

DIMENSIONAMENTO DE COZINHA CERVEJEIRA INDUSTRIAL COM A UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA TIPO HERMS

Flávia Scarsi Mota¹

George Luís Dos Santos Amaral²

Resumo: Com a crescente expansão do mercado cervejeiro nos últimos anos, os cervejeiros caseiros e as micro cervejarias estão em busca de novas tecnologias para o aprimoramento dos seus processos de produção. Porém, o campo tecnológico do ramo das bebidas não está expandindo em conjunto com o mercado. Para isso, o presente trabalho busca apresentar um dimensionamento de cozinha cervejeira com a utilização do sistema HERMS. O dimensionamento busca utilizar dados reais de uma micro cervejaria para desenvolver um projeto detalhado de engenharia que inclui a elaboração de uma receita padrão como base de dados, desenvolvimento do diagrama de blocos, cálculos de dimensionamento, gráfico de Gantt, *layout*, *datasheet* e metodologia de controle. Todos os dados obtidos apresentaram coerência e garantia para que o sistema funcione adequadamente a partir do dimensionamento e assim, possa contribuir com a área tecnológica cervejeira.

Palavras-Chave: Cerveja artesanal. Dimensionamento. Sistema HERMS. Projetos. Metodologia de controle.

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), nos últimos anos a tendência da atividade cervejeira no Brasil cresceu significativamente. Em 2019, 320 cervejarias foram registradas sendo o ano com maior número de registros comparando os últimos 20 anos e totalizando 1209 cervejarias no país. A relação entre o crescimento exponencial de produção de cerveja artesanal e a busca por cervejas especiais mostra uma mudança no perfil de consumo dos brasileiros que está cada vez mais exigente.

A produção cervejeira está ganhando espaço no mercado e com isso há a necessidade de inovação científica e tecnológica de equipamentos e processos para suprir as diferentes e fundamentais etapas de produção cervejeira. Porém, mesmo com o atual cenário do crescimento de cervejarias artesanais de pequeno porte no

¹ Graduanda em Engenharia Química. E-mail: flaviascarsimota@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: george.amaral@satc.edu.br

Brasil, ainda existe carência tecnológica de qualidade no país para suprir as necessidades de fabricação e para isso é preciso um avanço no desenvolvimento da tecnologia de produção cervejeira visando equipamentos eficientes para contribuir ainda mais com a expansão nesse ramo do mercado.

Formas eficientes de otimizar processos e avançar tecnologicamente são utilizando sistemas de instalação como o sistema HERMS (*Heat Exchanged Recirculating Mash System* - Sistema de troca de calor por recirculação do mosto) que através de uma fonte quente (normalmente água), troca calor com o mosto que recircular continuamente por serpentinas com o auxílio de bombas.

Neste trabalho será realizado um estudo utilizando dados de produção para o dimensionamento de uma cozinha cervejeira em escala industrial utilizando o sistema HERMS. Será projetado também, o diagrama de blocos do sistema bem como o fluxograma de processo com as principais operações unitárias, o gráfico de Gantt para estimar os ciclos de bateladas, *layout* da cozinha, *datasheet* e metodologia de controle. Posteriormente, os dados obtidos serão avaliados para verificar a eficiência dos equipamentos desenvolvidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentadas as considerações relevantes para este trabalho que estão disponíveis em literaturas e em artigos científicos. Assim sendo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre processos cervejeiros, equipamentos para a produção de cerveja e sobre o sistema HERMS.

2.1 CERVEJA ARTESANAL

Fabricar a própria cerveja tornou-se motivo de curiosidade seguida de prazer por muitas gerações. A cerveja artesanal abriu caminho para o compartilhamento de experiências e trocas de conhecimento sobre um assunto que, cada vez mais, foi se tornando sério e estruturado (MORADO, 2009).

A produção em pequena escala favorece muitos aspectos nas cervejas artesanais garantindo um maior controle sobre o produto, cuidado na seleção das

matérias-primas, reconhecimento regional e produtos diferenciados para os consumidores (TOZETTO, 2017).

2.2 MATÉRIAS-PRIMAS

Os quatro ingredientes fundamentais para a produção de cerveja são a água, o malte, o lúpulo e as leveduras. Cada um possui características específicas como: o nível de torrefação para o malte, o nível de amargor, sabor e aroma para o lúpulo e a alta ou baixa fermentação para as leveduras.

- **Água:** a água é uma das matérias-primas utilizada em maior quantidade para a produção da cerveja. Porém, esta, precisa estar isenta de impurezas, sabor, cheiro, cloro e livre de contaminações, para não interferir na qualidade da bebida (RABELLO, 2009);

- **Malte:** é o grão de cereal com germinação interrompida. A cevada é o cereal mais utilizado para a produção de malte pois é rica em enzimas que podem produzir grandes quantidades de açúcares fermentáveis (HUGHES, 2014);

- **Lúpulo:** o lúpulo é uma flor cônica de plantas trepadeiras. Apenas as plantas fêmeas são capazes de produzir os cones que possuem óleos e resinas capazes de atribuir amargor, sabor e aroma para a cerveja e também contribuem para combater possíveis bactérias contaminantes (PALMER, 2006);

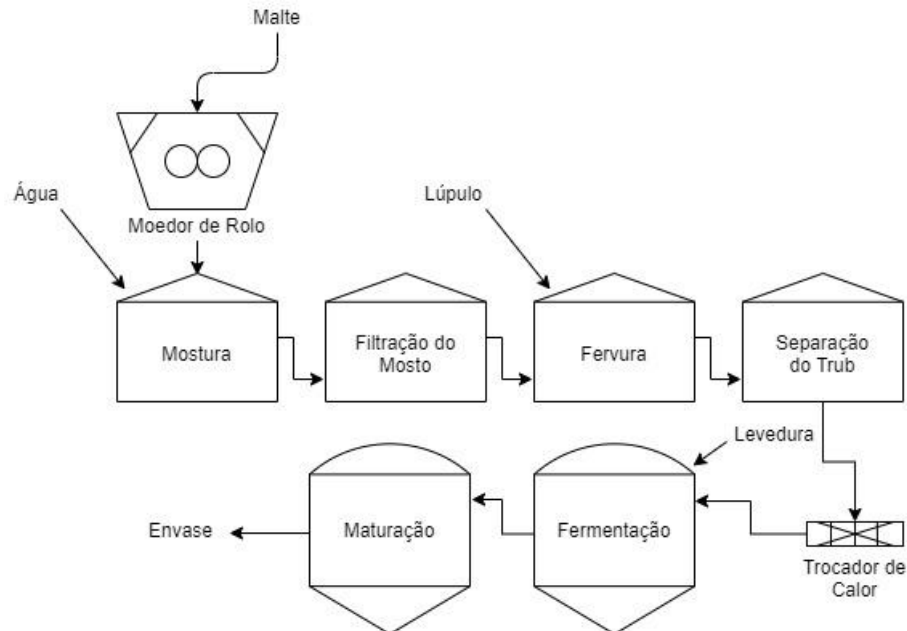
- **Leveduras:** a fermentação alcoólica ocorre através de microrganismos, usualmente leveduras da espécie *Saccharomyces Cerevisae* que transformam os açúcares fermentáveis (maltose, glicose, frutose, entre outros) contidos no mosto em álcool (C_2H_6O) e gás carbônico (CO_2) (MORADO, 2009).

2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERVEJA

Existem diversos tipos de cerveja e classificações que as diferenciam uma das outras. Essa classificação pode estar relacionada com o tipo de processo produtivo utilizado. Porém, pode-se dizer que todas as cervejas passam pelas mesmas etapas de produção e o que distingue os estilos das bebidas é a utilização de diferentes matérias-primas, o tempo de mostura, fervura, fermentação, etc.

(BALDO, 2014). Na Fig. 1, é ilustrado o fluxograma do processo geral de produção de cerveja.

