

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUGUSTO KOGA  
FELIPE BERGENER GUIMARÃES DOS SANTOS  
LUCAS BRIZOLLA PROENÇA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO  
DE MOSTO PARA UMA NANOCERVEJARIA COM FOCO NO  
DESPERDÍCIO MÍNIMO DE ÁGUA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

AUGUSTO KOGA  
FELIPE BERGENER GUIMARÃES DOS SANTOS  
LUCAS BRIZOLLA PROENÇA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO  
DE MOSTO PARA UMA NANOCERVEJARIA COM FOCO NO  
DESPERDÍCIO MÍNIMO DE ÁGUA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Carlos Cziulik, Ph.D.

CURITIBA

2018

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE MOSTO PARA UMA NANOCERVEJARIA COM FOCO NO DESPERDÍCIO MÍNIMO DE ÁGUA", realizado pelo alunos AUGUSTO KOGA, FELIPE BERGENER GUIMARÃES DOS SANTOS e LUCAS BRIZOLLA PROENÇA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Carlos Cziulik

Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC

Orientador

Prof. Dr. Moisés Marcerlino Alves Neto

Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC

Avaliador

Prof. Dr. David Kretschek

Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC

Avaliador

Curitiba, 07 de dezembro de 2018.

O Termo de Aprovação assinado encontra-se em arquivo da coordenação

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, que nos trouxe até esta etapa da graduação com ânimo e saúde para concluir tal projeto.

Agradecemos também ao sempre atencioso e paciente professor Carlos Cziulik, sem o qual este projeto não teria o sucesso que teve, pois “quem não mede, não sabe onde está”.

Agradecemos em especial e particularmente aos caros e prestativos amigos Bruno Almeida de Sousa e Marcelo Vinícius Verona de Freitas, os quais estiveram sempre presentes e apoiando a execução deste projeto.

Por fim, agradecemos aos amigos e familiares pela compreensão nas ausências ao longo deste ano, em função da dedicação à conclusão desta árdua, porém gratificante jornada.

*"Era um homem sábio aquele que inventou a cerveja."*

***Platão***

*"Vender uma cerveja ruim é um crime contra o amor cristão."*

***13ª lei da Cidade de Augsburg***

## RESUMO

KOGA, Augusto, SANTOS, Felipe Bergener Guimarães, PROENÇA, Lucas Brizolla. Projeto e construção de um sistema de resfriamento de mosto para uma nanocervejaria com foco no desperdício mínimo de água. 196 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A fabricação de cervejas segue os mesmos padrões e etapas há séculos, tendo apenas incorporado aos seus processos novas tecnologias. A produção artesanal da bebida vem se expandindo no Brasil com o surgimento de novos produtores, buscando sempre inovação e qualidade em seus produtos. Uma das principais etapas do processo de fabricação está no resfriamento após a fervura, crucial para se evitar defeitos técnicos no produto final. Os métodos de resfriamento de mosto existentes para microcervejarias são caros para aplicações em nanocervejarias, pois requerem alto investimento que se justificam apenas com volumes elevados de produção. Tendo em vista a falta de sistemas de resfriamento que atendam nanocervejarias de forma eficiente e sem desperdício de água, é necessário o desenvolvimento de uma solução que atenda tal demanda. O objetivo é desenvolver um sistema de resfriamento de mosto cervejeiro que atenda às necessidades técnicas da cervejaria e, simultaneamente, evite o desperdício de água, bem de consumo essencial para a sociedade. Portanto, a partir do levantamento das necessidades do cliente e dos requisitos técnicos do projeto, foi desenvolvida uma concepção de sistema de resfriamento, sendo então construído um protótipo e realizado teste de funcionamento do produto. Após realizado o processo de resfriamento, com o objetivo de se testar o sistema, obteve-se um resultado satisfatório, porém, com uma variação pequena na temperatura de saída do mosto, devida a fatores que são descritos ao final do presente trabalho. Todavia, os resultados obtidos são satisfatórios para os requisitos técnicos de produção de cerveja.

**Palavras-chave:** Cerveja. Mosto. Resfriamento. Metodologia de Projeto.

## ABSTRACT

KOGA, Augusto, SANTOS, Felipe Bergener Guimarães, PROENÇA, Lucas Brizolla. Design and construction of a wort cooling system focusing on minimum water waste. 196 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The brewing industry has followed the same standards and steps for centuries, having only incorporated new technologies into its processes. The beer craft industry has been expanding in Brazil with new breweries constantly pursuing innovation and quality in their products. One of the main steps in the beer manufacturing process is wort cooling after the boil, essential to avoid defects in the final product. Existing wort cooling methods for nanobreweries and microbreweries are expensive because they require high investments that are only justified by high volumes of production. In view of a lack of cooling systems that efficiently attends to the needs of nanobreweries and microbreweries without wasting water, it is necessary to develop a solution that can meet such a demand. The objective of the study is to develop a cooling system for beer wort that attends to breweries' technical requirements while, at the same time, avoids wasting water, an essential commodity in present society. Starting from a survey of a client's needs which included essential technical requirements, a cooling system was designed and developed, and a prototype was built to carry out production tests. After the cooling process has finished, with the objective of testing the system, a satisfactory result was obtained, although with a small variation in the must temperature, due to factors that are described at the end of the present study. However, the obtained results are satisfactory for the technical requirements of the beer production.

**Keywords:** Beer. Wort. Cooling. Project methodology.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Trocador de calor tubular por imersão.	39
Figura 2 – Trocador de calor de casco e tubos.	39
Figura 3 – Placa de trocador de calor de placas.	40
Figura 4 – Placa de trocador de calor de placas gaxetado.	40
Figura 5 – Ilustração de aletas em trocadores de calor.	41
Figura 6 – Trocador de calor de imersão.	43
Figura 7 – Trocador de calor de placas.	44
Figura 8 – Trocador de calor de contra fluxo.	44
Figura 9 – Reaproveitamento de água para lavagem de garrafas.	48
Figura 10 – Sistema de captação de água da chuva em um telhado.	53
Figura 11 – Sistema de resfriamento atual da nanocervejaria em estudo.	54
Figura 12 – Espaço físico da nanocervejaria em estudo.	55
Figura 13 – Sistema idealizado.	69
Figura 14 – Ilustração dos parâmetros $b$ , $t$ e $p$ .	74
Figura 15 – Parâmetros dos trocadores de calor.	81
Figura 16 – Parâmetros do sistema.	82
Figura 17 – Trocas térmicas e propriedades dos fluídos.	83
Figura 18 – Quantidades de calor e propriedades dos fluídos.	84
Figura 19 – Ilustração dos trocadores de calor e temperaturas de trabalho.	85
Figura 20 – Botões interativos.	85
Figura 21 – Localização do reservatório termodinâmico.	92
Figura 22 – Catálogo Fortlev.	93
Figura 23 – Deslocamento de mosto.	98
Figura 24 – Posicionamento da bomba de mosto.	98



Figura 25 – Posição dos trocadores em relação à bomba de mosto.	99
Figura 26 – Posicionamento dos tubos a partir da caixa d'água.	101
Figura 27 – Modelo de tubulação junto ao banco de água fria.	102
Figura 28 – Ilustração do trajeto entre o refrigerador e o fermentador.	103
Figura 29 – Diagrama elétrico do sistema.	104
Figura 30 – Posicionamento dos trocadores de calor no modelo virtual.	122
Figura 31 – Posicionamento dos trocadores de calor no modelo virtual.	122
Figura 32 – Conexão dos trocadores de calor com o reservatório termodinâmico.	123
Figura 33 – Conexão dos trocadores de calor com o banco de água fria.	124
Figura 34 – Montagem da bomba submersa no reservatório termodinâmico.	126
Figura 35 – Saída e retorno de tubulação do banco de água fria sem isolamento térmico.	127
Figura 36 – Saída e retorno de tubulação do banco de água fria com isolamento térmico.	128
Figura 37 – Tubulação de saída e retorno de água para o banco de água fria.	129
Figura 38 – Layout virtual do sistema de resfriamento na nanocervejaria.	130
Figura 39 – Layout físico do protótipo – banco de água fria e tubulação rígida.	131
Figura 40 – Layout físico do protótipo – Trocadores de calor.	131
Figura 41 – Resultados da planilha de cálculo.	133
Figura 42 – Resultados da planilha de cálculo em formato PDF.	133
Figura 43 – Temperatura obtida com o resfriamento.	134
Figura 44 – Restos da fervura depositados no fundo da panela.	136
Figura 45 – Diagrama esquemático da proposta concebida.	150
Figura 46 – Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema.	191
Figura 47 – Receita de fabricação de cerveja	196

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de água por ppm de íons presentes.	50
Tabela 2 – Características do trocador de placa planas.	67
Tabela 3 – Parâmetros dos trocadores de calor.	68
Tabela 4 – Características do trocador de placa planas.	89
Tabela 5 - Temperaturas desejadas no segundo trocador de calor.	90
Tabela 6 – Modelos e preços de refrigeradores.	94
Tabela 7 – Lista de materiais projeto elétrico.	105
Tabela 8 - Tabela com temperaturas de operação do sistema.	189
Tabela 9 - Lista de materiais utilizados.	194

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Necessidades dos clientes.	58
Quadro 2 - Parâmetros técnicos das necessidades dos clientes.	59
Quadro 3 - Requisitos dos clientes associados a objetivos e metas.	60
Quadro 4 – Materiais para tubulações.	87
Quadro 5 - Modelos e preços de bombas.	95
Quadro 6 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor	109
Quadro 7 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 2°C - <i>A/e</i> .	109
Quadro 8 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 17°C - <i>A/e</i> .	110
Quadro 9 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor.	110
Quadro 10 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor.	112
Quadro 11 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor.	112
Quadro 12 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 20°C e lotes de 150 litros - <i>Lager</i> .	113
Quadro 13 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 20°C e lotes de 120 litros - <i>Lager</i> .	113
Quadro 14 - Temperatura de entrada d'água no segundo trocador sem a atuação do primeiro trocador.	115
Quadro 15 - Comprimentos e funções de transferência.	124
Quadro 16 - Reservatório termodinâmico virtual e protótipo.	125
Quadro 17 - Materiais utilizados.	126
Quadro 18 - Lista de materiais do subsistema.	129
Quadro 19 – Comparativo de bombas para mosto cervejeiro.	187

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CAMRA	<i>Campaign for Real Ale</i> (Campanha por cerveja de verdade)
DMS	Dimetilsulfureto
SMM	S-Metil-Metionina
DMSO	Dimetilsulfóxido
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
PVC	Policloreto de Vinila
°C	Grau Celsius
l	Litro
h	Hora
kg	Quilograma
s	Segundo
W	Watts
K	Kelvin
N	Newton
J	Joule
A	Ampère

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	CONTEXTO DO TEMA .....	16
1.2	CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE .....	17
1.3	OBJETIVOS .....	17
1.3.1	Objetivos específicos .....	18
1.4	JUSTIFICATIVA .....	18
1.5	ABORDAGEM METODOLÓGICA .....	18
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
2	CERVEJA: CONTEXTO .....	21
2.1	CERVEJA: CLASSIFICAÇÕES .....	21
2.2	CERVEJA: HISTÓRIA .....	22
2.2.1	Antiguidade .....	22
2.2.2	Idade antiga .....	22
2.2.3	Idade moderna .....	23
2.2.4	Idade contemporânea .....	24
2.3	PROCESSO PRODUTIVO DE CERVEJA .....	26
2.3.1	Moagem .....	26
2.3.2	Brassagem .....	27
2.3.3	Recirculação e lavagem .....	28
2.3.4	Fervura .....	29
2.3.5	Resfriamento .....	30
2.3.6	Fermentação .....	30
2.3.7	Maturação .....	31
2.3.8	Envase .....	31
2.4	DEFEITOS NA CERVEJA .....	32
2.4.1	Dimetilsulfureto .....	32
2.4.2	Clorofenol .....	34
2.4.3	Diacetil .....	34
2.4.4	Butírico .....	35
2.5	TROCADORES DE CALOR .....	36
2.5.1	Recuperadores / regeneradores .....	36
2.5.2	Processos de transferências: contato direto / indireto .....	37
2.5.3	Mecanismos de transferência de calor .....	37
2.5.4	Tipos de corrente: paralela, contra fluxo e cruzada .....	37
2.5.5	Geometria de construção .....	38
2.6	MÉTODOS DE RESFRIAMENTO DE MOSTO .....	41
2.6.1	Imersão em água com gelo .....	42
2.6.2	Trocador de calor de tubos de imersão .....	42

2.6.3	Trocador de calor de placas .....	43
2.6.4	Trocador de calor de contra fluxo .....	44
2.7	CONSUMO DE ÁGUA .....	45
2.7.1	Consumo de água – Impactos na sociedade .....	45
2.7.2	Desperdício de água no processo de produção agrícola de bens primários para a produção de cerveja .....	46
2.7.3	Consumo de água no processo de fabricação de cerveja .....	47
2.7.4	Água como ingrediente da cerveja .....	49
2.7.5	Água no processo de produção de cerveja .....	51
2.7.6	Sistemas de captação de água da chuva em estabelecimentos cervejeiros .....	52
2.8	CONSTRUÇÃO ATUAL .....	54
2.8.1	Sistema de resfriamento atual .....	54
2.8.2	Espaço físico .....	55
2.9	CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE .....	55
3	PROJETO INFORMACIONAL .....	57
3.1	LEVANTAMENTO DAS NECESSIDADES DO CLIENTE .....	57
3.1.1	Técnica para obtenção de informações .....	57
3.1.2	Necessidades do Cliente .....	58
3.2	REQUISITOS DA QUALIDADE .....	59
3.3	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO .....	59
3.3.1	Vazão e temperatura do mosto .....	62
3.3.2	Custos e Investimentos .....	62
3.3.3	Ergonomia .....	63
3.3.4	Limpeza após o processo de produção .....	63
3.4	SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE RESFRIAMENTO .....	65
3.4.1	Imersão em água com gelo .....	65
3.4.2	Trocador de calor de tubos por imersão .....	66
3.4.3	Trocador de placas .....	66
3.4.4	Trocador de calor por contra fluxo .....	67
3.4.5	Seleção do trocador de calor .....	68
4	PROJETO CONCEITUAL E PRELIMINAR .....	69
4.1	CONCEITO .....	69
4.1.1	Diagrama esquemático da proposta concebida .....	70
4.1.2	Dimensionamento térmico .....	70
4.1.3	Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema .....	80
4.1.4	Seleção de componentes .....	86
4.1.5	Projeto Mecânico .....	97
4.1.6	Projeto Elétrico .....	103
5	ANÁLISE E REVISÃO DO PROJETO .....	106
5.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	106

5.1.1	Temperatura ambiente no dia de fabricação.....	108
5.1.2	Volume de mosto a ser resfriado.....	111
5.1.3	Quantidade de água no reservatório termodinâmico .....	113
5.1.4	Densidade do mosto.....	115
5.1.5	Temperatura da água de resfriamento do segundo trocador.....	115
5.1.6	Materiais utilizados no projeto .....	116
5.2	REVISÃO DO PROJETO .....	117
5.2.1	Risco de congelamento .....	117
5.2.2	Perda de temperatura em tubulações .....	118
5.3	FMEA .....	119
6	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA .....	121
6.1.1	Trocadores de calor.....	121
6.1.2	Banco de água fria.....	126
7	TESTES E DISCUSSÕES .....	132
7.1	TESTE DO SISTEMA .....	132
7.2	DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS .....	135
7.2.1	Discussão acerca da utilização do sistema.....	138
8	CONCLUSÕES.....	140
8.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	141
	REFERÊNCIAS .....	142
	APÊNDICE A – ENTREVISTA COM PROPRIETÁRIOS DA CERVEJARIA... ..	147
	APÊNDICE B – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO .....	150
	APÊNDICE C – CÓDIGO PARA PROGRAMAÇÃO DE CÁLCULOS .....	151
	APÊNDICE D – QUADRO COMPARATIVO DE BOMBAS.....	187
	APÊNDICE E – TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	189
	APÊNDICE F – PLANILHA DE CÁLCULOS TERMODINÂMICOS.....	191
	APÊNDICE G – FMEA.....	192
	APÊNDICE H – RELAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS.....	194
	APÊNDICE I – RECEITA DE FABRICAÇÃO DE CERVEJA .....	196

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO DO TEMA

A cerveja como a conhecemos, uma bebida fermentada de cereais, tem suas origens em cerca de 7.000 a.C. (OLIVER, 2012), e vem sendo aprimorada com o passar dos anos até os dias de hoje, passando por melhorias em seus ingredientes, inovações nos estilos e também melhorias nos processos de fabricação.

Desde o final dos anos 1980, iniciou-se um movimento crescente de fabricação de cervejas de forma artesanal, iniciado nos Estados Unidos, porém que se estendeu por todo o mundo, inclusive no Brasil (BELTRAMELLI, 2015).

O mercado brasileiro de cervejas artesanais vem crescendo ano a ano e ainda apresenta oportunidades de negócio para produtos inovadores, mas principalmente para produtos de qualidade, que fidelizem seus clientes através de boas cervejas com repetibilidade e padronização.

Além das microcervejarias, há um nicho de mercado ainda tímido, porém crescente, de nanocervejarias que visam atender o mercado apenas em seu entorno, nos limites do município e cidades próximas, com configurações de produção em menor volume que nanocervejarias, porém com a mesma qualidade de produtos.

A nanocervejaria Giramundo se enquadra neste quesito, localizada na cidade de Curitiba e com proposta de atender a demanda local, com produtos de alta qualidade e baixos volumes.

Apesar de a forma de se fazer cerveja se manter basicamente a mesma nos últimos 300 anos haver se estabelecido um padrão de fabricação de cerveja que é seguido até hoje, com os mesmos passos, as inovações tecnológicas vem sendo incorporadas às cervejarias, facilitando e melhorando os processos produtivos.

Dentre as etapas do processo de produção de cerveja, uma das mais importantes é a de resfriamento após a fervura, pois nesta etapa podem surgir diversos defeitos técnicos que irão se tornar evidentes no produto final, impactando diretamente na qualidade da cerveja e na percepção do cliente.



## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE

Existem diversos sistemas de troca térmica conhecidos pela engenharia mecânica, variando em tamanho, material, construção, capacidade de troca térmica, entre outros diversos fatores. Desses sistemas, alguns são utilizados na indústria cervejeira e alimentícia, atendendo à padrões de funcionamento estabelecidos pelos usuários.

Porém, tais sistemas são de custo elevado e desenvolvidos para atender a grandes volumes de produção, justificando altos investimentos. Nanocervejarias e cervejeiros caseiros utilizam, geralmente, métodos arcaicos de resfriamento, como imersão de painéis em recipientes com gelo, ou imersão de serpentinas tubulares na panela de fervura, métodos ineficientes e que ainda trazem o risco de acidentes graves, como queimaduras devido o contato com o mosto cervejeiro fervente.

A nanocervejaria Giramunddo utiliza um sistema de resfriamento denominado de contra fluxo tubular, que consiste em duas tubulações, onde uma utilizado para fluxo de mosto está envolta por outro tubo por onde há fluxo de água em sentido cruzado, realizando a troca térmica com o tubo interior. O sistema é ineficiente sob diversos aspectos. Pois não atinge a temperatura adequada de resfriamento, proporciona um resfriamento lento e consome um alto volume de água no processo.

A partir destas evidências, percebe-se uma oportunidade para o desenvolvimento de um sistema de resfriamento de mosto cervejeiro que atenda às especificações técnicas de fabricação de cerveja e, simultaneamente, reduza ao máximo o desperdício de água que a cervejaria possui hoje.

## 1.3 OBJETIVOS

Desenvolver o projeto e o protótipo de um sistema de resfriamento de mosto cervejeiro que atenda aos requisitos técnicos de fabricação de cervejas sem geração de defeitos e com o mínimo desperdício de água no processo. Para este trabalho, o sistema a ser desenvolvido será focado na nanocervejaria Giramunddo, porém o sistema deve ser de fácil aplicação em qualquer nanocervejaria.

### 1.3.1 Objetivos específicos

- a) Resfriamento de mosto dentro do tempo especificado pelos requisitos técnicos;
- b) Resfriamento do mosto até atingir a temperatura necessária para inoculação de fermento tanto para cervejas do tipo *Alé* quanto do tipo *Lager*;
- c) Reduzir ao máximo possível o desperdício de água no processo de resfriamento;
- d) Desenvolver um sistema de baixo custo, que não necessite de grandes investimentos em sua construção.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Com os dados apresentados, o desenvolvimento de um sistema de resfriamento de mosto para nanocervejarias que atenda aos requisitos técnicos de produção e evite o desperdício de água, pode ser justificado por:

- a) Equiparação competitiva com microcervejarias quanto à qualidade do produto percebida pelo consumidor;
- b) Desenvolvimento de um sistema de resfriamento financeiramente acessível e viável para nanocervejarias com baixos volumes de produção;
- c) Redução do consumo de água de processo, não apenas para ganhos financeiros no processo, mas também como consciência ambiental em relação à escassez de água em regiões do país e do planeta.

## 1.5 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Será utilizada metodologia similar à sugerida pelos autores Pahl *et al.* (2005), com adaptações feitas de forma a se atender a realidade deste projeto, e utilizando

outras ferramentas de apoio nos momentos adequados. A abordagem inicia-se com extensa revisão da bibliografia em relação à fabricação de cervejas e de onde surgem os defeitos no produto. Também são abordados os diversos tipos de transferência térmicas conhecidos pela engenharia mecânica e as ferramentas de troca de calor com embasamento teórico para utilização prática. Um modelo conceitual é proposto para solucionar a situação problema da nanocervejaria em estudo, e os materiais e componentes necessários para atender às funções especificadas são selecionados para melhor atender ao funcionamento do sistema.

O conceito é então modelado de forma teórica sob o ponto de vista térmico e projetado virtualmente com auxílio de *softwares* para construção mecânica e elétrica. O protótipo é construído com base nos projetos mecânico e elétrico e colocado à prova em situação real de uso para teste do conceito e dos cálculos térmicos realizados. Os resultados obtidos são avaliados, apresentados e discutidos.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O contexto geral do trabalho e seus objetivos principais foram apresentados neste primeiro capítulo. O Capítulo 2 irá apresentar todo o contexto da fabricação de cervejas e o mercado de micro e nanocervejarias no Brasil e, particularmente, em Curitiba. Ainda no Capítulo 2 é abordado o tema de desperdício uso da água, não apenas na indústria cervejeira, mas também seus impactos na sociedade como um todo.

No Capítulo 3 são levantadas as necessidades do cliente e os requisitos técnicos, sendo desdobrados em parâmetros de engenharia que deverão ser atendidos pelo projeto. Já, no Capítulo 4 é apresentado um modelo conceitual como proposta para desenvolvimento do sistema de resfriamento, os cálculos termodinâmicos envolvidos na proposta concebida, a seleção dos componentes para o sistema e, finalmente, o projeto mecânico e elétrico da concepção.

O quinto capítulo conta com uma análise do projeto, verificando se o projeto é sensível a fatores externos que possam comprometer o funcionamento do sistema e são feitas revisões no projeto para se minimizar o impacto destas variáveis. É feita

ainda uma análise de possíveis modos de falha no modelo e quais ações podem ser previstas para se evitar tais falhas.

O Capítulo 6 apresenta de forma detalhada a construção do protótipo com base no modelo proposto, contando com a lista de materiais completa para seu desenvolvimento. O Capítulo 7 descreve o teste realizado com o protótipo, apresentando os resultados e discutindo os dados obtidos. Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões sobre o trabalho.

## 2 CERVEJA: CONTEXTO

Neste capítulo serão abordadas algumas informações com o objetivo de se construir uma base de dados necessários para a solução da oportunidade. Inicialmente, será apresentada uma breve história da cerveja e sua relação com a humanidade ao longo das eras. Posteriormente, serão descritos alguns dos processos produtivos mais comuns empregados.

### 2.1 CERVEJA: CLASSIFICAÇÕES

Basicamente, a cerveja pode ser considerada como uma bebida fermentada à base de cereais, fabricada a partir da extração de açúcares de grãos maltados e expostos à ação de leveduras, fungos que promovem fermentação alcoólica através de processos biológicos. Quanto ao processo de fermentação, as cervejas podem ser classificadas em três grandes grupos: *Lagers*, *Ales* e *Lambics*, separação feita de acordo com o tipo de fermentação:

- a) *Lagers*: cervejas fermentadas pelas leveduras do tipo *Saccharomyces Pastorianus*, que trabalham em temperaturas de 8 a 12 graus Celsius (BELTRAMELLI, 2015);
- b) *Ales*: são cervejas em que as leveduras utilizadas são da família *Saccharomyces Cerevisiae*, em que o processo de fermentação ocorre em temperaturas de 16 a 20 graus Celsius (BELTRAMELLI, 2015);
- c) *Lambics*: considerada uma família à parte em relação às duas primeiras, as *Lambics* são cervejas de “fermentação espontânea”. Ou seja, cervejas em que não há controle de quais leveduras são adicionadas ao mosto. A fermentação ocorre em tanque abertos, onde diversos micro-organismos presentes no ambiente se depositam sobre a cama de mosto, realizando o processo de fermentação e conferindo aromas e sabores únicos a cada repetição do processo, mesmo com a mesma base de maltes e lúpulos. Porém, este processo ocorre de forma eficaz apenas na região do Vale do Rio Senna, em Bruxelas, na Bélgica, devido a uma fauna de micro-

organismos locais específicos, como a espécie *Brettanomyces Bruxellensis*, que não é encontrada em nenhum outro local do mundo. Atualmente, essa levedura já foi isolada e pode ser utilizada em qualquer região do planeta. Porém sem o restante dos micro-organismos da região de Bruxelas, a cerveja é simplesmente considerada uma cerveja azeda feita com *Brettanomyces*, e não uma *Lambic* propriamente dita (BELTRAMELLI, 2015).

## 2.2 CERVEJA: HISTÓRIA

### 2.2.1 Antiguidade

Bebidas de cereais fermentadas surgiram em diversos povos ao redor do mundo em diversas épocas. Porém, a cerveja como se conhece hoje, surgiu na região da Suméria em torno do ano 7.000 antes de Cristo, e acredita-se que a bebida foi descoberta completamente por acaso quando um camponês esqueceu grãos de cevada em um pote na chuva e, após alguns dias, a água da chuva e os grãos foram fermentados por micro-organismos presentes no ambiente. A bebida fermentada e, conseqüentemente, o álcool presente trouxe uma sensação que até então os humanos desconheciam, um leve estado de torpor e relaxamento. O desejo de replicar esta sensação fez com que os camponeses passassem a estudar e aprimorar a fabricação da bebida e dos ingredientes (OLIVER, 2012).

Com a melhora nos processos de fabricação e plantio, além da necessidade de se manter próximos às plantações de cevada, trigo e outros grãos, pode-se afirmar que a cerveja contribuiu diretamente para o desenvolvimento da agricultura e fixação de comunidades na antiguidade (OLIVER, 2012).

### 2.2.2 Idade antiga

Com o passar do tempo, e com o aprimoramento da bebida, os fabricantes se espalharam pela região do oriente médio e do norte da África, chegando ao Egito em

torno do ano 3.000 a.C., tendo tanta relevância na cultura local que chegou a ser utilizada como moeda e forma de pagamento aos trabalhadores na construção das pirâmides (OLIVER, 2012).

O primeiro contato da civilização europeia com a cerveja foi quando Alexandre, o Grande buscando a expansão da Grécia conquista o Egito em 332 a.C. e passa a apoiar fortemente a cultura e agricultura local, fazendo com que a cerveja entre definitivamente nas rotas comerciais existentes até então, contribuindo diretamente para que a bebida se espalhasse pela Europa (OLIVER, 2012).

Trezentos anos depois, os romanos tomam o Egito em busca de terras férteis e cereais. A cerveja, até então apreciada pelos egípcios e de grande valor comercial na Grécia, passa a ser considerada como bebida símbolo dos rivais que foram conquistados, portanto uma bebida inferior (OLIVER, 2012).

Já durante a idade média, os rios eram extremamente poluídos com esgoto e dejetos das comunidades que se estabeleciam ao redor. Portanto, beber água do rio era uma atitude muito perigosa, trazendo severos riscos à saúde. A cerveja, por contar com uma fase de fervura no seu processo e, conseqüentemente, esterilização do líquido, era uma bebida segura e muito nutritiva, e por seu baixo custo mais fácil de produzir do que o vinho. As igrejas e monastérios, que detinham o conhecimento dos processos e também contavam com plantações, passaram a fabricar a bebida para distribuir para as comunidades ao redor dos monastérios (OLIVER, 2012).

### 2.2.3 Idade moderna

Além da Igreja Católica, que dominava amplamente a produção da bebida, havia uma quantidade gigantesca de pequenos produtores espalhados pela atual região da Bélgica, Áustria e, principalmente, Alemanha. Estas pequenas cervejarias, tão comuns e regionalizadas quanto padarias e mercearias, pagavam tributos elevadíssimos à igreja católica para utilização de alguns ingredientes, como o “*Gruit*”, mistura de ervas que conferia o amargor à bebida. Devido a esta alta tributação, os cervejeiros alemães passaram a buscar alternativas, até descobrir que o lúpulo seria o ingrediente perfeito em substituição ao *Gruit*.

Com esta “fuga” aos impostos, as cervejarias passaram a prosperar e crescer, fazendo frente aos antigos mosteiros, fortalecendo famílias de cervejeiros e propagando ainda mais a cultura, principalmente, na Alemanha e na Bélgica (BELTRAMELLI, 2015).

#### **2.2.4 Idade contemporânea**

Desde o século XVII, iniciou-se na Europa um movimento de imigração para a América, tanto do Sul quanto do Norte, para as colônias de Espanha e Portugal ao sul e para as colônias da Inglaterra, ao norte. Tanto no Sul quanto no Norte, houve um grande volume de imigrantes alemães e ingleses, que levaram com eles a tradição da cerveja e dos processos produtivos.

Na América do Norte, as cervejarias passaram a se multiplicar até atingir a marca de cerca de 1.500 cervejarias em 1910. Porém, em 1920, com o advento da Lei Seca nos Estados Unidos da América, todas as cervejarias, independente do tamanho, encerraram suas atividades em relação à cerveja. Algumas se tornaram fabricantes de alimentos, enquanto outras passaram a focar em outras bebidas, como chás, sucos e refrigerantes. Ao final da Lei Seca, em 1933, apenas alguns grupos possuíam capacidade financeira para voltar a fabricar cerveja, e o foco passou a ser em cervejas extremamente baratas, refrescantes e com sabor massificado que pudesse atingir o maior número possível de consumidores. De 1933 a 1970, estes grupos prosperaram e passaram a impor uma cerveja sem sabor, sem aromas, e sem nenhuma característica nutritiva nos Estados Unidos e, devido à importância econômica do país e capacidade financeira dos fabricantes, ao redor mundo (BELTRAMELLI, 2015).

A cerveja que até então era uma bebida cultural, nutritiva e saborosa, foi substituída por uma bebida feita com o mínimo de sabor e sem nenhum valor nutritivo para atender ao maior público possível apenas como uma bebida refrescante e barata. Esta nova forma de produzir e consumir cerveja se espalhou não só pelos Estados Unidos, mas também por países sem tradição em fabricação na bebida, como o Brasil, e alguns países europeus com maior influência comercial dos Estados Unidos, como a Inglaterra.



Em 1970 surgiu na Inglaterra um grupo chamado CAMRA – *Campaign for Real Ale*, grupo de cervejeiros que buscava recuperar a tradição cervejeira do país, fazendo cervejas de acordo com as tradições das antigas cervejarias inglesas, para ser uma opção em relação às cervejas massificadas que dominavam o mercado da época (HINDY, 2014).

Acompanhando o movimento surgido na Inglaterra, nos anos 1980 as microcervejarias voltaram a surgir nos Estados Unidos, trazendo cervejas de qualidade e principalmente com diversidade para o público local. As microcervejarias que chegaram a desaparecer em 1920 voltaram a surgir com força no mercado norte-americano, chegando a cerca de 300 em 1990 e dando um salto gigantesco para quase 1.500 microcervejarias legalmente estabelecidas no ano 2.000, e continuando com a expansão do mercado de cervejas artesanais até chegar a 3.040 microcervejarias em 2014, de acordo com dados da *Brewers Association*, associação das microcervejarias independentes dos Estados Unidos (HINDY, 2014).

Em comparação, no Brasil havia apenas cinco microcervejarias em 1990, número que passou a 300 em 2015, cerca de apenas 10% do existente atualmente nos Estados Unidos. Além disso, Curitiba é hoje considerada um dos principais polos cervejeiros do país, com diversas cervejarias mundialmente premiadas e reconhecidas por sua qualidade e inovação, além de um público grande, maduro e em constante crescimento em relação ao consumo de cervejas artesanais (BELTRAMELLI, 2015).

Dentro deste contexto, há um crescente movimento de cervejeiros, que buscam fabricar suas próprias cervejas de forma artesanal com processos caseiros. Alguns destes cervejeiros buscam expandir suas produções para níveis comerciais, passando a gerir nano e microcervejarias ao redor do país.

A diferença entre nano e microcervejarias não está essencialmente em seu tamanho físico, mas sim no volume produzido. São consideradas nanocervejarias as que produzem até mil litros de cerveja por mês, já as microcervejarias produzem de mil até 200 mil litros por mês. Acima deste volume o empreendimento já é considerado como uma cervejaria industrial (HOMINILUPULO, 2016).

Seguindo esta lógica, a nanocervejaria Giramunddo surgiu a partir de uma cervejaria até então caseira, buscando comercializar de forma legal suas cervejas para o público de Curitiba.

## 2.3 PROCESSO PRODUTIVO DE CERVEJA

Dentro de uma cervejaria, independentemente do porte ou volume de produção, o processo de fabricação de cerveja consiste, basicamente, de oito etapas:

- a) Moagem do malte;
- b) Brassagem;
- c) Recirculação e lavagem;
- d) Fervura;
- e) Resfriamento;
- f) Fermentação;
- g) Maturação;
- h) Envase.

Estes são os processos internos de uma cervejaria, e aqui não são considerados os processos de fabricação dos insumos, em que apenas alguns grandes grupos cervejeiros possuem controle (CANTWELL, 2013).

### 2.3.1 Moagem

O processo inicia-se com a moagem dos diversos tipos de cereais que serão utilizados no processo de fabricação, sendo o mais comum o malte de cevada. Todavia, também, são utilizados eventualmente outros cereais, como malte de trigo e de centeio e, também, estes mesmos cereais em sua forma natural, não maltada.

O malte de cevada é basicamente um grão de cevada que teve seu processo de germinação forçado através de maceração (umidificação dos grãos) e, então, subitamente interrompido através da secagem em diferentes temperaturas e tempos.

Essa variação de temperatura e tempo de secagem irá impactar no grau de torra do malte, indo desde maltes mais claros e com pouco açúcar em seu interior, até maltes torrados e com grande quantidade de açúcares no interior de cada grão (MALLET, 2014).

A moagem dos grãos de cevada é necessária para expor o endosperma do cereal, região que concentra os açúcares que deverão ser extraídos durante a brassagem. Apesar de aparentemente simples, tem grande impacto em todo o processo. A moagem deve ser conduzida de tal forma que a casca do malte seja quebrada, porém não triturada, assim como o interior do grão deve ser exposto, também não deve ser triturado. Uma moagem muito fina, com grãos triturados, irá ocasionar o entupimento do processo durante a recirculação, pois o mosto não conseguirá atravessar os grãos e seguir para o processo de fervura. Já uma moagem muito grossa fará com que não haja extração suficiente de açúcares, impactando diretamente no resultado final da cerveja (MALLET, 2014).

### 2.3.2 Brassagem

A brassagem é o processo onde haverá a extração dos açúcares do malte e sua conversão em açúcares fermentáveis. Os açúcares presentes nos cereais são considerados açúcares de cadeias longas, e não são consumidos pelas leveduras. Portanto, nesta etapa o malte é cozido em temperatura e tempos controlados, de acordo com o objetivo que o mestre-ervejeiro tem para a cerveja.

A temperatura de conversão de açúcares longos em açúcares fermentáveis varia de 64 a 67 graus Celsius, e essa conversão é realizada por enzimas presentes no próprio malte, que irão quebrar as cadeias longas, transformando-as em cadeias curtas consumíveis pela levedura cervejeira.

O tempo desta etapa específica irá determinar se a cerveja, ao final de todo o processo, será mais adocicada ou mais seca<sup>1</sup>. Por exemplo: em uma brassagem longa, haverá conversão de praticamente 100% do açúcar extraído em açúcar fermentável. Então, este açúcar será completamente consumido pelas leveduras e

---

<sup>1</sup> Cervejas secas são cervejas com baixa quantidade de açúcar, tornando a cerveja menos densa e causando uma sensação de secura na boca após um gole (MOSHER, 2009).

transformado em álcool, gerando uma cerveja praticamente sem açúcares e com teor alcoólico mais elevado do que uma cerveja que fosse produzida com os mesmos ingredientes, porém com uma brassagem mais curta. Neste segundo caso, restaria uma quantidade grande de açúcar na cerveja que não foi fermentado, trazendo dulçor para a bebida e, também um teor alcoólico menor devido a não conversão destes açúcares em álcool pelas leveduras (DANIELS, 1998).

### 2.3.3 Recirculação e lavagem

Durante a etapa de brassagem, a água quente irá extrair os açúcares do malte, como já mencionado, e estes açúcares permanecem diluídos no mosto que irá atingir um ponto de saturação. A partir deste ponto a água quente não irá mais extrair açúcares, e outra consequência da brassagem é que, por melhor que tenha sido feita a moagem dos grãos, haverá pó de malte (tanto de cascas quanto substratos) presente no líquido que, se for transferido às etapas seguintes, causará turbidez na cerveja, característica que não é desejada ao se analisar a aparência do produto concluído (DANIELS, 1998).

