteurizador e o tempo de duração de cada teste. Esses dados podem ser visualizados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Dados de tempo e temperatura para cada teste**

zona	Temperaturas das zonas medidas pelo painel do túnel para cada teste (°C)					
	1	2	3	4	5	6
1	47,1	40,9	41,7	42,5	41,7	43,2
2	48,7	47,2	45,7	45,6	47,9	45,7
3	58,0	58,0	58,8	58,8	58,9	58,5
4	48,7	47,2	45,7	45,6	47,9	45,7
5	47,1	40,9	41,7	42,5	41,7	43,2
tempo de duração do processo (em minutos)	63,0	54,0	44,0	62,0	60,0	53,0

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

A partir desses dados calculou-se o ganho de UP para cada teste (Tabela 10). As tabelas com os detalhamentos das UPs ganhas em cada teste encontram-se no Apêndice C.

**Tabela 10 - Ganho de UP para os valores de temperatura medidos pelo sistema e para o tempo total de passagem em cada teste, média de UP e desvio padrão**

Teste	UP total
1	7,08
2	5,48
3	5,55
4	8,34
5	8,82
6	6,97

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

A média de ganho de UP para essa determinação foi de  $7,04 \pm 1,30$ . Esse valor é mais próximo do valor de ganho de UP esperado pelo sistema. Isso pode ser explicado pelo fato de que as temperaturas medidas pelo sistema apresentam, em média, valores 8,8% maiores do que as temperaturas de *set point* do sistema e o tempo de duração da pasteurização ser, em média, maior 24,4% do que o valor de tempo de passagem de *set point* do sistema.

#### 4.4.3. Determinação de UP – dados do *Data Logger*

Para essa última determinação de UP foram utilizados os dados de temperatura medidos pelo *Data Logger* ao longo dos seis experimentos. Os dados de tempo utilizados foram os de duração de cada teste. Os resultados de ganho de UP total de cada teste podem ser visualizados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Ganho de UP para os valores de tempo e temperatura medidos pelo *Data Logger***

Teste	UP total
1	11,14
2	9,34
3	8,45
4	10,70
5	9,00
6	10,65

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

O valor médio de UP encontrado foi de  $9,88 \pm 1,00$ . Esse valor é maior do que a UP esperada pelo sistema. Isso pode ser explicado pelo fato de que a zona de pasteurização apresentou, em média, valores de temperatura 2,99% mais altos do que os valores de *set point* do sistema para a mesma zona, como pode ser observado na Tabela 12.

**Tabela 12 - Valores máximos de temperatura obtidos pelo *Data Logger* na zona de pasteurização para cada teste e suas relações com o valor de *set point***

Teste	T <sub>máx</sub> (°C)	T <sub>máx</sub> /TSP (%)
1	60,70	3,76%
2	60,13	2,79%
3	59,83	2,28%
4	60,57	3,54%
5	59,92	2,43%
6	60,35	3,16%
média	60,25	2,99%

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

De acordo com a Equação (22) é na zona de pasteurização que ocorre a maior incorporação de UP, por ser a zona com a maior temperatura do processo. Por conta disso, pequenas divergências nos valores de temperatura dessa zona acarretam uma variação significativa no ganho final de UP no processo.

É importante ressaltar que os dados de temperatura obtidos a partir do *Data Logger* são valores medidos dentro do líquido, diferente das duas primeiras análises em que foram utilizados valores das temperaturas dos banhos. É sabido que durante o processo de transferência de calor, o líquido contido no interior do vasilhame não alcançará a temperatura da água do banho, isso deve-se ao gradiente de temperatura e às perdas de energia durante o

processo. Em consequência disso, as temperaturas de banho das zonas possivelmente apresentam valores maiores que as temperaturas máximas medidas pelo *Data Logger*.

#### 4.5. Avaliação do processo de pasteurização

Na Tabela 13 é apresentado o compilado dos resultados obtidos para as três formas de determinar o ganho de UP no processo de pasteurização empregado na cervejaria.

**Tabela 13 - Resultados da determinação do ganho de UP**

$UP_{set\ point}$	$\overline{UP}_{equipamento}$	$\overline{UP}_{data\ logger}$
5,60	$7,04 \pm 1,30$	$9,88 \pm 1,00$

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2023)

É possível observar que o valor de  $UP_{set\ point}$  calculado não alcança o valor estabelecido no sistema para a pasteurização. Já o cálculo da  $\overline{UP}_{equipamento}$ , levando em consideração seu desvio padrão, pode alcançar o valor desejado. Por sua vez, o cálculo da  $\overline{UP}_{data\ logger}$  mostra que a UP não só está sendo atingida, como está ultrapassando o valor determinado. Dessa forma, é possível observar que os dados reportados pelo pasteurizador não são consistentes, mas que isto não está inviabilizando o tratamento térmico da cerveja.

Essas inconsistências nos resultados podem estar sendo geradas por alguns fatores. Por exemplo, os valores de tempo e temperatura do *set point* do sistema parecem estar subestimados, pois o resultado de UP obtido não atinge o valor esperado. Outro problema pode estar nos sensores de medição de temperatura do pasteurizador, que podem estar mal configurados e/ou com mau funcionamento, acarretando uma leitura errada, influenciando nos dados de temperatura utilizados para o cálculo da  $\overline{UP}_{equipamento}$ . Outro fator que pode estar gerando dados incorretos é uma possível má regulagem dos esguichos da água de banho, ocasionando uma sobreposição das zonas. Caso esse problema aconteça no esguicho da zona 3, que é a zona de pasteurização, pode fazer com que a pasteurização dure mais tempo do que o estabelecido, gerando um ganho maior de UP.