Figura 1: Fluxograma do processo produtivo de uma cervejaria.



Fonte: Do autor (2020)

2.3.1 Malteação

A produção do malte é feita nas maltarias. Os grãos são molhados em água para absorver umidade interna e ativar o processo de desenvolvimento embrionário (crescimento da radícula). Após as radículas crescerem, o grão é seco para interromper o processo de germinação e então as radículas são retiradas. Por fim, o grão passa pelo processo de torrefação que determina sua característica final (HUGHES, 2014).

2.3.2 Brassagem

Esta etapa tem por objetivo transformar o amido e as proteínas presentes no malte, em uma solução de açúcares. O processo de brassagem possui várias etapas importantes que incluem:

1. **Moagem:** consiste na quebra dos grãos para expor o amido contido no seu interior. Esse processo deve ser realizado com cuidado pois na etapa

de filtragem as cascas dos grãos irão ser usadas como material filtrante (KUNZE, 2004);

2. Mostura: na água são adicionados os grãos maltados para hidratá-los e ativar as enzimas para que possa ocorrer a conversão dos amidos contidos nos grãos em açúcares fermentáveis variando a temperatura do líquido (mosto) (OLIVEIRA; ARAÚJO; SERRANO, 2015, p. 30);

3. Filtragem: o objetivo da filtragem é separar o mosto do bagaço do malte. Com esse processo, obtêm-se um mosto claro, minimiza-se a absorção de oxigênio e também se obtêm uma alta recuperação de extrato dos grãos (BOAN; COLLINI; PEREZ, 2012);

4. Fervura: o mosto é fervido de 50 a 60 minutos. Durante esse processo acrescenta-se o lúpulo que libera suas características de sabor, amargor e aroma. A fervura além de esterilizar o mosto, desativa as enzimas, evapora as substâncias que causam aromas indesejáveis (*off-flavours*) e concentra o mosto através da evaporação da água (KUNZE, 2004);

5. Separação do *trub*: o *trub* consiste de uma massa de partículas insolúveis que resultam da coagulação de proteínas. Separar o *trub* é muito importante pois pode interferir na ação das leveduras durante o processo de fermentação e na estabilidade físico-química e sensorial da cerveja (JORGE, 2004);

6. Resfriamento: é necessário para não prejudicar a etapa seguinte de fermentação. O resfriamento precisa ser realizado o mais rápido possível para evitar o risco de contaminações e formações de aroma indesejáveis. Normalmente utiliza-se trocadores de calor do tipo placa para realizar esse processo (MORADO, 2009).

2.3.3 Fermentação

A fermentação é o processo de transformação pela levedura, dos açúcares contidos no mosto em dióxido de carbono (CO_2) e etanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$). Esse processo pode formar subprodutos do metabolismo da levedura que não favorecem a bebida e para que isso não aconteça é importante administrar o processo de fermentação controlando a temperatura, o tempo de fermentação, a levedura utilizada e consequentemente sua quantidade empregada (MORADO, 2009).

2.3.4 Maturação

A maturação inicia-se com a retirada das leveduras. O processo é responsável pelo “afinamento” da bebida. Após o fim da maturação, o líquido é filtrado com o objetivo de dar um aspecto “brilhante” e garantir a ausência de todas as leveduras no líquido (BALDO, 2014).

2.3.5 Envase

O processo de envase é a última etapa do processo de fabricação da cerveja. Esta etapa inclui a sanitização via térmica ou via úmida das embalagens (garrafas de vidro, latas de alumínio e barris) através de produtos específicos para evitar qualquer tipo de contaminação. Após realiza-se o enchimento, fechamento, pasteurização, rotulagem, empacotamento e comercialização do produto (OLIVEIRA; ARAÚJO; SERRANO, 2015, p. 50).

2.4 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos devem ser dimensionados conforme a necessidade de produção e obedecendo os critérios de balanço de massa e energia, volume, troca térmica, tipo de material para fabricação, entre outros.

2.4.1 Painéis Industriais

As painéis industriais possuem alta capacidade de produção e são seguras na manipulação, acarretando em um produto de melhor qualidade (SINNOT, 2012).

A estrutura das painéis normalmente é fabricada com material do tipo aço inoxidável que possui maior resistência à corrosão, possibilita uma maior facilidade na limpeza e apresenta uma boa usinabilidade e soldabilidade (SILVA; AVANZI, 2012).

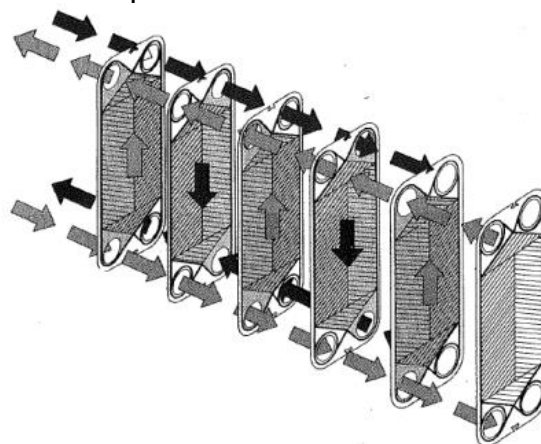
As painéis são utilizadas em diversas etapas do processo de produção de cerveja como o aquecimento da água, brassagem, clarificação e fervura. Para cada etapa, existe uma característica específica, como por exemplo:

- **Panelas de homogeneização com hélice:** facilita o contato da água aquecida com o malte e ajuda na extração adequada dos açúcares (HUGHES, 2014);
- **Panelas para recirculação com pulverização:** utilizada tanto para clarificação, melhorando a filtração do mosto, quanto na fervura, para homogeneizar a temperatura do líquido (o mosto é retirado pela lateral da panela e devolvido pela parte superior);
- **E por fim a separação do trub:** ocorre na panela de fervura, onde faz-se a separação do material particulado com o auxílio de bombas (MORADO, 2009).

2.4.2 Trocador de Calor de Placas

O trocador de calor de placas é amplamente utilizado em indústrias alimentícias para resfriamento de forma higiênica e eficiente. Em cervejarias, realiza-se a troca térmica do mosto após a fervura. Para um equipamento compacto, encontram-se opções de área de troca de 0,02 a 4,75 m², vazão de 0,5 a 5000 m³/h, temperatura operando entre -35 °C e 200 °C e pressão de até 25 bar (BASTOS, 2019). A seguir, a Fig. 2 apresenta os fluxos das correntes no trocador de calor de placas.

Figura 2: Fluxo em um trocador de calor de placas.



Fonte: Kakaç; Liu; Pramuanjaroenkij (2012)

Em cervejarias o fluido que realiza a troca térmica é normalmente água gelada e, esta, deve estar na temperatura adequada para que haja o resfriamento correto do mosto. Para isso utiliza-se o *chiller* (trocador de calor) como central de água gelada (BASTOS, 2019).

2.4.3 Limpeza e Sanitização

A limpeza e sanitização dos equipamentos deve ser eficiente a fim de evitar a proliferação de micro-organismos e contaminação nos lotes de produção. A automação de sistemas de limpeza previne riscos à segurança alimentar pois diminui a intervenção humana e a manipulação de materiais. Um dos métodos utilizados com a finalidade de limpeza automatizada é o sistema *Clean in Place* (CIP).

O CIP é muito utilizado em micro cervejarias para a limpeza dos equipamentos sem a desmontagem dos mesmos. O processo trabalha em circuito fechado com circulação e recirculação, em ciclos. O reaproveitamento da água do enxague final pode ser utilizado para a limpeza seguinte do tanque (BASTOS, 2019).

Para a aspensão das soluções de limpeza dentro do tanque, são utilizados aspersores do modelo *spray-ball* que são amplamente utilizados em indústrias alimentícias. A Fig. 3 apresenta dois modelos de *spray-ball* comum e o rotativo.

Figura 3: *Spray-ball* e *spray-ball* rotativo.

