

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

PATRICK ZAGO

**ESTUDO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA PRODUÇÃO ARTESANAL DE
CERVEJA**

CAXIAS DO SUL

2018

PATRICK ZAGO

**ESTUDO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA PRODUÇÃO ARTESANAL DE
CERVEJA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Área de concentração: Engenharia Térmica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

CAXIAS DO SUL

2018

PATRICK ZAGO

**ESTUDO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA PRODUÇÃO ARTESANAL DE
CERVEJA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Área de concentração: Engenharia Térmica

Aprovado em: 23/11/18

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Joanir Luís Kalnin
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Sergio Machado Godoy
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Neste trabalho é dimensionado um trocador de calor para resfriamento do mosto após fervura no processo de fabricação de cerveja artesanal. São abordadas as principais etapas do processo produtivo em pequena escala, apontando os insumos e equipamentos utilizados para produção de cerveja, além de apresentar o estudo dos fenômenos físicos que envolvem o resfriamento do mosto. A redução de temperatura do mosto é considerada uma etapa muito importante no processo de produção cervejeira, pois faz parte do conjunto de fatores que influenciam diretamente na velocidade do processo, além de estar diretamente ligada a qualidade final do produto. O estudo é justificado pelo aumento significativo do consumo das cervejas denominadas artesanais ou especiais e a crescente busca por aperfeiçoamento na produção de cerveja, seja ela comercial ou caseira. A escolha do tipo de construção do trocador de calor e seu dimensionamento foram os principais temas abordados no decorrer do trabalho. Após o dimensionamento e a escolha do trocador de calor do tipo placa, foram realizados os experimentos de validação que apontaram para cervejas do tipo *ale* uma diferença de temperatura média logarítmica (DTML) de 20 °C, com coeficiente global e transferência de calor de 1111 W/m²K. Para cervejas do tipo *Lager*, o experimento apontou uma DTML de 24,8 °C e coeficiente global de transferência de calor de 1049 W/m²K. O trocador de calor utilizado possui 30 placas, área de troca de 0,360 m² e atende as aplicações sugeridas neste estudo.

Palavras chaves: Cerveja artesanal, dimensionamento, trocador de calor.

ABSTRACT

This work assess a heat exchanger for cooling the wort after boiling in the brewing process. The main stages of the small-scale production process are discussed, pointing out the inputs and equipment used to produce beer, besides presenting the study of the physical phenomena that involve the cooling of the must. The reduction of the temperature of the must is considered a very important step in the brewing process, because it is part of the set of factors that directly influence the speed of the process, besides being directly linked to the final quality of the product. Small-scale production is justified by the significant increase in the consumption of so-called artisanal or specialty beers and the increasing search for improvement in beer production, whether commercial or home-made. The choice of the type of construction of the heat exchanger and its dimensioning were the main topics discussed in the course of the work. After the design and the choice of the plate type heat exchanger, the validation experiments were carried out, which showed a mean logarithmic temperature difference (LMTD) of 20 °C, with a global heat transfer coefficient of 1111 W/m²K. For *Lager* beers, the experiment showed 24.8 °C as LMTD and a global heat transfer coefficient of 1049 W/m²K. The heat exchanger used has 30 plates, exchange area of 0.36 m² and meets the applications suggested in this study.

Keywords: Homemade beer, sizing, heat exchanger.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Insumos utilizados na produção de cerveja	14
Figura 2 - Geometria do grão de malte.....	15
Figura 3 - Geometria da flor de lúpulo	16
Figura 4 - Resumo do processo de produção de cerveja artesanal	18
Figura 5 - Moagem correta do malte	19
Figura 6 - Exemplo de cozinha tribloco para produção de cerveja	20
Figura 7 - Serpentina de alumínio	22
Figura 8 - Trocador de calor de contra fluxo.....	22
Figura 9 - Trocador de calor de placas	22
Figura 10 - Fermentador em aço inox	23
Figura 11 - Trocador de duplo tubo do tipo fluxo contracorrente	27
Figura 12 - Trocador do tipo fluxo cruzado misto	28
Figura 13 - Trocador do tipo fluxo cruzado não misturado.....	28
Figura 14 - Trocador de dois tubos e um casco	29
Figura 15 - Trocador de múltiplos passes com chicanas	29
Figura 16 - Trocador de placas do tipo gaxeta	30
Figura 17 - Planta baixa da instalação.....	35
Figura 18 - Cozinha em estudo.....	36
Figura 19 – Unidade condensadora Danfoss	37
Figura 20 - Montagens dos sensores de fluxo	39
Figura 21 - Bombas utilizadas para movimento dos fluidos	40
Figura 22 – Painel de medidores	41
Figura 23 - Trocador casco e tubo	43
Figura 24 - Desempenho do trocador de placas para a cerveja <i>Lager</i>	45
Figura 25 - Desempenho do trocador de placas para a cerveja <i>Ale</i>	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da água em diferentes cidades e seus estilos (mg/L).....	14
Tabela 2 - Exemplos de diferentes leveduras	17
Tabela 3 – Temperaturas de segurança para adição da levedura.....	38
Tabela 4 - Propriedades da água nas temperaturas utilizadas	41
Tabela 5 - Dados calculados	42
Tabela 6 - Trocadores de calor de placas	44
Tabela 7 - Custo para construção de um trocador casco e tubo	44
Tabela 8 - Custo para aquisição trocador de calor de placas.....	44
Tabela 9 - Resfriamento cerveja <i>Lager</i>	45
Tabela 10 - Resfriamento cerveja <i>Ale</i>	46

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
A_a	Área de uma aleta
C_{min}	Capacidade calorífica mínima
C_p	Calor específico
C_r	Razão entre as capacidades máxima e mínima
dT	Variação de temperatura
dx	Comprimento de troca
E	Fluxo térmico na radiação
h	Coefficiente convectivo
h_{ent}	Entalpia de entrada
h_{sai}	Entalpia de saída
k	Condutividade térmica
L	Comprimento
\dot{m}	Fluxo de massa
q	Taxa de transferência de calor
q_h	Taxa de transferência de calor por convecção
q_{max}	Máxima taxa de calor
q_x	Taxa de transferência de calor por condução
r_1	Raio interno
r_2	Raio externo
R_d''	Fator de deposição de incrustações
R_p''	Resistência condutiva da parede
$R_{p,circular}$	Resistência condutiva em parede circular
$R_{p,plano}$	Resistência condutiva em parede plana
T_{ent}	Temperatura de entrada do fluido
T_{sai}	Temperatura de saída do fluido
T_s	Temperatura de superfície de um corpo
U	Coefficiente global de transferência de calor

LETRAS GREGAS

ε	Eficiência
ε_m	Emissividade do material
μ	Viscosidade dinâmica
n_a	Eficiência de uma aleta
n_0	Eficiência de um conjunto de aletas
σ	Constante de Stefan-Boltzmann

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>NUT</i>	Número de unidades de transferência
<i>DTML</i>	Diferença média logarítmica de temperatura
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>Pr</i>	Número de Prandtl
<i>Nu</i>	Número de Nusselt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO	11
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3	OBJETIVOS GERAIS	12
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	DEFINIÇÃO DE CERVEJARIA.....	13
2.2	FABRICAÇÃO ARTESANAL DE CERVEJA.....	13
2.2.1	Insumos necessários	13
2.2.1.1	Água	14
2.2.1.2	Malte.....	15
2.2.1.3	Lúpulo	16
2.2.1.4	Levedura.....	17
2.2.1.5	Produtos adjuntos	18
2.2.2	Processo de produção.....	18
2.2.2.1	Brassagem	19
2.2.2.2	Fervura.....	21
2.2.2.3	Resfriamento do mosto e adição da levedura.....	21
2.2.2.4	Fermentação/Maturação	23
2.2.2.5	Pasteurização	24
2.2.2.6	Carbonatação e envase	24
2.3	MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	25
2.3.1	Transferência de calor por condução	25
2.3.2	Transferência de calor por convecção	25
2.3.3	Transferência de calor por radiação	26
2.4	TROCADORES DE CALOR	26
2.4.1	Trocadores de calor de tubos concêntricos	26
2.4.2	Trocadores de calor com escoamento cruzado	27
2.4.3	Trocadores de calor de passes múltiplos	28
2.4.4	Trocadores de calor de placas	29

2.4.5	Avaliação dos trocadores de calor	30
2.4.5.1	Coeficiente global de transferência de calor	30
2.4.5.2	Método de análise de trocadores de calor pela diferença de temperatura média logarítmica	32
2.4.5.3	Método da efetividade – NUT na análise de trocadores de calor.....	33
2.5	TRABALHOS CORRELATADOS	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES ATUAIS	35
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO.....	38
3.3	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DO TROCADOR DE CALOR	42
4.2	RESFRIAMENTO CERVEJA <i>LAGER</i>	45
4.3	RESFRIAMENTO CERVEJA <i>ALE</i>	46
4.4	ANÁLISE FINANCEIRA.....	47
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A	51
	APÊNDICE B	53
	APÊNDICE C	55
	APÊNDICE D	57
	APÊNDICE E	59
	APÊNDICE F	60
	APÊNDICE G	62
	APÊNDICE H	64
	APÊNDICE I	65

1 INTRODUÇÃO

A cerveja, uma das bebidas alcoólicas mais consumidas no mundo, fora descoberta provavelmente na Idade da Pedra, na região do Crescente Fértil, situada no local conhecido atualmente como Oriente Médio. A hipótese é a de que o precário armazenamento de cereais como o trigo e a cevada não evitava o contato dos grãos com a água, acarretando na sua germinação. Para serem consumidos estes grãos eram cozidos em uma espécie de sopa. Neste cozimento, os grãos germinados liberavam açúcares que posteriormente fermentavam de forma natural, gerando álcool e CO₂. Mesmo que de forma acidental, estas foram às primeiras versões de cerveja experimentadas pelo ser humano (STANDAGE, 2005). O nome cerveja, do latim *cerevisia*, deriva de Ceres, a deusa da colheita e da fertilidade, e *vis*, força (MORADO, 2009).

Com o passar dos anos o consumo foi se popularizando, tornando-se parte da dieta alimentar dos povos do período medieval. A bebida servia também como pagamento aos trabalhadores, remédio e frequentemente era ofertada em rituais aos deuses. Até então, a produção de cerveja era atividade realizada de forma caseira, para suprir as necessidades do consumo doméstico. A partir do século VI, iniciaram-se produções de maior escala em mosteiros, seguidos pelos grupos produtores criados para atender o crescimento do consumo nos centros que vinham se formando na Europa (MORADO, 2009).

No Brasil, segundo Santos (2003), as primeiras cervejas eram produzidas de forma caseira por imigrantes apenas para consumo próprio. Em seguida, pequenas cervejarias surgiam e algumas permanecem abertas até hoje. Em 1888, surgem a Cia. Cervejaria Brahma e a Cia. Antártica Paulista, que se tornaram as duas maiores cervejarias do Brasil, posteriormente dando origem a AmBev – Companhia de Bebidas das Américas.

Além das grandes cervejarias, vale destacar o segmento que vem crescendo no mundo todo: o das cervejas especiais, ou artesanais. Dados divulgados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) apontam um crescimento de 37,7% no número de cervejarias registradas no Brasil em 2017 – 2016 terminou com 493, já 2017 encerrou com 679 (ABRACERVA, 2018). O crescimento aponta oportunidades em toda a cadeia envolvida na concepção do produto, não só na etapa de fabricação de cervejas especiais, mas também para os produtores de insumos, mestres cervejeiros e principalmente os fabricantes de equipamentos para produção.

As consideradas microcervejarias artesanais, que produzem normalmente em cozinhas com capacidade maiores que 350 litros/batelada, buscam constantemente o

aperfeiçoamento de seu produto, seja na elaboração das receitas, na escolha dos insumos ou na etapa de produção.

Este aperfeiçoamento desencadeia uma série de estudos para melhoria de equipamentos de produção, com a finalidade de tornar o processo cada vez mais eficiente, mantendo os padrões de higiene e qualidade exigidos para este produto. As melhorias estão relacionadas principalmente ao sistema de aquecimento do mosto (brassagem e fervura), no sistema de resfriamento após fervura e na etapa de controle da fermentação.

Novas formas de construção, bem como o uso de materiais alternativos aos metálicos, como os materiais cerâmicos e poliméricos, estão sendo utilizados na construção dos equipamentos destinados a produção de cerveja artesanal. Segundo Cervieri (2017) o movimento de estudos dá-se principalmente nas áreas de eficiência térmica, na diminuição do consumo d'água e na redução de emissões de efluentes e CO₂.

A água, além de ser a matéria prima principal para produção da cerveja é utilizada em outra etapa do processo de fabricação: no resfriamento do mosto. Esta etapa consiste em transferir o calor do mosto pós-fervura para a água, com a finalidade de resfriar a mistura. Conforme dados fornecidos pelos fabricantes de fermento, mostos de cerveja tipo *Lager* são usualmente resfriados para 18 ± 2 °C e os de tipo *Ale* são resfriados para, em média 25 ± 2 °C, antes da adição da levedura.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

Para o desenvolvimento deste trabalho, fora utilizado uma nanocervejaria caseira, equipada com cozinha de duas panelas, que possui capacidade de produção por batelada de 100 litros.

Esta cozinha produz atualmente 200 litros de cerveja por mês e sua produção não é comercializada. A produção é limitada pela unidade de fermentação. Se ampliada a capacidade de fermentação, a mesma poderia produzir até 4.000 litros/mês.

1.2 JUSTIFICATIVA

O respeito ao processo de produção de cerveja é um dos principais determinantes no que diz respeito à qualidade da cerveja produzida. O resfriamento do mosto, tema deste estudo deve ser realizado em um tempo de até 60 minutos (VENTURINI FILHO). Quanto mais longo for o resfriamento do mosto, maior será a possibilidade de geração do composto

dimitil sulfito, que é responsável por causar o defeito conhecido como DMS, sabor indesejado na cerveja. A demora no resfriamento pode ocasionar também outros defeitos, como aqueles gerados por oxidação ou contaminação (PALMER, 2006).