Conforme previamente explicado neste trabalho, é de extrema importância que o processo de pasteurização esteja bem regulado. De acordo com os resultados obtidos de ganho de UP a cerveja pode estar sendo subpasteurizada ou superpasteurizada e ambos os casos devem ser evitados. Uma subpasteurização pode comprometer a vida útil do produto, pois não se pode garantir que todos os micro-organismos indesejáveis da cerveja foram devidamente inativados

(BRIGGS, BOULTON, *et al.*, 2004). Já uma superpasteurização pode comprometer a qualidade sensorial do produto, pois nestas condições algumas alterações físico-químicas são mais susceptíveis a acontecer, como por exemplo a quebra da estabilidade coloidal da cerveja (MORADO, 2009).

É importante ressaltar que todas as análises foram feitas considerando um cenário dito ideal, onde os vasilhames entraram pelo lado direito do pasteurizador. Isso porque, conforme mostrado anteriormente, não foi possível identificar visualmente os patamares de temperatura de banho quando o vasilhame entrava pelo lado esquerdo. Além disso, verificou-se também que o tempo de residência do vasilhame no equipamento depende da sua posição de entrada. Isso pode ser explicado pela alimentação de garrafas na envasadora, que é a etapa anterior à pasteurização, ser realizada manualmente, fazendo com que a vazão de entrada no pasteurizador nem sempre seja constante, ocasionando oscilações no fluxo de vasilhames que chegam no pasteurizador. Com isso é possível presumir que o processo pode apresentar maiores divergências quando o vasilhame entra pelo lado esquerdo. Sendo assim, é imprescindível que a capacidade máxima do equipamento seja utilizada, ou em casos em que isso não seja possível, realizar alguma manobra para diminuir a área interna de passagem do equipamento.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da conclusão de que o tempo de residência do vasilhame é igual para todas as zonas, foi possível realizar a determinação de UP no processo de pasteurização da cervejaria avaliada. A partir dos parâmetros de *set point* obteve-se um ganho de 5,60 UPs, enquanto na análise feita a partir dos valores de temperatura medidos pelo sistema e do tempo real de duração de cada teste, o ganho médio de UP foi de 7,04. Já na determinação de UP com os dados obtidos pelo *Data Logger* obteve-se uma média de 9,88 UPs adquirida no processo.

O túnel pasteurizador analisado está parametrizado para alcançar o valor de 8,00 UP. Dessa forma, os resultados obtidos são inconsistentes em relação ao valor desejado, o que pode gerar dúvidas em relação ao processo de pasteurização. Aparentemente o que se observa é um tratamento térmico superestimado em relação ao valor desejado.

A partir de todas as análises feitas é plausível concluir que o pasteurizador pode apresentar diversos problemas por conta das inconsistências nos dados. Como por exemplo, má regulagem dos esguichos da água de banho, mau funcionamento de seus sensores de temperatura e problemas na forma que é feita a alimentação do equipamento, ocasionando tempos de passagem irregulares. Dessa forma é recomendado que o equipamento passe por uma inspeção e manutenção para conferência de seus componentes, fazendo com que ele passe a apresentar dados consistentes e realize um processo de pasteurização mais eficiente.

É válido ressaltar que as determinações de UP foram feitas para os casos em que o vasilhame entrou pelo lado direito do pasteurizador, já que não foi possível prosseguir com as análises a partir dos dados do lado esquerdo. É sugerido que novos trabalhos sejam conduzidos a fim de estudar o comportamento da pasteurização em função da posição de entrada.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Neste capítulo são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que podem ser conduzidos a fim de aprofundar o estudo da avaliação do desempenho do túnel pasteurizador analisado.

Durante a realização deste trabalho foi comprovado que existe uma diferença no tempo de passagem do vasilhame em função da sua posição de entrada no pasteurizador. Com isso seria interessante a condução de um trabalho complementar a fim de elucidar se além da influência no tempo de duração do processo existe alguma influência direta no desempenho do processo de pasteurização, e se a posição de entrada impactaria na absorção das UPs desejadas.

Outro trabalho complementar seria a realização de análises de viabilidade celular dos micro-organismos da cerveja antes e após o processo de pasteurização. O intuito seria avaliar se a pasteurização está sendo eficiente mesmo com as inconsistências obtidas nos resultados das determinações de absorção de UP.

Por último a realização de testes com várias medições simultâneas, isto é, a utilização de mais de um Data Logger, de forma que fosse possível medir os dados de temperatura e tempo de várias garrafas em uma mesma corrida, a fim de analisar a influência da posição do vasilhame dentro do pasteurizador durante o processo de pasteurização.

## 7. REFERÊNCIAS

A. ÇENGEL, Yunus; J. GHAJAR, Afshin. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications**. 5ª edição. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

AQUARONE, Eugênio *et al.* **Biotecnologia Industrial: Biotecnologia na Produção de Alimentos**. São Paulo: Editora Blucher, v. Volume 4, 2001.

ARAÚJO, G.S. **Elaboração de uma cerveja ale utilizando melão de caroá [sicana odorífera (vell) naudin] como adjunto do malte**. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2016.

ARROIO, Agnaldo. Revista Eletrônica de Ciências. **Revista Eletrônica de Ciências**, 2009. Disponível em: [https://web.archive.org/web/20090621054919/http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art\\_31/EraUmaVez.html](https://web.archive.org/web/20090621054919/http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art_31/EraUmaVez.html). Acesso em: 07 Março 2023.

AUGUSTO, Pedro E. D. **Modelamento Matemático da Transferência de Calor Durante o Tratamento Térmico de Alimentos Líquidos Embalados**. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas. 2009.