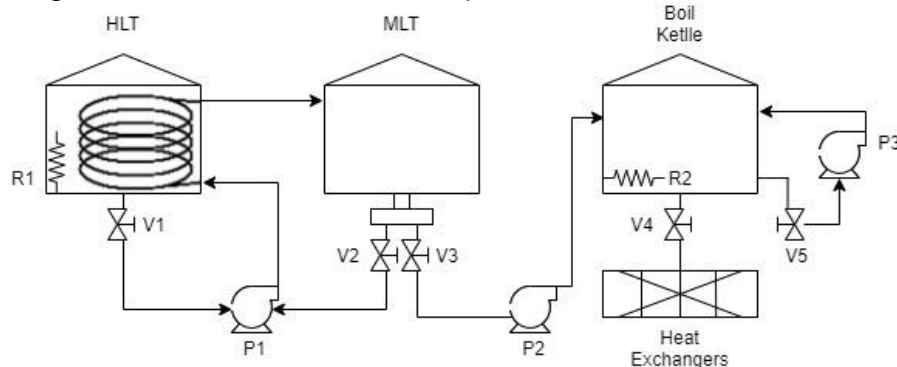


Fonte: Palhota (2018)

2.5 SISTEMA HERMS

O sistema HERMS baseia-se em circular o mosto constantemente através de uma serpentina imersa em água quente e apresentar total controle sobre a temperatura no processo de brasagem. Para funcionamento desse sistema, no mínimo três painéis são necessárias, uma para servir de reservatório de água quente, outra para abrigar o mosto realizando assim as etapas de mostura e clarificação e a terceira para a fervura (CAMPOS, 2017). A Fig. 4 apresenta o sistema HERMS completo.

Figura 4: Sistema HERMS completo.



Fonte: Do autor (2020)

2.5.1 Processo Operacional do Sistema HERMS

O processo inicia-se colocando água na panela HLT que possui em seu interior uma serpentina para aquecimento do mosto. A seguir, coloca-se o malte moído na panela MLT (*Mash/ Lauter Tank* – Panela de mosturação (brasagem) e filtração com fundo falso) que é responsável pela mosturação e filtração.

A água é aquecida pela resistência elétrica R1 até a temperatura desejada sendo controlada por um controlador de temperatura. Após atingir a temperatura, a água é transferida da panela HLT para a panela MLT através da bomba P1 e da serpentina. Na panela HLT é adicionada água novamente para iniciar a etapa de mostura. São acionadas a resistência elétrica R1 e a bomba P1. A válvula V1 é aberta para o escoamento da água para a panela MLT.

Após, o mosto recircular pela serpentina obedecendo as rampas de temperatura estabelecidas que são controladas pelo controlador responsável pela

panela MLT. São acionadas a resistência R1 e a bomba P1. A válvula V1 é fechada e a válvula V2 é aberta para passagem do mosto pela serpentina.

Ao fim da clarificação o mosto passa para a última panela *Boil Kettle* que é a panela de fervura. A água contida na panela HLT é transferida simultaneamente para a panela de *Boil Kettle* para realizar o *fly-sparging* que tem como objetivo aspergir água sobre a superfície dos grãos e extrair os açúcares ainda presentes no bagaço do mosto. A temperatura da água deve ser controlada e ajustada conforme a temperatura do mosto.

São acionadas a resistência elétrica R1 e as bombas P1 e P2. A válvula V2 é fechada e são abertas as válvulas V1 para passagem da água para a panela MLT e a válvula V3 para a passagem do mosto para a panela *Boil Kettle*.

Após concluir o volume desejado na panela *Boil Kettle*, inicia-se a fervura e são adicionados o lúpulo e especiarias desejadas. São desligadas a resistência R1, e as bombas P1 e P2. São acionadas a resistência R2 e a bomba P3, e fechadas as válvulas V1 e V3. A bomba P3 é acionada e a válvula V5 é aberta para realizar o *whirlpool*, que tem como objetivo causar um redemoinho forte na panela de fervura para a separação do *trub*.

Terminando a fervura inicia-se a etapa de resfriamento. O mosto passa pelo trocador de placas para a troca térmica e para isso desliga-se a resistência R2 e a bomba P3. Fecha-se a válvula V5 e a válvula V4 é aberta para iniciar o resfriamento através do trocador de calor.

Ao término da troca térmica, o mosto vai para o fermentador e são adicionadas as leveduras. O processo de fermentação é controlado por temperatura estabelecida. No fim da fermentação coloca-se a cerveja para a maturação e após, faz-se o engarrafamento da bebida.

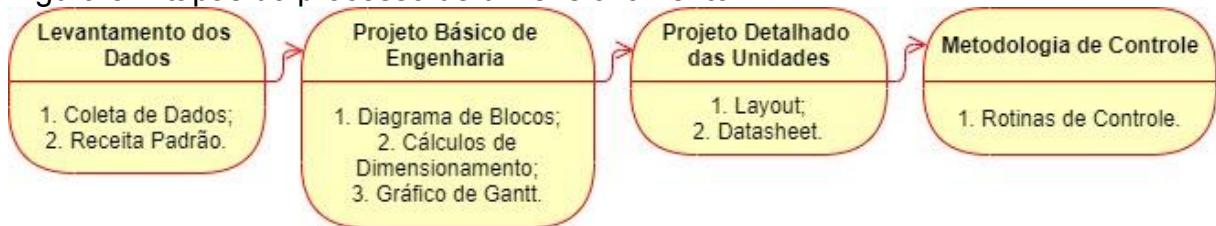
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, são apresentadas as metodologias e critérios utilizados para o desenvolvimento do projeto de dimensionamento bem como os cálculos realizados para a elaboração do projeto.

3.1 FLUXOGRAMA DO PROJETO

A Fig. 5 descreve, através de um fluxograma, as etapas do processo de dimensionamento da cozinha cervejeira, facilitando assim o entendimento das etapas que foram executadas para atingir o objetivo.

Figura 5: Etapas do processo de dimensionamento.



Fonte: Do autor (2020)

3.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Para obter as informações necessárias para o cálculo de demanda mensal de produção, as coletas dos dados de volume de produção foram realizadas em uma micro cervejaria localizada em Urussanga – SC no dia 10 de agosto de 2020. Esse levantamento foi baseado no histórico de produção da cervejaria para então determinar qual a necessidade de produção do equipamento.

O projeto precisa obter alto desempenho em todas as etapas e atingir a eficiência processo. Para isso, desenvolveu-se uma formulação base para servir de receita padrão nos lotes a serem produzidos. Para a receita padrão utilizou-se três estilos de cervejas que apresentavam maior volume de produção no ano de 2019, são elas: American Pale Ale, Blond Ale e Pilsen.

Conforme os dados levantados, obteve-se os pontos críticos de controle analisando os parâmetros de quantidade de malte, volume de água para as etapas de mostura, lavagem, água total, fervura, pós fervura e duração da fervura. Todos os dados utilizados para a receita padrão e as demais análises que foram realizadas ao longo do projeto, foram retirados do software *Brewfather* conforme Qd 1. demonstra a seguir.

Quadro 1: Dados utilizados com base nas receitas dos estilos de cerveja.

Receitas Brewfather			
Descrição	American Pale Ale	Blond Ale	Pilsen
Volume Total (L)	500	500	500
Densidade Pré-Fervura	1052	1043	1041
Fermentáveis (Kg)	119,05	101,52	91,1
Volume da Fervura (L)	524,38	526,38	562,08
Volume Pós Fervura (L)	521,88	521,88	552,08
Água de mostura (L)	420,18	277,6	245,97
Água de Lavagem (L)	199,44	330	248
Tempo de Fervura	60min	90min	60min
Água total (L)	619,62	607,6	612,48
Eficiência do Equipamento	71%	72%	75%
Rampas	67°C - 68°C	65°C	50°C - 65°C - 72°C - 78°C
Duração Rampas	60min - 10min	60min	0min - 30min - 10min - 0min

Fonte: Do autor (2020)

3.3 PROJETO BÁSICO DE ENGENHARIA

Após realizar o levantamento dos dados conforme Qd. 1, elaborou-se o diagrama de blocos do processo obedecendo a sequência de produção. O diagrama foi realizado através do *Software online* e grátis *Draw io*, e nele contemplou-se desde a entrada das matérias-primas até a saída do produto final.

