



Simulação de Cervejaria Artesanal Empregando
Alternativas Operacionais Visando à Redução de
Custos de Processo

Talison Alvarenga dos Santos

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Élcio Ribeiro Borges, *D.Sc*

Prof^a. Tamires Carvalho dos Santos, *D.Sc*

Fevereiro de 2018

**SIMULAÇÃO DE CERVEJARIA
ARTESANAL EMPREGANDO
ALTERNATIVAS OPERACIONAIS
VISANDO À REDUÇÃO DE CUSTOS DE
PROCESSO**

Talison Alvarenga dos Santos

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo de Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Prof.^a. Danielle Silveira dos Santos Martins, *D.Sc*

Prof.^a. Isabelli do Nascimento Dias, *D.Sc*

Prof.^a. Alanna Medeiros Botelho, *D.Sc*

Orientado por:

Prof. Élcio Ribeiro Borges, *D.Sc*

Prof.^a. Tamires Carvalho dos Santos, *D.Sc*

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2018

Alvarenga dos Santos, Talison.

Simulação de cervejaria artesanal empregando alternativas operacionais visando à redução de custos de processo/ Talison Alvarenga dos Santos. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ. 2018
xiii, 79 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2018.

Orientadores: Élcio Ribeiro Borges e Tamires Carvalho dos Santos

1. Cervejaria Artesanal. 2. Simulação. 3. Mitigação. 4. Monografia (Graduação – UFRJ/EQ).
5. Élcio Ribeiro Borges e Tamires Carvalho dos Santos. I. Simulação de cervejaria artesanal empregando alternativas operacionais visando à redução de custos de processo

Dedico este trabalho aos meus pais, Márcia e Tarcísio e à minha vó Chica por sempre
me ensinarem a importância da preservação da natureza.

Ao meu amor, Camila, por estar sempre ao meu lado em todas as batalhas da vida.

À toda minha família e amigos pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva de vida.

À minha Mãe, verdadeira heroína a quem devo pelo o que sou hoje.

Ao meu Pai, por todo suporte durante toda minha vida.

À toda minha família, pela NOSSA conquista.

Ao meu amor, por ser quem ela é.

Aos professores Élcio e Tamires pela gentileza e orientação durante o trabalho.

Aos “crétos”, amigos (leia-se irmãos) de jornada de faculdade.

Aos meus colegas da EQN 100Lei, parceiros de Alegrias, tristezas e muito estudo.

Aos forasteiros do Fundão, que assim como eu, longe de casa, formamos uma família.

A todos professores, secretários, auxiliares, faxineiros, bibliotecários, serventes, vigias, funcionários da Escola de Química e de toda UFRJ, sem vocês minha formação não seria possível.

Ao meu companheiro boldo, por sempre estar comigo nas horas difíceis e também nas boas horas.

Aos meus “serumaninhos” presentes em toda a minha vida, que me ensinaram o amor do melhor amigo do homem e a importância de amar a natureza.

Aos meus amigos ao redor do mundo, que enriquecem a minha jornada de vida.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

SIMULAÇÃO DE CERVEJARIA ARTESANAL EMPREGANDO ALTERNATIVAS OPERACIONAIS VISANDO À REDUÇÃO DE CUSTOS DE PROCESSO

Talison Alvarenga dos Santos

Fevereiro, 2018

Orientadores: Prof. Élcio Ribeiro Borges

Prof.^a. Tamires Carvalho dos Santos

A produção de cerveja é um processo que demanda elevado consumo de água e energia. Além disso, a geração de grandes quantidades de resíduos e gases nocivos ao meio ambiente vêm impulsionando as grandes cervejarias a investirem no aprimoramento de equipamento e no desenvolvimento de processos que mitiguem os danos causados ao ecossistema. Porém, as cervejarias artesanais não possuem porte suficiente para grandes aquisições de equipamentos. Com a crescente busca pelas cervejas oriundas de processos artesanais, o momento se apresenta bastante promissor para a abertura de novas microcervejarias, com relevante potencial poluidor. Concernente com essa realidade, o presente trabalho foi concebido com o intuito de apresentar propostas mitigadoras, que não demandam grandes investimentos, quais sejam: integração energética e uso de aquecedor solar como fonte de energia térmica. O estudo foi realizado através da simulação de microcervejaria, com o auxílio do software Aspen HYSYS V8.8, onde foram avaliados a viabilidade técnica e econômica. O resultado se mostrou promissor quanto ao uso das soluções propostas uma vez que houveram significativas reduções quanto ao uso de água e energia, com conseqüente reduções da produção de resíduos aquosos e emissão de gases, além de serem economicamente favoráveis. O presente trabalho poderá ser útil para o aperfeiçoamento e melhoramento de processos futuros, envolvendo a mitigação de impacto ambiental das microcervejarias.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a.C – Antes de Cristo

AGV – Análise de Ácidos Graxos Voláteis

Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica

ATP – Adenosina Trifosfato

cal – Caloria

CAPEX – *Capital Expenditures*

CervBrasil – Associação Brasileira da Indústria da Cerveja

d.C – Depois de Cristo

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DQO – Demanda química de oxigênio

Eq. – Equação

g – grama

GEE – Gases do efeito estufa

GN – Gás natural

hl – Hectolitro

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Changes*

J – Joule

K – Kelvin

m³ – Metro cúbico

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Neg. – Negligenciado

°P – Grau Plato

OPEX – *Operational Expenditures*

PIB – Produto interno Bruto

SDT – Sólidos dissolvidos totais

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SST – Sólidos suspensos totais

ST – Sólidos totais

W – Watts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mercenário Sírio tomando cerveja ao lado de sua esposa egípcia e seu filho - Pintura datada da 18 ^o dinastia. Fonte: Cultural Atlas of Ancient Egypt (2008).	6
Figura 2 - Cerveja Barbante. Fonte: Portal Cervisia (2013).	8
Figura 3 - Variações de Cerveja. Adaptado de: Brookston Beer Bulletin (2013).	10
Figura 4 - Número de cervejarias artesanais no Brasil com o tempo. Fonte: Estimativa Instituto da Cerveja Brasil (2016).	11
Figura 5 - Maiores Estados criadores de receita de cerveja artesanal do Brasil. Fonte: Mapa/Dois Dedos de Colarinho (2016).	12
Figura 6 - Fluxograma da produção de cerveja. Adaptado de: Harisson (2009).	13
Figura 7- Balanços de massa e energia aplicados ao processo cervejeiro, representando valores específicos por m ³ de cerveja produzido. Fonte: Unicer AS (2005).	19
Figura 8 - Temperatura de diferentes etapas durante a produção de cerveja. Fonte: Kunze (2004).	25
Figura 9 - Arranjo de aquecedores integrados no processo de produção de cerveja a fim de reduzir energia gasta com o aquecimento de água. Adaptado de: Mauthner et al (2013).	26
Figura 10 - Fluxograma da metodologia utilizada no presente projeto	30
Figura 11- Diagrama de Fluxo de Processo (PFD) do Processo 1	39
Figura 12 – Diagrama de Fluxo de Processo (PFD) do Processo 2.....	39
Figura 13 – Simulação do Processo 1 utilizando Aspen HYSYS V8.8	42
Figura 14 – Simulação do Processo 2 utilizando Aspen HYSYS V8.8	45
Figura 15 - Placa de aquecimento solar da marca KOCS.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores nutricionais da cerveja. Adaptado de Nutritional Aspects of Beer, Bamforth (2001).	5
Tabela 2 - Consumo de água durante o processo cervejeiro. Adaptado de Olajire (2012).	20
Tabela 3 - Características Físico-químicas do rejeito aquoso das cervejarias. Adaptado Olajire (2012).	21
Tabela 4 - Etapas de maior consumo de energia térmica em microcervejarias* Fonte: Kunze (2004).	25
Tabela 5 – Consumo de energia elétrica por etapa de refrigeração em microcervejarias (Adaptado de Kunze, 2004).....	27
Tabela 6 - Propriedades físico-químicas das correntes do Processo 1	40
Tabela 7 – Frações molares das correntes do Processo 1	41
Tabela 8- Correntes energéticas do Processo 1	41
Tabela 9 - Propriedades físico-químicas das correntes do Processo 2	43
Tabela 10 - Frações molares das correntes do Processo 2.....	44
Tabela 11 - Correntes energéticas do Processo 2	44
Tabela 12 - Comparativo do consumo de água no processo cervejeiro	46
Tabela 13 – Consumo anual de água por processo.....	47
Tabela 14 - Consumo de energia térmica nas etapas de Brassagem e Pasteurização.....	48
Tabela 15 - Consumo de energia térmica que é gerada pela combustão.....	49
Tabela 16 - Comparativo do consumo de eletricidade no processo cervejeiro (kcal/m ³)	50
Tabela 17 - Cotação de trocadores de calor do tipo Placas Removíveis*	54
Tabela 18 - Cotação da Bomba Centrífuga	55
Tabela 19 - Cotação de placas solares	56
Tabela 20 - Investimentos para a aquisição de equipamentos.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre os tratamentos aeróbios e anaeróbios. Fonte: Driessen e Vereijken (2003).	23
Quadro 2 - Considerações adotadas para tomada de decisões na busca por soluções mitigadoras de impacto ambiental.....	30
Quadro 3 - Uso dos componentes nos processos simulados	33
Quadro 4 – Condições físico-químicas das correntes de matéria-prima	34
Quadro 5 - Informações técnicas dos equipamentos da Integração Energética (Processo 2) fornecidas pelo HYSYS	47
Quadro 6 - Resultados da aplicação das soluções mitigadores (por ano).....	50
Quadro 7 - Variação dos gastos com insumos entre os Processos 1 e 2.....	53

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	16
Equação 2	17
Equação 3	17
Equação 4	24
Equação 5	24
Equação 6	33
Equação 7	37
Equação 8	37
Equação 9	48
Equação 10	49
Equação 11	49
Equação 12	50
Equação 13	51
Equação 14	52
Equação 15	52
Equação 16	52
Equação 17	52
Equação 18	56
Equação 19	56
Equação 20	56
Equação 21	57

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE EQUAÇÕES	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. CERVEJA.....	4
3.1.1. Definição	4
3.1.2. Composição e benefícios à saúde.....	4
3.1.3. História.....	5
3.1.4. Cerveja no Brasil.....	7
3.1.5. Estilos.....	9
3.1.6. Dados do mercado brasileiro e internacional	11
3.2. PROCESSO CERVEJEIRO	12
3.2.1. Malteação	13
3.2.2. Moagem.....	14
3.2.3. Brassagem	14
3.2.3.1. Mostura.....	14
3.2.3.2. Clarificação.....	15
3.2.3.3. Fervura.....	15

3.2.4.	Resfriamento e aeração	15
3.2.5.	Fermentação	16
3.2.6.	Remoção do trub frio e biomassa cervejeira	17
3.2.7.	Fermentação Secundária e maturação	17
3.2.8.	Filtração e estabilização coloidal da cerveja	18
3.2.9.	Carbonatação	18
3.2.10.	Estabilização microbiológica.....	18
3.2.11.	Envase.....	18
3.3.	IMPACTOS AMBIENTAIS	19
3.3.1.	Consumo de água	20
3.3.2.	Consumo de energia	24
3.3.2.1.	Energia Térmica	24
3.3.2.2.	Energia Elétrica	26
3.4.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	28
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA		29
4.1.	DEFINIÇÕES DO PROCESSO.....	29
4.2.	O SIMULADOR E AS VARIÁVEIS DE PROJETO E OPERACIONAIS	31
4.2.1.	Parâmetros para a simulação	32
4.2.2.	Etapas do processo de produção e considerações adotadas	34
4.2.2.1.	Brassagem.....	34
4.2.2.2.	Fermentação.....	35
4.2.2.3.	Envase e Pasteurização	35
4.3.	Uso de utilidades.....	35
4.3.1.	Água	35
4.3.2.	Energia	36
4.4.	ESTUDOS DE VIABILIDADE.....	36

4.4.1.	Avaliação Técnica Ambiental	36
4.4.2.	Avaliação Econômica Preliminar.....	37
4.5.	DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO (PFD).....	37
4.5.1.	PFD do Processo 1	39
4.5.2.	PFD do Processo 2	39
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES		40
5.1.	RESULTADOS	40
5.1.1.	Processo 1.....	40
5.1.2.	Processo 2.....	43
5.2.	DISCUSSÕES	46
5.2.1.	Viabilidade Técnica.....	46
5.2.1.1.	Uso de água	46
5.2.1.2.	Uso de Energia	47
5.2.1.2.1.	Térmica	47
5.2.1.2.2.	Elétrica	50
5.2.2.	Viabilidade Econômica	51
5.2.2.1.	Variação de OPEX.....	51
5.2.2.2.	CAPEX.....	53
5.2.2.3.	Payback.....	57
5.3.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....		59
6.1.	CONCLUSÕES	59
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS		60

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

1.1. INTRODUÇÃO

O setor cervejeiro representa uma importante parcela da indústria brasileira. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a participação do setor no Produto Interno Bruto (PIB) em 2016 foi de 1,6%, sendo o 12º setor de maior geração de empregos diretos e indiretos, alcançando 2,2 milhões de postos de trabalho no mesmo ano. Estima-se que em 2016, foram produzidos 14,1 bilhões de litros de cerveja, com um faturamento total de R\$ 77 bilhões gerando R\$ 23 bilhões de impostos (MAPA, 2017).

A produção de cerveja demanda elevada quantidade de água. A água chamada de primária é utilizada diretamente na composição da cerveja. Já a secundária, não possui contato direto com o produto e é utilizada no processo como fluido refrigerante, água de lavagem dos equipamentos, entre outros, com potencial geração de resíduos (KUNZE, 2004). O processo cervejeiro também é consumidor intensivo de energia, tanto elétrica como térmica, que corresponde a uma boa parcela do custo de produção, de 10 a 20%. O consumo energético é responsável pela emissão de gases gerados a partir da queima de combustíveis fósseis, durante a produção de vapor nas caldeiras (BRLA, 1999).

Com a crescente preocupação com a preservação ambiental, devido principalmente ao aquecimento global e a escassez de água potável ao redor do mundo, se faz necessário o aprimoramento dos processos industriais os tornando mais “verdes”. No caso das cervejarias, a redução do uso de recursos, como água e energia, é ponto chave para se alcançar patamares mais sustentáveis (OLAJIRE, 2012).

Grandes cervejarias investem em equipamentos e processos com potencial mitigação dos danos ambientais. Porém, as microcervejarias artesanais não possuem a capacidade de investimento nem o volume de vendas necessário que viabilize a aquisição de equipamentos mais eficientes que promovam processos mais sustentáveis (OLAJIRE, 2012).

Segundo o relatório de inteligência do setor alimentício do Sebrae (2017), o país vivencia uma crescente tendência do *Wellness*, ou do “Bem-Estar”. Isso significa que as pessoas estão buscando consumir produtos que providenciam sabores mais sofisticados, diferentes daqueles que são produzidos em larga escala. Essa tendência impulsiona o consumo de produtos artesanais que oferecem uma maior variedade de sabores atendendo à diversos paladares (SEBRAE, 2017). Como consequência disso, o surgimento de novas microcervejarias foi

impulsionado, chegando a um novo registro de cervejaria artesanal por semana em 2014 (INSTITUTO DA CERVEJA, 2016).

Como mencionado anteriormente, as microcervejarias artesanais não possuem o porte para investimentos em equipamentos que tornam o processo mais sustentável. Esse fato somado ao crescente surgimento de novas unidades aumentam o potencial poluidor do setor, principalmente da parcela de microcervejarias.

Dentro deste contexto, uma forma de reduzir esse potencial poluidor para as microcervejarias é propondo soluções mais sustentáveis que demandam baixos investimentos e baixos custos operacionais sendo, portanto, economicamente viáveis.

O presente trabalho oferece duas propostas mitigadoras: A primeira proposta é a integração energética entre correntes frias e quentes. Essa medida reduz o consumo total de utilidades quente e fria. No caso das microcervejarias, o vapor é a utilidade quente e água corrente e refrigeradores são as utilidades frias (OLAJIRE, 2012). A redução do uso de vapor tem como consequência a redução de emissão de gases poluentes bem como a economia gerada por conta da redução da compra de combustíveis. Já a redução do uso de água corrente, além de por si só já ser uma contribuição ambiental, também resulta na redução da produção de efluentes bem como nos gastos de aquisição de água e custos com tratamento dos rejeitos.

A segunda proposta é o uso de aquecedores solares em substituição parcial do uso de caldeiras. Uma vez que o processo cervejeiro é conduzido em temperaturas médias (KUNZE, 2004), o uso de água aquecida por energia solar se apresenta como potencial solução para a redução do uso de vapor.

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo propor e analisar a viabilidade preliminar de alternativas com potencial aplicação em microcervejaria artesanal, que promovam a mitigação dos danos causados ao meio ambiente. Essas alternativas são: integração energética e uso de aquecedores solares.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Extração de dados sobre gastos com utilidades, através de simulação computacional de dois processos de mesmo volume de produção: o primeiro representando um processo microcervejeiro simples; o segundo, representando o mesmo processo, porém com o emprego da integração energética e uso de aquecedores solares.
- ii. Estudo de viabilidade técnica e econômica das alternativas propostas a partir da comparação dos dados de gastos com utilidades entre os processos.

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CERVEJA

3.1.1. Definição

Nos termos da legislação vigente, cerveja é a bebida obtida pela fermentação por ação de leveduras alcoólica do mosto, composto por malte de cevada e água potável com adição de lúpulo (Decreto nº 6.871/09, “Art. 36). O malte de cevada poderá ser substituído por adjuntos, como arroz, trigo, milho, aveia e sorgo, todos integrais, em flocos ou em sua forma amilácea, e por carboidratos de origem vegetal, transformados ou não (CURI, 2006).

3.1.2. Composição e benefícios à saúde

Apesar de ser conhecido que uma taça de vinho por dia faz muito bem à saúde, principalmente ao coração, um copo diário de cerveja também traz muitos benefícios à saúde. Além de minerais como cálcio, fósforo e magnésio, a cerveja é rica em algumas vitaminas, como a vitamina C (BAMFORTH, 2001).

Estudos mostram que o uso moderado de cerveja ajuda a prevenir doenças coronárias, protege contra infecções da *Helicobacter pylori*, uma das causadoras da úlcera, mantém ossos mais fortes, ajuda na prevenção de pedra nos rins, protege contra acidentes cerebrovasculares, entre outros (BAMFORTH, 2001).

A Tabela 1 mostra a relação da composição da cerveja com a recomendação de dieta diária de um adulto:

Tabela 1 - Valores nutricionais da cerveja. Adaptado de Nutritional Aspects of Beer, Bamforth (2001).

