

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Departamento de Engenharia Química

G
E
Q



**Trabalho de Conclusão de
Curso**

**PROJETO DE UMA PLANTA PILOTO CERVEJEIRA
COM LEVEDURA IMOBILIZADA**

Alex Alcino De Oliveira André

***Orientadora: Profa. Dra. Andrelina Maria
Pinheiros Santos***

Recife/PE

2021

ALEX ALCINO DE OLIVEIRA ANDRÉ

**PROJETO DE UMA PLANTA PILOTO CERVEJEIRA
COM LEVEDURA IMOBILIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial à obtenção do grau
Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Andrelina Maria
Pinheiro Santos

Recife
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

André, Alex Alcino de Oliveira.

Projeto de uma planta piloto cervejeira com levedura imobilizada / Alex
Alcino de Oliveira André. - Recife, 2021.
63 : il., tab.

Orientador(a): Andrelina Maria Pinheiros Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2021.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Cerveja. 2. Levedura imobilizada. 3. Balanço de energia. 4. Balanço de
massa. 5. Projeto. I. Santos, Andrelina Maria Pinheiros. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

AGRADECIMENTOS

A meu pai Antônio Alcino e a minha mãe Sandra Maria, por toda dedicação, amor e sobretudo por acreditarem no caminho da educação mesmo que a eles não tenha sido ofertado.

A minha irmã Alessandra Alcino que sempre esteve do meu lado me aguentando por completo como ninguém mais.

A todos meus amigos que me mantiveram para cima mesmo quando a vida me solicitou uma pausa.

A minha professora orientadora Lia, por estar comigo e me guiar. Por fazer despertar em mim o desejo de conhecimento novamente. Por ter ficado.

A meu psicólogo Tiago e a meu fisioterapeuta Fernando, que ajudaram a reorganizar minha mente e corpo. Por me ajudarem a caminhar com passos menos dolorosos.

Ao meu Babalorixá Marcos de Baru e seu axé que me devolveu o brilho da vida.

Por último, ao meu Orixá Xangô, dono da minha cabeça, que sempre esteve comigo, me protegendo dos meus limites. Por me trazer de volta ao alinhamento. Por me curar de mim. Kawó Kábîèsílè.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRACERVA	Associação Brasileira da Cerveja Artesanal
ABIA	Associação Brasileira da Indústria de Alimentos
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
CIP	Clean-in-place

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do processo	22
Figura 2 - Diagrama de moagem.	24
Figura 3 - Diagrama de Mosturação.	26
Figura 4 – Diagrama de Clarificação.....	28
Figura 5 – Diagrama de aquecimento.....	30
Figura 6 – Diagrama de fervura.....	31
Figura 7 – Diagrama para o resfriamento.	34
Figura 8 – Temperaturas de projeto.....	34
Figura 9 – Diagrama da Aeração.....	36
Figura 10 – Diagrama da fermentação.	37
Figura 11 – Diagrama para a maturação.....	41
Figura 12 – Diagrama de carbonatação	43
Figura 13 – Moinho de rolos	43
Figura 14 –Tina monobloco	43
Figura 15 – Tanque de aquecimento	50
Figura 16 – Bomba centrifuga	51
Figura 17 – Trocador de calor	51
Figura 18 – Aerador.....	52
Figura 19 – Tanque fermentador	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Balanço de massa da moagem	25
Tabela 2 – Balanço de massa para etapa de mosturação	27
Tabela 3 – Balanço de Energia para a mosturação	27
Tabela 4 - Balanço de massa para a clarificação	29
Tabela 5 – Balanço de energia para o aquecimento	30
Tabela 6 – Balanço de massa para a fervura	32
Tabela 7 – Balanço de energia para a fervura	32
Tabela 8 – Balanço de energia do <i>whirlpool</i>	33
Tabela 9 – Atualização dos valores da corrente 12	33
Tabela 10 – Balanço de massa do trocador de calor.....	35
Tabela 11 – Balanço de energia do trocador de calor.....	35
Tabela 12 – Balanço de massa para aeração.....	36
Tabela 13 – Balanço de massa para a fermentação	40
Tabela 14 – Calores calculados da etapa de fermentação	41
Tabela 15 – Balanço de massa para maturação	42
Tabela 16 – Balanço de energia para maturação	42
Tabela 17 – Balanço de massa para etapa de carbonatação	45
Tabela 18 - Orçamento da planta.....	53

RESUMO

Em 2020 O Brasil chegou a um total de 1383 cervejarias abertas com um aumento de 14.4% com relação ao ano anterior. A imobilização de leveduras é uma técnica que confina as células em um espaço restrito diminuindo sua liberdade de movimento, porém conservando ainda suas atividades biológicas. Sistemas de leveduras imobilizadas permitem a recuperação de biocatalizadores para a sua reutilização, melhora a estabilidade, seletividade e atividade das moléculas, além disso, elimina etapas de separação por filtração e purificação o que promove diminuição de custo. Este projeto consiste nos cálculos de balanço de massa e energia para uma planta cervejeira de 150L de produção bem como dimensionamento e especificações de equipamentos. No projeto é apontado para a planta um moinho de rolos, uma tina monobloco 250L para bassagem com panela de aquecimento de água 150L, uma bomba móvel 1 CV, trocador de calor 20 placas, um fermentador cilindro cônico 200L com cesto para leveduras imobilizadas.

Palavras-chaves: cerveja, levedura imobilizada, balanço de massa, balanço de energia, dimensionamento, planta piloto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	HISTÓRIA	8
1.2	CLASSIFICAÇÃO.....	8
1.3	MERCADO.....	9
1.4	RELEVÂNCIA	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1.	INSUMOS	10
2.1.1.	ÁGUA	10
2.1.2.	MALTE	11
2.1.3	LÚPULO	12
2.1.4	LEVEDURA IMOBILIZADA.....	12
2.2.	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	13
2.2.1	MOAGEM DO MALTE	14
2.2.2	MOSTURAÇÃO.....	14
2.2.3	FILTRAÇÃO DO MOSTO.....	15
2.2.4	FERVURA	16
2.2.5	CLARIFICAÇÃO – WHIRLPOOL.....	16
2.2.6	RESFRIAMENTO	17
2.2.7	FERMENTAÇÃO.....	17
2.2.8	MATURAÇÃO	18
2.2.9	CARBONATAÇÃO.....	18
2.2.10	ENVASE	19
2.3	SANITIZAÇÃO DOS MATERIAIS	19
3	METODOLOGIA	20

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1.	DIAGRAMA DE PROCESSO	21
4.2.	BALANÇO DE MASSA E ENERGIA	23
4.2.1.	MOAGEM	23
4.2.2.	MOSTURAÇÃO	25
4.2.3	CLARIFICAÇÃO	28
4.2.4	FERVURA E WHIRLPOOL	30
4.2.5	CORREÇÃO PELA EFICIÊNCIA DE BRASSAGEM	33
4.2.6	RESFRIAMENTO	33
4.2.7	AERAÇÃO DO MOSTO	35
4.2.8	FERMENTAÇÃO	37
4.2.9	MATURAÇÃO	41
4.2.10.	CARBONATAÇÃO	42
4.3.	ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS	46
4.3.1.	MOINHO DE ROLOS	46
4.3.2.	TINA DE MOSTURAÇÃO MONOBLOCO	47
4.3.3	TANQUE DE ÁGUA QUENTE	48
4.3.4.	BOMBA MÓVEL	48
4.3.5.	TROCADOR DE CALOR	49
4.3.6.	FERMENTADOR PARA LEVEDURAS IMOBILIZADAS	50
4.4	ANÁLISE DE CUSTO	51
5.	CONCLUSÃO	53
6.	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRIA

O desenvolvimento da cerveja perpassa várias culturas. Além de ser a uma das mais antigas bebidas do mundo é também uma das mais consumidas. A primeira lei de regulamentação foi registrada em 1760 a.c. conhecida como Estela do Código de Hamurabi e previa pena de morte para aqueles que diluísssem a bebida para comercializá-la. (SOUZA, 2019). No começo da idade moderna, O Duque William IV da Baviera promulgou a “Lei de Pureza Alemã (Reinheitsgebot) onde era descrito que a cerveja deveria ser feita apenas de água, malte de cevada e lúpulo. (DIAS; FALCONI, 2018). Essa lei, serviu como base para regulamentação da bebida em diversos países, sendo notória sua influência no mundo. (PEREIRA, 2016).

A cerveja chegou no Brasil em navios mercantes junto aos holandeses. Ela fez parte da inovação cultural que foi promovida por Maurício de Nassau que também fundou a primeira cervejaria nacional na cidade já estabelecida do Recife (PEDROSO, 2014). Com a expulsão dos holandeses, a cerveja só voltou a entrar em terras brasileiras quando houve a reabertura dos portos para os navios ingleses e nesta época as cervejas fortes estavam sendo bastante comercializadas pelo mundo. (CASCUDO, 2011; PRIEST; STEWART, 2006). Apenas em 1836 que foi fundada uma cervejaria genuinamente brasileira. Em 1888 foi fundada a Brahma no Rio de Janeiro, e em 1891 foi fundada a Antártica em São Paulo. Elas foram as precursoras da Atual AB inbev que é a maior companhia de cerveja atualmente. (CASCUDO, 2011)

1.2 CLASSIFICAÇÃO

A cerveja é classificada em dois grandes grupos e a grande diferença está no tipo da fermentação bem como na levedura utilizada. A cervejas tipos Lager, ou de baixa fermentação, são aquelas produzidas pela levedura *Saccharomyces uvarum* que ao final do seu trabalho repousam na parte superior do fermentador e trabalham entre 5 e 15°C. Do outro lado, as cervejas do tipo ale, ou de alta fermentação, são aquelas produzidas pela leveduras *Saccharomyces cerevisiae* que ao final do seu trabalho decantam ao fundo do fermentador e trabalham entre 5-21°C (SANTOS, 2005).

As grandes industriais produzem em larga escala com plantas operando em alta eficiência e com insumos de qualidade conseguindo reduzir os custos do produto devido ao maior volume de produção. (FERREIRA, 2017). Elas empregam tecnologias de ponta que permitem o reaproveitamento de itens que antes eram tidos como descartes. A exemplo das leveduras que podem ser usadas para produção de biogás (DIAS, 2014), o bagaço de malte pode ser usado para produção de bolos (RECH *et al* 2017) e para alimentação de animais (BROCHIER, 2009). Essas indústrias, no Brasil, optam por produzir as cervejas mais populares de acordo com a demanda.

As micro cervejarias se juntam as grandes industriais servindo uma enorme gama de estilos que decorrem da crescente popularidade da bebida. Elas são definidas pela Associação Brasileira de Cerveja Artesanal (ABRACERVA) quando possuem um limite de 50mil hectolitros anuais (ou 416,6mil litros/mês). Com o menor volume de processados é notório o aumento preço do produto. As cervejas chamadas artesanais, ou ainda, especiais, possuem sabores e aromas mais complexos que propiciam uma experiência de consumo diferenciada.

1.3 MERCADO

A indústria de bebidas é a segunda mais importante da economia brasileira atrás apenas da indústria de alimentos. Segundo a Associação das Indústrias de Alimentação (ABIA), foi-se faturado, em 2019, um total de 137,0 bilhões de reais com a produção de cerveja com um aumento de 7,3% em relação ao ano anterior. Ainda sobre o mercado houve um aumento de 36% na produção de bebidas fermentadas em relação a 2018 (MAPA, 2020).

Em 2020 O Brasil chegou a um total de 1383 cervejarias abertas. Segundo o anuário de cerveja desenvolvido pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento houve um registro de 204 novas cervejarias e um encerramento de 30 registros que geram um saldo positivo de 174 novas cervejaria ou 14,4% de alta (MAPA, 2020).

Dados do mesmo anuário também mostram que no ano de 2020 todas os estados do país possuem uma cervejaria com a abertura de uma cervejaria no Acre. A região sudeste é ainda a que detém o maior número absoluto de cervejarias, mas foi o Nordeste que mais cresceu com aumento de 41,4%. Projeções futuras para este mercado prevê um crescimento de até 36% para os próximos anos (MAPA, 2020).

No processo cervejeiro ocorrem reações químicas e bioquímicas e se faz necessário a presença de mão de obra qualificada para sua realização. A crescente demanda abre espaço não somente para profissionais da área, mas também para empreendedores. Em uma pesquisa feita com 486 produtores independentes, 90% possuem curso superior completo e 81% fizeram cursos de tecnologia cervejeira. Esses resultados reforçam o perfil de profissionais nessa área (SEBRAE 2019).