Fez-se também o fluxograma de processo com as principais operações unitárias do sistema através do *Software Draw io*. O fluxograma contempla a maior parte dos dados de engenharia necessários para um projeto de processo químico. No fluxograma estabeleceu-se os principais equipamentos que incluem a panela de água quente, panela de brassagem e a panela de fervura. Mostrou-se os fluxos do processo e atribuiu-se aos mesmos um código identificando assim a ordem que o sistema deve operar.

Criou-se o gráfico de Gantt através do programa Excel 2016 com base na receita padrão já definida. O gráfico auxilia como ferramenta virtual utilizada para controlar a programação de produção, estimando assim os ciclos de bateladas do processo.

Realizou-se também, os cálculos dimensionais dos equipamentos que são eles: moinho, panela de água quente, panela de mostura e filtração, panela de fervura, trocador de calor e especificado as bombas e válvulas de transferência. Os cálculos

incluem capacidade produtiva das painelas, demanda térmica, sistema de agitação conforme apresentado abaixo.

3.3.1 Moinho

Para a moagem do malte, utilizou-se o moinho de rolos. Existem diversos tipos de moedores e moinhos com determinada quantidade de rolos variando conforme a necessidade de produção. Em microcervejarias, usualmente utiliza-se moinho de dois rolos. Portanto, conforme a capacidade de produção determinada no tópico 4.3.1, escolheu-se o moinho de dois rolos que atenderá a demanda produtiva.

3.3.2 Dimensionamento da Painela de Água Quente

Para a painela de água quente, são realizadas rampas de temperatura de aquecimento que são mantidas durante tempos determinados. Para isso, realizou-se o cálculo térmico considerando a receita da cerveja tipo pilsen que é a que tem as condições mais extremas de temperatura como mostra no Qd. 1.

Analisando a receita, a parte do processo que exigirá mais potência do sistema e tem a maior variação de temperatura em função do tempo é dos 50 °C aos 65 °C e dos 0 aos 30 minutos. Diante disso, foi realizado os cálculos de dimensionamento das resistências baseando-se nessa etapa do processo. Utilizou-se para determinar o volume da painela a Eq. (1):

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}} \quad (1)$$

Onde:

r = Raio (m);

h = Altura painela (m);

V = Volume painela (m³).

Após, para determinar a potência das resistências elétricas \dot{E}_g , realizou-se o balanço de energia do sistema conforme Eq. (2).

$$\dot{E}_{ac} = \dot{E}_e - \dot{E}_s + \dot{E}_g \quad (2)$$

Onde:

\dot{E}_{ac} = Energia acumulada no processo (W);

\dot{E}_e = Energia que entra no processo (W);

\dot{E}_s = Energia que sai do processo (W);

\dot{E}_g = Potência das resistências elétricas (W).

Atribui-se que a energia que entra no processo é nula, a energia que sai do processo é por convecção e radiação (desconsideradas para este cálculo) e a energia acumulada é a necessária para aquecer o processo.

Para encontrar o volume do material de aço (material utilizado para as painéis), utilizou-se a Eq. (3).

$$V_{aço} = 2 \cdot esp \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot r \cdot esp \cdot \pi \cdot h_{painel} \quad (3)$$

Onde:

$V_{aço}$ = Volume de aço (m³);

esp = Espessura da painél (m);

h_{painel} = Altura da painél (m).

Calculou-se a energia acumulada atribuindo-se a soma do líquido e o tanque de mosturação conforme Eq. (4).

$$\dot{E}_{ac} = \left(\rho V C p \frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{\text{Água}} + \left(\rho V C p \frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{\text{Aço}} \quad (4)$$

Onde:

$\rho_{\text{água}}$ = Massa específica da água (Kg/m³);

$\rho_{\text{aço}}$ = Massa específica do aço (Kg/m³);

$V_{\text{água}}$ = Volume máximo de água na painél (m³);

$V_{\text{aço}}$ = Volume de material (aço) (m³);

$C_{p\acute{a}gua}$ = Calor específico da água (J/KgK);

$C_{p\grave{a}ço}$ = Calor específico da panela (J/KgK).

Conforme rampa de temperatura e tempo estabelecidos (variação de 50 °C em 30 minutos), calculou-se a taxa de temperatura em função do tempo $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ e obteve-se a potência do sistema.

3.3.3 Dimensionamento da Panela de Mostura e filtração

Utilizou-se a Eq. (1) para o cálculo de volume da panela de mosturação. Nesta panela, não se utiliza resistência elétrica para o aquecimento visto que todo o processo das rampas de temperatura é realizado através da panela de água quente (sistema HERMS).

Utiliza-se para a panela, um fundo falso de chapa circular que serve como retenção dos grãos de malte e camada filtrante intermediária antes da saída do mosto para a fervura.

3.3.4 Dimensionamento da Panela de Fervura

Para a panela de fervura utilizou-se a Eq. (1) no cálculo de volume e conseqüentemente pode-se dimensionar a resistência elétrica da panela conforme o volume obtido.

Conforme eficiência do processo indicada no Qd. 1, o dimensionamento das resistências será baseado na quantidade de líquido evaporado em função do tempo. Utilizou-se uma taxa de evaporação máxima de 30% em aproximadamente 150 minutos que é o maior tempo de mosturação e fervura da cerveja estilo Blond Ale.

Realizou-se o balanço de energia conforme o balanço realizado para a panela de mosturação, porém, considerou-se agora a energia para a troca de fase. A energia acumulada depende da entalpia de mudança de fase conforme Eq. (5).

$$\dot{E}ac = \left(\frac{h_{lg} m_{evaporada}}{t_{evaporação}} \right)_{\acute{a}gua} \quad (5)$$

Onde:

h_{lg} = Entalpia de troca de fase da água (KJ/kg.K);

$m_{evaporada}$ = Massa de água evaporada (Kg);

$t_{evaporação}$ = Tempo de evaporação (s).

3.3.5 Dimensionamento do Trocador de Calor

Para o dimensionamento do trocador de calor, utilizou-se o modelo de trocador de calor de placas e calculou-se a carga térmica conforme Eq. (6).

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot cp \cdot (\Delta T_{ml}) \quad (6)$$

Onde:

\dot{q} = Carga Térmica (KJ);

\dot{m} = Vazão mássica (Kg/m³);

cp = Calor específico (J/KgK);

ΔT_{ml} = Média logarítmica das diferenças de temperatura (°C).

Com base no resultado obtido conforme Eq. (6), igualou-se o valor com a equação de transferência de calor em um trocador conforme Eq. (7) para encontrar a área de troca térmica.

$$\dot{q} = A \cdot U \cdot (\Delta T_{ml}) \quad (7)$$

Onde:

A = Área de troca térmica (m²);

U = Coeficiente global de transferência de calor (KW/m²°C);

3.4 PROJETO DETALHADO DAS UNIDADES

O projeto foi desenvolvido conforme cálculos realizados para cada equipamento, obtendo assim as dimensões necessárias para suprir a necessidade de demanda produtiva.

Realizou-se o desenho técnico (*layout*) no programa Autodesk AutoCAD 2019 dos equipamentos de produção com as principais dimensões já calculadas e suas respectivas posições na cozinha cervejeira.

Por fim, obteve-se um datasheet através do programa Excel 2016 que é uma ficha de especificação com os dados de desempenho obtidos nos cálculos de dimensionamento e os dados características do equipamento para integrar o mesmo ao processo.