Parâmetro	Valores diários Referência (Idade 25-50)		Valor na Cerveja (Por litro)
	Homem	Mulher	
Caloria (kcal)	2550	1940	150-1100
Proteína (g)	63	50	3-5
Carboidratos (g)	a	a	0-61
Gordura (g)	a	a	Neg.
Vitamina C (mg)	60	60	0-30
Vitamina B1 (mg)	1,5	1,1	0,003-0,08
Vitamina B2 (mg)	1,7	1,3	0,02-0,8
Vitamina B3 (mg)	19	15	3-8
Vitamina B6 (mg)	2	1,6	0,07-1,7
Vitamina B9 (µg)	200	180	40-600
Vitamina B12 (µg)	2	2	3-30
Vitamina B7 (µg)	30-100	20-100	2-15
Cálcio (mg)	800	800	40-140
Fósforo (mg)	800	800	90-400
Magnésio (mg)	350	280	60-200
Ferro (mg)	10	15	0,1-0,5
Zinco (mg)	15	12	0,01-1,48
Selênio (µg)	70	55	<0,4-7,2

Fonte dos valores diários referência: *Food and Nutrition Board, National Academy of Sciences, British Nutrition Foundations*

a – Para dietas que contém álcool, a recomendação é que 15% da energia total da dieta seja ingerida na forma de proteína, 47% na forma de carboidrato e 33% na forma de gordura.

Por outro lado, o uso abusivo de álcool pode trazer graves consequências, portanto se faz necessário o uso consciente não só de cerveja, mas de todas as bebidas alcoólicas. Os principais efeitos negativos ao consumo do álcool são:

- Acidentes de trânsito, quedas, sonolência
- Sistema nervoso: degeneração do tronco cerebral, atrofia ótica, polineuropatia, pelagra
- Sistema digestivo: Hepatite, cirrose, pancreatite, ulcera péptica, degeneração do fígado
- Câncer: Boca, faringe, laringe, esôfago, fígado
- Cardiomiopatia, hipertensão
- Miopatia, porfíria, síndrome alcoólica fetal

3.1.3. História

A cerveja (do gaulês, através do latim *servisia*) é a bebida alcoólica mais antiga e mais consumida ao redor do mundo. No ranking de todas as bebidas mais consumidas no planeta, a cerveja se posiciona atrás, apenas, da água e do chá (NELSON, 2005).

Povos antigos como sumérios, egípcios, mesopotâmios e ibéricos já dominavam sua produção a mais de 6000 a.C. Arqueólogos especulam que a cerveja foi fundamental na formação de civilizações. Aproximadamente 5000 anos atrás, trabalhadores da cidade de *Uruk* (Iraque) eram pagos em cerveja. Durante as construções das grandes Pirâmides em Giza, Egito, cada trabalhador teve uma ração diária de quatro a cinco litros de cerveja, os quais eram usados tanto como fonte de nutrientes e como refresco, cruciais para a construção das pirâmides (PORTAL CERVISIA, 2013).

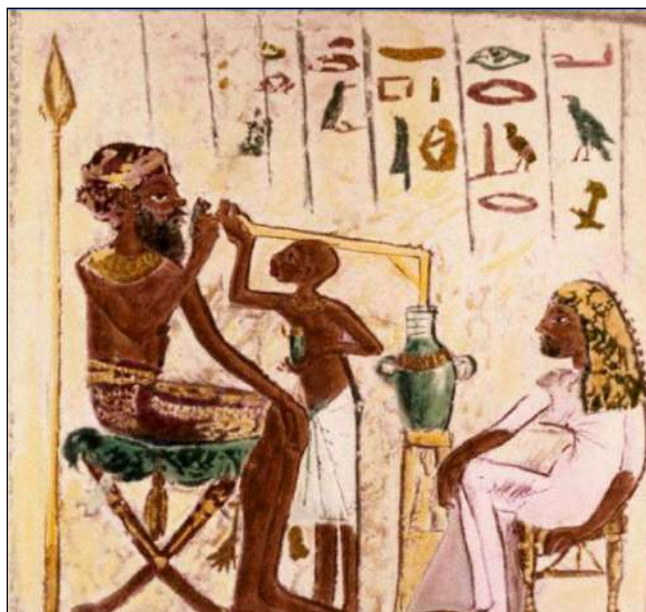


Figura 1 - Mercenário Sírio tomando cerveja ao lado de sua esposa egípcia e seu filho - Pintura datada da 18ª dinastia. Fonte: *Cultural Atlas of Ancient Egypt* (2008).

A lei mais antiga que regulamentava a produção e a venda de cerveja constava no Código de *Hamurabi*, 1760 a.C. na antiga Mesopotâmia. Nela, se condena à morte quem não respeita os critérios de produção de cerveja indicados. O código incluía várias leis de comercialização, fabricação e consumo da cerveja, relacionando direitos e deveres dos clientes das tabernas (PORTAL CERVISIA, 2013).

A cerveja foi introduzida na Europa por tribos Alemãs e celtas por volta de 3000 a.C. Além da típica fonte de amido, os europeus mais antigos também utilizavam frutas, mel, plantas, pimentas e outras substâncias como ervas narcóticas. Mas foi no domínio romano que se espalhou pela Europa, principalmente quando foi decretado a proibição do cultivo da vinha em terrenos onde pudessem ser semeados cereais, para combater a grave crise na cultura cerealífera (NELSON, 2005).

Nesta época, ainda não se adicionavam lúpulo à cerveja, sendo este mencionado na Europa por volta de 822 d.C. Leis que forçavam o uso de lúpulo na cerveja foram introduzidas na Inglaterra no século XIV, e depois leis similares foram introduzidas em outros países. Na Inglaterra, essas leis levaram a insurreições camponesas que foram brutalmente combatidas. No século XV, cervejas sem lúpulo eram chamadas apenas de “Ale” (PORTAL CERVISIA, 2013).

No século XIV, maior tempo de validade combinado com a padronização do tamanho do barril permitiram a exportação da cerveja em larga escala. Esse tipo de produção se espalhou pela Holanda, depois pelos Flanders, Brabant e alcançando a Inglaterra no final do século XV (PORTAL CERVISIA, 2013).

Em 1516, Willian IV, Duque de Bavária, adotou a lei pura (*Reinheitsgebot*), que é provavelmente a regulamentação de alimentos mais antiga ainda em uso, a qual permite apenas água, lúpulo e cereais maltados como ingredientes da cerveja (PORTAL CERVISIA, 2013).

Durante a Revolução Industrial, a produção da cerveja mudou de artesanal para industrial, e ao fim do século XIX a produção caseira deixou de ser significativa. Inovações no processo de fabricação vieram com a introdução do termômetro em 1760 e do hidrômetro em 1770, o que permitiu o aumento da eficiência dos processos e a atenuação de agentes indesejáveis. Além disso, a modernização na geração de vapor contribuiu para a formação de cervejarias, como a Cervejaria Caledonian, fundada em 1869 em Edinburgh, Escócia (PORTAL CERVISIA, 2013).

Em 1857, Louis Pasteur descobriu o papel das leveduras na fermentação, o que contribuiu para os métodos de produção de cerveja, evitando sabores azedos e microrganismos indesejáveis (PASTEUR, 1857).

Antes da Lei Seca Americana (1920-1933), já existiam milhares de cervejarias nos Estados Unidos. No início de 1920, a maioria destas cervejarias fecharam, e as que permaneceram começaram a produzir bebidas não alcóolicas (BLUE, 2004).

3.1.4. Cerveja no Brasil

A cerveja teve sua introdução no Brasil apenas em 1808, trazida pela família real portuguesa que estava, naquele momento, se mudando para o Brasil colônia. A Inglaterra foi historiada como a primeira nação a exportar cerveja para a colônia (MEGA et al., 2011).

Durante a década de 1830, a cachaça era a bebida alcoólica mais popular do país. Licores da França e vinhos de Portugal eram importados para servir especialmente à nobreza. Nesse

período, a cerveja era num processo caseiro, realizado por famílias de imigrantes para o próprio consumo (COUTINHO, 2017).

Fontes de dados obtidas pelo Portal Cervisia (2013) apontam que o Diário de Pernambuco de 1869 notificou que o Imperador decretou ter sido Henri Joseph Leiden o fundador da primeira fábrica de cerveja no Brasil no ano de 1842. Em 1846 a Imperial Colônia de Petrópolis fez a primeira estatística sobre a população do país trazendo informações sobre as atividades econômicas, constatando que, os 303 imigrantes da colônia alemã de Petrópolis estavam divididos em 32 profissões, dentre elas, um fabricante de cerveja. (PORTAL CERVISIA, 2013).

Em 1858 já existiam seis fábricas de cerveja barbante no país (Figura 2). Ela recebia esse nome por ser uma cerveja de alta fermentação, o que gerava uma alta pressão interna por causa da grande quantidade de gás carbônico, sendo necessária a amarração com barbante para evitar a ejeção da rolha (PORTAL CERVISIA, 2013).



Figura 2 - Cerveja Barbante. Fonte: Portal Cervisia (2013).

O processo de produção em larga escala na indústria cervejeira foi viabilizado pela política de substituição de importações a partir de 1880. O Estado brasileiro considerou que, a produção nacional estava apta a substituir as importações da Inglaterra e principalmente da Alemanha. De 1881 até 1900 praticamente toda a cerveja importada foi substituída pela produção nacional, exceto a cerveja britânica Guinness. A substituição de importações desse período até os anos 30 também atingiu negativamente o setor, porque a matéria-prima utilizada (Malte e Lúpulo) e o maquinário eram importados da Europa, sobretudo da Alemanha e Áustria (VERSIANI, 1977).

Dados estatísticos de 1907 mostram que existiam 186 fábricas de cerveja no Brasil, empregando quase 3.000 funcionários (IBGE, 2013). A indústria cervejeira estava entre dos 10 setores industriais com maior valor da produção, ficando atrás somente da usinagem de açúcar, produção de calçados, manuseio do charque, fiação e tecelagem do algodão, fundição e obras

de metais, moagem de cereais e cerrarias e carpintarias. As três maiores indústrias eram a Companhia Cervejaria Brahma, a Companhia Antártica Paulista e a Fábrica de Cerveja Paraense, as quais controlavam mais de 50% do mercado, 62,9% do capital, 68% da potência instalada e 47,3% da mão-de-obra empregada (SUZIGAN, 2002).

A expansão da indústria cervejeira pelo país foi viabilizada pelo melhoramento dos transportes o que criava uma melhor integração entre as regiões, em especial nas regiões mais distantes dos maiores centros urbanos. A Cerveja Brahma passou a ser engarrafada (Brahma Chopp) em grande escala, tornando-se a cerveja mais consumida no país. O Brasil passou de uma produção de 8 milhões de litros em 1910 para 30 milhões de litros em 1934 (PORTAL CERVISIA, 2013).

Durante o período de 1985 a 1995, o consumo de cerveja cresceu constantemente. Com o Plano Real em 1994 e o aumento consequente da capacidade de compra da população, o mercado da cerveja incorporou novos consumidores, principalmente do tradicional mercado da cachaça (BEERLIFE, 2010).

Com o passar do tempo, o perfil sensorial da cerveja no Brasil tem sido gradualmente modificado. Cervejas mais leves e mais refrescantes, menos encorpadas, menos amargas e com menor teor alcoólico tem se tornado cada vez mais populares. Essa tendência foi adotada pelas principais cervejarias no Brasil, o que é uma combinação entre o perfil da cerveja europeia e americana (BEERLIFE, 2010).

3.1.5. Estilos

Existem milhares de diferentes marcas de cervejas pelo mundo, criados por inúmeras cervejarias que tentam agradar paladares dos mais exigentes consumidores. Muitas dessas marcas podem ser classificadas em tipos definidos de cerveja, como Pilsen, *Stout*, *Porter*, *Bock*, etc (Figura 3).

Uma classificação geral, onde praticamente todas as cervejas podem ser alocadas, pode ser feita dependendo da levedura usada e do processo de fermentação. Basicamente existem três tipos famílias: cervejas de alta fermentação, cervejas de baixa fermentação e *Lambic*, ou fermentação espontânea (KUNZE, 2004).

A diferenciação das famílias ocorre devido aos produtos metabólicos das leveduras que se encontram em condições diferentes, principalmente em temperaturas diferentes. Enquanto as de alta fermentação ocorrem a mais elevadas temperaturas entre 10°C e 26°C as de baixa fermentação ocorrem menos de 10°C (KUNZE, 2004).

Leveduras de alta fermentação são caracterizadas por aglomerados pesados que só se desfazem no início da fermentação e são carregados para a parte superior do mosto pelas bolhas de CO₂ que foram produzidas. Essa família de cerveja é reconhecida por proporcionar aroma e sabor frutados, devido aos ésteres produzidos em temperaturas mais elevadas. Os representantes mais comuns dessa família são: *Ales*, *Stouts*, Cerveja de trigo ou *weissbeer*.

As cervejas produzidas sob baixa fermentação surgiram no século passado, dependente de várias circunstâncias como a invenção da máquina refrigeradora por Linde (1871), permitindo a fermentação em baixas temperaturas independente das condições climáticas (KUNZE, 2004).

Apesar de ser um dos tipos mais recentes, o estilo *Lager*, que muitas vezes leva o nome da família, é o estilo mais consumido no mundo. Com uma coloração mais pálida e moderada adição de lúpulo, o estilo é reconhecido por ser uma cerveja “leve” e refrescante, sendo classificada em altamente “bebível”. Outros estilos marcantes da família de alta fermentação são: *Dark Lager*, *Pilsner* e *Bocks* (PORTAL CERVISIA, 2013).



Figura 3 - Variações de Cerveja. Adaptado de: *Brookston Beer Bulletin* (2013).

Tipicamente da Bélgica, a família *Lambic* representa as cervejas de fermentação espontânea. De paladar bem distinto, as cervejas desse tipo possuem um sabor ácido se assemelhando a vinho espumante. São exemplos de *Lambic* as marcas: *Faro*, *Geuze* e *Kriek* (KUNZE, 2004).

3.1.6. Dados do mercado brasileiro e internacional

Atualmente, segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CervBrasil), o Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, ficando atrás apenas para China e EUA. Estima-se que a produção nacional é de cerca de 14,1 bilhões de litros por ano (MAPA, 2017).

Apesar do mercado de cerveja como um todo esteja em queda, por causa da atual crise político-financeira, o mercado de cervejas artesanais no Brasil não para de crescer e se mostra como uma aposta promissora para os próximos anos. Em 2015, o país fechou o ano com 372 cervejarias, um aumento de 17% quando comparado com 2014 (Figura 4). Estima-se que a taxa de crescimento se mantenha acima de 50 cervejarias por ano, o que representa em média uma nova cervejaria artesanal por semana (INSTITUTO DA CERVEJA, 2016). Esse crescimento é impulsionado pela tendência de valorização da sensorialidade e a busca pelo prazer no consumo (SEBRAE, 2017).

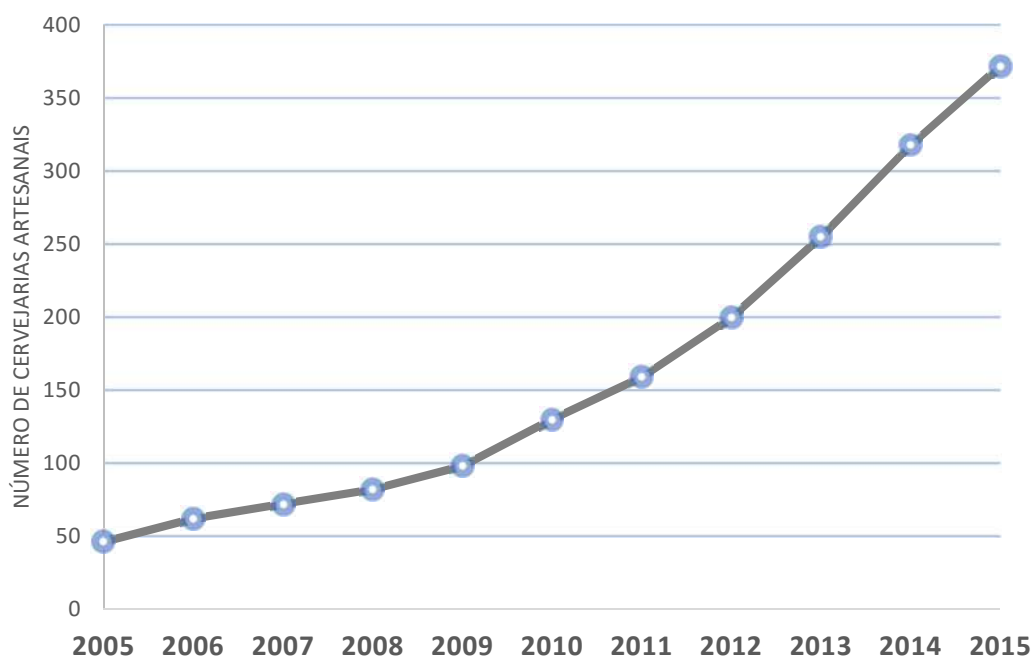


Figura 4 - Número de cervejarias artesanais no Brasil com o tempo. Fonte: Estimativa Instituto da Cerveja Brasil (2016).

Nos Estados Unidos, a cerveja artesanal vem aumentando cada vez mais sua participação nas vendas. Em 2014, o número de cervejarias artesanais cresceu 19% quando comparado ao ano de 2013, totalizando mais de 3.400 cervejarias pelo país com uma produção aproximada de 3,5 bilhões de litros por ano (BREWERS ASSOCIATION, 2015). Já no Brasil, a produção anual das cervejas especiais, onde incluem as artesanais, é estimada em 700 milhões de litros, ou seja, 5% do mercado nacional (INSTITUTO DA CERVEJA, 2016).