1.4 RELEVÂNCIA

A fermentação é um dos processos mais antigos da humanidade e, hoje, é sabido que ela está atrelada a preservação de alimentos e bebidas. Ao passo que o conhecimento foi avançando, a fermentação foi reconhecida, estudada e hoje é tida como um conhecimento fundamental da biotecnologia, sendo um dos importantes pilares dessa área da ciência (PANTOJA, 2006) A técnica de imobilização de leveduras tem sido estudada na produção cervejeira em fermentadores contínuos como um método mais rentável o que atrai a atenção de novos pesquisadores. (ALMONACID *et al.*, 2010). A principal vantagem do método de imobilização é a alta concentração celular o que promove elevadas taxas de fermentação (KOSSEVA, 2010).

Diante do exposto o presente trabalho tem como objetivo estudar o processo cervejeiro, projetar uma planta piloto utilizando leveduras imobilizadas.

Objetivos específicos:

- Pesquisar e analisar o processo, suas etapas, equipamentos e insumos.
- Realizar os balanços de massa de energia para uma produção de 150L
- Realizar o dimensionamento e especificação dos equipamentos para máxima produtividade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INSUMOS

2.1.1. ÁGUA

A água é o insumo mais utilizado na produção cervejeira. Usa-se um volume 6 vezes maior que o volume final de cerveja desejado. (BRIGGS *et al.*, 2004). A

concentração salina e o pH interferem na qualidade da cerveja (BAMFORTH, 2003). Deve ser utilizado água potável na produção do mosto e com concentração controlada de íons pois esses interferem diretamente na qualidade da produção bem como nos aspectos sensoriais da bebida. (AQUARONE *et al.*, 2001). Além de ser um ingrediente, água entra no processo produtivo na etapa de lavagem, sanitização de equipamentos e pasteurização da bebida já envasada (PRIEST; STEWART, 2006).

Sua importância é tão grande que ela é um dos fatores decisivos na escolha do local para a instalação de uma cervejaria. A água deve ser insípida e inodora, para não interferir no gosto e aroma da cerveja. Deve possuir pH entre 6,5 e 8,0, faixa na qual as enzimas hidrolíticas do malte atuam (KARL; IMHOFF, 2002).

Conforme a tecnologia de tratamento de águas evoluiu hoje é possível adequar a composição de qualquer água às características requeridas. Porém o custo para alterar a composição salina da água normalmente é muito alto, motivo pelo qual as cervejarias consideram a qualidade da água disponível como fator determinante da localização da fábrica. No Brasil a maioria das regiões dispõe de reservas de água adequadas para a produção da cerveja tipo lager (FERREIRA 1998).

2.1.2. MALTE

O malte cervejeiro é resultado da germinação e dessecação do grão cevada (*hordeum sativum*) (BRIGGS *et al* 2004). Na etapa de germinação do grão são produzidas enzimas com a função de hidrolisar os açúcares complexos da semente em açúcares simples e se não for interrompido, esse processo continua para o desenvolvimento de uma nova planta. A etapa de secagem busca interromper o processo natural mantendo as enzimas produzidas no interior do grão (KUNZE, 2004). As principais enzimas para o processo cervejeiro são: amilases (α -amilase, β -amilase), glucanases e proteases (PALMER, 2006). Elas serão responsáveis pela sacarificação do mosto.

O processo de malteação é divido em três etapas: maceração, germinação e secagem. A maceração é a umidificação do grão para iniciar a germinação onde oxigênio, temperatura, umidade, e gás carbônico são controlados rigorosamente. Nesta acontece uma redução nas cadeias de amido do grão tornando-o solúvel. A germinação é quando o grão inicia o processo de criação de uma nova planta e logo em seguida é interrompido pela Etapa seguinte, a secagem. Com temperaturas controladas secagem reduz o a

umidade sem destruir as enzimas formadas. (SENAI, 2014). Este processo torna o malte estável e armazenável (GAUTO e ROSA, 2013).

No Brasil são comercializados quatro tipos de maltes, o tipo Pilsen, Munique, Caramelo, Preto ou Torrado (ZSCHOERPER, 2009).

2.1.3 LÚPULO

O lúpulo (*Humulus lupulus*) é uma trepadeira que faz parte da família das *Cannabaceae* e produz flores masculinas e femininas. São utilizadas as flores femininas na produção cervejeira pois são essas que possuem substâncias que conferem o amargor e aroma característicos da bebida. (HUGHES, 2013). Ele auxilia no controle bacteriostático da mistura reduzindo as chances de contaminação na etapa da fermentação. Também possui a propriedade de diminuir a produção de espuma durante a fervura o que contribui para estabilidade do sabor. (BRIGGS, 2004).

A lupulina é a substância que é utilizada na fabricação de cerveja. Esta substância apresenta uma quantidade significativa de resinas amargas e óleos essenciais responsáveis pelo amargor e aroma característicos. A lupulina ainda contribui para a estabilidade da espuma da cerveja, e possui propriedades bactericidas (GAUTO e ROSA, 2013).

O lúpulo em pellets é o mais utilizado por ser mais prático. Com esse formato, consegue-se reduzir o volume das flores de lúpulo sem perda das características originais. A flor ainda pode ser adicionada de forma natural conforme colhida na lavoura (REINOLD, R. M, 1997). A variedade do lúpulo e sua quantidade é um dos principais elementos que diferenciam as cervejas (SENAI, 2014).

2.1.4 LEVEDURA IMOBILIZADA

A levedura é o que vai realizar propriamente a transformações do mosto em cerveja. São organismos anaeróbios facultativos, ou seja, produzem energia a partir de carboidratos em condição aeróbias ou anaeróbias. Para a fermentação ocorrer, é de interesse que essas leveduras estejam em condição de anaerobiose na qual elas absorvem açúcares simples retornando ao meio dióxido de carbono, álcool, e produtos secundários como ésteres, álcool superiores, cetonas, fenóis e ácidos graxos (AQUARONE; BORZANI; SCHMIDELL, 2001).

A imobilização de leveduras é uma técnica que confina as células em um espaço restrito diminuindo sua liberdade de movimento, porém conservando ainda suas atividades biológicas. (MORENO-GARCIA *et al.*, 2018) São utilizadas em operações contínuas ou descontínuas (COVIZZI *et al.*, 2007). A principal vantagem do método de imobilização é a alta concentração celular o que promove elevadas taxas de fermentação (KOSSEVA, 2010).

A técnica de levedura imobilizada permite a recuperação de biocatalizadores para a sua reutilização, melhora a estabilidade, seletividade e atividade das moléculas, além disso, elimina etapas de separação por filtração e purificação o que promove diminuição de custo (ES, VIEIRA, AMARAL, 2015).

A técnica de imobilização tem sido estudada na produção cervejeira em fermentadores contínuos como um método mais rentável o que atrai a atenção de novos pesquisadores. (ALMONACID *et al.*, 2010). Entretanto apenas algumas poucas técnicas de imobilização de leveduras propostas na literatura resultaram de fato em produção de cerveja em escala piloto ou mesmo em implementação industrial (BERLOWSKA *et al.*, 2013). Essa técnica ainda permite o uso de um sistema descontínuo de fermentadores resultando em economia do processo e eliminação de uma das etapas.

Na produção de hidromel, leveduras imobilizadas em suporte de alginato de cálcio foram reutilizadas em vários ciclos sem que houve perda de rendimento (FONSECA, 2013). Já na produção de cerveja artesanal, a utilização de leveduras imobilizadas no processo permitiu um maior rendimento, menor custo e maior qualidade da cerveja (BEZBRADICA *et al.*, 2007).

A técnica de imobilização vem sendo bastante empregada em diversos segmentos industriais. Coutinho (2020) avaliou a viabilidade do processo combinada com ciclos da fermentação de uma cerveja puro malte em um sistema descontínuo utilizando leveduras *Saccharomyces cerevisiae* imobilizadas em alginato de cálcio. Foram realizados 4 ciclos com as mesmas leveduras e o rendimento pouco se alterou entre as fermentações.

2.2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo de fabricação da cerveja pode ser dividido em: moagem do malte, mosturação, filtração do mosto, fervura do mosto, tratamento do mosto, fermentação,

maturação, carbonatação seguindo para etapa de envase e sanitização do material, (VENTURINI FILHO & CEREDA, 2001).

2.2.1 MOAGEM DO MALTE

Com o objetivo de acessar o conteúdo interno do grão de malte ele é moído de uma forma a romper sua casca, mas sem triturá-la. Dessa forma, o endosperma é exposto permitindo o acesso aos açúcares do mesmo (PALMER, 2006). A etapa de moagem está diretamente relacionada com a velocidade das transformações físico-químicas, o rendimento, a clarificação e a qualidade do produto (FILHO, 2010).

A moagem é uma etapa em que se analisa condições antagônicas uma vez que a casca e o endospermas possuem objetivos distintos no processo. Por um lado, a casca deve ser preservada para que possa servir como meio filtrante. Por outro, quanto mais se expor do endosperma, com uma moagem mais fina por exemplo, maior será o rendimento de extração de açúcares. (SENAI, 2014).

Segundo essas análises, uma moagem mais fina permite obter maior quantidade de açúcares fermentescíveis, maior atenuação e maior quantidade de álcool. Porém a etapa de filtração vai ser prejudicada visto que menores partículas de cascas filtraram com menos eficiência. (SENAI, 2014).

2.2.2 MOSTURAÇÃO

A mosturação é a etapa na qual o malte moído é misturado com água numa temperatura controlada a depender da cerveja em questão por um intervalo de tempo. A brassagem, como também é chamada, tem como objetivo solubilizar os açúcares proveniente do endosperma do malte. Nesta etapa existe a hidrólise do amido em açúcares fermentescíveis, solúveis em água, catalisada por enzimas (SILVA *et al.*, 2017). A ação enzimática deve produzir um mosto que contenha de 70 a 80% de açúcares fermentáveis, incluindo glicose, maltose e maltotriose (BUSCH, 2015). É importante ressaltar todo o processo enzimático depende intrinsecamente da temperatura, grau de acidez, da concentração do malte. (MESSERSCHMIDT, 2015)

Nesta etapa, as temperaturas mais baixas, na faixa de 62 a 66°C promovem a quebra do amido em açúcares menores, de cadeia curta que devem ser fermentados completamente pela levedura resultando em cervejas com sabores mais “secos”, ou seja, sem dulçor. Já temperatura mais altas, na faixa de 67 a 72 °C produzem açúcares mais

complexos, as dextrinas, que não serão fermentados pela levedura, resultando em uma cerveja com um sabor adocicado e encorpado. (PRIEST; STEWART, 2006). O tempo desta etapa é de 90 minutos tipicamente. (VENTURINI FILHO, 2016). E obtém-se a extração de 65% dos sólidos totais do malte (CARVALHO, 2007).

O teste de Iodo 0,2M é feito para verificar a sacarificação do malte. O iodo reage com as moléculas de amido formando coloração roxo azulada. Uma vez que o amido é completamente consumido pelas enzimas, o teste revelará a ausência desta cor (COSTA *et al.*, 2006). Logo em seguida, a mistura é aquecida entre 75 e 79°C por 10 minutos. Essa técnica é conhecida como *mashout* ou parada proteica. Nesta etapa ocorre a inativação das enzimas e a redução da viscosidade do mosto o que beneficia a extração dos açúcares na etapa seguinte.

No processo avaliado, água e malte moído entram a temperatura ambiente na tina de mosturação e são aquecidos até temperatura de 66°C por 90 minutos. Logo em seguida o Mashout será feito em 75°C por 10 minutos. O aquecimento será feito por resistência.

2.2.3 FILTRAÇÃO DO MOSTO

A etapa de filtração é realizada utilizando como meio o bagaço do malte que não se dissolvem na fervura. Nesta etapa ainda é usada água secundária numa temperatura de 76 a 78°C objetivando a extração dos açúcares remanescentes. Temperaturas superiores podem ocasionar a extração de taninos do bagaço gerando *off-flavors* (SILVA *et al.*, 2017).

Em pequena escala industrial, a filtração é feita utilizando panelas de fundo falso e o próprio bagaço do malte como meio filtrante (VENTURINI FILHO, 2016). Após o *mashout* o mosto deve ser colocado em repouso para que o assentamento do bagaço e início da recirculação. A recirculação é feita da base ao topo de forma lenta para não atrapalhar a formação do leito de grãos. Ao começo da recirculação, a menores partículas serão sugadas pela bomba sendo jogada por cima até o ponto que a torta estará suficientemente formada para reter essas partículas. (PALMER, 2006).

Ainda nesta etapa, é feita uma lavagem do leito filtrante chamada de *sparging* com o objetivo de extrair os açúcares residuais que ficaram no bagaço. (VENTURINI FILHO, 2016). Esta lavagem é iniciada antes do nível do mosto ficar abaixo do leito filtrante evitando assim a formação de caminhos preferenciais (BRIGGS *et al.*, 2004). A água de

lavagem deve ainda estar na mesma faixa de temperatura do *mashout* e a quantidade está atrelada a parâmetros do projeto como densidade do mosto e volume pré-fervura (KUNZE, 2004)

No presente trabalho, a temperatura da água de clarificação é 75°C e será alcançada por um tanque de aquecimento por resistência tubular. O tempo de aquecimento será igual ao tempo de mosturação assim a água alcança a temperatura adequada no final do *mashout*.