3.5 METODOLOGIA DE CONTROLE

Estabeleceu-se nos equipamentos, as rotinas de controle para garantir o desempenho do sistema e definiu-se como será controlada as variáveis de processo e também, a justificativa para a utilização de cada variável de controle.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são descritos os resultados obtidos ao longo dos experimentos, sendo indicados as melhores condições para a concepção de dimensionamento da cozinha cervejeira.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

A seguir, Tab. 1 com os volumes de produção conforme dados levantados das principais cervejas baseados no histórico do ano de 2019.

Tabela 1: Histórico de produção (2019).

Estilo	Volume de produção no primeiro Semestre 2019 (L)	Volume de produção no segundo Semestre 2019 (L)	Total Produzido (L)
American Pale Ale	3440	2600	6040
Blond Ale	8400	4560	12960
Pilsen	14190	27800	41990

Fonte: Do autor (2020)

Com a análise da tabela, pode-se observar que os três estilos apresentam um total de produção por ano de 60990 litros. Conseqüentemente, o projeto deve obter no mínimo essa capacidade de produção para atender a demanda. Para isso, estabeleceu-se os pontos críticos para o dimensionamento levando em consideração os três estilos.

A seguir, Tab. 2 com os valores de volume máximo utilizados para a produção da cerveja desde a adição do malte até a etapa pós-fervura, considerando que a cozinha que será dimensionada irá ter uma capacidade de 500 litros de produção para atender a demanda produtiva.

Tabela 2: Pontos críticos de dimensionamento.

	American Pale Ale	Blond Ale	Pilsen
Malte (Kg)	119,05	91,1	101,52
Mostura (L)	420,18	245,97	277,6
Lavagem (L)	199,44	248	330
Água total (L)	619,62	612,48	607,6
Lúpulo (Kg)	2,8571	0,8305	1,633,7
Fervura (L)	524,38	562,08	526,38
Duração fervura (min)	60	60	90
Pós-Fervura (L)	521,88	552,08	521,88

Fonte: Do autor (2020)

Ao analisar-se a Tab. 2, pode-se definir a receita padrão utilizando os volumes máximos para cada etapa, de cada estilo.

Abaixo, Tab. 3 com os valores utilizados para elaboração da receita padrão.

Tabela 3: Receita Padrão.

Receita Padrão	
Malte (Kg)	119,05
Mostura (L)	420,18
Lavagem (L)	330
Água total (L)	619,62
Lúpulo (Kg)	2,8571
Fervura (L)	562,08
Duração fervura (min)	90
Pós-Fervura (L)	552,08

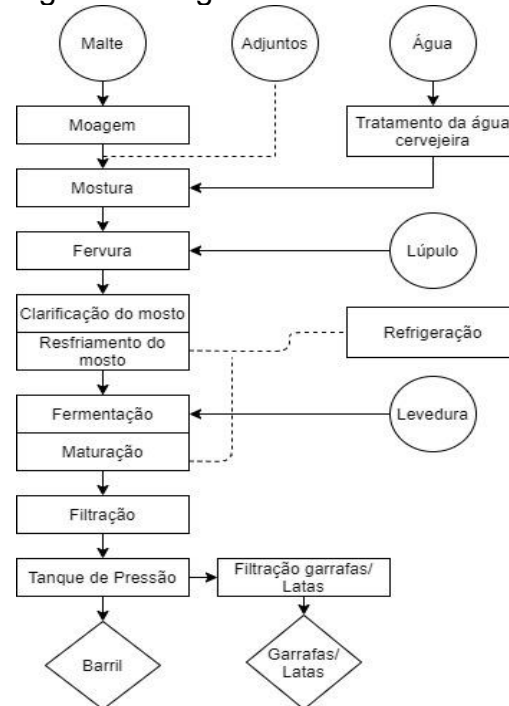
Fonte: Do autor (2020)

4.2 PROJETO BÁSICO DE ENGENHARIA

Obedecendo a sequência de produção criou-se o diagrama de blocos que fornece uma visão rápida do processo que contempla desde a entrada de matéria-prima até a saída dos resíduos gerados. O diagrama foi criado através do *software online Draw io*.

Para a elaboração obedeceu-se aos critérios normativos de simbologias utilizadas e para identificações em equipamentos, tubulações e instrumentações. A seguir, Fig. 6 com o diagrama de blocos do processo.

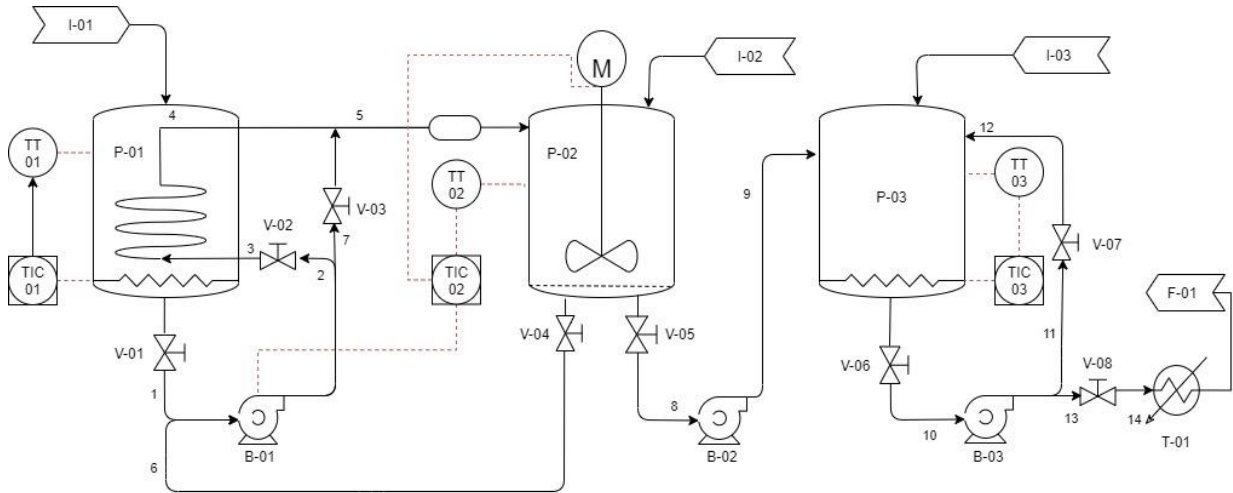
Figura 6: Diagrama de blocos.



Fonte: Do autor (2020)

A Fig. 7 representa o fluxograma de processo produtivo com base na receita padrão já estabelecida. O fluxo obedece uma sequência de produção com as operações unitárias do sistema e todos os principais equipamentos, controles de temperatura, vazão, nível e agitação. É descrito no fluxograma seu respectivo código e sequência com os nomes descritos no Qd. 2.

Figura 7: Fluxograma de Processo.



Fonte: Do autor (2020)

Quadro 2: Dados referentes ao fluxograma de processo.

INSUMOS	
Código	Nome
I-01	Água
I-02	Malte
I-03	Lúpulo
PANELAS	
P-01	Panela de água quente
P-02	Panela de brassagem
P-03	Panela de fervura
EQUIPAMENTOS	
B-0X	Bombas
F-01	Fermentador
T-01	Trocador de calor
TT-0X	Transmissores de Temperatura
TIC-01	Controladores de Temperatura
V-0X	Válvulas

Fonte: Do autor (2020)

4.3 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO

Realizou-se os cálculos de dimensionamento dos equipamentos que compõem a cozinha cervejeira que são eles: o moinho, as panelas de água quente, mostura, fervura, o trocador de calor e as bombas de transferência como mostra abaixo.

4.3.1 Moinho

Conforme gráfico de Gantt no tópico 4.4, a cozinha cervejeira terá capacidade de três lotes de produção por dia e conforme Tab. 2, os três estilos de cerveja apresentam aproximadamente a mesma quantidade de malte para moagem.