BALARDIN MONTAGEM E MANUTENÇÃO INDUSTRIAL. BALARDIN MONTAGEM E MANUTENÇÃO INDUSTRIAL. **BALARDIN**, 2023. Disponível em: <https://balardin.com.br/products/tunel-pasteurizador-aquecedor-refrigerador-para-vinho-e-suco-de-uva>. Acesso em: 19 ABRIL 2023.

BELEZA DA TERRA PRODUTOS NATURAIS LTDA. Beleza da Terra. **Beleza da Terra Loja de Produtos Naturais**. Disponível em: <https://www.belezadatterra.com.br/none-77640885>. Acesso em: 2023.

BOULTON, Chris; QUAIN, David. **Brewing Yeast and Fermentation**. Oxford: Blackwell Science Ltda, 2001.

BRASIL. **Decreto Nº 6.871, de 4 de junho de 2009**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

BRIGGS, Dennis E. *et al.* **Brewing: Science and Practice**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004.

BUZRUL, Sencer. A suitable model of microbial survival curves for beer pasteurization. **Food Science and Technology**, p. 1330-1336, 2006.

CARVALHO, Giovani B. M. D. **Obtenção de Cerveja Usando Banana Como Adjunto e Aromatizante**. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Lorena, p. 163. 2009.

CLARK, Jim. Rate Constants And The Arrhenius Equation. **Chem Guide**, 2013. Disponível em: <https://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/arrhenius.html>.

CLERK, Jean de. **A Textbook of Brewing**. 1ª Edição. ed. Londres: Chapman & Hall, v. Vol 1, 1958.

CLUBE DO MALTE. Clube do Malte. **Nação Cervejeira**, 2021. Disponível em: <https://www.clubedomalte.com.br/blog/homebrewing/conheca-quais-sao-os-tipos-de-malte/>. Acesso em: 06 Novembro 2022.

DEL VECCHIO, H. W.; DAYHARSH, C. A.; BASELT, F. C. Thermal Death Time Studies on Beer Spoilage Organisms–I. **American Society of Brewing Chemists**, p. 45-50, 1951.

DRAGONE, Giuliano *et al.* Revisão: Produção de Cerveja: Microrganismos Deteriorantes e Métodos de Detecção. **Brazilian Journal of Food Technology**, Março 2007. 240-251.

EBLINGER, Hans M. **Handbook of Brewing - Processes, Technology, Markets**. Freiburg: Wiley-Vch, 2009.

ENGELMAN, M. S.; SANI, R. L. Finite-element simulation of an in-package pasteurization process. **Numerical Heat Transfer**, p. Vol 6, pag 41-54, 1983.

FONTANA, Daniel H. G. **Elaboração de um modelo para o controle do processo de pasteurização em cerveja envazada (In-Package)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 122. 2009.

GAVA, J A. **Princípios de Tecnologia de Alimentos**. São Paulo: Nobel, 1998.

GONÇALVES, Eliane. Radioagência Nacional. **Agenciabrasil**, 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/economia/audio/2022-09/numero-de-cervejarias-no-brasil-registrou-alta-de-12-em-2021#:~:text=O%20Brasil%20C3%A9%20o%20terceiro,bilh%C3%B5es%20de%20litros%20de%20cerveja>. Acesso em: 31 Março 2023.

KLEIN, Luís F. F. **Estudo de desempenho de esguichos para túneis de pasteurização**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

KUNZE, Wolfgang. **Technology Brewing and Malting**. 3ª edição. ed. Berlin: VLB, 2004.

LAVARDA, Liziane. **Determinação da cinética de degradação térmica da vitamina C em polpa de acerola via aquecimento ôhmico**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 37. 2011.

LEWICKI, P. P. Heat Transfer in a Tunnel Pasteuriser. Part II: Heat Transfer Coefficients. **Journal of Food Engineering** 3, 1984. 91-115.

LEWICKI, P. P.; WALCZAK, W.; GOSS, B. Heat Transfer in a Tunnel Pasteuriser. Part I. Factors affecting the rate of heating of liquid in a bottle. **Journal of Food Engineering** 2, 1983. 309-322.

MATOS, Ricardo A. G. **Produção de cervejas artesanais, avaliação de aceitação e preferência, e panorama do mercado**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 78. 2011.

MORADO, Ronaldo. **Larousse da Cerveja**. 1ª edição. ed. São Paulo: Alaúde Editorial Ltda, 2009.

ONSET COMPUTER CORPORATION. Onset. Disponível em: <https://www.onsetcomp.com/>.

PUPPIM, Atila. **Análise Numérica da Convecção Natural em Cavidades Tridimensionais**. Universidade de Brasília. Brasília. 2015.

SAKAMOTO, Kanta; KONINGS, Wil N. Beer spoilage bacteria and hop resistance. **International Journal of Food Microbiology**, Dezembro 2003. 105-124.

SERRA INOX. **Manual Técnico Pasteurizador Contínuo 600G/1000G**. Bento Gonçalves. 2016.