No período de 2000 a 2015, as cervejas artesanais receberam 954 novos registros, contra 1.116 das grandes cervejarias. Dois estados, São Paulo e Rio Grande do Sul, são responsáveis por quase metade dos novos registros de artesanais no mesmo período. A Figura 5, mostra os novos registros de receitas pelos estados no país:

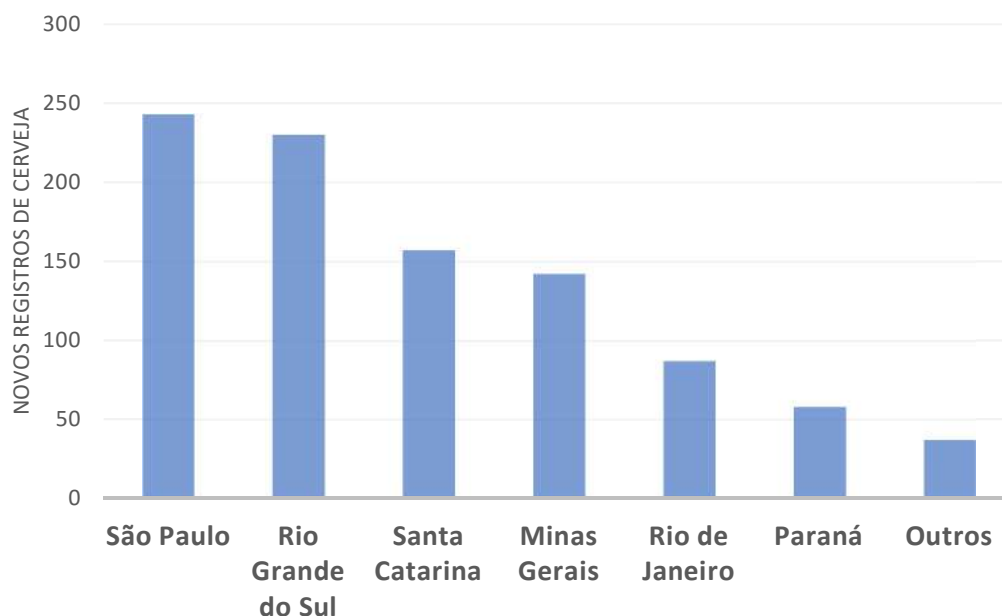


Figura 5 - Maiores Estados criadores de receita de cerveja artesanal do Brasil. Fonte: Mapa/Dois Dedos de Colarinho (2016).

3.2. PROCESSO CERVEJEIRO

A forma de condução do processo de produção e do respectivo controle são fatores essenciais para a qualidade da cerveja produzida. Alterações físicas, químicas, microbiológicas e sensoriais, desde a escolha e tratamento das matérias-primas, seu processamento, fermentação, e etapas seguintes de finalização do produto, inclusive durante seu transporte e estocagem, podem ser extremamente prejudiciais à qualidade da cerveja (KUNZE, 2004).

A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos do processo cervejeiro, cujas as etapas serão brevemente descritas a seguir.

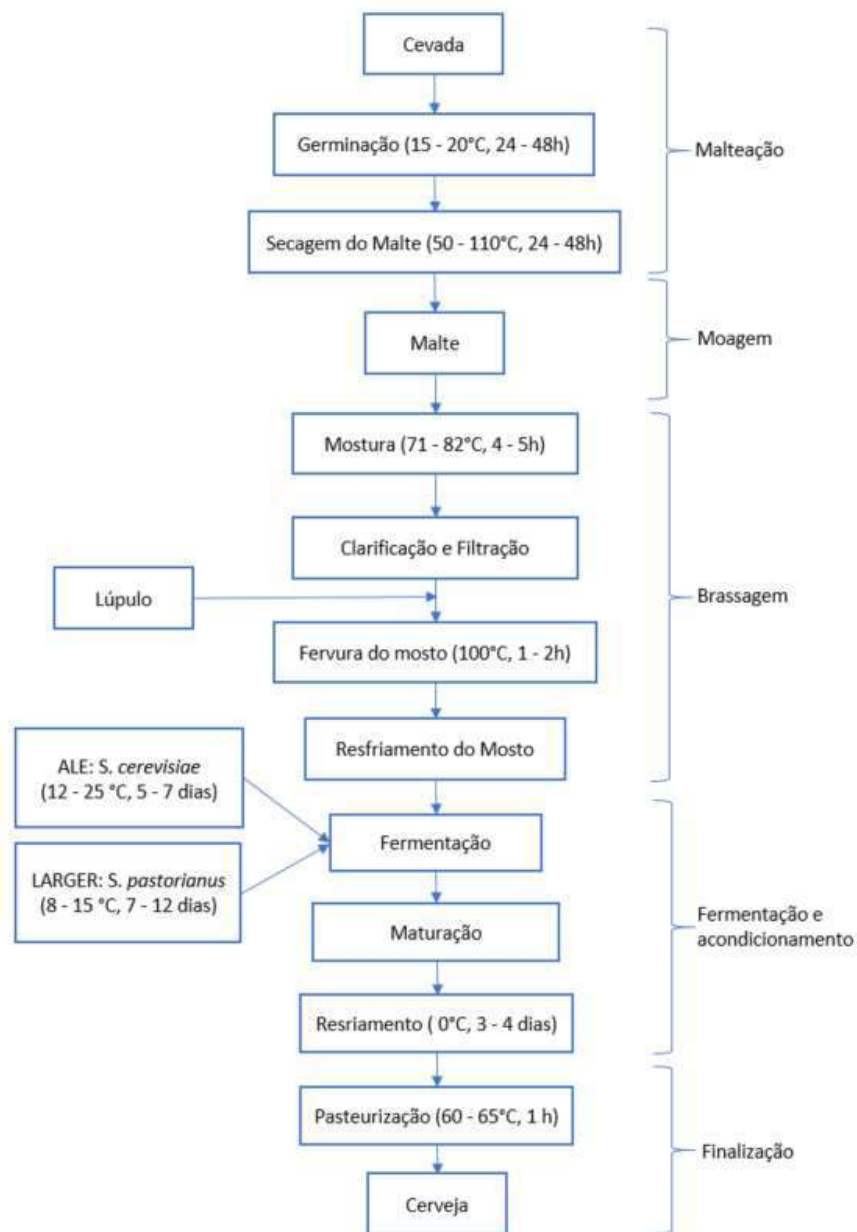


Figura 6 - Fluxograma da produção de cerveja. Adaptado de: Harisson (2009).

3.2.1. Malteação

O malte é um dos três componentes da cerveja, juntamente com a água e o lúpulo. Para produzir 1 m³ de cerveja são necessários aproximadamente 170 kg de malte. Ele é obtido através de cereais, sendo a cevada o tipo mais comum (KUNZE, 2004).

O processo chamado malteação tem como objetivo principal promover o aumento do conteúdo enzimático do cereal e de seu chamado poder diastático, que representa a atividade enzimática do malte em função da quantidade de sacarídeos ou aminoácidos presentes na mistura (O'ROURKE,2002). Esta etapa permitirá que o amido dos cereais seja hidrolisado para

disponibilizar açúcares fermentescíveis e outros compostos de importância, durante a etapa seguinte, a brasagem (LIMA, 2001).

Ao todo, essa etapa possui três subetapas: maceração ou hidratação, que irá contribuir para que a próxima etapa ocorra; germinação, período em que enzimas são liberadas promovendo a hidrólise do amido; secagem, momento em que a germinação é finalizada. O tempo de duração total pode durar por até seis dias com a atuação de diferentes temperaturas (KUNZE, 2004).

Por demandar rígido controle e monitoramento e por ser um processo longo, muitas cervejarias optam por não realizar a malteação, adquirindo o malte seco das chamadas maltearias ou maltarias (MATHIAS, 2015).

3.2.2. Moagem

Consiste na quebra e esmagamento do grão de malte, que tem como objetivo o aumento da área superficial de contato do grão e, portanto, aumento da exposição da fração amilácea para a ação enzimática. Além disso, a quebra longitudinal da casca, mantendo-a com máxima conservação possível, será fundamental na etapa de filtração durante a clarificação do mostro (MATHIAS, 2015).

3.2.3. Brassagem

A brassagem é a etapa do preparo do mosto para posterior fermentação. Basicamente, o processo é dividido em três subetapas: mostura, clarificação e fervura. Durante processo, elevadas quantidades de energia térmica são requeridas.

3.2.3.1. Mostura

Terminado a moagem, o malte está pronto para ser usado. O componente é misturado com água para que seus compostos sejam solubilizados. Porém, apenas 10 a 15% de seu material é diretamente solúvel em água. Substâncias com elevada massa, como amido e proteínas, necessitam de temperaturas mais elevadas para se solubilizarem (KUNZE, 2004).

A mostura tem como objetivo intensificar a solubilização do malte para a extração de todos os componentes de interesse na matéria prima, que irá produzir o mosto cervejeiro rico em substratos fermentescíveis e com fontes de nitrogênio em tamanho molecular adequados (KUNZE, 2004).

Com duração de até cinco horas, o processo se dá pela aplicação de calor, através de vapor por bobinas ou jaquetas, de modo a atingir temperaturas específicas entre 71 – 82 °C (OLAJIRE, 2012) que irão promover a atuação de diferentes enzimas. Amilases, proteases, fosfatases e glucanases atuam promovendo a hidrólise de macromoléculas permitindo maior solubilização, e, portanto, maior disponibilização do material no meio aquoso (LIMA et al, 2001).

3.2.3.2. Clarificação

Após a etapa de mostura, cerca de 80% da massa do grão é solubilizada pela ação das enzimas (LIMA, 2001) e torna-se necessário a separação da parte sólida remanescente. A clarificação ou filtração, é o processo de retenção dos sólidos, a qual utiliza-se equipamentos, como filtro prensa, o qual possibilita formação da torta de filtração com o próprio resíduo. A qualidade da moagem tem impacto nesta etapa (BRIGGS, 2004).

3.2.3.3. Fervura

A etapa de fervura ou cocção, tem como principais objetivos a destruição das enzimas, aumento da estabilidade coloidal, desinfecção, eliminação de compostos voláteis indesejáveis, precipitação de fosfato de cálcio com redução do pH, desenvolvimento de cor, formação de compostos de aroma e sabor, concentração do mostro e ajuste do extrato inicial (BRIGGS, 2004; BAMFORTH, 2001).

O processo consiste no aquecimento do mosto vindo da clarificação, até seu ponto de fervura à temperaturas em torno de 100°C, durante uma hora e meia. Nesta etapa também ocorre a adição de adjuntos açucarados e lúpulo (PRIEST e STEWART, 2006). Este é o último estágio da preparação do mosto e neste momento devem ser avaliados alguns parâmetros, tais como: limpidez, volume e extrato alcançados, rendimento e eficiência da brassagem. Agora a mistura é chamada de mosto de apronte (MATHIAS, 2015).

3.2.4. Resfriamento e aeração

Nesta etapa, o mosto de apronte, em temperaturas próximas à 98°C, é resfriado até a sua temperatura de fermentação, que dependerá do tipo de cerveja a ser produzido. As *Lagers* realizam a fermentação em temperaturas entre 6 e 15°C, já as *Ales* entre 12 e 25°C. O resfriamento é normalmente realizado em trocadores de calor do tipo Placas Removíveis, por ser mais recomendado na produção de alimentos (KUNZE, 2004).

Após o resfriamento, o mosto é areado até que obtenha a saturação de oxigênio (entre 6 e 9 mg/L) (MATHIAS, 2015). A presença do oxigênio é essencial para o desenvolvimento da levedura cervejeira nas fases iniciais da fermentação, uma vez que seu metabolismo aeróbio apresenta maior rendimento energético. Esta etapa é opcional (PRIEST e STEWART, 2006; BRIGGS et al, 2004).

3.2.5. Fermentação

A fermentação é o estágio em que ocorre a transformação de açúcares em biomassa, etanol e subprodutos através da atuação metabólica da levedura cervejeira em um processo que dura entre cinco e sete dias. Processo que ainda apresenta aspectos que necessitam ser elucidados, sendo objeto de estudo de diversas pesquisas (BOULTON e QUAIN, 2001).

As leveduras cervejeiras, *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces uvarum* e *Saccharomyces pastorianus* são seres facultativos que podem realizar a respiração aeróbia, via ciclo de Krebs, ou a anaeróbica, via fermentação alcoólica, dependendo da presença ou ausência de oxigênio livre (LIMA et al, 2001).

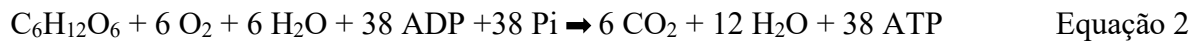
A primeira etapa do metabolismo é comum para ambos caminhos metabólicos, a via glicolítica (glicólise ou Embden-Meyerhof), Equação 1. Nesta etapa ocorre a formação de piruvato através do processo de oxidação em uma sequência de dez reações bioquímicas dos açúcares (glicose, dextrose, frutose, maltose e maltotriose) (NELSON e COX, 2011; TORTORA 2011).

Reação global da glicólise:

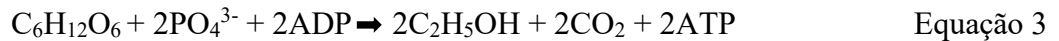


Na presença de oxigênio, o piruvato sofre a oxidação completa pela via metabólica do ciclo de Krebs, com a geração de 38 ATP e CO₂ e água como subprodutos, Equação 2 (NELSON e COX, 2011). Entretanto, na ausência de oxigênio, ao invés de oxidação completa o piruvato sofre descarboxilação, com a liberação de CO₂, formando acetaldeído que em seguida será reduzido à etanol, o que gera apenas 2 ATP, Equação 3 (MADIGAN, MARTINKO E PARKER, 2008).

Reação Global da Via aeróbica (respiração celular):



Reação Global da Via anaeróbica (fermentação alcoólica):



Além dos dois principais subprodutos, CO_2 e H_2O , durante a fermentação também são formados outros compostos essenciais para formação de biomassa e manutenção da atividade celular, como polissacarídeos de reserva e estruturais, lipídeos, proteínas, ácidos nucleicos, etc. Esses outros subprodutos ou compostos secundários da fermentação influenciarão de forma significativa no paladar, aroma, textura e características finais da cerveja, de forma que chegue-se a dizer que a fermentação é a etapa responsável pela formação de até 50% das características sensoriais da bebida final (DRAGONE e SILVA, 2010; LIMA et al, 2001).

3.2.6. Remoção do *trub* frio e biomassa cervejeira

Após o término da fermentação, a cerveja se apresenta turva devido à presença de compostos de turbidez, chamados de *trub* frio. Esse material é composto principalmente por complexos formados entre proteínas de alto peso molar e polifenóis oxidados ou condensados. Além disso, também estão presentes carboidratos de alto peso molecular, além de ácidos graxos e íons metálicos (LEWIS e YOUNG, 2001). A elevada concentração de biomassa celular, formada durante a fermentação, também intensifica a turvação da cerveja.

A remoção destes materiais é realizada por decantação natural, onde a cerveja é mantida em repouso e, por ação da gravidade, os materiais decantam sendo em seguida removidos no interior do tanque de fermentação (KUNZE, 2004).

3.2.7. Fermentação Secundária e maturação

Com baixo teor de CO_2 , a cerveja nesta etapa é dita verde, com aroma e sabor em formação (BRIGGS et al, 2004). As células de levedura que ainda restam suspensas na cerveja promovem a fermentação secundária, em baixas temperaturas. Em seguida, se dá o processo de maturação, no qual a cerveja é mantida em temperaturas entre -1 e 0°C , garantindo o prosseguimento de um lento processo de clarificação e de alterações bioquímicas, garantindo

características finais de estabilidade e de qualidade sensorial da bebida (BRIGGS et al, 2004; LIMA et al, 2001).

3.2.8. Filtração e estabilização coloidal da cerveja

Apesar da decantação realizada na etapa da fermentação e da clarificação na etapa de maturação, ainda se mantém suspensas leveduras e compostos de turvação sendo então necessário a filtração da cerveja. Isso porque essa turvação indesejada pode gerar consideráveis alterações químicas no sabor da cerveja em seu pós-processamento (PRIEST e STEWART, 2006; KUNZE, 2004).

As técnicas mais comumente utilizadas para a clarificação são: sedimentação, uso de agentes clarificantes, centrifugação e filtração, sendo a última, filtração em terra diatomácea combinada com a adição de agentes adsorventes a mais utilizada atualmente (PRIEST e STEWART, 2006).

3.2.9. Carbonatação

O ajuste da concentração de CO₂ pode ser necessário uma vez que a perda do gás é muito provável nas etapas posteriores à fermentação. Em grandes cervejeiras, o processo de carbonatação ocorre em tanques de pressão ou em linha (LIMA et al, 2001).

3.2.10. Estabilização microbiológica

Apesar do teor alcoólico, baixo extrato residual, baixo pH entre outros empecilhos para o crescimento de microrganismos, ainda assim, pode haver desenvolvimento continuado da levedura cervejeira, bem como de microrganismos contaminantes o que demanda de tratamento para estabilização microbiológica (REINOLD, 2009). A técnica mais empregada na atualidade é a pasteurização, podendo ser feita antes ou depois do envase, no qual a temperatura da bebida é elevada para entre 60 e 65°C por uma hora (BAMFORTH, 2001).

3.2.11. Envase

Após a pasteurização, a cerveja já está pronta para ser acondicionada no seu recipiente final, sendo ele, geralmente, garrafa ou lata. No caso das cervejas (ou chopp) em barris, estas não passam pelo processo de pasteurização. A etapa de envase é realizada com a cerveja em baixas temperaturas (0°C) e pode ser a mais dispendiosa de todo o processo produtivo (DRAGONE e SILVA, 2010).

3.3. IMPACTOS AMBIENTAIS

A produção de cerveja consome elevadas quantidades de insumos, como água, energia térmica e energia elétrica provocando a geração de efluentes, sólidos, gases do efeito estufa e outros poluentes. A Figura 7 apresenta os balanços de massa e de energia envolvidos na produção de cerveja:

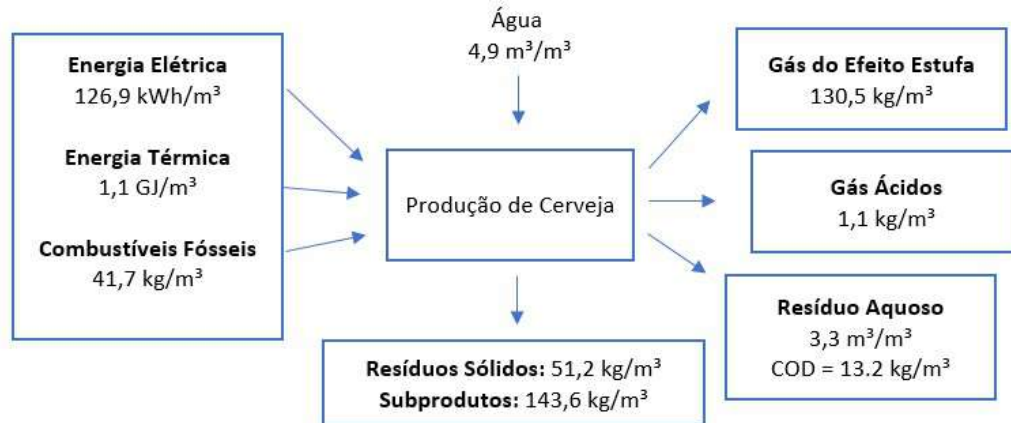


Figura 7- Balanços de massa e energia aplicados ao processo cervejeiro, representando valores específicos por m³ de cerveja produzido. Fonte: Unicer AS (2005).