Para solucionar estas duas situações, é realizada a etapa de filtragem e lavagem. A filtragem consiste em retirar mosto pelo fundo da panela e despejá-lo novamente acima do malte em cozimento. Recomenda-se realizar este processo de forma contínua durante ao menos uma hora. Com este processo, o líquido que é removido pelo fundo da panela sairá turvo e cheio do pó e, ao jogar este líquido sobre a cama de grãos, as cascas de malte atuarão como um filtro natural, retendo este pó e fazendo com que o mosto saia cada vez mais límpido do fundo da panela.

Terminado este processo de filtragem para clarificação, o mosto começa a ser transferido para a panela de fervura, mantendo certa quantidade de mosto na panela de brassagem que seja suficiente para cobrir a cama de grãos. Inicia-se então o processo chamado de lavagem, onde, de forma contínua e proporcional, mosto é removido pelo fundo da panela de brassagem enquanto se adiciona água a 75°C sobre os grãos, mantendo a proporção entre o quanto é removido e o quanto é adicionado. Este processo tem por objetivo extrair resquícios de maltose que tenham permanecido no endosperma do malte, que não foram extraídos durante o processo

de brassagem. O volume de água a ser utilizado na brassagem é definido durante a receita pelo mestre cervejeiro de acordo com as características a serem alcançadas na cerveja pronta, e de acordo com a configuração de equipamento da cervejaria (DANIELS, 1998).

#### 2.3.4 Fervura

Com o mosto puro transferido para a panela seguinte, inicia-se o processo de fervura. Durante este processo é realizada a adição de lúpulo, especiaria que irá trazer o amargor à cerveja pronta, além de aromas específicos e até mesmo outras características em alguns casos específicos, como sabor e retrogosto<sup>2</sup>. A fervura tem, basicamente, três pontos fundamentais para o processo de fabricação de cerveja (DANIELS, 1998):

- a) Isomerização dos alfa-ácidos presentes no lúpulo, também chamados de lupulina, são os compostos que irão trazer o amargor à cerveja, porém eles não se dissolvem no mosto de forma simples. É necessário que o mosto esteja em temperatura de fervura, para que ocorra o processo químico de isomerização destes alfa-ácidos e então eles são dissolvidos de forma eficiente na bebida;
- b) Esterilização do mosto cervejeiro, para eliminação de bactérias e outros organismos que possam ter chegado até este ponto. Como o mosto cervejeiro é um líquido rico não apenas em açúcares, mas também em diversos nutrientes, ele é um ambiente extremamente propício para o desenvolvimento de bactérias e micro-organismos que possam estar presentes no ambiente. Por isso a necessidade de se esterilizar o mosto antes de se adicionar as leveduras;
- c) Evaporação de compostos não desejáveis que são extraídos do malte durante a brassagem. O principal composto que deve ser evaporado é o dimetilsulfureto, popularmente conhecido como "DMS". Este composto químico presente até então no mosto, se não for eliminado, irá fazer com que a cerveja possua um sabor e aroma inconfundível de legumes cozidos,

---

<sup>2</sup> Retrogosto: Gosto que permanece na boca depois que se toma a cerveja (MOSHER, 2009).

lembrando principalmente milho e repolho, o que é considerado um grave defeito em uma cerveja (DANIELS, 1998).

### 2.3.5 Resfriamento

Terminada a fervura, é imprescindível resfriar o mosto, que neste instante está em torno de 98°C, da forma mais rápida possível para em torno de, no mínimo, 25°C. A rapidez neste processo é necessária para evitar que o DMS se forme novamente no mosto. Um resfriamento adequado, sem chances de formação de DMS deve ser executado em menos de 25 minutos. Porém, resfriamentos realizados entre 25 e 30 minutos trazem resultados satisfatórios para o processo, pois a formação de DMS seria tão baixa que se tornaria praticamente imperceptível (DANIELS, 1998).

O DMS durante o resfriamento é formado a partir do S-metil-metionina (SMM), composto presente na casca do malte e que não é eliminado com a fervura. Este composto transforma-se em DMS em temperaturas acima de 30°C. Porém, essa transformação é acentuada acima de 70°C. Por isso, a necessidade de se resfriar o mosto de forma rápida, evitando ao máximo a formação de DMS (FIX, 1999).

Alcançada a temperatura de 25°C, elimina-se a chance de formação de DMS. Porém, ainda deve-se resfriar o mosto até a temperatura de inoculação do fermento. Esta temperatura é de 16 a 18°C para fermentos do tipo *ale* e de 8 a 10°C para fermentos do tipo *lager* (DANIELS, 1998).

### 2.3.6 Fermentação

Atingida a temperatura desejada, o fermento é adicionado ao mosto. O fermento irá consumir os açúcares extraídos durante a brassagem e, através de processos biológicos, transformá-lo em álcool e dióxido de carbono. A partir deste momento o líquido deixa ser apenas mosto e é efetivamente cerveja. Neste momento do processo, o dióxido de carbono é expelido do tanque de fermentação. A fermentação é considerada concluída quando não houver mais açúcares para

consumo por parte das leveduras, e o controle é feito através de medições periódicas da densidade da cerveja (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

### 2.3.7 Maturação

Encerrada a fermentação, as leveduras mortas que se depositam no fundo do tanque são removidas da cerveja, e esta é colocada em processo de maturação. Neste processo, a cerveja irá descansar a uma temperatura que geralmente é metade da temperatura de fermentação, com a finalidade de se arredondar o perfil aromático e de sabor da cerveja, fazendo com que eventuais defeitos decorrentes do processo sejam eliminados ou ao menos minimizados, além de decantar eventuais partículas sólidas que ainda estejam presentes nesta etapa, e evitar que estas partículas sejam transferidas para as garrafas, latas ou barris, garantindo um aspecto límpido e brilhante para o produto final (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

### 2.3.8 Envase

Para o envase, o recipiente a ser escolhido irá depender principalmente da estratégia comercial e logística da cervejaria, que poderá optar por acondicionar seu produto em barris, garrafas ou latas.

O envase pode ser feito de duas maneiras:

- 1) Enchimento por contrapressão: dióxido de carbono é adicionado de forma forçada à cerveja dentro dos tanques de maturação até que o gás esteja totalmente dissolvido dentro da cerveja, e a cerveja é então transferida ao seu recipiente já com o gás;
- 2) *Priming*: uma baixa quantidade de açúcar é adicionada ao recipiente junto com a cerveja ainda sem gás. As leveduras restantes na cerveja irão consumir este açúcar e transformá-lo em álcool e dióxido de carbono. Neste ponto, a quantidade de álcool gerada é desprezível. Porém, o dióxido de carbono gerado irá se dissolver na bebida, visto que o recipiente estará lacrado, sem ter por onde sair (CANTWELL, 2013).

## 2.4 DEFEITOS NA CERVEJA

Durante a análise de uma cerveja, diversos aspectos são levados em consideração, desde visuais até sensoriais, compostos por textura, sabor e aroma. Estes dois últimos, são agrupados em uma categoria chamada de “*flavors*”, termo de língua inglesa sem tradução direta para o português, mas que significa o conjunto de sensações provocado pelos aromas e sabores de determinado alimento. Há, também, os *off-flavors*, que são os defeitos percebidos através do olfato e paladar.

São diversos os *off-flavors* que podem estar presentes em uma cerveja, sendo que vários deles estão ligados à matéria-prima e outros tantos ligados ao processo de fabricação. Dentre os principais defeitos, os mais comuns são adstringência, oxidação, e presença de compostos químicos não eliminados no processo, como acetaldeído, composto que remete a maçãs verdes, gerado pelas leveduras e que deve ser eliminado com maturação. Outro *off-flavor* relativamente comum é a presença de diacetil, composto que trará semelhança com manteiga e é causado por falta de controle de temperatura de maturação (MOSHER, 2009).

Neste projeto e, principalmente neste capítulo, serão citados alguns dos defeitos que podem surgir durante o processo de fabricação da cerveja. O defeito mais importante para o estudo é a presença do dimetilsulfureto (DMS), composto químico que pode ser resultado de uma fervura fraca ou de um resfriamento lento e ineficiente.

### 2.4.1 Dimetilsulfureto

O DMS é um composto organossulfuroso de fórmula  $[(CH)_3]_2S$ . O DMS é um composto natural presente no malte de cevada, mas pode ser formado através de outros compostos precursores também presentes no malte de cevada, como o S-metil-metionina (SMM) e o dimetilsulfóxido (DMSO) (FIX, 1999).

O DMS não é percebido de forma sensorial na cerveja até concentrações de 50 µg/litro. Porém entre 50 e 100 µg/litro já se torna perceptível para pessoas sensíveis a este composto, ou bem treinadas na detecção de defeitos em cervejas. Acima



desta concentração, considera-se que o composto é agressivo para qualquer estilo de cerveja (FIX, 1999).

#### **2.4.1.1 Formação do dimetilsulfureto**

O malte de cevada carrega em si os compostos químicos DMS, SMM e DMSO, sendo os dois últimos precursores do DMS. A quantidade de DMS puro no malte é considerada desprezível (abaixo de 10 PPM). Porém, a quantidade de SMM e DMSO é significativa o suficiente para trazer preocupações ao processo de fabricação de cervejas, pois ao longo do processo poderão se transformar em DMS, cabendo ao produtor tomar ações que eliminem e previnam a formação do composto (FIX, 1999).

A principal fonte de DMS na cerveja é através da decomposição de SMM em DMS. A presença de DMS na cevada é relativamente baixa. Porém durante o processo de malteação o SMM é formado dentro do grão. Durante a etapa de umidificação, o SMM é desenvolvido em grandes quantidades dentro do grão, sendo parcialmente eliminado durante a secagem. Quanto menor a temperatura de secagem, maior será a retenção de SMM dentro do malte, e o SMM é um composto que se dissolve facilmente no mosto cervejeiro (FIX, 1999).

A fervura e resfriamento são as etapas que mais irão influenciar na formação e presença de DMS na cerveja, pois é em temperatura de fervura, que o SMM irá se decompor em DMS. A meia-vida do SMM durante a fervura é de aproximadamente 30 minutos. Ou seja, em 30 minutos 50% de SMM se transformará em DMS. Mas, também, durante a fervura, de forma simultânea, o DMS será evaporado continuamente, pois seu ponto de ebulição é de apenas 37,3°C (FIX, 1999).

Portanto, a maior contribuição para formação de DMS a partir do SMM é durante o resfriamento, visto que praticamente todo o DMS formado antes ou durante a fervura é também evaporado. Durante o resfriamento, o SMM continua sendo transformado em DMS. O DMS formado nesta etapa é retido no mosto em sua maior parte, pois não há mais evaporação de mosto com os compostos (FIX, 1999).

### 2.4.2 Clorofenol

Outro defeito inadmissível em cervejas é a presença de clorofenol, um composto químico que gerará um *off-flavor* comumente descrito como “medicinal”, pois apresenta aromas e sabores que remetem à esparadrapo e antissépticos e, também podem provocar uma sensação de adstringência na boca.

O clorofenol é resultante de uma reação entre o cloro e o álcool produzido pelas leveduras na fermentação. O cloro pode ser proveniente da água utilizada na produção da cerveja, ou através de resquícios de produtos de limpeza utilizados na sanitização dos equipamentos de produção, caso sejam utilizados produtos à base de cloro e não sejam lavados adequadamente.

Para se evitar este problema, deve-se tomar cuidado na etapa de limpeza dos equipamentos, evitando utilizar com excesso produtos à base de cloro e, quando for inevitável utilizá-los, removê-los completamente com água. Outra forma de se evitar a formação de clorofenol é a utilização de filtros que removam o cloro da água que será utilizada na produção. Tais filtros podem ser de carvão ou de terra diatomácea, sendo os primeiros os mais utilizados (MOSHER, 2009).

### 2.4.3 Diacetil

Este defeito é identificável através de um forte aroma de manteiga e por causar a sensação de ranço na boca após prová-la. Porém, em níveis mais baixos, o diacetil irá trazer características de balas *toffee* e de caramelo, que podem não ser aceitáveis em determinados estilos de cerveja.

O diacetil é formado durante a fermentação, sendo um dos subprodutos da metabolização de açúcares pelas leveduras. Além do álcool e gás carbônico, principais produtos da fermentação, as leveduras produzem outros elementos, sendo um deles a valina, um aminoácido que não irá causar impacto na cerveja. Porém, durante a produção de valina, há a formação de um composto intermediário chamado de acetolactato.

Nem todo acetolactato irá se transformar em valina, uma parte do acetolactato irá permanecer livre no mosto. Com temperaturas de fermentação elevadas (em torno de 20°C) o acetolactato livre irá oxidar, transformando-se em diacetil.

Apesar de ser um defeito comum, o diacetil é um problema facilmente evitável. Isto porque as próprias leveduras, na falta de açúcares fermentáveis ao final do processo de fermentação, irão reabsorver este composto e transformá-lo em acetoína, composto que não irá impactar nem no sabor e nem no aroma da cerveja. Portanto, basta controlar a temperatura de fermentação e não interromper este processo antes de se ter certeza que as leveduras encerraram sua atividade metabólica (MOSHER, 2009).

#### 2.4.4 Butírico

O butírico é, provavelmente, o pior defeito que um cervejeiro gostaria de provar em sua cerveja. Isto porque é associado diretamente ao aroma de vômitos, leite estragado e podridão. Este defeito é causado devido à contaminação por uma bactéria chamada de *Clostridium*, que pode estar presente no malte, ou nos equipamentos caso não sejam bem sanitizados (MOSHER, 2009).

Assim como o mosto cervejeiro é um excelente ambiente para a reprodução das leveduras, ao mesmo tempo ele é um ambiente perfeito para proliferação de bactérias. Portanto, todo cuidado é pouco ao se sanitizar os equipamentos que entrarão em contato com o mosto (MOSHER, 2009).

Caso esta bactéria entre em contato com o mosto, ela irá se proliferar rapidamente, em muitos casos inclusive impedindo o desenvolvimento da levedura cervejeira. A única recomendação para se evitar este defeito é a correta sanitização de todos os equipamentos, em especial dos que entrarão em contato com o mosto após a fervura, como resfriadores, fermentadores, mangueira, tubulação e recipientes de envase (MOSHER, 2009).

Considerando-se que o processo de resfriamento do mosto é uma etapa fundamental para a qualidade do produto final, deve-se estudar qual será a melhor ferramenta de resfriamento, com o objetivo de evitar defeitos na cerveja. Na seção

2.5 serão citados e estudados os tipos de trocadores de calor que melhor se adequam ao processo produtivo.

## **2.5 TROCADORES DE CALOR**

Os trocadores de calor são elementos fundamentais no sistema de resfriamento tendo em vista que uma troca térmica eficiente interfere diretamente na qualidade do produto final, conforme descrito na seção 2.4.

Estes dispositivos permitem a troca de energia térmica entre dois ou mais fluídos a temperaturas diferentes, os mesmos são utilizados em diversas áreas da indústria (produção de energia, indústria alimentícia, farmacêutica, eletrônica, manufatura).

Segundo Kakaç (2002), os trocadores de calor podem ser divididos em:

- a) Recuperadores / regeneradores;
- b) Processos de transferências: contato direto / indireto;
- c) Mecanismos de transferência de calor: uma fase, duas fases;
- d) Tipos de corrente: paralela, contra fluxo, cruzado;
- e) Geometria de construção.

Tais categorias serão descritas a seguir de acordo com Kakaç (2002):

### **2.5.1 Recuperadores / regeneradores**

Os recuperadores ou regeneradores de calor são utilizados em sistemas térmicos com o objetivo de recuperar parte da energia perdida do líquido quente durante os processos de troca. O líquido quente, ao avançar no sistema térmico, perde sua energia gradativamente a cada fase. Essa perda de energia é minimizada utilizando-se recuperadores e regeneradores, que são trocadores de calor posicionados em seções do sistema com o único objetivo de recuperar a temperatura do líquido quente.

### 2.5.2 Processos de transferências: contato direto / indireto

No processo de contato direto há realmente o contato entre os fluídos. Não existe parede entre os fluídos quente e frio e a transferência de calor se dá simplesmente pelo contato entre eles. Os fluídos devem ser imiscíveis para que possam ser separados após o processo, como, por exemplo, uma mistura de gás-líquido ou partículas sólidas e fluídos.

No processo de contato indireto a troca de calor ocorre através de uma superfície que separa os fluídos. Eles não se misturam.

### 2.5.3 Mecanismos de transferência de calor

A mudança de fase dos líquidos envolvidos nos processos pode ser aproveitada de maneira positiva, por exemplo, água à temperatura ambiente entrando no sistema para resfriar outro líquido tem sua temperatura aumentada, podendo entrar em ebulição (estado gasoso) durante o processo quando sua temperatura é drasticamente aumentada. Após esta mudança de fase, pode ainda ser usada para regenerar a temperatura de outra etapa do sistema, voltando ao estado líquido.

Estes processos podem ser classificados em:

- a) Fase única com convecção em ambos os lados;
- b) Fase única com convecção em um lado;
- c) Convecção de duas fases no outro lado;
- d) Duas fases com convecção em ambos os lados.

### 2.5.4 Tipos de corrente: paralela, contra fluxo e cruzada

Nos trocadores de calor de corrente paralela, os fluídos entram no mesmo lado e sentido, escoando lado a lado durante o processo até a saída. Esta configuração requer uma maior área de trabalho.

Já nos trocadores de calor de corrente contra fluxo, os fluídos entram em lados opostos e fluem em sentidos opostos, saindo cada um por um lado do sistema. Esta configuração requer menor área de trabalho.

Nos trocadores de corrente cruzada os fluídos percorrem direções e sentidos diferentes, dependendo da situação e opção de dimensionamento escolhida. Podem, por exemplo, fluir um horizontalmente e o outro verticalmente, trocando calor com ângulos retos. Esta configuração requer uma área intermediária de trabalho quando comparada às outras configurações.

A grande diferença nos arranjos de corrente está na distribuição de temperatura ao longo do sistema e nas áreas necessárias para a troca de calor.

### **2.5.5 Geometria de construção**

Os trocadores de calor são frequentemente classificados pelas suas geometrias de construção, podendo ser:

- a) Tubular;
- b) Placas;
- c) Superfícies estendidas.

#### **2.5.5.1 Trocadores de calor tubulares**

Os trocadores de calor tubulares são compostos por tubos circulares por onde passa um fluído quente ou frio, envoltos por um volume que contém outro fluído responsável pela troca de calor. O diâmetro, número, comprimento e arranjo dos tubos podem variar a fim de se obter os resultados esperados para cada situação. A Figura 1 ilustra um exemplo de trocador de calor tubular por imersão. Já a Figura 2 ilustra um trocador de calor de casca e tubos.



**Figura 1 – Trocador de calor tubular por imersão.  
Fonte: Termotek (2018)**



**Figura 2 – Trocador de calor de casco e tubos.  
Fonte: Apema (2018)**

#### **2.5.5.2 Trocadores de calor de placas**

Os trocadores de calor de placas são compostos por placas finas colocadas em sequência, onde um fluido passa por uma placa à temperatura quente enquanto o outro fluido passa pela placa adjacente, à temperatura fria, constituindo a troca de calor entre as placas quente e fria. As placas são constituídas de superfícies rugosas formadas por pequenas aletas, que têm como objetivo potencializar a transferência de calor. Podem ser usados para qualquer combinação de fluidos, como gases, fluidos ou sistemas bifásicos, compostos por gases e fluidos.

A Figura 3 ilustra uma placa que compõe este trocador.



**Figura 3 – Placa de trocador de calor de placas.  
Fonte: Trocadores de calor (2018)**

A Figura 4 ilustra um trocador de placas gaxetado, composto por N placas, onde N pode ser 20, 30, 40, um número inteiro determinado pelas necessidades do usuário.

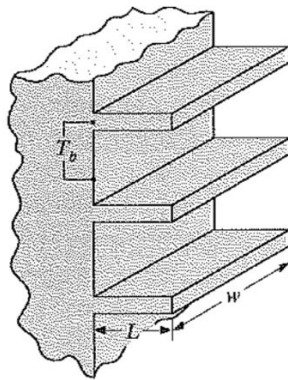


**Figura 4 – Placa de trocador de calor de placas gaxetado.  
Fonte: Trocadores de calor (2018)**

### **2.5.5.3 Trocadores de superfícies estendidas**

Os trocadores de calor de superfícies estendidas são caracterizados, também, pelas suas aletas. Suas superfícies aletadas aumentam consideravelmente sua capacidade de troca de calor. Podem ser tubulares ou planos, e seu uso é mais apropriado para misturas de gás-gás ou gás-líquido, justamente pela existência de aletas, conforme Figura 5.





**Figura 5 – Ilustração de aletas em trocadores de calor.**  
Fonte: Incropera (2008)

Após estudados os principais tipos de trocadores de calor, na seção 2.6, serão analisados os principais métodos de resfriamento de mosto utilizados por produtores de cerveja artesanal.

## 2.6 MÉTODOS DE RESFRIAMENTO DE MOSTO

Após a fervura, o mosto precisa ser resfriado a temperaturas que sejam suficientes para a sobrevivência das leveduras, que serão responsáveis pela fermentação da cerveja posteriormente. Conforme citado na seção 2.3.5, o mosto deve ser resfriado em até 30 minutos, para evitar a formação de DMS, em quantidades perceptíveis, e para alcançar as temperaturas necessárias para produção dos tipos *Ale* e *Lager* de cerveja.

Neste trabalho não serão abordados métodos de resfriamento empregados em grandes cervejarias, em nível industrial, por não se encaixarem na situação da nanocervejaria em estudo. Os métodos industriais abrangem níveis elevados de investimentos, equipamentos e questões de confidencialidade empresarial.

Nesta seção serão abordados alguns dos métodos mais comuns para o resfriamento do mosto em nano e microcervejarias.

### **2.6.1 Imersão em água com gelo**

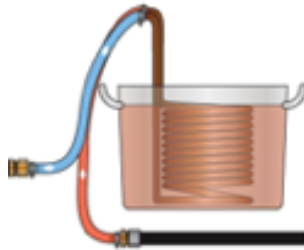
Considerado um método simples e pouco efetivo, consiste na imersão do recipiente que contém o mosto em um volume contendo gelo. Os recipientes utilizados para fervura do mosto são panelas ou recipientes metálicos que, quando envoltos por gelo, ocorre a troca de calor entre o recipiente e o gelo. Não possui nenhum controle de tempo, temperatura ou eficácia de troca de calor. Portanto, é pouco efetivo para produção de cerveja de qualidade, além de se ter um grande desperdício de água caso o gelo utilizado seja descartado após o processo de resfriamento. É, sem dúvidas, o método mais barato, em termos financeiros, de resfriamento, além de ser o mais fácil de ser utilizado (DINSLAKEN, 2016).

### **2.6.2 Trocador de calor de tubos de imersão**

Este método consiste na utilização de um trocador de calor de tubos, em formato circular, que é inserido dentro do recipiente que contém o mosto. Água fria passa por dentro dos tubos, trocando calor com o mosto pelas paredes metálicas do trocador de calor. É um método simples e mais efetivo que o método descrito na seção 2.6.1.

O controle do tempo e temperatura da troca de calor não é muito eficiente, além de haver grande desperdício de água se não houver um sistema de reaproveitamento na saída. Devem ser executadas limpezas constantes após a utilização, principalmente na parte exterior, a fim de manter os tubos livres de sujeiras que possam contaminar o mosto. O custo financeiro e de investimento são baixos, sendo utilizado principalmente por cervejeiros caseiros (DINSLAKEN, 2016).

Este método é ilustrado pela Figura 6.



**Figura 6 – Trocador de calor de imersão.**  
Fonte: Austin Homebrew Supply (2008)

### **2.6.3 Trocador de calor de placas**

Este método consiste na utilização de um trocador de calor por placas, exemplificado na seção 2.5.5.2. Este trocador possui duas entradas e duas saídas, por onde entram e saem o mosto e a água fria. É composto por várias placas, dispostas uma junto à outra, sendo que por uma placa passa a água e, pela placa seguinte, passa o mosto quente. É um método eficiente, de custo relativamente reduzido. O controle de temperatura e tempo é exercido pela utilização de uma bomba que, quando configuradas potência e vazão corretamente, garante a eficácia do processo (DINSLAKEN, 2016).

A Figura 7 ilustra um trocador de placas comumente utilizado para resfriamento de mosto.

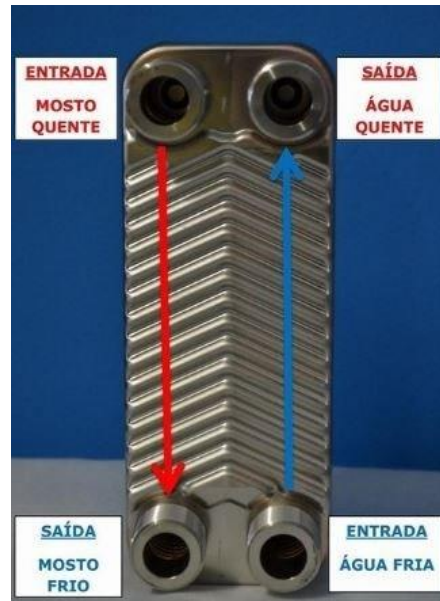


Figura 7 – Trocador de calor de placas.  
Fonte: Concerveja (2018)

#### 2.6.4 Trocador de calor de contra fluxo

Neste método de troca de calor o mosto quente passa por um tubo enquanto, simultaneamente, o fluido refrigerante flui por um tubo que envolve o tubo quente. Tem-se um tubo envolvendo o outro, e realizando a troca térmica durante a passagem dos líquidos. É um método relativamente de baixo custo, porém não é prático de ser higienizado (DINSLAKEN, 2016).

Pode-se observar o trocador de contra fluxo ilustrado na Figura 8.



Figura 8 – Trocador de calor de contra fluxo.  
Fonte: TroCalor (2018)

Após realizados os estudos dos diferentes tipos de trocadores de calor utilizados em nano e microcervejarias, deve-se analisar os possíveis impactos destas ferramentas em relação ao consumo de água, tendo em vista que se utiliza um volume consideravelmente alto de fluido refrigerante para se resfriar o mosto cervejeiro.

Na seção 2.7 serão analisados o consumo de água e seus impactos durante a produção de cerveja em nano e microcervejarias.

## **2.7 CONSUMO DE ÁGUA**

Nesta seção serão abordados alguns assuntos a respeito do consumo de água nos processos de fabricação de cerveja, além de impactos na sociedade e no meio ambiente provenientes da produção e resfriamento do mosto.

### **2.7.1 Consumo de água – Impactos na sociedade**

A água é um dos recursos naturais mais preciosos da Terra, imprescindível para a vida em geral e para a humanidade em especial. No seu estado propício para o consumo como água potável, ela é um bem finito. Portanto, é no mínimo demonstração de falta de conscientização fazer o mau uso dela.

Segundo estudos recentes da ONU, até 2025, três bilhões de pessoas estarão sem acesso à água de boa qualidade, causando graves problemas de subsistência, somados ao crescimento populacional, à poluição e ao aquecimento global não demorará muito para que países estejam guerreando por este líquido cristalino (GOMES, 2009).

Pessoas sofrem com a falta de acesso à água limpa suficiente para suprir necessidades básicas. Deve-se atentar não só para o consumo excessivo, mas também ao desperdício e as práticas utilizadas em casa e no trabalho.

No Brasil, apesar de dispor de 12% da água doce do planeta, a crise hídrica também deve ser um risco para a população brasileira (TODAMATÉRIA, 2018).

As áreas mais atingidas são a África, a Ásia Central e Oriente Médio, locais onde especialistas acreditam que eventuais conflitos serão causados cada vez mais por causa da água e cada vez menos por causa do petróleo (DECICINO, 2007).

Com isso, se faz necessário pensar na sustentabilidade desse bem em qualquer projeto desenvolvido por engenheiros, no intuito de mostrar-se um profissional consciente e melhorar os processos em que se envolve o uso de água.

### **2.7.2 Desperdício de água no processo de produção agrícola de bens primários para a produção de cerveja**

Segundo o Canal Rural (2014), o agronegócio responde por sete dos dez produtos que são exportados hoje pelo Brasil. Muitos já ouviram falar sobre o Brasil ser líder em exportação de itens como soja e café.

A realidade da agricultura brasileira é que 60% da água utilizada na irrigação é desperdiçada (CARVALHO, 2018). Não se utiliza a quantidade correta de água, aplica-se o líquido fora do período de necessidade da planta, até mesmo a escolha de horários de maior intensidade de evaporação influenciam no mau uso desse bem precioso, desperdício que também ocorre para os insumos primários utilizados para a produção de cerveja, como malte de cevada, malte de trigo e malte de centeio (CARVALHO, 2018).

A agricultura é a atividade socioeconômica que mais utiliza água em todo o mundo, totalizando um montante de 70%, em média, de toda a água consumida no planeta. Ao mesmo tempo é a atividade que mais desperdiça água. Segundo o Fundo das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), quase metade de toda a água empregada no campo é desperdiçada e, caso o meio rural diminuísse o consumo em 10%, o volume seria suficiente para abastecer duas vezes a população mundial (PENA, 2018).

De acordo com Planeta Saudável (2008), para a produção de insumos primários da cerveja, não é diferente. O desperdício de água se mostra tão alarmante quanto. Estima-se que para a produção de 1kg de cevada utiliza-se 1300 litros de água. Assim, observa-se que há oportunidade de economia e reaproveitamento de água em toda a cadeia produtiva da produção de cerveja.

### 2.7.3 Consumo de água no processo de fabricação de cerveja

Como qualquer empresa de bebidas, a água é a principal matéria-prima, e a preservação dela faz parte da estratégia do negócio. Reduzindo o impacto no meio ambiente colabora-se para aumentar o acesso à água potável da comunidade e, garante-se a perenidade de qualquer negócio (AMBEV, 2017).

Segundo a CervBrasil (Associação Brasileira da Indústria da Cerveja), o Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, atrás apenas de China e EUA. A produção nacional é de cerca de 13 bilhões de litros por ano. A famosa bebida vem ganhando cada vez mais espaço nas mesas dos brasileiros, conforme o poder aquisitivo aumenta (UOL, 2013).

Poucos sabem o quanto de água é consumido em todo processo de produção de cerveja. Estima-se que em média, são utilizados 155 litros de água para a produção de um litro da bebida, desde suas matérias-primas até chegar na mesa do consumidor, mostrando mais uma vez a importância de atenuar os impactos desse processo (ROSA, 2014).

Estima-se que 90% da matéria prima da cerveja é água. Em média uma cervejaria grande utiliza de três a quatro litros de água para cada litro da bebida. Já nas cervejarias de pequeno porte essa quantia pode chegar a dez litros. Esse número tem diminuído ao longo do tempo devido a esforços e estudos das grandes companhias<sup>3</sup> para atenuar o desperdício de tal líquido (MAGRI, 2016).

Segundo Magri (2016), tecnicamente quase toda a água de produção pode ser reaproveitada e pode-se dividir em três etapas:

- 1) **Produto:** refere-se à água que faz parte da cerveja, comparado aos outros dois processos é o que menos possui potencial de reaproveitamento;
- 2) **Processo de produção:** na fabricação de cerveja, a água utilizada no processo de produção é a mais simples de ser reutilizada, pelo simples fato da mesma não conter produtos químicos. A água desta etapa é utilizada

---

<sup>3</sup> Grandes Companhias: Conglomerados cervejeiros internacionais, como, por exemplo, os grupos AB IMBEV e Heineken.

para resfriar o mosto, aquecer as caldeiras a vapor, e para o processo de pasteurização;

- 3) **Água de utilidade:** esse tipo de água contém produtos químicos, pode ser reaproveitada para a limpeza de equipamentos e do piso da cervejaria. É tido como o tipo de água mais difícil de ser reutilizada dos processos em análise, pois necessita de um tratamento especial antes de estar apta para ser reutilizada. Com isso, limita-se a cervejarias de grande porte, que possuem estrutura para tratamento do líquido.

Segundo o Empresário Rodrigo Silveira (GLOBO, 2014), para o processo de pasteurização, quando as garrafas já estão envasadas e são lavadas, é muito comum as cervejarias de pequeno porte não reutilizarem a água, pois nem todas possuem a tecnologia ou capital para investir em tecnologia de reaproveitamento da água de lavagem. Nessa etapa chega-se a perder, aproximadamente, 3,75 litros para cada garrafa. A Figura 9 ilustra o reaproveitamento da água para lavagem das garrafas.



**Figura 9 – Reaproveitamento de água para lavagem de garrafas.**  
Fonte: Globo (2014)

Para a etapa de fervura, a água que evapora pode ser reaproveitada se existir um condensador específico para o processo. Novamente, poucas empresas



possuem capital para investir em tal tecnologia. Todavia, o custo do investimento pode ser recuperado com o decorrer do tempo.

Segundo a supervisora de manutenção da fábrica Colorado, Georgia Tedescho (GLOBO, 2014), situada em Ribeirão Preto, durante a etapa de resfriamento, a água é utilizada para retirar calor da bebida após etapa de fervura. Poucas empresas reaproveitam essa água, chegando a desperdiçar 300 litros por dia dependendo do volume produzido, a recirculação dessa água se mostra uma boa opção de economia de água.

O enfoque do presente trabalho será dado, também, no reaproveitamento da água utilizada no resfriamento do mosto, na tentativa de chegar ao desperdício quase zero nessa etapa do processo.

#### **2.7.4 Água como ingrediente da cerveja**

Pensando na qualidade do produto final, a água que será utilizada como ingrediente deve ser potável. A grande maioria das cervejarias não utiliza água da rede pública, encarecendo o produto (ULLMAN, 2002).

Quando a água for proveniente de poços artesianos, rios, as condições de origem muitas vezes exigem o tratamento de várias etapas que podem incluir: decantação, filtração e tratamento desinfetante (ULLMAN, 2002).

O parâmetro principal para a água utilizada na produção é seu pH, que consiste em uma escala que varia de 0 a 14, onde 0 é o extremo ácido, 14 é o extremo alcalino e 7 é o valor neutro (SILVA, 2014).

Para a produção de cerveja a água deve estar entre 6,5 e 7,0. Ou seja, levemente ácida, pois um pH alcalino pode acarretar na dissolução de algumas substâncias presentes nas cascas e no malte (SILVA, 2014).

O pH ácido, além de evitar a degeneração do malte, contribui para uma maior atividade enzimática na etapa de brassagem, resultando em um rendimento maior de maltose, com tudo isso, o que vai definir o pH ideal de fato é o tipo de cerveja que irá ser produzida (SILVA, 2014).

Segundo Silva (2014), a água pode apresentar íons que afetam seu pH, tendo assim duas classificações: água mole e água dura. A água dura é mais indicada para processo de produção de cervejas de coloração escura, pois as mesmas possuem pH mais elevado e uma maior concentração de íons como cálcio, magnésio e bicarbonato. A água mole é mais adequada para a produção de cervejas do tipo *pilsen*, com pH mais baixo e menor quantidade de íons dissolvidos. A quantidade de íons pode ser avaliada através de uma análise de dureza da água.

Os principais sais encontrados na água são: bicarbonato, cloreto, sulfato, cálcio e magnésio. A dureza temporária é medida de acordo com a presença do bicarbonato dissolvido na água, e leva essa denominação devido a possibilidade de ser reduzida, ou praticamente eliminada através da fervura, onde ocorre a solidificação e precipitação do sal em questão. A dureza permanente é influenciada pela quantidade de cálcio e magnésio (SILVA, 2014).

A soma dos íons de bicarbonato, cálcio, magnésio resulta no índice de dureza da água, em PPM (partes por milhão), conforme demonstrado na Tabela 1 (SILVA, 2014).

**Tabela 1 - Tipos de água por ppm de íons presentes.**

PPM	Tipo de água
0 - 50	Água mole
51 - 110	Água média
111 - 200	Água dura
200 +	Água super dura

Fonte: Silva (2014)

Os sais presentes na água desempenham um papel importante no resultado final da cerveja. Na sequência estão listadas as influências de cada sal processo de produção (SILVA, 2014).

- a) **Carbonato e Bicarbonato (CO<sub>3</sub> e HCO<sub>3</sub>):** em níveis baixos, a cerveja pode apresentar uma acidez excessiva da brassagem, principalmente, quando utilizados maltes escuros. E em níveis elevados, prejudica a ação

enzimática, dificultando o *cold break*<sup>4</sup> e aumentando o gosto amargo desagradável;

- b) **Sódio (Na):** o sódio contribui para a sensação do corpo da cerveja, mas, se utilizado em excesso irá resultar em sabores não desejáveis. Os níveis normais de sódio são aproximadamente de 10 a 70 PPM, para se realçar a sensação de dulçor e de corpo, são utilizadas até 150 PPM;
- c) **Cloreto (Cl):** analogamente ao sódio, o cloreto também contribui para o aumento da sensação de corpo e dulçor da cerveja;
- d) **Sulfato (SO<sub>4</sub>):** desempenha um papel importante na degradação do amido e proteínas, no processo de filtragem e na formação do *trub*<sup>5</sup>. Contribui para o sabor do lúpulo e diminui amargor do mesmo, além de trazer um perfil seco à cerveja, quando desejado;
- e) **Cálcio (Ca):** o cálcio desempenha múltiplas funções no processo de produção de cerveja, incluindo a redução do pH. Nas etapas de brassagem, fervura, clarificação da cerveja e fermentação, auxilia na precipitação das proteínas. Além de reforçar a estabilidade da cerveja e contribuir como um importante nutriente para a levedura;
- f) **Magnésio (Mg):** o magnésio, em pequenas quantidades, é um importante nutriente para as leveduras. Observa-se que o malte já adiciona quantidades suficientes de Magnésio ao mosto.