Podem ser utilizados diversos métodos para resfriamento do mosto, que vão desde o banho em água do recipiente onde se encontra o mosto, resfriamento utilizando-se gelo ou resfriadores de imersão em cobre (PALMER, 2006). Outros sistemas podem ser utilizados, como trocadores de calor de fluxo cruzado ou de placas. Na maioria dos processos citados anteriormente, a escolha do método é feita de forma empírica, apresentando uma baixa eficiência ou até o superdimensionamento do sistema. Outro fator normalmente desconsiderado na construção e na escolha do método é o consumo de água para realizar o processo.

Sabido da importância do resfriamento, o presente trabalho apresenta o dimensionamento de um sistema de resfriamento de mosto que atinge os requisitos de tempo e temperatura exigidos para manter a qualidade do processo, descartando o menor volume de água possível por batelada.

1.3 OBJETIVOS GERAIS

Estudar a aplicação de um sistema de trocador de calor para o resfriamento do mosto na produção artesanal de cerveja.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender o objetivo geral citado anteriormente, os seguintes objetivos específicos deverão ser explorados:

- a) entendimento do processo de produção de cerveja em nível de pequeno porte;
- b) levantamento dos fabricantes de equipamentos para a produção de cerveja;
- c) definição do porte de uma nanocervejaria para o desenvolvimento do trabalho;
- d) projeto/dimensionamento do sistema de resfriamento do mosto;
- e) Avaliação final do resfriamento com o novo trocador de calor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÃO DE CERVEJARIA

Segundo o estatuto redigido pela ABRACERVA (2018), a Associação brasileira de cerveja artesanal, as microcervejarias são empresas que possuem sede e capital maioritário no Brasil e que possuem capacidade de produção de até 50.000 hectolitros de cerveja anuais. Estes empreendimentos precisam ser reconhecidos pelo Ministério da Agricultura e Pecuária para poder produzir e comercializar seus produtos de forma legal.

Além das microcervejarias, outro segmento fabricante de cerveja artesanal vem ganhando espaço entre os produtores de cervejas especiais: as nanocervejarias. No Brasil, ainda não existe um órgão que define o volume de produção que caracteriza as nanocervejarias. A nomenclatura surge entre os fabricantes de equipamentos e caracteriza produções menores que 300 litros por batelada, seja a bebida destinada a venda ou não. Nos Estados Unidos, conforme Howlett (2013), denominam-se nanocervejarias as que produzem até de 3 barris por batelada, cerca de 350 litros. Sua aplicação possibilita produção de lotes menores, facilitando a oferta de produtos diferenciados aos clientes. Normalmente as nanocervejarias são instaladas em conjunto a bares de cerveja, hotéis e até restaurantes, com a finalidade de complementar os serviços especiais oferecidos por estes estabelecimentos.

2.2 FABRICAÇÃO ARTESANAL DE CERVEJA.

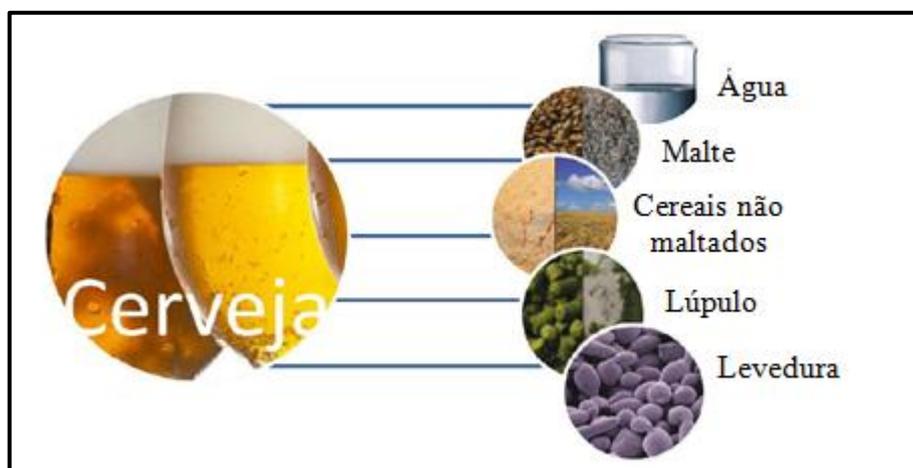
Os insumos necessários e os processos de beneficiamento dos mesmos são apresentados a seguir.

2.2.1 Insumos necessários

A maioria das cervejas artesanais são produzidas seguindo a lei da pureza alemã de 1516, a Reinheitsgebot, que no momento de sua criação indicava o uso de apenas três ingredientes: Água, malte de cevada e lúpulo. A levedura, ou fermento, fora considerada um ingrediente somente após a descoberta de Pauster em 1864. Até então a fermentação acontecia de forma natural e sem controle (LAWRENCE, 2010). Além dos insumos citados, eventualmente utilizam-se produtos adjuntos para proporcionar alguma característica diferenciada à bebida.

A Figura 1 ilustra os principais insumos utilizados no processo.

Figura 1 - Insumos utilizados na produção de cerveja



Fonte: Adaptado de Veiga (2013).

2.2.1.1 Água

Segundo Dragone, Almeida e Silva (2010), a água é, pela sua quantidade, a principal matéria prima da cerveja, pois representa aproximadamente 95% do seu peso final.

A qualidade da água e sua composição química são fatores que influenciam na qualidade final da cerveja, sabendo que a proporção entre os sais pode afetar o aroma e a cor da bebida. Os sais principais são o bicarbonato, cloreto, sulfato de sódio, cálcio e magnésio. (OETTERER, REGINATO D'ARCE e SPOTO, 2006).

Diferentes tipos de cerveja necessitam de diferentes perfis de água. Algumas cidades apresentam águas com perfis característicos que deram origem a diferentes estilos de cerveja, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição da água em diferentes cidades e seus estilos (mg/L)

Cidade	Cálcio	Magnésio	Bicarbonato	Sulfato	Sódio	Cloreto	Estilo
Pilsen	10	3	3	4	3	4	<i>Pilsner</i>
Dortmund	225	40	220	120	60	60	<i>Export Lager</i>
Vienna	163	68	234	216	8	39	<i>Vienna Lager</i>
Munich	109	21	171	79	2	36	<i>Oktoberfest</i>
London	52	32	104	32	86	34	<i>British Bitter</i>
Edimburg	100	18	160	20	20	45	<i>Scottish Ale</i>
Buton	352	24	320	44	44	16	<i>IPA</i>
Dublin	118	4	319	12	12	19	<i>Dry Stout</i>

Fonte: adaptado de Palmer (2006).

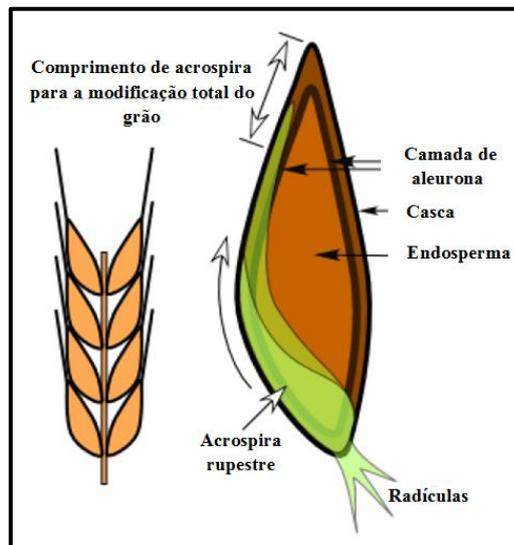
Conforme Rebello (2009) existem três utilizações da água no processo de produção de cerveja: a água cervejeira, que é utilizada como ingrediente no processo e consome de 4 a 5 litros para obtenção de 1 litro de cerveja, a água industrial, utilizada para lavagem dos equipamentos e a água de utilidades, necessária para abastecimento de caldeiras e resfriadores.

2.2.1.2 Malte

O termo técnico malte define a matéria prima resultante da germinação, sob condições controladas, de qualquer cereal (cevada, arroz, milho, trigo, aveia, sorgo, triticale e etc.) É utilizado como fonte de amido, que posteriormente é convertido em açúcar fermentável (DRAGONE, ALMEIDA e SILVA, 2006).

A Figura 2 apresenta as principais partes do grão de malte.

Figura 2 - Geometria do grão de malte



Fonte: Adaptado de Palmer (2006).

Para ser transformado em malte, o grão de cevada seco (4% de umidade) é macerado por doze horas. Esta etapa consiste em imergir os grãos em água e após o absorvimento do líquido, retirar o excedente e aquecer a mistura de 30 a 60 minutos fazendo com que ocorra a ativação dos grãos e a liberação da germinação. Após, interrompe-se o processo injetando ar seco e frio (REBELLO, 2009).

Os maltes mais utilizados na produção de cerveja são os de cevada, seguidos pelos de trigo. Os maltes base compõem normalmente a maior proporção da receita e são normalmente

do tipo *Pilsen* e *Pale*. Alguns estilos utilizam o malte de trigo como base na sua receita. Maltes especiais podem ser introduzidos a receitas para proporcionar sabores diferenciados, como o tostado, o caramelo, ou o *toffee*.

2.2.1.3 Lúpulo

As primeiras documentações que mostram a utilização do lúpulo remetem ao ano de 736 d.C na região de Hallertau, na Baviera. Nos séculos XI e XII fora extensamente utilizado para elaborar cerveja na Baviera, Eslovênia e Bohemia.

O *Humulus lupulus*, nome científico da planta produtora do lúpulo, se situa botanicamente na família Cannabinaceae de plantas com flores na qual, por sua vez pertence à ordem das Urticales. (HORNSEY,2002). Sua geometria está indicada na Figura 3.

Figura 3 - Geometria da flor de lúpulo



Fonte: Nutriagro (2018)

Na cerveja, o lúpulo favorece a formação de espuma, confere amargor e ajuda na sua conservação. Pode ser encontrado em flor, pellet ou extrato, cabendo a cada fabricante escolher qual formato se adequa melhor ao seu processo. Os tipos mais comuns são denominados em função do seu local de origem, como os lúpulos de Saaz, produzidos na República Tcheca e os lúpulos de Hallertau produzidos na Alemanha. (VOGEL, 2003).

A escolha do lúpulo e a sua variedade se dá pelo tipo de estilo produzido. Conforme Palmer (2006), os lúpulos podem ser de aroma ou de amargor, e o que os classifica é

porcentagem de alfa ácidos (resinas que são dissolvidas no momento de fervura do mosto) contidas em sua massa. Os lúpulos de amargor são ricos em alfa ácido, tendo cerca de 10 por cento de seu peso formado por esta resina. São utilizados normalmente no início da fervura, para conferir a cerveja amargor. Os lúpulos de aroma possuem cerca de 5 por cento do seu peso em alfa ácidos, e são adicionados no final do processo de fervura.

2.2.1.4 Levedura

As leveduras são as responsáveis por transformar o açúcar fermentável contido no mosto em álcool e dióxido de carbono, no processo conhecido como fermentação, que pode acontecer através da adição de leveduras ou mesmo, em estilos menos triviais, sem a adição de levedura, sendo o mosto por sua vez fermentado pela ação de microrganismos contidos no ar, que são conhecidas como leveduras selvagens.

Segundo Dircksen e Muller (2016), as leveduras cervejeiras pertencem ao gênero *Saccharomyces*. No mosto são capazes de absorver os açúcares dissolvidos, fontes de nitrogênio, vitaminas e íons através da sua membrana plasmática, realizando reações metabólicas para a evolução da fermentação. As propriedades de aroma e sabor são determinadas principalmente pelo tipo de levedura.

Diferentes cepas produzem diversos estilos de cerveja. Conforme Pinto et al. (2016), para cervejas do tipo *Ale* são utilizadas as leveduras do tipo *Saccharomyces cerevisiae*, que trabalham usualmente na faixa de temperaturas mais altas, de 18 a 28 °C.

Ainda para Pinto et al. (2016), cervejas do tipo *Lager*, utilizam leveduras do tipo *Saccharomyces clausenii* que trabalham usualmente em temperaturas de 6 a 15 °C.

A Tabela 2 mostra diferentes temperaturas de fermentação para leveduras de um determinado fabricante

Tabela 2 - Exemplos de diferentes leveduras

Levedura	Estilo	Dosagem (hl)	Temperatura fermentação (°C)	Exemplo utilização
W 34/70	<i>Lager</i>	80-120	12-15	<i>Pilsen</i>
US-05	<i>Ale</i>	50-80	18-28	<i>Pale Ale</i>
WB-06	<i>Ale</i>	50-80	18-24	<i>Weiss</i>

Fonte: Catálogos Fermentis (2018)

2.2.1.5 Produtos adjuntos

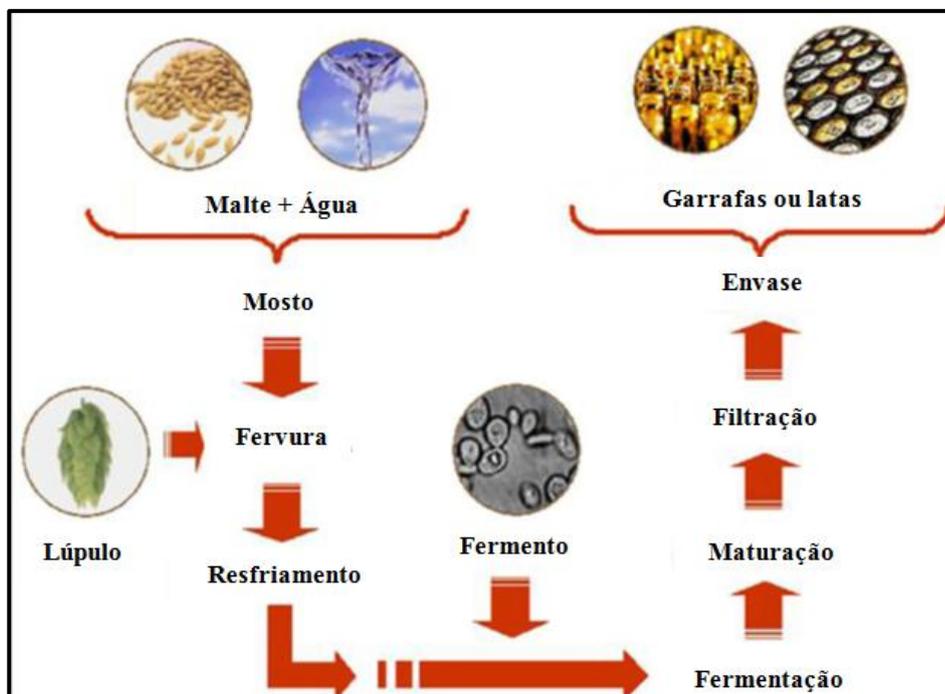
Os produtos adjuntos são cereais não maltados que possuem composições apropriadas e propriedades que beneficiam e complementam o malte de cevada. Os mais comuns são o milho, o arroz aveia e o trigo. (DRAGONE, ALMEIDA e SILVA, 2006).