2.2.4 FERVURA

A etapa seguinte, a temperatura é elevada até a fervura. Desta forma ocorre a inativação das enzimas, esterilização do mosto e a coagulação proteica. Ainda nesta etapa é adicionada o lúpulo do qual é extraído componentes aromáticos e de amargor. (MESSERSCHMIDT, 2015). A fervura deve ser realizada até chegar na concentração de açucares desejada e, em paralelo, um aumento na densidade é verificado devido a perda de solvente (SILVA *et al.*, 2017)

A fervura também é importante para a estabilização biológica do mosto. Esta etapa do processo costuma durar entre 60min e 90min (VENTURINI FILHO, 2016)

A adição do lúpulo pode se dar em dois momentos distintos. Ao início do processo é a variedade do lúpulo para amargor e deve ser fervida por cerca de uma hora. A segunda adição de lúpulo visa extraer os compostos aromáticos, por serem mais voláteis devem ser adicionados final da fervura por um período de 10 a 15min (PALMER, 2006)

No processo avaliado esta etapa terá duração de 90minutos e contará com uma adição de lúpulo.

2.2.5 CLARIFICAÇÃO – WHIRLPOOL

Após a fervura do mosto é verificado materiais coagulados com textura mucilaginosa chamado *trub*. Ele é formado por materiais em suspensão como proteínas coaguladas e outras substâncias. O *trub* se deposita no fundo do tanque enquanto o mosto é drenado para o tanque de fermentação. É muito importante a remoção completa do *trub* pois este conglomerado de substâncias pode afetar drasticamente a experiência do paladar (KUNZE, 2004).

Com o objetivo de decantar os materiais suspensos é feita a técnica de *whirlpool*. Ela consiste no uso de um fluxo de mosto rotacional que retorna uma separação do por diferença de densidade. O processo de decantação é feito por 90 minutos (SILVA *et al.*, 2017). A técnica referida, tem a finalidade de aumentar a eficiência de separação dos materiais em suspensão favorecendo a formação de conglomerados sólidos formado por proteínas e outras partículas (KUNZE, 2004).

2.2.6 RESFRIAMENTO

O resfriamento do mosto busca reduzir a temperatura até níveis adequados para a fermentação de acordo com o tipo de leveduras utilizadas (SENAI, 2014). Deve ser realizado de forma rápida e asséptica para interromper as reações bioquímicas e minimizar o crescimento de possíveis contaminantes microbianos (BRIGGS *et al.*, 2004).

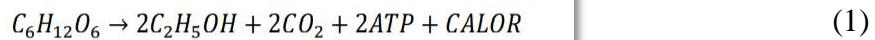
O equipamento utilizado em cervejarias é o trocador de placas (AQUARONE *et al.*, 2001). A vantagens desse trocador é que são mais compactos, tem facilidade para mudanças na operação de volumes de mosto e temperatura diferentes (SENAI, 2014).

Em linhas tradicionais de produção, é injetado oxigênio na linha fria do mosto antes da entrada no fermentador (FILHO, 2010). A função do oxigênio é ativar a rota de reprodução da levedura sendo o mesmo necessário na sintetização de compostos da parede celular (SENAI, 2014).

2.2.7 FERMENTAÇÃO

Colocado o mosto em contato com as leveduras fermentador o processo de fermentação é iniciado. Essa operação constitui da etapa mais longa do processo de fabricação e pode durar de 3 a 15 dias a depender da receita em questão. (OETTERER, REGITANDO-D'ARCE e SPOTO, 2006)

O princípio básico da fermentação é a conversão dos açucares do mosto em etanol e gás carbônico. Por via anaeróbia como mostra a equação 1 e pela respiração, via aeróbica equação 2 que promove o crescimento e revigoramento da levedura (OETTERER, REGITANDO-D'ARCE e SPOTO, 2006).





Fermentações com leveduras imobilizadas levam em conta também o efeito de difusão existente na barreira de imobilização. O alginato de cálcio permite uma boa absorção de glicose (COUTINHO, 2020) o que não termina por limitar a velocidade de consumo do açúcar.

Ao usar leveduras imobilizadas a etapa de filtração posterior a fermentação é eliminada (ES, VIEIRA, AMARAL, 2015). Esta etapa tem por objetivo separar as leveduras em suspensão da cerveja tornando-a mais clara. Uma vez que as leveduras estão aprisionadas nas esferas sua separação é facilitada.

2.2.8 MATURAÇÃO

A maturação é etapa onde a cerveja permanece em tanques sob ação de baixas temperaturas possibilitando reações químicas que finalizam o sabor do produto (FILHO, 2010). Esta etapa é chamada também de fermentação secundária na qual a levedura remanescente trabalha com atividade reduzida devido as condições (BRIGGS *et al.*, 2004).

Na produção de cervejas artesanais, o tempo de maturação pode variar de dez dias até alguns meses, a depender do estilo da cerveja em questão. Esta etapa normalmente é realizada no mesmo tanque em que ocorre a fermentação (BRIGGS *et al.*, 2004).

2.2.9 CARBONATAÇÃO

O dióxido de carbono é responsável pela efervescência e pela acidez da cerveja. Sua concentração deve ser controlada para obter um produto de qualidade. Ele ainda colabora para evitar ação microbiana e oxidação indesejadas. O CO₂ pode ser recuperação na etapa de fermentação e ser submetido a lavagem, compressão, secagem em sílicas e alumínio desodorização com carvão ativado, liquefação e vaporização para depois ser injetado na bebida (OETTERER, REGITANDO-D'ARCE e SPOTO, 2006). Entretanto essa recuperação não é suficiente e é necessário comprar o gás carbônico em empresas do setor (FILHO, 2010). A recuperação torna o processo mais extenso e de maior valor agregado.

A técnica mais utilizada em micro cervejarias são as de injeção em tanque ou em linha. A primeira consiste em injetar o CO₂ no fundo do tanque por meio de um difusor de rochas porosas que formam pequenas bolhas. Já a segunda consiste na injeção do gás na tubulação por meio de difusores (SENAI, 2014).

2.2.10 ENVASE

Envase é o procedimento de enlatamento, engarrafamento ou embarrilhamento do produto. É a etapa dispende de mais custos em termos de matéria prima e mão de obra. Existem equipamentos específicos para cada um tipo de embalagem (FILHO, 2010).

2.3 SANITIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Como em qualquer outro bioprocesso, a limpeza é parte fundamental. No processo cervejeiro caseiro, para evitar contaminação é necessário que todo o equipamento seja lavado e posteriormente sanitizado com hipoclorito de sódio (2%) ou iodo (12,5g/ml) para evitar crescimento de micro-organismos indesejados (PALMER, 2006).

Na indústria, existem vários sistemas de limpezas e quanto a sua realização eles podem ser classificados como: processo manual, por imersão, aspersão ou CIP. A seleção do sistema de limpeza vai depender do resíduo a ser removido (LEITÃO, 1975).

O CIP (*Cleaning in place*) consiste na limpeza de todos os equipamentos e tubulações em uma planta sem necessidade de desmontá-la com mínima ou nenhuma interferência do operador (TAMIME, 2008). Esse processo consiste em fazer transitar água, detergentes e sanitizantes pelo interior das tubulações e equipamentos retirando dessa forma todas as sujidades acumuladas em pontos da planta (EVANGELISTA, 2008).

A etapa de limpeza é muito importante pois está diretamente ligada com a qualidade do produto, com aspectos ambientais e econômicos. Em relação a qualidade, o CIP é fundamental pois se feito de maneira inadequada, microrganismos contaminantes podem comprometer a segurança do produto. No aspecto ambiental a etapa da limpeza gera bastante resíduos, pois são utilizadas águas e agentes químicos sendo de fundamental importância o correto descarte ao final do processo (CARRERA, 2015). Economicamente falando, o sistema aparenta ter um custo elevado, porém traz vantagens a longo prazo como menor custo com mão de obra, maior economia de produtos e maior segurança dos funcionários. (MELERO JUNIOR, 2011).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho utilizou dados da dissertação de mestrado “(PGCTA/UFRPE) COUTINHO, U.; Capacidade fermentativa da *Saccharomyces cerevisiae* imobilizada em alginato de cálcio para produção de cerveja 2020” onde consta dados de projeto como temperaturas, quantidades relativas de insumo e tempo de operação todos devidamente evidenciados nos resultados.

Com os dados da capacidade fermentativa, quantidades relativas de insumos, temperatura, tempo das etapas bem como a base de cálculos para os balanços, foi então montada uma planilha dinâmica no aplicativo Microsoft Excel correlacionando cada etapa num ambiente único que permite variação de parâmetros. O volume de produção escolhido para este trabalho foi de 150L de cerveja.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DIAGRAMA DE PROCESSO

A figura 1 mostra o diagrama do processo cervejeiro em questão. O malte (0) passa pela etapa de moagem onda há perdas (1) e o malte moído (2) é encaminhado para etapa de mosturação juntamente com a água (3) onde serão aquecidos para promover a sacarificação do mosto. Esta etapa dura 90 minutos e existe perdas com água e casca (4). O mosto primário (5) segue para etapa de clarificação. A água de clarificação é aquecida no tanque de aquecimento e esta etapa tem duração de 90 minutos devendo começar em sincronia com a mosturação. Uma vez aquecida a água (6) segue para etapa de clarificação. Nesta etapa o bagaço (7) é filtrado e removido do processo. O mosto clarificado (8) segue para etapa de fervura onde é adicionado o lúpulo (9) e aquecido até a ebulação perdendo água na forma de vapor (10). Ao final da fervura, o mosto passa pela etapa de *whirlpool* onde há decantação do *trub* quente (11) e redução de temperatura até 95°C. O mosto quente (12) segue para etapa de resfriamento no trocador de calor e o mosto frio (13) segue para etapa de aeração onde o oxigênio (14) é adicionado por meio de um tubo difusor. O mosto aerado (15) segue para o fermentador. Este fermentador possuirá uma cesta removível onde se alojará a levedura (16). Durante o processo existe formação de uma corrente gasosa (17) que sairá por cima. A cerveja verde (18) segue para etapa de maturação e após maturada (19) seguirá para etapa de carbonatação. Nesta última etapa gás carbônico sob pressão (20) é injetado por pedra difusora e parte se alojará no headspace do fermentador (21) e a cerveja carbonatada (22) segue para etapa de envase que não será abordada neste projeto.

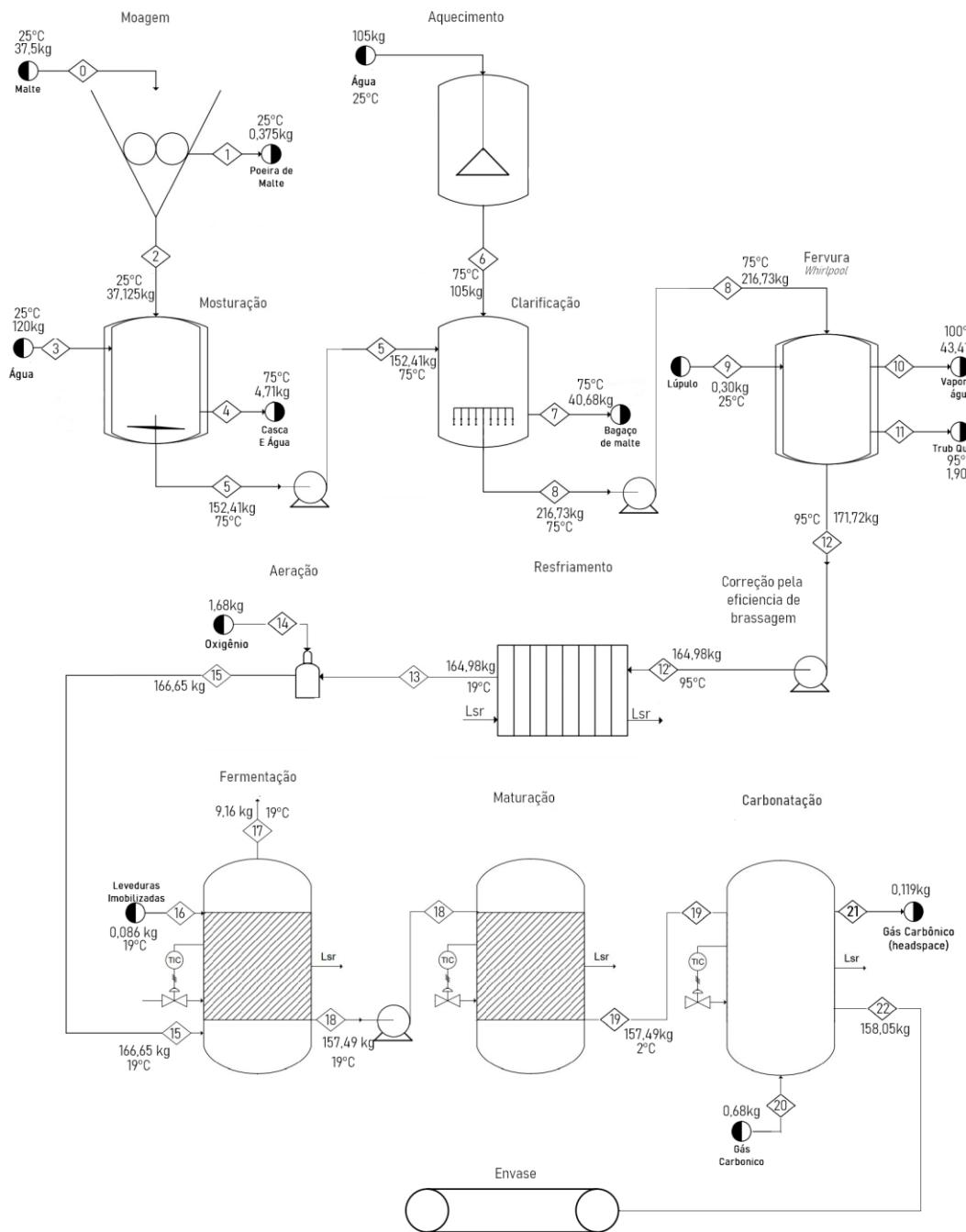


Figura 1 – Diagrama do processo

4.2. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

De maneira geral o balanço de massa global para um sistema aberto pode ser escrito conforme a seguinte equação:

$$\sum \text{Entrada} + \sum \text{Geração} = \sum \text{Acúmulo} + \sum \text{Saida} + \sum \text{Consumo} \quad (3)$$