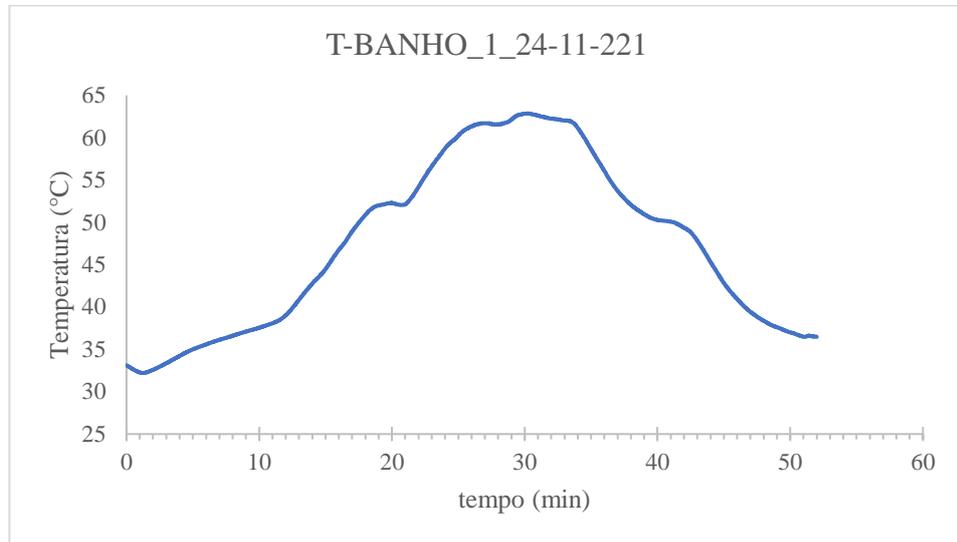
SINDICERV. SINDICERV. **SINDICERV**, 2020. Disponível em: <https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>. Acesso em: 06 Novembro 2022.

SIQUEIRA, Edson. Lojas Memo. **Lojas Memo**. Disponível em: <https://blog.lojasmemo.com.br/lupulo-brasileiro-ou-importado/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

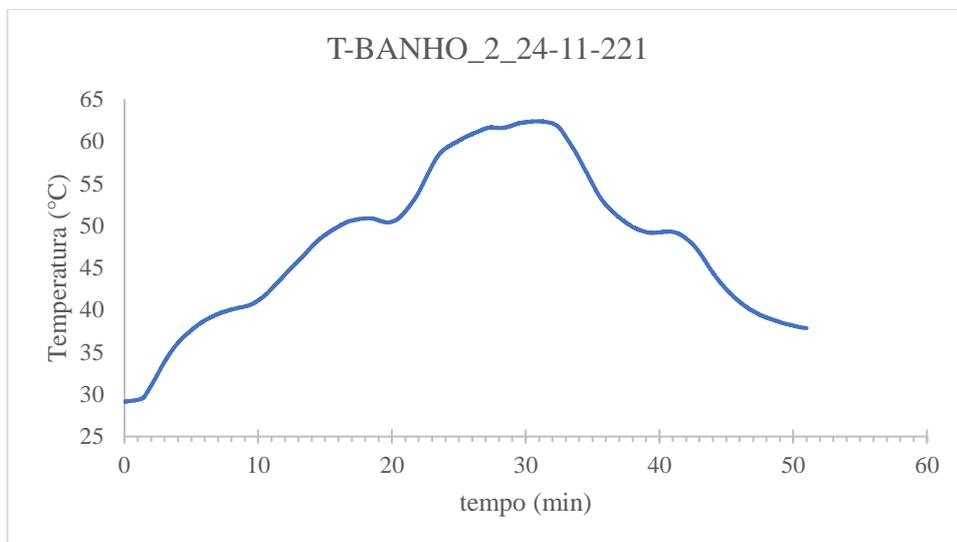
SMITH, Brad. Craft Beer and Brewing. **Craft Beer and Brewing**, 2017. Disponível em: <https://beerandbrewing.com/actual-beer-color-vs-predicted-color>. Acesso em: 06 Novembro 2022.

SUZUKI, Koji *et al.* A Review of Hop Resistance in Beer Spoilage Lactic Acid Bacteria. **Journal of the Institute of Brewing**, Junho 2006. 173-191.

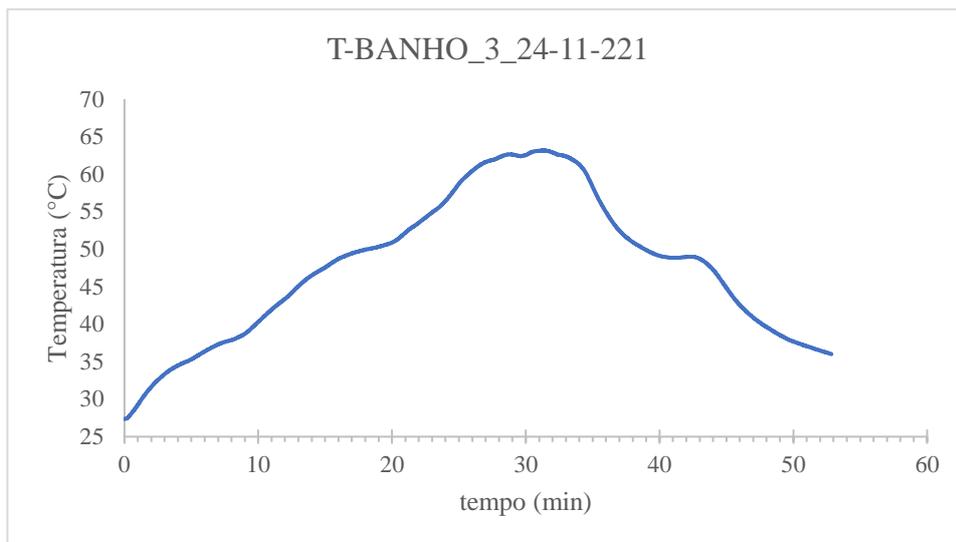
**APENDICE A – Gráficos dos testes para avaliação das temperaturas das zonas do pasteurizador**