### 2.7.5 Água no processo de produção de cerveja

A água se faz presente não só na composição química da cerveja, mas também na fabricação da mesma. Esse líquido está presente em diversas etapas do processo. Entender quais são as demandas para o bom uso do mesmo, se faz de extrema importância. Pode-se observar o uso da água nas seguintes etapas (TROMMER, 2015):

---

<sup>4</sup> *Cold Break*: Processo realizado logo antes do envase, que consiste em baixar a temperatura da cerveja para próximo de zero, geralmente 2 graus Celsius, para decantar partículas sólidas ainda presentes na bebida, tornando a cerveja límpida e cristalina (DANIELS, 1998).

<sup>5</sup> *Trub*: Partículas decantadas ao final do processo de fervura, como pó de lúpulo, proteínas, sais e outras substâncias sólidas eventualmente presentes na etapa de fervura (DANIELS, 1998).

- a) **Maceração:** o malte moído é misturado com água em temperaturas pré-estabelecidas para que se inicie a ação de enzimas, que quebrarão as cadeias de amido em cadeias menores de açúcares como glicose, maltose entre outros;
- b) **Fervura:** durante essa etapa, o mosto é levado à ebulição, substâncias não desejáveis se volatizam, proteínas coagulam e o mosto é esterilizado;
- c) **Resfriamento:** realizado através de trocadores de calor, o resfriamento se faz necessário para que o mosto chegue a temperatura de absorção de oxigênio, que deve ser suficiente para o início da fermentação através da levedura. Essa etapa se dá por um processo simples de troca de calor, onde a água absorve o calor e, conseqüentemente, o resfriamento do mosto ocorre.

O resfriamento, é obtido de forma fechada através de trocadores de calor tubulares ou trocadores de placas. Conforme citado na seção 2.3.5, as temperaturas de saída do mosto após a troca de calor devem ser de 16 a 18°C para fermentos do tipo *ale*, e de 8 a 10°C para fermentos do tipo *lager* (TROMMER, 2015).

A fim de se atingir as condições desejadas, o processo de resfriamento deve ocorrer basicamente em três fases:

- 1) Armazenagem de água fria;
- 2) Bomba de água;
- 3) Troca térmica com água gelada.

Para se obter uma boa troca de calor, os líquidos devem se movimentar de forma rápida. Porém, deve-se respeitar o tempo mínimo de contato necessário entre eles para que a troca de calor ocorra de maneira correta (TROMMER, 2015).

### 2.7.6 Sistemas de captação de água da chuva em estabelecimentos cervejeiros

O reaproveitamento da água da chuva está sendo uma melhoria implementada em diversos estabelecimentos cervejeiros. É uma maneira eficiente de armazenar

água e com isso, economizar não apenas financeiramente, mas também demonstrar a possibilidade de se englobar uma atitude mais sustentável (AQUARELLA, 2018).

O sistema de captação de água e chuva revela duas possibilidades:

- 1) Sistema de captação utilizando o teto do imóvel, conforme ilustrado na Figura 10;
- 2) Sistema em área de encosta, revestindo o subsolo e canalizando a água até um processo de pré-filtragem. Em seguida, é então armazenada em um reservatório.



**Figura 10 – Sistema de captação de água da chuva em um telhado.**  
Fonte: Aquarella (2018)

Para cervejarias que utilizam estes sistemas de captação de água, destacam-se as funções de uso para limpeza de pisos da fábrica, pátio, frota de caminhões, irrigar plantas e tonéis.

## 2.8 CONSTRUÇÃO ATUAL

Na nanocervejaria em que está se desenvolvendo o projeto, a cozinha conta com três painéis de inox com volume de 160 litros, o que proporciona uma capacidade útil de se fabricar em torno de 120 litros de cerveja por brassagem.

As painéis para água quente e, a brassagem propriamente dita, são aquecidas por resistência elétrica, enquanto a panela de fervura é aquecida através de chama direta. O processo de fabricação é realizado conforme o descrito na seção 2.3, seguindo as etapas clássicas de fabricação de cerveja.

### 2.8.1 Sistema de resfriamento atual

O sistema de resfriamento atual consiste em um dispositivo composto por um tubo de alumínio envolto por uma mangueira de PVC flexível, reforçada com espiral de aço. O resfriamento ocorre através da transferência de calor do mosto cervejeiro que passa por dentro do tubo de alumínio para a água fria que passa externamente ao tubo de alumínio, e dentro da mangueira de PVC, este método é o mesmo descrito na seção 2.6.4. O mosto e a água têm seus pontos de entrada e saída em extremidades opostas, com fluxos contrários. Por este motivo este tipo de trocador é caracterizado como um trocador de calor por contra fluxo. A Figura 11 ilustra o esquema atual utilizado na nanocervejaria em estudo.



**Figura 11 – Sistema de resfriamento atual da nanocervejaria em estudo.<sup>6</sup>**

---

<sup>6</sup> Todas as figuras sem indicação de fonte são de autoria do grupo responsável por este projeto.

Com o sistema atual, a cervejaria utiliza em torno de 70 minutos para que todo o mosto pós-fervura passe pelo resfriador e seja transferido para os fermentadores, tempo muito acima do desejável. Além do elevado tempo demandado, com o sistema atual a temperatura é reduzida de 98°C para 26°C, também considerado acima do desejável para inoculação de fermento.

Nesse sistema, a água utilizada para o resfriamento do mosto é proveniente de uma torneira de quintal. A vazão de água da torneira utilizada é de aproximadamente 85 ml por segundo. Considerando o tempo necessário, são gastos aproximadamente 420 litros de água no processo, que saem do trocador de calor e são descartados.

### 2.8.2 Espaço físico

O espaço físico que a nanocervejaria ocupa é limitado, e a cozinha já está instalada no local, com capacidade adequada ao volume produzido. Na Figura 12 é possível ver a representação em software de modelagem do espaço atual.

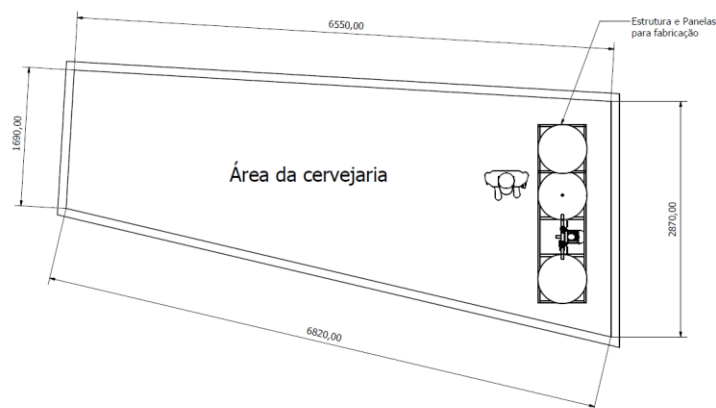


Figura 12 – Espaço físico da nanocervejaria em estudo.

## 2.9 CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE

A identificação da oportunidade se dá após análise dos tópicos comentados previamente e durante a fabricação de cerveja, realizada pelos membros da equipe, onde foram constatados desperdícios desnecessários e impactos nos produtos

finais, devido à ineficiência do trocador de calor utilizado na etapa de resfriamento do mosto.

O processo atual para a produção de cerveja na nanocervejaria Giramunddo tem seus produtos finais impactados, tendo em vista que o trocador de calor não atende à demanda durante a etapa de resfriamento de mosto.

Considerando-se as condições atuais da cervejaria em estudo, descritos na seção 2.8, surgiu uma oportunidade de melhoria devida aos seguintes fatores observados:

- a) O tempo de resfriamento do mosto médio de 70 minutos, considerado inapropriado para uma produção de cerveja de qualidade;
- b) A temperatura mínima atingida é de 26°C, não recomendada para inoculação de fermento;
- c) São gastos, aproximadamente, 420 litros de água na produção de 120 litros de cerveja;
- d) Ocorre o descarte de toda a água utilizada durante do processo de resfriamento do mosto.

A cervejaria Giramunddo não atende às recomendações da literatura, pois o resfriamento do mosto ocorre em um intervalo de tempo maior que 30 minutos, e a temperatura atingida não é a ideal.

Com isso, fez-se necessário utilizar metodologia de projetos e outros conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Mecânica, para projetar e construir um sistema mais eficiente em relação à troca de calor e minimize o desperdício de água observado.



## **3 PROJETO INFORMACIONAL**

Para a sequência do projeto e desenvolvimento da solução final, é necessário esclarecer com detalhes o problema do projeto, com todas as informações necessárias para seu entendimento. Com este objetivo, são utilizadas algumas etapas que serão descritas neste capítulo.

### **3.1 LEVANTAMENTO DAS NECESSIDADES DO CLIENTE**

Para um projeto de sucesso, é necessário entender em detalhes qual será sua aplicação final e quais as expectativas do cliente em relação ao produto ou solução oferecida, ou seja: quais são as reais necessidades do cliente para solucionar um determinado problema.

#### **3.1.1 Técnica para obtenção de informações**

Por se tratar do projeto de um sistema sob medida e de aplicação específica para um único cliente, a equipe optou por obter as informações através de observação direta, analisando de maneira detalhada o processo de fabricação atual da nanocervejaria em que o projeto está sendo desenvolvido e, também, através da análise de todo o embasamento técnico examinado no Capítulo 2, onde são descritos os processos de fabricação de cerveja, possíveis defeitos ocasionados por um resfriamento incorreto, além da descrição de processos de troca de calor e informações relativas ao desperdício de água.

Aliado a isso, foi também realizada uma entrevista com os proprietários da nanocervejaria, buscando informações extras que não puderam ser obtidas através de análise fria dos dados do Capítulo 2. A entrevista completa encontra-se no Apêndice A.

### 3.1.2 Necessidades do Cliente

De maneira genérica, pode-se dizer que o cliente necessita de um sistema de resfriamento de mosto que atenda às condições técnicas para se produzir cerveja sem defeitos, e que minimize o desperdício de água, um dos grandes problemas do processo atual.

A partir desta descrição geral, juntamente com os dados do Capítulo 2 e os obtidos na entrevista, as necessidades foram relacionadas e a cada necessidade foi atribuído um peso, de zero a dez, de acordo com a importância observada pelo cliente, sendo zero importância nula, e dez um item de importância extremamente relevante. Esta relação pode ser vista no Quadro 1.

**Quadro 1 - Necessidades dos clientes.**

<b>Necessidade do Cliente</b>	<b>Importância ao cliente</b>
Alto fluxo de passagem de mosto	7
Alta troca de calor no sistema	7
Baixo consumo de água	8
Custo	4
Adaptação ao layout atual	8
Tamanho	4
Fácil manutenção	8
Fácil limpeza	8
Durabilidade	7
Segurança	9
Materiais de grau alimentício	10
Sem vazamentos	6
Baixo consumo de energia	6
Peso	4

### 3.2 REQUISITOS DA QUALIDADE

Apesar de serem parâmetros essenciais para o desenvolvimento do projeto, as necessidades do cliente são ainda muito subjetivas para que possam ser utilizadas como referências diretas de projeto. Por serem vagas, é necessário que estas necessidades sejam transformadas em parâmetros técnicos. Para isso, com base no Quadro 2, a equipe de engenharia define características mensuráveis que representem cada necessidade previamente listadas, produzindo assim os requisitos de qualidade, que podem ser observados no Quadro 2.

**Quadro 2 - Parâmetros técnicos das necessidades dos clientes.**

Requisito	Unidade	Tendência
Vazão de mosto	Litros/minuto	↑
Coefficiente de transferência de calor	$\Delta^{\circ}\text{C}$	↑
Consumo de água por ciclo	Litros	↓
Preço	R\$	↓
Peso	kgf	↓
Resistência à corrosão	mm <sup>2</sup>	↑
Cantos vivos	Unidades	↓
Tempo de limpeza	Minutos	↓
Altura, largura, comprimento	Metro	-
Consumo de energia	kW/h	↓
Quantidade de componentes	Unidades	↓
Número de operações	Unidades	↓
Tempo de ciclo (para um resfriamento)	Minutos	↓
Tempo de setup	Minutos	↓
Resistência mecânica	Pa	↑
Rugosidade superficial	Ra	↓
Componentes comerciais	%	↑

### 3.3 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Com as necessidades e requisitos estabelecidos, é necessário definir objetivos e metas que a solução deverá fornecer ao cliente ao final do projeto. Estas

especificações levarão em conta, além dos itens mencionados, as informações obtidas no Capítulo 2, onde há requisitos técnicos para a fabricação de cerveja.

No Quadro 3, os requisitos estão listados, associados a um objetivo ou meta, mensurável, com qual sensor será utilizado para validar posteriormente este objetivo e quais são as possíveis saídas indesejadas de cada requisito.

**Quadro 3 - Requisitos dos clientes associados a objetivos e metas.**

Requisito	Objetivo ou meta	Tendência	Sensor	Saídas Indesejadas
Vazão de mosto	5 l / min	↑	Medidor de vazão	Baixa transferência de calor
Coefficiente de transferência de calor	2,4 °C / min	↑	Termômetro	Vazão baixa
Consumo de água por ciclo	120 litros	↓	Medidor de vazão	Resfriamento insuficiente
Preço	R\$ 5000	↓	Moeda	Demanda por simplificações excessivas
Peso	30 kgf / seção	↓	Balança	Redução da robustez
Resistência à corrosão	*	↑	Impedância eletroquímica	Alteração sensorial e erro do processo
Cantos vivos	0	↓	Contagem	Acidentes
Tempo de limpeza	1 hora	↓	Cronômetro	Custos, aumento de complexidade
Quantidade de componentes	6 – 10	↓	Contagem	Simplificações excessivas
Número de operações	5	↓	Contagem	Simplificações excessivas
Tempo de ciclo (Para um resfriamento)	30 min	↓	Cronômetro	Baixa transferência de calor
Tempo de setup	15 min	↓	Cronômetro	Simplificações Excessivas

Requisito	Objetivo ou meta	Tendência	Sensor	Saídas Indesejadas
Vazão de mosto	5 l / min	↑	Medidor de vazão	Baixa transferência de calor
Coeficiente de transferência de calor	2,4 °C / min	↑	Termômetro	Vazão baixa
Consumo de água por ciclo	120 litros	↓	Medidor de vazão	Resfriamento insuficiente
Preço	R\$ 5000	↓	Moeda	Demanda por simplificações excessivas
Peso	30 kgf / seção	↓	Balança	Redução da robustez
Resistência à corrosão	*	↑	Impedância eletroquímica	Alteração sensorial e erro do processo
Cantos vivos	0	↓	Contagem	Acidentes
Tempo de limpeza	1 hora	↓	Cronômetro	Custos, aumento de complexidade
Quantidade de componentes	6 – 10	↓	Contagem	Simplificações excessivas
Número de operações	5	↓	Contagem	Simplificações excessivas
Resistência mecânica	*	↑	Ensaio de tração	Fadiga e rompimentos do sistema
Rugosidade superficial	*	↓	Especificação técnica do produto	Alteração da resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga de uma determinada peça
Componentes superficiais	> 90%	↑	Contagem	Simplificações excessivas

Na sequência, apresentam-se os detalhes e justificativas que nos levaram ao objetivo de cada requisito.

### 3.3.1 Vazão e temperatura do mosto

Para a vazão do mosto, o objetivo foi estipulado com base nas informações obtidas no Capítulo 2, onde há necessidade de se resfriar 120 litros de mosto cervejeiro em, no máximo, 30 minutos. Para atender este volume e tempo, a vazão que o sistema deve possuir é de cerca de três litros e meio por minuto.

Novamente com informações do Capítulo 2, sabe-se que o sistema deve resfriar o mosto de 98°C para 25°C, evitando assim a formação de DMS. Entretanto, para a inoculação correta do fermento, as temperaturas de resfriamento que devem ser atingidas durante o processo são dos intervalos de 16 a 18 graus para cervejas do tipo *Ale* e, 8 a 10 graus para tipo *Lager*, durante o intervalo de 30 minutos. Desta forma, as taxas de resfriamento podem ser definidas por:

a) Cerveja tipo *Ale*:

$$\frac{(98 - 18)^{\circ}\text{C}}{30 \text{ minutos}} = \frac{70^{\circ}\text{C}}{30 \text{ minutos}} = 2,67^{\circ} \frac{\text{C}}{\text{minuto}}$$

b) Cerveja tipo *Lager*:

$$\frac{(98 - 10)^{\circ}\text{C}}{30 \text{ minutos}} = \frac{88^{\circ}\text{C}}{30 \text{ minutos}} = 2,93^{\circ} \frac{\text{C}}{\text{minuto}}$$

### 3.3.2 Custos e Investimentos

No modelo atual existente na cervejaria, há o consumo de 420 litros de água em um ciclo de resfriamento e, com a proposta de reduzir este desperdício, define-se a meta de redução de 80% neste consumo, fazendo com que se utilize, no máximo, 84 litros de água.

Em relação ao preço do conjunto, os proprietários da cervejaria possuem um orçamento de R\$4.500,00 para a construção do sistema, valor se será considerado como limite para gastos do projeto.

### 3.3.3 Ergonomia

Quanto ao peso do sistema pronto, não há uma referência clara por não saber ainda qual será a configuração do projeto, e se isto acarretará em movimentações não ergonômicas durante sua utilização e manutenção. Portanto, considera-se que, partes não desmontáveis não devem exceder 30 kgf, utilizando como referência a Norma Regulamentadora 17, Brasil (2007), que trata de ergonomia no trabalho, e limite de cargas que seres humanos devem levantar e transportar.

Por ser um sistema de manuseio frequente, não devem existir cantos vivos no sistema, que possam vir a ocasionar cortes ou danos a outros equipamentos.

### 3.3.4 Limpeza após o processo de produção

O tempo de limpeza foi determinado em 60 minutos, com base na entrevista com os representantes da cervejaria em questão. Baseado no sistema atual descrito na seção 2.8, que considera uma hora um tempo bom para a limpeza do sistema, pois é o tempo mínimo de limpeza da cozinha (panelas), e o sistema pode ser limpo e sanitizado em paralelo.

A quantidade de componentes deve ser a menor possível, visando simplificar o sistema e facilitar sua operação, manutenção e limpeza. A quantidade de seis componentes é baseada em componentes mínimos para operação de um sistema fechado de resfriamento:

- 1) Trocador de calor (mosto X líquido de arrefecimento);
- 2) Bomba;
- 3) Encanamento;
- 4) Conexões;
- 5) Suportes;
- 6) Trocador de calor (resfriamento do líquido de arrefecimento).

A categorização apresentada toma como base no agrupamento de componentes em relação às suas funções.

A quantidade de operações foi definida em passos simples, como abertura e fechamento de válvulas, e acionamento de bombas para transferência do mosto. O sistema deve ser simples o suficiente para ser facilmente operado.

Em relação ao tempo de ciclo, conforme já foi explicado no Capítulo 2, não se pode exceder 30 minutos para o resfriamento de todo o mosto cervejeiro. O sistema deve ser de fácil operação, assim como sua montagem e desmontagem. Portanto, um tempo coerente de *setup* é de, no máximo, 15 minutos, de forma que não acarrete desperdício de tempo na operação.

Considerando que os componentes principais de sistemas de resfriamento em cervejarias são compostos, basicamente, de bombas, trocadores de calor, conexões e tubulação, deve-se priorizar a utilização de componentes comerciais, visando baratear a construção do sistema e facilitando a busca por peças de reposição quando necessário. Desta forma, espera-se que mais de 90% dos componentes do sistema sejam comerciais padronizados.

Dois itens foram removidos das especificações de projeto, por não se possuir base para definir um objetivo real para estes itens: tamanho do sistema e consumo de energia. As especificações do cliente demonstram que o sistema deve se adaptar ao espaço físico disponível na cervejaria e à cozinha já existentes no local.

Em relação ao consumo de energia, não é possível estabelecer uma meta, pois ainda não há uma configuração prévia de sistema. Porém, o projeto deve ser direcionado para o mínimo consumo de energia elétrica, visando um baixo custo de operação.

Considerando o sistema no qual circula o mosto, sua limpeza é realizada com ácido peracético ( $C_2H_4O_3$ ), para fins de higienização após o uso, a busca pela resistência à corrosão é crítica ao uso desse químico (pH de 2 a 4). Somado a isso, é necessário levar em consideração requisitos de produtos alimentícios, tendo em vista que a qualidade final produto é inegociável. Logo, devem-se averiguar as resistências à corrosão de mangueiras e tubulações, empregados na indústria alimentícia.

O tema “resistência mecânica” será revisitado quando o sistema estiver dimensionado, e será calculado considerando o peso do próprio sistema somado aos fluídos, na intenção de verificar se não haverá ruptura do material.

A rugosidade será considerada apenas para tubulações novas, considerando as especificações do fornecedor. A rugosidade pode afetar a vazão a escolha da bomba, devido à perda de carga. Como premissa, deve-se escolher uma rugosidade que não retenha partículas.



Para tubulações que escoam água fornecida pela rede, não existe a necessidade de o material atender os requisitos de qualidade instituídos para produtos alimentares, pois essa água não fará parte da composição do produto final, sendo um líquido utilizado puramente para atender os requisitos do processo de resfriamento.

Para tubulações que abrigam o mosto, é determinante a escolha de materiais atóxicos, que não deixam gosto nem cheiro. Dessa maneira, não alterando a composição química do alimento, o mosto faz parte da composição final do produto. Logo, deve-se especificar materiais atóxicos para toda tubulação em contato com o líquido citado.

### **3.4 SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE RESFRIAMENTO**

Considerando os trocadores de calor utilizados em nanocervejarias e microcervejarias, conforme descrito na seção 2.6, serão analisadas as soluções com o objetivo de se obter a melhor opção para a nanocervejaria em estudo. Serão levados em conta parâmetros como eficiência de troca térmica, vazão de líquido refrigerante, consumo de água, método de limpeza, material do trocador e custo de implementação.

#### **3.4.1 Imersão em água com gelo**

Por se tratar de uma produção de 120 litros de mosto, torna-se inviável manusear uma panela desse porte contendo líquido a aproximadamente 98°C. A quantidade de gelo necessária e, também, a necessidade de um grande recipiente capaz de envolver a panela e o gelo tornam este método totalmente ineficiente e perigoso.

### 3.4.2 Trocador de calor de tubos por imersão

Fabricado em aço inoxidável, possui em média 8,75 metros de comprimento e uma bitola de 9,53 milímetros (3/8 de polegada). Sua área de contato é de, aproximadamente, 0,262 metros quadrados (WECONSULTORIA, 2018b).

Considerando-se que uma maior área de contato aumenta a eficiência de troca térmica, a um primeiro momento, será levada em conta a área de contato como parâmetro essencial na escolha do trocador.

O material de construção em aço inoxidável é o recomendado para indústrias alimentícias. Portanto, o material de construção é válido. Seu custo de mercado é de aproximadamente 205 reais para um trocador de calor de tubos por imersão. (WECONSULTORIA, 2018b).

### 3.4.3 Trocador de placas

Podem ser compostos por dez, 20, 30, 40 placas. Cada configuração de quantidade de placas possui suas próprias especificações. A Tabela 2 ilustra todas as especificações de um trocador desse tipo. Ao observar a área de troca, nota-se uma área quase quatro vezes maior que a do trocador de tubos por imersão (WECONSULTORIA, 2018a).

Tabela 2 – Características do trocador de placa planas.

	10 placas	20 placas	30 placas	40 placas
Altura das conexões (cm)	1,5	1,5	1,5	1,5
Altura (cm)	2,7	5	7,5	10
Comprimento (cm)	31,5	31,5	31,5	31,5
Largura (cm)	7,15	7,15	7,15	7,15
Área de troca (m <sup>2</sup> )	0,23	0,46	0,69	0,92
Conexões de entrada e saída (polegadas)	3/4	3/4	3/4	3/4
Temperatura máxima (° C)	225	225	225	255
Pressão de serviço (bar)	10	10	10	10
Pressão de teste (bar)	20	20	20	20
Material da chapa	316L Aço Inox	304 Aço inox	304 Aço inox	304 Aço inox
Material da solda	99.9% Cobre	99.9% Cobre	99.9% Cobre	99.9% Cobre
Líquido	Todos, exceto Amônia	Todos, exceto Amônia	Todos, exceto Amônia	Todos, exceto Amônia

Fonte: WeConsultoria (2018a).

#### 3.4.4 Trocador de calor por contra fluxo

Este é o tipo atual de trocador de calor utilizado na nanocervejaria em estudo. Pode ser fabricado com diversos materiais e, também, podem apresentar diversos comprimentos e diâmetros de tubulações (interno e externo). Porém, a partir de experiência prática da própria cervejaria, o mesmo demonstrou-se ineficiente para a produção na escala atual.

Portanto, por uso e experiência, como mostrado na seção 2.8, esta opção está descartada.

### 3.4.5 Seleção do trocador de calor

A Tabela 3 exemplifica os parâmetros de cada trocador e serve como base para a escolha do tipo de trocador de calor a ser adotado pela nanocervejaria. Os parâmetros foram definidos pelas seguintes notas: 1, para índices ruins, 3 para índices medianos e, 5 para índices bons. A escolha do componente se dará pela maior somatória de índices apontados.

Pode-se concluir, com a somatória das notas, que o trocador de placas se mostrou como a melhor opção para o desenvolvimento do sistema de troca térmica e obtenção dos resultados desejados.

Tabela 3 – Parâmetros dos trocadores de calor.

	IMERSÃO EM ÁGUA COM GELO	TROCADOR TUBOS DE IMERSÃO	TROCADOR DE PLACAS	TROCADOR DE CONTRA FLUXO
<b>Troca térmica</b>	1	3	5	3
<b>Vazão da água</b>	0	3	3	3
<b>Consumo de água</b>	5	1	1	1
<b>Método de limpeza</b>	5	1	3	1
<b>Material</b>	1	5	5	5
<b>Custo</b>	5	3	3	5
<b>Somatória</b>	17	16	20	18

Na sequência do projeto, será demonstrado através de cálculos de engenharia a eficiência do trocador de calor escolhido, com base no projeto do sistema como um todo.

## 4 PROJETO CONCEITUAL E PRELIMINAR

Neste capítulo serão descritos o conceito do sistema, os cálculos termodinâmicos, a seleção de materiais, projetos físico e elétrico, do conjunto de resfriamento de mosto.

### 4.1 CONCEITO

O sistema idealizado pela equipe pode ser observado conforme o esquema ilustrado na Figura 13, utilizando-se dois trocadores de calor de placas planas para realizar o resfriamento do mosto.

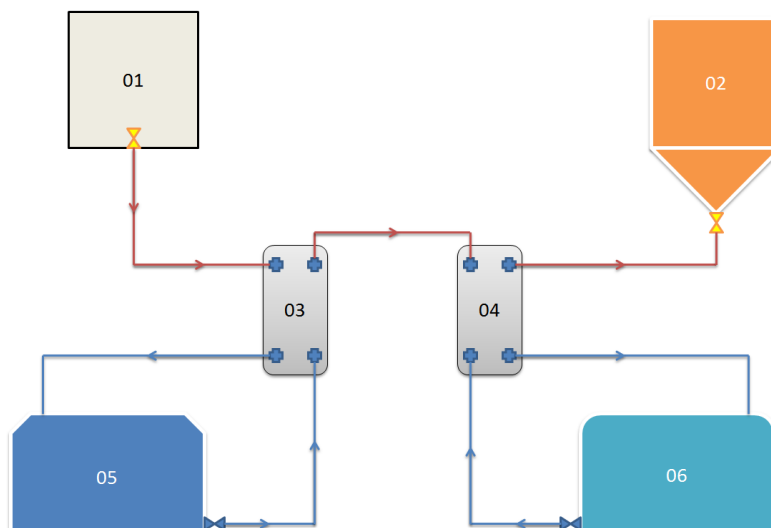


Figura 13 – Sistema idealizado.

Os itens numerados de um a seis indicam respectivamente:

- 01 – Painel de fervura de mosto;
- 02 – Fermentador de cerveja;
- 03 – Primeiro trocador de calor de placas;
- 04 – Segundo trocador de calor de placas;
- 05 – Reservatório termodinâmico;
- 06 – Banco de água fria.

O modelo proposto consiste em fazer com que o mosto seja resfriado em dois estágios, passando por dois trocadores de calor independentes, onde o primeiro trocador de calor irá utilizar água em temperatura ambiente vinda de um reservatório termodinâmico em circuito fechado com o trocador. Já, o segundo trocador de calor está ligado em um banco de água fria, onde água à temperatura controlada resfriará o mosto até a temperatura desejada para inoculação de fermento.

As vantagens desta configuração estão no circuito fechado de água para resfriamento nos dois trocadores de calor, eliminando o desperdício de água, e também a possibilidade de se realizar um *setup* no sistema para atender aos dois tipos de cerveja, *Ale* e *Lager*, e assim, se atingir suas respectivas temperaturas desejadas.

A partir deste modelo, será realizado um modelo termodinâmico e físico do sistema, para se verificar se a solução é viável.

#### **4.1.1 Diagrama esquemático da proposta concebida**

A partir da configuração concebida, um primeiro croqui é montado para se ter uma ideia de como será o modelo físico do sistema, e quais componentes e materiais serão utilizados em sua construção.

A Figura 45, localizada no Apêndice B ao final do presente trabalho, mostra uma visão do sistema com mais detalhes que o modelo anterior, e, também, já com a função de alguns componentes.

No croqui ilustrado, já é possível identificar quais pontos será necessária a utilização de material atóxico, pois este material estará em contato com o mosto cervejeiro, e em quais pontos não há necessidade desta demanda, pois terá contato apenas com água de forma isolada.

Com essas informações é possível se iniciar o dimensionamento do sistema e, em paralelo, à seleção de materiais e componentes.

#### **4.1.2 Dimensionamento térmico**

Com o objetivo de se pré-determinar as temperaturas do sistema necessárias para a que as trocas térmicas sejam efetivas, foi desenvolvida uma planilha utilizando-se o software Excel, da Microsoft. Tal programa permite a utilização da

linguagem de programação conhecida como *Visual Basic for Applications* alinhada ao ambiente de uma planilha.

Toda a linguagem e códigos desenvolvidos encontram-se no Apêndice C, ao final do presente trabalho.

As propriedades termofísicas de viscosidade, condutividade térmica, número de Prandtl, calor específico e massa específica utilizadas para o mosto foram as mesmas para a água saturada por falta de dados e pelas semelhanças de ambos os fluídos. Tais propriedades podem ser encontradas na tabela A.6 em Incropera (2008).

#### **4.1.2.1 A TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NECESSÁRIA**

O primeiro parâmetro calculado foi a taxa de transferência de calor necessária para um resfriamento de mosto com temperaturas quente e fria pré-estabelecidas na seção 2.3.5, utilizando equação 1, utilizando-se a vazão mássica, calor específico e a variação das temperaturas na entrada e na saída do processo de resfriamento.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 1}$$

#### **4.1.2.2 PARÂMETROS DO TROCADOR**

Conforme descrito na seção 3.4.5, foi escolhida como ferramenta de troca térmica o trocador de calor de placas. Com o objetivo de se obter os parâmetros dimensionais do trocador necessários para os cálculos de engenharia, foi realizada uma pesquisa na *Internet*, buscando-se as informações necessárias e, mediu-se manualmente algumas dimensões com um trocador encontrado em varejo.

Para os cálculos necessários, os parâmetros medidos que afetam diretamente nos resultados são:

- a) Quantidade de placas ( $N_t$ );

- b) Vazão mássica do líquido refrigerante;
- c) Vazão mássica do mosto cervejeiro;
- d) Altura total do trocador ( $L_c$ );
- e) Área de transferência de calor por placa ( $A_t$ );
- f) Espessura efetiva das placas ( $L_w$ );
- g) Espessura de uma placa ( $t$ );
- h) Condutividade térmica do material (Aço AISI 304);
- i) Temperatura de entrada do mosto quente;
- j) Temperatura de entrada da água fria;
- k) Temperatura de saída do mosto.

#### **4.1.2.3 Metodologia de cálculo**

Após determinada a taxa de transferência de calor necessária para o resfriamento do mosto por completo, devem ser calculados diversos parâmetros com o objetivo de se determinar as temperaturas de saída do líquido refrigerante e a quantidade de calor trocada nos trocadores de calor. Para fins de organização e melhor descrição, a metodologia de cálculo foi subdividida em quatro tópicos, seguindo uma sequência lógica, de acordo com o encadeamento dos parâmetros, conforme a seguir.

- a) Parâmetros gerais dos trocadores;
- b) Parâmetros dos fluídos de entrada;
- c) Parâmetros calculados no primeiro trocador de calor;
- d) Parâmetros calculados no segundo trocador de calor.

Toda a metodologia de cálculo descrita a seguir foi desenvolvida a partir de Incropera (2008), Kakaç (2002) e Gebremariam (2016), alinhados aos conhecimentos básicos de transferência de calor e massa.

- a) Parâmetros gerais dos trocadores



O parâmetro de quantidade de placas efetivas, definido como  $N_e$ , é calculado utilizando-se o número de total de placas ( $N_t$ ) e subtraindo-se duas placas.

$$N_e = N_t - 2 \quad \text{Eq. 2}$$

A área efetiva de troca térmica, denominada  $A_t$ , é determinada pela multiplicação da área de uma placa e a quantidade de placas efetivas ( $N_e$ ).

$$A_t = N_e \cdot A_e \quad \text{Eq. 3}$$

O número de passes por placa definido para este tipo de trocador é um, pois trata-se de um trocador de placas simples.

$$N_p = 1 \quad \text{Eq. 4}$$

O número de canais por passes pode ser encontrado pela seguinte equação:

$$N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2N_p} \quad \text{Eq. 5}$$

A altura de passe ( $p$ ) pode ser definida por:

$$p = \frac{L_c}{N_t} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde  $L_c$  é a espessura total do trocador de calor.

O parâmetro  $b$  é calculado por:

$$b = p - t \quad \text{Eq. 7}$$

No caso,  $p$  é a altura de passe, como mencionada na equação 6, e  $t$  é a espessura de canal de uma placa. A Figura 14 ilustra os parâmetros  $b$ ,  $t$  e  $p$ .

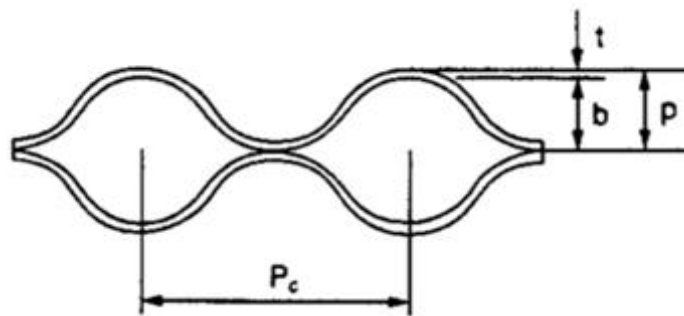


Figura 14 – Ilustração dos parâmetros  $b$ ,  $t$  e  $p$ .

O diâmetro hidráulico pode ser calculado pela expressão:

$$De = \frac{2 \cdot b}{\phi} \quad \text{Eq. 8}$$

Segundo Kays e London (1998), o parâmetro  $\phi$  pode ser definido com um valor próximo ou igual a 1,17. Tal parâmetro diz respeito ao fator de alargamento da área de uma célula unitária de trocadores de placa do tipo chevron.

A equação que descreve o parâmetro  $\phi$  é definida por:

$$\phi = \frac{1}{6} \left\{ 1 + \left[ 1 + \left( \frac{\pi}{2 \cos(\beta)} \right)^2 \gamma^2 \right]^{0,5} + 4 \left[ 1 + \left( \frac{\pi}{2\sqrt{2} \cos(\beta)} \right)^2 \gamma^2 \right]^{0,5} \right\} \quad \text{Eq. 9}$$

O ângulo  $\beta$  tem valor de  $31^\circ$  e  $\gamma$  vale 0,453. Tais valores determinam um valor de 1,17 para o fator de alargamento.

b) Parâmetros dos fluídos de entrada

A velocidade mássica do canal ( $G_c$ ) pode ser determinada por:

$$G_c = \frac{\dot{m}}{N_{cp} \cdot b \cdot L_w} \quad \text{Eq. 10}$$

Os parâmetros  $\dot{m}$  e  $L_w$  indicam a vazão mássica do fluído que entra no trocador e a altura efetiva da placa, respectivamente.

O número de Reynolds é calculado utilizando-se  $G_c$ ,  $De$  e  $\mu$ , onde  $\mu$  é a viscosidade do fluído na temperatura inicial de entrada e pode ser encontrado na tabela A.6 em Incropera (2008).

$$Re = \frac{G_c \cdot De}{\mu} \quad \text{Eq. 11}$$

O número de Nusselt, segundo Kakaç (2002), pode ser determinado por:

$$Nu = 0,2 \cdot Re^{\frac{3}{4}} \cdot Pr^{\frac{2}{5}} \quad \text{Eq. 12}$$

O número de Prandtl (Pr) pode ser obtido, também, pela tabela A.6 em Incropera (2008).

Os coeficientes de transferência de calor por convecção são determinados pela expressão:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{De} \quad \text{Eq. 13}$$

Onde k é a condutividade térmica do material que compõe as placas do trocador de calor. No caso, aço AISI-304. Este valor pode ser obtido pela tabela A.1 em Incropera (2008).

Segundo Kakaç (2002), o coeficiente global de transferência de calor é determinado por:

$$\frac{1}{Uc} = \frac{1}{h1} + \frac{1}{h2} + \frac{1}{k} \quad \text{Eq. 14}$$

c) Parâmetros calculados no primeiro trocador de calor

Como apenas as temperaturas de entrada dos fluídos no primeiro trocador são conhecidas, foi utilizado o método da efetividade-NUT, de acordo com Incropera (2008), que permite determinar as temperaturas de saída de ambos os fluídos.