Algumas circunstâncias de uma cervejaria possuem maior efeito na quantidade de energia, água e outros insumos consumidos na produção. Estes são:

- Capacidade de produção: Devido à grande escala de economia, fatores de envase, processos e tecnologias mais modernos, as cervejarias de grande porte são normalmente mais eficientes quanto ao uso de energia e insumos. Isso porque os grandes empreendimentos possuem capital e volume de produção suficientes para justificarem investimentos intensivos em equipamentos e processos mais eficientes (OLAJIRE, 2012).
- Tipo de cerveja: O consumo de energia dependerá do tipo de cerveja a ser produzido. As cervejas do tipo *Lager* requerem quantidades superiores de energias elétrica e térmica quando comparadas às cervejas do tipo *Ale*. Enquanto a fermentação das *Ale* ocorre em temperaturas ambiente (16 – 24°C), as *Lagers* são fermentadas em temperaturas inferiores (4 – 13°C) com tempo de duração superior, consumindo mais energia para refrigeração. Além disso, as *Lagers* são normalmente pasteurizadas e envasadas em garrafas, já as *Ales* normalmente envasadas em barris sem pasteurização, reduzindo o consumo de energia (KUNZE, 2004).

- Densidade do mosto: Cervejas de baixa densidade de mosto possuem até 10°P (Escala Plato), enquanto as de alta densidade possuem até 20°P. As cervejas de alta densidade, após a fermentação e a maturação ocorre a diluição com água. As vantagens da cerveja de alta densidade são: melhor utilização dos equipamentos, menor perdas de processo, maior estabilização química e de sabor. As desvantagens são: maior tempo de fermentação, diferentes características de sabor e baixa utilização de lúpulo (HARDWICK, 1995).

- Tipo de envase: A energia consumida no envase de cerveja em garrafas retornáveis, 38 – 50 kJ por garrafa corresponde a quase três vezes a energia por litro quando o envase é em cascos ou barris, 1 MJ por barril de 50L (BRITISH BEER & PUB ASSOCIATION, 2006).

3.3.1. Consumo de água

Um dos maiores desafios da indústria cervejeira é a redução do uso de água em sua operação (SIMATE, 2012). Estima-se que em média são utilizados até sete litros de água para cada litro de cerveja produzido (KUNZE, 2004). A água é utilizada em várias atividades incluindo a própria composição da cerveja, aquecimento e resfriamento, limpeza e sanitização. Apesar da cerveja ser composta por aproximadamente 95% de água, a grande maioria da água que entra no processo é descartada após o uso ou perdida durante as etapas (OLAJIRE, 2012). A Tabela 2 apresenta o consumo de água durante o processo cervejeiro:

Tabela 2 - Consumo de água durante o processo cervejeiro. Adaptado de Olajire (2012).

Processo	Consumo específico de água (m³/m³ de cerveja produzida)
Malteação	1,7 - 2,6
Resfriamento	1,1 - 2,4
Fermentação	0,4 - 0,8
Armazenamento	0,1 - 0,6
Filtração	0,1 - 0,8
Envase Garrafas	0,9 - 1
Envase Barris	0,1 - 1,2
Diversos	0,3 - 4
Total	4,7 - 13,3

Além de grandes consumidoras de água, as cervejarias são grandes geradoras de efluentes ricos em matéria orgânica que, quando lançados sem tratamento em vias aquíferas,

promovem a redução do nível de oxigênio dissolvido dessas águas, essencial para a sobrevivência de espécies aquáticas. Alguns compostos em altas quantidades podem causar sérios problemas fisiológicos e neurológicos ao corpo humano quando ingerido. Portanto, se faz necessário o tratamento do efluente antes de seu descarte (BREWERS OF EUROPE, 2002).

A quantidade e características dos compostos presentes irão depender de vários fatores, como o tipo de cerveja produzido, equipamentos, localidade, etc. A Tabela 3 apresenta faixas de parâmetros físico-químicos tipicamente encontradas nos efluentes cervejeiros. Apesar de serem bem variados, o principal composto encontrado é o material orgânico (BREWERS OF EUROPE, 2002), o que pode ser notado pelas altas taxas demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Esses fatores são importantes no diagnóstico da qualidade da água e representam a quantidade de oxigênio necessária para a degradação bioquímica e química, respectivamente, da matéria orgânica (MANTECH, 2011).

Apesar da carga de contaminantes, o efluente de cervejarias é considerado não-tóxico, com baixa quantidade de metais pesados e de fácil biodegradação (BREWERS OF EUROPE, 2002; OLAJIRE, 2012). Portanto, quando tratados, os efluentes podem ser reutilizados até mesmo como água primária, utilizada diretamente na composição da cerveja, ou água secundária, sem contato direto com a produção (OLAJIRE, 2012).

Tabela 3 - Características Físico-químicas do rejeito aquoso das cervejarias. Adaptado Olajire (2012).

Parâmetro	Valor
pH	3 - 12
Temperatura °C	18 - 40
DQO (mg/L)	2000 - 6000
DBO (mg/L)	1200 - 3600
Razão DQO/DBO	1,667
AGV (mg/L)	1000 - 2500
Nitrogênio (mg/L)	25 - 80
Fosfato PO ₄ ³⁻ (mg/L)	10 - 50
ST (mg/L)	5100 - 8750
SST (mg/L)	2901 - 3000
SDT (mg/L)	2020 - 5940

Como mencionado anteriormente, operações de pré tratamento são necessárias antes que se despeje efluentes em corpos hídricos ou utilização como água secundária do processo. Estas podem ser classificadas em métodos físicos, métodos químicos e métodos biológicos que normalmente são empregadas em sequência (EPA, 2003).

As operações do método físico removem os contaminantes através da aplicação de forças físicas. Normalmente, o método físico faz parte da etapa inicial de tratamento onde os sólidos são removidos. Na maioria dos casos, o tratamento físico consiste em uso de telas e sedimentadores para a remoção de sólidos em suspensão. Em geral, o tratamento físico requer baixa energia, porém não tem grande efetividade na remoção dos poluentes (EPA, 2003).

Já o método químico lança mão de reações químicas para a remoção dos poluentes (METCALF & EDDY, 1991). São exemplos de tratamentos químicos a coagulação, floculação, ajuste de pH, que são utilizados para a remoção de materiais tóxicos e impurezas coloidais não removidas na etapa física (OLAJIRE, 2012; SIMATE ET AL., 2011). A vantagem da utilização de métodos químicos é a sua facilidade de aplicação (MOHAN, 2008). Entretanto, a necessidade de adição de novos agentes químicos contribui para a concentração de possíveis contaminantes ao efluente. Outra desvantagem é o aumento de custos de operação devido à compra dos agentes químicos utilizados (METCALF & EDDY, 1991).

O pré tratamento biológico surge como uma solução para a remoção de material orgânico e inorgânico biodegradáveis presentes no efluente (METCALF & EDDY, 1991). O método consiste no uso dos poluentes como substrato para a atividade metabólica de uma variedade de microrganismos (SIMATE et al., 2011). As principais aplicações do método são: remoção de matéria orgânica, nitrificação, desnitrificação e estabilização. Os métodos biológicos podem ser divididos entre anaeróbios, com ausência de oxigênio, e aeróbios, com a presença de oxigênio (ar), Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação entre os tratamentos aeróbios e anaeróbios. Fonte: Driessen e Vereijken (2003).

Fator	Sistemas Aeróbios	Sistemas Anaeróbios
Consumo de Energia	Alto	Baixo
Produção de Energia	Não	Sim
Produção de Biosólidos	Alta	Baixa
Remoção de DQO (%)	90 - 98	70 - 85
Remoção de Nutrientes (N/P) (%)	Alta	Baixa
Operação Descontínua	Difícil	Fácil

Quando comparado com os métodos físicos e químicos, o tratamento biológico anaeróbio apresenta como principal vantagem a alta eficiência na remoção de DQO e DBO (80-90%) e baixo custo de investimento. Entretanto, para se alcançar alto grau de remoção dos poluentes, alta quantidade de energia é necessária (FENG, WANG, LOGAN, & LEE, 2008).

Além dos métodos de pré tratamento, métodos de tratamento avançados são empregados quando se deseja obter água primária através do efluente (BRAEKEN ET AL., 2004; FAKOYA & VAN DER POLL, 2013). A água primária poderá ser usada durante o processo para: rinsar os tubos, equipamentos e recipientes e também como água de resfriamento (BRAEKEN et al., 2004). São exemplos de métodos avançados para o tratamento de efluentes: filtração por membranas, biorreatores com membrana, célula de combustível microbiana, etc. Normalmente, essas tecnologias são bastante eficazes na remoção de poluentes, porém demandam de altos valores de investimento e de operação (SIMATE et al., 2011).

A redução do uso de água está ligada diretamente com a redução da produção de efluentes. Além do mais, a própria economia do seu uso já se mostra como uma medida sustentável. Uma possível solução para restringir o consumo de água em microcervejarias é a integração energética entre as correntes frias e quentes. Isso porque em muitos empreendimentos, a utilidade fria utilizada é a água corrente, a qual é descartada após o seu uso (OLAJIRE, 2012).

3.3.2. Consumo de energia

O processo de produção de cerveja consome elevadas quantidades de energias térmica e elétrica. A demanda térmica vem principalmente das etapas de malteação, realizado nas maltarias, e da brassagem, realizada nas cervejarias. Já a demanda elétrica, surge principalmente nas etapas de resfriamento e na operação dos equipamentos em geral.

3.3.2.1. Energia Térmica

Segundo dados da *Unicer Breweries SA*, em média para cada m³ de cerveja produzida (desconsiderando-se a etapa de malteação) são necessários 1,1 GJ de energia térmica. Durante a geração dessa energia, são consumidos 41,7 kg de combustíveis fósseis com a emissão de 130,5 kg de gases do efeito estufa (GEE) e 1,1 kg de gases ácidos. Entretanto, em microcervejarias artesanais, com produção de até dois mil m³ de cerveja por ano, a demanda por energia térmica pode ser até o dobro, ou seja, 2,2 GJ por m³ de cerveja, Quadro 5. Isso se deve, principalmente, pela falta de otimização em seus processos (KUNZE, 2004).

Segundo o Instituto da Cerveja (2016), o Brasil produz anualmente aproximadamente 700 mil m³ de cervejas especiais, onde se encontram as artesanais. Portanto, isso significa que apenas essa parcela (5% em volume) da produção cervejeira nacional foi responsável pela emissão de mais de 180 mil toneladas de gases do efeito estufa (Equação 4) e 1.500 toneladas de gases ácidos (Equação 5) no ano de 2015.

$$2x \frac{130,5 \text{ kg GEE}}{m^3 \text{ cerveja}} \times 700.000 m^3 \text{ cerveja} = 182.700 \text{ ton GEE} \quad \text{Equação 4}$$

$$2x \frac{1,1 \text{ kg Gás Ácido}}{m^3 \text{ cerveja}} \times 700.000 m^3 \text{ cerveja} = 1.540 \text{ ton Gás Ácido} \quad \text{Equação 5}$$

A malteação é a etapa que mais consome energia térmica na fabricação da cerveja. Durante o processo, são consumidos aproximadamente 2,5 GJ para cada tonelada de malte produzido (KUNZE, 2004). Porém, como mencionado anteriormente, muitas cervejarias optam por adquirir o malte pronto. Sendo assim, a etapa que mais demanda calor na cervejaria é a brassagem, sendo responsável por aproximadamente 50% de toda a demanda térmica do processo, podendo chegar até 1,1 GJ por m³ de cerveja nas microcervejarias. Em sequência vêm

as etapas de envase e pasteurização, que somadas correspondem a 20% e 10% para garrafas/latas e barris, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Etapas de maior consumo de energia térmica em microcervejarias* Fonte: Kunze (2004).

Etapa	Consumo de Calor (MJ/m³ cerveja)
Brassagem	1148
Envase & Pasteurização Garrafa/Lata	461
Envase Barril	242

* Valores para cervejarias com produção anual de 200m³ de cerveja

A integração energética entre correntes se mostra uma boa solução para a redução dos gastos totais de energia térmica. Isso porque a prática reduz a necessidade de energia externa ao processo. Por exemplo, o calor retirado durante o resfriamento do mosto antes da fermentação pode ser utilizado para aquecer a água usada na pasteurização.

Por ser um país tropical, o aquecimento solar se apresenta como uma boa alternativa energética no Brasil. Os equipamentos modernos oferecem a capacidade de aquecimento da água em até 96 °C (MAUTHNER et al, 2013). Uma vez que o processo de produção de cerveja demanda temperaturas de até 105°C (KUNZE, 2004), figura 8, essa tecnologia simples, relativamente barata e sustentável se mostra como uma boa alternativa energética para as microcervejarias, promovendo a substituição parcial do uso de vapor (MAUTHNER et al, 2013).

A Figura 8 mostra as faixas de temperaturas presentes em algumas etapas-chaves do processo cervejeiro:

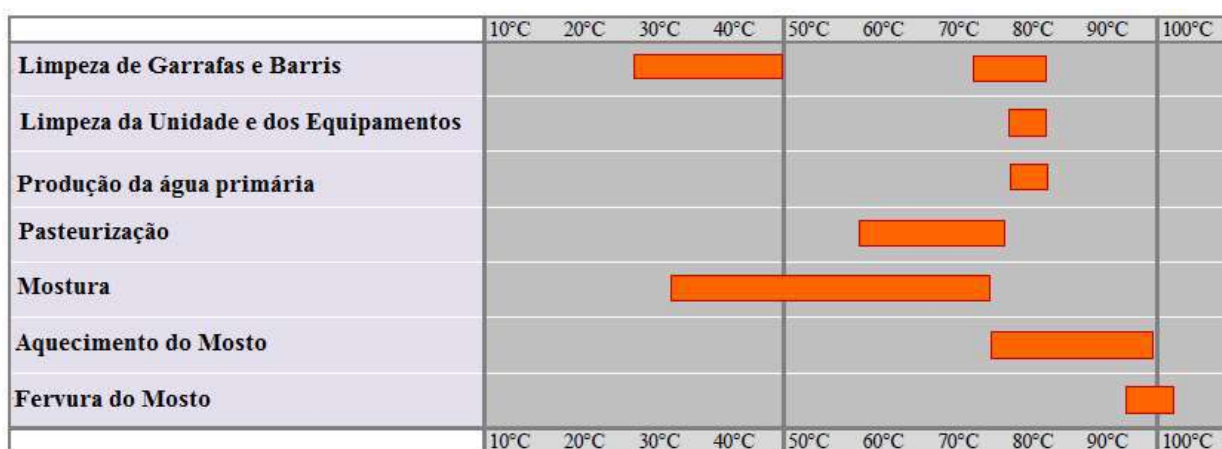


Figura 8 - Temperatura de diferentes etapas durante a produção de cerveja. Fonte: Kunze (2004).

A Figura 9 mostra um arranjo possível para o uso das placas de aquecimento solar juntamente com a caldeira. Em dias com menor incidência solar, a temperatura da água (fluido refrigerante) que sai das placas solares pode não atingir as especificações do projeto. Nesse caso, o controlador irá ditar o uso da caldeira de acordo com a temperatura de saída do tanque de armazenamento de água secundária.

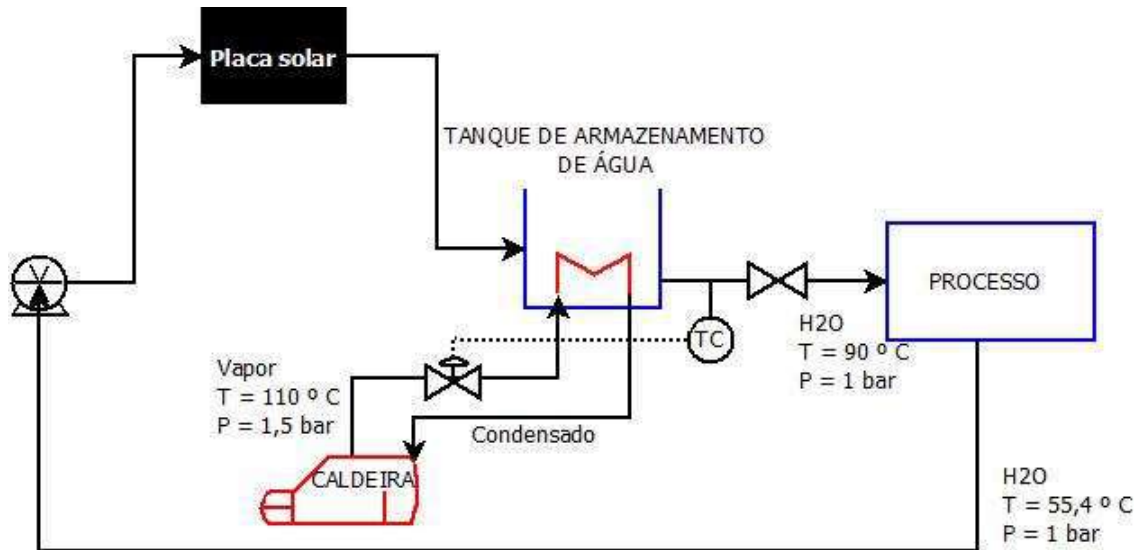


Figura 9 - Arranjo de aquecedores integrados no processo de produção de cerveja a fim de reduzir energia gasta com o aquecimento de água. Adaptado de: Mauthner et al (2013).

As configurações dos processos serão mais profundamente exploradas no Capítulo 4.

3.3.2.2. Energia Elétrica

Além de energia térmica, o processo cervejeiro consome elevadas quantidades de energia elétrica. Ao total, são necessários em torno de 130 kWh por m³ de cerveja produzidos. As etapas de refrigeração representam a maior parte do consumo elétrico, podendo chegar em até 75% de toda a demanda, Tabela 5. O remanescente é consumido por outras áreas, principalmente pelos equipamentos, bombas, envasadoras, etc. As microcervejarias consomem até 10% a mais por m³ de cerveja produzida, quando comparadas com grandes cervejarias, devido à falta de otimização (KUNZE, 2004).

Tabela 5 – Consumo de energia elétrica por etapa de refrigeração em microcervejarias (Adaptado de Kunze, 2004)

Etapa	Consumo de Eletricidade (kWh/m³)
Resfriamento do mosto	16,68 – 22,24
Fermentação e pós resfriamento	12,70 – 24,27
Aclimação	27,80 – 58,30
Total	57-18 – 104,89

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em 2016 as hidroelétricas produziram 61,2% de toda energia elétrica do país, seguida pelas termoelétricas (30,4%) e pelos parques eólicos (7,1%).