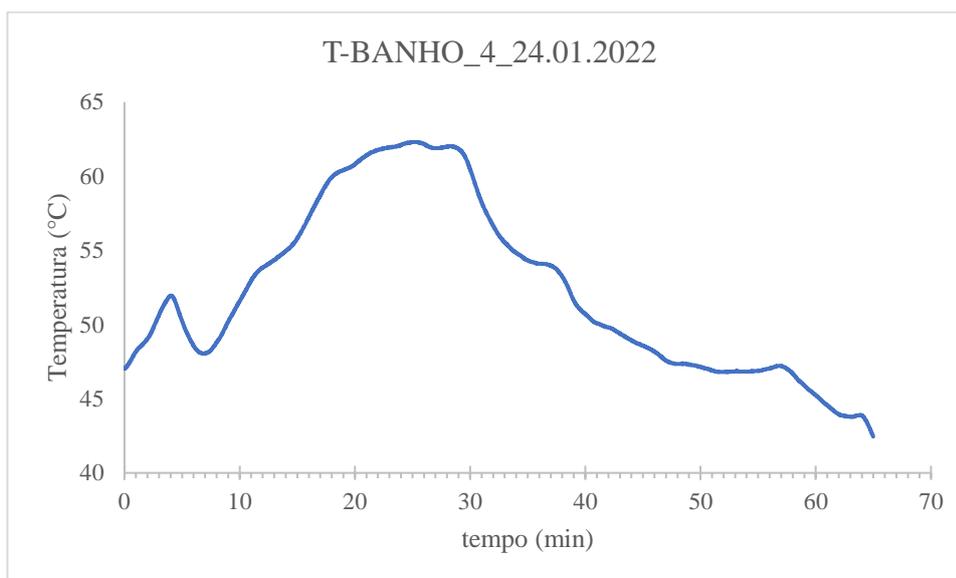
Entrada do vasilhame pelo lado direito



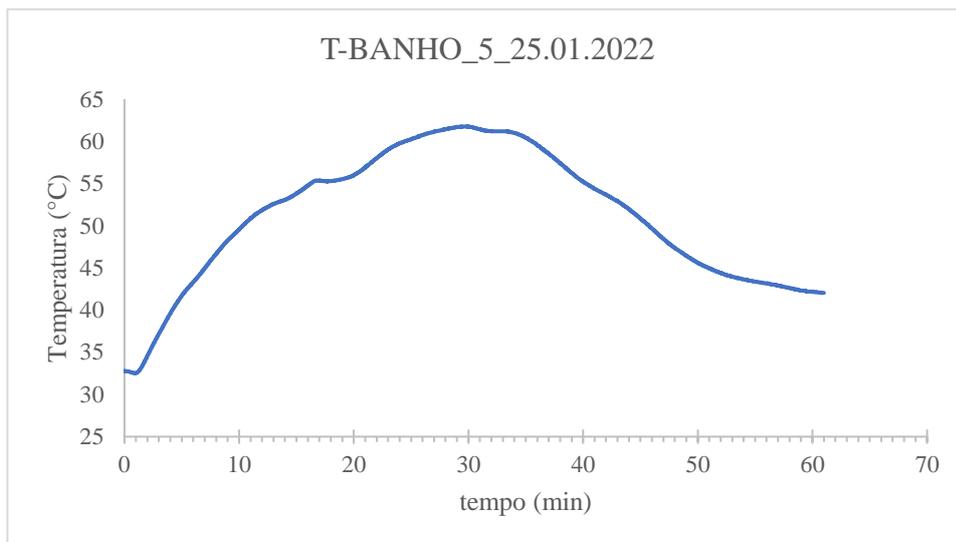
Entrada do vasilhame pelo lado direito



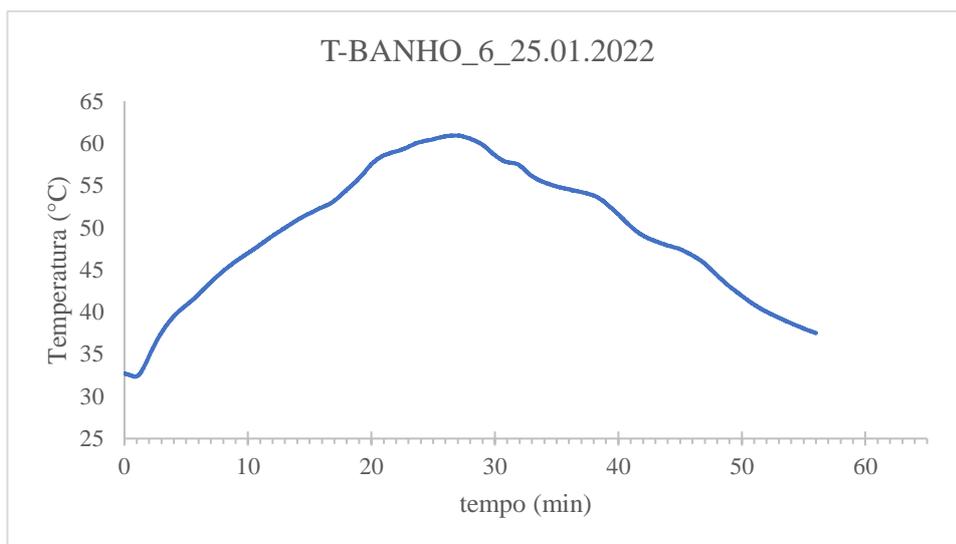