Seguindo a metodologia demonstrada no livro, deve-se determinar a taxa de transferência de calor máxima possível, segundo a equação:

$$q_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n} \cdot (T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad \text{Eq. 15}$$

Calcula-se os valores de  $q_{m\acute{a}x}$  para o fluído refrigerante e o mosto utilizando-se o valor de  $C_{m\acute{i}n}$ , que é o menor valor entre  $C_f$  e  $C_q$ , descritos nas equações 17 e 18.

O valor de NUT é determinado de acordo com a seguinte expressão, utilizando-se o coeficiente global de transferência de calor ( $U_c$ ), a área efetiva de troca térmica ( $At$ ) e o menor valor de calor específico dos fluídos:

$$NUT = \frac{U_c \cdot At}{C_{mín}} \quad \text{Eq. 16}$$

Após determinado o valor de NUT deve-se encontrar os valores de  $C_{mín}$  e  $C_{máx}$ , a partir das equações:

$$C_{mín} = \dot{m} \cdot C_f \quad \text{se } C_f < C_q \quad \text{Eq. 17}$$

$$C_{mín} = \dot{m} \cdot C_q \quad \text{se } C_q < C_f \quad \text{Eq. 18}$$

A partir da relação  $C_{mín} / C_{máx}$  é possível determinar a efetividade do trocador de calor utilizando-se um método iterativo a partir da seguinte expressão para escoamentos contracorrente:

$$NUT = \frac{1}{Cr - 1} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon Cr - 1}\right) \quad \text{Eq. 19}$$

Reorganizando-se a expressão acima chega-se a:

$$\varepsilon = (e^{(Cr - 1) \cdot NUT} \cdot (\varepsilon \cdot Cr - 1)) + 1 \quad \text{Eq. 20}$$

Para se determinar a efetividade, é estimado um valor inicial de  $\varepsilon$ , e com este valor calcula-se um novo valor para  $\varepsilon$ , que será utilizado novamente na expressão para se encontrar um novo valor de  $\varepsilon$ , até que os valores encontrados sejam 99,99% próximos.

Após se obter a efetividade do trocador de calor é possível determinar a quantidade de calor real de troca térmica no mesmo.

$$q = \varepsilon \cdot q_{m\acute{a}x} \quad \text{Eq. 21}$$

A partir do valor calculado da troca térmica efetiva que ocorre no primeiro trocador de calor é possível determinar as temperaturas de saída dos fluídos quente e frio a partir das seguintes equações:

$$T_{q,sai} = T_{q,ent} - \frac{q}{m \cdot \dot{C}p,q} \quad \text{Eq. 22}$$

$$T_{f,sai} = T_{f,ent} - \frac{q}{m \cdot \dot{C}p,f} \quad \text{Eq. 23}$$

d) Parâmetros calculados no segundo trocador de calor

Na configuração concebida como solução, o mosto sairá da panela de fervura em direção aos trocadores de calor, que estarão conectados em sequência. Portanto, a temperatura com que o mosto sairá do primeiro trocador de calor é, conseqüentemente, a mesma com que irá entrar no segundo trocador de calor, com o objetivo de se atingir a temperatura desejada de saída do mosto ao final do processo de troca térmica, surge a necessidade de se encontrar as temperaturas de entrada e saída do líquido refrigerante.

Conhecendo-se a quantidade de calor total necessária para o resfriamento do mosto a partir da temperatura de fervura até a temperatura desejada na saída, calculada no primeiro tópico desta seção, é possível determinar a quantidade de calor de troca necessária no segundo trocador, a partir da seguinte expressão:

$$Q_2 = Q - q \quad \text{Eq. 24}$$

Onde  $Q_2$  é a quantidade de calor trocada no segundo trocador de calor,  $Q$  é a quantidade de calor necessária para o resfriamento do mosto por completo e  $q$  é a quantidade de calor de troca real do primeiro trocador de calor.

A partir da seguinte expressão é possível determinar, por método iterativo, as temperaturas de entrada e saída do líquido refrigerante, adotando-se uma temperatura de entrada estimada, menor que a temperatura de saída desejada. Para cervejas do tipo *Ale* a temperatura de partida estimada foi de 15,999 graus Celsius, já para as de tipo *Lager* o valor estimado foi de 7,999 graus Celsius, com iterações de 0,001 graus Celsius em busca de melhores aproximações.

$$T_{f2, sai} = \frac{Q_2}{\dot{m}_2 \cdot C_{pf2}} + T_{partida} \quad \text{Eq. 25}$$

A equação 25 utiliza a vazão mássica que entra no segundo trocador de calor, o calor específico, que também é recalculado a cada iteração e a temperatura de partida iterada.

Com as temperaturas encontradas a partir das iterações e interpolações, calcula-se a média logarítmica das temperaturas ( $\Delta T_{ml}$ ), conforme a expressão:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Eq. 26}$$

Onde:

$$\Delta T_1 = T_{q2, ent} - T_{f2, sai} \quad \text{Eq. 27}$$

$$\Delta T_2 = T_{q2, sai} - T_{f2, ent} \quad \text{Eq. 28}$$

A partir da diferença logarítmica obtida, deve-se obter a quantidade de calor do segundo trocador de calor determinada a partir das iterações e interpolações até que  $Q_{2, partida}$  seja igual ou maior que  $Q_2$  calculado pela equação 24.

$$Q_{2,partida} = U_{c2} \cdot A_t \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Eq. 29}$$

Atingindo-se  $Q_{2,partida}$  desejado, as iterações e interpolações são encerradas e as temperaturas de entrada e saída do fluido refrigerante são obtidas.

Na seção 4.1.3 será descrito o desenvolvimento da Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema desenvolvida a partir das equações descritas e ordenadas na seção 4.1.2.

#### 4.1.3 Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema

Com o objetivo de se determinar as temperaturas do mosto e do fluido refrigerante do sistema em cada estágio, foi desenvolvida a Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema, que serve como ferramenta para a automatização dos parâmetros e resultados.

Toda a linguagem de programação foi desenvolvida dentro do software Excel, da Microsoft, utilizando-se a linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*). A escolha de tal ferramenta deu-se na liberdade de se desenvolver uma interface gráfica totalmente customizável no ambiente Excel. Todas as linhas de código desenvolvidas para a planilha estão disponíveis no Apêndice C.

##### 4.1.3.1 A interface gráfica

Foi desenvolvida uma interface gráfica simples com o objetivo de possibilitar a visualização fácil e rápida dos parâmetros do sistema de trocas térmicas.

A Figura 15 ilustra a área que contém os parâmetros gerais dos trocadores de calor necessários para os cálculos e os dois únicos botões interativos presentes na planilha e a vazão do fluido refrigerante que atua no primeiro trocador de calor.



Existe a possibilidade de se escolher o tipo de cerveja, *Ale* ou *Lager*, tal escolha afeta diretamente na temperatura de saída final do mosto cervejeiro. Todas as células preenchidas na cor amarela referem-se a parâmetros que interferem nos cálculos, já as células em branco referem-se a parâmetros coletados durante os estudos do projeto e estão presentes para fins informativos, pois não impactam nos cálculos.

A Figura 16 ilustra diversos parâmetros, como vazão mássica do mosto, cálculos realizados no primeiro trocador de calor, vazão mássica do fluido refrigerante contido no refrigerador, que entra no segundo trocador, quantidade de placas do segundo trocador e a quantidade de calor trocada no mesmo.

MENU	
Tipo Trocador	Placas
Tipo Cerveja	Lager
DADOS TROCADOR DE CALOR	
Número de placas - Trocador 1	30,000
Vazão mássica água da caixa d'água ( kg / s )	0,417
Lc ( m )	0,066
Área de transferência de calor / placa ( m ^ 2 )	0,012
Lv	0,155
Lp	0,125
Lh	0,045
Lw ( m )	0,065
Ângulo Beta dos pratos	60,000
Diâmetro entrada água	0,016
Diâmetro entrada mosto	0,013
Espessura das placas ( m )	0,0003
Condutividade térmica Aço AISI 304 ( J / kg * K )	14,9

Figura 15 – Parâmetros dos trocadores de calor.

<b>BOMBA - MOSTO</b>		
Vazão	240,000	l / h
Vazão mássica escumamento	0,069	kg / s
<b>DADOS DO TROCADOR 1</b>		
Cmin	292,802	W / K
Cmáx	1757,655	W / K
NUT	4,275	-
Efetividade do trocador 1	0,98	-
Taxa de transferência de calor real	0,000	W
Cmin / Cmáx	0,167	-
<b>BOMBA - REFRIGERADOR</b>		
Vazão	1980,000	l / h
Vazão mássica escumamento	0,573	kg / s
<b>DADOS DO TROCADOR 2</b>		
Temperatura água que entra no trocador 2	5,404	°C
Número de placas do trocador 2	30,000	-
Quantidade de calor trocada no trocador 2	26352,20	W

**Figura 16 – Parâmetros do sistema.**

A Figura 17 contém a quantidade de calor necessária para o resfriamento do mosto, as trocas térmicas que ocorrem no primeiro e, no segundo trocador de calor, durante o funcionamento do sistema, em função de todos os parâmetros descritos nas células amarelas e as propriedades dos fluídos após os cálculos e iterações terem sido realizados.

TROCAS TÉRMICAS			
Quantidade de calor necessária (mosto)	26352,180	W	
Quantidade de calor trocada no trocador 1	0,000	W	
Quantidade de calor trocada no trocador 2	26352,180	W	
PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	98,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00028567	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandtl	1,787	-	
Condutividade térmica	0,679	W / (m * K)	
Calor específico	4215,00	J / kg * K	
Temperatura entrada mosto trocador 1	98,000	°C	Mosto entra trocador 1
Viscosidade	0,000285667	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandtl	1,787	-	
Condutividade térmica	0,679	W / (m * K)	
Calor específico	4215,00	J / kg * K	
Temperatura saída mosto trocador 2	8,000	°C	Mosto sai trocador 2
Viscosidade	0,00138260	W / (m * K)	
Prandtl	9,970	-	
Condutividade térmica	0,584	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4196,20	J / kg * K	
Temperatura saída mosto trocador 1	98,000	°C	Mosto sai trocador 1
Viscosidade	0,00028567	W / (m * K)	
Prandtl	1,787	-	
Condutividade térmica	0,679	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4215,00	J / kg * K	
Temperatura saída água trocador 1	98,000	°C	Água sai trocador 1
Viscosidade	0,00028567	W / (m * K)	
Prandtl	1,787	-	
Condutividade térmica	0,679	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4215,00	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	5,404	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00149542	W / (m * K)	
Prandtl	10,886	-	
Condutividade térmica	0,579	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4202,15	J / kg * K	
Temperatura saída água trocador 2	16,392	°C	Água sai trocador 2
Viscosidade	0,00109762	W / (m * K)	
Prandtl	7,712	-	
Condutividade térmica	0,597	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4184,61	J / kg * K	

Figura 17 – Trocas térmicas e propriedades dos fluídos.

A Figura 18 contém a tabela A.6 reproduzida, disponível em Incropera (2008), com o objetivo de se realizar as interpolações necessárias para as temperaturas dos fluídos. A Cada iteração realizada pelas linhas de código, determina-se, novamente, as propriedades dos fluídos para cada temperatura iterada, até que se atinja a temperatura desejada, previamente estipulada.

Temperatura (K)	Viscosidade (N * s / m <sup>2</sup> )	Condutividade Térmica ( W / ( m * K ) )	Número de Prandtl	Calor específico ( J / kg * K )	pô ( kg / m ^ 3 )
273	0,00175	0,569	12,99	4217	1000
275	0,001652	0,574	12,22	4211	1000
280	0,001422	0,582	10,26	4198	1000
285	0,001225	0,59	8,81	4189	1000
290	0,00108	0,598	7,56	4184	1001
295	0,000959	0,606	6,62	4181	1002
300	0,000855	0,613	5,83	4179	1003
305	0,000769	0,62	5,2	4178	1005
310	0,000695	0,628	4,62	4178	1007
315	0,000631	0,634	4,16	4179	1009
320	0,000577	0,64	3,77	4180	1011
325	0,000528	0,645	3,42	4182	1013
330	0,000489	0,65	3,15	4184	1016
335	0,000453	0,656	2,88	4186	1018
340	0,00042	0,66	2,66	4188	1021
345	0,000389	0,664	2,45	4191	1024
350	0,000365	0,668	2,29	4195	1027
355	0,000343	0,671	2,14	4199	1030
360	0,000324	0,674	2,02	4203	1034
365	0,000306	0,677	1,91	4209	1038
370	0,000289	0,679	1,8	4214	1041
373	0,000279	0,68	1,76	4217	1044
375	0,000274	0,681	1,7	4220	1045
380	0,00026	0,683	1,61	4226	1049
385	0,000248	0,685	1,53	4232	1053
390	0,000237	0,686	1,47	4239	1058

**Figura 18 – Quantidades de calor e propriedades dos fluídos.**

A Figura 19 ilustra uma aba existente na planilha com que tem como objetivo gerar um arquivo PDF ilustrando os trocadores de calor e as temperaturas dos fluídos que atuam em cada trocador.

E, por fim, a Figura 20 contém os dois botões interativos que, quando pressionados, executam as ações de realizar os cálculos e gerar o arquivo PDF.

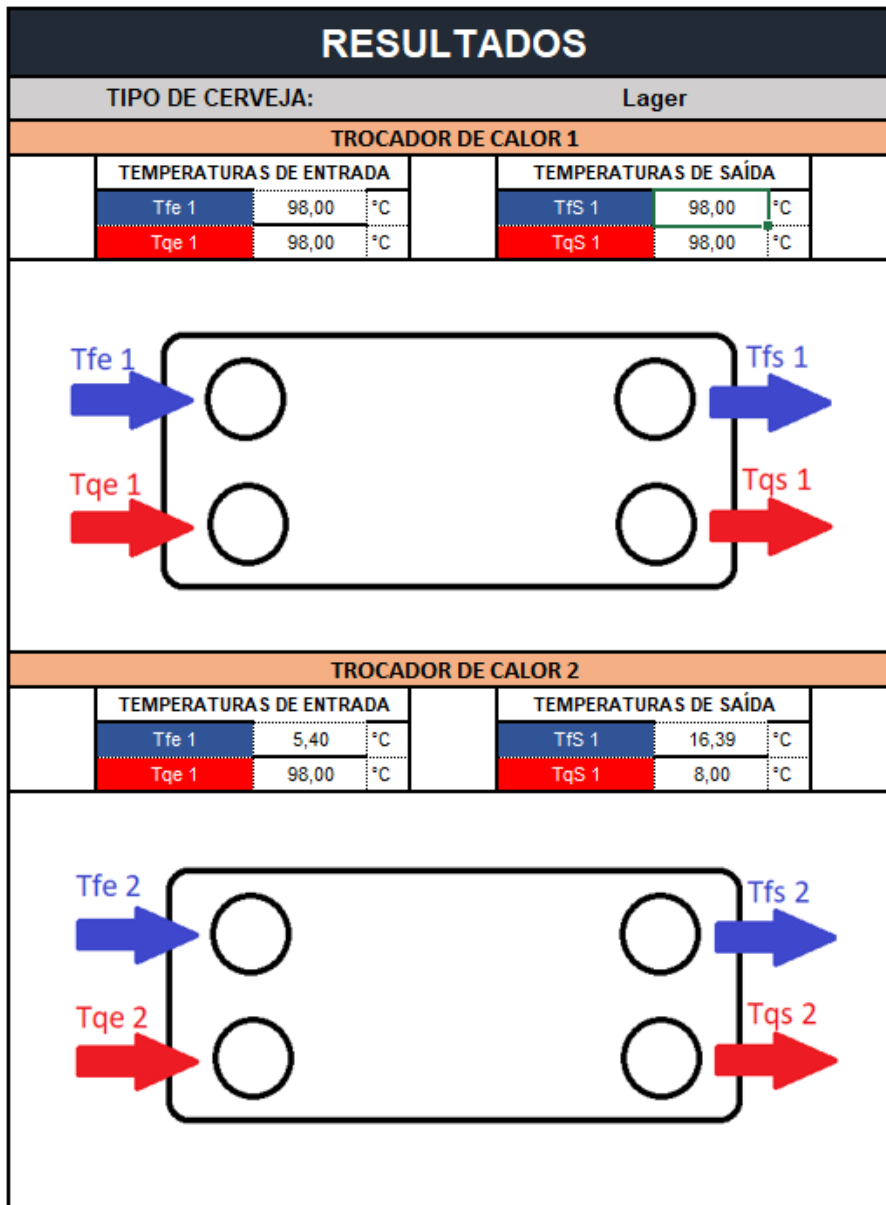


Figura 19 – Ilustração dos trocadores de calor e temperaturas de trabalho.

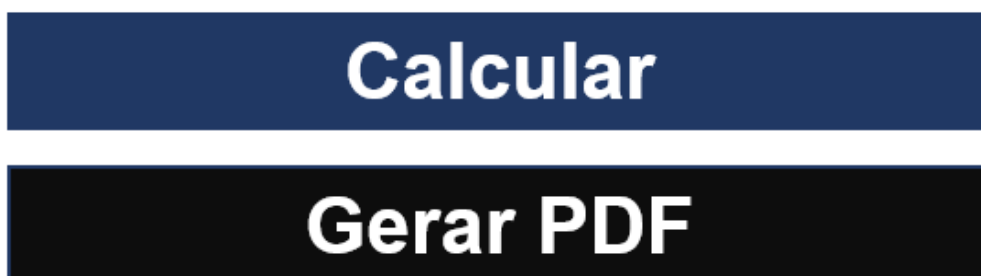


Figura 20 – Botões interativos.

A interface completa da Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema encontra-se disponível no Apêndice F, ao final do presente trabalho.

Na seção 4.1.4 serão descritos os critérios para seleção dos componentes que irão incorporar o sistema.

#### **4.1.4 Seleção de componentes**

O dimensionamento e seleção dos componentes do sistema será dividido de acordo com as funções a seguir:

- a) Bomba para transferência de mosto;
- b) Tubulação para transferência de mosto;
- c) Tubulação para água;
- d) Trocadores de calor;
- e) Reservatório termodinâmico;
- f) Banco de água fria;
- g) Periféricos.

Na sequência, será descrita a seleção levando em conta as particularidades de cada função, sendo que as tubulações serão agrupadas para se facilitar a especificação dos materiais.

##### **4.1.4.1 Bomba para transferência de mosto**

A bomba deverá ter vazão de 240 litros por hora, para atender à demanda do projeto de se fazer o resfriamento em 30 minutos. Além disso, a bomba deve conter componentes de material atóxico e precisa suportar temperaturas elevadas.

Dentre as opções disponíveis no mercado, foram listadas bombas disponíveis à pronta entrega e que atendam às necessidades do projeto. A tabela com as características de cada bomba encontra-se no Apêndice D.

Foi escolhida a opção 6. Dentre suas vantagens estão que a área de contato com o mosto se dá com aço inox 304 polido, e o rotor da bomba é de fácil desmontagem para limpeza e manutenção, sendo conectado por uma abraçadeira com apenas uma borboleta manual, mais simples de se abrir e fechar que as configurações com parafusos. Além disso, a bomba selecionada suporta

temperaturas de até 140°C, bem acima dos 98°C estipulados como temperatura de fervura do mosto. Outra vantagem da bomba é a proteção do motor também confeccionada em inox, protegendo o motor de eventuais respingos de mosto oriundos das panelas que estarão próximas, e também facilitando a limpeza externa da bomba.

#### 4.1.4.2 Tubulação para transferência de mosto

Os materiais disponíveis para tubulações são classificados em metálicos e poliméricos. A condição de seleção do material para o escoamento do mosto foi a necessidade de ser atóxico e suportar a temperatura de fervura do mosto, estimada em 98°C. Comparou-se diversos materiais e suas principais características, que serviram como critérios de seleção para qual material seria melhor para transferência de água e mosto. As características dos materiais encontram-se no Quadro 4.

**Quadro 4 – Materiais para tubulações.**

Material	Dimensões	Temperatura máxima de operação	Custo por metro	Conexões	Observações
Aço Inox	3/8" a 3/4"	900°C	R\$32,90 a R\$87,90	Conexões roscadas	Material rígido, necessidade de soldas e usinagens especiais.
Alumínio	3/8" a 3/4"	250°C	R\$12,90 a R\$27,90	Conexões roscadas	Material rígido, necessidade de soldas e usinagens especiais.
Cobre	1/2" a 3/4"	250°C	R\$29,16 a R\$44,76	Conexões roscadas	Material rígido, necessidade de soldas e usinagens especiais.

Silicone	3/8" a 3/4"	140°C	R\$19,30 a R\$36,50	Engate tipo espigão para mangueiras	Flexíveis, fácil limpeza e manuseio.
Polipropileno	3/8" a 3/4"	60°C	R\$6,20 a R\$9,80	Engate tipo espigão para mangueiras	Flexíveis, fácil limpeza e manuseio.
Polietileno	3/8" a 3/4"	80°C	R\$1,20 a R\$2,00	Engate tipo espigão para mangueiras	Flexíveis, fácil limpeza e manuseio.

Com os materiais atóxicos descritos no Quadro 4, foram descartados imediatamente os dois últimos (polipropileno e polietileno), pois não suportam a temperatura de saída do mosto. Dentre os materiais restantes, todos irão atender aos requisitos do projeto de suportarem as temperaturas e serem materiais atóxicos.

O material selecionado para transferência de mosto é o silicone, por se tratar de um material flexível. Apesar de ser relativamente mais caro que o alumínio ao se fazer uma análise direta de custo, utilizando mangueiras de silicone, não há necessidade de se fazer usinagens e soldas especiais sob medida, como seria o caso com alumínio e aço inox. Utilizando mangueiras de silicone, as conexões são facilitadas utilizando espigões comerciais de aço inox, além de se ganhar flexibilidade no manuseio do equipamento e facilitar a manutenção e limpeza.

#### **4.1.4.3 Tubulação para transferência de água**

Como não há necessidade de utilização de material atóxico para transferência de água, tendo em vista que esta água de processo não entrará em contato com o mosto, o material a ser utilizado para esta finalidade pode ser simples e de fácil acesso. Portanto, será utilizado PVC comum para a função.

Ainda assim, para haver flexibilidade no manuseio e facilidade de limpeza e manutenção não só do sistema, mas também das painéis utilizadas na produção, serão utilizadas mangueiras flexíveis na área próxima às painéis, e tubulações rígidas próximas às paredes, em áreas que não afetem o manuseio do sistema.



#### 4.1.4.4 Trocadores de calor

Na seção 3.4.5 determinou-se que os trocadores serão de placas planas, restando determinar a quantidade de placas dos trocadores.

Com o uso da planilha de cálculos, pode-se selecionar a melhor configuração de trocadores de calor. Como há duas situações de resfriamento (*Lager* e *Ale*), o trocador de calor será selecionado com base no tipo de cerveja que requer um resfriamento maior, ou seja, cervejas *Lager*, em que é necessário resfriar o mosto até oito graus Celsius.

Considerando que um dos aspectos apontados no projeto é a facilidade de montagem e manutenção do sistema, os dois trocadores de calor deverão ser do mesmo tamanho, evitando assim erros de *setup* dos equipamentos.

Desenvolveu-se uma tabela comparativa de quantidade placas dos trocadores de calor, disponível no Apêndice E, e seu impacto na temperatura necessária de entrada de água no segundo trocador de calor, considerando uma vazão fixa do mosto a 240 litros por hora, atingindo o tempo de resfriamento de trinta minutos estabelecido como requisito técnico do projeto. Foram simuladas diversas faixas de temperatura para entrada de água de resfriamento no primeiro trocador de calor, a fim de se avaliar qual a temperatura de entrada de água para resfriamento no segundo trocador de calor para atingir a temperatura de 10°C.

Pode-se observar na tabela disponível no Apêndice D que os trocadores de calor de 60, 50 e 40 placas irão oferecer a mesma temperatura. Portanto os trocadores de calor de 50 e 60 placas serão descartados, visando utilizar os trocadores de menor custo.

O valor de varejo de cada trocador está listado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Características do trocador de placa planas.**

Quantidade de placas	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
20	506,10	1.012,20
30	808,09	1.616,18
40	853,91	1.707,82

Considerando-se que a água de resfriamento que será utilizada no segundo trocador irá permanecer em um reservatório, torna-se arriscado utilizar um trocador de calor de 20 placas, devido a necessidade de fazer com que a água seja bombeada em temperatura próxima à 1°C, o que certamente irá causar congelamento em pontos do reservatório.

Levando em consideração as informações destacadas até aqui, serão utilizados dois trocadores de calor com 30 placas cada para fazer o resfriamento do mosto.

Selecionada a ferramenta de resfriamento, na sequência é determinada a temperatura de *setup* para cervejas tipo *Lager* e *Ale*, considerando variação da temperatura do dia, que irá influenciar na temperatura de água de resfriamento do primeiro trocador de calor. Estas temperaturas encontram-se disponíveis na Tabela 5.

**Tabela 5 - Temperaturas desejadas no segundo trocador de calor.**

<b>Cerveja tipo</b>	<b>Temperatura de entrada de água no primeiro trocador</b>	<b>Vazão do mosto (litros/hora)</b>	<b>Temperatura de saída do mosto</b>	<b>Temperatura de entrada de água no segundo trocador de calor</b>
<b>Lager</b>	5	240	10	8,48
<b>Lager</b>	10	240	10	8,32
<b>Lager</b>	15	240	10	8,19
<b>Lager</b>	20	240	10	8,07
<b>Lager</b>	25	240	10	7,97
<b>Lager</b>	30	240	10	7,88
<b>Lager</b>	35	240	10	7,81
<b>Ale</b>	5	240	16	14,97
<b>Ale</b>	10	240	16	14,79
<b>Ale</b>	15	240	16	14,63
<b>Ale</b>	20	240	16	14,5

Cerveja tipo	Temperatura de entrada de água no primeiro trocador	Vazão do mosto (litros/hora)	Temperatura de saída do mosto	Temperatura de entrada de água no segundo trocador de calor
Ale	25	240	16	14,38
Ale	30	240	16	14,28
Ale	35	240	16	14,2

Com os dados computados, pode-se afirmar que dois trocadores de calor de 30 placas deverão atender à demanda da cervejaria para os dois tipos de cerveja que serão produzidos.

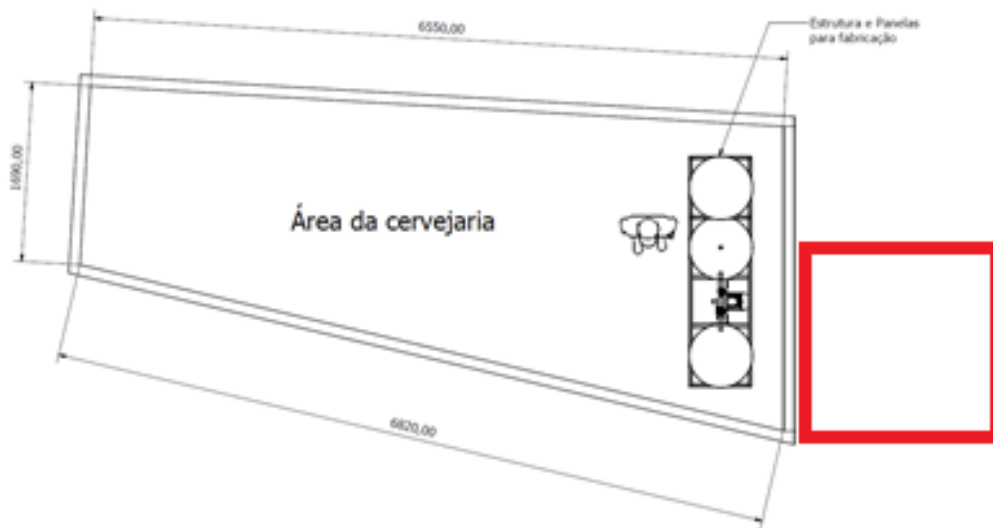
#### 4.1.4.5 Reservatório Termodinâmico

Segundo Rodriguez (2018), um reservatório termodinâmico é um volume de controle capaz de manter sua temperatura e propriedades constantes, mesmo quando sob ação de transferências de calor e massa.

Levando em consideração o conceito apresentado, será empregado no projeto um reservatório com a maior dimensão possível para ser utilizado como reservatório termodinâmico.

Basicamente, há duas opções possíveis para tal reservatório: a construção de um equipamento ou a aquisição de um reservatório comercial. Devido à complexidade de construção de um reservatório e do espaço disponível, será adquirido um reservatório que possa armazenar grande quantidade de água.

O espaço disponível para colocação do reservatório é na área externa à cervejaria, destacado na Figura 21.

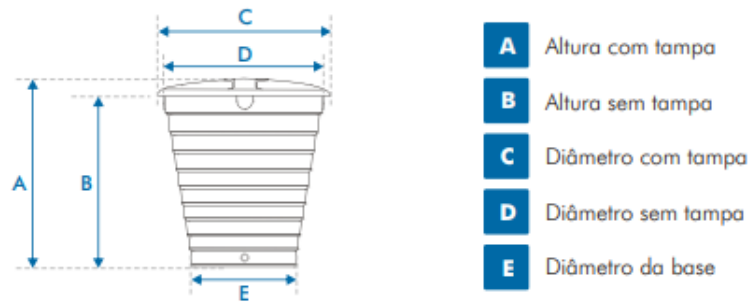


**Figura 21 – Localização do reservatório termodinâmico.**

Esta área é plana, e aproximadamente quadrada, com lado de um metro e meio. O reservatório a ser adquirido será uma caixa d'água simples, padrão NBR 13210, devido à facilidade de instalação e manutenção, baixo custo e alta capacidade de armazenamento.

Para seleção foi utilizado o catálogo da empresa Fortlev, com as dimensões disponíveis na Figura 22.

De acordo com o catálogo percebe-se que a maior dimensão diametral da caixa corresponde à cota C. Para atender ao espaço destinado ao reservatório, será utilizada a caixa d'água com capacidade para 1.000 litros, pois possui diâmetro máximo de 1,52 metros.



Capacidade em litros	Dimensões em metros					Pesos em quilos	
	A	B	C	D	E	Caixa vazia	Caixa cheia
500	0,66	0,58	1,24	1,15	1,00	14,10	514,10
1.000	0,90	0,80	1,52	1,40	1,17	20,30	1.020,30
1.500	0,88	0,75	1,74	1,63	1,51	27,10	1.527,10
2.000	1,14	0,99	1,93	1,87	1,52	36,80	2.036,80
3.000	1,47	1,32	2,06	1,89	1,52	49,00	3.049,00
4.000	1,82	1,66	2,12	2,02	1,52	57,10	4.057,10
5.000	1,85	1,64	2,34	2,23	1,86	74,90	5.074,90
6.000	1,92	1,70	2,45	2,31	2,00	94,00	6.094,00
7.500	2,27	2,01	2,57	2,45	2,00	110,30	7.610,30
8.000	2,39	2,09	2,62	2,57	2,00	116,40	8.116,40
10.000	2,31	2,00	2,82	2,70	2,38	136,70	10.136,70
*10.000	2,82	2,50	2,70	2,50	2,00	132,00	10.132,00
12.000	2,46	2,12	3,05	2,89	2,48	161,00	12.161,00
15.000	2,94	2,59	3,09	2,95	2,50	190,90	15.190,90
20.000	3,67	3,26	3,25	3,08	2,41	278,10	20.278,10
**20.000	4,10	3,79	2,96	2,91	2,35	271,50	20.271,50
25.000	4,39	4,09	3,34	3,31	2,42	413,00	25.413,00

Figura 22 – Catálogo Fortlev.  
 Fonte: Fortlev (2017)

**4.1.4.6 Banco de água fria**

O banco de água fria utilizará o mesmo conceito de reservatório termodinâmico citado na seção anterior. Porém, com o diferencial de controlar a temperatura da água em seu interior. Portanto, deve ser um reservatório com capacidade de refrigeração.

Visando o aproveitamento de espaço no interior da cervejaria, o banco de água fria será posicionado junto à parede oposta às painéis. Esta parede possui 1,69 metros de comprimento. Portanto, o banco de água fria não poderá ultrapassar esta dimensão.

Para tal fim, será utilizado um refrigerador comercial horizontal, que será enchido com água e terá sua temperatura controlada através de um termostato simples.

Refrigeradores horizontais com medidas próximas à 1,69 metros de largura possuem capacidade entre 500 e 550 litros, e, em pesquisa de mercado realizada apresentaram os preços disponíveis na Tabela 6.

**Tabela 6 – Modelos e preços de refrigeradores.**

Modelo	Local de compra	Capacidade (litros)	Preço (R\$)
Consul CHB53EB	Americanas	534	1.823,05
Midea RCFA41	Extra	415	1.698,99
Metalfrio DA550	Frigelar	550	2.127,00
Fricon HCEB411	Magazine Luiza	411	1.889,91
Esmaltec EFH350	Magazine Luiza	305	1.359,00
Gelopar GHBS	Dufrio	411	1.799,00

Devido ao elevado custo que o projeto vai demonstrando após compra dos trocadores de calor e bomba para o mosto, os valores acima apresentados estão além do orçamento disponível para o projeto. Portanto, a solução buscada foi a aquisição de um refrigerador semi-novo.

Após pesquisa em sites e lojas de vendas de equipamentos semi-novos, foi adquirido um refrigerador horizontal modelo Consul CHB53EB pelo valor de R\$ 650,00. Apesar de não ser um equipamento novo e não dispor de garantia do fabricante, os testes realizados antes da compra do equipamento foram satisfatórios para aquisição do equipamento.

O termostato para controle de temperatura do banco de água fria será utilizado do estoque de equipamentos da própria cervejaria, que possui um termostato reserva para controle de temperatura dos fermentadores, modelo Full Gauge TIC-17. O termostato irá manter o freezer acionado até que se atinja a temperatura estipulada pelo aparelho, sendo medida através de um sensor no interior do freezer.

#### 4.1.4.7 Periféricos

Devido à posição do reservatório termodinâmico e do banco de água fria, existe a necessidade de que a água presente nos dois tanques seja bombeada para o sistema, visto que a transferência não poderá ser feita via gravidade.

Para bombeamento da água do banco de água fria será utilizada uma bomba periférica já disponível na cervejaria que estava sem uso, do fabricante GoodYear, modelo GYPM100023011.

Já para o bombeamento de água do reservatório termodinâmico, é necessário a aquisição de uma bomba submersa, pois a bomba estará dentro da caixa d'água. Para seleção da bomba adequada, realizou-se um levantamento com diversas opções disponíveis no mercado, disponíveis no Quadro 5.

**Quadro 5 - Modelos e preços de bombas.**

Imagem	Modelo	Preço (R\$)	Diâmetro da conexão (polegadas)	Vazão máxima (l/h)	Garantia
	Ecco 300W 127V(110V) Anauger	272,90	3/4"	1500	12 meses
	SP2 Flat 250W 127V(110V) Kärcher	468,90	3/4"	6000	12 meses
	SP3 Dirt 350W 127V(110V) Kärcher	492,90	3/4"	7000	12 meses

Imagem	Modelo	Preço (R\$)	Diâmetro da conexão (polegadas)	Vazão máxima (l/h)	Garantia
	ESUB-4/9 1CV 127V(110V) Eletroplás	1.489,90	1/2"	4200	6 meses
	800 380W 127V(110V) Anauger	388,97	3/4"	1970	12 meses
	EBSV-800 340W 127V(110V) Eletroplás	368,90	3/4"	1500	6 meses
	XKS-401PW 1/2CV 127V(110V) Ferrari	395,90	3/4"	7500	12 meses
	ESUB-3/18 1CV 127V(110V) Eletroplás	1.397,90	3/8"	3600	6 meses

Fonte: Leroy Merlin (2018).

Por se tratar de um item que não é crítico, e onde a vazão máxima de 1.500 litros por hora (menor vazão na tabela) já atende à demanda do sistema, a bomba selecionada é a de menor custo. Trata-se do modelo Ecco 300W do fabricante Anauger, com custo de R\$ 272,90.

Todas as conexões utilizadas no sistema serão de aço inox caso haja contato com o mosto, ou de PVC caso não haja contato com o mosto. Desta forma há uma



padronização entre os sistemas de água e mosto, atendendo à demanda de utilização de materiais atóxicos e de baixo custo.

#### 4.1.5 Projeto Mecânico

Apesar do grande número de componentes e da interligação necessária entre as funções do sistema, o projeto mecânico é relativamente simples, pois utiliza quase que em sua totalidade componentes comerciais padronizados para a construção do sistema.

Para descrever o projeto mecânico, o sistema será dividido em três grandes grupos:

1. Trocadores de calor;
2. Reservatório termodinâmico;
3. Banco de água fria.

Em cada subsistema serão incluídos os itens periféricos, como conexões, engates e até mesmo a bomba utilizada em cada seção.

1. Trocadores de calor

Para que o sistema funcione corretamente, o mosto deve sair da panela de fervura, passar pela bomba, onde terá sua vazão controlada, passar pelos dois trocadores de calor e seguir para o fermentador, conforme representação esquemática da Figura 23.