Apesar de ser vista por muitos como fonte limpa, as hidroelétricas possuem potencial poluidor, principalmente durante a sua construção. As represas formadas alagam vastas áreas de vegetação, destruindo fauna e flora locais. Além do prejuízo à biodiversidade, as represas podem causar impactos na hidrologia local, clima, erosão, assoreamento e alteração da paisagem (INATOMI, 2005).

Já as termoelétricas possuem o maior potencial poluidor dentre as opções de geração de eletricidade. Gases como óxido de enxofre (SO_x), óxido de nitrogênio (NO_x), monóxido e dióxido de carbono (CO_x) e particulados (chumbo), são lançados à atmosfera durante a queima dos combustíveis fósseis na operação da usina. O uso de biomassa como combustível poderá mitigar os efeitos da combustão, que no contexto das cervejarias poderia ser o rejeito produzido durante a brassagem. Os efeitos ao ecossistema das emissões são: acidificação das águas e do solo, agravamento do efeito estufa, danos à fauna e flora (INATOMI, 2005).

Com a crise do petróleo o uso de energia eólica vem sendo encorajada no país. Do ponto de vista de sua operação, as turbinas eólicas não poluem o ecossistema, uma vez que não há a emissão de gases. Considerada uma alternativa sustentável, a fonte eólica se apresenta como uma proposta promissora para a geração de eletricidade limpa. Os impactos ambientais estão relacionados principalmente aos ruídos das turbinas, ao impacto visual e impacto sobre a fauna (INATOMI, 2005).

Em suma, todas as maneiras de se produzir eletricidade possuem sua parcela poluidora. Portanto, a economia de energia elétrica é uma boa prática a ser aplicada para tornar o processo mais limpo. O racionamento de energia não deve ser realizado apenas no processo, mas em toda

a unidade produtiva. Ademais, a escolha por fontes mais “verdes” para geração de energia elétrica se torna necessária para que os danos ao meio ambiente sejam mitigados.

3.4. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A cerveja é uma das bebidas mais consumidas do mundo e vem atraindo cada vez mais consumidores ao redor do mundo, com vasta variedade de estilos e sabores. No Brasil, a cerveja artesanal vem ganhando cada vez mais espaço no mercado, tornando o momento favorável para a abertura de novas microcervejarias (SEBRAE, 2015).

Ao contrário das grandes cervejarias, as de menor porte não possuem processos otimizados, devido à baixa capacidade de investimentos, o que significa maiores danos ao meio ambiente (OLAJIRE, 2015). A combinação do aumento do número de microcervejarias com o seu alto potencial poluidor representa um risco para o desenvolvimento sustentável.

Sendo assim, para que propostas de mitigação sejam aplicáveis em microcervejarias, elas devem ser de baixo investimento com retorno, ou *payback*, de curto prazo, para atender à menores economias. Nos próximos capítulos, serão estudadas propostas que contribuem para tornar o processo mais sustentável.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo a comparação do uso dos insumos energia e água, recursos chaves para a preservação ambiental, através da simulação de dois processos produtivos com escalas de cervejaria artesanal. Os dados obtidos pelas simulações foram utilizados para os cálculos envolvidos nos estudos de viabilidade técnica e viabilidade econômica do uso das duas propostas aplicadas em microcervejarias: integração energética e aquecimento solar.

4.1. DEFINIÇÕES DO PROCESSO

Para a realização da simulação foram desenhados dois processos conduzidos pelo modo contínuo, com capacidades iguais de produção. Segundo Kunze (2004), são caracterizadas como microcervejarias (artesaniais) as empresas que possuem capacidade produtiva de até 20.000 hl de cerveja por ano, ou seja, aproximadamente 167.000 L por mês. Para o presente estudo, a produção para ambos processos foi estabelecida em 150.000 L por mês.

Para facilitar a identificação, de acordo com as estratégias de cada um deles, foram denominados da seguinte forma:

- PROCESSO 1 – Representando a produção de cerveja do tipo *Ale* a partir do malte. A capacidade produtiva mensal é de 150.000 litros de cerveja. Neste processo, não há a aplicação das propostas mitigadoras dos impactos ambientais, sendo este o cenário menos otimizado;
- PROCESSO 2 – O tipo de cerveja e capacidade produtiva são idênticos ao que é praticado no Processo 1. Isto é, cerveja do tipo *Ale* e produção mensal de 150.000 litros. Entretanto, no Processo 2, há o emprego das propostas com potencial de mitigação.

Com a obtenção dos dados das simulações, foi possível realizar o estudo de viabilidade técnica. Foram analisadas as diferenças de consumo de insumos, bem como as diferenças de emissões de gases nocivos ao meio ambiente entre os processos 1 e 2. Além disso, foi realizado o estudo de viabilidade econômica, uma vez que as novas propostas demandam a aquisição de novos equipamentos. Nestes termos, as etapas concebidas no presente projeto podem ser vistas na Figura 10:

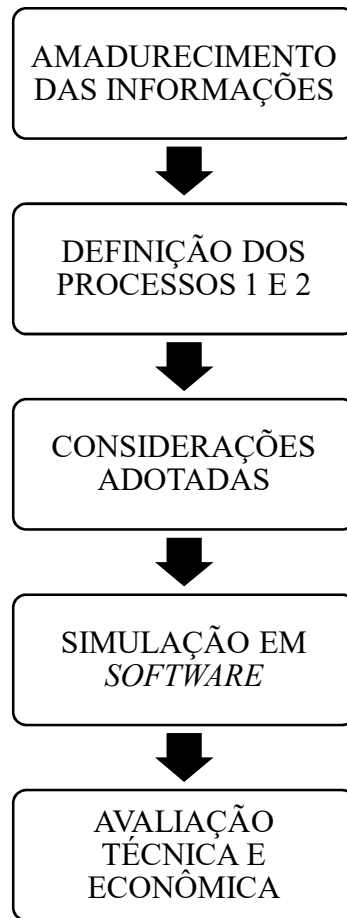


Figura 10 - Fluxograma da metodologia utilizada no presente projeto

As considerações adotadas para o desenvolvimento do presente trabalho encontram-se no Quadro 2. Foram levantadas informações a respeito dos fatores mais impactantes acerca da produção artesanal de cerveja, concomitantemente às possíveis soluções mitigadoras dos seus efeitos.

Quadro 2 - Considerações adotadas para tomada de decisões na busca por soluções mitigadoras de impacto ambiental

Problemática	Soluções Mitigadoras	Finalidade
<ul style="list-style-type: none"> • Elevado consumo de água • Elevada geração de efluentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Integração energética das correntes 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do consumo da utilidade fria (água corrente)
<ul style="list-style-type: none"> • Emissão de gases nocivos ao meio ambiente para geração de vapor (utilidade quente) 	<ul style="list-style-type: none"> • Integração energética das correntes • Uso de energia solar para aquecimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da demanda por uso de vapor

As propostas mitigadoras utilizadas foram: integração energética das correntes quentes e frias, promovendo a redução da demanda por energia externa ao processo e do consumo de água. Trocadores de calor possibilitarão o fluxo térmico. A outra proposta consiste no uso de energia solar para o aquecimento da água secundária, utilizada como fluido refrigerante. Esta será usada como utilidade quente.

Somadas, essas medidas terão potencial para a redução do consumo de água e do uso de vapor, que também é usado como utilidade quente. Conseqüentemente, o uso das caldeiras poderá ser restringido, diminuindo a emissão dos gases provenientes da queima de combustíveis fósseis. A substituição integral do uso de vapor não é recomendada, uma vez que o calor captado pelas placas solares pode oscilar, principalmente devido à variação da disponibilidade da luz solar durante o dia. Portanto, indica-se o uso de aquecedor integrado, onde estão disponíveis o aquecimento solar e aquecimento à vapor, sendo que a utilização do último é regida por controlador de temperatura (Figura 9).

A aplicação das soluções propostas trouxe a necessidade de aquisição de novos equipamentos. Para a integração energética, foram necessários o uso de uma bomba e mais dois trocadores de calor que não estavam presentes no Processo 1. A captação de energia solar é feita por placas solares. Em prol do estudo econômico, foram realizadas cotações via telefone e e-mail, junto às empresas nacionais fornecedoras dos equipamentos indicados. O assunto será mais aprofundado adiante.

4.2. O SIMULADOR E AS VARIÁVEIS DE PROJETO E OPERACIONAIS

O uso de ferramentas computacionais para análise dos processos foi essencial para uma boa avaliação. As ferramentas possibilitam simular condições específicas dos processos permitindo a obtenção de resultados de maneira dinâmica e eficaz.

As simulações foram executadas no *software* Aspen HYSYS[®] versão 8.8, comprovadamente de boa acuracidade na simulação de processos. O programa fornece informações chaves do processo, como propriedades físico-químicas das correntes, demandas energéticas e volume de líquido refrigerante necessário, calculados a partir das condições imputadas (MORAN, 2015).

O Aspen HYSYS, ou simplesmente HYSYS, é uma ferramenta valiosa para simulação dinâmica de processos químicos, muito útil para o cálculo de parâmetros físico-químicos de operações unitárias ou de plantas completas.

O primeiro passo para a simulação é a escolha do modelo termodinâmico que contém as equações que irão reger os cálculos matemáticos. A escolha é baseada, principalmente, nas características dos componentes presentes no processo. Em seguida, é escolhida a lista de todos as substâncias presentes na simulação.

Caso esteja presente no processo, a reação química deve ser caracterizada. O *software* oferece opções para o ajuste das taxas da reação. As opções de escolha são: *Conversion*, *Equilibrium*, *Heterogeneous Catalytic*, *Kinect* e *Simple Rate*. Para cada escolha, o usuário deve completar a caracterização com algumas informações relevantes. O tipo *Conversion*, por exemplo, solicita a porcentagem da conversão, com ou sem a interferência da temperatura.

Com o modelo termodinâmico definido, lista de componentes estabelecida e reação caracterizada (se preciso), o usuário prossegue para o ambiente de simulação. Neste momento, uma paleta disponibiliza opções de operações unitárias para o *design* de processos (MORAN, 2015).

As informações chaves do trabalho a serem coletadas pelas simulações são: consumo de água, demanda de energia térmica e elétrica para o aquecimento e resfriamento de correntes, respectivamente, bem como a composição das correntes envolvidas. Diante do exposto, algumas hipóteses e simplificações foram assumidas e discutidas a seguir.

4.2.1. Parâmetros para a simulação

O modelo termodinâmico representa o conjunto de equações que regem o comportamento dos componentes de acordo com cada operação. Para o presente projeto, o modelo termodinâmico escolhido para a simulação foi o *Peng Robinson Stryjek Vera* (PRSV), uma vez que fornece bons resultados para meios aquosos (MORAN, 2015).

Apesar do malte conter em sua composição uma variedade de compostos e açúcares, apenas a dextrose foi considerada para o preparo do mosto, visando simplificar a reação de fermentação. Sendo assim, o malte foi assumido sendo composto apenas por celulose e dextrose. A adição de lúpulo foi desconsiderada no processo, uma vez que não há impactos significativos quanto ao uso de água e energia (KUNZE, 2004).

A lista de componentes presentes é: Água (H_2O), Etanol (C_2H_5OH), Dióxido de Carbono (CO_2), Dextrose ($C_6H_{12}O_6$) e Celulose. Por não pertencer à lista de componentes presentes no banco de dados do HYSYS, a celulose teve que ser criada no próprio *software* com o auxílio da ferramenta *Hypothetical Solid*. As características utilizadas foram: peso molecular igual à 12.000, densidade igual à $1,50 \text{ kg/m}^3$ e calor específico constante de $1,40 \text{ kJ/kg-K}$

(CHENG, 2010). O uso de cada componente durante a operação pode ser visualizado no Quadro 3:

Quadro 3 - Uso dos componentes nos processos simulados

Componente (Fórmula)	Finalidade do Uso
Água (H ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> • Água primária: Usada na composição da cerveja • Água secundária: Usada como fluido refrigerante
Etanol (C ₂ H ₅ OH)	<ul style="list-style-type: none"> • Produto da reação de fermentação. A concentração de etanol no produto final deve estar em torno de 5% em volume, para atender os requisitos da cerveja (KUNZE, 2004)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Produto da reação de fermentação
Dextrose (C ₆ H ₁₂ O ₆)	<ul style="list-style-type: none"> • Substrato da reação de fermentação
Celulose (*)	<ul style="list-style-type: none"> • O composto criado tem como objetivo a representação de todo material insolúvel em água presente no malte. A presença da celulose é indispensável para os cálculos da demanda energética na etapa de brassagem

* A celulose não está presente no banco de dados de componentes do HYSYS.

A reação de fermentação usada foi do tipo *Conversion*, com 100% de conversão independentemente da temperatura. Uma vez que o foco do projeto é a coleta de informações da utilização de insumos, essa simplificação se mostrou razoável. A reação utilizada é apresentada na Equação 6:



A bomba utilizada para a recirculação de água secundária no Processo 2, foi projetada com a elevação de três metros, simulando a altura do telhado de uma unidade produtiva, onde ficariam as placas solares.

4.2.2. Etapas do processo de produção e considerações adotadas

As etapas do processo descrevem os equipamentos de acordo com a sua seção. Cada equipamento possui a sua particularidade de modo que o seu funcionamento seja identificado. Em cada unidade de processo o simulador o assume como uma peça real, que hospeda um procedimento determinado e com alguns recursos específicos.

É convencionalizado que as características (temperatura, pressão, composição e vazão) das correntes de entrada e saída de cada etapa são as mesmas para ambos processos (Processo 1 e Processo 2). Assim é possível realizar a comparação real do consumo de insumos.

Antecedendo a brassagem, ocorre a mistura das duas principais matérias-primas, água e malte, em condições ambiente, ou seja, 25 °C e 1 bar. O uso de lúpulo é omitido, uma vez que não contribui significativamente para o consumo de água e energia. O equipamento utilizado é o misturador. As propriedades das correntes de entrada (Quadro 4) foram definidas para simular um ambiente real de produção e para atingir a meta de produção mensal de 150.000 L de cerveja, com o teor alcoólico de 5% em volume.

Quadro 4 – Condições físico-químicas das correntes de matéria-prima

Correntes de entrada	Fluxo volumétrico (m³/h)	Fluxo mássico (kg/h)	Composição molar	Condições físicas
Água Primária	0,387	387,57	100 % H ₂ O	25 °C / 1 bar
Malte	Sólido	194,04	94% C ₆ H ₁₂ O ₆ 6% Celulose	25 °C / 1 bar

4.2.2.1. Brassagem

Ao deixar o misturador, a corrente que contém a mistura de água e malte, em condições ambientes, entra no tanque de mostura. Sob o ponto de vista da simulação, a única alteração das condições é o aumento de temperatura, essencial para a formação do mosto. As composições se mantêm inalteradas. Apesar de haver a aplicação de rampas de temperatura durante a etapa, foi convencionalizado que para ambos processos as condições da mostura foram mantidas em 80 °C e 1 bar.

Depois de deixar o tanque de mostura, o mosto passa por um filtro onde é separado o resíduo sólido, sendo composto pela celulose. Essa etapa representa a clarificação. Após o filtro,

a corrente entra no tanque de fervura. Novamente, não há alterações nas composições, apenas nas condições que passam para 105 °C e 1,5 bar.

4.2.2.2. Fermentação

Foi convencionado que o tipo de cerveja a ser produzido é o *Ale*. Portanto, a temperatura durante a fermentação foi mantida a 22 °C e 1 bar. Nesta etapa ocorre a reação de fermentação alcoólica, havendo a conversão total da dextrose ($C_6H_{12}O_6$) em etanol (C_2H_5OH) e dióxido de carbono (CO_2).

Todas as etapas posteriores à fermentação que antecedem a pasteurização foram omitidas na simulação. Isso porque ou não são obrigatórias na produção de cerveja artesanal ou contribuem pouco para o consumo de insumos (KUNZE, 2004).

Neste momento, a mistura atinge a composição final da cerveja, ou seja, teor alcoólico em torno de 5% e o remanescente de água. A presença de outros compostos foi desconsiderada.

4.2.2.3. Envase e Pasteurização

Após a etapa de fermentação a cerveja é refrigerada para a etapa de envase, alcançando 2 °C e 1 bar. Em seguida, o produto passa pelo processo de pasteurização, onde a temperatura é elevada a 65 °C, mantendo-se a pressão. Por fim, se encerra o processo de produção de cerveja.

4.3. Uso de utilidades

Até o momento, as etapas dos processos se mantiveram idênticas, com objetivos e condições iguais. A diferenciação se dá pela aplicação das utilidades. Assume-se que as perdas de água e energia durante as etapas são negligenciadas. Nesta seção serão discutidas as diferenças entre o uso de água e energia pelo Processo 2 quando comparado ao Processo 1.

4.3.1. Água

Além de ser primordial para a composição do produto final, a água (corrente) também é utilizada como utilidade fria no Processo 1, a qual é descartada após o seu uso. Essa prática é comum em cervejarias de pequeno porte, uma vez que a água é um recurso mais barato que energia elétrica (OLAJIRE, 2002).

Para a simulação, convencionou-se que a mínima diferença de temperatura entre a corrente fria de entrada e a quente de saída dos trocadores de calor é de cinco graus Celsius. Sendo assim, as correntes que são resfriadas pela água corrente (25°C e 1 bar) alcançam no

mínimo 30 °C. Como a etapa posterior, que é a fermentação, requer 22 °C, a mistura passa por mais uma refrigeração utilizando eletricidade.

Com o emprego da integração energética no Processo 2, a água utilizada como fluido refrigerante é recirculada, evitando-se o descarte. Foi necessário a implantação de outros equipamentos para a viabilização da integração energética. Os principais são: Trocadores de calor E-102, E-103 e Aquecedor Integrado, Bomba P-100.

4.3.2. Energia

O Processo 1 utiliza como utilidade quente o vapor e como utilidades frias a água corrente e a refrigeração por eletricidade. Apesar do vapor não estar presente na simulação, o seu uso é representado pelo fluxo de calor presente nos equipamentos. Para os estudos de viabilidade, convencionou-se que o gás natural (GN) é o combustível para a geração de vapor nas caldeiras.

Já o Processo 2, utiliza como utilidade quente o vapor e a água aquecida através do fluxo térmico obtido pelo aquecedor integrado (Figura 9), isto é, aquecimento por vapor e energia solar. Diferentemente do Processo 1, o uso de vapor só é mandatório durante a etapa de fervura, uma vez que a temperatura atingida na etapa excede a máxima obtida pelas placas solares.