Para Rosa e Afonso (2015), os adjuntos são adicionados à cerveja com o intuito de reduzir o custo de fabricação, aumentar a quantidade de produção e possibilitar a fabricação de cervejas mais claras. Estes adjuntos podem ser adicionados no momento da brassagem, (no caso dos que possuem amido para extração de açúcar), ou no momento da fervura, (no caso de produtos adjuntos que possuem carboidratos simples).

2.2.2 Processo de produção

Além de insumos de qualidade, a produção de cerveja artesanal requer um processo de fabricação controlado. Suas etapas estão resumidas na Figura 4:

Figura 4 - Resumo do processo de produção de cerveja artesanal



Fonte: Adaptado de Química da Cerveja (2012)

2.2.2.1 Brassagem

A primeira fase na fabricação de cerveja artesanal, a brassagem é a etapa responsável por produzir o mosto. Dá-se através da mistura aquecida de água e malte, com intenção de converter o amido contido no interior do grão em açúcares fermentáveis (ROSA e AFONSO, 2015).

Para melhorar a conversão, o malte e os possíveis produtos adjuntos devem ser moídos. Tal processo influencia diretamente na velocidade em que ocorrem as transformações no mosto a ser produzido, podendo afetar a qualidade do produto final. Uma moagem muito fina pode prejudicar a clarificação da cerveja, gerando substâncias que produzem particulados em excesso. Uma moagem muito grossa pode não romper a casca do malte de forma a não expor o endosperma do grão, prejudicando as transformações (DRAGONE, ALMEIDA e SILVA, 2006). A Figura 5 representa, para Palmer (2006), uma boa moagem de malte.

Figura 5 - Moagem correta do malte



Fonte: How to Brew (2006)

Conforme Palmer (2006) existem dois tipos principais de moinhos para grãos: os de disco e os de rolo, sendo o último o mais indicado para realizar o trabalho.

A água de mostura deve ser aquecida, com a finalidade de facilitar o processo, não passando da temperatura de 72 °C, para evitar a inativação das enzimas (ROSA e AFONSO, 2012).

Para Palmer (2006), o método mais simples e utilizado na produção dos mostos da maioria dos estilos de cerveja é o método de infusão a uma única temperatura, que consiste em introduzir o malte em temperatura de 5,5 °C a 8,5 °C acima da temperatura recomendada para mosturação. A temperatura de mosturação varia em função do estilo de cerveja a ser produzido, ficando normalmente na faixa entre 65,5 °C e 70 °C. O tempo indicado para conversão do amido contido no grão em açúcar fermentável, varia de 60 a 90 minutos. Concluído o tempo requerido de processo, a mistura é aquecida até 76 °C para inativar as enzimas presentes. Todo o processo de brassagem dá-se na tina de cozimento, que pode ser produzida em alumínio ou aço inox, e o aquecimento da mistura feito por fonte de calor à chama, vapor quente ou resistência elétrica. A Figura 6 apresenta a configuração de uma cozinha de brassagem, onde a tina da esquerda é responsável por armazenar a água de lavagem, a central é a tina de mostura e a que se encontra a direita é a tina de fervura.

Figura 6 - Exemplo de cozinha tribloco para produção de cerveja



Fonte: EGISA (2018)

Com a etapa de mosturação finalizada, é realizado o processo de filtração do mosto, utilizando a cama de grãos como elemento filtrante. Após a cama de grãos é lavada com água aquecida a 75 °C com a finalidade de aumentar a extração do açúcar residual contido no grão, contribuindo com o aumento da eficiência da brassagem (DRAGONE, ALMEIDA e SILVA, 2006).

2.2.2.2 Fervura

Fase posterior a mostura, a fervura visa à esterilização do mosto, extração dos componentes amargos e aromáticos dos lúpulos, inativação total das enzimas existentes no mosto e a evaporação da água excedente e de componentes indesejados ao produto final. Este processo pode durar de 60 a 90 minutos, dependendo do equipamento, lúpulo ou estilo de cerveja a ser produzido, permitindo uma evaporação máxima de até 10% do volume inicial do mosto (HORNSEY, 2002).

Utilizam-se normalmente como fonte de energia o GLP ou gás natural, eletricidade e até mesmo vapor à pressão. As tinas de fervura, nome dado ao equipamento que executa o processo em análise podem ser construídas alumínio ou aço inox, sendo o último mais utilizado devido a sua durabilidade e facilidade de limpeza e higienização (HORNSEY, 2002). A geometria da tina deve ser concebida de forma a facilitar o escoamento dos gases provenientes da fervura. Tais gases transportam substâncias geradoras de amargor em excesso conhecidos como *off flavors*, que estão contidas no mosto e desprendem no momento fervura (VOGEL, 2003). Tal geometria pode ser observada na Figura 6.

2.2.2.3 Resfriamento do mosto e adição da levedura

Ao final da fervura, o mosto encontra-se normalmente na faixa de temperaturas entre 80-90 °C, sendo necessário resfriá-lo antes de adicionar a levedura para que não ocorra a inativação das células vivas contidas na substância (VOGEL, 2003).

As temperaturas necessárias para a introdução das leveduras com segurança variam dependendo do seu tipo e do estilo de cerveja a ser produzido. Para a cerveja *Ale*, a faixa ideal de temperatura encontra-se entre 25 ± 2 °C e para a *Lager*, de 18 ± 2 °C, podendo variar de acordo com o tipo de levedura.

Palmer (2006) cita que o resfriamento é realizado utilizando trocadores de calor alimentados com água, gelada ou não, e com a possibilidade ainda de utilizar bombas para auxiliar no escoamento dos fluidos pelos trocadores. Em escala artesanal, o resfriamento é normalmente feito utilizando serpentinas iguais a mostrada na Figura 7.

Figura 7 - Serpentina de alumínio



Fonte: Chefe Cervejeiro (2018)

O equipamento é submerso no mosto que se encontra estacionado dentro da tina de fervura e quem circula pela serpentina é a água de troca. Tal sistema mostra-se eficiente, porém apenas para lotes de volumes pequenos, de aproximadamente 20 litros por batelada.

Para volumes maiores, utilizam-se trocadores de calor do tipo contrafluxo ou de placas, sendo o último bastante aplicado em processos de microcervejarias. Ambos trocadores estão apresentados na Figura 8 e 9, respectivamente.

Figura 8 - Trocador de calor de contra fluxo



Fonte: Cervejando (2018)

Figura 9 - Trocador de calor de placas



Fonte: Oficina da cerveja (2018)

2.2.2.4 Fermentação/Maturação

A fermentação é a etapa do processo responsável por transformar os açúcares contidos no mosto em álcool etílico e CO₂. É conduzida em fermentadores providos de controle de temperatura, possuindo também manômetros que monitoram a pressão interna gerada pela formação do CO₂ (DRAGONE, ALMEIDA e SILVA, 2010). Conforme Palmer (2006), a temperatura de fermentação varia de acordo com o estilo e o tempo do processo está diretamente relacionados à atenuação da levedura.

O processo de fermentação acontece em equipamentos denominados fermentadores, que podem ser construídos em aço inox, conforme mostra a Figura 10, ou eventualmente em polipropileno.

Figura 10 - Fermentador em aço inox



Fonte: Aztec (2018)

Segundo Dragone, Almeida e Silva, (2006), a maturação, também conhecida como fermentação secundária, tem como função eliminar os subprodutos indesejados gerados pela fermentação que causam aroma e amargor desagradáveis a cerveja, como o diacetil, por exemplo. Além da eliminação dos subprodutos, ajuda na clarificação da cerveja, devido à

precipitação de leveduras e proteínas contidas no mosto, assim como sólidos insolúveis. Acontece normalmente em temperaturas próximas a 0 °C.

O processo de maturação também acontece nos fermentadores, porém nesta etapa é retirada a levedura residual da fermentação para minimizar a possibilidade de contaminação.

2.2.2.5 Pasteurização

Em 1864, o químico francês Louis Pasteur criou o processo que leva o seu nome, conhecido atualmente como pasteurização. É o processo que elimina a ação e a reprodução de microrganismos que prejudicam a turbidez e causam mudanças sensoriais indesejáveis a cerveja (GOUVEIA-MATOS, 1997).

Segundo Dragone, Almeida e Silva (2006), na cerveja, a pasteurização é realizada em trocadores de calor do tipo placas onde a cerveja é aquecida rapidamente a temperatura de 72 °C e mantida de 30 a 60 segundos nesta condição, com posterior resfriamento.

O processo de pasteurização não é obrigatório na fabricação de cerveja. Muitas cervejarias e cervejeiros caseiros engarrafam ou embarrilam as suas cervejas sem a pasteurização e as denominam “cervejas vivas”, podendo mudar seu aroma e amargor ao longo do tempo. Sob pena da não pasteurização, estas cervejas conseqüentemente têm seu prazo de validade reduzido para até seis meses (HORNSEY, 2002).

2.2.2.6 Carbonatação e envase

Última etapa da produção de cerveja, a carbonatação e o envase são processos responsáveis pelo armazenamento da cerveja. Em grandes escalas, a carbonatação pode se dar através da adição de CO₂ de forma forçada. Pode ser executada também adicionando frações de açúcar para que ocorra geração de CO₂ através da ação das leveduras residuais. (DRAGONE, ALMEIDA e SILVA, 2006).

O envase, por sua vez, proporciona a possibilidade de distribuição do produto, podendo ser realizado em garrafas e barris de diferentes formatos e volumes.

2.3 MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sempre que um corpo está em uma temperatura maior que a do outro, ocorre cessão de energia do ponto de temperatura mais elevada para o ponto de temperatura mais baixo. Tal fenômeno caracteriza a transmissão, ou transferência de calor (ARAUJO, 1982).

Existem três tipos de transferência de calor, e são detalhados nos itens a seguir.

2.3.1 Transferência de calor por condução

Kreith (2011) cita que o processo de transferência de calor por condução é caracterizado pela interação entre partículas de uma substância, sendo que as partículas mais energéticas transferem parte da sua energia para partículas menos energéticas. Pode ocorrer em meios sólidos, líquidos ou gasosos e a sua taxa de transferência de calor por condução (q_x) pode ser quantificada utilizando a lei de Fourier, apresentada na Equação 1.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

onde k é a condutividade térmica do material analisado, A área de troca, dT a variação de temperatura entre os dois corpos e dx o comprimento elementar da troca.

2.3.2 Transferência de calor por convecção

A convecção, segundo Shimidt et al, (1996), é o processo que se dá entre um fluido e uma superfície. Tal fenômeno ocorre através do somatório de duas ocorrências: a transferência de energia pelo movimento global do fluido e pelo movimento aleatório entre as moléculas do fluido (condução).

Através da lei de resfriamento de Newton pode se calcular a taxa de transferência de calor por convecção (q_h), que leva em consideração o coeficiente de transferência de calor por convecção (h), a área de troca térmica (A) e a variação de temperatura entre os dois meios (ΔT). A Equação 2 apresenta a estrutura para tal determinação.

$$q_h = hA\Delta T \quad (2)$$

2.3.3 Transferência de calor por radiação

A radiação é o fenômeno de transferência de energia que ocorre através da propagação de ondas eletromagnéticas, podendo acontecer entre um gás e uma superfície sólida, ou entre duas ou mais superfícies (SCHMIDT et al., 1996). O fluxo térmico emitido pelo fenômeno de radiação (E), determinado pela lei de Stefan-Boltzmann segundo Incropera et al.(2008), é dado pela Equação 3.

$$E = \varepsilon_m \sigma T_s^4 \quad (3)$$

A propriedade de emissividade (ε_m) depende do material e de seu acabamento superficial, podendo variar entre $0 \leq \varepsilon_m \leq 1$. σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_s a temperatura absoluta do corpo irradiante.

2.4 TROCADORES DE CALOR

Desenvolvido para realizar trocas de calor entre dois fluidos que se encontram em diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida, os trocadores de calor são amplamente utilizados em aplicações de engenharia. Pode ser utilizado no aquecimento de ambientes e condicionamento de ar, na produção de potência, na recuperação de calor em processos diversos, entre outras aplicações de engenharia (INCORPERA et al, 2008).

Para Schmidt et al. (1996), é na fase de projeto dos trocadores de calor que se determinam a área de troca de calor, bem como o número, diâmetro e comprimento dos tubos, além do tipo de configuração do equipamento.

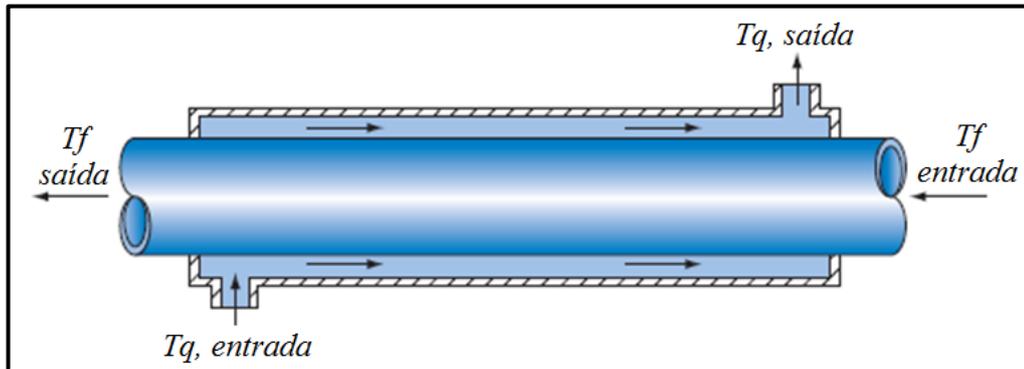
Os tipos mais comuns em aplicações de engenharia são os de tubos concêntricos, os de múltiplos passes, os de fluxo cruzado e os trocadores de placas. Suas particularidades serão abordadas nos itens a seguir.