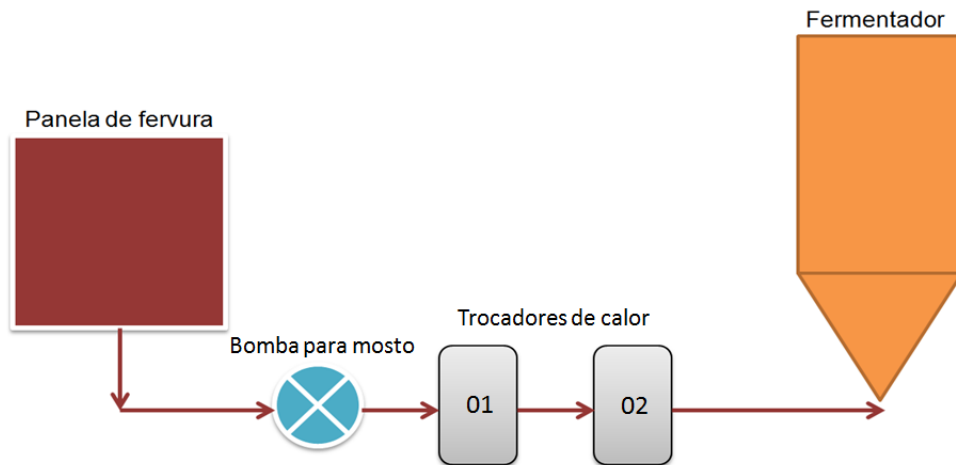


Figura 23 – Deslocamento de mosto.

Para que o sistema tenha bom funcionamento, a bomba deverá ser posicionada próxima à panela de fervura e os trocadores devem, por sua vez, permanecer próximos à bomba para evitar perdas de carga antes dos trocadores.

Como mencionado na seção 4.1.4.2, a transferência de mosto será efetuada com mangueiras de silicone, desde a saída da panela até a chegada ao fermentador. Tanto a panela quanto o fermentador possuem válvulas de esfera construídas em aço inox para permitir ou bloquear a vazão de mosto. Considerando que tanto a saída da bomba, quanto as válvulas mencionadas possuem rosca de 3/4", serão utilizadas conexões do tipo espigão com esta dimensão de rosca e conexão para mangueira de 1/2".

O posicionamento da bomba e dos trocadores de calor se dará conforme Figura 24.

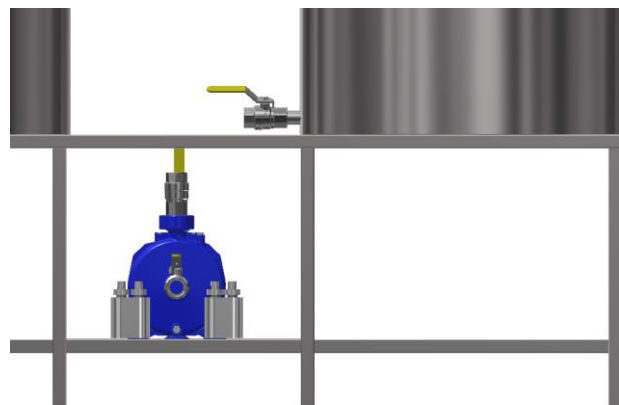


Figura 24 – Posicionamento da bomba de mosto.

Na Figura 24, nota-se que os trocadores ficarão abaixo do nível das painéis, junto à bomba. Já na Figura 25, onde o sistema é visto de cima, pode-se ver novamente a posição da bomba e dos trocadores. Porém nesta imagem estão indicadas a sequência de conexões que as mangueiras realizarão no momento da montagem.

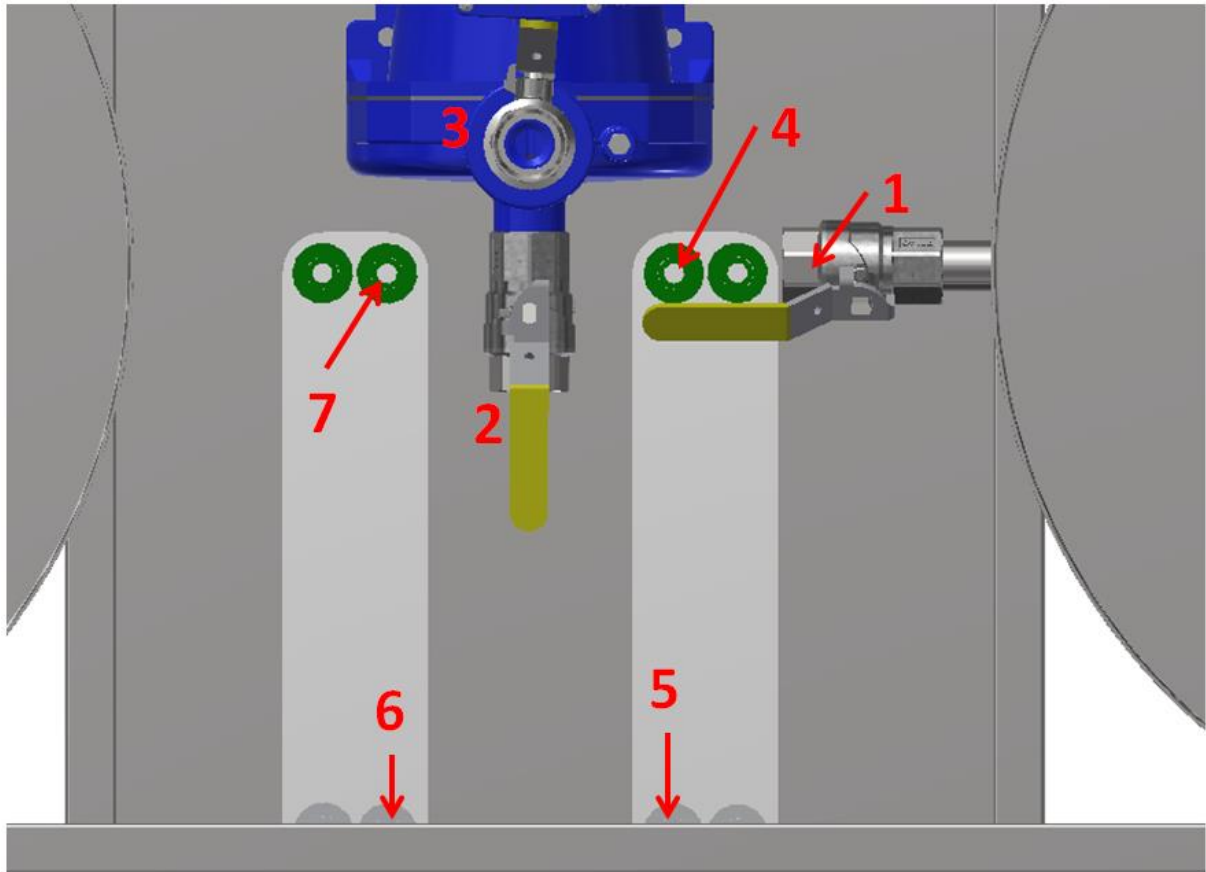


Figura 25 – Posição dos trocadores em relação à bomba de mosto.

As mangueiras deverão ser conectadas de acordo com a seguinte ordem:

1. Uma mangueira sairá do ponto 1 (saída da panela de fervura) e irá até o ponto 2 (entrada da bomba);
2. Outra mangueira sairá do ponto 3 (saída da bomba) e irá se conectar no ponto 4 (entrada do primeiro trocador de calor);
3. Uma terceira mangueira ligará os pontos 5 e 6 (saída do primeiro trocador de calor e entrada do segundo trocador de calor, respectivamente);

4. Por fim uma mangueira sairá do ponto 7 (saída do segundo trocador de calor) e será ligada ao fermentador.

Estima-se uma quantidade de três metros de mangueira para fazer as ligações acima, considerando que o fermentador estará a cerca de dois metros de distância do segundo trocador de calor.

Além disso, serão utilizadas seis conexões do tipo espigão, sendo quatro delas com rosca tipo fêmea, para serem montadas nos trocadores de calor, e duas delas com rosca tipo macho, para montagem na válvula de saída da panela de fervura e na válvula de saída da bomba.

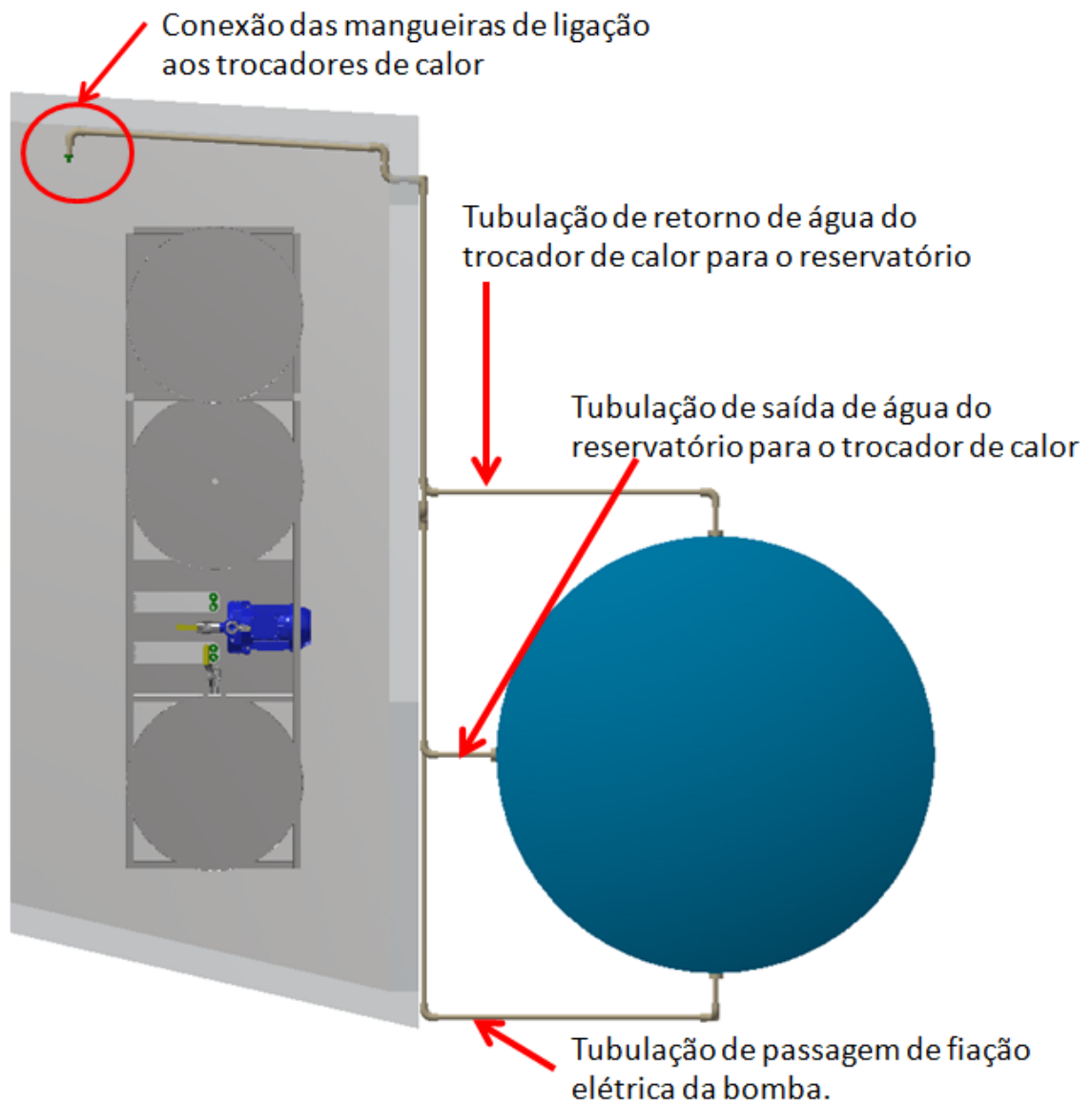
## 2. Reservatório termodinâmico

A função do reservatório, como já mencionado anteriormente, será de armazenar água em temperatura ambiente para ser utilizada com líquido refrigerante no primeiro trocador de calor. Portanto, há a necessidade de se transportar água do reservatório até o trocador de calor e que haja um retorno para esta água até o reservatório novamente.

Para se manter a proposta de utilização de mangueiras nas conexões dos trocadores de calor, a água será transportada em tubulação rígida de PVC até um ponto alinhado à estrutura de suporte das painéis, onde serão colocados conexões do tipo engate rápido, onde mangueiras poderão ser conectadas para utilização do sistema e facilmente desconectadas e removidas para armazenamento, limpeza e manutenção do sistema como um todo.

O esquema da Figura 26 ilustra o posicionamento dos tubos a partir da saída da caixa d'água até o ponto de destino. A partir dos engates ao final dos tubos, conectam-se mangueiras ligando a tubulação ao primeiro trocador de calor.

O terceiro tubo visto na imagem será utilizado para passagem da fiação elétrica para ligação da bomba submersa que irá impulsionar água através do sistema.



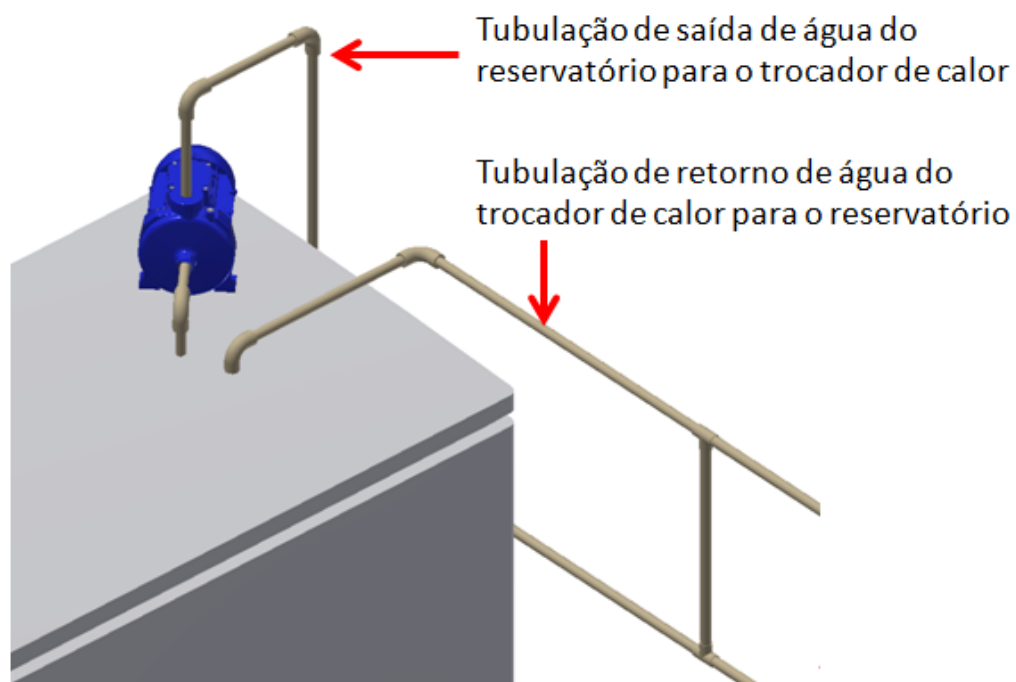
**Figura 26 – Posicionamento dos tubos a partir da caixa d'água.**

Para construção desta etapa do sistema serão utilizados três registros para caixa d'água, 19 cotovelos 90°, de PVC, duas conexões plásticas tipo engate rápido, duas mangueiras de PVC de 3/4" e dois metros de comprimento cada, uma bomba submersa conforme selecionada na seção 4.1.4.7, uma caixa d'água com capacidade para 1.000 litros padrão NBR 13210, um metro de mangueira de 3/4" para ligar a bomba à tubulação rígida e cola para PVC para solda dos componentes da tubulação rígida.

### 3. Banco de água fria

Dentro do sistema como um todo, o funcionamento do banco de água fria é similar ao do reservatório termodinâmico, onde há um volume de água a ser utilizado no resfriamento que deve sair do tanque, passar pelo trocador de calor e retornar ao local de armazenagem. Para tanto, a construção será similar ao do reservatório anterior, com tubulação em PVC rígido até próximo à estrutura de suporte das painelas e então mangueiras flexíveis de PVC no trecho final até o trocador.

Como pode se observar na Figura 27, a bomba irá captar água de dentro do freezer através da tubulação, direcionando a água fria até o segundo trocador de calor por tubulação de PVC, por onde a água irá passar resfriando o mosto, e retornará ao refrigerador.



**Figura 27 – Modelo de tubulação junto ao banco de água fria.**

A distância aproximada do refrigerador até o trocador de calor é de 5,2 metros, de acordo com o projeto. A água será transportada através destes cinco metros através de tubulação de PVC, presa à parede da cervejaria. Porém, para se evitar a flexão dos tubos, as seções de canos serão de, no máximo, um metro cada, sendo conectadas por conexões do tipo “T” 90°, onde dois tubos são ligados um ao outro

nas extremidades opostas da conexão, e a terceira via da conexão é fechada com tampão de PVC.

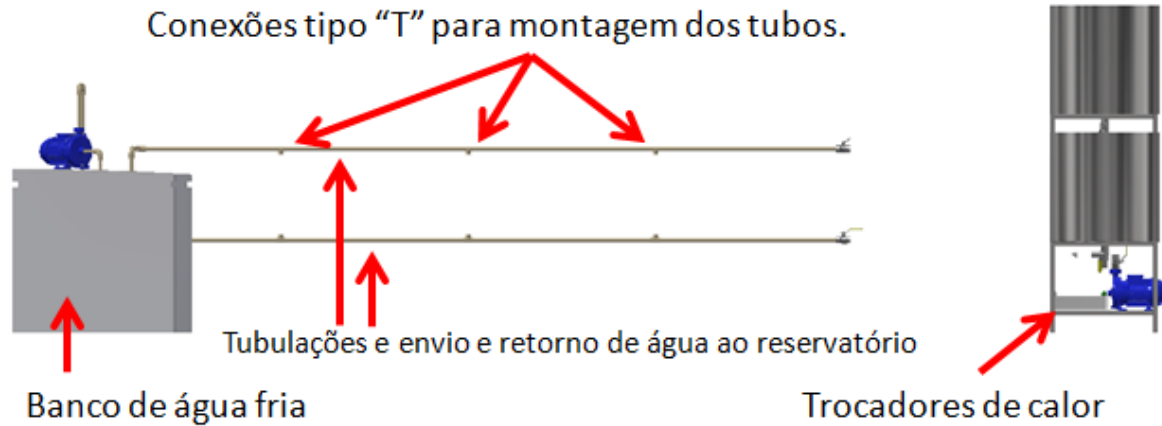


Figura 28 – Ilustração do trajeto entre o refrigerador e o fermentador.

Como visto na Figura 28, serão utilizadas quatro seções de um metro de tubos de PVC, onde ao final serão instaladas válvulas para conexão de mangueiras, que farão a ligação final até o trocador de calor.

#### 4.1.6 Projeto Elétrico

A instalação dos componentes elétricos faz-se necessária, sendo composta por três bombas e um freezer. Como materiais auxiliares de controle serão utilizados um inversor de frequência para controle da bomba utilizada para fluxo do mosto, e um termostato, já citado no projeto mecânico, para controle da temperatura do refrigerador.

A organização e disposição dos componentes será conforme a Figura 29.

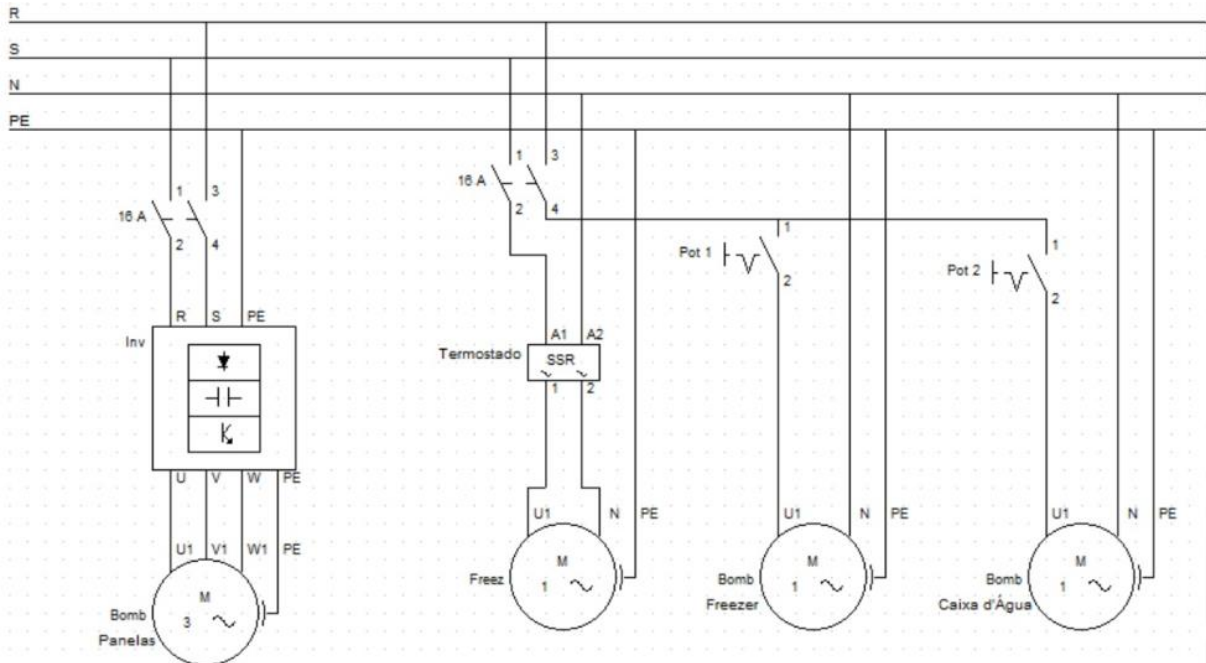


Figura 29 – Diagrama elétrico do sistema.

Para alimentação da bomba de fluxo de mosto é utilizado um sistema bifásico com um disjuntor de 16 Ampére para proteção e um inversor de frequência com a finalidade de controle de velocidade e vazão da bomba, através do controle de frequência.

Este controle é realizado por meio de uma conversão entre a alimentação bifásica que se dá por corrente alternada, com frequência padrão de 60Hz, passando esta corrente para contínua, onde não há frequência associada, e convertendo novamente para corrente alternada com frequência determinada de acordo com a necessidade e alimentação trifásica, disponível para a bomba. Dessa forma, alterando a velocidade do motor da bomba e, conseqüentemente, a vazão de mosto.

Na alimentação do refrigerador, utiliza-se outro disjuntor de 16 A compartilhado com as duas bombas restantes, utilizadas nos sistemas independentes dos dois trocadores de calor, também com a finalidade de proteção do sistema, evitando curtos-circuitos ou eventuais surtos de corrente. Para controlar a temperatura do refrigerador e poder se fazer os *setups* planejados, será utilizado um termostato que



irá acionar o compressor do refrigerador sempre que for necessário reduzir a temperatura do líquido em seu interior.

Na prática, há um sensor ligado ao termostato, posicionado no interior do freezer. Ao se determinar a temperatura necessária dentro do refrigerador, o sensor fará a leitura da temperatura atual e, caso esta seja maior que a estipulada, o compressor será acionado, iniciando o resfriamento do líquido até atingir a temperatura desejada. Quando a temperatura estipulada for atingida, o sensor irá transmitir ao termostato esta informação, e o mesmo, por sua vez, desligará o compressor, mantendo a temperatura sempre constante.

As outras duas bombas são alimentadas através do mesmo disjuntor que faz a alimentação do freezer, e acionadas diretamente por botoeiras de comando, sendo comandadas pelo usuário do sistema sempre que necessário.

A lista de materiais do projeto elétrico encontra-se listada na Tabela 7.

**Tabela 7 – Lista de materiais projeto elétrico.**

Item	Quantidade	Preço (R\$)
Disjuntor de 16 Ampére	2	58,90
Inversor de frequência	1	558,70

Fonte: Leroy Merlin e Lujetec (2018).

Com a descrição e projeto dos subsistemas concluídos, a seguir será feita uma análise e revisão do modelo, buscando encontrar potenciais falhas no projeto antes da sua construção.

## 5 ANÁLISE E REVISÃO DO PROJETO

Neste capítulo serão abordados os tópicos de análise de sensibilidade, revisão do projeto e FMEA. A análise de sensibilidade tem como objetivo pontuar possíveis fatores que possam interferir no sistema. Já a revisão de projeto entrega possíveis soluções para os fatores que são identificados durante análise de sensibilidade. E por fim, o FMEA tem como objetivo identificar os possíveis fatores de risco para o sucesso do projeto, alinhado à busca por soluções e melhorias.

### 5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Durante a fase de projeto, as melhores alternativas são buscadas de acordo com critérios técnicos estabelecidos, para atender ao conjunto de funções que o sistema deve executar. Porém, as soluções encontradas nem sempre irão atender com precisão a todos os requisitos do projeto e poderão também sofrer influência de agentes externos, pois não são soluções perfeitas, e sim soluções que atendem aos principais critérios determinados no escopo do projeto.

Para se entender quais as interferências que o sistema pode sofrer após sua implementação, é necessário se faça uma análise de sensibilidade do projeto, para verificar em quais pontos o produto final irá apresentar dificuldades de atender às demandas estabelecidas ou até mesmo apresentar falhas funcionais críticas.

Para conduzir tal análise, são levantados quais pontos podem interferir no funcionamento do produto e quais os impactos que variações nestes pontos irão implicar. Ao se analisar o projeto, foram estabelecidos seis fatores que podem influenciar o funcionamento do sistema, e na sequência os impactos que cada fator pode ocasionar.

Deve-se ressaltar que para a produção da análise, as vazões das bombas do mosto, dos fluídos refrigerantes que atuam no primeiro e segundo trocador de são mantidas constantes, nos valores de 240 l/h, 1500 l/h e 1980 l/h.

Os fatores de possível influência elencados foram os seguintes:

- a) Temperatura ambiente no dia de fabricação de mosto;
- b) Volume de mosto a ser resfriado;
- c) Quantidade de água no reservatório termodinâmico;
- d) Densidade do mosto;
- e) Temperatura da água de resfriamento do segundo trocador;
- f) Materiais utilizados.

O item “a)” irá influenciar diretamente na temperatura da água de resfriamento utilizada no primeiro trocador de calor. O primeiro trocador de calor irá funcionar utilizando um sistema de água em circuito fechado, com um reservatório termodinâmico sem controle de temperatura e, portanto, este reservatório sofrerá influência da temperatura do dia.

No item “b)” tem-se a variação de volume de cerveja produzida, a capacidade produtiva da cervejaria é de 120 litros por lote. Porém, este volume é o máximo, e alguns lotes de produção podem variar para menos em função de problemas de produção ou, até mesmo, fabricação proposital de lotes menores.

Na teoria o reservatório termodinâmico estará sempre com sua capacidade máxima. Porém, é necessário avaliar se variações no volume de água disponível irão impactar o funcionamento do modelo.

O tipo de cerveja, item “d)” apontado, não diz respeito apenas se uma cerveja será do tipo *Ale* ou *Lager*, isso está bem mapeado no desenvolvimento do projeto, porém é necessário avaliar se a densidade do mosto produzido no dia pode ter algum impacto no sistema.

Por fim, deve-se avaliar quais impactos a temperatura de água utilizada no segundo trocador pode ocasionar no sistema como um todo.

Para cada um dos pontos levantados, serão montados três cenários possíveis, sendo um otimista, um neutro e um pessimista. Ou seja, cada uma das variáveis será testada para dois casos diametralmente opostos e uma situação neutra, entre os dois polos.

### 5.1.1 Temperatura ambiente no dia de fabricação

Como mencionado na seção 5.1, por não contar com controle de temperatura, o reservatório termodinâmico estará suscetível às variações de temperatura do dia. Foram considerados para a análise de sensibilidade dois casos extremos e um meio termo, onde a temperatura do reservatório esteja a dois graus Celsius em um caso, 32°C em outro e 17°C no terceiro caso.

Para que seja possível manter a temperatura de saída do mosto de acordo com o especificado, considera-se o cenário de uma cerveja *Lager*, que precisa ser resfriada até, no mínimo, oito graus Celsius para o teste no cenário com 32°C de temperatura de líquido refrigerante. Já, para o caso de o reservatório estar a dois graus Celsius, analisa-se o que ocorre em uma cerveja do tipo *Alé*, que precisa ser resfriada até 16°C. Já o caso central, em que o reservatório esteja a 17°C, realiza-se o teste para os ambos os tipos de cerveja.

Utilizando-se a Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema, apresentada na seção 4.1.3, para avaliar se o banco de água à temperatura controlada terá condições de suportar estas variações do primeiro trocador.

#### a. Primeiro cenário

Considerando-se a entrada de água no primeiro trocador a 32°C, e a cerveja em fabricação sendo uma *Lager*, de acordo com os cálculos realizados, como pode se verificar no Quadro 6, é necessário que a água entre no segundo trocador com temperatura de 6,17°C

Quadro 6 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	32,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00076900	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandtl	5,200	-	
Condutividade térmica	0,620	W / (m * K)	
Calor específico	4178,00	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	6,171	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00146013	W / (m * K)	
Prandtl	10,585	-	
Condutividade térmica	0,581	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4200,16	J / kg * K	

Não há problemas em se atingir a temperatura necessária para entrada de água no segundo trocador de calor (6,17°C), visto que será utilizado um refrigerador com *setup* de temperatura.

b. Segundo cenário

Se for considerada a entrada de água no primeiro trocador a 2°C, e a cerveja em fabricação seja do tipo *A/e*, apenas um trocador é o suficiente para resfriar o mosto a ponto de se evitar defeitos no produto final.

Quadro 7 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 2°C - *A/e*.

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	2,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00165200	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandtl	12,220	-	
Condutividade térmica	0,574	W / (m * K)	
Calor específico	4211,00	J / kg * K	
Temperatura saída mosto trocador 1	6,145	°C	Mosto sai trocador 1
Viscosidade	0,00146132	W / (m * K)	
Prandtl	10,595	-	
Condutividade térmica	0,581	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4200,22	J / kg * K	

Porém, como observado no Quadro 7, o mosto irá sair do trocador de calor a aproximadamente 6°C, temperatura muito inferior à de inoculação de fermento para cervejas do tipo *Ale* (16°C). Portanto, deve se ter atenção no momento de adição do fermento, aguardando que o mosto atinja a temperatura adequada. Pode-se utilizar o segundo trocador de calor, neste caso, como um aquecedor ao invés de um resfriador, utilizando água em temperaturas elevadas o suficiente para se atingir os 16°C recomendados.

c. Terceiro cenário

No terceiro caso, considerando que a água entre a 17°C no primeiro resfriador, para a fabricação de uma cerveja tipo *Ale*, a água deverá entrar no segundo trocador a 15,65°C, e para a fabricação de uma cerveja tipo *Lager* deverá entrar a 6,90°C.

Quadro 8 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 17°C - *Ale*.

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	17,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00108000	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandlt	7,560	-	
Condutividade térmica	0,598	W / (m * K)	
Calor específico	4184,00	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	15,646	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00111927	W / (m * K)	
Prandlt	7,898	-	
Condutividade térmica	0,596	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4185,35	J / kg * K	

Quadro 9 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor.

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	17,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00108000	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandlt	7,560	-	
Condutividade térmica	0,598	W / (m * K)	
Calor específico	4184,00	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	6,898	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00142669	W / (m * K)	
Prandlt	10,300	-	
Condutividade térmica	0,582	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4198,27	J / kg * K	

Pode-se concluir que o sistema apresenta sensibilidade à temperatura do dia. Portanto, em dias muito frios não há a necessidade de se utilizar o segundo trocador de calor do ponto de vista de conclusão do resfriamento para se evitar defeitos na cerveja. Porém, deve-se ter atenção com a temperatura de inoculação do fermento, e neste caso o segundo trocador de calor pode ser usado como aquecedor para se atingir a temperatura desejada.

### 5.1.2 Volume de mosto a ser resfriado

Até o momento, todos os cálculos e projeções para o sistema foram conduzidos considerando 120 litros de mosto cervejeiro a ser resfriado. Para analisar a sensibilidade do sistema quanto ao volume serão analisados dois casos: i) será realizada uma simulação da fabricação de um lote de cerveja para teste, em que seriam fabricados apenas 20 litros, tanto para uma *Ale* quanto para *Lager*; ii) será simulada uma condição de fabricação em que seja fabricado um lote de 150 litros de cerveja.

#### d. Lote com 20 litros

O primeiro ponto que se deve ressaltar é que, mantendo a vazão do mosto em 240 litros por hora, o resfriamento seria realizado em apenas cinco minutos, o que de forma alguma é um problema.

Utilizando a Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema para análise, não há nenhum problema em relação à temperatura de entrada de água para resfriamentos nos trocadores, os valores se mantêm os mesmos tanto para 120, quanto para 20 litros de mosto a ser resfriado pois as vazões mássicas das bombas são mantidas constantes.

#### e. Lote com 150 litros

Para se atender ao critério do projeto de se resfriar o mosto em 30 minutos, é necessário alterar a vazão da bomba que faz a transferência de mosto. Enquanto em lotes de 120 litros a vazão se mantém em 240 litros por hora, para se resfriar em

150 litros em 30 minutos, é necessário que a vazão seja aumentada para 300 litros por hora.

Para uma cerveja tipo *Ale*, e com água entrando no primeiro trocador a 20°C, é necessário que a água entre a 15,08°C no segundo trocador de calor, como pode ser visto no Quadro 10, ligeiramente abaixo de lotes de 120 litros, em que é necessário que a água entre a 15,08°C, como visto no Quadro 11.

Quadro 10 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor.

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	20,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00100740	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandlt	6,996	-	
Condutividade térmica	0,603	W / (m * K)	
Calor específico	4182,20	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	15,083	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00113559	W / (m * K)	
Prandlt	8,039	-	
Condutividade térmica	0,595	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4185,92	J / kg * K	

Quadro 11 - Temperatura de entrada d'água nos trocadores de calor.

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	20,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00100740	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandlt	6,996	-	
Condutividade térmica	0,603	W / (m * K)	
Calor específico	4182,20	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	15,083	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00113559	W / (m * K)	
Prandlt	8,039	-	
Condutividade térmica	0,595	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4185,92	J / kg * K	

Já para uma cerveja do tipo *Lager*, é necessário que água entre no segundo trocador de calor a 6,14°C, como visto no Quadro 12, ligeiramente abaixo do



necessário para lotes de 120 litros, como mostrado no Quadro 13, considerando que a temperatura de entrada de água no primeiro resfriador seja de 20°C.

Quadro 12 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 20°C e lotes de 150 litros - Lager.

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	20,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00100740	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandlt	6,996	-	
Condutividade térmica	0,603	W / (m * K)	
Calor específico	4182,20	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	6,140	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00146156	W / (m * K)	
Prandlt	10,597	-	
Condutividade térmica	0,581	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4200,24	J / kg * K	

Quadro 13 - Temperatura de entrada d'água no trocador a 20°C e lotes de 120 litros - Lager.

PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	20,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00100740	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandlt	6,996	-	
Condutividade térmica	0,603	W / (m * K)	
Calor específico	4182,20	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	6,715	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00143511	W / (m * K)	
Prandlt	10,372	-	
Condutividade térmica	0,582	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4198,74	J / kg * K	

### 5.1.3 Quantidade de água no reservatório termodinâmico

A partir do conceito de reservatório termodinâmico, sabe-se que o propósito de tal reservatório é conservar a temperatura da água no caso deste projeto. Em condições consideradas normais de operação, ou seja, com água no reservatório termodinâmico a 18°C, esta água voltará para o reservatório a 31°C, de acordo com os cálculos realizados utilizando a Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema, apresentada na seção 4.1.3.

Utilizando um reservatório de 1.000 litros, e considerando a vazão estabelecida em 0,417 quilogramas por segundo, equivalente a 1500 litros por hora de vazão, em torno de 750 litros de água sairão do reservatório durante os 30 minutos de resfriamento, passando pelo trocador e retornando ao reservatório original.

Em uma aproximação simples e discreta, sabe-se que 75% do volume do reservatório será de água que passou pelo trocador e retornou. Ou seja, teve um ganho de temperatura de 18 para 31°C. Porém, deve-se aqui ressaltar que esta é uma aproximação discreta, sendo que na realidade esta mudança de temperatura será gradual ao longo dos 30 minutos.

Desta forma, assume-se que 75% do volume total é de fato significativo para alterações de temperatura, mas considera-se que é a condição de operação padrão do projeto.

Numa situação em que, por algum motivo, o reservatório não esteja com sua capacidade completa, os riscos de que a água que retorna ao reservatório impacte na temperatura geral do reservatório aumentam proporcionalmente à quantidade de água faltante.

Por não se possuir um cálculo preciso do reservatório termodinâmico e utilizar-se apenas o conceito teórico para a elaboração do projeto, deve-se avaliar com cuidado o impacto de falta de água no reservatório para o funcionamento correto do sistema.

Porém, para efeitos de análise de efetividade do sistema, será considerado um caso em que o reservatório esteja completamente vazio. Ou seja, o primeiro trocador não teria efeitos práticos de resfriamento, e todo o trabalho seria realizado pelo segundo trocador de calor, ligado ao banco de água fria.

Neste caso e considerando-se que a cerveja em fabricação seja do tipo *Lager*, utilizando a Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema, seria necessário que água entre no segundo trocador de calor a 5,4°C, como mostrado no Quadro 14, para que o resfriamento seja eficaz. Não é um ponto crítico e pode ser empregado como medida de contenção em casos como esse, porém com aumento no consumo de energia e maior dificuldade de *setup* entre cervejas tipo *Ale* e *Lager*.

**Quadro 14 - Temperatura de entrada d'água no segundo trocador sem a atuação do primeiro trocador.**

TROCAS TÉRMICAS			
Quantidade de calor necessária (mosto)	26352,180	W	
Quantidade de calor trocada no trocador 1	0,000	W	
Quantidade de calor trocada no trocador 2	26352,180	W	
PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS			
Temperatura água entra trocador 1	98,000	°C	Água entra trocador 1
Viscosidade	0,00028567	N * s / m <sup>2</sup>	
Prandtl	1,787	-	
Condutividade térmica	0,679	W / (m * K)	
Calor específico	4215,00	J / kg * K	
Temperatura entrada água trocador 2	5,404	°C	Água entra trocador 2
Viscosidade	0,00149542	W / (m * K)	
Prandtl	10,886	-	
Condutividade térmica	0,579	N * s / m <sup>2</sup>	
Calor específico	4202,15	J / kg * K	

#### 5.1.4 Densidade do mosto

Já foi analisado previamente o impacto de se fazer cervejas tipo *Ale* e *Lager*. Porém, não foi observado se a densidade do mosto pode influenciar no resfriamento. Os cálculos realizados até momento foram realizados considerando-se uma densidade média de 1042 quilogramas por metro cúbico de mosto cervejeiro.