Em termos da simulação, o aquecedor integrado é representado pelo trocador de calor chamado 'Aquecedor Integrado'. A corrente de *Make-up* serve como abastecimento de água para cobrir as perdas envolvidas no processo. Porém, como foi convencionado que não há perdas, a corrente na simulação possui vazão igual a zero.

4.4. ESTUDOS DE VIABILIDADE

4.4.1. Avaliação Técnica Ambiental

O estudo técnico será útil para avaliar a eficácia do emprego das soluções propostas sob o ponto de vista ambiental. Para isso, serão comparados os dados de consumo de insumos entre os processos 1 e 2, obtidos através da simulação. O consumo de energia térmica pode ser convertido em termos de emissão de gases. Segundo o Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC), para a queima de cada m³ de gás natural, são produzidos aproximadamente 1,95 kg de CO₂ equivalente. Cruzando este dado com a informação da Petrobras sobre o calor gerado pela queima de 1 m³ de gás natural, 9,40 Mcal, pode-se chegar na razão de 0,21 kg de CO₂ são emitidos na produção de 1 m³ de gás natural.

$$\frac{1,95 \text{ kg CO}_2 / 1 \text{ m}^3 \text{GN}}{9,40 \text{ Mcal} / 1 \text{ m}^3 \text{GN}} = 0,207 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{Mcal}}$$

Equação 7

4.4.2. Avaliação Econômica Preliminar

A avaliação econômica cria um critério para decidir entre estratégias alternativas, procurando identificar formas para aplicar recursos de forma eficiente. Antes que haja o investimento para se iniciar a construção e operação é importante apurar o capital necessário para o investimento das instalações, o designado de capital para o investimento fixo e o capital necessário para o funcionamento da planta, denominado de capital de giro ou de trabalho.

No caso do presente trabalho, a metodologia de análise econômica preliminar será similar ao que foi aplicado na avaliação técnica. Ou seja, a comparação dos gastos com recursos entre os processos será ponto chave da análise. O estudo tem como objetivo uma análise preliminar com a avaliação do tempo de retorno, ou *payback*, (Equação 8) do investimento com equipamentos, amortizado pela economia alcançada com as práticas aplicadas. Em outras palavras, o tempo em que as soluções mitigadoras irão se pagar.

$$\text{Payback (ano)} = \frac{\text{Investimento Aplicado na aquisição dos equipamentos (R\$)}}{\text{Economia alcançada pelas soluções} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{ano}} \right)}$$

Equação 8

O tempo de retorno representa o tempo necessário para que o investidor recupere o que investiu. O mesmo não leva em consideração a inflação e a desvalorização da moeda ao longo do tempo.

4.5. DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO (PFD)

O diagrama de fluxo de processo, ou PFD, indica o esquema geral de plantas, de forma a expor os fluxos de materiais, substâncias, misturas e respectivas condições físicas (RAYMOND et al, 2001).

As figuras a 11 e 12, apresentam os diagramas de fluxos dos processos 1 e 2, respectivamente. Os modelos foram desenvolvidos com o auxílio do *software* Dia® V 0.97.2.

No capítulo seguinte serão analisados os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia descrita. A análise preliminar do custo dos processos será possível através dos relatórios gerados pelo simulador.

4.5.1. PFD do Processo 1

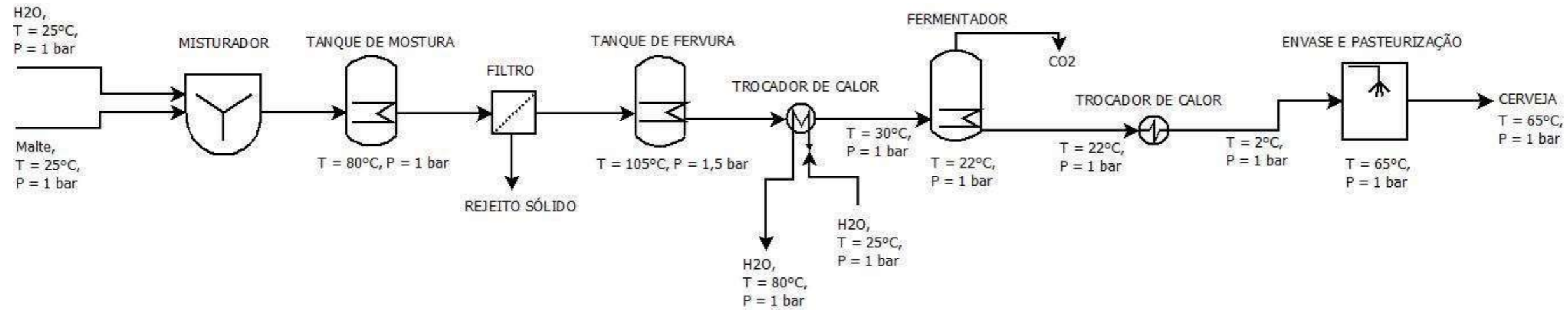


Figura 11- Diagrama de Fluxo de Processo (PFD) do Processo 1

4.5.2. PFD do Processo 2

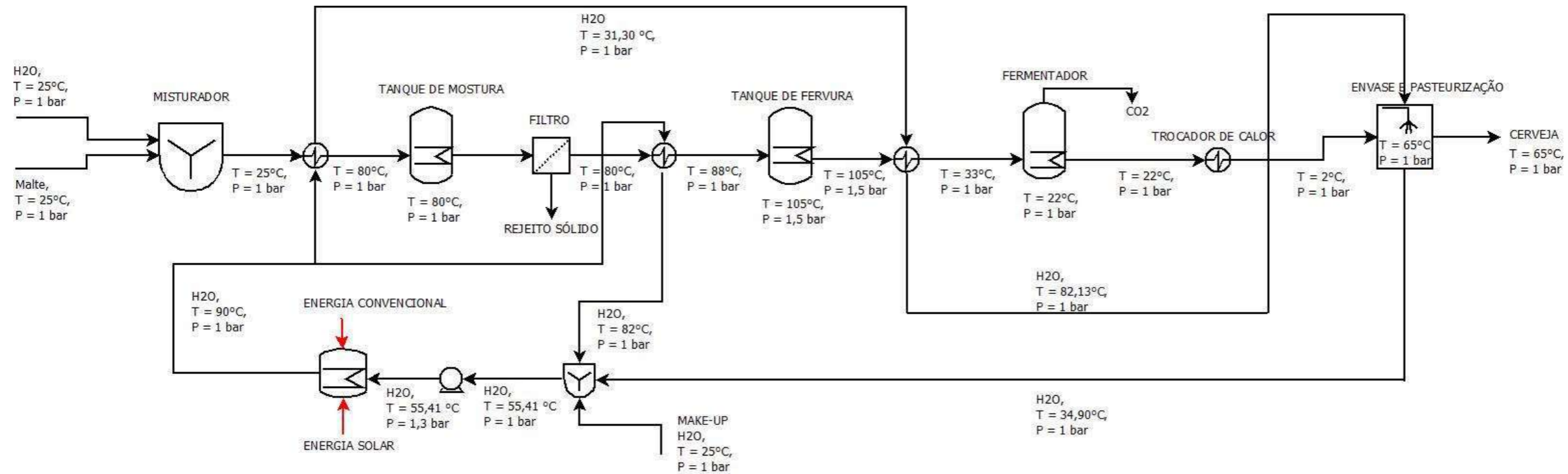


Figura 12 – Diagrama de Fluxo de Processo (PFD) do Processo 2

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os dados obtidos pelas simulações dos Processos 1 e Processo 2 no HYSYS, conforme metodologia descrita anteriormente. Em seguida, foram discutidas as principais considerações e as análises dos resultados. De acordo com os processos sugeridos, as simulações foram realizadas em modo contínuo.

5.1.1. Processo 1

Os valores acerca das propriedades físico-químicas das correntes, fração molares e correntes energéticas do Processo 1 (Figura 13) são apresentados nas tabelas 6, 7 e 8, respectivamente.

Tabela 6 - Propriedades físico-químicas das correntes do Processo 1

Corrente	Gas	Mosto 1	Mosto 2	Rejeito Sólido	Mosto 3
Fração de Vapor	1,00	-	-	-	-
Temperatura [°C]	80,00	80,00	80,00	80,00	99,00
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	-	21,74	21,73	0,01	21,73
Fluxo Mássico [kg/h]	-	581,61	426,38	155,23	426,38
Fluxo volumétrico [m3/h]	-	103,91	0,42	103,49	0,42
Fluxo de Calor [kcal/h]	-	- 1.497.777,60	- 1.506.310,57	8.532,97	- 1.498.609,70
Corrente	Cerveja	Água Primária	Malte	Chopp	Mistura Fria
Fração de Vapor	-	-	-	-	-
Temperatura [°C]	65,00	25,00	25,00	2,00	24,78
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	21,93	21,51	0,23	21,93	21,74
Fluxo Mássico [kg/h]	407,01	387,57	194,04	407,01	581,61
Fluxo volumétrico [m3/h]	0,41	0,39	103,52	0,41	103,91
Fluxo de Calor [kcal/h]	- 1.480.072,94	- 1.468.508,20	- 59.973,05	- 1.504.740,82	- 1.528.481,26
Corrente	Água Corrente	Mosto Resfriado	Água Descarte	CO2	Fermentado
Fração de Vapor	-	-	-	1,00	-
Temperatura [°C]	25,00	30,00	80,00	22,00	22,00
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	28,96	21,73	28,96	0,45	21,93
Fluxo Mássico [kg/h]	521,64	426,38	521,64	19,37	407,01
Fluxo volumétrico [m3/h]	0,52	0,42	0,52	0,02	0,41
Fluxo de Calor [kcal/h]	- 1.976.517,08	- 1.526.359,03	- 1.948.767,74	- 41.435,32	- 1.496.903,63

Total de Água	
Fluxo volumétrico [m3/h]	0,91
Razão m3 água/m3 cerveja	2,2

Tabela 7 – Frações molares das correntes do Processo 1

Corrente	Gas	Mosto 1	Mosto 2	Rejeito Sólido	Mosto 3
Comp Mole Frac (H2O)	0,99	0,99	0,99	-	0,99
Comp Mole Frac (Celulose)	-	0,00	-	1,00	-
Comp Mole Frac (Ethanol)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (Dextrose)	0,01	0,01	0,01	-	0,01
Comp Mole Frac (CO2)	-	-	-	-	-
Corrente	Cerveja	Água Primária	Malte	Chopp	Mistura Fria
Comp Mole Frac (H2O)	0,98	1,00	-	0,98	0,99
Comp Mole Frac (Celulose)	-	-	0,06	-	0,00
Comp Mole Frac (Ethanol)	0,02	-	-	0,02	-
Comp Mole Frac (Dextrose)	-	-	0,94	-	0,01
Comp Mole Frac (CO2)	0,00	-	-	0,00	-
Corrente	Água Corrente	Mosto Resfriado	Água Descarte	CO2	Fermentado
Comp Mole Frac (H2O)	1,00	0,99	1,00	0,03	0,98
Comp Mole Frac (Celulose)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (Ethanol)	-	-	-	0,01	0,02
Comp Mole Frac (Dextrose)	-	0,01	-	-	-
Comp Mole Frac (CO2)	-	-	-	0,96	0,00

Tabela 8- Correntes energéticas do Processo 1

Energia	Térmica			Elétrica	
Corrente de Energia	H Mostura	H Fervura	H Pasteurização	C Fermentação	C Chopp
[kcal/h]	30.703,66	7.700,88	24.667,87	11.979,92	7.837,18

Total	
Térmica [kcal/h]	63.072,41
Elétrica [kcal/h]	19.817,10

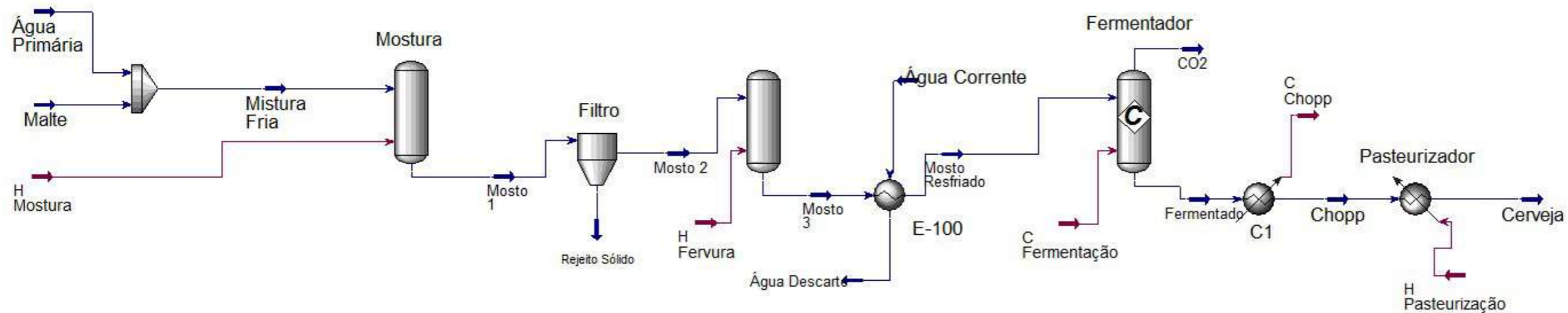
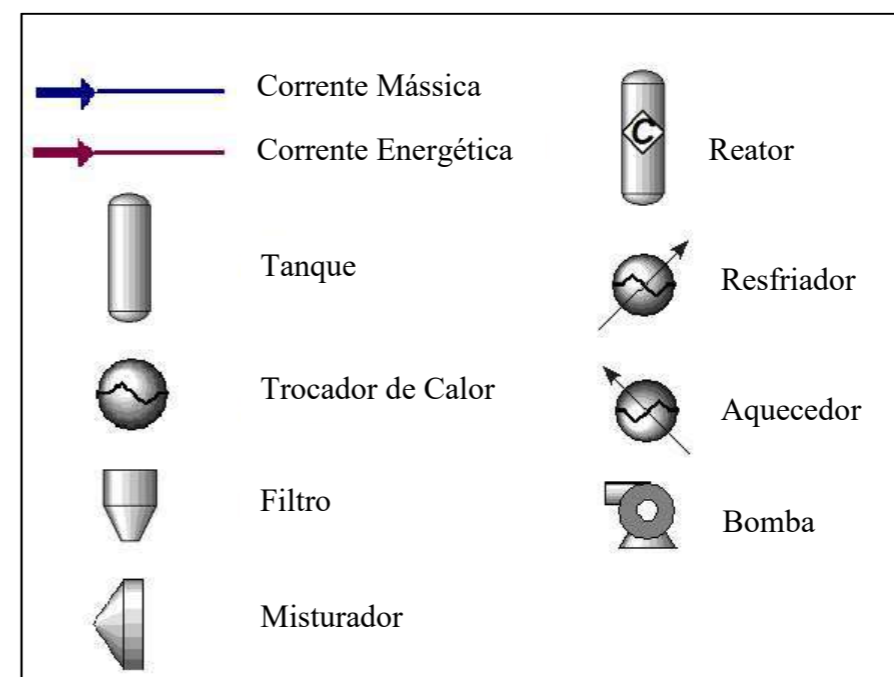


Figura 13 – Simulação do Processo 1 utilizando Aspen HYSYS V8.8

LEGENDA DOS EQUIPAMENTOS



5.1.2. Processo 2

Os valores acerca das propriedades físico-químicas das correntes e suas fração molares e correntes energéticas do Processo 2 (Figura 14) estão apresentados nas tabelas 9, 10 e 11, respectivamente.

Tabela 9 - Propriedades físico-químicas das correntes do Processo 2

Corrente	Gas	Mosto 1	Mosto 2	Rejeito Sólido	Mosto 3
Fração de Vapor	1,00	-	-	-	-
Temperatura [°C]	80,00	80,00	80,00	80,00	99,00
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	-	21,77	21,76	0,01	21,76
Fluxo Mássico [kg/h]	-	582,13	426,89	155,23	426,89
Fluxo volumétrico [m3/h]	-	103,91	0,42	103,49	0,42
Fluxo de Calor [kcal/h]	-	- 1.499.710,69	- 1.508.243,66	8.532,97	- 1.500.533,18
Corrente	Cerveja	Água Primária	Malte	Mistura	Mistura Fria
Fração de Vapor	0,00	-	-	-	-
Temperatura [°C]	65,00	25,00	25,00	80,00	24,78
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	21,96	21,54	0,23	21,77	21,77
Fluxo Mássico [kg/h]	407,53	388,08	194,04	582,13	582,13
Fluxo volumétrico [m3/h]	0,41	0,39	103,52	103,91	103,91
Fluxo de Calor [kcal/h]	- 1.482.013,98	- 1.470.468,83	- 59.973,05	- 1.499.710,69	- 1.530.441,88
Corrente	Make-Up	Água Pasteur	Água Refluxo Elevada	Água Corrente	Mosto Resfriado
Fração de Vapor	-	-	-	-	-
Temperatura [°C]	25,00	34,90	55,41	31,30	33,00
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,29	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	- 0,00	30,00	53,04	30,00	21,76
Fluxo Mássico [kg/h]	- 0,00	540,45	955,47	540,45	426,89
Fluxo volumétrico [m3/h]	- 0,00	0,54	0,96	0,54	0,42
Fluxo de Calor [kcal/h]	0,00	- 2.042.629,77	- 3.592.266,68	- 2.044.512,92	- 1.527.115,74
Corrente	Água Descarte	CO2	Fermentado	Água Aquecida	AA1
Fração de Vapor	-	1,00	-	-	-
Temperatura [°C]	82,13	22,00	22,00	90,00	90,00
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	30,00	0,45	21,96	53,04	30,00
Fluxo Mássico [kg/h]	540,45	19,37	407,53	955,47	540,45
Fluxo volumétrico [m3/h]	0,54	0,02	0,41	0,96	0,54
Fluxo de Calor [kcal/h]	- 2.017.930,35	- 41.434,91	- 1.498.866,18	- 3.560.189,96	- 2.013.781,72
Corrente	AA2	Água Refluxo	Chopp	Mosto 2 Aq	AF2
Fração de Vapor	-	-	0,00	-	-
Temperatura [°C]	90,00	55,41	2,00	88,00	82,00
Pressão [bar]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fluxo Molar [kgmole/h]	23,04	53,04	21,96	21,76	23,04
Fluxo Mássico [kg/h]	415,02	955,47	407,53	426,89	415,02
Fluxo volumétrico [m3/h]	0,42	0,96	0,41	0,42	0,42
Fluxo de Calor [kcal/h]	- 1.546.408,24	- 3.592.275,63	- 1.506.713,40	- 1.505.006,04	- 1.549.645,86