Entrada do vasilhame pelo lado direito



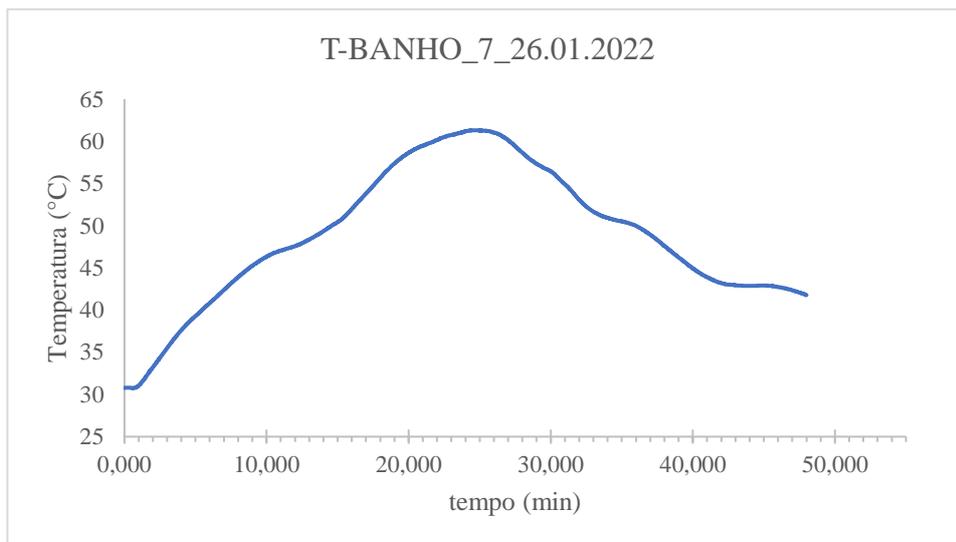
Entrada do vasilhame pelo lado esquerdo



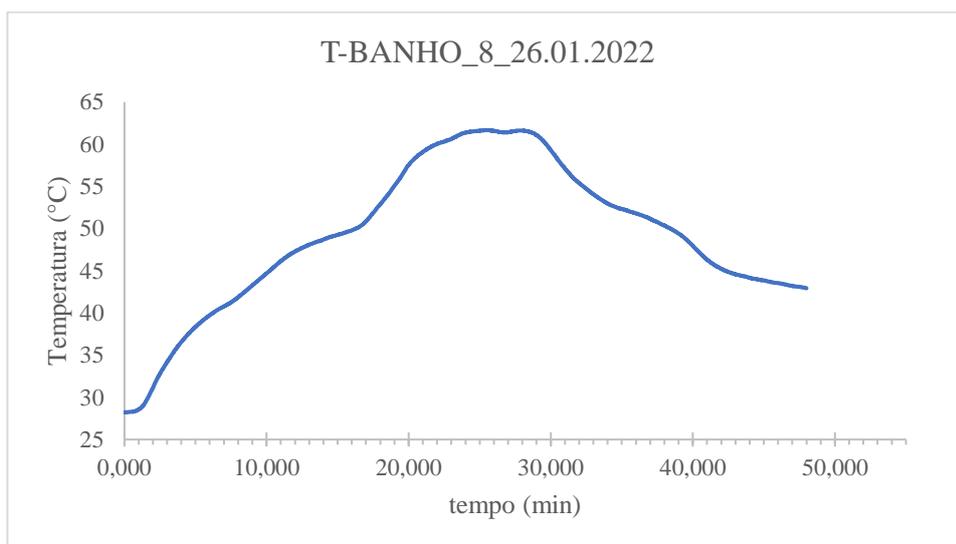
Entrada do vasilhame pelo lado esquerdo



Entrada do vasilhame pelo lado esquerdo