A densidade da água é de 1000 quilogramas por metro cúbico. Já, o mosto cervejeiro, por conter alta concentração de açúcar em sua composição, pode chegar a até 1100 quilogramas por metro cúbico, e terá um valor mínimo de 1020 kg/m<sup>3</sup>.

Através dos cálculos, a variação da densidade do mosto não irá interferir no resfriamento, pois esta característica não irá impactar na condutividade térmica do mosto e, portanto, não irá interferir nos parâmetros do sistema.

#### 5.1.5 Temperatura da água de resfriamento do segundo trocador

Para fins de simplificação do sistema, considera-se a temperatura do banco de água fria como homogênea. Porém, sabe-se isto não ocorre na prática. Ao se utilizar um refrigerador para atingir a temperatura necessária, sabe-se que o princípio de

funcionamento de um equipamento como este se baseia na remoção de calor de seu interior e troca com o exterior. Portanto, o refrigerador irá retirar calor da água a partir das paredes, criando um gradiente de temperatura até o centro, onde é posicionado o sensor do termostato para garantir que toda a água dentro do refrigerador esteja na temperatura adequada.

O risco da formação deste gradiente é um possível congelamento gradual da água a partir das paredes do refrigerador. Em um primeiro momento, pela diminuição de água em estado líquido no sistema, podendo interferir na temperatura do sistema e conseqüentemente, no resfriamento do mosto. Mas o maior risco é de um possível congelamento da água e obstrução da saída do freezer para a alimentação da bomba, travando completamente o sistema.

Para se evitar tal risco, a solução a ser adotada será a adição de um produto químico anti-congelante na água que estará no refrigerador, permitindo que mesmo com um gradiente considerável de temperatura em seu interior, essa mistura de água com anti-congelante não congele, eliminando o risco de obstrução no sistema com a presença de gelo. O anticongelante a ser utilizado será o Etilenoglicol, composto químico comercial de fácil aquisição e de grande eficácia.

### **5.1.6 Materiais utilizados no projeto**

Quanto aos materiais a serem utilizados, a análise de sensibilidade volta-se à tubulação que irá transportar a água do banco de água fria até o segundo trocador de calor. Isto porque esta água estará, no pior caso, a 5,4°C e será transportada por aproximadamente cinco metros até o trocador de calor, em um ambiente que contará com vapor e calor proveniente da fervura do mosto e da troca de calor do próprio freezer com o ambiente.

O material utilizado neste sistema é PVC, material com condutividade térmica de 0,21 W/m\*k (TIGRE, 2017). Portanto há risco de troca de temperatura com o ambiente, prejudicando o resfriamento do mosto. Deve-se então prever uma solução para esta perda de temperatura, que será realizada na etapa de revisão de projeto.

## 5.2 REVISÃO DO PROJETO

A partir da análise de sensibilidade do projeto, nota-se que em algumas situações críticas, porém possíveis, o sistema pode vir a falhar se considerada a configuração inicialmente projetada.

Há dois pontos principais citados na análise de sensibilidade que chamam atenção e podem ser solucionados previamente. O primeiro deles é a eventual necessidade de se manter água no banco de água fria em temperatura próxima a zero grau, e o segundo é a questão dos materiais utilizados no projeto, principalmente na transferência da água de resfriamento do segundo trocador de calor, em seu caminho do refrigerador até o trocador.

### 5.2.1 Risco de congelamento

Por mais que a temperatura de *setup* do refrigerador venha a ser de 2°C, acima do ponto de congelamento da água, há o risco da criação de um gradiente de temperatura em direção ao sensor do termostato, causando pontos de congelamento no freezer até que se atinja a temperatura de 2°C pontualmente próxima ao sensor.

Para se prevenir a ocorrência deste problema, a solução viável é a utilização de um aditivo anti-congelante junto à água que estará no refrigerador. Um anti-congelante comum e de fácil utilização é o etilenoglicol, encontrado em lojas automotivas. Este composto químico quando misturado com água irá alterar as propriedades físicas da mesma, reduzindo seu ponto de congelamento de acordo com a proporção da mistura. Como referência, uma mistura de água e etilenoglicol a 50% de cada líquido faz com que a temperatura de congelamento da mistura seja de 33°C negativos.

A capacidade do refrigerador instalado é de 410 litros de acordo com informações do fabricante. Porém, não há necessidade de que a mistura seja 50% água e 50% etilenoglicol, pois não há necessidade de se atingir a temperatura de 33 graus negativos. Será considerado, para fins de análise, que a temperatura dentro do refrigerador não ultrapassará o limite de cinco graus negativos. Ou seja, um sexto

do que a mistura 50/50 pode atingir. Em uma simplificação direta, recomenda-se utilizar então um sexto da proporção anterior, utilizando apenas cerca de 8,5% do volume total do reservatório com etilenoglicol e 91,5% de água, resultando em 34,85 litros do aditivo químico caso o reservatório seja completamente preenchido, o que na prática não ocorre. Portanto recomenda-se a utilização de 30 litros deste produto para evitar problemas de congelamento no freezer.

Considerando-se em conta o custo do produto, de R\$26,72 por litro, de acordo com o preço da Loja Synth (2018), será necessário um investimento extra de R\$801,54 para aplicação do aditivo. Em função do orçamento do projeto e visando a máxima redução de custos na construção do sistema, o produto não será utilizado em um primeiro momento na construção e utilização do sistema. Porém fica o alerta de que o produto é necessário para correto funcionamento do sistema em casos extremos.

É válido ressaltar que o etilenoglicol é um composto tóxico e sua ingestão deve ser considerada um caso de emergência médica, seu consumo acidental podem afetar importantes órgãos, como rins, coração, fígado e partes do sistema nervoso central, sua manipulação deve ser extremamente cautelosa, o uso de tal composto também se reflete em perigos para a natureza, como a degradação de oxigênio nos sistemas aquáticos, caso ocorra o contato do composto com esgoto e redes pluviais, é necessário avisar as autoridades públicas.

### **5.2.2 Perda de temperatura em tubulações**

Levando-se em consideração que o ambiente da cervejaria é relativamente pequeno, e que o calor acumulado das etapas de mostura e fervura permanecerão no ambiente, elevando a temperatura dentro da cervejaria, aumenta-se o risco da troca térmica da água de resfriamento do segundo trocador de calor com o ambiente, pois esta água é transferida através de tubos de PVC comuns, material que não é reconhecido por sua capacidade de isolamento térmico.

Os tubos mais críticos são os que irão transferir a água do banco de água fria até o segundo trocador de calor, pois a diferença de temperatura desta água para o ambiente é a maior presente no projeto, como demonstrado na seção 5.1.

Portanto, estes tubos serão revestidos com material de isolamento térmico, minimizando a troca de calor da água com o ambiente, mantendo esta água em temperatura próxima à estipulada até atingir o trocador de calor.

O material a ser aplicado será uma espuma elastomérica, produzida a partir de borracha sintética de alta densidade, com coeficiente de condutividade térmica de apenas 0,025 kcal/m\*h°C (ISAR, 2018). Além de ser um bom isolante, possui baixo custo e facilidade de instalação, pois já é fornecido em formato de tubos.

### 5.3 FMEA

A sigla FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) é traduzida para o português como Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos, têm como principal objetivo evitar possíveis anormalidades durante um processo. (Redação Indústria Hoje, 2013)

Desenvolveu-se uma tabela de FMEA, localizada no Apêndice G, com o objetivo de se estudar os componentes do sistema de resfriamento de mosto e suas possíveis falhas e efeitos potenciais, organizando-as em níveis de ocorrência, severidade, grau de detecção. Para cada modo de falha atribuiu-se uma nota que varia de um a dez, e o risco total de cada modo foi determinado pela multiplicação das notas de cada falha.

Foram analisadas as potenciais falhas que atinjam 40 pontos ou mais, pois são modos de falha com baixo risco de detecção, alta severidade ou grande risco de ocorrência. Por se tratar de uma multiplicação aritmética, um dos três itens apresentou uma nota alta.

Para níveis de ocorrência, a nota um indica que a chance do modo de falha ocorrer é praticamente nula, e a nota dez indica que ocorre praticamente em todas as utilizações do sistema. Já para o grau de severidade, a nota um indica que o modo de falha é pouco significativo e a nota dez indica que tal modo é extremamente significativo, exigindo ação imediata. Por fim, para níveis de detecção atribuiu-se a nota um para modos de falha fáceis de se detectar e a nota dez para itens com detecção extremamente difícil ou impossível.

Para se determinar o risco de cada falha, é feita uma multiplicação direta entre os valores atribuídos à ocorrência, severidade e detecção. Como resultado, observa-se que há uma classificação de riscos de 16 a 96 pontos.

Pode-se observar no FMEA realizado que o sistema não é imune a falhas de funcionamento, com riscos de parada de processo. Porém, no mesmo FMEA, são apontadas ações de contenção para cada problema previsto. Basicamente, os potenciais riscos envolvem alguma forma de entupimento do sistema. Nestes casos, para se garantir o correto resfriamento do mosto, deve-se interromper o processo, eliminar o problema e, antes de se reiniciar o resfriamento, o mosto deve ser fervido novamente por cinco minutos.

Deve-se também destacar que em vários pontos o projeto se mostrou robusto, como na utilização de disjuntores para proteção do sistema elétrico.

Sem o desenvolvimento do FMEA apresentado, haveria o risco de não se ter ações rápidas a serem tomadas durante o surgimento de problemas de operação do sistema e, principalmente, a possibilidade de se interromper o processo e continuá-lo do ponto de parada. Com o FMEA, fica registrada a ação de ferver novamente o mosto antes do resfriamento, algo que poderia ser esquecido caso os problemas não fossem previstos.



## 6 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA

A construção do sistema foi feita com base no projeto mecânico apresentado na seção 4.1.5. Como descrito anteriormente, algumas simplificações foram assumidas no projeto e serão melhor exploradas durante a construção do sistema, principalmente em relação à parte de conexões em PVC dos sistemas de transferência de água tanto do primeiro, quanto do segundo trocador de calor.

Para representar a construção do sistema, será utilizada a mesma separação apresentada no projeto mecânico de três subsistemas, comparando a construção física com o modelo virtual.

### 6.1.1 Trocadores de calor

Como mostrado no projeto, os trocadores de calor terão suas conexões implementadas com mangueiras de silicone quando há contato com o mosto cervejeiro, e em mangueiras de PVC quando não houver contato com o mosto. Ou seja, apenas contato com água do processo de resfriamento.

Na Figura 13 da seção 4.1 observa-se a configuração virtual do modelo, já nas figuras 30 e 31 pode-se verificar como ficou a configuração física do sistema.

A partir da Figura 30, vê-se que a decisão de se utilizar mangueiras para conexão dos trocadores de calor se mostrou acertada, devido ao pouco espaço disponível e a flexibilidade permitida pela utilização de mangueiras, facilitando sua conexão, manuseio e direcionamento nas áreas próximas

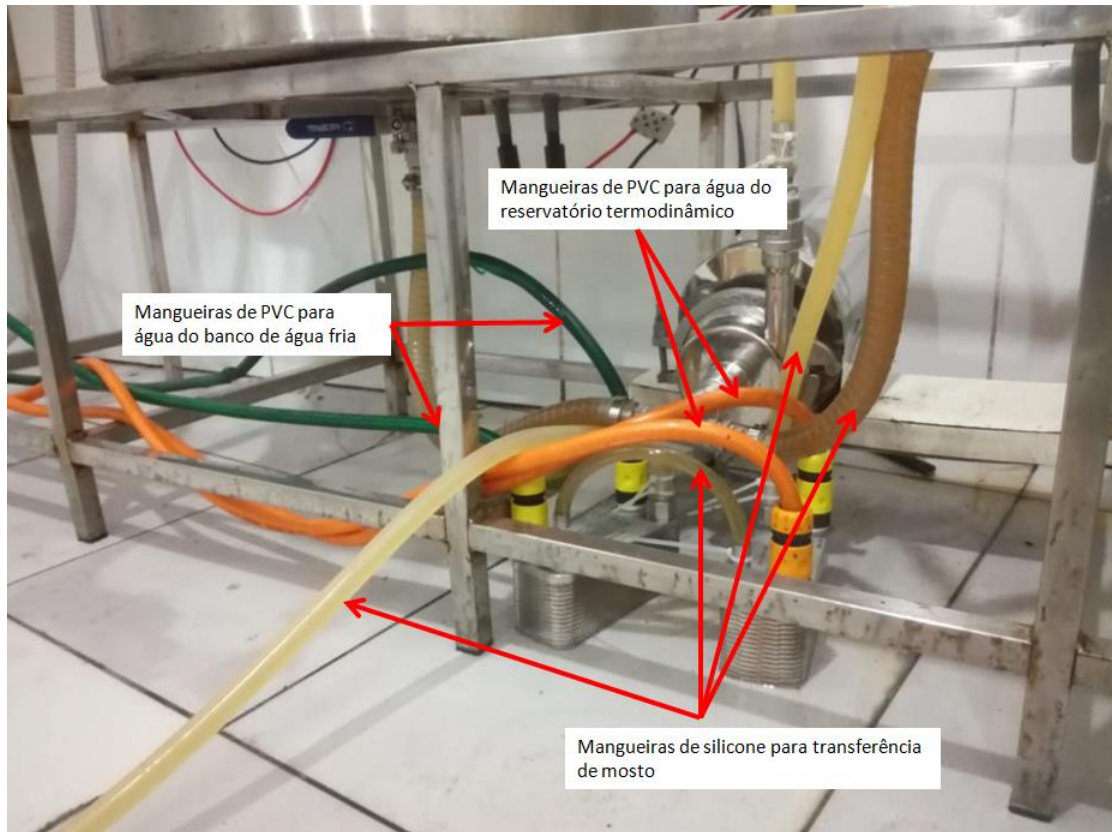


Figura 30 – Posicionamento dos trocadores de calor no modelo virtual.

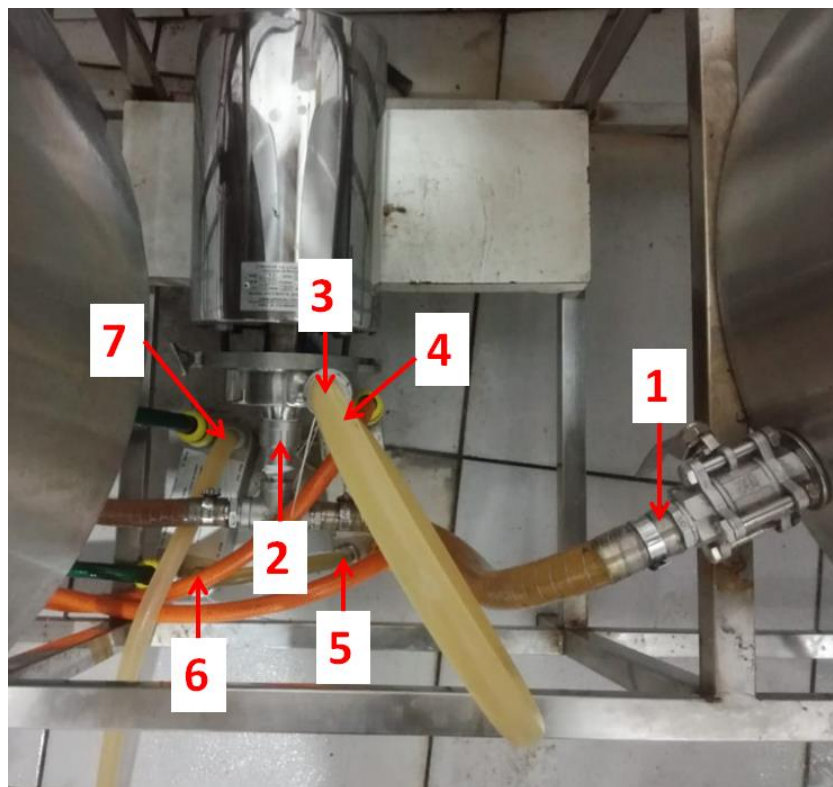


Figura 31 – Posicionamento dos trocadores de calor no modelo virtual.

A partir Figura 31 é possível estabelecer um paralelo com a Figura 25, mostrando os mesmos sete pontos de passagem do mosto e conexões das mangueiras atóxicas.

A primeira comparação está em relação à posição dos trocadores. Enquanto no modelo virtual foi prevista a colocação de uma chapa metálica como suporte da bomba e dos trocadores, durante a construção do protótipo não foi possível a utilização deste suporte devido ao custo e tempo de execução do mesmo. Portanto adaptou-se um suporte para a bomba e os trocadores foram mantidos no chão.

Observa-se que a utilização das mangueiras foi uma decisão acertada para o momento, pois permitiu uma montagem simples do sistema. Nas figuras 32 e 33, observa-se o direcionamento das mangueiras conectadas aos trocadores de calor com os outros dois subsistemas, reservatório termodinâmico e banco de água fria.



**Figura 32 – Conexão dos trocadores de calor com o reservatório termodinâmico.**



Figura 33 – Conexão dos trocadores de calor com o banco de água fria.

Para este subsistema, foram utilizadas duas seções de dois metros e duas seções de três metros de mangueira de PVC, para conexão dos trocadores com seu respectivo sistema de resfriamento, além de quatro seções de mangueira de silicone com os comprimentos e funções que se encontram no Quadro 15.

Quadro 15 - Comprimentos e funções de transferência.

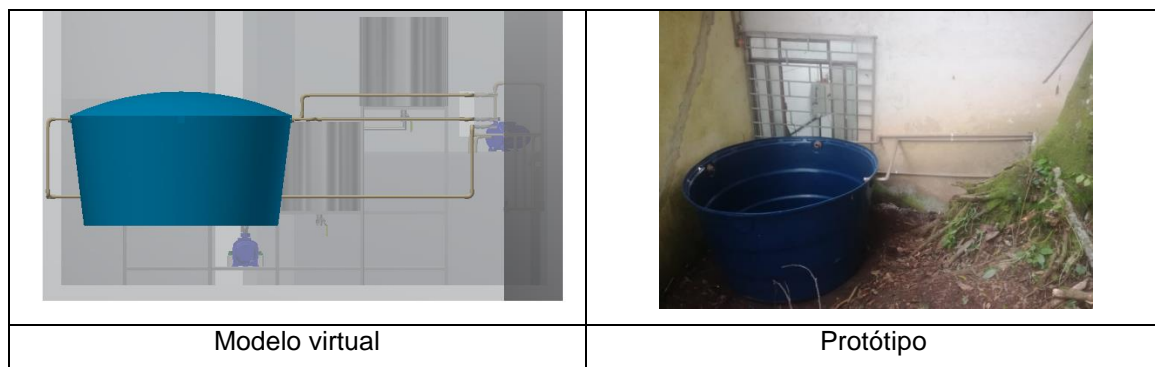
Seção	Comprimento	Função de transferência
A	0,4 metro	Panela de fervura para bomba
B	0,6 metro	Bomba para primeiro trocador de calor
C	0,15 metro	Primeiro trocador de calor para segundo
D	2,5 metros	Segundo trocador de calor para fermentador

As conexões utilizadas foram oito engates rápidos tipo fêmea para conexão das mangueiras, sendo dois engates em cada mangueira, e quatro engates rápidos tipo macho nos trocadores de calor para conectar as mangueiras. Em relação ao

mosto foram utilizadas sete conexões de aço inox do tipo espigão, sendo um deles na saída da panela de fervura, um na entrada e outro na saída da bomba e os outros quatro nos quatro pontos de entrada e saída de mosto dos dois trocadores de calor.

No Quadro 16 estabelece-se um comparativo entre o modelo virtual e o protótipo do reservatório termodinâmico.

**Quadro 16 - Reservatório termodinâmico virtual e protótipo.**



Como visto no Quadro 16, algumas mudanças na rota da instalação dos tubos foram realizadas para desviar da grade da janela e facilitar a fixação dos mesmos junto à parede.

Além da instalação na parte externa, os tubos avançam para a área interna da cervejaria, chegando próximos às painéis de fabricação, onde as mangueiras dos trocadores de calor serão conectadas, como já apresentado na Figura 33.

A montagem da bomba submersa dentro da caixa d'água foi realizada com mangueira tipo cristal e abraçadeira, sendo presa a um registro de caixa d'água em uma das laterais do reservatório, conforme mostra a Figura 34.



Figura 34 – Montagem da bomba submersa no reservatório termodinâmico.

Com isto, o total de materiais utilizados pode ser observado no Quadro 17.

Quadro 17 - Materiais utilizados.

Item	Quantidade
Bomba submersa	01
Mangueira cristal	0,5 metro
Abraçadeira em aço inox	02
Conexão plástica tipo espigão	01
Conexão registro para caixa d'água	03
Engate rápido conexão macho	02
Conexão em PVC 90°	18
Cano de PVC 3/4"	12 metros

### 6.1.2 Banco de água fria

O terceiro e último sistema irá alimentar o segundo trocador de calor com água em temperatura controlada via termostato. O sistema consiste em um freezer

controlado por termostato, com uma bomba para impulsionar a água até o trocador de calor, e tubulação para transportar esta água até o trocador e novamente até o freezer.

Com um modelo bem simplificado, o modelo virtual previu apenas a rota das tubulações e posição da bomba, e a posição do retorno de água após ter passado pelo trocador de calor. Já durante a construção do sistema, percebe-se que o funcionamento é mais complexo do que o inicialmente imaginado na seção 4.1.5, necessitando inclusive de uma entrada extra de água apenas para se afogar a bomba e o sistema, permitindo seu correto funcionamento.

Nas figuras 35 e 36, pode-se observar a construção do protótipo em comparativo à Figura 27. A Figura 35 apresenta a construção do sistema ainda sem o isolamento térmico e com possibilidade de visualização das conexões utilizadas, enquanto, pela Figura 36 observa-se o protótipo já com os isolamentos térmicos utilizados para evitar a perda de temperatura na tubulação. Ainda nas duas figuras mencionadas, observa-se a posição do termostato que irá controlar a temperatura do refrigerador.



Figura 35 – Saída e retorno de tubulação do banco de água fria sem isolamento térmico.



**Figura 36 – Saída e retorno de tubulação do banco de água fria com isolamento térmico.**

Percebe-se pelas imagens, que a construção é muito mais complexa que o simples modelo virtual planejado. A necessidade de conexões para vedação e adaptação dos tubos à bomba foi necessária para que o sistema viesse a funcionar.

Além disso, foi implementada também a tubulação rígida que levará a água até as mangueiras que farão a conexão final com o segundo trocador de calor, como pode ser observado na Figura 37.





Figura 37 – Tubulação de saída e retorno de água para o banco de água fria.

Considerando todo este subsistema, foram utilizados os materiais contidos no Quadro 18.

Quadro 18 - Lista de materiais do subsistema.

Item	Quantidade
Bomba periférica	01
Registro para caixa d'água	02
Conexão tipo emenda de canos	05
Conexão 90°	06
Conexão tipo T	08
Cano de PVC 3/4"	11 metros
Engate rápido conexão macho	02
Termostato TIC 17	01
Freezer Consul 410 litros	01
Filtro de entrada de água	01

É importante ressaltar que a construção do sistema foi completamente adaptada para a estrutura física da cervejaria e aproveitamento de materiais já

disponíveis. A reprodução dos conceitos deste sistema deverá levar em conta o local de aplicação.

No Apêndice H, há a relação completa de materiais utilizadas para a construção do protótipo, sendo que o custo total resulta em R\$4.780,43. Para fins de cálculo e estimativa de custo do sistema, mesmo os itens de que a cervejaria já dispunha, como a bomba periférica, e os itens recebidos como doação, como os canos e conexões em PVC, foram considerados no cálculo e tiveram seu valor estimado com base em pesquisa de mercado.

O valor atingido foi bem próximo do estipulado na entrevista com os proprietários da cervejaria, contida no Apêndice A, de R\$4.500,00. Porém, considerando que os materiais utilizados para tubulação rígida foram doados e a bomba periférica utilizada no banco de água fria já estava em posse da cervejaria, o valor empregado na construção do protótipo ficou dentro do objetivo.

O layout final do protótipo pode ser observado em um comparativo das figuras 38, 39 e 40, onde a figura 38 mostra o layout inicialmente previsto no modelo virtual, enquanto as figuras 39 e 40 mostram a construção física do sistema.

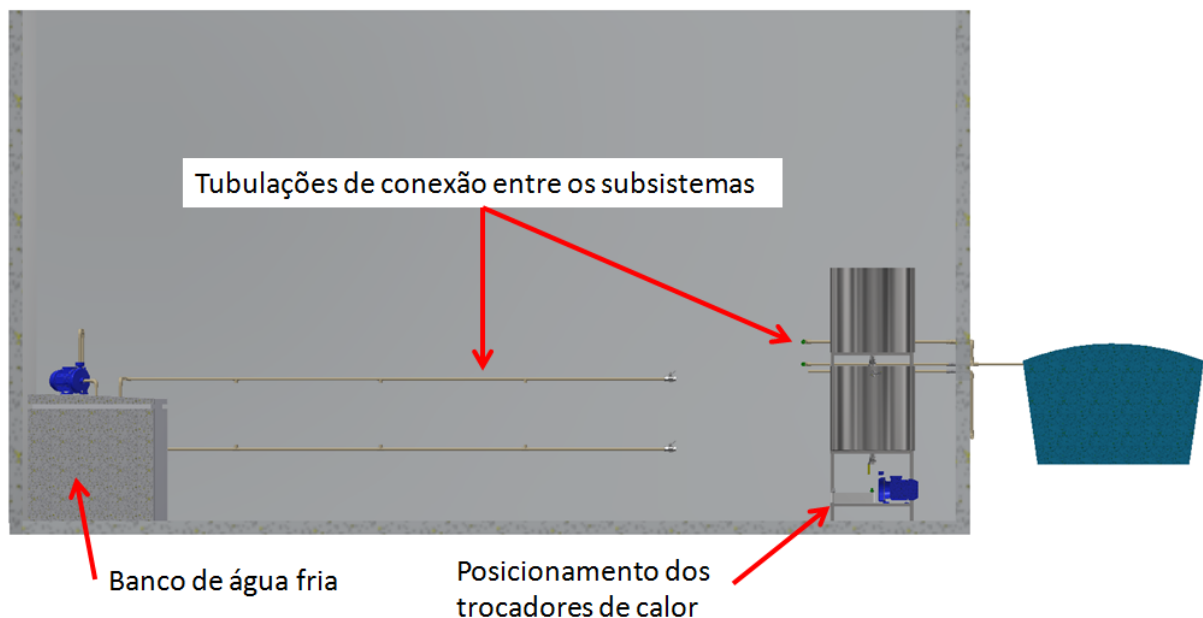


Figura 38 – Layout virtual do sistema de resfriamento na nanocervejaria.



Figura 39 – Layout físico do protótipo – banco de água fria e tubulação rígida.



Figura 40 – Layout físico do protótipo – Trocadores de calor.

A construção do protótipo foi concluída de forma satisfatória, reproduzindo fielmente o que foi previsto no modelo virtual, fazendo as adaptações necessárias conforme o sistema foi construído.

No próximo capítulo, o protótipo é colocado em teste para que se possa observar se o modelo concebido atende às necessidades da nanocervejaria.

## 7 TESTES E DISCUSSÕES

Com o protótipo construído, é possível então colocá-lo em teste para verificar se atenderá aos requisitos estabelecidos, resfriamento em até trinta minutos e obtenção das temperaturas estabelecidas. Serão analisados os dados apresentados no capítulo anterior, discorrendo sobre o resultado apresentado pelo projeto.

### 7.1 TESTE DO SISTEMA

O teste do sistema foi realizado no dia 04 de novembro de 2018, na própria cervejaria Giramundo. O protótipo foi colocado à prova durante uma situação real de fabricação de cerveja. Ou seja, foi incorporado totalmente à estrutura e utilizado em condições reais.

A cerveja fabricada na ocasião foi do estilo *India Pale Lager*, cerveja do tipo *Lager*, com necessidade de resfriamento até 10°C para inoculação do seu fermento. A receita da cerveja, incluindo todos seus ingredientes e passo a passo de produção encontra-se no Apêndice I.

O motivo da escolha de tal estilo de cerveja se deu pelo fato de ser um resfriamento ainda mais crítico que de uma *Ale*, que demanda ser resfriada apenas até 16°C. Portanto, caso o teste seja positivo para uma *Lager*, por consequência sabe-se que o sistema terá capacidade de resfriamento para cervejas do tipo *Ale*.

Ao final da fervura, o volume de mosto dentro da panela era de 116 litros, a uma temperatura de 98°C. Já, a temperatura do reservatório termodinâmico, que alimenta o primeiro trocador de calor, era de 19°C. Com estes dados como parâmetros de entrada, era necessário que a água no segundo trocador de calor entrasse a 6,835°C para que o mosto atingisse 10°C ao final do resfriamento, de acordo com a Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema, como visto nas Figuras 41 e 42.

MENU		BOMBA - MOSTO		TROCAS TÉRMICAS	
Tipo Trocador	Placas	Vazão	240,000 l/h	Quantidade de calor necessária (mosto)	25766,576 W
Tipo Cerveja	Lager	Vazão mássica escumamento	0,069 kg/s	Quantidade de calor trocada no trocador 1	22566,103 W
DADOS TROCADOR DE CALOR		DADOS DO TROCADOR 1		Quantidade de calor trocada no trocador 2	
Número de placas - Trocador 1	30,000	Cmin	292,802 W/K	PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	
Vazão mássica água da caixa d'água ( kg / s )	0,417	Cmáx	1744,478 W/K	Temperatura água entra trocador 1	18,000 °C
Lc ( m )	0,066	NUT	3,762 -	Viscosidade	0,00105590 N * s / m <sup>2</sup>
Área de transferência de calor / placa ( m ^ 2 )	0,012	Efetividade do trocador 1	0,96 -	Prandtl	7,372 -
Lv	0,155	Taxa de transferência de calor real	22566,103 W	Condutividade térmica	0,600 W / ( m * K )
Lp	0,125	Cmin / Cmáx	0,168 -	Calor específico	4183,40 J / kg * K
Lh	0,045	BOMBA - REFRIGERADOR		Temperatura entrada mosto trocador 1	96,000 °C
Lw ( m )	0,065	Vazão	1980,000 l/h	Viscosidade	0,000285667 N * s / m <sup>2</sup>
Ângulo Beta dos pratos	60,000	Vazão mássica escumamento	0,573 kg/s	Prandtl	1,787 -
Dímetro entrada água	0,016	DADOS DO TROCADOR 2		Condutividade térmica	0,679 W / ( m * K )
Dímetro entrada mosto	0,013	Temperatura água que entra no trocador 2	7,999 °C	Calor específico	4215,00 J / kg * K
Espessura das placas ( m )	0,0003	Número de placas do trocador 2	30,000	Temperatura saída mosto trocador 2	11,200 °C
Condutividade térmica Aço AISI 304 ( J / kg * K )	14,9	Quantidade de calor trocada no trocador 2	4316,93 W	Viscosidade	0,00130380 W / ( m * K )
<b>Calcular</b>				Prandtl	9,390 -
<b>Gerar PDF</b>				Condutividade térmica	0,587 N * s / m <sup>2</sup>
				Calor específico	4192,60 J / kg * K
				Temperatura saída mosto trocador 1	20,931 °C
				Viscosidade	0,00098488 W / ( m * K )
				Prandtl	6,821 -
				Condutividade térmica	0,604 N * s / m <sup>2</sup>
				Calor específico	4181,64 J / kg * K
				Temperatura saída água trocador 1	30,936 °C
				Viscosidade	0,00078731 W / ( m * K )
				Prandtl	5,334 -
				Condutividade térmica	0,619 N * s / m <sup>2</sup>
				Calor específico	4178,21 J / kg * K
				Temperatura entrada água trocador 2	8,310 °C
				Viscosidade	0,00138264 W / ( m * K )
				Prandtl	9,970 -
				Condutividade térmica	0,584 N * s / m <sup>2</sup>
				Calor específico	4196,20 J / kg * K
				Temperatura saída água trocador 2	9,330 °C
				Viscosidade	0,00133020 W / ( m * K )
				Prandtl	9,584 -
				Condutividade térmica	0,586 N * s / m <sup>2</sup>
				Calor específico	4193,81 J / kg * K

Figura 41 – Resultados da planilha de cálculo.

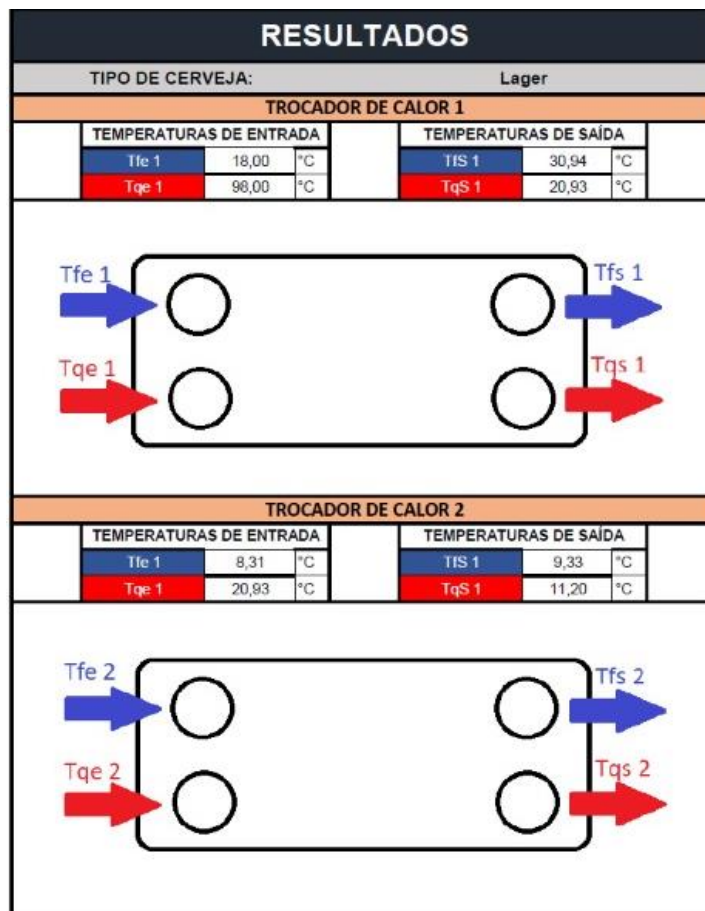


Figura 42 – Resultados da planilha de cálculo em formato PDF.

Portanto, o refrigerador e o termostato foram regulados para manter a água em 8,3°C para que o resfriamento cumprisse o esperado, e a vazão da bomba foi regulada com o inversor de frequência para que se mantivesse em 240 litros por hora de forma constante.

O resfriamento foi iniciado às 15h 40min, e encerrado às 16h 07min, levando então 27 minutos de tempo total, abaixo dos trinta minutos estipulados. A temperatura de saída do mosto, esperada para 10,0°C, foi medida em 11,5°C como mostrado na Figura 43, ou seja, 15% acima do esperado. Esta variação no tempo de resfriamento explica-se por diferença no volume de mosto a ser resfriado, abaixo dos 120 litros inicialmente previstos.



Figura 43 – Temperatura obtida com o resfriamento.

Na seção 7.2 será apresentada uma análise dos resultados e comentários acerca do teste.

Após a conclusão do resfriamento, o fermento foi adicionado à cerveja na temperatura de 11,5°C, e o início da fermentação transcorreu sem problemas.

Terminado o processo e lacrado o fermentador, iniciou-se a limpeza do sistema, outro fato apontado como importante para o bom funcionamento do produto. Após remover os resíduos sólidos, como bagaço de malte da panela de mostura e *trub* da panela de fervura, foi elaborada uma solução de ácido peracético na panela utilizada para aquecimento de água de lavagem. Esta solução foi passada através das painelas, fazendo a limpeza do sistema, até chegar à panela de fervura, a partir de onde seguiu o mesmo caminho do mosto no processo de resfriamento, passando pela bomba de transferência de mosto e pelos dois trocadores de calor. Por se tratar de um produto químico que não requer enxágue em sua forma diluída, os trocadores de calor e mangueiras foram desmontados e armazenados para futuras utilizações.

O tempo de limpeza, incluindo preparação da solução de ácido peracético, foi de apenas 18 minutos. Desconsiderando o tempo de preparação de solução, todo o sistema de resfriamento foi sanitizado em apenas seis minutos de forma ágil e organizada.

Na seção seguinte, serão analisados e feitos comentários acerca do processo de resfriamento e da operação do sistema.

## **7.2 DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS**

A partir dos dados apresentados na seção 7.1, pode-se discutir os resultados do protótipo.

A primeira análise a ser examinada diz respeito ao tempo de resfriamento, mais rápido que os 30 minutos estipulados e calculados. Os cálculos realizados levam em conta uma quantidade teórica e idealizada de 120 litros de mosto cervejeiro, o que nem sempre se repete na prática. Variações na eficiência da mostura, com maior ou

menor absorção de líquido pelos grãos, e variações na fervura, com maior ou menor taxa de evaporação por diversas razões, irão impactar no volume de mosto a ser resfriado após esta etapa.

Os dois motivos mencionados acima são causas potenciais para o volume de 116 litros observados durante a fabricação do lote utilizado para teste do sistema. Porém, mesmo com 116 litros e vazão de 240 litros por hora, o tempo de resfriamento esperado seria de 29 minutos, e não 27. Se a vazão da bomba foi ajustada eletronicamente, qual a razão para estes dois minutos de diferença e prática?