2.4.1 Trocadores de calor de tubos concêntricos

Segundo Incropera et al. (2008), os trocadores de calor de tubos concêntricos são equipamentos de concepção simples. Consiste basicamente em acoplar dois tubos de forma concêntrica, respeitando espaço entre as duas paredes para possibilitar o escoamento do

fluido. Nesta mesma construção, podem ocorrer dois tipos de aplicação: os de corrente paralela e os de corrente cruzada. O último é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Trocador de duplo tubo do tipo fluxo contracorrente



Fonte: Kreith (2011).

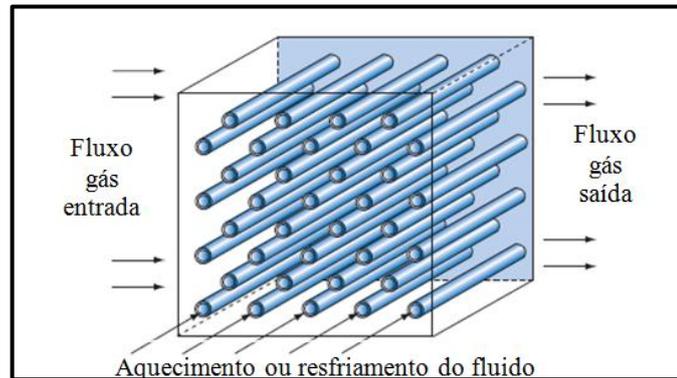
Os de corrente paralela são equipamentos onde os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade e escoam no mesmo sentido deixando o trocador pela mesma extremidade.

Já nos trocadores de calor do tipo contracorrente os fluidos quente e frio entram em extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e deixam o equipamento e extremidades opostas.

2.4.2 Trocadores de calor com escoamento cruzado

Tais equipamentos, segundo Çengel e Ghajar (2011) são projetados de tal forma a realizar um escoamento cruzado, tendo um fluido escoando no sentido perpendicular ao outro. Se o trocador não possuir aletas, o escoamento é chamado de misturado, pois possibilita o movimento do fluido na direção transversal. A Figura 12 mostra um exemplo de tal trocador.

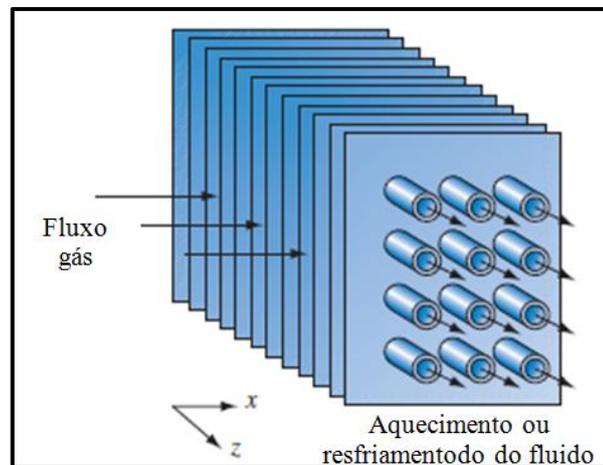
Figura 12 - Trocador do tipo fluxo cruzado misto



Fonte: Kreith (2011).

Outra aplicação para trocadores do tipo escoamento são os de fluxo não misturados. Este possui aletas que não possibilitam a movimentação transversal do fluido, conforme a Figura 13 apresenta.

Figura 13 - Trocador do tipo fluxo cruzado não misturado

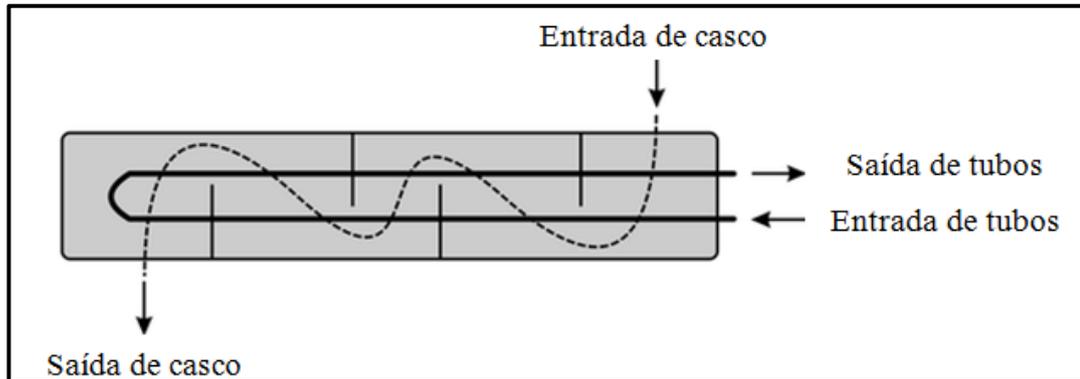


Fonte: Kreith (2011)

2.4.3 Trocadores de calor de passes múltiplos

Conforme Araújo (1982) no seu formato de construção mais simples estes equipamentos são construídos de forma a criar uma trajetória de ida e retorno dentro de um mesmo casco, sendo esse movimento de correntes opostas e paralelas, conforme mostra a Figura 14.

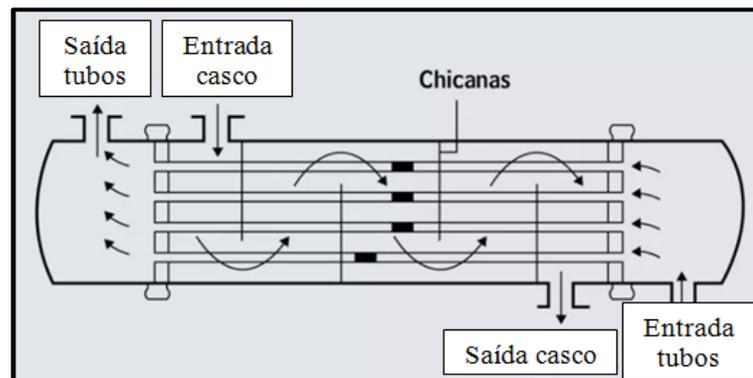
Figura 14 - Trocador de dois tubos e um casco



Fonte: Adaptado de CDC Equipamentos (2018).

Pode-se utilizar além dos múltiplos passes o artifício das chicanas, que obrigam o fluido a percorrer todos os espaços possíveis contidos entre os tubos, conforme indicado na Figura 15.

Figura 15 - Trocador de múltiplos passes com chicanas



Fonte: Adaptado de Martinelli (2017).

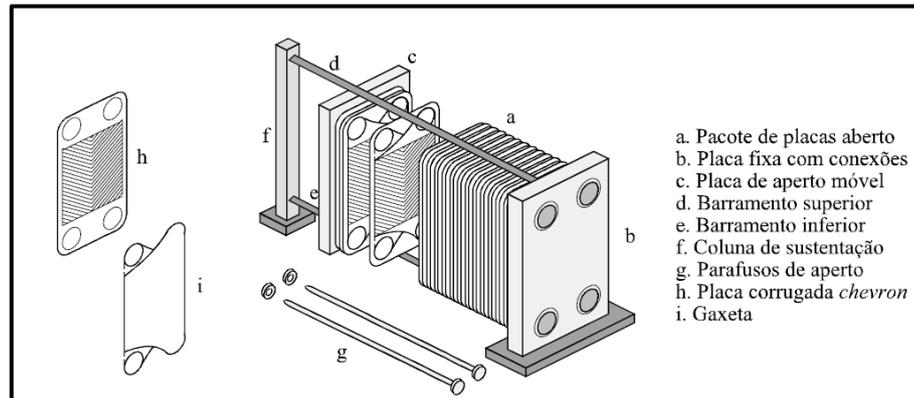
2.4.4 Trocadores de calor de placas

Estes equipamentos, segundo Gut (2003), são largamente utilizados em aplicações que exigem trocas térmicas entre líquidos. É constituído pelo aglomerado de placas paralelas que formam canais para o escoamento alternado entre os fluidos, sendo que a troca de calor ocorre através das finas chapas metálicas que separam os dois líquidos.

Ainda conforme Gut (2003), os trocadores de calor de placas podem ser divididos em quatro diferentes tipos: os de espiral, lamela, circuito impresso e gaxeta, sendo o último tipo citado o mais utilizado, pois permite ser desmontado para eventual limpeza ou manutenção. Suas principais aplicações estão voltadas ao ramo alimentício, como na pasteurização de leites

e suco, podendo ser aplicado também em outras funções, como no resfriamento de óleo de turbinas a vapor, resfriamento de água de geradores ou plantas nucleares. A Figura 16 apresenta a vista explodida do equipamento.

Figura 16 - Trocador de placas do tipo gaxeta



Fonte: Gut (2003)

2.4.5 Avaliação dos trocadores de calor

2.4.5.1 Coeficiente global de transferência de calor

A definição do coeficiente global de transferência de calor (U), conforme Incropera et al.(2008) é uma etapa essencial nas análises de trocadores de calor. É definido normalmente como sendo a função da soma total das resistências à transferência de calor existente entre dois fluidos. Pode ser representado através da Equação 4.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(n_0 h A)_f} + \frac{R_{d,f}''}{(n_0 A)_f} + R_p + \frac{R_{d,q}''}{(n_0 A)_q} + \frac{1}{(n_0 h A)_q} \quad (4)$$

onde A representa a área de troca térmica, n_0 a eficiência do conjunto de aletas, h o coeficiente convectivo, R_d'' o fator de deposição de incrustações e R_p a resistência condutiva da parede, calculada de forma a considerar a geometria do tubo onde ocorre o escoamento. Os índices f e q indicam fluidos frio e quente.

Para obtenção da resistência condutiva em parede plana ($R_{p,plano}$), é utilizada a Equação 5, levando em consideração o comprimento do tubo (L), o coeficiente de condução (k) e a área de troca térmica (A).

$$R_{p,plano} = \frac{L}{kA} \quad (5)$$

Já para obtenção da resistência condutiva em parede circular, utiliza-se a Equação 6, adicionando-se novos termos, como r_2 e r_1 sendo os raios externo e interno, respectivamente.

$$R_{p,circular} = \frac{\ln r_2/r_1}{2\pi Lk} \quad (6)$$

No caso da com tubos aletados, a eficiência do conjunto de aletas pode ser calculada por meio da Equação 7.

$$\eta_0 = 1 - \frac{A_a}{A}(1 - \eta_a) \quad (7)$$

para esta análise, A_a é a área superficial total das aletas, A a área superficial total e η_a a eficiência de uma única aleta.

Para obtenção do coeficiente convectivo h , calcula-se inicialmente o Número Reynolds, utilizando a Equação 8.

$$Re_{D tubo} = \frac{4m_q}{\pi D_i \mu} \quad (8)$$

onde D_i é o diâmetro interno do tubo e μ as viscosidade dinâmica.

Com Número de Reynolds, calcula-se o Número de Nusselt, utilizando a Equação 9, para resfriamento do fluido.

$$Nu_{D tubo} = 0,023 Re_{D tubo}^{4/5} Pr_{tubo}^{0,4} \quad (9)$$

E utilizando a Equação 10, quando o fluido for aquecido.

$$Nu_{D tubo} = 0,023 Re_{D tubo}^{4/5} Pr_{tubo}^{0,3} \quad (10)$$

sendo Pr o Número de Prandtl.

E por fim obtém-se o coeficiente convectivo utilizando a Equação 11.

$$h = \frac{Nuk_q}{D_h} \quad (11)$$

tendo k como sendo a condutividade térmica do fluido e D_h o diâmetro hidráulico.

2.4.5.2 Método de análise de trocadores de calor pela diferença de temperatura média logarítmica

Tal método, segundo Çengel e Gahjar (2011), é indicado para casos onde se conhece a temperatura de entrada e saída dos fluidos em análise. Na prática é normalmente utilizado quando se está dimensionando ou escolhendo o tipo de trocador de calor a ser instalado. Segundo Incropera et al. (2008), para calcular a taxa de transferência de calor dos fluidos (q), utiliza-se as Equações 12 e 13.

$$q = \dot{m}_q (h_{q,ent} - h_{q,sai}) \quad (12)$$

$$q = \dot{m}_f (h_{f,ent} - h_{f,sai}) \quad (13)$$

Sendo \dot{m} , o fluxo de massa dos fluidos, h_{ent} e h_{sai} a entalpia de entrada e saída dos fluidos, respectivamente e os índices f e q , representando os fluidos frio e quente, respectivamente.

Se não ocorrer mudança de fase durante o processo, e puder admitir-se que o calor específico mantém-se constante durante o processo, pode se escrever a taxa de transferência de calor dos fluidos (q) através das Equações 14 e 15.

$$q = \dot{m}_q C_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (14)$$

$$q = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,ent} - T_{f,sai}) \quad (15)$$

onde C_p é o calor específico associado ao fluido, e T_{ent} e T_{sai} são as temperaturas de entrada e saída do fluido.

Ainda segundo Incropera et al. (2008), para obter a área de troca do equipamento, utiliza-se a Equação 16, na forma de taxa e que leva em consideração a média logarítmica das diferenças de temperatura ($DTML$), obtida através da Equação 17.

$$q = U \cdot A \cdot DTML \quad (16)$$

$$DTML = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (17)$$

2.4.5.3 Método da efetividade – NUT na análise de trocadores de calor

Com aplicações voltadas para análises de efetividade dos trocadores de calor, o método NUT, para Incropera et al. (2008), consiste em obter a máxima taxa de transferência de calor possível de ser realizada por um trocador de calor (q_{max}) e compará-la com a taxa de transferência de calor real realizada pelo trocador (q). Tal efetividade (ε) é obtida através da Equação 18.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (18)$$

Para fins de obtenção da taxa máxima de transferência de calor deve considerar-se hipoteticamente que o equipamento possui comprimento infinito, de forma que $T_{f,saída}$ seja igual a $T_{q,saída}$.