Essa equação será amplamente utilizada na etapa de fermentação pois é a única etapa que possui geração e consumo. Já em para outras etapas onde não foram consideradas reações químicas a mesma pode ser simplificada em:

$$\sum \text{Entrada} = \sum \text{Saida} \quad (4)$$

A equação fundamental da calorimetria será extensamente usada com exceção da etapa de fermentação por possuir calores envolvidos nas transformações químicas das matérias. A troca de calor efetiva, o calor latente e a potência acumulada podem ser calculados por:

$$Q = m * c_p * \Delta T \quad (5)$$

$$Q = m H_L \quad (6)$$

$$P = \frac{Q_{total}}{t} \quad (7)$$

4.2.1. MOAGEM

A figura 2 representa a etapa de moagem. O malte (0) entra no processo gerando uma quantidade perdas (1) e o malte moído (2) sai desta etapa.

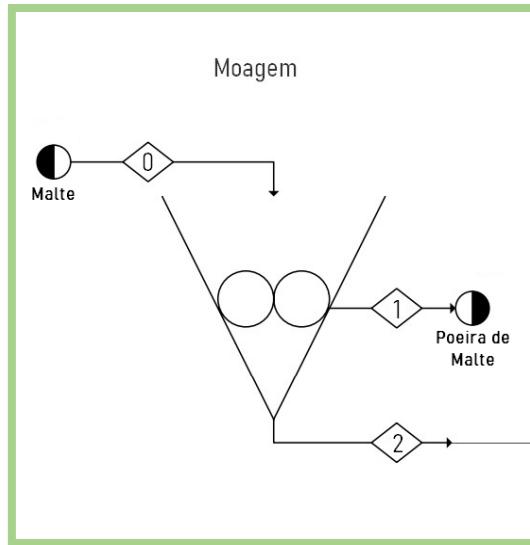


Figura 2 - Diagrama de moagem.

O cálculo da massa zero de malte por batelada (m_0) foi feito utilizando concentração relativa de malte 250g para cada litro de cerveja produzida (COUTINHO, 2020). Sendo o volume total de produção 150L de cerveja, chega-se à massa de entrada de malte.

$$m_0 = c_{malte} V_{cerveja} \quad (8)$$

$$m_0 = 250 \frac{g}{L} * 150L * \frac{1kg}{1000g} \quad (9)$$

$$m_0 = 37,5 kg \quad (10)$$

A perda de massa no processo de moagem é de cerca de 1% da massa total do malte. Uma parcela do malte forma poeira e dispersa no ar enquanto outra fica presa no equipamento de moagem (SAMMI JUNIOR *et al.* 2019). Sendo assim a massa perdida (m_1) pode ser calculada

$$m_1 = 0,01 m_0 \quad (11)$$

$$m_1 = 0,01 * 37,5kg \quad (12)$$

$$m_1 = 0,375kg \quad (13)$$

A massa de saída desta etapa m_2 é calculada por tanto pela equação geral do balanço de massa.

$$m_2 = m_0 - m_1 \quad (14)$$

$$m_2 = 37,5 - 0,375 \quad (15)$$

$$m_2 = 37,125 \text{ kg} \quad (16)$$

Sendo a composição do malte 61% em amido, 9% de proteína 5% de água e 25% de casca (SAMMI JUNIOR *et al.* 2019), pode-se caracterizar cada uma das correntes diagramadas acima em termos desses componentes (tabela 1):

Tabela 1 – Balanço de massa da moagem

	0	1	2
Temperatura(°C)	25	25	25
Pressão(bar)	1	1	1
Massa(kg)	37,5	0,375	37,125
Componente			
Açúcar	22,875	0,229	22,65
Proteína	3,375	0,034	3,34
Água	1,875	0,019	1,86
Casca	9,375	0,094	9,28

4.2.2. MOSTURAÇÃO

Nos cálculos a seguir é considerada condição ideal com 100% de eficiência em extração e clarificação para posterior correção pela grandeza chamada de eficiência de brassagem.

Na figura 3 é representada a etapa de mosturação. O malte moído (2) e água (3) alimenta o tanque e são aquecidos. Nesta etapa existe perdas (4) e a saída (5).

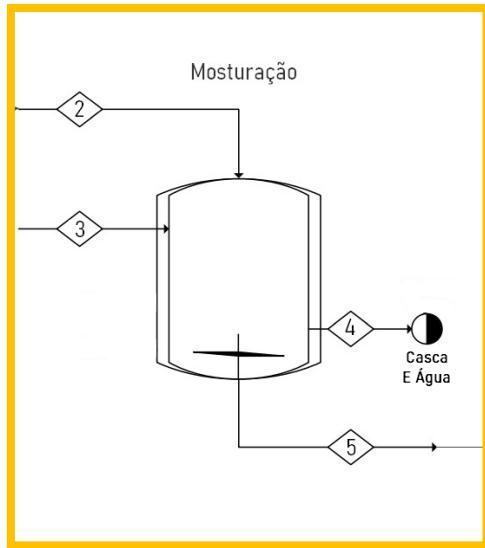


Figura 3 - Diagrama de mosturação.

O Volume de água de brassagem utilizado segue a relação $V_{\text{água}}/V_{\text{Mosto}} = 0,8$ (COUTINHO, 2020). A Corrente 3 é água de mostura e sua massa m_3 pode ser calculada, neste projeto, por:

$$m_3 = R_{\text{água/mosto}} * V_{\text{mosto}} * d_{\text{água}} \quad (17)$$

$$m_3 = 0,8 * 150L * 1 \frac{kg}{L} \quad (18)$$

$$m_3 = 120kg \quad (19)$$

A massa m_4 de perdas tem valor de 3% do total que entra e é composta por água e casca em igual proporção (SAMMI JUNIOR *et al.* 2019), logo:

$$m_4 = 0,03 * (m_3 + m_2) \quad (20)$$

$$m_4 = 0,03(120 + 37,125) \quad (21)$$

$$m_4 = 4,71kg \quad (22)$$

$$m_{\text{casca},4} = m_{\text{água},4} = 2,36 kg \quad (23)$$

A massa de saída m_5 pode ser calculada pela equação de balanço global e para cada componente.

$$m_5 = m_2 + m_3 - m_4 \quad (24)$$

$$m_5 = 37,125 + 120 - 4,71 \quad (25)$$

$$m_5 = 152,41 kg \quad (3)$$

Com esses valores, a tabela 2 desta etapa é apresentada:

Tabela 2 – Balanço de massa para etapa de mosturação

	2	3	4	5
Temperatura(°C)	25	25	75	75
Pressão(bar)	1	1	1	1
Massa(kg)	37,125	120	4,71	152,41
Componente				
Açúcar	22,65	0	0	22,65
Proteína	3,34	0	0	3,34
Água	1,86	120	2,36	119,50
Casca	9,28	0	2,36	6,92

A corrente de saída caracterizada em açúcar, proteína, água e casca. O valor da massa de casca foi de 6,92kg. Esse valor é importante para os cálculos de balanço da etapa seguinte de filtração.

Nesta etapa ainda existe o aquecimento da água de mostura e do malte até a temperatura de mosturação 66°C para a sacarificação do mosto. Logo em seguida, é necessário aquecer a mistura até a temperatura de *mash-out* 75°C. A duração desta etapa é de 90 minutos (COUTINHO, 2020) por tanto calculando os calores chega-se aos resultados (Tabela 3).

Tabela 3 – Balanço de Energia para a mosturação

	Massa	T_i	T_f	Calor	Potência
	Kg	°C	°C	kJ	W
Água	120	25	66	20595,1	-
Malte	37,125	25	66	2803,8	-
<i>Mash</i>	157,125	66	75	5417,5	-
Total				28816,4	5336,4

O sistema como um todo apresenta uma demanda de potência de 5336W. Esse valor será utilizado na etapa de dimensionamento e especificação técnicas.

4.2.3 CLARIFICAÇÃO

A figura 4 representa a etapa de clarificação. A água de clarificação (6) entra no processo o bagaço do malte(7) é retirado e massa de mosto clarificado (8) segue para etapa seguinte.

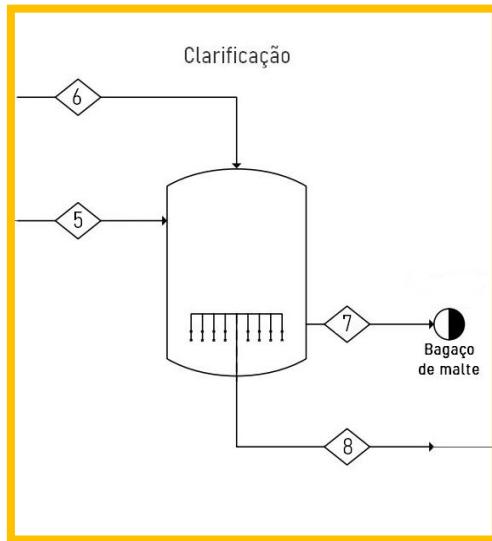


Figura 4 – Diagrama de clarificação

A etapa de clarificação, além da corrente 5 há também entrada da corrente 6 de água de clarificação que foi calculando utilizando a relação $V_{água}/V_{mosto} = 0,7$. A Massa de água de lavagem m_6 pode ser calculada neste projeto por:

$$m_6 = R_{água/mosto} * V_{mosto} * d_{água} \quad (4)$$

$$m_6 = 0,7 * 150 \text{ L} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \quad (5)$$

$$m_6 = 105 \text{ kg} \quad (6)$$

A corrente 7 é constituída do bagaço do malte. Em condições ideais, sua composição é de 0,37% em açúcares, 5% em proteína, 77,61% em água, 17,02% em casca (SAMMI JUNIOR *et al.*, 2019). Considerando ainda que toda casca é filtrada, determina-se a massa da corrente m_7 feito a partir do balanço de massa da componente casca nesta etapa. A massa de casca na corrente 5 já foi determinada e pode ser consultada na tabela 2.

$$m_{5,casca} = m_{7,casca} \quad (30)$$

$$m_{5,casca} = x_{7,casca} * m_7 \quad (31)$$

$$m_7 = \frac{m_{5,casca}}{x_{7,casca}} \quad (32)$$

$$m_7 = \frac{6,92 \text{ kg}}{0,17} \quad (33)$$

$$m_7 = 40,6 \text{ kg} \quad (34)$$

De posse do valor total da massa de bagaço a massa 8 pode ser calculada pela equação de balanço global:

$$m_8 = m_5 + m_6 - m_7 \quad (7)$$

$$m_8 = 152,4 + 105 - 40,6 \quad (8)$$

$$m_8 = 216,7 \text{ kg} \quad (9)$$

Uma vez determinadas a composição das correntes anteriores, a composição da corrente 8 é calculada para cada componente (tabela 4).

Tabela 4 - Balanço de massa para a clarificação

	5	6	7	8
Temperatura(°C)	75	75	75	75
Pressão(bar)	1	1	1	1
Massa(kg)	152,41	105	40,68	216,73
Componente				
Açucar	22,65	0	0,15	22,50
Proteína	3,34	0	2,034	1,31
Água	119,50	105	31,57	192,92
Casca	6,92	0	6,92	0,0

A tabela acima mostra que se forma uma massa de 40,6kg de bagaço. Esse resíduo pode ser direcionado para a pecuária servindo como ração de ruminantes.