Total de Água	
Fluxo volumétrico [m ³ /h]	0,39
Razão m ³ água/m ³ cerveja	~1 *

Tabela 10 - Frações molares das correntes do Processo 2

Corrente	Gas	Mosto 1	Mosto 2	Rejeito Sólido	Água Aquecida
Comp Mole Frac (H ₂ O)	0,99	0,99	0,99	-	1,00
Comp Mole Frac (Celulose)	-	0,00	-	1,00	-
Comp Mole Frac (Ethanol)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (Dextrose)	0,01	0,01	0,01	-	-
Comp Mole Frac (CO ₂)	-	-	-	-	-
Corrente	Cerveja	Água Primária	Malte	Mistura	Mistura Fria
Comp Mole Frac (H ₂ O)	0,98	1,00	-	0,99	0,99
Comp Mole Frac (Celulose)	-	-	0,06	0,00	0,00
Comp Mole Frac (Ethanol)	0,02	-	-	-	-
Comp Mole Frac (Dextrose)	-	-	0,94	0,01	0,01
Comp Mole Frac (CO ₂)	0,00	-	-	-	-
Corrente	Make-Up	Água Pasteur	Água Refluxo Elevada	Água Descarte	CO ₂
Comp Mole Frac (H ₂ O)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,03
Comp Mole Frac (Celulose)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (Ethanol)	-	-	-	-	0,01
Comp Mole Frac (Dextrose)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (CO ₂)	-	-	-	-	0,96
Corrente	Mosto 3	Água Corrente	Mosto Resfriado	Chopp	Mosto 2 Aq
Comp Mole Frac (H ₂ O)	0,99	1,00	0,99	0,98	0,99
Comp Mole Frac (Celulose)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (Ethanol)	-	-	-	0,02	-
Comp Mole Frac (Dextrose)	0,01	-	0,01	-	0,01
Comp Mole Frac (CO ₂)	-	-	-	0,00	-
Corrente	AA1	AA2	Água Refluxo	Fermentado	AF2
Comp Mole Frac (H ₂ O)	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00
Comp Mole Frac (Celulose)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (Ethanol)	-	-	-	0,02	-
Comp Mole Frac (Dextrose)	-	-	-	-	-
Comp Mole Frac (CO ₂)	-	-	-	0,00	-

Tabela 11 - Correntes energéticas do Processo 2

Energia	Térmica		Elétrica		
Corrente Energética	Aquecimento integrado	H Fervura	C Chopp	C Fermentação	Pump E
[kcal/h]	32.076,72	4.472,86	7.847,22	13.185,35	8,95

Total	
Térmica [kcal/h]	36.549,58
Elétrica [kcal/h]	21.041,52

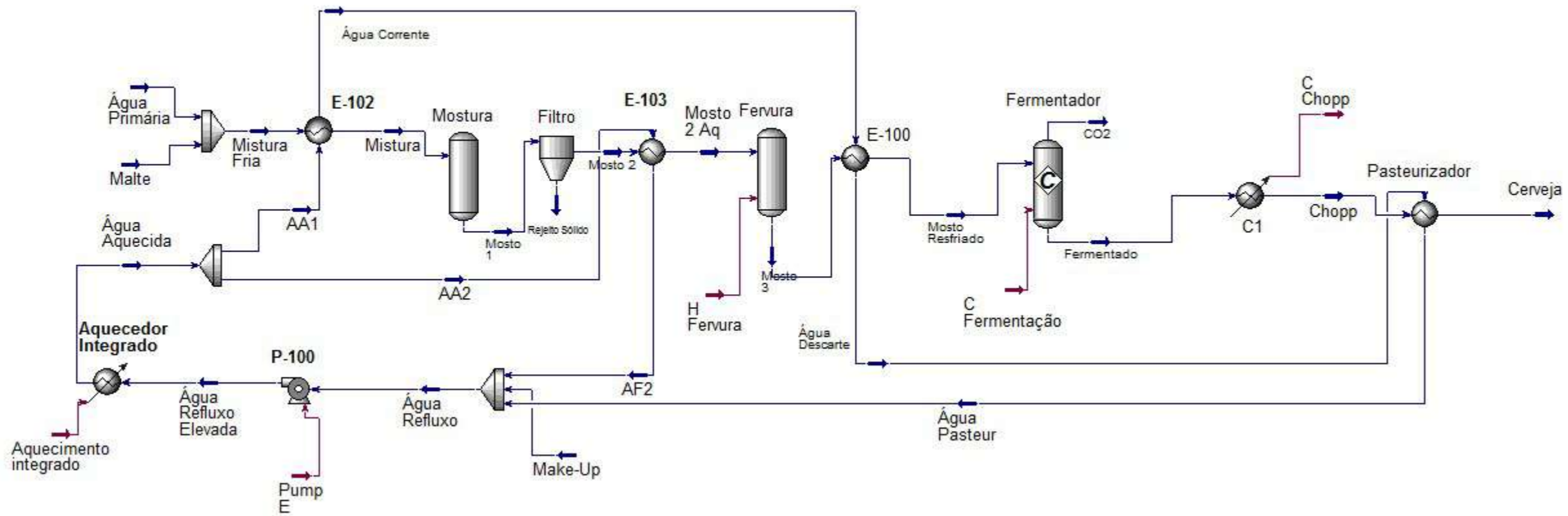
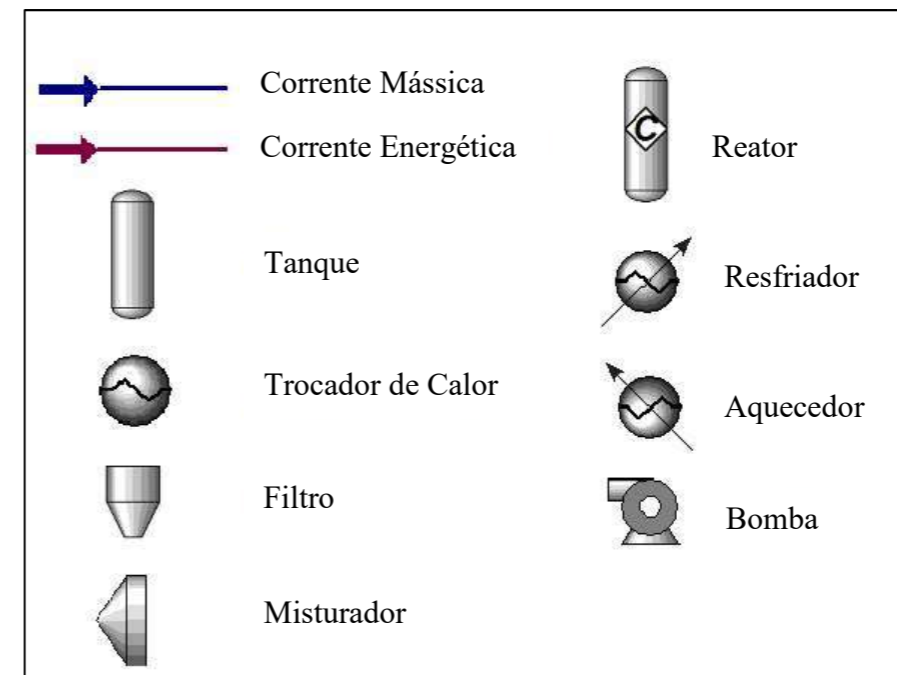


Figura 14 – Simulação do Processo 2 utilizando Aspen HYSYS V8.8

LEGENDA DOS EQUIPAMENTOS



5.2. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos na simulação se mostram promissores quanto ao uso das soluções propostas. A integração energética foi responsável pela redução do uso de água em aproximadamente 55% e da redução de 30% do total de energia consumida. O uso de energia solar possui potencial para reduzir ainda mais o uso total de energia, promovendo o corte de mais de 90% do consumo de energia térmica. Nesta seção são discutidos os resultados, bem como a efetividade técnica e viabilidade econômica.

5.2.1. Viabilidade Técnica

5.2.1.1. Uso de água

Ao se comparar os resultados do consumo de água obtidos pelas simulações com os valores encontrados na bibliografia, percebe-se uma diferença considerável (Tabela 12). Isso se deve às simplificações feitas aos processos. Para as simulações, foram omitidas algumas etapas com elevado consumo de água, como a malteação, envase, armazenamento, gastos com a unidade industrial, etc. Além disso, foram desconsideradas as perdas de água durante as etapas. Essas simplificações se mostraram razoáveis, pois como a base do estudo é a comparação entre processos, só faz sentido considerar as etapas que irão sofrer alterações.

Tabela 12 - Comparativo do consumo de água no processo cervejeiro

Consumo de água por m³ de cerveja produzido	
Bibliografia (Olajire, 2012)	4,7 – 13,3 m ³
Processo 1	2,3 m ³
Processo 2	1 m ³

No Processo 1, o maior consumo de água se deve ao resfriamento do mosto. Em muitas cervejarias artesanais, a água corrente é utilizada como fluido refrigerante, sendo descartada após o uso (OLAJIRE, 2012). Por ser um recurso barato, a princípio o seu descarte se mostra economicamente mais viável do que resfriamento e recirculação o que demandaria a aquisição de equipamentos e gastos energéticos. Entretanto, tal medida se mostra na contramão da preservação ambiental. Anualmente, o consumo total de água do processo é de aproximadamente 4.000 m³ para a produção de 1.800 m³ de cerveja.

Com o emprego da integração energética, o consumo de água no Processo 2 sofreu drástica redução. O consumo total anual foi aproximadamente 1.700 m³ (Tabela 13), ou seja, toda água consumida foi convertida em cerveja. É claro que este cenário possui simplificações, como comentado no início desta sessão.

Tabela 13 – Consumo anual de água por processo

Consumo anual de água para a produção de 1.800 m³ de cerveja artesanal	
Processo 1	4.000 m ³
Processo 2	1.700 m ³
<i>Diferença</i>	2.300 m ³

Para a aplicação da integração energética no Processo 2 é necessária a aquisição de equipamentos que não estavam presentes no Processo 1. O Quadro 5 apresenta as informações técnicas dos equipamentos, fornecidas pelo HYSYS:

Quadro 5 - Informações técnicas dos equipamentos da Integração Energética (Processo 2) fornecidas pelo HYSYS

Quantidade	Equipamento	Informação Técnica
01	Bomba de Recirculação (P-100)	Potência: 10.4 W
01	Trocador de Calor (E-102)	Fluxo Térmico: 30.730 kcal/h
01	Trocador de Calor (E-103)	Fluxo Térmico: 3.238 kcal/h

A análise dos resultados permite concluir que o uso de integração energética bem como a recirculação da água usada como fluido refrigerante é tecnicamente favorável, uma vez que promove a redução do consumo com água. O uso de aquecedor solar não afetou o consumo de água. Os efeitos no consumo de energia serão discutidos na próxima seção.

5.2.1.2. Uso de Energia

5.2.1.2.1. Térmica

O consumo de energia térmica nos processos se deve principalmente às etapas de mostura e pasteurização, representando a brassagem. Juntas, elas são responsáveis por até 88

% de todo consumo. A Tabela 14 compara os dados obtidos na simulação com os valores encontrados na bibliografia:

Tabela 14 - Consumo de energia térmica nas etapas de Brassagem e Pasteurização

Consumo de energia térmica (kcal por m³ de cerveja produzido)			
	Brassagem	Pasteurização	Total
Bibliografia (KUNZE, 2004)	274.378	57.839	332.217
Processo 1	93.670	60.163	153.833
Processo 2	(1)	(1)	89.141 ⁽²⁾

(1) O consumo de energia por etapa no Processo 2 é igual ao Processo 1, uma vez que as condições das correntes são iguais. Entretanto, devido à integração energética, o consumo total externo é menor no Processo 2.

(2) Consumo total no equipamento Aquecedor Integrado

Houve uma considerável diferença entre o valor informado pela bibliografia e os resultados quanto ao gasto energético durante a etapa de brassagem. Isso se deve principalmente ao fato de ter sido adotado o regime contínuo para os processos simulados, enquanto que na realidade, a cerveja é produzida em regime de batelada. Em processos reais, a brassagem pode durar até seis horas (KUNZE, 2004), o que não foi levado em consideração para a simulação. Porém, como os estudos de viabilidade são baseados na comparação entre processos com condições similares, essa simplificação se mostrou razoável para análises preliminares.

Ao se comparar os processos, observa-se uma queda da demanda total por energia térmica. Enquanto o Processo 1 consome ao todo 153.833 kcal para cada m³ de cerveja produzido, o Processo 2 consome 42% a menos, ou seja, 89.141 kcal por m³. Isso se deve à integração energética, que promove o reuso do calor das correntes a serem resfriadas. A diminuição do uso de energia térmica pode ser convertida em redução da emissão de gases poluidores e na diminuição dos gastos com a caldeira. A redução anual de energia promovida pela integração energética é 116.445.600 kcal, conforme a Equação 9:

$$(153.833 - 89.141) \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{cerveja}} \times 1.800 \frac{\text{m}^3 \text{cerveja}}{\text{ano}} = \mathbf{116.445.600 \text{ kcal/ano}} \quad \text{Equação 9}$$

Como apresentado na seção 3.3.2, para cada 1.000 kcal gerados pela combustão de gás natural são gerados 0,207 kg de CO₂. Portanto, o emprego da proposta resultará a economia da emissão de CO₂ de 24,1 toneladas por ano, conforme apresentado na Equação 10:

$$0,207 \frac{kg\ CO_2}{1.000\ kcal} \times 116.445.600 \frac{kcal}{ano} = \mathbf{24,1\ toneladas\ CO_2/ano} \quad \text{Equação 10}$$

té o momento, se discutiu a variação da demanda por energia térmica adquirida pelo emprego da integração energética entre correntes. A outra proposta é a utilização da energia solar como fonte de calor, compondo o aquecedor integrado (Figura 9).

De acordo com a simulação do Processo 2, o fluxo de calor representado pelo “aquecimento integrado” (Figura 14) é de 32.076 kcal/h, ou seja, aproximadamente 90% de todo fluxo térmico externo ao processo. Assumindo que a energia solar tem potencial para fornecer toda a demanda do aquecedor integrado, a utilização das caldeiras poderá ser ainda mais reduzida. Para que isso seja possível, é necessária a aquisição de placas solares com potência total de captação de energia igual ou superior à 32.076 kcal/h.

A Tabela 15, apresenta a necessidade de geração de calor para cada processo, considerando o emprego das soluções mitigadoras, integração energética e placas solares, no Processo 2:

Tabela 15 - Consumo de energia térmica que é gerada pela combustão

Fluxo térmico produzido pelas caldeiras (kcal/h)	
Processo 1	63.072,41
Processo 2	4.472,86 ⁽¹⁾
<i>Diferença</i>	58.599,55

(1) Assumindo que todo calor do aquecedor integrado é captado pelas placas solares

Portanto, segundo os resultados obtidos, o emprego das duas propostas promove a redução do fluxo térmico, proveniente da queima de combustíveis, em até 93%. Sendo assim, as emissões de gases, por ano, podem ser reduzidas em até 53,1 toneladas de CO₂ por ano, conforme as equações 11 e 12:

$$58.599,25 \frac{kcal}{h} \times 12 \frac{h}{dia} \times 365 \frac{dia}{ano} = 256.668.000\ kcal/ano \quad \text{Equação 11}$$

$$0,207 \frac{kg\ CO2}{1.000\ kcal} \times 256.668.000 \frac{kcal}{ano} = 53,1\ toneladas\ CO2/ano$$

Equação 12

Cabe ressaltar que esse resultado representa o caso mais otimista. Porém, devido à variação de disponibilidade da luz solar, a captação de energia pelas placas solares poderá ser menor, fazendo que o uso das caldeiras no aquecedor integrado seja maior.

O Quadro 6 compila os resultados quanto à mitigação dos impactos ambientais causados pelo processo cervejeiro:

Quadro 6 - Resultados da aplicação das soluções mitigadores (por ano)

Água	Gases do Efeito Estufa
Redução do uso de 2.300 m ³	Redução da emissão de até 53,1 t de CO ₂ equivalente

5.2.1.2.2. Elétrica

Apesar dos esforços para a redução de energia térmica, há um aumento da demanda total de energia elétrica de 6%, ou 1.224 kcal/h. Esse aumento se deve principalmente ao aumento da temperatura da corrente ‘mosto resfriado’, que devido a limitações de transferência de calor gerados pela integração energética, possui temperatura 3°C superior no Processo 2 quando comparado ao Processo 1. O emprego da bomba (P-100) para a recirculação não apresentou grande aumento para a demanda energética, sendo seu valor inferior a 1% da demanda elétrica total.

A Tabela 16, mostra o comparativo dos gastos com energia elétrica entre os processos e os valores contidos na bibliografia.

Tabela 16 - Comparativo do consumo de eletricidade no processo cervejeiro (kcal/m³)

Consumo de energia elétrica (kcal por m³ de cerveja produzido)			
	Fermentação	Refrigeração	Total
Bibliografia (KUNZE, 2004)	15.889 ⁽¹⁾	42.433 ⁽¹⁾	58.322
Processo 1	29.217	19.114	48.331
Processo 2	32.158	19.139	51.297

(1) Valores médios

A informação do consumo total de eletricidade das etapas analisadas (Fermentação e Refrigeração) fornecido pela bibliografia é superior ao que foi simulado. Isso se deve ao fato de que nas simulações é desconsiderada a parcela de ineficiência dos equipamentos elétricos.

Os resultados das simulações durante a etapa de fermentação foram superiores ao fornecido pela bibliografia. Isso porque a bibliografia separa a parte da refrigeração da fermentação. Entretanto, para os processos simulados, durante a fermentação há refrigeração, uma vez que o mosto chega ao fermentador em temperaturas superiores às requeridas pela etapa. A mesma explicação é usada para justificar os valores inferiores de refrigeração das simulações ao fornecido pelo autor.

5.2.2. Viabilidade Econômica

Nesta seção, são apresentados, em termos financeiros, a viabilidade do projeto, uma vez que, sob perspectiva ambiental, ele se mostrou promissor. Foram avaliados os custos operacionais, ou *Operational Expenditure* (OPEX) e os custos com capital, ou *Capital Expenditures* (CAPEX). Esses dados foram úteis para obtenção do tempo de retorno de investimento, ou *payback*.

5.2.2.1. Variação de OPEX

OPEX remete aos custos operacionais de um negócio, como os custos com funcionários, utilidades, etc. O presente estudo foi baseado a partir da comparação apenas dos gastos com utilidades entre os processos 1 e 2, uma vez que as outras despesas se mantiveram fixas.

A cidade do Rio de Janeiro – RJ foi concebida como a sede da unidade industrial, portanto, os preços dos insumos e utilidades foram tabelados de acordo com os valores praticados na cidade.