Como hipótese de análise, assume-se que a vazão da bomba estava fixa e constante em 240 litros por hora. Nesta condição, dois minutos de resfriamento correspondem a oito litros de mosto. Como mencionado no capítulo que trata de processos de fabricação de cerveja, após a fervura os restos de lúpulo e proteínas irão se depositar no fundo da panela, como pode ser visto Figura 44.



**Figura 44 – Restos da fervura depositados no fundo da panela.**



Para evitar que este  *trub*  continue no mosto nos processos seguintes, interrompe-se o resfriamento assim que houver risco de que este  *trub*  entre no sistema de resfriamento. Portanto, os oito litros a menos observados em relação aos 116 litros originais são consideradas como uma perda aceitável no processo para se manter a qualidade do produto final, pois este acúmulo de matéria causaria turbidez e excesso de amargor na cerveja. Além do fundo da panela, há o restante de cerveja que permaneceu parada nas mangueiras, devido à interrupção abrupta do resfriamento. Portanto, tem-se um resultado final de 108 litros de mosto para fermentação.

Outro ponto discutível em relação aos resultados é o fato de a temperatura final após o resfriamento ter sido medida em 11,5°C, ao invés dos 10,0°C previstos. Uma explicação plausível está na utilização do conceito de reservatório termodinâmico tanto para a caixa d'água que alimenta o primeiro trocador de calor, quanto para o banco de água fria.

Em uma análise por comparação direta, entende-se que o mais crítico tenha sido o banco de água fria. Na questão da caixa d'água, o volume de controle é de mil litros, enquanto no refrigerador é de apenas 410 litros teóricos. Ao considerar o banco de água fria como um reservatório termodinâmico, exclui-se a hipótese de que na verdade trata-se de um volume de controle transiente, onde o retorno de água para o mesmo banco irá afetar a temperatura deste volume de controle.

De acordo com os cálculos mostrados na figura 41, a temperatura de entrada de água no segundo trocador de calor é de 8,31°C, porém a saída está em 11,2°C. E como observado na análise de sensibilidade e na revisão do projeto, há troca térmica entre a água e o ambiente, que está acima da temperatura considerada como ambiente em função do aquecimento das panelas para fabricação de cerveja.

Durante a revisão do projeto houve a preocupação apenas com a troca térmica da água que vai em direção ao trocador, e desprezou-se a água que retorna para o refrigerador. Certamente durante este caminho de volta, do trocador ao refrigerador, houve ganho de temperatura da água, elevando ainda mais os 11,2°C calculados como saída do trocador de calor.

Ao retornar ao refrigerador com temperatura superior à do volume de controle, há um impacto direto sobre a temperatura de saída da água do banco de água fria, conseqüentemente afetando o resfriamento, explicando assim a temperatura medida de 11,5°C ao final do processo.

Há duas soluções possíveis para que se possa prever com exatidão o funcionamento do sistema e se atingir a temperatura esperada. A primeira é rever os cálculos, excluindo a hipótese de reservatório termodinâmico e considerando o banco de água fria e a caixa d'água como volumes de controle transientes. Já o segundo método seria mais prático e iterativo, criando um histórico de resfriamento buscando sempre se aproximar da temperatura final desejada através de testes a cada lote fabricado, criando assim um histórico e regulando a temperatura do sistema a cada novo ciclo de fabricação, até se atingir a temperatura exata.

Porém, apesar desta divergência, o resultado do ponto de vista dos requisitos do projeto foi extremamente satisfatório. Considerando os dados apresentados sobre Dimetilsulfureto na seção 2.4.1, que tangem a respeito de sua temperatura de formação, e velocidade de resfriamento necessária para que este composto não seja formado, o sistema de resfriamento garantiu de forma efetiva que não haja a presença deste composto no produto final.

Outro ponto que deve-se destacar como resultado, é o fato de que tanto a caixa d'água quanto o refrigerador foram cheios com água e, até que haja necessidade de realizar algum tipo de intervenção nestes dois reservatórios, esta água poderá ser utilizada inúmeras vezes para resfriamento de mosto. Ou seja, o objetivo de se eliminar o desperdício de água foi atingido.

### **7.2.1 Discussão acerca da utilização do sistema**

Outros requisitos importantes do projeto eram em relação à facilidade de utilização do sistema e sua manutenção e limpeza.

Destaca-se aqui a configuração do sistema de ser construído por uma mistura de tubulações rígidas e flexíveis. As tubulações rígidas e fixas estão em locais em que não atrapalham a movimentação de pessoas dentro da cervejaria, enquanto a

tubulação flexível, neste caso as mangueiras, são de fácil manuseio e adaptáveis à condição de uso do equipamento. A utilização de engates rápidos facilita a montagem e desmontagem do equipamento, assim como seu armazenamento.

Quanto à limpeza, esta foi realizada de forma simples e eficiente utilizando produtos químicos adequados, que puderam ser preparados utilizando as próprias panelas de fabricação de mosto, e escoados através de todo o sistema de resfriamento, limpando e sanitizando todos os componentes, deixando-os imediatamente prontos para serem armazenados.

Mas há também oportunidades claras de melhorias no sistema, como tubulação rígida nas áreas abaixo das panelas, mantendo as mangueiras apenas para conexão entre os reservatórios e o que estiver junto da estrutura metálica que suporta todo o conjunto.

Outro ponto que deve ser mencionado é no custo de construção de todo o sistema. Mesmo que não houvesse auxílio de colegas e utilização de materiais já disponíveis, o custo se manteve abaixo dos R\$4.500,00 apontados como limite de orçamento na entrevista realizado no início do projeto com os proprietários da cervejaria.

Pode-se dizer ainda que o sistema de resfriamento cumpriu todos os requisitos técnicos inicialmente apontados como essenciais para o sucesso do projeto. Apesar da já mencionada variação na temperatura final, não se trata de algo que comprometa o sistema ou que cause descrédito. Pelo contrário, a temperatura atingida, apesar de não ser ideal, ainda é considerada como adequada e saudável para fermentação.

Finalmente, deve-se reconhecer que o projeto é totalmente composto por itens comerciais, sem necessidade de ferramentas tecnológicas ou processos de fabricação específicos para sua construção, podendo ser replicado e adaptado com facilidade a qualquer nanocervejaria no Brasil, e talvez até no mundo, que busque a melhora de seus processos e produtos, ainda com o benefício de se eliminar o desperdício de água durante seu ciclo produtivo.

## 8 CONCLUSÕES

Apesar de ainda estar em franca expansão, o mercado de cervejas artesanais, tanto em Curitiba quanto a nível nacional, está cada dia mais competitivo. Além de inovação e variedade, condições essenciais para se ter destaque nesse meio, a qualidade continua sendo o fator primordial para retenção de clientes a uma marca.

Com essa premissa, as cervejarias tidas como inovadoras e criativas tem e continuarão tendo seu destaque entre os consumidores que buscam novidades no mercado e experimentar novos sabores e sensações. Porém apenas as cervejarias que atingirem um alto padrão de qualidade conseguirão fidelizar os clientes à sua marca, tendo confiança para seguir em busca de inovação.

Portanto, a busca pela qualidade dos produtos e processos deve ser tratado como algo fundamental não só no meio cervejeiro, mas em toda a indústria. As empresas que conseguirem isso de forma criativa, inovadora, e com menos custo certamente terão destaque em seu nicho de mercado.

O sistema desenvolvido no presente trabalho se enquadra bem dentro do cenário acima exposto. Trata-se de um sistema que resolveu um problema real da cervejaria em estudo, eliminando por completo o desperdício de água no ciclo de resfriamento e atingindo ainda os requisitos técnicos de fabricação de cervejas.

Alcançou-se o objetivo proposto no início do projeto, de se desenvolver um sistema que resfrie mosto cervejeiro dentro das especificações técnicas de produção e que não desperdice água durante o processo. O sucesso deste projeto está diretamente atrelado ao uso de ferramentas como a metodologia de Pahl & Beits (1996), mas também à aplicação de todo o conhecimento adquirido ao longo do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

O projeto contou com uma extensa e detalhada revisão bibliográfica, que serviu como base para a concepção de um conceito que foi desenvolvido com ferramentas de engenharia. Todos os cálculos e testes foram realizados para que se pudesse selecionar os melhores componentes em cada função do projeto.

O teste do protótipo comprovou a funcionalidade do sistema. Apesar da pequena variação apresentada no resultado final, esta não é significativa do ponto

de vista técnico de fabricação das cervejas, e não tem impacto em nenhum dos requisitos do projeto. Portanto, o projeto foi um sucesso sob todos os aspectos: técnico, ambiental e financeiro.

Por se tratar de um sistema composto por componentes comerciais e ter altíssima flexibilidade, o projeto pode ser adaptado por qualquer nanocervejaria do mundo, levando-o para a sua realidade de capacidade produtiva e infraestrutura disponível. O conceito foi provado como válido e é reproduzível.

Com isto, pode-se dizer que os principais objetivos estabelecidos ao início do projeto foram plenamente atingidos:

- a) Resfriamento em tempo adequado;
- b) Resfriamento até a temperatura adequada;
- c) Redução do desperdício de água;
- d) Custos do projeto.

A redução atingida no consumo de água é de grande impacto não só na cervejaria, mas sim na comunidade local, visto as recentes crises hídricas em estados do Brasil.

## **8.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Apesar de comum na teoria, a utilização de reservatórios termodinâmicos não é aplicável para volumes de controle relativamente pequenos, como caixas d'água e refrigeradores, como os utilizados neste projeto. Recomenda-se então aprofundar a questão de cálculos térmicos, e dimensionar o sistema considerando os reservatórios como volumes de controle transientes.

Outro ponto de atenção na execução do projeto deve ser o cuidado com o desprezo a variáveis, como o não isolamento térmico da tubulação de retorno de água do segundo trocador de calor ao refrigerador.

Por fim, todo processo produtivo é passível de melhorias. Portanto, deve-se acompanhar continuamente a utilização do sistema para detectar possíveis melhoras no sistema e no processo.

## REFERÊNCIAS

- AMBEV. **Água.** 2017. Disponível em: <<https://www.ambev.com.br/sustentabilidade/agua/>>. Acesso em: 06 maio 2018.
- APEMA. **Trocadores de calor casco e tubo.** 2018. Disponível em: <<http://www.apema.com.br/produtos-detalhes/trocadores-de-calor-casco-e-tubos>>. Acesso em: 10 abril 2018.
- AQUARELLA. **Como funciona um sistema de captação de água de chuva.** 2018. Disponível em: <<http://www.aquarelladesentupidora.com.br/blog/118-como-funciona-um-sistema-de-captacao-de-agua-de-chuva>>. Acesso em: 26 abril 2018.
- AUSTIN HOMEBREW SUPPLY. **Wort Chiller.** 2018. Disponível em: <[https://www.austinhomebrew.com/25-12-Wort-Chiller-wGarden-Hose-Fittings\\_p\\_7054.html](https://www.austinhomebrew.com/25-12-Wort-Chiller-wGarden-Hose-Fittings_p_7054.html)>. Acesso em: 09 maio 2018.
- BELTRAMELLI, Mauricio. **Cervejas, brejas e birras.** 2. ed. São Paulo: Leya, 2015. 320 p.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 17 – **Ergonomia.** Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2007. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR17.pdf>>. Acesso em: 06 maio 2018.
- CANAL RURAL. **Agronegócio responde por sete dos dez produtos mais exportados pelo brasil.** 2014. Disponível em: <<http://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/agronegocio-responde-por-sete-dos-dez-produtos-mais-exportados-pelo-brasil-8883>>. Acesso em: 26 abril 2018.
- CANTWELL, Dick. **Starting Your Own Brewery.** 2. ed. Boulder: Brewers Publications, 2013.
- CARVALHO, Júnior. **O desperdício da água.** 2018. Disponível em: <<http://www.gestaonocampo.com.br/biblioteca/o-desperdicio-da-agua>>. Acesso em: 25 abril 2018.
- CONDADO DA CERVEJA. **Água para produção de cerveja: Minerais e Dureza.** 2014. Disponível em: <<http://www.condadodacerveja.com.br/agua-para-producao-de-cerveja-minerais-e-dureza/>>. Acesso em: 28 mar. 2018.
- DANIELS, Ray. **Designing Great Beers: The Ultimate Guide to Brewing Classic Beer Styles.** Boulder: Brewers Publications, 1998.
- DECICINO, Ronaldo. **Escassez de água: Quais as áreas mais atingidas?** 2007. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/escassez-de-agua-quais-as-areas-mais-atingidas.htm>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

- DINSLAKEN, Daniel. **Como resfriar o mosto mais rápido**. 2016. Disponível em: <<https://concerveja.com.br/2016/06/30/resfriar-mosto>>. Acesso em: 18 abril 2018.
- FERNANDES, Carla; DIAS, Ricardo; MAIA, João. New plates for different types of plate heat exchangers. Instituto Politécnico de Bragança. 2008.
- FIX, George. **Principles of brewing science: a study of serious brewing issues paperback**. 2. ed. Boulder: Brewers Publications, 1999. 250 p.
- FORTLEV. **Guia de instalação**. 2017. Disponível em: <<https://www.fortlev.com.br/uploads/2015/03/Guia-de-Instalação-Caixa-PE-21x297cm-web.pdf>>. Acesso em: 17 outubro 2018.
- GEBREMARIAM, Aklilu. **GASKETED PLATE TYPE HEAT EXCHANGER DESIGN SOFTWARE**. 2016.
- GLOBO. **Cervejarias de ribeirão preto apostam em tecnologia para economizar água**. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2014/11/cervejarias-de-ribeirao-preto-apostam-em-tecnologia-para-economizar-agua.html>>. Acesso em: 25 abril 2018.
- GOMES, Luiz. **Desperdício da água e impactos ambientais**. 2009. Disponível em: <<http://www.gazetadigital.com.br/conteudo/show/secao/60/og/1/materia/221689/t/des-perdicio-da-agua-e-impactos-ambientais->>>. Acesso em: 25 abril 2018.
- GOODYEAR. **Motobomba periférica bomba d'água 1/2 CV – Goodyear**. 2018. Disponível em: <<http://www.goodyearferramentas.com.br/bombas-d-agua/motobomba-periferica-12hp-goodyear>>. Acesso em: 12 novembro 2018.
- HINDY, Steve. **The Craft Beer Revolution: How a Band of Microbrewers Is Transforming the World's Favorite Drink**. New York: Palgrave Macmillan Trade, 2014.
- HOMINILUPULO. **Microcervejaria e nanocervejaria: O que são, quais as diferenças e como ter sucesso**. 2016. Disponível em: <<https://www.hominilupulo.com.br/cultura/o-que-e-nanocervejaria-e-o-que-e-microcervejaria/>>. Acesso em: 05 jun. 2018.
- INCROPERA, Frank. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.
- INDÚSTRIA HOJE. **O que é FMEA?**. 2013. Disponível em: <<https://industria hoje.com.br/fmea>>. Acesso em: 13 novembro 2018.
- ISAR. **Espuma elastomérica**. 2018. Disponível em: <<https://www.isar.com.br/produtos/isolamento-termico/espuma-elastomerica/>>. Acesso em: 13 novembro 2018.
- KAKAÇ, S. **Heat exchangers. SELECTION, RATING, and THERMAL DESIGN**. 2<sup>th</sup> Edition. Florida: CRC, 2002.

KAYS, William M; LONDON, A. L.. **Compact Heat Exchangers**. 3. ed. Malabar: Krieger Publishing, 1998.

LUJETEC. **Automação industrial**. Disponível em: <[https://www.lujetec.com.br/produto/inversor-de-frequencia-cfw300a04p2s2nb20-1cv-220vca-mono-padroao/?gclid=CjwKCAiArK\\_fBRABEiwA0gOOc1TbbxW9CMheCt0sLhZs-\\_Bns1TtTXueayWViZX4iiJ\\_3TvOJg8H2xoCDhsQAvD\\_BwE](https://www.lujetec.com.br/produto/inversor-de-frequencia-cfw300a04p2s2nb20-1cv-220vca-mono-padroao/?gclid=CjwKCAiArK_fBRABEiwA0gOOc1TbbxW9CMheCt0sLhZs-_Bns1TtTXueayWViZX4iiJ_3TvOJg8H2xoCDhsQAvD_BwE)>. Acesso em: 13 novembro 2018.

LOJA SYNTH. **Etileno Glicol (1100g) PURO – Embalagem 5000 ml**. 2018. Disponível em: <<https://www.lojasynth.com/reagentes-analiticasmaterias-primas/reagentes-analiticasmaterias-primas/etileno-glicol-1100g-puro-embalagem-5000ml>>. Acesso em: 15 novembro 2018.

MAGRI, Daniel. **Quantos litros de água são usados na fabricação de cerveja?**. 2016. Disponível em: <<http://chefcomcerveja.com.br/quantos-litros-de-agua-sao-usados-na-fabricacao-de-cerveja>>. Acesso em 25 abril 2018.

MALLETT, John. **Malt: A Practical Guide from Field to Brewhouse**. Boulder: Brewers Publications, 2014.

MERLIN, LEROY. **A casa da sua casa**. 2018 Disponível em: <<https://www.leroymerlin.com.br/disjuntores-din>>. Acesso em: 13 novembro 2018.

MOSHER, Randy. **Tasting Beer: An Insider's Guide to the World's Greatest Drink**. North Adams: Storey Publishing, 2009.

OLIVER, Garrett. **A mesa do mestre-cervejeiro**. São Paulo: Senac Sp, 2012. 548 p.

PAHL, Gerhard et al. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Blucher, 2005.

PLANETA SUSTENTÁVEL. **Me vê 16 mil litros de água!**. 2008. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/blog/planeta/me-ve-16-mil-litros-de-agua>>. Acesso em: 25 abril 2018.

PENA, Rodolfo. **Economia de água na agricultura**. 2018. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/economia-agua-na-agricultura.htm>>. Acesso em: 26 abril 2018.

PROFESSORES DE PLANTÃO. **Entenda a dinâmica dos anticongelantes, líquidos de arrefecimento e aditivos**. 2014. Disponível em: <<http://www.professoresdeplantaao.com.br/blog/post/84/entenda-a-dinamica-dos-anticongelantes-liquidos-de-arrefecimento-e-aditivos>>. Acesso em: 11 novembro 2018.

RODRIGUEZ, Oscar. **Segunda lei da termodinâmica**. 2018. Disponível em: <<http://www2.eesc.usp.br/netef/Oscar/Aula18t.pdf>>. Acesso em 15 de outubro de 2018.



ROSA, Mayra. **155 litros de água para 1 litro de cerveja**. 2014. Disponível em: <[http://ciclovivo.com.br/vida-sustentavel/bem-estar/155\\_litros\\_de\\_agua\\_para\\_1\\_litro\\_de\\_cerveja](http://ciclovivo.com.br/vida-sustentavel/bem-estar/155_litros_de_agua_para_1_litro_de_cerveja)>. Acesso em: 25 abril 2018.

SCHRODER, Francisco. **Levantamento em campo da rugosidade equivalente de tubos metálicos**. 2011. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258751/1/Schroder\\_FranciscoCarlos\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258751/1/Schroder_FranciscoCarlos_M.pdf)>. Acesso em: 26 maio 2018.

SILVA, David. **Água para produção de cerveja**. 2014. Disponível em: <<http://www.condadodacerveja.com.br/agua-para-producao-de-cerveja-minerais-e-dureza/>>. Acesso em: 27 abril 2018.

TERMOTEK. **Serpentina de cobre preço**. 2018. Disponível em: <<http://www.termotek.com.br/serpentina-cobre-preco>>. Acesso em: 10 abril 2018.

TIGRE. **PVC-U Industrial SHC. 80. 2017**. Disponível em: <[https://www.tigre.com.br/sites/default/files/produtos/catalogos/Ficha\\_tecnica\\_linha\\_PVC-U.pdf](https://www.tigre.com.br/sites/default/files/produtos/catalogos/Ficha_tecnica_linha_PVC-U.pdf)>. Acesso em: 16 novembro 2018.

TODAMATÉRIA. **Escassez de água**. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/escassez-de-agua/>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

TRANSCALOR. **Trocadores de calor de placas**. 2018. Disponível em: <<http://www.transcalor.com.br>>. Acesso em: 18 abril 2018.

TROCADORES DE CALOR. **Placas de trocadores de calor**. 2018. Disponível em: <<http://www.trocadoresdecalor.com.br/placas-de-trocadores-de-calor>>. Acesso em: 10 abril 2018.

TROCALOR. **Trocadores de calor – tubo e tubo**. 2018. Disponível em: <<http://www.trocalor.com.br/p-trocador-tube-and-tube.php>>. Acesso em: 27 maio 2018.

TROMMER, Michel. **Para que resfriar o mosto?**. 2015. Disponível em: <<http://engarrafadormoderno.com.br/processos/para-que-resfriar-o-mosto>>. Acesso em: 25 abril 2018.

UFRGS. **Água na cervejaria**. 2018. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/feira/materias-primas/outros/agua-na-cervejaria>> Acesso em: 25 abril 2018.

ULLMAN, Samanta. **Água na Cervejaria**. 2002. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/mpoutro/agua/agua\\_na\\_cervejaria.htm](http://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/mpoutro/agua/agua_na_cervejaria.htm)>. Acesso em: 26 maio 2018.

UOL. **Brasil é o 3º maior produtor de cerveja do mundo; veja como se faz a bebida**. 2013. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2013/10/25/brasil-e-o-3-maior->

produtor-de-cerveja-do-mundo-veja-como-se-faz-a-bebida.htm>. Acesso em: 26 abril 2018.

WECONSULTORIA. **Chiller de placas / trocador de calor**. 2018a. Disponível em: <<http://loja.weconsultoria.com.br/chiller-de-placas-trocador-de-calor-p45161/>>. Acesso em: 26 maio 2018.

WECONSULTORIA. **Chiller simples**. 2018b. Disponível em: <<http://loja.weconsultoria.com.br/chiller-simples-p257/>>. Acesso em: 26 maio 2018.

WHITE, Chris; ZAINASHEFF, Jamil. **Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation**. Boulder: Brewers Publications, 2010.

## APÊNDICE A – ENTREVISTA COM PROPRIETÁRIOS DA CERVEJARIA

Neste apêndice consta a transcrição de entrevista gravada em 12 de março de 2018, com proprietários da Nanocervejaria **Giramundo Brewing Co.**

Proprietários:

- Augusto Koga;
- Filipe Pozzobom;
- Marcelo Freitas;
- Nardel Peixoto.

### **1.Qual a capacidade produtiva atual da cervejaria?**

R: 600 litros de cerveja por mês, com produções individuais de 120 litros cada.

### **2.Qual a capacidade prevista a curto/médio prazo?**

R: 1.200 litros de cerveja por mês, mantendo os lotes de 120 litros por produção.

### **3.Qual o sistema de resfriamento de mosto atual?**

R: Um sistema por contra-fluxo, que consiste em dois tubos, um interno ao outro, onde um líquido flui em um sentido e o outro líquido em sentido contrário, sendo o mosto passando por dentro de um tubo interno, e água passando em uma mangueira que envolve o tubo de mosto, fazendo a troca de calor entre os fluidos.

### **4.Quais são os resultados do sistema atual? Ele atende às necessidades da cervejaria?**

R: Com o sistema atual levamos 70 minutos para resfriar o mosto de 98 a 35 graus Celsius, e isso com certeza impacta negativamente na qualidade do produto final.

### **5.Quais são as demandas de tempo e temperatura para um sistema de resfriamento que atenda às necessidades da cervejaria?**

O ideal é que consigamos fazer todo o resfriamento em menos de 35 minutos e atinjamos, no mínimo, 25 graus de temperatura no mosto após passar pelo sistema de resfriamento.

**6.Quais são os impactos desta demora no resfriamento com o sistema atual?**

R: O principal é, com certeza, o impacto negativo na qualidade do produto final. Mas podemos citar ainda outras perdas, como tempo de processo que poderia ser menor, gasto de água (quanto mais tempo o mosto leva pra passar pelo sistema, mais água da rede gastamos).

**7.Qual o consumo de água com o sistema atual?**

R: Estimamos que seja entre 450 e 500 litros por lote produzido, é necessário fazer um cálculo preciso.

**8.Quais são as restrições atuais da cervejaria para implementação de um novo sistema de resfriamento?**

R: Com certeza a maior delas é adaptar ao espaço e layout que já possuímos hoje. Fizemos um investimento relativamente alto nas painéis e estrutura em inox que temos hoje, e nosso espaço é relativamente pequeno. Então precisamos de um sistema que se encaixe com o que temos hoje.

**9.E em relação a custos? O que seria um impeditivo?**

R: Veja bem, assim como outros investimentos que temos feito ultimamente (cozinha e fermentadores, por exemplo), temos buscado soluções criativas e nós mesmos temos feito os projetos e “colocado a mão na massa” para reduzir custos. Sabemos da importância de um sistema de resfriamento eficiente e é nosso foco agora. E considerando algumas estimativas preliminares que fizemos, reservamos em torno de R\$4.500,00 para fazer o sistema, utilizando soluções existentes no mercado e que atendam às nossas demandas. Então custo não é o maior impeditivo nosso hoje.

**10.O que vocês pretendem utilizar como fluido de resfriamento?**

R: O que for mais barato (risos). E eficiente, temos que nos concentrar na eficiência do sistema.

**11. Quais os materiais que devem ser utilizados na construção do sistema?**

R: Tudo que entrar em contato com o mosto deve ser material de grau alimentício, aço inox ou algum plástico que atenda este requisito. O que não entrar em contato com o mosto podem ser materiais de baixo custo.

**12. Você falou que fizeram algumas estimativas preliminares, o que foi verificado neste pré-estudo?**

Pesquisamos alguns trocadores de calor comerciais, com boa eficiência, consultamos alguns outros cervejeiros em relação à reaproveitamento da água. O que mais vimos de aplicação em volumes similares aos nossos são trocadores de calor por placas e utilização de bancos de água fria para resfriar a água que sai quente do trocador de calor.

**13. Algumas cervejarias utilizam a água quente que sai do trocador de calor para iniciar a brassagem seguinte. Este sistema não se enquadra à sua cervejaria?**

R: Não, pois como fazemos apenas uma brassagem por dia de produção, esta água ficaria na panela e retornaria à temperatura ambiente antes da próxima produção. Além de que teríamos que filtrar a água antes dela passar pelo trocador de calor, aumentando significativamente o custo com filtros.

**14. Qual o tempo considerado como aceitável para a limpeza do sistema?**

R: Levamos em torno de uma hora para fazer a limpeza da cozinha após a o término da produção, então um tempo bom de limpeza seria de em torno de uma hora.

## APÊNDICE B – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO

Este apêndice contempla o diagrama esquemático da proposta concebida, descrito na seção 4.1.1, e tem como objetivo ilustrar a primeira ideia de como será o modelo físico do sistema, e quais componentes e materiais serão utilizados em sua construção, permitindo-se assim iniciar o dimensionamento do sistema e a seleção de materiais e componentes.

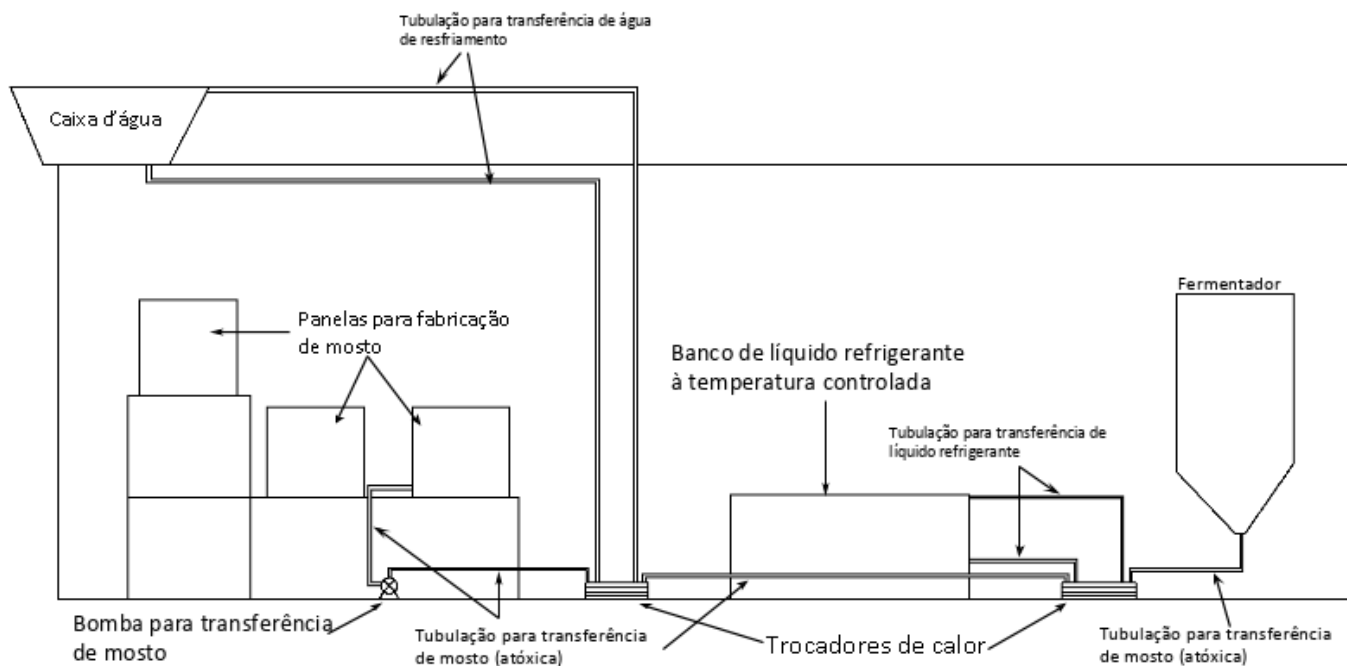


Figura 45 – Diagrama esquemático da proposta concebida.

## APÊNDICE C – CÓDIGO PARA PROGRAMAÇÃO DE CÁLCULOS

Neste apêndice consta todo o código de programação em *Visual Basic* para desenvolvimento da planilha de cálculos térmicos citada no Capítulo 4.

Sub TROCATERMICA()

Dim Q As Double 'Vazão da bomba

Dim Qf As Double

Dim m1 As Double 'Vazão mássica mosto

Dim m2 As Double 'Vazão mássica água 1

Dim Th1 As Double 'Temperatura entrada quente

Dim Th2 As Double 'Temperatura saída quente

Dim Cp1 As Double 'Calor específico mosto

Dim Pi As Double

Dim po1 As Double 'Po do mosto

Dim po2 As Double 'Po da água

Dim vol1 As Double 'Volume mosto m<sup>3</sup>

Dim Ts1 As Double 'Temperatura saída mosto no trocador 1

Dim opcao As String

Dim Qtroca As Double

Dim Q2 As Double

Dim Qf2 As Double

Call INTERPOLACAO1

Call INTERPOLACAO2

opcao = Sheets("Início").Range("C4")

vol1 = Sheets("Dados").Range("B2")

Pi = 3.1415 'Pi

Fi = 1.17 'Valor aproximado

po1 = Sheets("Dados").Range("B5") 'kg/m<sup>3</sup>

Q = Sheets("Início").Range("F4") 'Vazão da bomba

Qf = Q \* po1 / 1000 / 3600

Sheets("Início").Range("F5") = Qf 'Vazão mássicaem kg / s

Cp1 = Sheets("Início").Range("I17") 'Calor específico mosto

Q2 = Sheets("Início").Range("F14") 'Vazão da bomba

Qf2 = Q2 \* po1 / 1000 / 3600

Sheets("Início").Range("F15") = Qf2 'Vazão mássicaem kg / s

If Sheets("Início").Range("C5") = "Ale" Then 'Ale

    Th2 = Sheets("Dados").Range("C14")

End If

If Sheets("Início").Range("C5") = "Lager" Then 'Lager

    Th2 = Sheets("Dados").Range("C15")

End If

Th1 = Sheets("Início").Range("I13")

Sheets("Início").Range("I18") = Th2



$Q_{troca} = Q_f * C_{p1} * (Th1 - Th2)$

Sheets("Início").Range("I4") = Qtroca

Call INTERPOLACAO1

Call INTERPOLACAO2

If opcao = "Placas" Then

    Call PLACAS1

End If

End Sub

Sub PLACAS1()

Dim Lc As Double 'Altura do trocador

Dim Nt As Integer 'Número total de placas

Dim De As Double 'Diâmetro equivalente do canal

Dim b As Double 'Espaçamento de canal

Dim Fi As Double 'Fator de superfície

Dim p As Double 'Plate pitch

Dim t As Double 'Espessura do prato

Dim Q2 As Double 'Vazão água 1

Dim m1 As Double 'Vazão mássica mosto

Dim m2 As Double 'Vazão mássica água 1

Dim Th1 As Double 'Temperatura entrada quente - mosto

Dim Th2 As Double 'Temperatura saída quente - mosto

Dim Tc1 As Double 'Temperatura entrada fria - água da rua

Dim Tc2 As Double 'Temperatura saída fria - água da rua

Dim Thf As Double 'Temperatura de saída final - mosto

Dim Cp1 As Double 'Calor específico mosto

Dim Cp2 As Double 'Calor específico água

Dim po1 As Double 'Po do mosto

Dim po2 As Double 'Po da água

Dim vol1 As Double 'Volume mosto m<sup>3</sup>

Dim Re1 As Double 'Reynolds do mosto

Dim Np As Double 'Nº de passes

Dim Ncp As Double

Dim Gc As Double 'Velocidade mássico canal de mosto

Dim Gc2 As Double

Dim mi1 As Double 'Viscosidade do mostoque entra no trocador 1

Dim Pr1 As Double 'Prandtl mosto que entra no trocador 1

Dim Nu1 As Double 'Nusselt mosto que entra no trocador 1

Dim h1 As Double

Dim k1 As Double 'Condutividade térmica do mosto a 98 graus

Dim Qt1 As Double 'Quantidade de calor trocada trocador 1

Dim Ae As Double 'área de troca de uma placa

Dim At As Double 'área de troca total

Dim Ne As Double 'Número de placas útil

Dim Tml1 As Double

Dim Re2 As Double 'Reynolds da água que entra no trocador 1

Dim mi2 As Double 'Viscosidade da água que entra no trocador 1

Dim Nu2 As Double 'Nusselt água que entra no trocador 1

Dim Pr2 As Double 'Prandtl água que entra no trocador 1

Dim k2 As Double 'Condutividade térmica da água que entra no trocador 1

Dim h2 As Double

Dim Uc1 As Double

Dim Kw As Double 'Condutividade térmica do a• o AISI 304

Dim Uct1 As Double

Dim Qt2 As Double

Dim Tml2 As Double

Dim a As Long  
Dim Cf1 As Double  
Dim Cpf1 As Double  
Dim Cpq1 As Double  
Dim Cq1 As Double  
Dim Cmin1 As Double  
Dim Cmax1 As Double  
Dim NTU1 As Double  
Dim qmax1 As Double  
Dim ef1 As Double 'Efetividade do trocador 1  
Dim qe1 As Double  
Dim chute As Double  
Dim qe2 As Double  
Dim mChute As Double  
Dim Tfsai As Double  
Dim dt1 As Double  
Dim dt2 As Double  
Dim Tml As Double  
Dim Qchute As Double  
Dim x As Double  
Dim Tqe As Double  
Dim Tqs As Double  
Dim Tfe As Double  
Dim TETA1 As Double  
Dim TETA2 As Double  
Dim tempo As Double  
Dim Asb As Double  
Dim hb As Double  
Dim Pob As Double

Dim Cpb As Double

Dim Cr As Double

Dim efi As Double

Dim i As Long

Thf = Sheets("Início").Range("I18")

Kw = Sheets("Início").Range("C19") 'Condutividade térmica do trocador de placas - A• o AISI 304

Nt = Sheets("Início").Range("C7")

Ne = Nt - 2

Ae = Sheets("Início").Range("C10")

Qt = Sheets("Início").Range("I4")

At = Ne \* Ae

'Reynlods

Np = 1 '1 Passe por placa

Ncp = (Nt - 1) / 2 / Np

Lc = Sheets("Início").Range("C9") 'Espessura total do trocador

p = Lc / Nt

t = Sheets("Início").Range("C18") 'Espessura de uma placa

b = p - t

Fi = 1.17 'Valor recomendado para ser utilizado sem cálculos

De = 2 \* b / Fi 'Diâmetro hidráulico

'Dados trocador 1

m1 = Sheets("Início").Range("F5") 'Vazão mássica do mosto

Lw = Sheets("Início").Range("C14") 'Espessura efetiva de uma placa

Gc = m1 / Ncp / b / Lw 'Gc mosto que entra no trocador 1

mi1 = Sheets("Início").Range("I14") 'Viscosidade mosto que entra no trocador 1

mi2 = Sheets("Início").Range("I9") 'Viscosidade da água que entra no trocador 1

Re1 = Gc \* De / mi1 'Reynolds de mosto que entra no trocador 1

Pr1 = Sheets("Início").Range("I15") 'Prandtl mosto que entra no trocador 1

Nu1 = 0.2 \* Re1 ^ (3 / 4) \* Pr1 ^ (2 / 5)

k1 = Sheets("Início").Range("I16") 'Condutividade térmica do mosto que entra no trocador 1

h1 = Nu1 \* k1 / De

Q2 = Sheets("Início").Range("C8") 'Vazão d'água torneira

Gc2 = Q2 / Ncp / b / Lw 'Gc água que entra no trocador 1

Re2 = Gc2 \* De / mi2

Pr2 = Sheets("Início").Range("I10") 'Prandtl da água que entra no trocador 1

Nu2 = 0.2 \* Re2 ^ (3 / 4) \* Pr2 ^ (2 / 5) 'Nusselt da água que entra no trocador 1

k2 = Sheets("Início").Range("I11") 'Condutividade térmica da água que entra no trocador 1

$$h_2 = Nu_2 * k_2 / De$$

$$U_{ct1} = (1 / h_1) + (1 / h_2) + (t / Kw)$$

$$U_{c1} = 1 / U_{ct1}$$

'Cálculos do trocador 1

Cpf1 = Sheets("Início").Range("I12") 'Cp da água que entra no trocador 1

Cf1 = Q2 \* Cpf1 'Cf da água que entra no trocador 1

Cpq1 = Sheets("Início").Range("I17") 'Cp do mosto que entra no trocador 1

Cq1 = m1 \* Cpq1 'Cq do mosto que entra no trocador 1

If Cf1 > Cq1 Then

    Cmin1 = Cq1

    Cmax1 = Cf1

End If

If Cq1 > Cf1 Then

    Cmin1 = Cf1

    Cmax1 = Cq1

End If

Cr = Cmin1 / Cmax1

Sheets("Início").Range("F7") = Cmin1

Sheets("Início").Range("F8") = Cmax1

NTU1 = Uc1 \* At / Cmin1

efi = 0.9999

For i = 1 To 1000000000

ef1 = (2.7182 ^ ((Cr - 1) \* NTU1) \* (efi \* Cr - 1)) + 1

efi = ef1

If ef1 <= 0.9999 \* efi Then

Exit For

End If

Next i

Sheets("Início").Range("F9") = NTU1

Sheets("Início").Range("F10") = ef1

Th1 = Sheets("Início").Range("I13")