Considerando a quantidade de 119,05 Kg que é a maior para a cerveja American Pale Ale e considerando três lotes de produção por dia, a quantidade de malte máxima a ser moída é de 357,15 Kg de malte por dia. E considerando o tempo total de moagem de uma hora, o moinho deve ter capacidade de moagem de 400 Kg/h.

4.3.2 Panela de Água Quente

Considerando a quantidade de brassagens de três lotes por dia e o volume de água para a lavagem como mostra na Tab. 2, realizou-se o cálculo de dimensionamento para a panela de água quente conforme as fórmulas mencionadas no tópico 3.3.2.

A panela de água quente deve aquecer no mínimo 330 L conforme receita padrão. Sendo assim, projetou-se a panela com 800 mm de diâmetro e altura de 1100 mm. Calculando o volume necessário conforme Eq. (1) obteve-se 550 L.

Com a variação de temperatura $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ obteve-se uma variação de 0,00833 °C/s e uma potência para as resistências de aproximadamente 19398,79 W.

A serpentina por onde mosto irá recircular, será de aço inox que é o material com maior facilidade de higienização e terá um comprimento de 26 m, 18 aspirais.

4.3.3 Panela de Mostura e Filtração

Conforme Tab. 3, o ponto crítico de brassagem é 420,18 L. Para isso dimensionou-se uma panela de 800 mm de diâmetro e 1350 mm de altura obtendo-se um volume conforme equação Eq. (1) de 680 L.

Para a filtração, projetou-se um fundo falso obedecendo o diâmetro da panela de mostura e estimando-se 4 furos de 2 mm, por centímetro quadrado resultando um total de 10052 furos.

O sistema de agitação será realizado através de um agitador tipo turbina,

com duas pás. A partir da Fig. 8, pode-se calcular a potência de agitação considerando o tipo de agitação como forte, para suprir as necessidades de produção.

Figura 8: Relação de Potência por Volume.

$\frac{\dot{W}_u}{V}$		Nível ou grau de agitação
<u>Watts</u> m ³	<u>HP</u> m ³	
Até 80	até 0.1	Débil
80 - 230	0.1 - 0.3	Suave
230 - 460	0.3 - 0.6	Média
460 - 750	0.6 - 1.0	Forte
750 - 1500	1 - 2	Intensa
1500 - 2250	2 - 3	Muito forte
2250 - 3000	3 - 4	Muito intensa

Fonte: Junior, et al (2007).

Conforme Fig. 8, multiplicou-se a potência máxima de 750 W/m³ pelo total de volume de panela e obteve-se 510 W de potência para o agitador.

4.3.4 Panela de Fervura e Whirlpool

A panela de fervura recebe todo o material vindo da lavagem e mosturação. O diâmetro de 800 mm e altura de 1350 mm resultou em um volume de 680 L que irão satisfazer as necessidades de produção. Atribuiu-se a espessura de 2 mm para todas as panelas e também a utilização de aço inoxidável 304 para a composição das mesmas.

Considerando a receita padrão conforme Tab. 3, o volume de água total para a fervura é de 619,62 L. Conforme a taxa de evaporação estabelecida no item 3.3.4 e a entalpia de troca de fase da água de 2430 KJ/Kg.K obteve-se uma potência para a panela de fervura de 50185 W.

4.3.5 Trocador de calor

Com base nas equações do tópico 3.3.5, calculou-se a carga térmica do sistema para as temperaturas de 100 °C – 35 °C e 35 °C – 10 °C. Para o primeiro

estágio obteve-se uma carga térmica de 25969 kJ resultando em uma área de troca térmica necessária de 1,491 m².

Para o segundo estágio, obteve-se uma carga térmica de 9988 KJ, resultando na área de troca térmica necessária de 0,541 m².

4.3.6 Bombas e Válvulas de Transferência

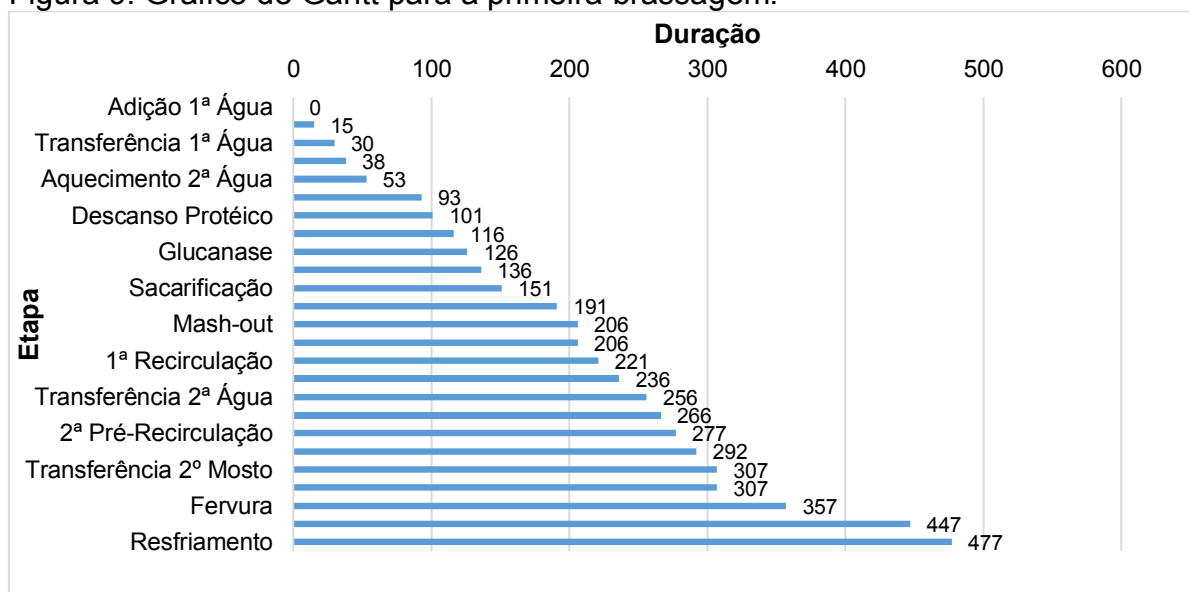
Para as transferências dos líquidos, utilizou-se três bombas centrífugas. Como o dimensionamento tem capacidade para 500 L de produção, as bombas precisam operar em 5 minutos para encher ou esvaziar as panelas, resultando em uma capacidade de vazão de 6000 L/h.

Para as válvulas que fazem a transferência dos líquidos entre os tanques com o auxílio das bombas e das tubulações, optou-se por válvulas de esfera em inox, específicas para procedimentos alimentícios.

4.4 GRÁFICO DE GANTT

Abaixo, os três gráficos de Gantt que apresentam os ciclos de bateladas do processo de produção da cerveja. Cada figura demonstra um lote de produção (primeira brassagem, segunda brassagem e terceira brassagem).