O NUT, número de unidades de transferência é um parâmetro adimensional e pode ser determinado através da Equação 19.

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \quad (19)$$

onde C_{min} caracteriza a capacidade calorífica mínima do fluido.

Para trocadores de tubos concêntricos de escoamento paralelo e contracorrente, a efetividade pode ser calculada utilizando as Equações 20 e 21, respectivamente.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (20)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp - [NUT(1 + C_r)]}{1 - C_r \exp[NUT(1 - C_r)]} \quad (21)$$

Onde, C_r é a razão entre as capacidades caloríficas máximas e mínimas dos fluidos.

2.5 TRABALHOS CORRELATADOS

Em seu trabalho, Caldart (2017) direciona seus estudos para a avaliação de fatores que influenciam no sistema de refrigeração de um fermentador de cerveja artesanal. Para tal, analisa diferentes aplicações de materiais isolantes com a finalidade de diminuir a variação de temperatura entre o ambiente e a cerveja. Trata também dos fluxos de glicol e análise para melhor aproveitamento do sistema de bombeamento do fermentador.

Com similaridade a proposta do presente trabalho, Macedo (2012) estudou o dimensionamento de um trocador de duplo tubo para resfriamento do mosto pós processo de fervura. Seu sistema, porem, fora dimensionado levando em consideração bateladas de 20 litros.

Limberger (2002), utilizou-se de um termoacumulador no seu dimensionamento. Obtiveram resultados satisfatórios, porem aponta aumento de consumo de energia elétrica por batelada tendo em vista a necessidade de alimentação gerada pelo termocaumulador.

Gerardth (2017) propôs, em seu trabalho, o dimensionamento e a construção de um trocador de calor desmontável, tendo em vista que a contaminação é um fator de risco nos processos de produção da cerveja artesanal.

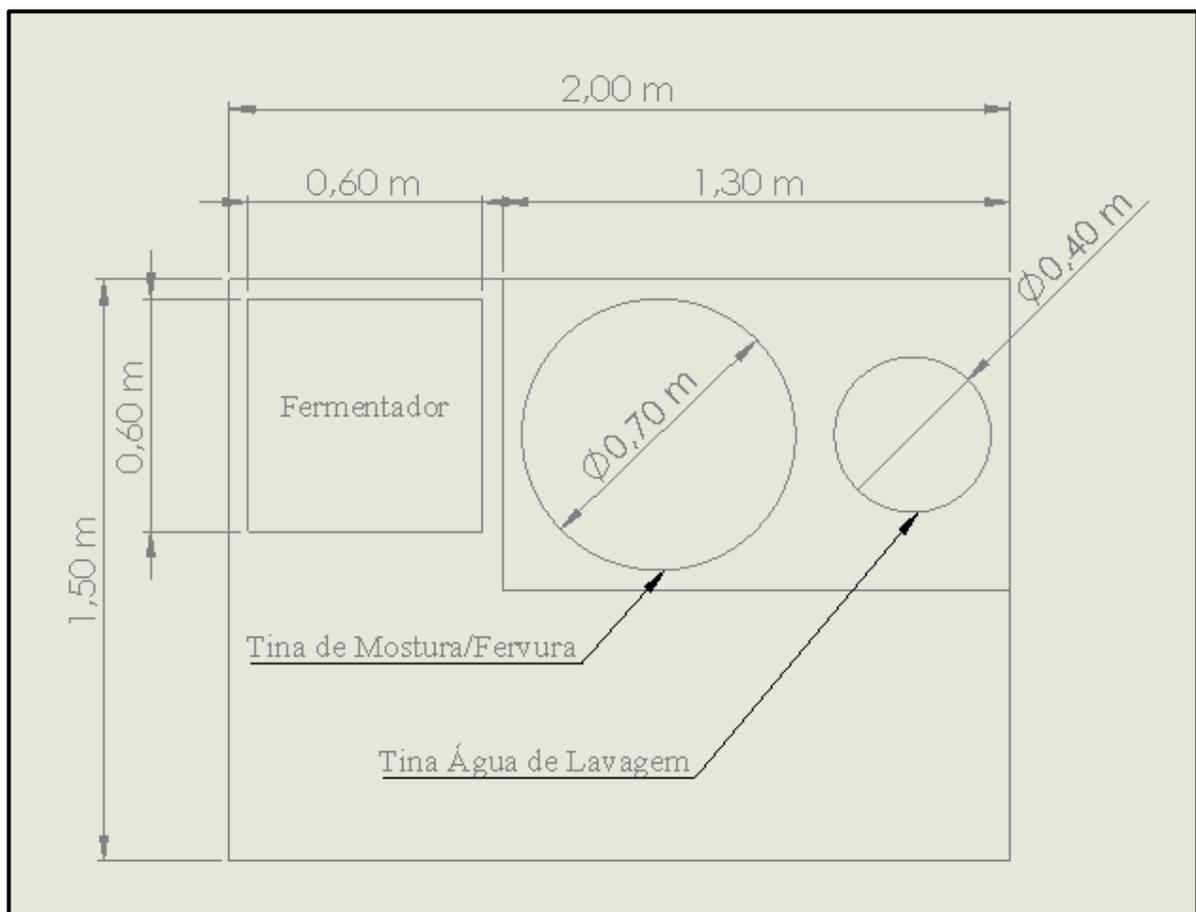
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os elementos de estudo e aplicações realizadas para o desenvolvimento do sistema de resfriamento do mosto para produção artesanal de cerveja.

3.1 DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES ATUAIS

A cervejaria caseira que fora motivação do estudo tem capacidade de produzir até 100 litros líquidos por batelada de cerveja. É composta pelas tinas de fervura/ mostura e de água quente, fermentador, sistema de resfriamento e envase. As dimensões e o arranjo da estrutura física podem ser observados na Figura 17.

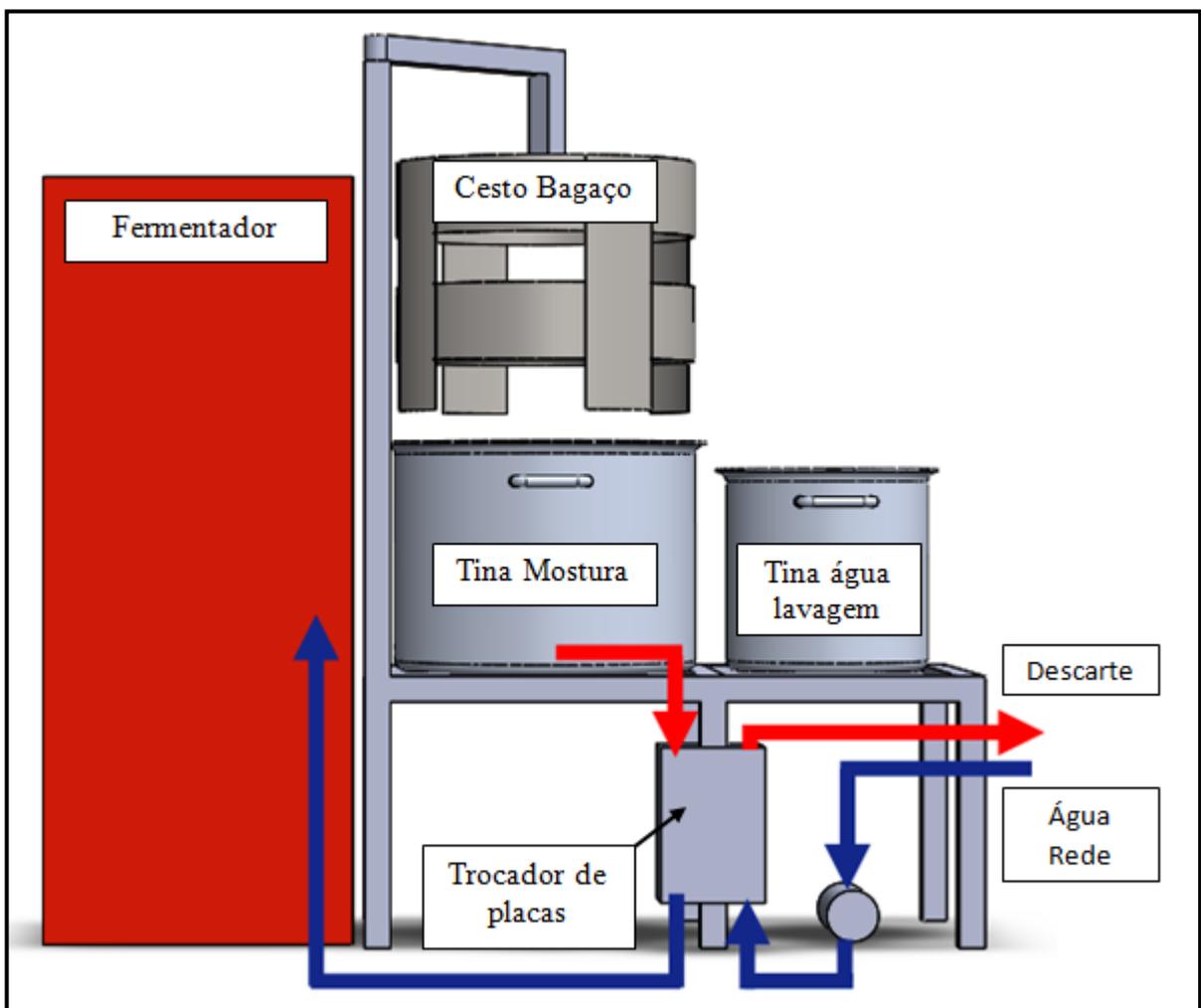
Figura 17 - Planta baixa da instalação.



Fonte: O autor (2018).

A instalação da cozinha possui duas tinas, uma de mostura/fervura e outra para água de lavagem. As tinas possuem 127 e 45 litros, respectivamente e foram produzidas em alumínio de 3 mm de espessura. Para aquecimento das mesmas, são utilizados dois fogareiros alimentados por GLP que ligados individualmente aquecem os fluidos conforme as temperaturas específicas de cada produto. Além das tinas citadas, a cozinha possui cesto para aporte do bagaço de malte. Construído em aço inox, o mesmo é içado por uma talha após a brassagem para execução da etapa de fervura.

Figura 18 - Cozinha em estudo



Fonte: O autor (2018).

A circulação dos fluidos durante o processo de produção dá-se pela utilização de duas bombas. Para circulação do fluido de resfriamento utiliza-se uma bomba periférica da marca GAMMA modelo QB60, que possui vazão máxima de 32 L/min, altura máxima de elevação de 20 mca e potência instalada de 0,37 kW ligada a mangueiras de PVC cristal de 3/4". Já para movimentação do mosto quente, é utilizada uma bomba magnética alimentícia

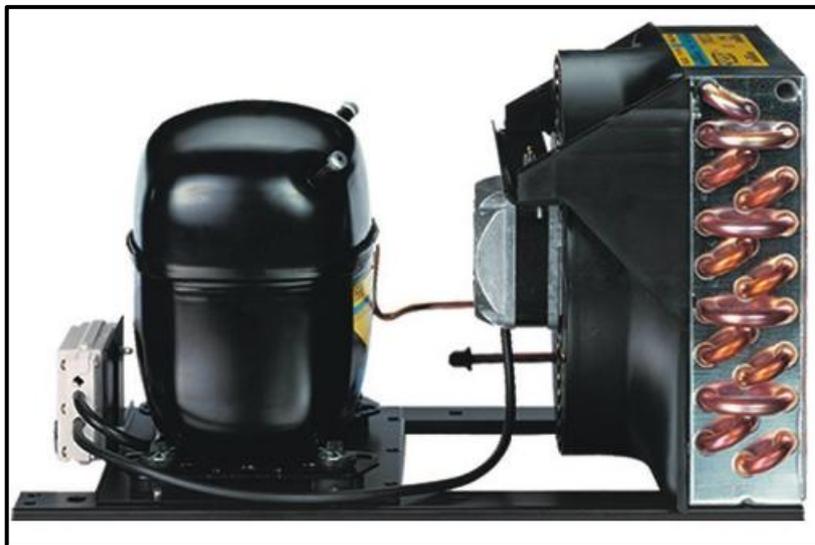
que resiste a temperaturas de até 160 °C modelo MP 15RM, que possui vazão máxima de 19 L/min, altura máxima de elevação de 3,4 mca e potência instalada de 10 W, ligada a mangueiras de silicone atóxico de ½” resistentes a altas temperaturas. A bomba magnética é também responsável pela movimentação do fluido quente nos processos de lavagem e clarificação. O controle de vazão se dá pela regulagem de registros instalados no sistema.

A bomba que circula o mosto quente, ligada durante a transferência do mosto para o fermentador, segundo o fabricante consome 25 W de energia elétrica. A bomba que circula a água fria pelo trocador de calor fica ligada o mesmo tempo que a bomba de mosto quente, consumindo 0,5 kW.

A unidade de fermentação situa-se no mesmo local da cozinha de brassagem, possui capacidade de fermentação de 100 litros e é auto refrigerada. O controle da temperatura se dá através de um controlador modelo ON/OFF da Full Gage instalado no sistema.

No caso de cervejas de baixa fermentação, será necessário utilizar o banco de água gelada que tem capacidade de resfriar 100 litros de água/hora. Este banco é constituído de um reservatório plástico e uma unidade condensadora da marca Danfoss, mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Unidade condensadora Danfoss



Fonte: Danfoss (2018)

Seu modelo é o HCG 006 que possui consumo elétrico de 0,8 kW e capacidade de refrigeração de 3790 kJ.