Tc1 = Sheets("Início").Range("I8")

qmax1 = Cmin1 \* (Th1 - Tc1)

qe1 = ef1 \* qmax1

Sheets("Início").Range("F11") = qe1

Th2 = Th1 - qe1 / Cq1

Sheets("Início").Range("I23") = Th2

Call INTERPOLACAO2

Tc2 = Tc1 + qe1 / Cf1

```
Sheets("Início").Range("I28") = Tc2
```

```
Call INTERPOLACAO3
```

```
If Sheets("Início").Range("C5") = "Lager" Then
```

```
    chute = 7.999
```

```
End If
```

```
If Sheets("Início").Range("C5") = "Ale" Then
```

```
    chute = 15.999
```

```
End If
```

```
Sheets("Início").Range("F17") = chute
```

```
Sheets("Início").Range("I33") = chute
```

```
If Sheets("Início").Range("I6") <> "-" Then
```

```
    qe2 = Sheets("Início").Range("I6")
```

```
    Call INTERPOLACAO5
```

```
End If
```

```
'Dados trocador 2
```

```
If Sheets("Início").Range("I15") > Sheets("Início").Range("I14") Then
```

```
    MsgBox ("Apenas um trocador atende os requisitos de sistema. Não é necessária a utilização do segundo trocador de calor.")
```

```
    Sheets("Início").Range("I33") = "-"
```

```
    Sheets("Início").Range("I34") = "-"
```

```
    Sheets("Início").Range("I35") = "-"
```

```
    Sheets("Início").Range("I36") = "-"
```

```
    Sheets("Início").Range("I37") = "-"
```

```
    Sheets("Início").Range("I38") = "-"
```

```
    Sheets("Início").Range("I39") = "-"
```

```
    Sheets("Início").Range("I40") = "-"
```



Sheets("Início").Range("I41") = "-"

Sheets("Início").Range("I42") = "-"

Sheets("Início").Range("F17") = "-"

Sheets("Início").Range("F19") = "-"

Sheets("Início").Range("F15") = "-"

Exit Sub

End If

If Sheets("Início").Range("I15") < Sheets("Início").Range("I4") Then

Ne = Sheets("Início").Range("F18") - 2 'Número de placas do trocador 2

At = Ne \* Ae 'Área total de troca do trocador 2

Gc = m1 / Ncp / b / Lw 'Gc mosto que entra no trocador 2

mi1 = Sheets("Início").Range("I24") 'Viscosidade mosto que entra no trocador 2

mi2 = Sheets("Início").Range("I34") 'Viscosidade da água que entra no trocador 2

Re1 = Gc \* De / mi1 'Reynolds de mosto que entra no trocador 2

Pr1 = Sheets("Início").Range("I25") 'Prandtl mosto que entra no trocador 2

Nu1 = 0.2 \* Re1 ^ (3 / 4) \* Pr1 ^ (2 / 5)

k1 = Sheets("Início").Range("I26") 'Condutividade térmica do mosto que entra no trocador 2

h1 = Nu1 \* k1 / De

Q2 = Sheets("Início").Range("F15") 'Vazão d'água da boma do refrigerador

Gc2 = Q2 / Ncp / b / Lw 'Gc água que entra no trocador 2

Re2 = Gc2 \* De /  $\mu$ i2

Pr2 = Sheets("Início").Range("I35") 'Prandtl da água que entra no trocador 2

Nu2 = 0.2 \* Re2 ^ (3 / 4) \* Pr2 ^ (2 / 5) 'Nusselt da água que entra no trocador 2

k2 = Sheets("Início").Range("I36") 'Condutividade térmica da água que entra no trocador 2

h2 = Nu2 \* k2 / De

Uct1 = (1 / h1) + (1 / h2) + (t / Kw)

Uc1 = 1 / Uct1

Tfsai = chute + 0.001

Tqe = Sheets("Início").Range("I23")

Tqs = Sheets("Início").Range("I18")

Tfe = chute

Sheets("Início").Range("I38") = Tfe

Call INTERPOLACAO6

For x = 1 To 10000000

Tfsai = (qe2 / Q2 / Sheets("Início").Range("I42")) + chute

Sheets("Início").Range("I38") = Tfsai

Call INTERPOLACAO6

dt1 = Tqe - Tfsai

dt2 = Tqs - chute

If dt2 < 0 Then

Exit For

Exit Sub

```
End If
If dt2 = 0 Then
    MsgBox ("Tml = ZERO")
    Exit For
    Exit Sub
End If
Sheets("Data-Sheet").Range("F11") = dt1
Sheets("Data-Sheet").Range("F12") = dt2
Tml = Sheets("Data-Sheet").Range("F9")
Qchute = Uc1 * At * Tml
If Qchute >= qe2 Then
    Exit For
    Sheets("Início").Range("I38") = Tfsai
    Sheets("Início").Range("I33") = chute
    Sheets("Início").Range("F17") = chute
    Sheets("Início").Range("F19") = Qchute
    Call INTERPOLACAO5
    Call INTERPOLACAO6
End If
If Qchute < qe2 Then
    chute = chute - 0.001
    Sheets("Início").Range("I33") = chute
    Call INTERPOLACAO5
    Call INTERPOLACAO6
    'Dados trocador 2
    Re2 = Gc2 * De / mi2
    Pr2 = Sheets("Início").Range("I35") 'Prandtl da água que entra no trocador 2
    Nu2 = 0.2 * Re2 ^ (3 / 4) * Pr2 ^ (2 / 5) 'Nusselt da água que entra no trocador 2
    k2 = Sheets("Início").Range("I36") 'Condutividade térmica da água que entra no trocador 2
```

$$h2 = Nu2 * k2 / De$$

$$Uct1 = (1 / h1) + (1 / h2) + (t / Kw)$$

$$Uc1 = 1 / Uct1$$

End If

Next x

Sheets("Início").Range("I33") = chute

Sheets("Início").Range("F17") = chute

Sheets("Início").Range("F19") = Qchute

TETA1 = Sheets("Início").Range("F8")

Sheets("Data-Sheet").Range("F18") = TETA1

TETA2 = TETA1 + 1

End If

End Sub

Sub INTERPOLACAO1()

Dim temp As Double

Dim temp2 As Double

Dim i As Double

Dim a As Double

Dim b As Double

Dim c As Double

Dim d As Double

Dim e As Double

Dim f As Double

Dim mi As Double

Dim prd As Double

Dim k As Double

Dim j As Double

```
Dim cp As Double
```

```
Dim po As Double
```

```
'Água que entra no trocador 1
```

```
temp = Sheets("Início").Range("I8")
```

```
temp = temp + 273
```

```
For i = 2 To 27
```

```
  If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then
```

```
    j = i - 1
```

```
    'Interpolação do MI
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    mi = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I9") = mi
```

```
    'Interpolação de Prandtl
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    prd = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I10") = prd
```

'Interpolação da condutividade térmica

a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)

d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)

e = temp

$k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d$

Sheets("Início").Range("I11") = k

'Interpolação do calor específico

a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)

d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)

e = temp

$cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d$

Sheets("Início").Range("I12") = cp

Exit For

End If

Next i

'Mosto que entra no trocador 1

temp = Sheets("Início").Range("I13")

temp = temp + 273

For i = 2 To 27

```
If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then
```

```
    j = i - 1
```

```
    'Interpolação do MI
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    mi = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I14") = mi
```

```
    'Interpolação de Prandtl
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    prd = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I15") = prd
```

```
    'Interpolação da condutividade térmica
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)
```

```
    e = temp
```

```
k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I16") = k
```

```
'Interpolação do calor específico
```

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)
```

```
d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)
```

```
e = temp
```

```
cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I17") = cp
```

```
'Interpolação da massa específica
```

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
c = Sheets("Tabela").Range("F" & i)
```

```
d = Sheets("Tabela").Range("F" & j)
```

```
e = temp
```

```
po = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Dados").Range("B5") = po
```

```
Exit For
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
'Mosto que sai no trocador 2
```

```
temp = Sheets("Início").Range("I18")
```



```
temp = temp + 273
```

```
For i = 2 To 27
```

```
  If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then
```

```
    j = i - 1
```

```
    'Interpolação do MI
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    mi = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I19") = mi
```

```
    'Interpolação de Prandtl
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    prd = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I20") = prd
```

```
    'Interpolação da condutividade térmica
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)
```

```
d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)
e = temp

k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
Sheets("Início").Range("I21") = k

'Interpolação do calor específico
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)
d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)
e = temp

cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
Sheets("Início").Range("I22") = cp

Exit For
End If
Next i

End Sub

Sub INTERPOLACAO2()
Dim temp As Double
Dim temp2 As Double
Dim i As Double
Dim a As Double
Dim b As Double
Dim c As Double
Dim d As Double
Dim e As Double
```

```
Dim f As Double
```

```
Dim mi As Double
```

```
Dim prd As Double
```

```
Dim k As Double
```

```
Dim j As Double
```

```
Dim cp As Double
```

```
'Mosto que sai do trocador 1
```

```
temp = Sheets("Início").Range("I23")
```

```
temp = temp + 273
```

```
For i = 2 To 27
```

```
  If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then
```

```
    j = i - 1
```

```
    'Interpolação do MI
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    mi = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I24") = mi
```

```
    'Interpolação de Prandtl
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)
```

```
d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)
```

```
e = temp
```

```
prd = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I25") = prd
```

```
'Interpolação da condutividade térmica
```

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)
```

```
d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)
```

```
e = temp
```

```
k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I26") = k
```

```
'Interpolação do calor específico
```

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)
```

```
d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)
```

```
e = temp
```

```
cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I27") = cp
```

```
Exit For
```

```
End If
```

```
Next i
```

End Sub

Sub INTERPOLACAO3()

Dim temp As Double

Dim temp2 As Double

Dim i As Double

Dim a As Double

Dim b As Double

Dim c As Double

Dim d As Double

Dim e As Double

Dim f As Double

Dim mi As Double

Dim prd As Double

Dim k As Double

Dim j As Double

Dim cp As Double

'água que sai do trocador 1

temp = Sheets("Início").Range("I28")

temp = temp + 273

For i = 2 To 27

    If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then

        j = i - 1

        'Interpolação do MI

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)
d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)
e = temp
```

```
mi = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
Sheets("Início").Range("I29") = mi
```

'Interpolação de Prandtl

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)
d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)
e = temp
```

```
prd = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
Sheets("Início").Range("I30") = prd
```

'Interpolação da condutividade térmica

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)
d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)
e = temp
```

```
k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
Sheets("Início").Range("I31") = k
```

```
'Interpolação do calor específico  
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)  
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)  
c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)  
d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)  
e = temp  
  
cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d  
Sheets("Início").Range("I32") = cp  
  
Exit For  
End If  
Next i  
  
End Sub  
  
Sub INTERPOLACAO4()  
Dim temp As Double  
Dim temp2 As Double  
Dim i As Double  
Dim a As Double  
Dim b As Double  
Dim c As Double  
Dim d As Double  
Dim e As Double  
Dim f As Double  
Dim mi As Double  
Dim prd As Double  
Dim k As Double  
Dim j As Double
```

```
Dim cp As Double
```

```
'água que entra no trocador 2
```

```
temp = Sheets("Início").Range("I33")
```

```
temp = temp + 273
```

```
For i = 2 To 27
```

```
  If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then
```

```
    j = i - 1
```

```
    'Interpolação do MI
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    mi = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I34") = mi
```

```
    'Interpolação de Prandtl
```

```
    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
    c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)
```

```
    d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)
```

```
    e = temp
```

```
    prd = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
    Sheets("Início").Range("I35") = prd
```



'Interpolação da condutividade térmica

a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)

d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)

e = temp

$k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d$

Sheets("Início").Range("I36") = k

'Interpolação do calor específico

a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)

d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)

e = temp

$cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d$

Sheets("Início").Range("I37") = cp

Exit For

End If

Next i

End Sub

Sub INTERPOLACAO5()

Dim temp As Double

Dim temp2 As Double

Dim i As Double

Dim a As Double

Dim b As Double

Dim c As Double

Dim d As Double

Dim e As Double

Dim f As Double

Dim mi As Double

Dim prd As Double

Dim k As Double

Dim j As Double

Dim cp As Double

'água que entra no trocador 2

temp = Sheets("Início").Range("I33")

temp = temp + 273

For i = 2 To 27

    If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then

        j = i - 1

        'Interpolação do MI

        a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

        b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

        c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)

        d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)

        e = temp

        mi = (e - b) \* (c - d) / (a - b) + d

Sheets("Início").Range("I34") = mi

'Interpolação de Prandtl

a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)

d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)

e = temp

$prd = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d$

Sheets("Início").Range("I35") = prd

'Interpolação da condutividade térmica

a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)

d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)

e = temp

$k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d$

Sheets("Início").Range("I36") = k

'Interpolação do calor específico

a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)

d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)

e = temp

```
cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I37") = cp
```

```
Exit For
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub INTERPOLACAO6()
```

```
Dim temp As Double
```

```
Dim temp2 As Double
```

```
Dim i As Double
```

```
Dim a As Double
```

```
Dim b As Double
```

```
Dim c As Double
```

```
Dim d As Double
```

```
Dim e As Double
```

```
Dim f As Double
```

```
Dim mi As Double
```

```
Dim prd As Double
```

```
Dim k As Double
```

```
Dim j As Double
```

```
Dim cp As Double
```

```
'água que sai do trocador 2
```

```
temp = Sheets("Início").Range("I38")
```

```
temp = temp + 273
```

For i = 2 To 27

If Sheets("Tabela").Range("A" & i) >= temp Then

    j = i - 1

    'Interpolação do MI

    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

    c = Sheets("Tabela").Range("B" & i)

    d = Sheets("Tabela").Range("B" & j)

    e = temp

    mi = (e - b) \* (c - d) / (a - b) + d

    Sheets("Início").Range("I39") = mi

    'Interpolação de Prandtl

    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

    c = Sheets("Tabela").Range("D" & i)

    d = Sheets("Tabela").Range("D" & j)

    e = temp

    prd = (e - b) \* (c - d) / (a - b) + d

    Sheets("Início").Range("I40") = prd

    'Interpolação da condutividade térmica

    a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)

    b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)

    c = Sheets("Tabela").Range("C" & i)

    d = Sheets("Tabela").Range("C" & j)

    e = temp

```
k = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I41") = k
```

```
'Interpolação do calor específico
```

```
a = Sheets("Tabela").Range("A" & i)
```

```
b = Sheets("Tabela").Range("A" & j)
```

```
c = Sheets("Tabela").Range("E" & i)
```

```
d = Sheets("Tabela").Range("E" & j)
```

```
e = temp
```

```
cp = (e - b) * (c - d) / (a - b) + d
```

```
Sheets("Início").Range("I42") = cp
```

```
Exit For
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub PDFCHOOSE()
```

```
If Sheets("Início").Range("I6") = "-" Then
```

```
    Call PDF2
```

```
End If
```

```
If Sheets("Início").Range("I6") <> "-" Then
```

```
    Call PDF
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Sub PDF()
```

```
Dim rng As Range
```

```
Dim path As String
```

```
Dim filepath As String
```

```
Dim nomeArq As String
```

```
Dim wsA As Workbook
```

```
Worksheets("PDF").Activate
```

```
Set wsA = ActiveWorkbook
```

```
nomeArq = "resultados"
```

```
path = ActiveWorkbook.path
```

```
filepath = path & "\PDF\"
```

```
Set rng = Nothing
```

```
Set rng = Range(Cells(2, 3), Cells(44, 13))
```

```
ActiveSheet.PageSetup.PrintArea = rng.Address
```

```
With ActiveSheet.PageSetup
```

```
    .CenterHorizontally = True
```

```
    .CenterVertically = True
```

```
    .Orientation = xLandscape
```

```
    .LeftMargin = Application.InchesToPoints(0)
```

```
    .RightMargin = Application.InchesToPoints(0)
```

```
    .TopMargin = Application.InchesToPoints(0)
```

```
    .BottomMargin = Application.InchesToPoints(0)
```

```
    .HeaderMargin = Application.InchesToPoints(0)
```

```
    .FooterMargin = Application.InchesToPoints(0)
```

```
.PaperSize = xlPaperA4

.Zoom = False

On Error Resume Next

End With

ChDir filepath

ActiveSheet.ExportAsFixedFormat Type:=xlTypePDF, Filename:= _
filepath & nomeArq & ".pdf" _
, Quality:=xlQualityMaximum, IncludeDocProperties:=True, IgnorePrintAreas _
:=False, OpenAfterPublish:=True

Worksheets("Início").Activate

Call OPENPDF

End Sub

Sub PDF2()

Dim rng As Range

Dim path As String

Dim filepath As String

Dim nomeArq As String

Dim wsA As Workbook

Worksheets("PDF2").Activate

Set wsA = ActiveWorkbook

nomeArq = "resultados"

path = ActiveWorkbook.path

filepath = path & "\PDF\"

Set rng = Nothing
```



```
Set rng = Range(Cells(2, 3), Cells(25, 13))
ActiveSheet.PageSetup.PrintArea = rng.Address

With ActiveSheet.PageSetup
    .CenterHorizontally = True
    .CenterVertically = True
    .Orientation = xlLandscape
    .LeftMargin = Application.InchesToPoints(0)
    .RightMargin = Application.InchesToPoints(0)
    .TopMargin = Application.InchesToPoints(0)
    .BottomMargin = Application.InchesToPoints(0)
    .HeaderMargin = Application.InchesToPoints(0)
    .FooterMargin = Application.InchesToPoints(0)
    .PaperSize = xlPaperA4
    .Zoom = False
On Error Resume Next
End With

ChDir filepath

ActiveSheet.ExportAsFixedFormat Type:=xlTypePDF, Filename:= _
    filepath & nomeArq & ".pdf" _
    , Quality:=xlQualityMaximum, IncludeDocProperties:=True, IgnorePrintAreas _
    :=False, OpenAfterPublish:=True

Worksheets("Inicio").Activate

Call OPENPDF

End Sub

Sub OPENPDF()
```

```
Dim path As String
```

```
Dim filepath As String
```

```
path = ActiveWorkbook.path
```

```
filepath = path & "\PDF\"
```






```
ActiveWorkbook.FollowHyperlink filepath & "resultados.pdf"
```




```
End Sub
```

## APÊNDICE D – QUADRO COMPARATIVO DE BOMBAS

Neste Apêndice encontra-se o quadro utilizada para comparação de diversos modelos de bombas de acordo com características importantes para o projeto, conforme mencionado na seção 4.1.4.1.

**Quadro 19 – Comparativo de bombas para mosto cervejeiro.**

Item	Imagem	Descrição	Valor (R\$)	Mat. Do Cabeçote	Temp. De trabalho (°C)	Vazão Máxima (l / h)	Desmontagem do cabeçote	Cap. De coluna	Dimensões de conexão	Diferenciais
01		Minibomba sanitária twist pump	1.175,29	Aço Inox 304	110°C	1.200	4 parafusos allen	3 metros	3/4"	Seletor de voltagem, monofásica
02		Topsflo b10h-b12-0905	256,53	Sulfeto de Polifenileno (PPS)	100°C	540	Sem desmontagem	Não informado	1/2"	tecnologia magnética acoplada.
03		Bomba chugger ss	1.490,00	Aço Inox 316	120°C	1.589,4	4 parafusos philips	5,4 metros	1/2"	Bombeamento em linha
04		Bomba chugger polysulfon pp inline - 230v	990,00	Polisulfona	120°C	1.590	4 parafusos philips	5,6 metros	In 3/4" e out 1/2"	Bombeamento em linha
05		Bomba chugger inox ss center	1.390,00	Aço Inox 316	120°C	1.590	4 parafusos Philips	5,6 metros	In 3/4" e out 1/2"	-

Item	Imagem	Descrição	Valor (R\$)	Mat. Do Cabeçote	Temp. De trabalho (°C)	Vazão Máxima (l / h)	Desmontagem do cabeçote	Cap. De coluna	Dimensões de conexão	Diferenciais
06		Bomba Centrifuga Sanitária 0,5CV Inox 304 - 4P 110/220V	1.621,30	Aço Inox 304	140°C	2.500	Uma borboleta manual e abraçadeira.	6,5 metros	1" BSP	Capa de proteção, abertura sem uso de ferramentas, 4 polos
07		Moto bomba autoaspirante inox AJM45 1/2 cv - 220V	646,01	Aço Inox 304	60°C	2.400	6 parafusos allen	6 metros	1" liso	-
08		Moto bomba sanitária BSIAA 01 MINI	2.499,00	Aço Inox 304	80°C	3.000	Chave manual	7 metros	1" liso	Corpo em inox, pés reguláveis

## APÊNDICE E – TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

Neste apêndice encontra-se a tabela utilizada para seleção dos trocadores de calor. Na Tabela 8 a vazão foi fixada em 240 litros por hora de mosto, e a temperatura necessária para entrada de água no segundo trocador de calor foi calculada em função da temperatura de entrada de água no primeiro trocador de calor. Os cálculos foram realizados através de Planilha de Cálculos Térmicos do Sistema, apresentada na seção 4.1.3.

Tabela 8 - Tabela com temperaturas de operação do sistema.

Quantidade de placas nos trocadores de calor	Temp. de entrada de água no primeiro trocador de calor (°C)	Temperatura de saída do mosto (°C)	Temperatura de entrada de água no segundo trocador de calor (°C)
20	05	10	4,51
20	10	10	3,83
20	15	10	3,21
20	20	10	2,64
20	25	10	2,13
20	30	10	1,66
20	35	10	1,23
30	05	10	8,48
30	10	10	8,32
30	15	10	8,19
30	20	10	8,07
30	25	10	7,97
30	30	10	7,88
30	35	10	7,81
40	05	10	9
40	10	10	9
40	15	10	9
40	20	10	9
40	25	10	9
40	30	10	9

<b>Quantidade de placas nos trocadores de calor</b>	<b>Temp. de entrada de água no primeiro trocador de calor (°C)</b>	<b>Temperatura de saída do mosto (°C)</b>	<b>Temperatura de entrada de água no segundo trocador de calor (°C)</b>
40	35	10	9
50	05	10	9
50	10	10	9
50	15	10	9
50	20	10	9
50	25	10	9
50	30	10	9
50	35	10	9
60	05	10	9
60	10	10	9
60	15	10	9
60	20	10	9
60	25	10	9
60	30	10	9
60	35	10	9

## APÊNDICE F – PLANILHA DE CÁLCULOS TERMODINÂMICOS

Este apêndice contém a ilustração da Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema.

MENU		BOMBA - MOSTO		TROCAS TÉRMICAS				
Tipo Trocador	Placas	Vazão	240,000	l / h	Quantidade de calor necessária (mosto)	26352,180	W	
Tipo Cerveja	Lager	Vazão mássica escumamento	0,069	kg / s	Quantidade de calor trocada no trocador 1	22566,103	W	
DADOS TROCADOR DE CALOR		DADOS DO TROCADOR 1		PROPRIEDADES DOS FLUIDOS				
Número de placas - Trocador 1	30,000	Cmin	292,802	W / K	Temperatura água entra trocador 1	18,000	°C	Água entra trocador 1
Vazão mássica água da caixa d'água ( kg / s )	0,417	Cmáx	1744,478	W / K	Viscosidade	0,00105580	N * s / m <sup>2</sup>	
Lc ( m )	0,066	NUT	3,762	-	Prandlt	7,372	-	
Área de transferência de calor / placa ( m ^ 2 )	0,012	Efetividade do trocador 1	0,96	-	Condutividade térmica	0,600	W / ( m * K )	
Lv	0,155	Taxa de transferência de calor real	22566,103	W	Calor específico	4183,40	J / kg * K	
Lp	0,125	BOMBA - REFRIGERADOR			Temperatura entrada mosto trocador 1	98,000	°C	Mosto entra trocador 1
Lh	0,045	Vazão	1980,000	l / h	Viscosidade	0,000285667	N * s / m <sup>2</sup>	
Lw ( m )	0,065	Vazão mássica escumamento	0,573	kg / s	Prandlt	1,787	-	
Ângulo Beta dos pratos	60,000	DADOS DO TROCADOR 2			Condutividade térmica	0,679	W / ( m * K )	
Diâmetro entrada água	0,016	Temperatura água que entra no trocador 2	6,835	°C	Calor específico	4215,00	J / kg * K	
Diâmetro entrada mosto	0,013	Número de placas do trocador 2	30,000	-	Temperatura saída mosto trocador 2	8,000	°C	Mosto sai trocador 2
Espessura das placas ( m )	0,0003	Quantidade de calor trocada no trocador 2	3786,66	W	Viscosidade	0,00138260	W / ( m * K )	
Condutividade térmica Aço AISI 304 ( J / kg * K )	14,9				Prandlt	9,970	-	
<b>Calcular</b>					Condutividade térmica	0,584	N * s / m <sup>2</sup>	
<b>Gerar PDF</b>					Calor específico	4196,20	J / kg * K	
					Temperatura saída mosto trocador 1	20,931	°C	Mosto sai trocador 1
					Viscosidade	0,00098488	W / ( m * K )	
					Prandlt	6,821	-	
					Condutividade térmica	0,604	N * s / m <sup>2</sup>	
					Calor específico	4181,64	J / kg * K	
					Temperatura saída água trocador 1	30,936	°C	Água sai trocador 1
					Viscosidade	0,00078731	W / ( m * K )	
					Prandlt	5,334	-	
					Condutividade térmica	0,619	N * s / m <sup>2</sup>	
					Calor específico	4178,21	J / kg * K	
					Temperatura entrada água trocador 2	6,835	°C	Água entra trocador 2
					Viscosidade	0,00142959	W / ( m * K )	
					Prandlt	10,325	-	
					Condutividade térmica	0,582	N * s / m <sup>2</sup>	
					Calor específico	4198,43	J / kg * K	
					Temperatura saída água trocador 2	8,410	°C	Água sai trocador 2
					Viscosidade	0,00136646	W / ( m * K )	
					Prandlt	9,851	-	
					Condutividade térmica	0,584	N * s / m <sup>2</sup>	
					Calor específico	4195,46	J / kg * K	

Figura 46 – Planilha de Cálculos Termodinâmicos do Sistema.

## APÊNDICE G – FMEA

Neste apêndice encontra-se o FMEA realizado para o sistema, conforme descrito e comentado na seção 5.3.

FMEA - Failure Modes and Effects Analysis									
Sistema de resfriamento de Mosto		Elaboração: Outubro / 2018		Responsáveis: Augusto Koga, Felipe Bergener, Lucas Proença		UTFPR - Engenharia Mecânica Trabalho de Conclusão de Curso			
Componente	Função	Item	Modos de falha	Efeito Potencial de falha	Ocorrência	Severidade	Deteção	Risco	Ação recomendada
Bomba alimentícia	Bombear mosto para o sistema	1.1	Entupimento da bomba	Bombeamento baixo ou nulo	2	8	5	80	Interromper o processo, detectar o motivo do entupimento e eliminá-lo, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reiniciar o resfriamento
		1.2	Superaquecimento	Queima dos componentes eletrônicos	2	10	2	40	O sistema possui disjuntores que protegem os equipamentos elétricos
		1.3	Sobrecarga de energia	Queima dos componentes eletrônicos	2	10	2	40	O sistema possui disjuntores que protegem os equipamentos elétricos
Mangueiras	Transferência de mosto	2.1	Entupimento das mangueiras	Obstrução do sistema	3	6	4	72	Interromper o processo, detectar o motivo do entupimento e eliminá-lo, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reiniciar o resfriamento
		2.2	Rompimentos	Vazamento de mosto	4	4	1	16	
Bomba de água	Bombear água para o sistema	3.1	Entupimento da bomba	Bombeamento baixo ou nulo	2	8	2	32	Interromper o processo, detectar o motivo do entupimento e eliminá-lo, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reiniciar o resfriamento
		3.2	Baixa vazão de água	Aumento do tempo de resfriamento	4	8	2	64	Interromper o processo, detectar o motivo do entupimento e eliminá-lo, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reiniciar o resfriamento
		3.3	Superaquecimento	Queima dos componentes elétricos	4	10	2	80	O sistema possui disjuntores que protegem os equipamentos elétricos
		3.4	Sobrecarga de energia	Queima dos componentes elétricos	2	10	2	40	O sistema possui disjuntores que protegem os equipamentos elétricos
Tubulação de água	Transferência de água	4.1	Entupimento dos canos	Obstrução do sistema	2	6	4	48	Interromper o processo, detectar o motivo do entupimento e eliminá-lo, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reiniciar o resfriamento
		4.2	Rompimentos	Vazamento de água	3	5	2	30	
Trocadores de calor	Resfriamento do mosto	5.1	Entupimento do trocador	Obstrução do sistema	4	8	3	96	Interromper o processo, detectar o motivo do entupimento e eliminá-lo, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reiniciar o resfriamento
		5.2	Vazamentos pelas conexões de mosto	Perda de mosto	4	4	1	16	
		5.3	Vazamentos pelas conexões de água	Possível interferência no resfriamento	4	4	1	16	
Caixa d'água	Armazenar água	6.1	Vazamentos	Pouco volume de água irá impactar no resfriamento conforme mostrado na análise de sensibilidade	3	6	1	18	



FMEA - Failure Modes and Effects Analysis									
Sistema de resfriamento de Mosto		Elaboração: Outubro / 2018		Responsáveis: Augusto Koga, Felipe Bergener, Lucas Proença		UTFPR - Engenharia Mecânica Trabalho de Conclusão de Curso			
Componente	Função	Item	Modos de falha	Efeito Potencial de falha	Ocorrência	Severidade	Deteção	Risco	Ação recomendada
Freezer	Armazenar e controlar temperatura da água para resfriamento	7.1	Vazamentos	Pouco volume de água irá impactar no resfriamento conforme mostrado na análise de sensibilidade	2	8	1	16	
		7.2	Congelamento	Entupimento do sistema e consequente falha de resfriamento	2	6	1	12	
		7.3	Baixa troca térmica	Água não estará na temperatura necessária para resfriamento	4	8	1	32	
Válvulas em geral	Controle de vazão de mosto e água	8.1	Travamento	Obstrução do sistema	4	7	3	84	Interromper o processo, detectar o motivo do entupimento e eliminá-lo, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reiniciar o resfriamento
		8.2	Vazamento	Impacto no resfriamento por vazamento de água ou perda de mosto	3	5	2	30	
Termostato	Controle de temperatura	9.1	Falha no sensor de temperatura	Variação na temperatura da água de resfriamento do segundo trocador	2	8	6	96	Interromper o processo, substituir o termostato, aguardar que a temperatura necessária seja atingida, ferver o mosto novamente por 5 minutos e reinicar o resfriamento
		9.2	Sobrecarga de energia	Variação na temperatura da água de resfriamento do segundo trocador	2	6	6	72	O sistema possui disjuntores que protegem os equipamentos elétricos

## APÊNDICE H – RELAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS

Neste apêndice é apresentado um compilado de todos os materiais utilizados para construção do protótipo, a partir da Tabela 9.

**Tabela 9 - Lista de materiais utilizados.**

Item	Descrição	Fornecedor	Custo Unitário	Quantidade	Custo total
1	Trocador de calor de 30 placas	Bil Bil Beer	R\$360,00	2	R\$720,00
2	Bomba centrífuga sanitária	Indupropil	R\$1.621,30	1	R\$1.621,30
3	Mangueira PVC flex	Leroy Merlin	R\$4,99	10	R\$49,90
4	Mangueira de silicone atóxica 3/8"	Bil Bil Beer	R\$20,30	3,65	R\$74,10
5	Engate rápido completo	Bil Bil Beer	R\$7,00	8	R\$56,00
6	Espigão Inox 3/8" x 1/2" Fêmea NPT	Bil Bil Beer	R\$12,00	7	R\$84,00
7	Caixa d'água Polietileno 1.000L Azul Fortlev	Leroy Merlin	R\$277,90	1	R\$277,90
8	Bomba de Água Submersa Ecco 300W 127V(110V)	Leroy Merlin	R\$272,90	1	R\$272,90
9	Mangueira Cristal 1/4"	Bil Bil Beer	R\$7,50	0,5	R\$3,75
10	Abraçadeira Rosca sem fim Aço Inox 3/4"	Leroy Merlin	R\$3,80	2	R\$7,60
11	Espigão plástico para mangueira	Leroy Merlin	R\$1,90	1	R\$1,90
12	Adaptador com Anel Marrom PVC 25mm ou 3/4"	Leroy Merlin	R\$9,99	5	R\$49,95
13	Joelho 90° Marrom PVC 25mm ou 3/4"	Leroy Merlin	R\$0,90	24	R\$21,60
14	Cano Marrom PVC 25mm ou 3/4"	Leroy Merlin	R\$2,50	23	R\$57,50
15	Cola para PVC	Leroy Merlin	R\$12,99	2	R\$25,98

Item	Descrição	Fornecedor	Custo Unitário	Quantidade	Custo total
16	Bomba de Água Periférica	Leroy Merlin	R\$159,90	1	R\$159,90
17	Adaptador Marrom PVC 25mm ou 3/4"	Leroy Merlin	R\$ 0,65	5	R\$3,25
18	Tê Liga-Fácil Soldável para Água Fria 25mm	Leroy Merlin	R\$9,99	8	R\$79,92
19	Termostato TIC 17	Indupropil	R\$136,98	1	R\$136,98
20	Freezer Consul 410L	OLX (seminovo)	R\$400,00	1	R\$400,00
21	Disjuntor de 16 Ampère	Leroy Merlin	R\$58,90	2	R\$117,80
22	Inversor de frequência	Lujetec	R\$558,70	1	R\$558,70

## APÊNDICE I – RECEITA DE FABRICAÇÃO DE CERVEJA

Neste apêndice encontra-se a receita de cerveja desenvolvida com o *software BeerSmith 2.0* com os ingredientes utilizados e passo a passo de fabricação.

# Giramundo India Pale Lage

Premium American Lager (1 C)

**Type:** All Grain  
**Batch Size:** 120,00 l  
**Boil Size:** 139,65 l  
**Boil Time:** 90 min  
**End of Boil Vol:** 131,25 l  
**Final Bottling Vol:** 116,00 l  
**Fermentation:** Lager, Two Stage  
**Taste Notes:**

**Date:** 28 Sep 2017  
**Brewer:** Eu  
**Asst Brewer:**  
**Equipment:** Giramundo NOVO  
**Efficiency:** 72,00 %  
**Est Mash Efficiency:** 75,6 %  
**Taste Rating:** 30,0



### Prepare for Brewing

- Clean and Prepare Brewing Equipment
- Total Water Needed: 170,68 l
- Mash Water Acid:

### Mash or Steep Grains

#### Mash Ingredients

Amt	Name	Type	#	%/IBU
15,00 kg	Pilsen (BestMälz) (3,5 EBC)	Grain	1	65,2 %
5,00 kg	Pale Malt, Maris Otter (5,9 EBC)	Grain	2	21,7 %
2,00 kg	Pale Ale (BestMälz) (5,0 EBC)	Grain	3	8,7 %
1,00 kg	Acid Malt (5,9 EBC)	Grain	4	4,3 %

#### Mash Steps

Name	Description	Step Temperature	Step Time
Protein Rest	Add 80,29 qt of water at 53,3 C	50,0 C	30 min
Saccharification	Heat to 64,4 C over 15 min	64,4 C	75 min
Mash Out	Heat to 75,6 C over 10 min	75,6 C	10 min

- Sparge Water Acid:
- Fly sparge with 94,70 l water at 75,6 C
- Add water to achieve boil volume of 139,65 l
- Estimated pre-boil gravity is 1,037 SG

#### Boil Ingredients

Amt	Name	Type	#	%/IBU
100,00 g	Mosaic (HBC 369) [12,25 %] - Boil 60,0 min	Hop	5	27,5 IBUs
200,00 g	Galaxy [14,00 %] - Boil 5,0 min	Hop	6	12,5 IBUs
200,00 g	Mandarina Bavaria [8,50 %] - Boil 5,0 min	Hop	7	7,6 IBUs

- Estimated Post Boil Vol: 131,25 l and Est Post Boil Gravity: 1,041 SG

### Cool and Transfer Wort

- Cool wort to fermentation temperature
- Transfer wort to fermenter
- Add water if needed to achieve final volume of 120,00 l

Figura 47 – Receita de fabricação de cerveja