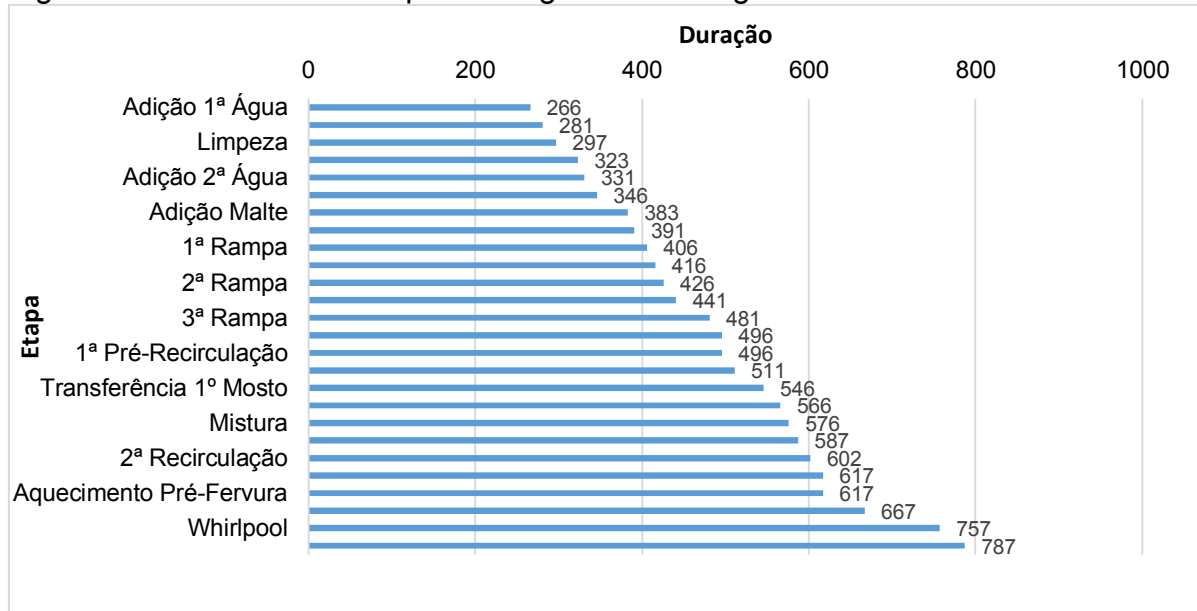
Figura 9: Gráfico de Gantt para a primeira brassagem.



Fonte: Do autor (2020)

A duração estimada para a primeira brassagem conforme o Fig. 9 é de 477 minutos de produção. Abaixo, segunda brassagem como mostra Fig. 10.

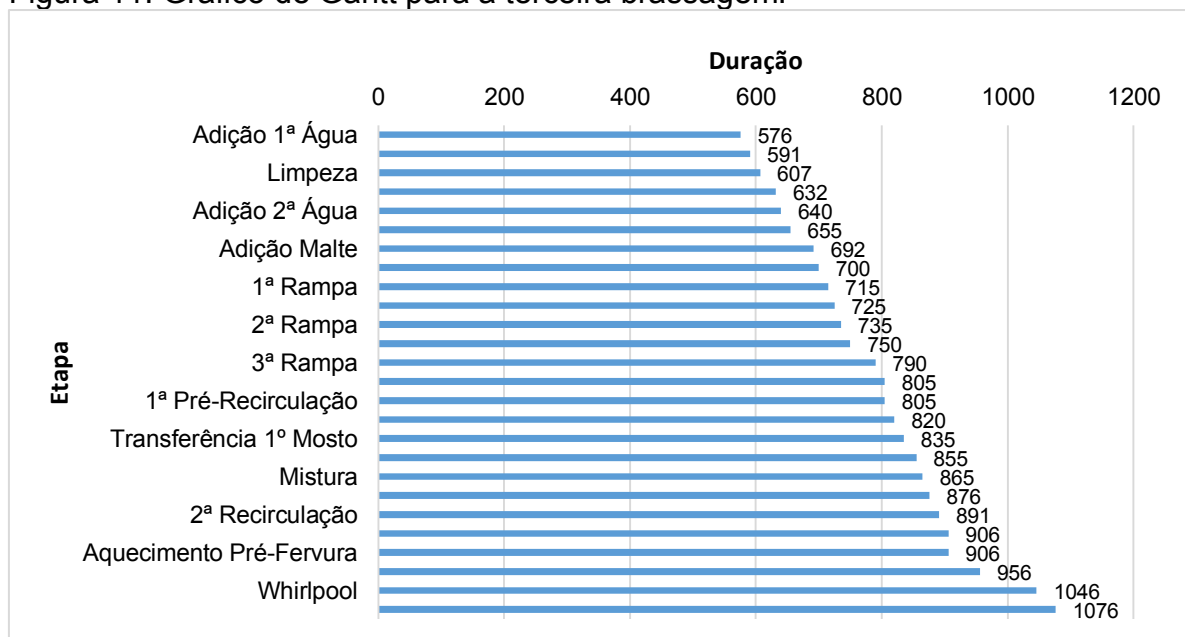
Figura 10: Gráfico de Gantt para a segunda brassagem.



Fonte: Do autor (2020)

Para a segunda brassagem, a estimativa é de 787 minutos de produção com a inclusão da primeira brassagem. E por fim, terceira e última brassagem como mostra Fig. 11.

Figura 11: Gráfico de Gantt para a terceira brassagem.



Fonte: Do autor (2020)

Conforme Fig. 11, a última etapa está estimada para finalizar com 1076 minutos, aproximadamente 18 horas de produção. Com isso, conclui-se uma estimativa de produção de três lotes por dia. Considerando o volume útil da panela de fervura de 544 L, tem-se por dia, 1632 L de produto e 427584 L de produto por ano (considerando 262 dias de produção). Assim, observa-se que o projeto atende e supera a capacidade de produção.

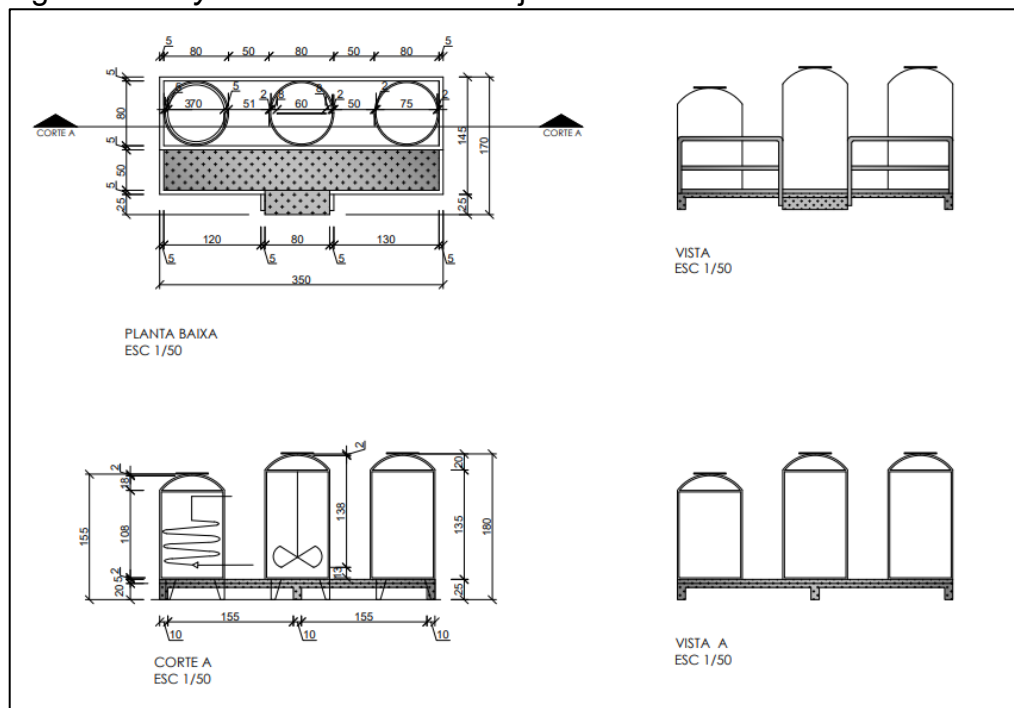
4.5 PROJETO DETALHADO DAS UNIDADES

Com os dados de dimensionamento obtidos, criou-se o layout da cozinha cervejeira com suas dimensões e também através dos cálculos realizados elaborou-se a ficha de especificação (*datasheet*) conforme seções abaixo.

4.5.2 Layout

Abaixo, Fig. 12 com o *layout* do projeto da cozinha cervejeira e as medidas dimensionadas e os ângulos de cima, frente e atrás da cozinha. O projeto conta com uma plataforma para facilitar a visualização do produto dentro das panelas.

Figura 12: *Layout* da Cozinha Cervejeira.



Fonte: Do autor (2020)

4.5.3 Datasheet

Com os dados obtidos dos cálculos de dimensionamento, criou-se o documento *datasheet* como mostra o Qd. 3 para melhor visualização dos dados de desempenho obtidos.