Além das instalações citadas, a planta possuiu unidade de moagem, estoque de insumos e garrafas localizado em outra área.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

Conforme abordado na revisão bibliográfica, o mosto pós fervura necessita ser resfriado em até 60 minutos para evitar possíveis contaminações ou aromas e sabores indesejados no produto final. Cada estilo de cerveja a ser produzido possui uma faixa específica de temperatura máxima necessária para que seja possível a inoculação da levedura sem que ocorra inativação das células que realizam a fermentação. A Tabela 3 mostra as temperaturas das leveduras indicadas pelos fabricantes e que são utilizadas nas produções desta cozinha.

Tabela 3 – Temperaturas de segurança para adição da levedura

Levedura	Receita	Fermentação	Temp. °C
M20	Weiss	Alta	25 ± 2
S33	Stout	Alta	25 ± 2
US05	APA	Alta	25 ± 2
S04	IRA	Alta	25 ± 2
S23	Pilsen	Baixa	18 ± 2

Fonte: Adaptado de Cerveja Herik Boden

Analisando a tabela, define-se que são necessárias duas diferentes temperaturas finais de processo. As leveduras do tipo alta fermentação necessitam de temperaturas finais do mosto de 25 ± 2 °C e as leveduras do tipo baixa fermentação, de temperaturas de até 18 ± 2 °C.

Referente ao tempo de resfriamento, considerando o tempo de *wirpoll* (movimento de rotação realizado no mosto para facilitar a sedimentação de partículas suspensas no mosto) de 15 minutos, tem-se efetivamente 45 minutos para efetuar o resfriamento. A vazão do sistema estudado deverá contemplar este tempo.

3.3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Baseado nos métodos e conceitos citados no referencial teórico e seguindo os requisitos técnicos de tempos e temperaturas exigidos pelo processo, foram listadas as ações necessárias para verificar se o sistema estudado atende as especificações de projeto. Tais dados foram avaliados posteriormente utilizando os métodos citados no referencial teórico.

Adotou-se para o experimento de validação do sistema a água como fluido para representar o mosto, considerando o fato de a cerveja possuir 95% de água em sua composição.

Para o estudo, foram aquecidos 45 litros de água até a temperatura de fervura, realizado o *wirpool* por 15 minutos para decantação de partículas suspensas no mosto. Depois de realizado, iniciou-se a passagem do mosto pelo trocador de calor.

Para medição de vazão do sistema, foram instalados na saída do mosto no trocador de calor um sensor de fluxo da marca SEA, modelo YF S201, que possui faixa de trabalho de 1 a 30 L/min, e suporta temperatura de até 80 °C. Na saída da água foi instalado outro sensor da mesma marca, porém, com bitola de 3/4", modelo Y F S202, suportando também temperatura de 80 °C, com faixa de medição de 1 a 60 L/min. A montagem citada está apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Montagens dos sensores de fluxo



Fonte: O autor (2018).

Estes sensores foram conectados a uma placa eletrônica Arduino UNO, que realizava a leitura gerada pelos sensores e plotava-os na interface do programa, instalado em um computador. A variação de vazão de água através do trocador de placas foi feito por meio de um registro instalado na sucção das bombas, mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Bombas utilizadas para movimento dos fluidos



Fonte: O autor (2018).

Para resfriamento do mosto a temperaturas de 18 °C, a unidade condensadora Danffos necessita ficar ligada por 3 horas. A água da rede entrando a temperatura ambiente no reservatório de água fria chega ao final do processo com a temperatura de 5 °C.

A medição de temperatura foi realizada por quatro controladores de temperatura, instalados em quatro pontos distintos do sistema, ou seja, dois controladores da marca Full Gage, que monitoram as temperaturas de saída do mosto pelo trocador e outros dois controladores da marca Omron foram usados para medir a temperatura do mosto dentro da tina de fervura e do banco de água fria. Todos os sensores de temperatura foram devidamente calibrados em gelo e água fervendo. A Figura 22 ilustra o painel de medidores de temperatura.

Figura 22 – Painel de medidores



Fonte: O autor (2018).

As propriedades termofísicas da água foram extraídas de Incropera et al. (2008). As propriedades utilizadas neste estudo são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades da água nas temperaturas utilizadas

Temp. (°C)	5 °C	18 °C	25 °C	80 °C
Densidade (kg/m ³)	1000	999	997	971
Calor específico (kJ/kgK)	4,203	4,183	4,179	4,197

Fonte: Adaptado de Incropera et al (2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar o sistema desenvolvido foram realizados três ensaios com o trocador de placas para cada tipo de produção de cerveja. Os experimentos foram realizados entre os dias 8 e 19 do mês de outubro e contemplaram as especificações de processo para produção de cervejas de alta e baixa fermentação. As análises a seguir apresentam os dados médios dos ensaios.

4.1 DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DO TROCADOR DE CALOR

Para realizar o resfriamento fora estudado dois possíveis tipos de trocadores de calor: o de tubos concêntricos e o de placas.

Considerando as especificações de projeto citadas no item anterior e a revisão bibliográfica feita no capítulo 2, tem-se os parâmetros de processo mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados calculados

Propriedade	<i>Ale</i>	<i>Lager</i>
Fluxo de calor (kW)	8,4	9,5
Temp. entrada do mosto (°C)	80	80
Temp. saída do mosto (°C)	25	18
Temp. entrada da água (°C)	18	5
Temp. saída da água (°C)	48,4	39,4
Vazão de água (L/min)	4	4
Vazão de mosto (L/min)	2,2	2,2
DTML (°C)	16,3	24,3

Fonte: O autor (2018)

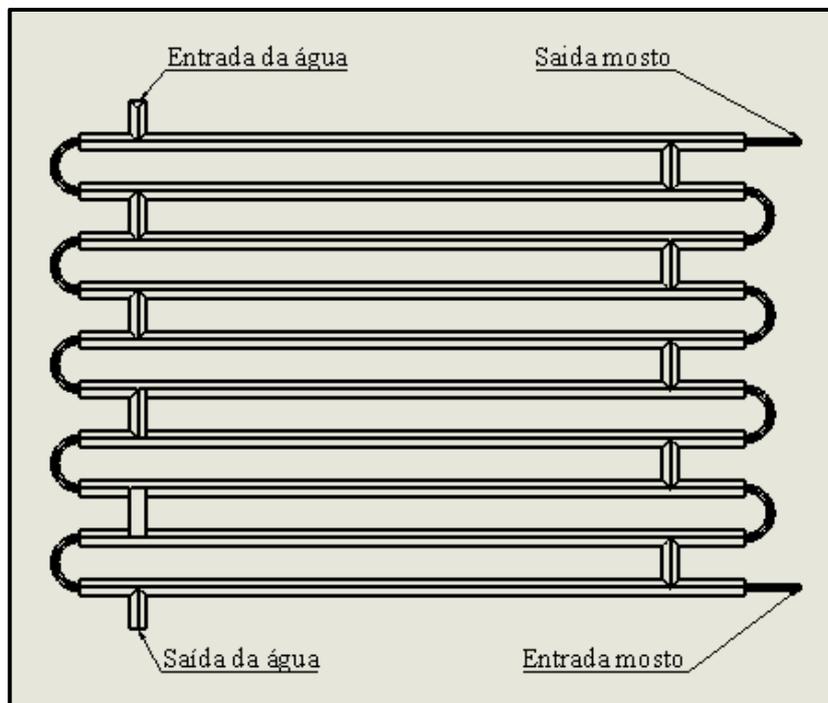
Os cálculos de vazão de mosto, bem como as temperaturas de entrada da água de resfriamento e do mosto foram considerados levando em conta a premissa de executar-se o resfriamento em no máximo 45 minutos. A vazão de água de resfriamento foi determinada considerando a capacidade de refrigeração já existente. Os cálculos para obtenção dos dados mostrados na Tabela 5 estão apresentados nos apêndices A e B.

O trocador de calor do tipo tubos concêntricos de correntes opostas foi dimensionado considerando tubos de aço inox 304 de ½” para circulação do mosto (fluido quente) e tubos de CPVC de ¾” para circulação da água (fluido de resfriamento). Tais geometrias, atreladas às especificações de temperatura e vazão indicaram uma área necessária de 0,333 m² para

resfriar cervejas do tipo *Ale* e $0,288 \text{ m}^2$ para o resfriamento das cervejas do tipo *Lager*, tendo um coeficiente global de transferência de calor de 1546 e $1352 \text{ W/m}^2\text{K}$, respectivamente. Os cálculos para obtenção da área do trocador de calor estão indicados nos apêndices C e D. Os dados obtidos nos cálculos mantiveram-se dentro dos limites citados por Kreith (2011), ou seja, de 900 a $2500 \text{ W/m}^2\text{K}$.

O projeto foi concebido dividindo o equipamento em 11 elementos de 1 metro de comprimento cada, sendo os tubos internos a serem construídos em aço inox, interligados por mangueiras de silicone e o tubo externo confeccionado em CPVC, unidos entre si por conexões do tipo "T". A figura 23 mostra tal construção.

Figura 23 – Trocador de tubos concêntricos



Fonte: O autor (2018).

Para o trocador de calor de placas o dimensionamento procedeu de forma diferente. O fornecedor de equipamentos para resfriamento de mosto cervejeiro não dispõe de informações das geometrias internas, sendo inviável o cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U). As informações dadas pelo fabricante resumiram-se em área total de troca, número de placas, vazão máxima e espessura da placa. Para este dimensionamento foi então adotado um coeficiente global de transferência de calor médio de $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ considerando os dados informados pela literatura para este tipo de equipamento. Conhecendo-se a área de troca térmica, a $DTML$ e a quantidade de calor necessária a ser retirada do mosto,

pode-se fazer uma estimativa de qual trocador atenderia melhor o processo de resfriamento do mosto. A Tabela 6 mostra o estudo comparando diferentes tamanhos de trocador, bem como o custo para aquisição.

Tabela 6 - Trocadores de calor de placas

Número placas	Área de troca (m ²)	Custo R\$
20	0,24	285,00
30	0,36	390,00
40	0,48	550,00

Fonte: O autor (2018)

Adotando o valor médio de 1500 W/m²K, tem-se uma área aproximada de troca térmica de 0,343 para a cerveja *Ale* e 0,260 m² para *Lager*, apontando ser o trocador de 30 placas como o mais adequado para esta aplicação. O estudo está apresentado no apêndice E.

Tendo em vista os dados calculados, foi escolhido então o trocador de calor de placas para fazer o resfriamento do mosto. A escolha do trocador deu-se em função de seu custo (mostrado na Tabela 7) ser menor quando comparado ao custo da confecção de um trocador de tubos concêntricos, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 7 - Custo para aquisição trocador de calor de 30 placas

Quant.	Item	Total
1 unid	Chiller 30 placas marca Wort Chiller	R\$ 390,00
2 unid.	Espigão ½”	R\$ 3,00
2 unid	Espigão ¾”	R\$ 3,00
5 unid	Total	R\$ 396,00

Fonte: O autor (2018)

Tabela 8 - Custo para construção de um trocador de tubos concêntricos

Quant.	Item	Total
11 m	Tubo CPVC 22 mm (casco)	R\$ 110,00
9 m	Tubo Inox 12,7 mm (tubo)	R\$ 415,00
3 m	Mangueira silicone 12,7 mm	R\$ 69,00
9 unid	T CPVC 22 mm	R\$ 30,00
9 unid	Luva fêmea CPVC 22 mm ½”	R\$ 86,40
9 unid	Anilhas para tubo	R\$ 140,00
48 unid	Total	R\$ 850,40

Fonte: O autor (2018).

4.2 RESFRIAMENTO CERVEJA *LAGER*

Para o resfriamento do mosto que será processado utilizando leveduras de baixa fermentação, foi utilizada como especificação de projeto a temperatura de 18 ± 2 °C, considerada máxima para introdução do fermento sem que ocorra morte das células da levedura.

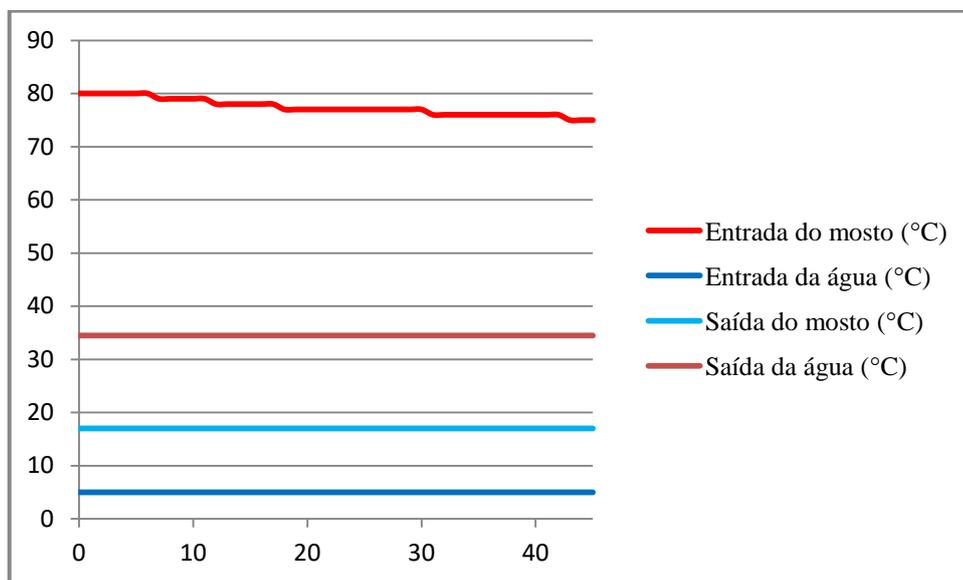
Para cervejas de baixa fermentação foi utilizada água proveniente do banco de resfriamento. Os dados coletados estão mostrados na Tabela 9 e na Figura 24.

Tabela 9 - Resfriamento cerveja *Lager*

Item	Mosto	Água
Temp. entrada (°C)	80	5
Temp. saída (°C)	17,5	34,5
Vazão (L/min)	2,2	4,5

Fonte: O autor (2018).

Figura 24 - Desempenho do trocador de placas para a cerveja *Lager*



Fonte: O autor (2018).

Considerando os dados obtidos na medição tem-se, conforme mostrado no apêndice G uma DTML de 24,8 °C e um coeficiente global de transferência de calor 1049 W/m²K, considerado dentro dos limites apontados pela literatura.