A água de clarificação deverá entrar a 75°C (COUTINHO, 2020) e por isso passa por uma etapa de aquecimento anterior a sua entrada na tina de clarificação.

A figura 5 representa o aquecimento da água de clarificação(6).

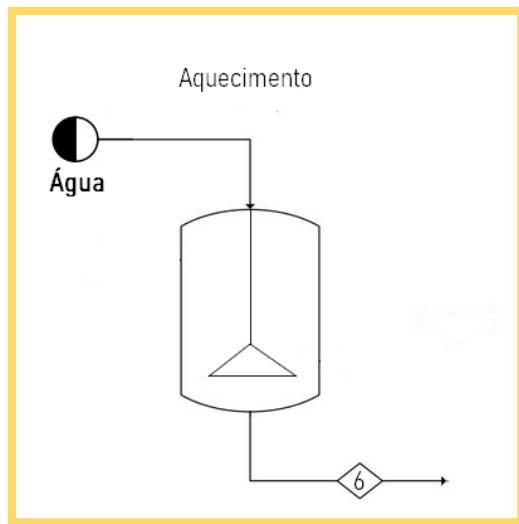


Figura 5 – Diagrama de aquecimento

Sabendo que a massa de água para esta etapa é 105kg calcula-se o calor necessário para aquecer essa massa de água. A água de filtração entra depois da etapa de mosturação logo o tempo de seu aquecimento será igual ao tempo de mosturação de 90 minutos e ambos as etapas começarão no meu instante. Utilizando a equação fundamental da calorimetria (equação 3) e equação de potência média (equação 5):

Tabela 5 – Balanço de energia para o aquecimento

Massa	T _i	T _f	Calor	Potência
Água	Kg	°C	°C	kJ
105	25	75	21976,5	W
			4069,72	

4.2.4 FERVURA E WHIRLPOOL

Na etapa de fervura (figura 6) acontece a adição do lúpulo (9) e aquecimento até ebulação do mosto. Com isso perde-se massa com vapor de água (10), com a formação do *trub* quente (11) e o mosto quente (12) sai desta etapa.

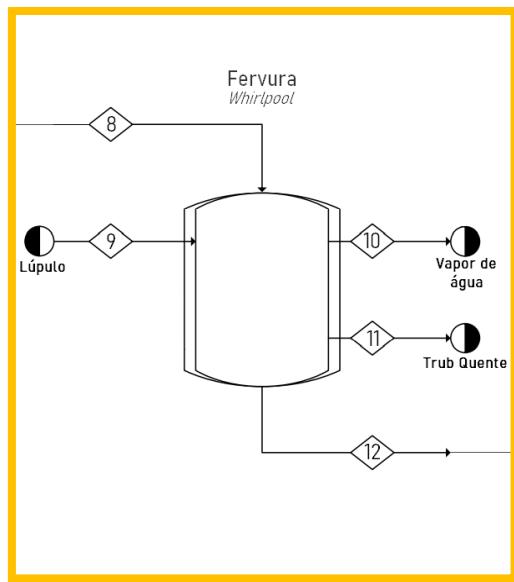


Figura 6 – Diagrama de fervura

A massa de lúpulo foi calculada a uma concentração relativa de 2g por cada litro de mosto produzido (COUTINHO, 2020).

$$m_9 = c_{lúpulo} * V_{mosto} \quad (10)$$

$$m_9 = 2 \frac{g}{L} * 150 L * \left[\frac{1kg}{1000g} \right] \quad (11)$$

$$m_9 = 0,3 \text{ kg} \quad (40)$$

A massa que evapora é composta por vapor de água essencialmente. Perde-se cerca de 15% da água do mosto nesta etapa em uma fervura de 60 minutos (HOMINILÚPULO, 2017). A duração da fervura do mosto foi de 90 minutos (COUTINHO, 2020) o que permite estimar uma perda de 22,5% de água no mosto.

$$m_{10} = 0,225 * m_{água,8} \quad (41)$$

$$m_{10} = 0,225 * 192,92 \quad (42)$$

$$m_{10} = 43,41 \text{ kg} \quad (12)$$

Após ser concentrado o mosto passa pela etapa de *whirlpool* no qual forma-se o *trub*. O *Trub* decanta levando consigo a parte não solúvel do lúpulo, proteínas e uma quantidade de água. a porcentagem de lúpulo solúvel no mosto, ou seja, a lupulina é cerca de 3,8%. (BLEIER *et al.* 2013). O *trub* arrasta uma quantidade de água que é igual a massa de lúpulo adicionada (SAMMI JUNIOR *et al.*, 2019) Portanto a massa de *trub* (m_{11}) pode ser calculada:

$$m_{11} = m_{proteina,8} + m_{água arrastada} + m_{lúpulo,insolúvel} \quad (13)$$

$$m_{11} = 1,31 + 0,3 + 0,962 * 0,3 \quad (14)$$

$$m_{11} = 1,90\text{kg} \quad (15)$$

De posse dos valores calculou-se a massa de saída da etapa de fervura, ou seja, o mosto quente e seus componentes (tabela 6)

$$m_{12} = m_8 + m_9 - m_{10} - m_{11} \quad (16)$$

$$m_{12} = 216,63 + 0,3 - 43,41 - 1,90 \quad (17)$$

$$m_{12} = 171,72 \text{ kg} \quad (18)$$

Tabela 6 – Balanço de massa para a fervura

	8	9	10	11	12
Temperatura(°C)	75	25	100	95	95
Pressão(bar)	1	1	1	1	1
Massa(kg)	216,73	0,30	43,41	1,90	171,72
Componente					
Açucar	22,50	0	0	0	22,50
Proteína	1,31	0	0	1,31	0
Água	192,92	0	43,41	0,30	149,22
Lúpulo	0,00	0,3	0	0,29	0,01

É gerada uma massa de 1,90kg de *trub* quente como resíduo desta etapa. Esse *trub* poderá ser destinado para indústrias de biotecnologia para ser usado como meio de cultura celular.

O mosto entra na tina de fervura a temperatura de 75°C proveniente da etapa de filtração. Já o lúpulo é adicionado na temperatura ambiente de 25°C (COUNTINHO, 2020). Com os valores mencionados é possível o cálculo das quantidades de calores envolvidas e potência acumulada do sistema (tabela 7)

Tabela 7 – Balanço de energia para a fervura

	Massa	Ti	Tf	Calor	Potência
	Kg	°C	°C	kJ	W
Mosto	216,73	75	100	22681	-
Lúpulo	0,3	25	100	41	-
Vapor de Água	43,41	-	-	97972	-
Total				120694,0	22350,74

A etapa de decantação ocorre com redução de 5°C na temperatura da mistura, por tanto, temperatura final deverá ser de 95°C antes de seguir para etapa de resfriamento (SENAI, 2014). A tabela 8 é apresentada:

Tabela 8 – Balanço de energia do *whirlpool*

	Massa	T_i	T_f	Calor
Mosto	171,72	100	95	-3594,18
Lúpulo	0,3	100	95	-2,76
Total				-3596,94

O mosto perde então cerca de 3596kJ de energia que é dissipada para o meio externo.

4.2.5 CORREÇÃO PELA EFICIÊNCIA DE BRASSAGEM

É fato que não é possível extrair todos os açucares do malte para o mosto. A eficiência da brasagem fica entre 60% e 80%. Ou seja, a quantidade de sólidos solúveis disponíveis no final da brasagem é menor que a calculada até então (BEERSCHOOL, 2021). Para este projeto usou-se o valor médio de 70% de eficiência de extração. Portanto coluna 12(mosto quente) da tabela de balanço de massa para fervura (Tabela 6) será atualizada. Mantendo apenas a quantidade de água e lúpulo constante.

Tabela 9 – Atualização dos valores da corrente 12

	12	12'
Temperatura(°C)	95	95
Pressão(bar)	1	1
Massa(kg)	171,72	164,98
Componente	0,00	0,00
Açúcar	22,50	15,75
Proteína	0,00	0,00
Água	149,22	149,22
Lúpulo	0,011	0,011

4.2.6 RESFRIAMENTO

A etapa de resfriamento (figura 7) o mosto quente (12) resfriado e sai do trocador (13)

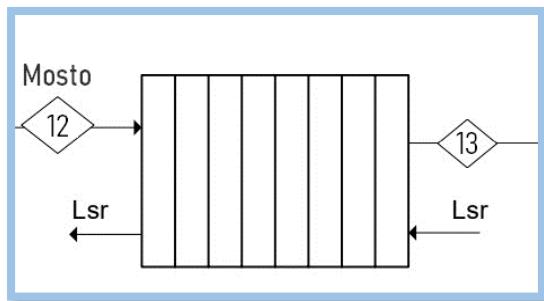


Figura 7 – Diagrama para o resfriamento.

O resfriamento do mosto é uma etapa onde a massa se conserva e ocorre a redução de temperatura até chegar até a temperatura de fermentação de 19°C (COUTINHO, 2020). Portanto:

$$m_{12'} = m_{13} \quad (19)$$

As temperaturas foram definidas de forma a gerar uma diferença de temperaturas de 10°C em ambos os lados do trocador (ANAPOLSKI E INDRUSIAK, 2015). Sendo a temperatura de entrada do mosto 95°C e a saída a 19°C calcula-se então a temperatura do líquido subresfriado (figura 8).

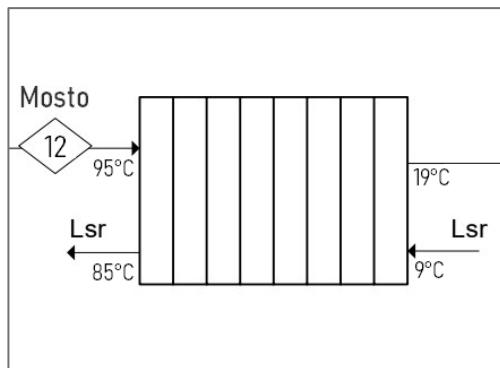


Figura 8 – Temperaturas de projeto.

A troca líquida de calor desta etapa foi calculada a partir do valor de massa do mosto, calor específico e variação da temperatura.

$$Q = m_{12'} * c_{p,mosto} * \Delta T \quad (51)$$

A massa de líquido sub resfriado L_{sr} necessária para promover tal variação foi calculada pela seguinte equação a partir do equilíbrio térmico.

$$m_L = \frac{Q}{c_{p,prop} * \Delta T} \quad (52)$$

Com isto chega-se tabela 10 de balanço de massa

Tabela 10 – Balanço de massa do trocador de calor

	12	13	Lsr1	Lsr2
Temperatura(°C)	95	19	9	85
Pressão(bar)	1	1	1	1
Massa(kg)	164,98	164,98	183,131	183,13
Componente				
Açúcar	15,75	15,75	-	-
Proteína	0,00	0,00	-	-
Água	149,22	149,22	-	-
Lúpulo	0,01	0,01	-	-

Existe um consumo de 180k de propilenoglicol por batelada que deve ser armazenado em temperatura ideal de 9°C conforme o projeto. Com valores de massa e temperaturas calcula-se o troca de calor envolvida nesta etapa (tabela 11).

Tabela 11 – Balanço de energia do trocador de calor

	Massa	Ti	Tf	Calor
	Kg	°C	°C	kJ
Mosto	164,98	95	19	-52484,5
Propilenogligol	183,13	9	85	52484,5

4.2.7 AERAÇÃO DO MOSTO

A aeração do mosto é uma etapa na qual o oxigênio é injetado na corrente. Neste projeto sua quantidade será limitada a partir da quantidade de açúcar destinada a respiração celular que neste projeto foi considerada 10% da quantidade total de açúcares. Na figura 9, o oxigênio (14) é adicionado no mosto frio (13) resultando no mosto aerado (15).