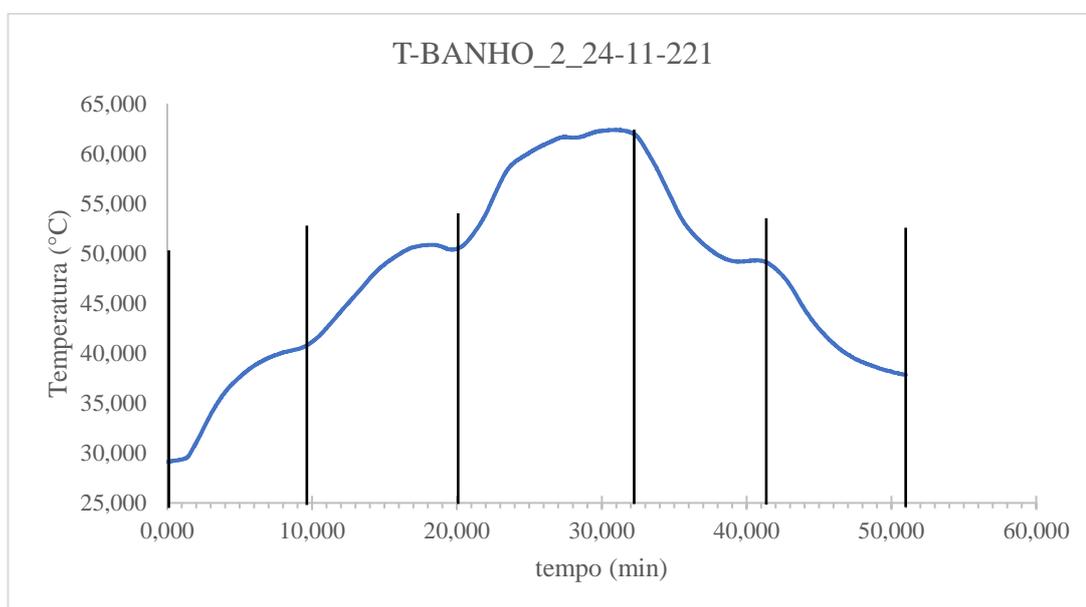
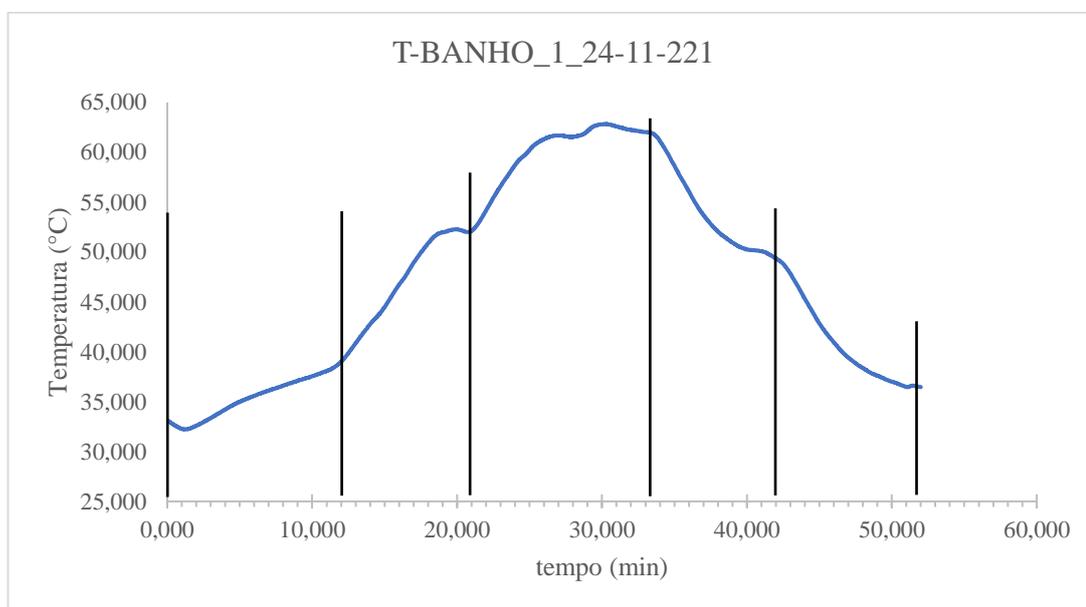


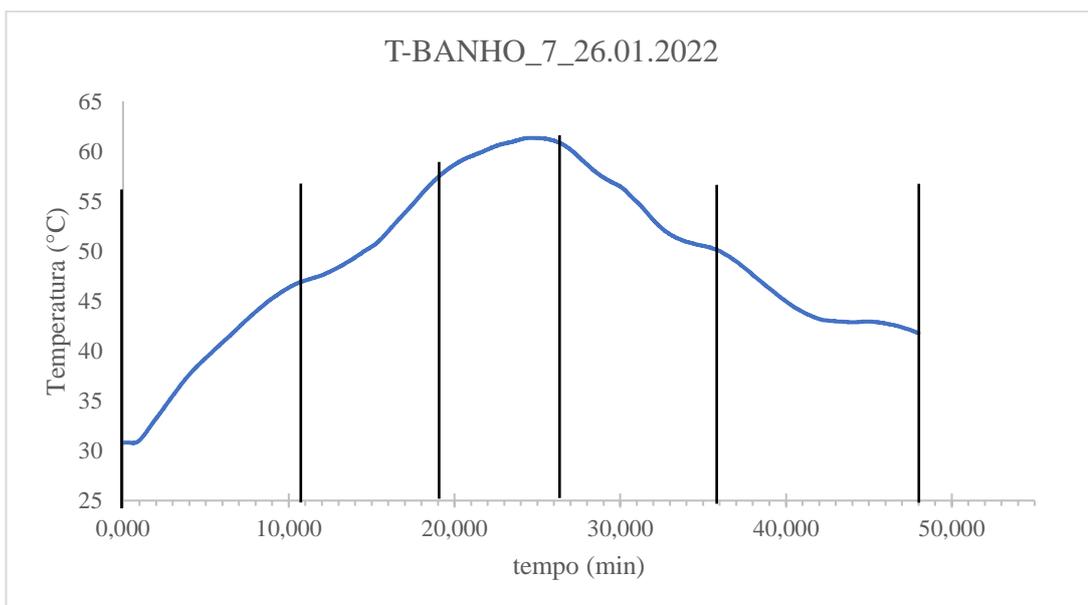
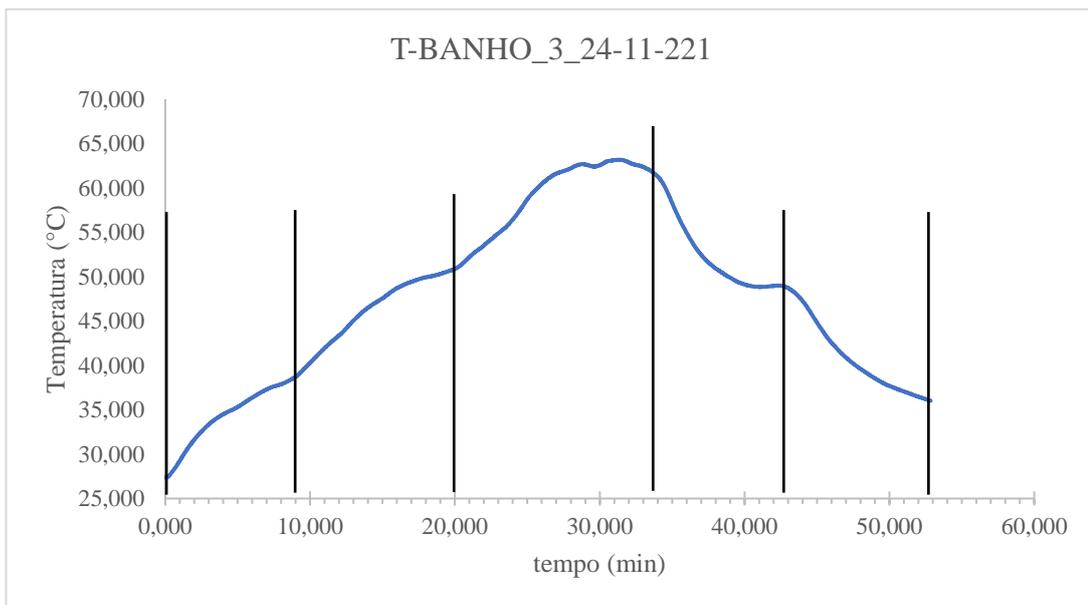
Entrada do vasilhame pelo lado direito