Conforme os dados apresentados no apêndice I, a efetividade calculada do trocador para esta aplicação foi de 83% e o NUT fora de 2,47.

4.3 RESFRIAMENTO CERVEJA ALE

Para o resfriamento do mosto que será fermentado utilizando leveduras de alta fermentação, foi utilizada como especificação de projeto a temperatura de 25 ± 2 °C, considerada máxima para introdução do fermento sem que ocorra morte das células da levedura.

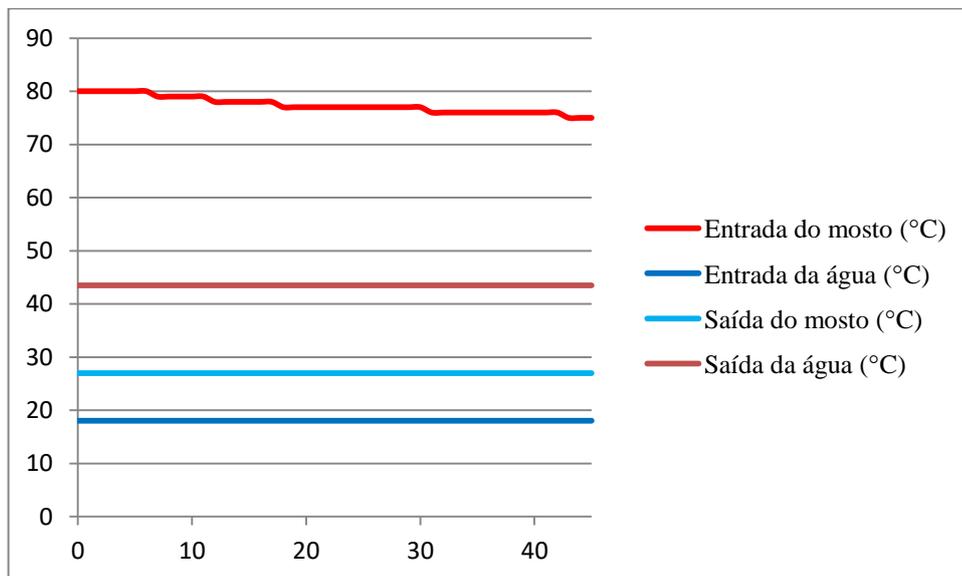
Para as cervejas de alta fermentação foi utilizada água da rede pública. Os dados coletados estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 25.

Tabela 10 - Resfriamento da cerveja *Ale*

Item	Mosto	Água
T entrada (°C)	80	18
T saída (°C)	27	43,5
Vazão (L/min)	2,2	4,5

Fonte: O autor (2018).

Figura 25 - Desempenho do trocador de placas para a cerveja *Ale*



Fonte: O autor (2018).

Considerando os dados obtidos na medição e os cálculos apresentados no apêndice F, tem-se para esta condição uma DTML de 20,00 °C, gerando um coeficiente global de transferência de calor 1111 W/m²K, também considerado dentro da faixa citada pela literatura. A efetividade do trocador de calor calculada no apêndice H para esta aplicação foi também de 84% e o NUT fora de 2,62.

Para ambas as aplicações, o trocador de calor mostrou-se suficiente para o resfriamento de 100 litros de mosto pós-fervura no tempo de 45 minutos, conforme indicado pela literatura.

4.4 ANÁLISE FINANCEIRA

A partir dos dados de vazão e temperaturas obtidos após os testes, se pode calcular quais os custos de produção relacionados ao resfriamento e o tempo para o retorno do investimento. Independente da produção do tipo de cerveja, tanto para a cerveja *Ale*, quanto para a cerveja *Lager* serão necessários para o resfriamento 202,5 litros de água, além de manter a unidade condensadora ligada por 3 horas, gerando o consumo de energia elétrica de 2,4 kWh. As bombas ficam acionadas por 45 minutos, gerando um consumo por produção de 0,52 kWh.

Considerando o custo da água por m³ de R\$ 5,21, a tarifa da energia elétrica de R\$ 0,434 o kWh e considerando produções de 100 litros, tem-se o gasto de R\$ 2,32 para produzir a cerveja tipo *Lager* e R\$ 1,05 para produzir a do tipo *Ale*.

Referente aos gastos com equipamentos, considerando a projeção de produção de 200 litros por mês, requerendo que o custo da instalação tenha seu valor retornado em 12 meses, cada litro crescerá no seu valor de produção R\$ 0,34, significando R\$ 0,20 por garrafa de 600 ml. A análise citada contempla o custo para aquisição do trocador, bombas, conexões e mangueiras que geraram somados um custo de R\$ 816,00.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou dimensionar o sistema de resfriamento do mosto pós-fervura no processo de fabricação artesanal de cerveja. O estudo foi baseado nas especificações de processo necessárias para atender a qualidade final do produto, considerando o tempo limite de resfriamento de 60 minutos, com temperaturas máximas de 20 °C para cervejas de baixa fermentação e 27 °C para cervejas de alta fermentação.

O dimensionamento apontou como sendo mais vantajoso o uso de um trocador de calor do tipo placas, por ser mais compacto e custar 46% a menos quando comparado ao trocador de calor de tubos concêntricos. Os experimentos realizados após a construção do equipamento mostraram que o sistema montado atende os requisitos de projeto, sendo determinado um coeficiente global de transferência de calor de 1111 W/m²K para o trocador de placas aplicado na fabricação de cerveja do tipo *Ale* e 1049 W/m²K para a cerveja do tipo *Lager*, ficando dentro da faixa apontada pela literatura (900-2500 W/m²K).

Para futuros projetos nesta área sugere-se a instalação de sistema para variar a rotação das bombas, com a finalidade de melhorar o deslocamento do fluido dentro do trocador.

O banco de água gelada, equipamento já existente neste projeto, poderá ser objeto e estudo em outro trabalho. O mesmo pode ser dimensionado levando em consideração menor tempo de funcionamento para atingir a temperatura necessária de trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABRACERVA. **Número de cervejarias artesanais no Brasil cresce 37,7% em 2017** disponível em <<http://abracerva.com.br/numero-de-cervejarias-artesanais-no-brasil-cresce-377-em-2017/>>. Acesso em: 27 mar. 2018
- ABRACERVA. **Estatuto Associação brasileira de microcervejarias – ABRACERVA.** disponível em <<http://abracerva.com.br/sobre/estatuto/>>. Acesso em: 16 mai. 2018
- ARAÚJO, C. **Transmissão de calor.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982.
- CALDART, E. **Avaliação do isolamento térmico e ajuste dos parâmetros da moto bomba para o sistema de refrigeração de tanques de cerveja.** 61 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Caxias do Sul, UCS, 2017.
- CERVIERI, O.J. **Panoramas setoriais 2030 - Desafios e oportunidades para o Brasil.** Rio de Janeiro: Expressão Editorial, 2017.
- ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. **Transferência de calor e massa – Uma abordagem prática.** 4 ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2011.
- DIRCKSEN, M.; MULLER, G.. **Isolamento de leveduras com capacidade fermentativa de mosto cervejeiro oriundas de fermentação espontânea de *malpighia glabra*.** In: CERVECÓN – CONGRESSO LATINO AMERICANO E BRASILEIRO DE CIÊNCIA E MERCADO CERVEJEIRO, 2016, Blumenau. **Anais...** Blumenau: Escola Superior de Cerveja e Malte, 2016.
- DRAGONE, G.; ALMEIDA E.; SILVA, J.B. **Bebidas Alcoólicas - Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Blucher, 2010.
- GERHARDT, F.S. **Desenvolvimento de um trocador de calor desmontável para o resfriamento do mosto de cerveja artesanal.** 104 f. Trabalho de conclusão de curso – Centro Universitário UNIVATES, 2017.
- GOUVEIA-MATTOS, J. A. M. **Pauster: Ciência para ajudar a vida** disponível em <<http://qnesc.s bq.org.br/online/qnesc06/historia.pdf>>. Acesso em: 10 de mai. 2018.
- GUT, J.A.W. **Configurações ótimas para trocadores de calor a placas.** 2003. 244f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.
- HORNSEY, I. S. **Elaboración de cerveza.** Zaragoza, Espanha: Acribia, 2002.
- HOWLETT, S. **Bureaus and Beer: Promoting bewery tourism in Colorado.** Las Vegas, Estados Unidos: Univesity of Nevada, 2013.
- INCROPERA F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor.** São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

- LIMBERGER, R.P. **Sistema de resfriamento do mosto de cerveja em processos artesanais**. 23 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, URGs, 2002.
- LAWRENCE, M. **Filosofia de Botequim – 48 questões filosóficas para acompanhar a sua cerveja**. São Paulo: Alaude, 2012.
- MACEDO, F.G. **Dimensionamento de um trocador de calor duplo tubo para resfriamento do mosto na fabricação de cerveja artesanal**. 23 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, URGs, 2012
- MORADO, R. **Larousse da Cerveja**. São Paulo: Larousse, 2009.
- OETTERER, M.; REGINATO D'ARCE, M.A.B.; SPOTO, M.H.F. **Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. São Paulo: Manole, 2006.
- PALMER, J.J. **How to Brew**. 3. Ed. Brewers Publication, 2006.
- PINTO, M.B.C. et al. **Alterações físico-químicas durante o processo de fermentação da cerveja**. In: CERVECÓN – CONGRESSO LATINO AMERICANO E BRASILEIRO DE CIÊNCIA E MERCADO CERVEJEIRO, 2016, Blumenau. **Anais...** Blumenau: Escola Superior de Cerveja e Malte, 2016.
- REBELLO, F.F.P. **Revista Agrogeoambiental**, Inconfidentes, 2009.
- ROSA, N.A.; AFONSO, J.C. Química da Cerveja. **Química nova escola**, São Paulo, v37, n.2, p.98-105, mai 2015.
- SANTOS, S. de P. **Os primórdios da cerveja no Brasil**. 2. ed. Cotia: Ateliê, 2004.
- SCHMIDT, F.W. et al.. **Introdução as ciências térmicas - Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1996.
- STANDAGE, T. **A History of the World in 6 Glasses**. Nova York, Estados Unidos: Walker, 2005.
- VENTURINI FILHO, W.G. **Bebidas alcólicas - Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.
- VOGEL, W. **Elaboración casera de cerveza**. Zaragoza, Espanha: Acribia, 2003.

APÊNDICE A

DADOS GERAIS PARA DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR PARA O RESFRIAMENTO DE CERVEJAS DO TIPO *ALE*

Os parâmetros de entrada para realização dos dimensionamentos do trocador de calor para o resfriamento da cerveja *ale* estão mostrados abaixo:

$$T_{\text{entrada mosto}} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{saída mosto}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{entrada água}} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Inicialmente determinam-se as vazões volumétricas, considerando os dados citados no Capítulo 3:

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{mosto}} = \frac{100 \text{ L}}{45 \text{ min}} = 2,22 \text{ L/min}$$

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{água}} = \frac{180 \text{ L}}{45 \text{ min}} = 4 \text{ L/min}$$

Considerando a densidade da água na temperatura média de trabalho, neste caso 52,5 °C para mosto e 33,05 °C para água de resfriamento tem-se as seguintes vazões mássicas:

$$\text{Vazão mássica}_{\text{mosto}} = \frac{2,22 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 987 \text{ kg/m}^3}{60 \text{ s}} = 0,037 \text{ kg/s}$$

$$\text{Vazão mássica}_{\text{água}} = \frac{4 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 994,5 \text{ kg/m}^3}{60 \text{ s}} = 0,066 \text{ kg/s}$$

Tendo as vazões definidas, determina-se a quantidade de calor a ser removida do mosto através da Equação 14:

$$q_q = m_q \times C_{p_q} \times \Delta T_q = 0,037 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4182,3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \times (80^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 8,41 \text{ kW}$$

E a temperatura de saída da água de resfriamento, através da Equação 15:

$$q_q = q_f$$

$$8,41 \text{ kW} = m_f \times Cp_f \times \Delta T_f$$

$$T_{saída \text{ água}} = 48,35^\circ$$

Por fim, determina-se a temperatura média logarítmica através da Equação 17:

$$DTML = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = 16,34^\circ C$$

APÊNDICE B

DADOS PARA DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR REFERENTES AO RESFRIAMENTO DE CERVEJAS O TIPO *LAGER*

Os parâmetros de entrada para realização dos dimensionamentos do trocador de calor para o resfriamento da cerveja *Lager* estão mostrados abaixo:

$$T_{\text{entrada mosto}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{saída mosto}} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{entrada água}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Inicialmente determinam-se as vazões volumétricas, considerando os dados citados no Capítulo 3:

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{mosto}} = \frac{100 \text{ L}}{45 \text{ min}} = 2,22 \text{ L/min}$$

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{água}} = \frac{180 \text{ L}}{45 \text{ min}} = 4 \text{ L/min}$$

Considerando a densidade da água na temperatura média de trabalho, neste caso 49 °C para mosto e 22,55 °C para água de resfriamento tem-se as seguintes vazões mássicas:

$$\text{Vazão mássica}_{\text{mosto}} = \frac{2,22 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 988,3 \text{ kg/m}^3}{60 \text{ s}} = 0,037 \text{ kg/s}$$

$$\text{Vazão mássica}_{\text{água}} = \frac{4 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 998 \text{ kg/m}^3}{60 \text{ s}} = 0,066 \text{ kg/s}$$

Tendo as vazões definidas, determina-se a quantidade de calor a ser removida do mosto utilizando a Equação 14:

$$q_q = m_q \times C p_q \times \Delta T_q = 0,037 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \times (80^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C}) = 9,49 \text{ kW}$$

E a temperatura de saída da água de resfriamento com uso da equação 15:

$$q_q = q_f$$

$$9,49 \text{ kW} = m_f \times Cp_f \times \Delta T_f$$

$$T_{saída \text{ água}} = 39,1^\circ\text{C}$$

Por fim, determina-se a temperatura média logarítmica através da Equação 17:

$$T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = 24,34^\circ\text{C}$$

APÊNDICE C

DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR DE CASCO E TUBO CONSIDERANDO AS PRODUÇÕES DE CERVEJA DO TIPO ALE

As vazões, temperaturas e propriedades dos fluidos utilizadas nesta análise foram obtidas nos cálculos apresentados no APÊNDICE A.