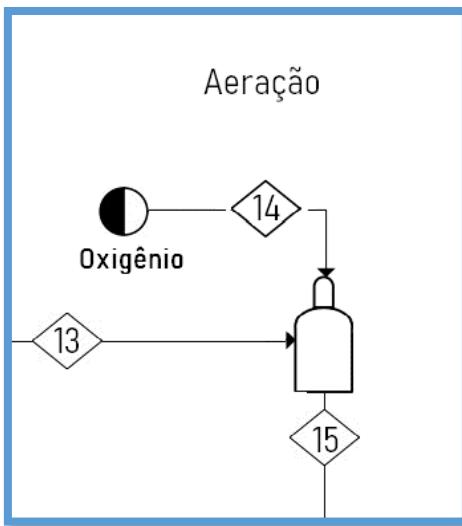


Figura 9 – Diagrama da aeração

De acordo com dados de estequiometria de reação (figura 2) a massa de oxigênio necessária pode ser calculada por:

$$n_{O_2} = 6 * n_{acucar} \quad (53)$$

$$m_{14} = M_{O_2} = 6 * \frac{MM_{O_2}}{MM_{acucar}} * M_{acucar} \quad (20)$$

$$m_{14} = 6 * \frac{32\text{g/mol}}{180\text{g/mol}} * (0,1 * 15,75\text{kg}) \quad (21)$$

$$m_{14} = 1,68\text{kg} \quad (22)$$

Com isso calcula-se a massa de saída m_{15} pela equação de balanço

$$m_{15} = m_{13} + m_{14} \quad (23)$$

$$m_{15} = 164,7 + 1,68 \quad (24)$$

$$m_{15} = 166,65\text{kg} \quad (25)$$

A tabela 12 de balanço de massa para esta etapa fica:

Tabela 12 – Balanço de massa para aeração

	13	14	15
Temperatura(°C)	19	19	19
Pressão(bar)	1	1	1
Massa(kg)	164,98	1,680	166,65
Componente			
Açúcar	15,75	0	15,74
Água	149,22	0	149,21

Lúpulo	0,011	0	0,011
Oxigênio	0,00	1,68	1,68

4.2.8 FERMENTAÇÃO

Na etapa de fermentação o mosto frio e as leveduras imobilizadas são adicionadas ao tanque dando início a fermentação alcoólica. Calcula-se primeiro as quantidades relativas as transformações promovidas pela levedura: consumo de açucares e produção de etanol, CO_2 e H_2O para depois distribuir com valores corretos em cada uma das correntes. Na figura 10, as leveduras imobilizadas (16) entram junto com o mosto frio (15). Ao decorrer da fermentação uma corrente gasosa (17) é gerada e ao final dela a cerveja verde (18) sairá do fermentador.

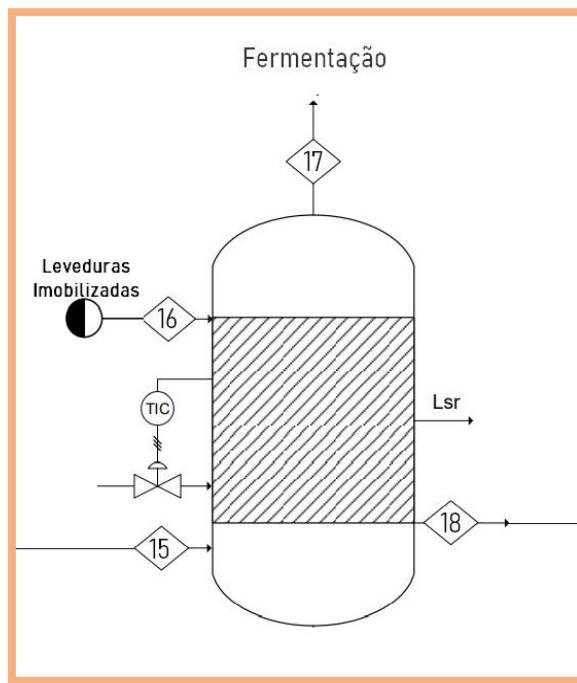


Figura 10 – Diagrama da fermentação.

4.2.8.1. Cálculo da massa de etanol produzida

A produtividade de etanol no sistema de leveduras imobilizadas estudado foi $P = 0,902\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ e a fermentação teve duração de 53 horas (COUTINHO, 2020) Sendo o volume de cerveja desejado de 150L pode-se calcular a quantidade de etanol produzida:

$$M_{\text{etanol}} = P_{\text{etanol}} * V_{\text{cerveja}} * t \quad (60)$$

$$M_{etanol} = 7,19kg \quad (61)$$

4.2.8.2 Cálculo da quantidade de açúcar consumida na fermentação

A partir da relação estequiométrica, pode-se desenvolver a seguinte equação e entrar com as grandezas explicitadas.

$$2 * n_{açucar} = n_{etanol} \quad (62)$$

$$m_{açucar} = 0,5 * \frac{MM_{açucar}}{MM_{etanol}} * m_{etanol} \quad (26)$$

$$m_{açucar} = 14,06kg \quad (27)$$

4.2.8.3 Cálculo da quantidade de açúcar na respiração

$$m_{açucar,r} = 10\% * M_{açucar,mosto} \quad (28)$$

$$m_{açucar,r} = 1,575kg \quad (29)$$

4.2.8.4 Cálculo da quantidade de CO_2 produzida.

A estequiometria das reações permite equacionar:

$$M_{CO_2,fermentação} = 2 * \frac{MM_{CO_2}}{MM_{açucar}} * M_{açucar,fermentação} = 6,87kg \quad (30)$$

$$M_{CO_2,respiração} = 6 * \frac{MM_{CO_2}}{MM_{açucar}} * M_{açucar,respiração} = 2,31kg \quad (31)$$

$$M_{CO_2,total} = 6,87kg + 2,31kg = 9,18kg \quad (32)$$

4.2.8.5 Cálculo da massa de água produzida na respiração.

Por estequiometria de reação:

$$n_{H_2O} = 6 * n_{açucar,r} \quad (70)$$

$$M_{H_2O} = 6 * \frac{MM_{H_2O}}{MM_{açucar}} * M_{açucar,respiração} \quad (71)$$

$$M_{H_2O} = 6 * \frac{18g/mol}{180g/mol} * 1,575 = 0,945kg \quad (33)$$

4.2.8.6 Determinação das correntes

A cerveja retém uma certa quantidade de CO₂ que é limitada pela solubilidade desse gás na água. A solubilidade do gás carbônico em água na temperatura de fermentação é S=1,08gL⁻¹ (BRIGGS, 2004),

$$m_{CO_2,soluvel} = \text{Solubilidade} * \text{Volume} \quad (34)$$

$$m_{CO_2,soluvel} = 1,08 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 150 \text{ L} * \frac{1}{1000} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \quad (35)$$

$$m_{CO_2,Soluvel} = 0,16\text{kg} \quad (36)$$

Portanto, o balanço de massa do componente gás carbônico para essa corrente será:

$$m_{CO_2,17} = m_{CO_2 \text{ total}} - m_{CO_2 \text{ soluvel}} \quad (37)$$

$$m_{CO_2,17} = 9,18\text{kg} - 0,16\text{kg} \quad (38)$$

$$m_{CO_2,17} = 9,02\text{kg} \quad (39)$$

O gás carbônico remanescente arrasta consigo uma quantidade de 2% em massa de etanol produzido devido sua volatilidade (SAMMI JUNIOR, et al. 2019). Logo a massa do componente etanol m_{etanol,17} pode ser calculada por

$$m_{etanol,17} = 2\% * M_{etanol \text{ produzido}} \quad (40)$$

$$m_{etanol,17} = 0,14 \text{ kg} \quad (80)$$

A massa total da corrente 17 (m₁₇) é calculada pela soma das duas componentes.

$$m_{17} = m_{CO_2,17} + m_{etanol,17} \quad (41)$$

$$m_{17} = 9,02\text{kg} + 0,14\text{kg} \quad (82)$$

$$m_{17} = 9,16\text{kg} \quad (83)$$

A corrente 18 é a cerveja verde, composta de água, etanol não arrastado, gás carbônico solúvel, lupulina e açúcar residuais.

A massa de açúcar residual é achada fazendo o balanço de massa desse componente sabendo levedura consome açúcar por duas vias, fermentação e respiração celular:

$$m_{acucar,residual} = m_{acucar,mosto} - m_{acucar,lev} \quad (42)$$

$$m_{acucar,residual} = 15,75kg - (14,06kg + 1,575kg) \quad (85)$$

$$m_{acucar,residual} = 0,11kg \quad (43)$$

Assim sendo, determina-se a massa total de cerveja verde produzida m_{18}

$$m_{18} = m_{h2o,15} + m_{h2o,resp} + (98\% m_{etanol,prod}) + m_{CO2,sol} + m_{lupulo} + \dots \quad (44)$$

$$m_{18} = 149,22kg + 0,945kg + (98\% * 7,19kg) + 0,16kg + 0,011kg + 0,11kg \quad (45)$$

$$m_{18} = 157,49kg \quad (46)$$

Determinada as correntes e seus componentes, é apresentada a tabela 13.

Tabela 13 – Balanço de massa para a fermentação

	15	16	17	18
Temperatura (°C)	19	19	19	19
Pressão (bar)	1	1	1	1
Massa (Kg)	166,65	0,086	9,16	157,49
Componente		Consumo	Produção	
Açúcar	15,75	15,63	-	0,11
Água	149,22	-	0,945	150,16
lúpulo	0,01	-	-	0,01
O ₂	1,68	1,68	-	0,00
CO ₂	0	-	9,18	9,02
Álcool	0	-	7,19	0,14
				7,04

Observa-se uma diminuição na massa da cerveja em relação ao mosto. Resultado esperado, pois, a cerveja diminui sua densidade ao longo da fermentação. Apenas uma pequena parcela do CO₂ total é solúvel na cerveja. A quantidade esta ligada a pressão de operação que nesta etapa do projeto é de 1bar. Portanto para aumentar a quantidade de gás carbônico na cerveja e reduzir o consumo na etapa de carbonatação pode ser feita uma fermentação pressurizada ao fechar a válvula de escape para os gases.

Para os cálculos de calores foram estimados para esta etapa calculando as entalpias de reação (fermentação e respiração) com base nos calores de formação de cada substância (apêndice A).

$$\Delta H_{fermentação} = 2 * \Delta H_{CO2}^f + 2 * \Delta H_{etanol}^f - (\Delta H_{acucar}^f) \quad (90)$$

$$\Delta H_{respiração} = 6 * \Delta H_{CO2}^f + 6 * \Delta H_{h2o}^f - (\Delta H_{acucar}^f + 6 * \Delta H_{O2}^f) \quad (91)$$

De posse dos calores de reação bem como da quantidade de açúcar gasta em cada etapa, chega-se à quantidade de calor total para esta etapa (tabela 14):

Tabela 14 – Calores calculados da etapa de fermentação

	Massa	Quantidade	Entalpia	Calor
	Kg	Mol	kJ/mol	kJ
Fermentação	14,06	78,1	-76	-5936,9
Respiração	1,57	8,75	-2812	-24600,3
Total				-30537,2

Logo o valor calculado do calor total liberado foi de 30573 kJ em módulo. Devido à complexidade da reação de fermentação de sua cinética o fermentador será equipado com sistema de refrigeração controlada.

4.2.9 MATURAÇÃO

A etapa de maturação (figura11) a cerveja verde (18) permanece no tanque até o final esta etapa quando enfim sai a cerveja maturada (19).

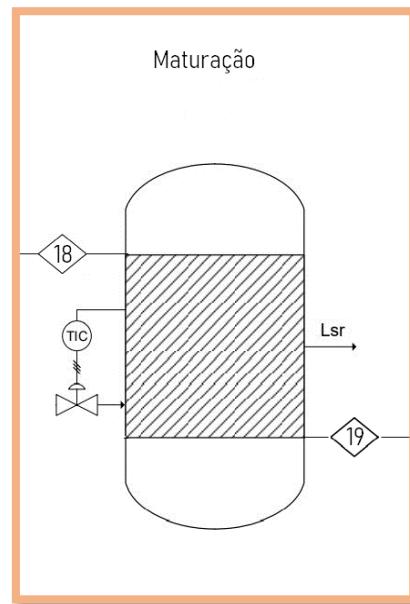


Figura 11 – Diagrama para a maturação

Nesta etapa foi considerado que não houve perda de massa de cerveja (tabela 15). A maturação foi feita a uma temperatura de 2°C por 5 dias (COUTINHO, 2020).

Tabela 15 – Balanço de massa para maturação

Corrente	18	19
Temperatura (°C)	19	2
Pressão (bar)	1	1
Massa (Kg)	157,49	157,49
Componente		
Açúcar	0,11	0,11
Água	150,16	150,16
lúpulo	0,01	0,01
O ₂	0,00	0,00
CO ₂	0,16	0,16
Álcool	7,04	7,04

Para refrigerar a cerveja até a temperatura adequada de 2°C será necessária uma quantidade de calor removida apresentada na tabela 16.

Tabela 16 – Balanço de energia para maturação

Massa	T _i	T _f	Calor
Kg	°C	°C	kJ
Mosto	157,48	19 2	-11206,4

Para atingir essa temperatura deverá aumentar a vazão de líquido subresfriado logo após a transferência no sistema de refrigeração do fermentador.

4.2.10. CARBONATAÇÃO

Na etapa de carbonatação (figura 12) a cerveja maturada (19) será adicionada gás carbônico (20). Uma parte será perdida para o headspace(21) e a cerveja carbonatada(22) seguirá para etapa de envase.