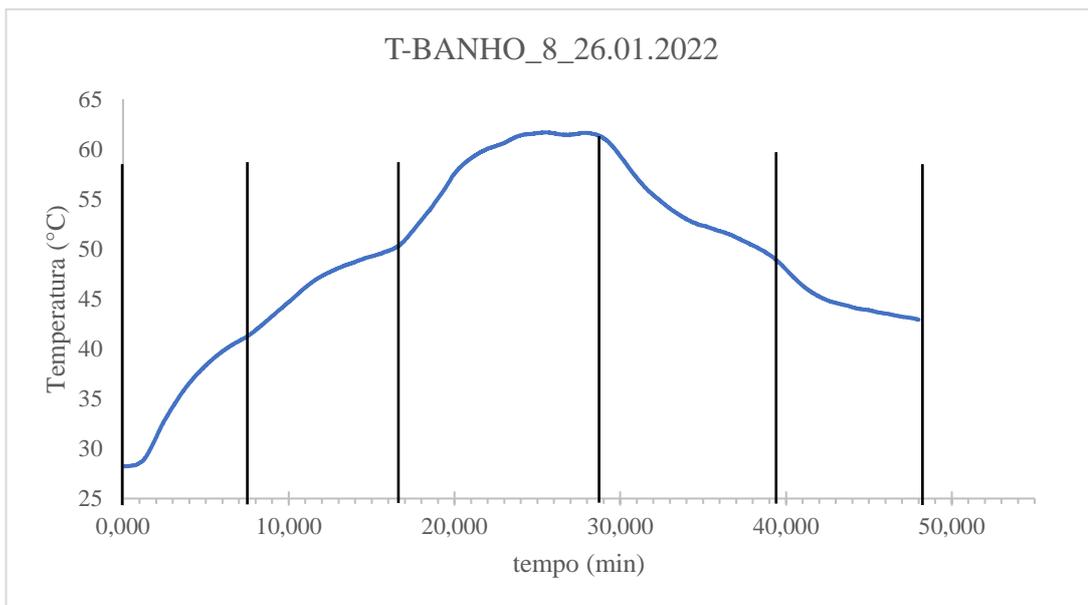


Entrada do vasilhame pelo lado direito

**APENDICE B – Gráficos para determinação dos patamares para o cálculo dos tamanhos das zonas do pasteurizador, com o vasilhame entrando pelo lado direito**







**APENDICE C – Tabelas dos resultados dos testes de determinação de UP, calculados a partir dos dados de temperatura medidos pelo sistema do pasteurizador e tempos de duração do processo**

Teste 1				
zonas	T (°C)	t (min)	ganho de UP	somatório de UP
1	47,1	12,0	0,1668	0,1668
2	48,7	12,0	0,2835	0,4503
3	58,0	12,0	6,1841	6,6344
4	48,7	12,0	0,2835	6,9179
5	47,1	12,0	0,1668	7,0847

Teste 2				
zonas	T (°C)	t (min)	ganho de UP	somatório de UP
1	40,9	10,0	0,0178	0,0178
2	47,2	10,0	0,1437	0,1615
3	58,0	10,0	5,1534	5,3149
4	47,2	10,0	0,1437	5,4586
5	40,9	10,0	0,0178	5,4764

Teste 3				
zonas	T (°C)	t (min)	ganho de UP	somatório de UP
1	41,7	8,0	0,0186	0,0186
2	45,7	8,0	0,0699	0,0885
3	58,8	8,0	5,3746	5,4631
4	45,7	8,0	0,0699	5,5330
5	41,7	8,0	0,0186	5,5516

Teste 4				
zonas	T (°C)	t (min)	ganho de UP	somatório de UP
1	42,5	12,0	0,0363	0,0363
2	45,6	12,0	0,1015	0,1378
3	58,8	12,0	8,0619	8,1997
4	45,6	12,0	0,1015	8,3012
5	42,5	12,0	0,0363	8,3375

Teste 5				
zonas	T (°C)	t (min)	ganho de UP	somatório de UP
1	41,7	12,0	0,0279	0,0279
2	47,9	12,0	0,2175	0,2453
3	58,9	12,0	8,3336	8,5790
4	47,9	12,0	0,2175	8,7964
5	41,7	12,0	0,0279	8,8243

Teste 6				
zonas	T (°C)	t (min)	ganho de UP	somatório de UP
1	43,2	10,0	0,0382	0,0382
2	45,7	10,0	0,0874	0,1256
3	58,8	10,0	6,7183	6,8438
4	45,7	10,0	0,0874	6,9312
5	43,2	10,0	0,0382	6,9694