O cálculo do coeficiente convectivo no tubo interno (mosto) inicia-se com a definição do número de Reynolds utilizando a Equação 8:

$$Re_{D_{tubo}} = \frac{4m_q}{\pi D_i \mu} = \frac{4 \times 0,037 \text{ kg/s}}{\pi \times 0,01 \text{ m} \times 0,00052293 \text{ Ns/m}^2} = 8900$$

Percebe-se que o escoamento é turbulento, sendo assim deve-se utilizar para cálculo do Número de Nusselt a Equação 9 para o lado do mosto:

$$Nu_{D_{tubo}} = 0,023 Re_{D_{tubo}}^{4/5} Pr_{tubo}^{0,4} = 0,023 \times 8900^{4/5} \times 3,63^{0,4} = 55,62$$

Por fim calcula-se o coeficiente convectivo para o tubo (mosto) com a Equação 11:

$$h_{tubo} = \frac{Nu_{tubo} k_q}{D_h} = \frac{55,62 \times 0,6456 \text{ W/mK}}{0,01 \text{ m}} = 3590 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcula-se também o coeficiente convectivo no tubo externo (água), iniciando com a definição do número de Reynolds utilizando a Equação 8:

$$Re_{D_{tubo}} = \frac{4m_q}{\pi D_i \mu} = \frac{4 \times 0,066 \text{ kg/s}}{\pi \times (0,012 - 0,01) \text{ m} \times 0,0007542 \text{ Ns/m}^2} = 9327$$

Percebe-se que o escoamento também é turbulento, sendo assim deve-se utilizar para cálculo do Nusselt a Equação 10 para o lado da água:

$$Nu_{D_{tubo}} = 0,023 Re_{D_{tubo}}^{4/5} Pr_{tubo}^{0,4} = 0,023 \times 9327^{4/5} \times 5,08^{0,3} = 56,14$$

Por fim calcula-se o coeficiente convectivo para o casco (água) com a Equação 11:

$$h_{tubo} = \frac{Nu_{tubo} k_q}{D_h} = \frac{56,14 \times 0,6126 \text{ W/mK}}{(0,012 - 0,01) \text{ m}} = 6584 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Além dos coeficientes convectivos referente aos deslocamentos dos fluidos, deve-se calcular a resistência a condução devido à parede através da Equação 6:

$$R_p = \frac{\ln(r_{Ext}/r_{int})}{(2\pi L k_w)} = \frac{\left(\frac{0,0127}{0,0100}\right)}{2\pi \times 11 \text{ m} \times 15,9 \text{ W/mK}} = 0,00022 \text{ W/mK}$$

Tendo em mãos os coeficientes convectivos do casco e tubo e a resistência devido à parede do tubo, calcula-se o coeficiente global de transferência de calor através da Equação 4:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_f} + R_p + \frac{1}{h_q} = \frac{1}{6584,56 \text{ W/m}^2\text{K}} + 0,0022 \text{ m}^2\text{k/W} + \frac{1}{3590,79 \text{ W/m}^2\text{K}} = 1546 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Após todas as etapas concluídas, pode-se calcular área e o comprimento requerido para o trocador de calor de casco e tubo para resfriamento de cervejas do tipo *ale* através da Equação 16.

$$A = \frac{q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{8,41 \text{ kW}}{1546 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 16,34^\circ\text{C}} = 0,333 \text{ m}^2$$

$$L = \frac{A}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{0,333 \text{ m}^2}{2 \times \pi \times 0,005 \text{ m}} = 10,59 \text{ m} = 11 \text{ metros}$$

APÊNDICE D

DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR DE CASCO E TUBO CONSIDERANDO AS PRODUÇÕES DE CERVEJA DO TIPO *LAGER*

As vazões, temperaturas e propriedades dos fluidos utilizadas nesta análise foram obtidas nos cálculos apresentados no APÊNDICE B.

O cálculo do coeficiente convectivo no tubo interno (mosto) inicia-se com a definição do número de Reynolds através da Equação 8.

$$Re_{D_{tubo}} = \frac{4m_q}{\pi D_i \mu} = \frac{4 \times 0,037 \text{ kg/s}}{\pi \times 0,01 \text{ m} \times 0,0005574 \text{ Ns/m}^2} = 8361$$

Percebe-se que o escoamento é turbulento, sendo assim deve-se utilizar para cálculo do Nusselt a Equação 9 para o lado do mosto.

$$Nu_{D_{tubo}} = 0,023 Re_{D_{tubo}}^{4/5} Pr_{tubo}^{0,4} = 0,0023 \times 8361^{4/5} \times 3,63^{0,4} = 52,91$$

Por fim calcula-se o coeficiente convectivo para o tubo (mosto) utilizando a equação 11.

$$h_{tubo} = \frac{Nu_{tubo} k_q}{D_h} = \frac{52,91 \times 0,642 \text{ w/mK}}{0,01 \text{ m}} = 3396 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcula-se também o coeficiente convectivo no tubo externo (água), iniciando com a definição do número de Reynolds utilizando a Equação 8:

$$Re_{D_{casco}} = \frac{4m_q}{\pi D_i \mu} = \frac{4 \times 0,067 \text{ kg/s}}{\pi \times (0,022 - 0,0127) \text{ m} \times 0,000947 \text{ Ns/m}^2} = 9613$$

Percebe-se que o escoamento também é turbulento, sendo assim deve-se utilizar para cálculo do Nusselt a Equação 10 considerando o lado da água.

$$Nu_{D_{tubo}} = 0,023 Re_{D_{tubo}}^{4/5} Pr_{tubo}^{0,4} = 0,0023 \times 9613,88^{4/5} \times 6,53^{0,3} = 74,81$$

Por fim calcula-se o coeficiente convectivo para o casco (água) através da Equação 11.

$$h_{tubo} = \frac{Nu_{tubo} k_q}{D_h} = \frac{74,81 \times 0,6067 \text{ W/mK}}{(0,022 - 0,0127) \text{ m}} = 4880 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Além dos coeficientes convectivos referente aos deslocamentos dos fluidos, deve-se calcular a resistência a condução devido à parede, utilizando a Equação 6.

$$R_p = \frac{\ln(r_{Ext}/r_{int})}{(2\pi L k_w)} = ((0,0127/0,0100))/(2\pi \cdot 10 \text{ m} \cdot 15,9 \text{ W/mK}) = 0,00024 \text{ W/mK}$$

Tendo em mãos os coeficientes convectivos do casco e tubo e a resistência devido à parede do tubo, calcula-se o coeficiente global de transferência de calor utilizando a Equação 4.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_f} + R_p + \frac{1}{h_q} = \frac{1}{3396,82 \text{ W/m}^2\text{K}} + 0,00022 \text{ m}^2\text{k/W} + \frac{1}{4880,35 \text{ W/m}^2\text{K}} = 1352 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Após todas as etapas concluídas, pode-se calcular a área e o comprimento requerido para o trocador de calor de casco e tubo para resfriamento de cervejas do tipo *Lager* utilizando a Equação 16.

$$A = \frac{q}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{9,5 \text{ kW}}{1352 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 24,3^\circ\text{C}} = 0,29 \text{ m}^2$$

$$L = \frac{A}{2 \cdot \pi \cdot r} = (0,288 \text{ m}^2)/(2 \cdot \pi \cdot 0,005 \text{ m}) = 9,2 \text{ m}$$

APÊNDICE E

ANÁLISE TROCADOR DE CALOR DE PLACAS

Devido a ausência e dados técnicos do trocador de calor de placas, teve-se que prever o coeficiente global de transferência de calor baseado na literatura. O valor médio escolhido fora de 1500 W/m²K para ambas as aplicações.

Utilizando os dados do APÊNDICE A, pode se calcular a área necessária para resfriamento das cervejas o tipo *ale* através da Equação 16.

$$A = q/(U \cdot DTML) = \frac{8,41 \text{ kW}}{1500 \cdot 16,34^\circ \text{C}} = 0,34 \text{ m}^2$$

Utilizando os dados do APÊNDICE B, pode se calcular a área necessária para resfriamento das cervejas o tipo *Lager* utilizando a Equação 16.

$$A = \frac{q}{U \cdot DTML} = \frac{9,5 \text{ kW}}{1500 \cdot 24,3^\circ \text{C}} = 0,26 \text{ m}^2$$

APÊNDICE F

VERIFICAÇÃO DE DADOS APÓS AS MEDIÇÕES (CERVEJA TIPO ALE)

$$T_{\text{entrada mosto}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{saída mosto}} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{entrada água}} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{saída água}} = 43,5 \text{ }^{\circ}$$

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{mosto}} = 2,2 \text{ L/mim}$$

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{água}} = 4,5 \text{ L/mim}$$

$$\text{Vazão massíca}_{\text{mosto}} = \frac{2,22 \frac{\text{L}}{\text{mim}} \times 987 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ L} \times 60 \text{ s}} = 0,036 \text{ kg/s}$$

$$\text{Vazão massíca}_{\text{água}} = \frac{4,5 \frac{\text{L}}{\text{mim}} \times 994,5 \text{ kg/m}^3}{1000 \times 60 \text{ s}} = 0,075 \text{ kg/s}$$

Tendo as vazões definidas, determina-se a quantidade de calor a ser removida do mosto através das Equações 14 e 15:

$$q_q = m_q \cdot Cp_q \cdot \Delta T_q = 0,0362 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4182,3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (80^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}) = 8,0 \text{ kW}$$

$$q_f = m_f \cdot Cp_f \cdot \Delta T_f = 0,0745 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4178 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (43,5^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C}) = 7,9 \text{ kW}$$

Por fim, determina-se a temperatura média logarítmica e o coeficiente global de transferência de calor com uso da Equação 17 e 4:

$$DTML = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = 20,0^\circ C$$

$$U = \frac{q}{A \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{8 \text{ kW}}{0,36 \text{ m}^2 \cdot 20^\circ C} = 1111 \text{ W/m}^2 K$$

APÊNDICE G

VERIFICAÇÃO DE DADOS APÓS AS MEDIÇÕES (CERVEJA TIPO *LAGER*)

$$T_{\text{entrada mosto}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{saída mosto}} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{entrada água}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{saída água}} = 34,5 \text{ }^{\circ}$$

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{mosto}} = 2,2 \text{ L/mim}$$

$$\text{Vazão volumétrica}_{\text{água}} = 4,5 \text{ L/mim}$$

$$\text{Vazão massica}_{\text{mosto}} = \frac{2,22 \frac{\text{L}}{\text{mim}} \times 988 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ L} \times 60 \text{ s}} = 0,037 \text{ kg/s}$$

$$\text{Vazão massica}_{\text{água}} = \frac{4,5 \frac{\text{L}}{\text{mim}} \times 998 \text{ kg/m}^3}{1000 \times 60 \text{ s}} = 0,074 \text{ kg/s}$$

Tendo as vazões definidas, determina-se a quantidade de calor a ser removida do mosto através das Equações 14 e 15.

$$q_q = m_q \times Cp_q \times \Delta T_q = 0,0362 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4182,3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \times (80^{\circ}\text{C} - 17^{\circ}\text{C}) = 9,5 \text{ kW}$$

$$q_f = m_f \times Cp_f \times \Delta T_f = 0,0745 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \times (34,5^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}) = 9,2 \text{ kW}$$

Por fim, determina-se a temperatura média logarítmica e o coeficiente global de transferência de calor utilizando a Equação 17 e 4.

$$DTML = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = 24,8^\circ C$$

$$U = \frac{q}{A \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{9 \text{ kW}}{0,36 \text{ m}^2 \cdot 24,8^\circ C} = 1049 \text{ W/m}^2 K$$

APÊNDICE H

CÁLCULO DE EFETIVIDADE E NUT DO TROCADOR DE CALOR CONSIDERANDO AS PRODUÇÕES DE CERVEJA DO TIPO ALE

Depois de realizados os experimentos de validação do sistema, podem ser calculadas as efetividades e o NUT do trocador de placas nas duas aplicações de cervejas.

No caso das cervejas do tipo *Ale*, inicia-se com o cálculo das capacidades térmicas para a obtenção do C_{min} .

$$C_{mosto} = \dot{m}_{mosto} \cdot C_{p,mosto} = 0,037 \cdot 4182,3 = 152,7 \text{ W/K}$$

$$C_{\text{água}} = \dot{m}_{\text{água}} \cdot C_{p,\text{água}} = 0,066 \cdot 4178 = 277 \text{ W/K}$$

$$C_{min} = C_{mosto}$$

A efetividade para esta aplicação é então calculada pela Equação 18:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_{mosto}(T_{qe} - T_{qs})}{C_{min}(T_{qe} - T_{fe})} = \frac{(80^{\circ}\text{C} - 27,5^{\circ}\text{C})}{(80^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C})} = 0,84 = 84\%$$

E o NUT, com a equação 19:

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} = \frac{1111 \cdot 0,36}{152,7} = 2,6$$

APÊNDICE I

CÁLCULO DE EFETIVIDADE E NUT DO TROCADOR DE CALOR CONSIDERANDO AS PRODUÇÕES DE CERVEJA DO TIPO *LAGER*

Para cervejas do tipo *Lager*, calcula-se as capacidades térmicas para a obtenção do C_{min} .

$$C_{mosto} = \dot{m}_{mosto} \cdot C_{p,mosto} = 0,0365 \cdot 4182,3 = 152,7 \text{ W/K}$$

$$C_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{\acute{a}gua} \cdot C_{p,\acute{a}gua} = 4178 \cdot 0,0745 = 277 \text{ W/K}$$

$$C_{min} = C_q$$

A efetividade para esta aplicação é então calculada pela Equação 18:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_q(T_{qe} - T_{qs})}{C_{min}(T_{qe} - T_{fe})} = \frac{(80^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C})}{(80^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C})} = 0,83 = 83\%$$

E o NUT, com a Equação 19:

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} = \frac{1049,0,36}{152,65} = 2,47$$