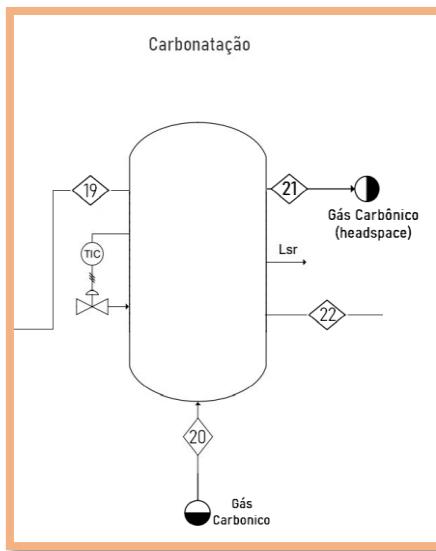


Figura 12 – Diagrama de carbonatação

A Carbonatação é a etapa onde há injeção de gás carbônico pressurizado na cerveja. Parte desse gás carbônico será absorvido e parte será alojada no headspace. Logo o balanço de massa desse componente fica:

$$CO_{2,total} = CO_{2,cerveja} + CO_{2,headspace}$$

Cerveja tipo ale podem ser carbonatadas com volumes entre 2,20 e 2,60 V/V (BEERSCHOOL, 2021). Para este projeto o foi considerado um valor médio de 2,4 volumes permitindo o cálculo da quantidade de CO₂ por unidade de volume na cerveja. Sendo a densidade de CO₂ nas CNTP igual a 1,96g/L (BEERSCHOOL, 2021).

$$C_{CO_2,cerveja} = (V/V)_{CO_2} * \rho_{CO_2}^{cntp} \quad (92)$$

$$C_{CO_2,cerveja} = 2,4 * 1,96 \frac{g}{L} \quad (47)$$

$$C_{CO_2,cerveja} = 4,82 \frac{g}{L} \quad (48)$$

A equação abaixo permite relacionar concentração de CO₂ função da temperatura e pressão do sistema (BEERSCHOOL, 2021)

$$C_{CO_2,cerveja} = 10 * (P + 1,013) * 2,71^{(-10,73 + \frac{2617,25}{T + 273,15})} \quad (49)$$

Isolando P = g(C,T) tem-se:

$$P = \frac{C_{CO_2,cerveja}}{10 * 2,71^{(-10,73 + \frac{2617,25}{T + 273,15})}} - 1,013 \quad (50)$$

A temperatura de carbonatação foi considerada a mesma da maturação(2°C) pois esta etapa será realizada no mesmo tanque. Com é achada a pressão manométrica na qual o sistema deverá chegar para atingir a concentração desejada. Logo fazendo $P=g(C,T) = g(4,82 ; 2)$:

$$P_{headspace} = 1 + 0,603 = 1,603 \text{ bar} \quad (51)$$

Uma vez achada pressão do headspace pode ser calculado a quantidade de CO_2 nesta região visto que gases sob baixas pressão tendem a se comportar como gases ideais. Logo usando a equação geral dos gases ideais:

$$C_{headspace} = \frac{P_{head} * MM_{CO_2}}{R * T} \quad (52)$$

$$C_{headspace} = \frac{1,603 * 44}{0,082 * (2 + 273)} \quad (53)$$

$$C_{headspace} = 3,2 \text{ g/L} \quad (100)$$

Ágora calculando a quantidade total de CO_2 necessária para a operação

$$m_{total} = (C * V)_{cerveja} + (C * V)_{headspace} \quad (101)$$

$$m_{total} = (4,82 \text{ g/L} * 150 \text{ L}) + (3,2 \text{ g/L} * 37,5 \text{ L}) \quad (54)$$

$$m_{total} = 0,84 \text{ kg} \quad (55)$$

A cerveja maturada já possui uma quantidade de CO_2 portanto a quantidade de CO_2 de entrada m_{20} será:

$$m_{20} = m_{CO_2, total} - m_{CO_2, 19} \quad (56)$$

$$m_{20} = 0,84 \text{ kg} - 0,16 \text{ kg} \quad (57)$$

$$m_{20} = 0,68 \text{ kg} \quad (58)$$

Já a massa de gás carbônico no headspace m_{21} já foi calculado anteriormente:

$$m_{21} = (C * V)_{headspace} \quad (59)$$

$$m_{21} = 3,2g/L * 37,5L \quad (60)$$

$$m_{21} = 0,12kg \quad (61)$$

A cerveja absorverá a quantidade de massa que é a diferença da entrada da saída

$$m_{CO2,abs} = m_{20} - m_{21} \quad (62)$$

$$m_{CO2,abs} = 0,68kg - 0,12kg \quad (63)$$

$$m_{CO2,abs} = 0,56kg \quad (64)$$

Logo a massa de cerveja carbonatada será

$$m_{22} = m_{19} + m_{CO2,abs} \quad (65)$$

$$m_{22} = 157,4kg + 0,56kg \quad (66)$$

$$m_{22} = 158,0kg \quad (67)$$

A tabela de balanço 17 mostra os valores pertinentes para esta etapa.

Tabela 17 – Balanço de massa para etapa de carbonatação

Corrente	19	20	21	22
Temperatura (°C)	2	2	2	2
Pressão (bar)	1	1,6	1,6	1
Massa (Kg)	157,49	0,681	0,119	158,05
Componente				
Açúcar	0,11	0	0	0,11
Água	150,16	0	0	150,16
Lúpulo	0,01	0	0	0,01
CO ₂	0,16	0,681	0,1193	0,72
Álcool	7,04	0	0	7,04

Para este processo são necessários 0,84kg de carbônico. Para diminuir esse valor pode realizar fermentações com pressão por simples fechamento da válvula. Com o aumento da pressão a solubilidade do CO₂ na cerveja aumenta gerando uma perda menor.

4.3. ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS

O modelo foi proposto baseado objetivando uma menor área de planta bem como menor custo, uma vez que certas etapas podem ser realizadas num mesmo equipamento.

4.3.1. MOINHO DE ROLOS

Para a moagem será empregado um moinho de dois rolos (figura13). A escolha do moinho foi baseada no tipo de moagem empregada que neste caso é a moagem a seco bem como no objetivo da granulometria específica para esta operação.



Figura 13 – Moinho de rolos.

O moinho deve ter capacidade para moer 37,5kg de malte assim como calculado no balanço de massa e por isso deve conter uma moega que comporte essa massa e uma folga 20% do espaço total. Portanto a moega deverá possuir capacidade para 47kg no mínimo.

Possui estrutura tubular em aço pintada, dois rolos em aço carbono levemente ranhurados com aplicação de cromo, acionamento por moto redutor. A moega de recebimento de malte em aço zinkado com capacidade de 50kg de malte devido disponibilidade no mercado. Possui estrutura tubular em aço carbono pintada e tensão 220 ou 380V Trifásico.

4.3.2. TINA DE MOSTURAÇÃO MONOBLOCO

Para etapa de brassagem é sugerido um tanque monobloco (figura 14) pela utilização simplificada e redução de custos. Neste equipamento o processo de mostura e clarificação ocorre simultaneamente. Enquanto ocorre a sacarificação o mosto irá recircular formando a torta de filtragem.



Figura 14 – Tina monobloco para brasagem.

Com isso ele deve ser capaz de receber primeiro o volume d'água de mostura e do malte o que totaliza um volume de 146L. Na segunda etapa, o bagaço de malte é removido abrindo espaço para a entrada d'água de lavagem. Com isso o sistema alcança um volume máximo 250L e deverá conter uma folga de segurança de 20%.

Possui um cesto filtrante com tela perfurada com capacidade útil de 37,5kg e guindaste de elevação com acionamento elétrico para erguer bagaço, executar a lavagem do mesmo e removê-lo do processo. Possui aquecimento por resistência tubular com potência de 6000W para a etapa de mosturação (valor calculado na tabela 3 somando 10% de perdas e arredondando) e parede dupla com revestimento, estrutura do tanque e tubulações construídas com aço inox 304 devido sua propriedade de resistência mecânica e química. Bomba sanitária de 1CV e tensão de operação é de 220V ou 380V trifásico.

4.3.3 TANQUE DE ÁGUA QUENTE

Para aquecer a água de clarificação a planta contará com um tanque de aquecimento com tampa (figura 15) e estrutura construída em aço inox 304. Deverá comportar um volume 105L e uma margem de segurança 20% o que retorna um volume total de 131L no mínimo. Por não possuir tanque com esta capacidade é sugerido um tanque de 150L. Com a potência calculada no balanço de energia para esta operação e ainda considerando uma margem de 10% de perda chega-se ao valor 4500W. Possui parede simples, e painel de controle com caixa plástica fixado aos pés. Tensão de alimentação 220V monofásico.



Figura 15 – Tanque de aquecimento de água.

4.3.4. BOMBA MÓVEL

O transporte dos fluidos envolvidos será promovido por uma bomba móvel (figura 16) de 1CV de potência. Possui carrinho para seu deslocamento e uma alimentação monofásica de 220V.



Figura 16 - Bomba centrífuga.

4.3.5. TROCADOR DE CALOR

Para etapa de resfriamento é sugerido um trocador de calor de placas (figura 17). Uma vez que as diferenças de temperatura de cada lado são iguais utilizando o método efetividade x NTU (ÇENGEL, 2012) é possível calcular a capacidade térmica mínima C_{min} . utilizando dados balanço de massa (tabela 10) chega-se a:

$$C_{min} = (m * c_p)_{mosto} = (m * c_p)_{prop} = 690,5$$

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{T_{frio,saida} - T_{frio,entrada}}{T_{quente,entrada} - T_{frio,entrada}} = \frac{85 - 9}{95 - 9} = 0,88$$

Com auxílio do gráfico efetividade x NTU (Anexo A). Tem-se que $NTU = 8$. A área de troca térmica pode ser determinada, na qual $U = 6120 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$ (ÇENGEL, 2012).

$$A = \frac{C_{min} * NTU}{U} = 0,90m^2$$



Figura 17 – Trocador de placas.

Em sequência do trocador de calor, será colocado um aerador de mosto (figura 18) para garantir a correta oxigenação.



Figura 18 – Aerador.

4.3.6. FERMENTADOR PARA LEVEDURAS IMOBILIZADAS

O tanque fermentador (figura 19) deverá conter um volume útil de 150L e uma margem de segurança de 20% no mínimo o que retorna uma capacidade total mínima de 187L. Como não são fabricados fermentadores com esta capacidade é apontado um fermentador 200L para o processo.

O tanque fermentador será construído em aço inox 304 com revestimento térmico, teto simples com calota. Possuirá um cesto interno para o alojamento das leveduras imobilizadas facilitando assim a sua separação da cerveja. Possui unidade condensadora acoplada ao fermentador e proteção em inox 430 com resfriamento total ou parcial, possibilitando utilização de meio fermentador. Acabamento interno e externo polido e passivado, válvula de segurança, manômetro e fundo cônicod de 60°. Tanque com capacidade de 200L devido a disponibilidade do mercado e tensão 220V monofásico.

A etapa de maturação e carbonatação ocorrerão no tanque fermentador com o objetivo de reduzir os custos associados a novos equipamentos. Para etapa de maturação a temperatura será reduzida de 19°C a 2°C pelo sistema de refrigeração do tanque. Para a carbonatação será utilizado um difusor de pedra e há necessidade de uma linha de CO₂ podendo esta ser implementada por empresas do setor.

Apesar do direcionamento para a técnica de leveduras imobilizadas, a planta ainda poderia servir para operar com leveduras livres visto que o cesto não atrapalharia a fermentação uma vez que ele pode ser removido do fermentador por completo.



Figura 19 – Tanque fermentador

4.4 ANÁLISE DE CUSTO

Foi-se então orçado valores dos equipamentos (tabela 18) que atendam todas as especificações acima citadas

Tabela 18 – Orçamento da planta

Moinho de Rolos 100Kg/h	R\$ 8.639,62
Monobloco + Panela de Aquecimento	R\$ 94.269,00
Bomba Móvel	R\$ 5.922,50
Aerador de Mosto	R\$ 2.145,40
Trocador de Calor	R\$ 2.777,25
Fermentador 200L	R\$ 20.690,38
Sistema de frio em fibra	R\$ 32.814,48
TOTAL	R\$ 167.258,63

O investimento necessário para a compra dos equipamentos totaliza R\$167.258,63. Não se foi orçado o valor do cesto de alojamento para as leveduras. Não se foi estudado os valores das utilidades, materiais de limpezas, nem sistema de envase. O ambiente a ser instalado esse projeto deverá conter linha de linha de CO₂ para etapa de envase. Este projeto pode ser implementado em ambientes de cervejaria que desejam construir plantas pilotos para experimentação de novas receitas, em laboratórios de universidades que desejam pesquisar o processo cervejeiro, ou ainda pode ser visto como uma opção de entrada para empreendedores do ramo.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho descreve os balanços de massa e energia necessários para se projetar uma planta piloto 150L operando com leveduras imobilizadas e calcular quantidade de insumos. Embora a levedura imobilizada não seja ainda muito utilizada neste mercado foi verificado que a planta piloto estudada difere minimamente de um processo tradicional podendo esta ser readequada com simples modificações tais como remoção do filtro da cerveja e inserção do cesto de alojamento para a levedura no fermentador.