Quadro 3: *Datasheet*.

DATASHEET		Equipamento: Cozinha Cervejeira	
		Flávia Scarsi Mota	
Equipamentos		Valor	Unidade
Moinho	Capacidade	400	Kg/h
Panela de Água Quente	Altura	1100	mm
	Diâmetro	800	mm
	Capacidade	550	L
	Potência da Resistência	19398,79	W
	Espessura	2	mm
Panela de Mostura	Altura	1350	mm
	Diâmetro	800	mm
	Capacidade	680	L
	Fundo Falso	10052	Furos
	Potência Sistema de Agitação	510	W
	Espessura	2	mm
Panela de Fervura	Altura	1350	mm
	Diâmetro	800	mm
	Capacidade	680	L
	Potência da Resistência	50185	W
	Espessura	2	mm
Trocador de Calor	Área de troca Térmica	0,541	m ²
Bombas	Capacidade de Vazão	6000	L/h

Fonte: Do autor (2020)

4.6 METODOLOGIA DE CONTROLE

Utilizaram-se controladores de temperatura nas panelas de água quente e de fervura para garantir a temperatura do processo que são medidas por sensores. Para o projeto, as duas panelas deverão possuir um sensor cada, e o mesmo poderá ser do modelo PT-100 que possui alta estabilidade, repetibilidade e alta precisão de leitura. O sensor enviará um sinal para o controlador com atuação on/off que através da programação, irá definir se liga ou desliga a resistência elétrica.

Para o controle das bombas, utilizou-se para o projeto inversores de

frequência que através do controle de velocidade ajustam a vazão do líquido de escoamento podendo assim ter o controle das mesmas.

Abaixo, Qd. 4 os equipamentos com as principais variáveis de controle e os tipos de controles para cada uma delas.

Quadro 4: Variáveis de Controle.

Equipamento	Variável Controlada	Variável Manipulada	Tipo de Controle
P-01/ P-03	Temperatura	Resistência	On/off
P-02	Temperatura	-	On/off
B-01	Vazão/ Temperatura	Inversor de Frequência	PID
B-02/ B03	Vazão	Inversor de Frequência	PID
M (agitador)	Agitação	Inversor de Frequência	On/off

Fonte: Do autor (2020)

Utilizou-se nas três painéis, visores de linha para avaliação da filtração e do fluxo do mosto visando o controle de qualidade da cerveja. E também para o controle de nível, utilizou-se três sensores de nível do tipo submerso que através de um sensor hidrostático, calcula o nível conforme a pressão exercida pela coluna de líquido. Utilizou-se em todas as três painéis *spray-ball* rotativo para o sistema de limpeza.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma cozinha cervejeira com a utilização do sistema HERMS. Durante o projeto, foram elaborados fluxogramas que contribuíram para o entendimento do fluxo e funcionamento dos equipamentos até a elaboração do layout da cozinha que resultou em uma capacidade produtiva de 680 L.

O dimensionamento dos equipamentos da cozinha cervejeira apresentaram resultados coerentes e similares aos valores comercializados e disponíveis no mercado tanto para a capacidade das painéis quanto para os valores de potência para as resistências, bombas e agitadores. Observou-se vários pontos de melhoria de um sistema de produção de cerveja artesanal e conseqüentemente concluir que o ramo tecnológico possibilita grandes chances de crescimento constante

em conjunto com o mercado cervejeiro.

A área tecnológica no ramo das bebidas pode evoluir com o mercado cervejeiro como foi observado ao longo do trabalho. Existem diversas possibilidades para o aprimoramento do sistema de produção de cerveja e conforme os dados obtidos, o dimensionamento e a utilização de sistemas como o HERMS, possibilitam uma maior qualidade e eficiência do procedimento de produção.

Com os resultados obtidos, concluiu-se que o projeto correspondeu às expectativas pois foi possível atingir os objetivos requeridos no início do dimensionamento. Para o aprimoramento do projeto, pode-se futuramente, executar o mesmo com a realização de experimentos, e validar a eficiência do equipamento desenvolvido.

REFERÊNCIAS

JUNIOR, Celso Fernandes Joaquim; CEKINSKI, Efraim; NUNHEZ, José Roberto; URENHA, Luiz Carlos. **Agitação e Mistura na Indústria**. 2007.

BALDO, Tamara Angélica. **O problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes no processo de fabricação de cerveja: modelos e métodos de produção**, 2014. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-12032015-161656/publico/Tese_TamaraBaldo_REVISADA.pdf>. Acesso em: 10 de abril de 2020. Acesso em: 04 de março de 2020.

BASTOS, Vinicius Ricardo da Silveira. **Concepção e Dimensionamento de uma Microcervejaria**, 2019. Disponível em: <

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26814/1/ConcepcaoDimensionamentoMicrocervejaria.pdf>>. Acesso em: 26 de maio de 2020.

BOAN M.; COLLINI D.; PEREZ C. **Manual Cerveceiro**. Buenos Aires: Malaspina, 2012.

CAMPOS, Rodrigo Magalhães. **Projeto e Automatização de um Sistema HERMS Artesanal**, 2017. Disponível em: <http://www2.dee.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/18/2017/11/TCC_2017_1_RMCampos.pdf>. Acesso em: 10 de

abril de 2020.

HUGHES, Greg. **Cerveja Feita em Casa: tudo sobre os ingredientes, os equipamentos e as técnicas para produzir a bebida em vários estilos**. São Paulo, 2014.

JORGE, Érico Pereira Marum. **Processamento de Cerveja sem Álcool**. Disponível em:

<[http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/8930/material/TCC-Erico%20\(PROCESSAMENTO%20DE%20CERVEJA%20SEM%20%C3%81LCOOL\).pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/8930/material/TCC-Erico%20(PROCESSAMENTO%20DE%20CERVEJA%20SEM%20%C3%81LCOOL).pdf)>. Acesso em: 10 de março de 2020.

KAKAÇ, Sadik; LIU, Hongtan; PRAMUANJAROENKIJ, Anchasa. **Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design**, 2012.

KUNZE, Wolfgang. **Technology Brewing and Malting**. 3ª ed., 2004.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário da cerveja**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pasta-publicacoes-DIPOV/anuario-da-cerveja-2019/view>>. Acesso em: 14 de abril de 2020.

MORADO, Ronaldo. **LAROUSSE da Cerveja**. São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, Caio Jacques Alpino De; ARAÚJO, Felipe De Castro; SERRANO, Helena Lobato. **Estudo do Uso de Adjuntos em Mosto Cervejeiro**. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/734/1/TCC-Helena-Caio-Felipe%20Castro.pdf>>. Acesso em: 20 de abril de 2020.

PALHOTA, Nthália da Fonseca. **Seleção de Bomba Utilizada em Sistema CIP Aplicado na Higienização de Circuito de Envase de uma Cervejaria**. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10025015.pdf>>. Acesso em: 14 de abril de 2020.

PALMER, John J. **How To Brew: Everything You Need to Know to Brew Great Beer Every Time**. 3ª ed., 2006.

REBELLO, Flávia De Floriani Pozza. **Produção de cerveja**. Revista Agrogeoambiental, 2009.

SILVA, A. C.; AVANZI, C. **Mecânica: tecnologia dos materiais e industrial**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

SINNOT. **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**. 2ª ed, 2012.

TOZETTO, Luciano Moro. **Produção e Caracterização de Cerveja Artesanal Adicionada de Gengibre (*Zingiber officinale*)**, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2451/1/PG_PPGE_M_Togetto%20%20Luciano%20Moro_2017.pdf>. Acesso em: 12 de abril de 2020.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos professores e orientador George Luís Dos Santos Amaral, por todo o conhecimento transmitido durante o meu processo de formação e também para a conclusão deste projeto. E aos meus pais e família por todo o apoio durante esta jornada de estudos.