6. REFERÊNCIAS

ABIA - Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação. Disponível em: <<https://www.abia.org.br/vsn/anexos/faturamento2019.pdf>> Acesso em: 06 de Outubro de 2021.

ALMONACID, S.F., NÁJERA, YOUNG, S.F., SIMPSON, R.J., ACEVEDO, C. A. A comparative study of stout beer batch fermentation using free and microencapsulated yeasts. *Food Bioprocess Technol*, vol. 5, p. 750-758, nov/2010

ANAPOLSKI, J. L. P.; INDRUSIAK, M. L S. Síntese energética de uma rede de trocadores de calor de um processo de refino de óleo de soja. *Perspectiva*. Erechim, v. 39, n. 146, p. 27-42, 2015. Disponível em: http://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/146_507.pdf. Acesso em: 14 mai. 2019.

AQUARONE, E.; BORZANI W.; SCHMIDELL W.; LIMA; A. U. *Biotecnologia Industrial*. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001

BAMFORTH, Charles. *Beer: tap into the art and science of brewing*. Oxford University Press, 2009

BEERSCHOL. Quanto de CO₂ vai pro headspace e quanto vai pra a cerveja? Cálculos de Carbonatação. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=57bheBHu7uc&t=1338s>> Acesso: 15 dez. 2021

BEERSCHOL. Rendimento e potencial. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=57bheBHu7uc&t=1338s>> Acesso: 15 dez. 2021

BLEIER, B. et al. *Craft Beer Production*. Pennsylvania: Pennsylvania: Senior Design Reports; 2013.

BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. *Brewing Science and Practice*. Flórida: CRC Press LLC and Woodhead Publishing Limited, 863p. 2004.

BRIGGS, Dennis E. et al. *Brewing: science and practice*. Elsevier, 2004.

BROCHIER, M. A. & Carvalho, S. 2009. Aspectos ambientais, produtivos e econômicos do aproveitamento de resíduo úmido de cervejaria na alimentação de

cordeiros em sistema de confinamento. Ciência e Agrotecnologia, 33, 1392-1399. 2009

CARRERA, Santiago Cadena. Validação do processo cip como ferramenta para melhorar a qualidade e a produtividade: estudo de caso em microcervejaria. 2015. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CARVALHO, L. G. Dossiê Técnico: Produção de Cerveja. Rio de Janeiro, 2007

CASCUDO, Luis da Câmara. História da alimentação no Brasil. São Paulo: Global, 4^a ed, 2011.

ÇENGEL, Y. A. Transferência de Calor e Massa – Uma Abordagem Prática. 7^a Ed. Editora McGraw-Hill Interamericana, 2012.

COSTA, G.E. de A.; QUEIROZ-MONICI, K. da S.; REIS, S.M.P.M.; OLIVEIRA, A.C. de. Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. Food Chemistry, v.94, p.327-330, 2006.

COUTINHO, U.; Capacidade fermentativa da *Saccharomyces cerevisiae* imobilizada em alginato de cálcio para produção de cerveja 2020 84f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural De Pernambuco, Recife, 2020.

COVIZZI, L.G., GEISE, E.C., GOMES, E., DEKKER, R.F.H., SILVA, R. Imobilização de células microbianas e suas aplicações biotecnológicas. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 28, n.2, p. 143-160, dez/2007

DIAS, Murillo de Oliveira; FALCONI, Davi. The evolution of craft beer industry in Brazil. Journal of Economics and Business, v. 1, n. 4, p. 618-626, 2018.

ES, I.; VIEIRA, J.D.G.; AMARAL, A.C. Principles, techniques, and applications of biocatalyst immobilization for industrial application. Appl Microbiol Biotechnol, v.99(5), p.2065-2082, Jan/2015

EVANGELISTA, José. Tecnologia de Alimentos. São Paulo: Atheneu, 2008.

FERREIRA, Gabriela da Silva et al. Análise da estrutura de mercado da cerveja – a competitividade e estratégias de mercado da indústria cervejeira e micro cervejarias. 2017

FILHO, W. G. V. Bebidas alcóolicas: Ciências e tecnologia. v.1. São Paulo: Blucher, 2010.

FONSECA, A. Reutilização de Células Imobilizadas na Produção de Hidromel. Tese (Dissertação de Mestrado) — Escola Superior Agraria de Bragança, Bragança, 2013.

GAUTO, M.; ROSA, G. Química industrial. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GAVA, Altanir Jaime. Princípios de Tecnologia de alimentos. São Paulo: Nobel, 1984.

HOMINILUPULO. Água na Cerveja. Disponível em: <https://www.hominilupulo.com.br/cervejas-caseiras/como-calcular-a-quantidade-de-agua/>. Acesso em: 10 out. 2021

HUGHES, G. Cerveja feita em casa: tudo sobre os ingredientes, os equipamentos e as técnicas para produzir a bebida em vários estilos. São Paulo: Publifolha, 2014.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L. Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa . Grupo Gen-LTC, 6^a ed, 2011.

KARL, E.; IMHOFF, K. R.; Manual de Tratamento de Águas Residuárias. 26.ed. Edgard Blucher: São Paulo, 2002.

RECH, Kamila P.M.; ZORZAN, Vanessa. Aproveitamento de resíduos da indústria cervejeira na elaboração de cupcake. 2017. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2017.

KOSSEVA, M.R. Immobilization of Microbial Cells in Food Fermentation Processes. Food Bioprocess Technol, v.4, p.1089–1118, ago/2011

KREGIEL, D.; BERLOWSKA, J.; AMBROZIAK, W. Growth and metabolic activity of conventional and non-conventional yeasts immobilized in foamed alginate. Enzyme and Microbial Technology, v.53(4), p.229–234, mai/2013

KUNZE, Wolfgang; MANGER, Hans-Jürgen. Technology brewing and malting. Berlin, Germany: Vlb, 2004.

LEITÃO, M. F. F. Limpeza e desinfecção na indústria de alimentos. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 43, p. 1-35, set. 1975.

MELERO JUNIOR, Valdir. Instrumentação e identificação de um processo de sanitização cinética CIP. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2011.

MESSERSCHMIDT, P.H.Z. Sistematização de conhecimentos para o projeto de fermentadores de cerveja. 2015. 78p. Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Anuário da cerveja: 2019 / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA/SDA, 2020

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Princípios de termodinâmica para engenharia. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MORENO-GARCIA,J.; GARCIA-MARTINEZ, T.; MAURÍCIO, J.C.; MORENO, J. Yeast Immobilization Systems for Alcoholic Wine Fermentations: Actual Trends and Future Perspectives. *Frontiers in Microbiology*, v.9, n.241, Fev/2018

OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2006.

OETTERER, Marília; D'ARCE, Marisa Aparecida Bismara Regitano; SPOTO, Marta Helena Fillet. Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos. Editora Manole Ltda, 2006.

ORTIZ, S.; BORK, J.A.; HENRIQUE, R.O.; FUROGO JR, A. Evaluation of Sodium Alginate Concentration in Cell Immobilization of *Saccharomyces cerevisiae* with Magnetic Nanoparticles. In: Congresso Brasileiro de Microbiologia, n.28, 2015, Florianópolis – SC. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015

PALMER, John J. How to Brew: Everything you need to know to brew beer right the first time. Brewers Publications, 2006.

PANTOJA, L.; PEREIRA JR, N.; YUYAMA, L.K. Seleção e Aproveitamento Biotecnológico de Frutos da Amazônia para Elaboração de Bebida Alcoólica Fermentada Utilizando Levedura Imobilizada. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Amazonas, 2006.

PEDROSO, Paulo; Um brinde à vida, a história das bebidas. São Paulo: DBA, 2014.

PEREIRA, Luiz Filipe Mattos. Reinheitsgebot: uma análise histórica sobre a lei de pureza da cerveja (1516) e sua influência política e legislativa na Alemanha e no ordenamento jurídico brasileiro. 2016

PRIEST, Fergus G.; STEWART, Graham G. (Ed.). Handbook of brewing. 2006. Taylor & Francis. Boca Raton, 2^a ed, 2006

REINOLD, R. M.; Manual Prático de Cervejaria. 1.ed., Aden: São Paulo, 1997.

SAMMI JUNIOR, Airton Ossamu; BARBOSA, Evaldo Cavalcante Cordeiro; TAKANO, Nicole Natsue. Projeto: microcervejaria Offenheit um brinde à pureza!. 2019. 266 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2019.

SANTOS, Iratan Jorge dos. Cinética de fermentações e estudo de metabólitos e enzimas intracelulares envolvidas na fermentação alcoólica cervejeira conduzidas com leveduras de alta e baixa fermentação em diferentes composições de mosto. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 2005.

SEBRAE. Primeiro Censo das cervejarias independentes brasileiras, 2019. Disponível em: [Cervejarias Independentes Brasileiras - DataSebrae](http://www.dadosabertos.sebrae.com.br/dataset/cervejarias-independentes-brasileiras-datasebrae) . Acesso em: 7 de outubro 2021.

SENAI. Tecnologia cervejeira. Rio de Janeiro, 2014

SILVA, M.I. da; SILVA, G.R. da; ALVES, J.E. de A.; MARTINS, J.N. Caracterização físico-química da polpa de umbu in natura. In: REUNIÃO

REGIONAL DA SBPC NO CARIRI, 2017, Crato. Território, biodiversidade, cultura, ciência e desenvolvimento: resumos. Crato: SBPC, 2017

SOUZA, Luigi Whitaker de; MARTINS, Edson Aparecido; NARDI JUNIOR, Geraldo de. Cerveja artesanal, uma alternativa para o agronegócio. In: VIII JORNACITEC-JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA. 2019

TAMIME, A. Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations. 3.rd. Oxford: Blackell Publishing, 2008

VENTURINI FILHO, W.G.; CEREDA, M.P. Cerveja. In: AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W.; LIMA, U. de A. (Coord.). Biotecnologia na produção de alimentos. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. Cap.4, p.91-144. (Biotecnologia Industrial, v.4)

VENTURINI FILHO, Waldemar Gastoni. Bebidas alcoólicas: ciência e tecnologia - 2^a Edição. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. v. 1.

ZSCHOERPER, O. P. Apostila de curso cervejeiro e malteador – AMBEV. Porto Alegre, Ambev. 71 p, 2009

APÊNDICE A – Parâmetros caloríficos e molares

Apêndice A.1 – calor específico

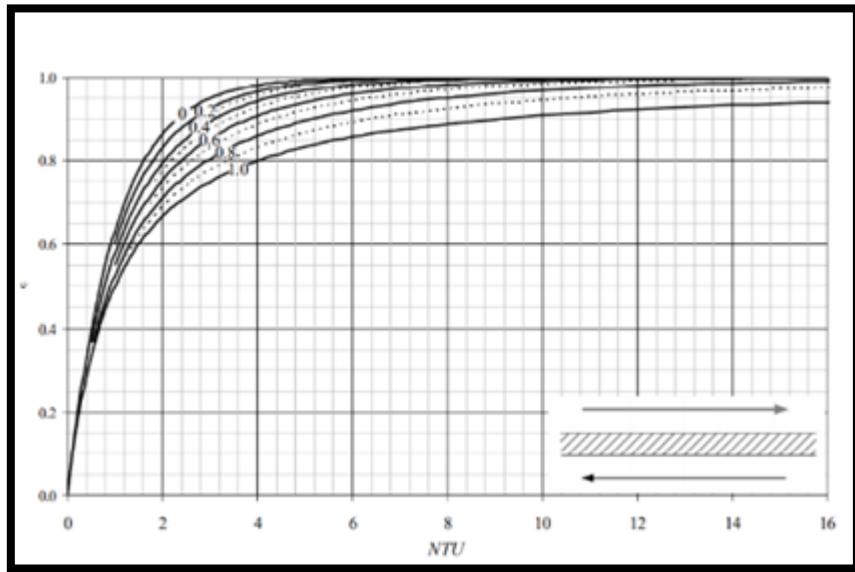
Cp	(kJ/kgK)	Fonte
Água	4,186	Bleier et al, 2013
Malte	1,842	Bleier et al, 2013
Lúpulo	1,842	Bleier et al, 2013
Mash	3,831	Bleier et al, 2013
Mosto	4,186	Bleier et al, 2013
Propilenoglicol _{30%}	3,771	Engineering toolbox, 2003

Fonte - Autoria própria

Apêndice A.2 – Massa molares

Massa Molar	Calor de formação	Fonte
g/mol	kJ/mol	
Glicose	180	-1268
O ₂	32	0
CO ₂	44	-394
Etanol	46	-278
H ₂ O	18	-286

Fonte - Autoria própria

ANEXO A – Gráfico efetividade vs. NTU

Fonte - SAARI (2010)