Conforme apresentado pela Tabela 15, a economia de água anual é de 2.300 m³, ou seja, 191,6 m³ mensais. De acordo com a Estrutura Tarifária Vigente da Cedae (divulgada em 30/06/2017), companhia de abastecimento de água da cidade, a tarifa para valores acima de 130 m³ mensais, na categoria industrial, é de R\$ 18,366825/m³. Sendo assim, a economia anual alcançada apenas com a redução do uso da água seria de aproximadamente R\$ 42.244,00.

$$2.300 \frac{m^3}{ano} \times 18,366825 \frac{R\$}{m^3} = R\$ 42.243,69 /ano$$

Equação 13

O uso da integração energética das correntes proveu a economia de 116.445.600 kcal por ano. Segundo a tabela Fórmulas de Conversão (2017) disponível no site da Petrobras, a queima de um m³ de gás natural gera 9.400 kcal. Sendo assim, a economia anual de gás natural é de 12.387 m³. De acordo com a Estrutura Tarifária Vigente da CEG Rio do mês do novembro de 2017, empresa fornecedora de gás natural da cidade, a tarifa para essa faixa de consumo para indústrias é de R\$ 2,4114/m³. Portanto, a economia anual seria de R\$ 29.872,01.

$$12.387 \frac{m^3 GN}{ano} \times 2,4114 \frac{R\$}{m^3 GN} = \mathbf{R\$ 29.872,01 /ano}$$

Equação 14

A utilização do aquecimento solar, gerou um potencial de economia de até 32.076 kcal/h, como discutido na seção 5.2.1.2.1. Em um ano, a economia de gás natural pode chegar próximo de 15.000 m³ de gás natural. Assim, a economia anual máxima vinda com a utilização dessa proposta mitigadora é de R\$ 36.037,54, Equação 16.

$$32.076 \frac{kcal}{h} \times \frac{1 m^3 GN}{9.400 kcal} \times 12 \frac{h}{dia} \times 365 \frac{dia}{ano} = 14.946 m^3 GN/ano$$

Equação 15

$$14.946 \frac{m^3 GN}{ano} \times 2,4114 \frac{R\$}{m^3 GN} = \mathbf{R\$ 36.037,54 /ano}$$

Equação 16

Os gastos com energia elétrica aumentaram em 1.224 kCal/h ou 512 kWh/mês (operação de 12 horas por dia). De acordo com a Estrutura Tarifária Vigente da Light do mês de novembro de 2017, empresa fornecedora de eletricidade da cidade, a tarifa para consumos acima de 450 kWh mensais, para baixa tensão, é de R\$ 0,83835/kWh. Portanto, o aumento de gastos com eletricidade seria de R\$ 5.150,00 anuais, Equação 17.

$$512 \frac{kWh}{mês} \times 12 \frac{mês}{ano} \times 0,83835 \frac{R\$}{kWh} = \mathbf{R\$ 5.150,82 /ano}$$

Equação 17

Ressaltando que esse valor se apresenta abaixo do valor real, uma vez que foi desconsiderada a ineficiência dos equipamentos de resfriamento, além também ter sido desconsiderada a possível necessidade de tensões médias ou altas, as quais refletiriam maiores valores de tarifa.

O Quadro 7 apresenta os dados da variação dos custos anuais com insumos, após a aplicação das soluções propostas:

Quadro 7 - Variação dos gastos com insumos entre os Processos 1 e 2

Utilidade	Propostas Mitigadoras	Variação de Gastos
Água	<ul style="list-style-type: none"> Integração Energética 	- R\$ 42.243,69
Gás Natural	<ul style="list-style-type: none"> Integração Energética Aquecedor Solar 	- R\$ 29.872,01 - R\$ 36.037,54
Energia Elétrica	<ul style="list-style-type: none"> Integração Energética/ Aquecedor Solar 	+ R\$ 5.150,82
TOTAL		- R\$ 103.002,42

Em suma, para o processo em estudo, as soluções propostas possuem o potencial para gerar uma economia líquida total de até R\$ 103.000,00 ao ano.

5.2.2.2. CAPEX

CAPEX remete aos gastos com investimentos realizados por um negócio, por exemplo o investimento para aquisição de equipamentos ou para melhoria de processos. No presente estudo, serão avaliados os custos com capital para a aquisição de equipamentos necessários para a aplicação das soluções mitigadoras.

As informações técnicas dos equipamentos necessários para a integração energética foram apresentadas pelo Quadro 5. Além desses equipamentos, é preciso o investimento em um sistema de aquecimento solar, com capacidade de captação de calor de 32.076 kcal/h. Com os dados técnicos dos equipamentos em mãos, foi possível realizar as cotações, Tabelas 17, 18 e 19.

A lista de equipamentos a ser adquirida é:

- 01 trocador de calor do tipo Placas Removíveis, com fluxo térmico de no mínimo 30.730 kcal/h

- 01 trocador de calor do tipo Placas Removíveis, com fluxo térmico de no mínimo 3.238 kcal/h
- 01 bomba centrífuga de potência mínima de 10W ou com a capacidade de transportar 1000 l/h de água à uma coluna de 3 m
- Placas solares, com fluxo térmico de no mínimo 32.076 kcal/h

Tabela 17 - Cotação de trocadores de calor do tipo Placas Removíveis*

Fluxo de calor (kcal/h)	Descrição / Empresa	Preço
	Trocador Micro Placas D62-E-60 1.1/4" – 12 TR / Vaportec	R\$ 3.773,31
30.000	FP 09-13 / Apema	R\$ 3.420,00
a	GBH 500H-70 (54,5 cm x 12,4 cm x 17cm) / GEA	R\$ 2.592,00
35.000	WTT	
	Chiller 60P (54 cm x 11 cm x 11 cm) / Danfrill	R\$ 2.529,00
	Chiller 50P (117 mm x 71 mm x 189 mm) / Importherm	R\$ 1.540,00
3.500	FP 09-09 / Apema	R\$ 3.125,00
a	Trocador B3-030-20-3.0-HQ L 3/4" – 2 TR / Vaportec	R\$ 997,77
5.000	BX8THx30	R\$ 1.035,00

* O trocador de calor do tipo placas removíveis é o mais adequado para a produção de cerveja, pois é mais fácil para realizar a sanitização (KUNZE, 2004).

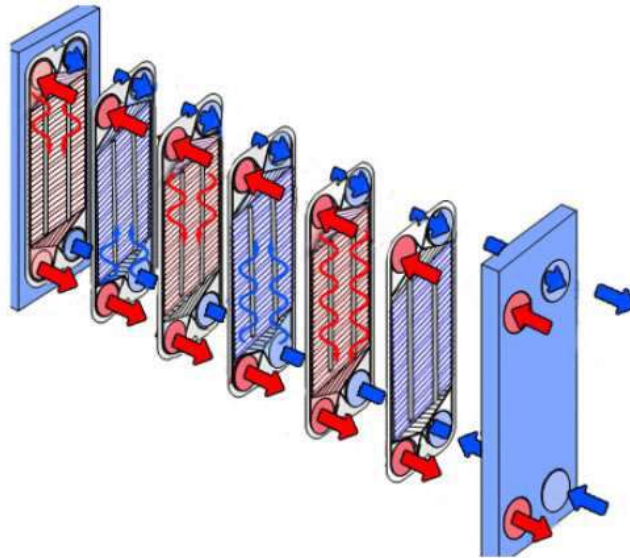


Figura 16 - Esquema do trocador de calor do tipo Placas Removíveis



Figura 15 - Placa de aquecimento solar da marca KOCS

Tabela 18 - Cotação da Bomba Centrífuga

Marca / Empresa	Potência (W)	Preço
Sd1000c /Sarlo	23	R\$ 167,12
SB1000A/ Sarlo Better	30	R\$ 171,10
4000 lh/ Mydor Tech	38	R\$ 733,90

Atendendo os requisitos, os preços médios dos trocadores de calor no mercado nacional são R\$ 3.244,00 e R\$ 1.674,00, para as faixas de fluxo de calor entre 30.000 a 35.000 kcal/h e

3.500 a 5.000 kcal, respectivamente. O preço médio da bomba centrífuga obtido pela cotação (Tabela 18) foi de R\$ 350,00.

Tabela 19 - Cotação de placas solares

Marca / Empresa	Produção mensal de calor (kcal/mês.m²)	Preço (R\$/m²)
KOCS OS / Komeco	88.500	555,56
RSC / Rinnai	70.500	562,00
Soletrol Max / Soletrol	69.300	391,25
CSC Premium / Cumulus	74.890	410,00

A escolha da marca das placas solares foi baseada na produção mensal de calor por m², a fim de se otimizar a área necessária para instalação das mesmas. Portanto, foi escolhida a marca KOCS OS, da empresa Komeco, com a produção de 88.500 kcal/mês.m², Tabela 19. Portanto, a área total de aplicação das placas é de 130,5 m², Equação 19:

$$32.076 \frac{kcal}{h} \times 12 \frac{h}{dia} \times 30 \frac{dia}{mês} = 11.547.360 \frac{kcal}{mês} \quad \text{Equação 18}$$

$$11.547.360 \frac{kcal}{mês} \div 88.500 \frac{kcal}{mês.m^2} = \mathbf{130,5 m^2} \quad \text{Equação 19}$$

O gasto total com as placas solares foi de R\$ 72.488,17:

$$130,5 m^2 \times \frac{R\$}{m^2} 555,56 = \mathbf{R\$ 72.488,17} \quad \text{Equação 20}$$

A Tabela 20 apresenta os custos totais com o capital para aquisição dos equipamentos:

Tabela 20 - Investimentos para a aquisição de equipamentos

Equipamento	Investimento Médio
Trocador de Calor (E-102)	R\$ 3.244,00
Trocador de Calor (E-103)	R\$ 1.674,00,
Bomba de Recirculação (P-100)	R\$ 350,00
Aquecedor Solar	R\$ 72.488,17
TOTAL	R\$ 77.756,17

Desta forma, o custo dos equipamentos gira em torno de R\$ 78.000,00. Esse valor desconsidera os custos fiscais, frete e instalação.

5.2.2.3. *Payback*

Ao total, o emprego das soluções mitigadoras trouxe uma economia anual de até R\$ 103.000,00. Em contrapartida, as propostas demandaram um total de investimentos de R\$ 78.000,00. Portanto, o tempo mínimo de retorno dos investimentos do projeto foi de 0,75 ano:

$$R\$ 78.000,00 \div R\$ \frac{103.000,00}{ano} = 0,75 \text{ ano} \quad \text{Equação 21}$$

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do investimento se mostrou bastante atrativa, uma vez que o *payback* gira em torno de 9 meses. Vale ressaltar que os resultados foram obtidos em situações com o emprego de hipóteses e simplificações, uma vez que o estudo é preliminar.

A integração energética entre correntes, se apresenta favorável quase sempre, uma vez que diminui a demanda por energia externa. Para o projeto em questão, a integração energética não só diminuiu a demanda externa de energia como também a utilização da água usada como

fluido refrigerante. Portanto, sua utilização é viável tanto na perspectiva ambiental como financeira.

O processo cervejeiro possui etapas de temperaturas baixas ou moderadas, o que torna a utilização de vapor (gerado por combustão, muitas vezes de combustíveis fósseis) opcional sob o olhar termodinâmico. É interessante a substituição da combustão tanto sob a perspectiva ambiental, devido à emissão de gases nocivos ao meio ambiente, quanto sob a perspectiva econômica, uma vez que o aumento do preço dos combustíveis se mostra cada vez mais presente no Brasil. Além do mais, o Brasil é um país tropical com altos índices de incidência solar contribuindo para a viabilidade do uso da tecnologia de energia solar.

Os objetivos traçados no trabalho foram alcançados nos termos assumidos. O projeto deslumbra a possibilidade de contribuir para trabalhos futuros no que diz respeito ao incentivo de aplicação de alternativas mitigadoras de impacto ambiental em cervejarias artesanais, utilizando ferramentas de simulação.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, foi possível confirmar que o emprego das duas soluções propostas, integração energética e aquecedores solar, é bastante promissor sob a perspectiva ambiental. O uso da integração energética promoveu uma economia do consumo de água em 2.300 m³ por ano ou 57% do total. Juntas, as duas propostas permitiram a redução da utilização de energia térmica gerada pela queima em caldeiras em até 93 %. Essa redução significou a não emissão de 53,1 toneladas de CO₂ por ano. O aumento de 6% na demanda por energia elétrica não afetou consideravelmente a viabilidade ambiental do projeto. O software Aspen HYSYS V8.8 foi fundamental para a aquisição dos dados de forma dinâmica e precisa.

O projeto também se mostrou viável sob o ponto de vista econômico. A redução do uso dos insumos gerou uma economia anual de até R\$ 103.000,00. O capital para a aquisição dos equipamentos necessários para o emprego das soluções girou em torno de R\$ 78.000,00. Portanto, o tempo de retorno do investimento foi menor do que um ano.

Enfim, a viabilidade do uso das tecnologias propostas foi confirmada, afirmando seu potencial ambiental e econômico. As soluções mitigadoras de danos ao meio ambiente contribuem para o desenvolvimento sustentável da indústria cervejeira, principalmente no que tange às microcervejarias, devido ao potencial de melhorias.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, sugere-se o mapeamento tecnológico para identificar outras alternativas que poderão contribuir para a produção mais sustentável de cerveja, com um maior aprofundamento técnico. Entre elas destacam-se a geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos e por turbinas eólicas, ou o uso dos resíduos dos grãos de malte como fonte de combustível nas caldeiras.

Fora do âmbito técnico, sugere-se o estudo do emprego de ferramentas de gestão, tais como *Lean Manufacturing* e *Six Sigma*, para toda a unidade industrial que podem contribuir para a redução do uso de recursos bem como a redução da emissão de gases e geração de resíduos.

REFERÊNCIAS

- Archaeo News (2001). Disponível em: <<http://www.stonepages.com/news/archives/000123.html>> Acesso em: 21 mai. 2017.
- BAMFORTH, Charles W. **Nutritional aspects of beer—a review**. Nutrition Research. Davis, p. 227-237. Ago. 2001.
- BEERLIFE (2010). Disponível em: <http://www.beerlife.com.br/portal/default.asp?id_texto=28> Acesso em: 16 mai. 2017.
- BLRA, **Utilities & Environmental Survey Report**, Technical Circular 344, Brewers & Licensed Retailers Association, London, 1999.
- Blue, Anthony Dias (2004). **The Complete Book of Spirits: A Guide to Their History, Production, and Enjoyment**. [S.l.]: HarperCollins. p. 73. ISBN 0-06-054218-7).
- BOULTON, C.; QUAIN, D. **Brewing Yest & Fermentation**. Blackwell Science LTD, 2001. 644p.
- Braeken, L., Van der Bruggen, B., & Vandecasteele, C. (2004). **Regeneration of brewery waste water using nanofiltration**. Water Reserach, 38(13), 3075–3082.
- BRASIL. Constituição (2009). Decreto nº 6.871, de 04 de julho de 2009. Lei da Cerveja. Brasília.
- BREWERS ASSOCIATION (2015). Disponível em: <<https://www.brewersassociation.org/press-releases/craft-brewer-volume-share-of-u-s-beer-market-reaches-double-digits-in-2014/>> Acesso em: 5 mai. 2017.
- Brewers of Europe, October 2002. Guidance Note for Establishing BAT in the Brewing Industry. Brewers of Europe, Brussels.
- BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. **Brewing Science and Practice**. Flórida: CRC Press LLC and Woodhead Publishing Limited, 2004. 863p.
- British Beer & Pub Association, **The British Brewing Industry e 30 Years of Environmental Improvement 1976e2006**, British Beer & Pub Association, London, 2006.

CBS News (2010). Disponível em: <<https://www.cbsnews.com/news/archeologists-link-rise-of-civilization-and-beers-invention/>> Acesso em: 5 mai. 2017.

Cervesia (2015). Disponível em: <<https://www.cervesia.com.br/historia-da-cerveja/72-a-historia-da-cerveja-no-brasil.html>> Acesso em: 20 mai. 2017.

CHENG, 2010 **Thermophysical Properties of Lignocellulose: A Cell-scale Study down to 41K**. Department of Mechanical Engineering, 2010 Black Engineering Building, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA 2Department of Foreign Language, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430065, P. R. China.

COUTINHO, Carlos Alberto Tavares, 2017. "**Cerveja marca barbante" ou a história da cerveja no Brasil**". Disponível em: <<http://cervisiafilia.blogspot.com.br/>> Acesso em: 19 outubro 2017.

CURI, Roberto Abdallah. **Produção de cerveja utilizando cevada como adjunto de malte**. 2006. xi, 123 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu., 2006

DRAGONE, G.; SILVA, J. B. A. **Cerveja**. Em: VENTURINI-FILHO, W.G. Bebidas. V1: Bebidas Alcoólicas Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ed Blucher, 2010. 461p.

Driessen, W., & Vereijken, T. (2003). **Recent developments in biological treatment of brewery effluent**. In The Institute and Guild of Brewing convention, Livingstone, Zambia, March 2–7. Disponível em <<http://www.environmental-expert.com/Files%5C587%5Carticles%5C3041%5Cpaques24.pdf>> Acesso em: 5 mai. 2017.

EEO, **Energy Consumption Guide** No 29: Small Breweries, Energy Efficiency Office, London, 1992.

EPA. (2003). **Wastewater technology fact sheet**. Washington: Municipal Technology Branch U.S. EPA. Disponível: <http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_final_sgrit_removal.pdf> Acesso em: 5 mai. 2017.

Fakoya, M. D., & van der Poll, H. M. (2013). **Integrating ERP and MFCA systems for improved waste-reduction decisions in a brewery in South Africa**. Journal of Cleaner Production, 40, 136–140.

Feng, Y., Wang, X., Logan, B. E., & Lee, H. (2008). **Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells**. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 78, 873–880.

Formulas de Conversão (2018). Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/formulas-de-conversao>>
Acesso em: Dez 2017

INATOMI, Thais Aya Hassan; UDAETA, Miguel Edgar Morales. ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA DENTRO DO PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS. 2015. 180 f. - Curso de Engenharia de Energia e Automação, USP, São Paulo, 2005.

Instituto da Cerveja (2016). Disponível em: <<https://www.institutodacerveja.com.br/blog/n113/novidades/cervejarias-artesanais-no-brasil>> Acesso em: 5 mai. 2017

KUNZE, Wolfgang; MANGER, Dr H J. **Technology Brewery and Malting**. 3. ed. Berlin: Vlb, 2004.

LEWIS, M. J.; YOUNG, T. W. **Brewing**. 2 ed. Aspen Publishers Inc, 2001.

LIMA, U.A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W. **Biotechnologia Industrial**. V.4, Biotechnologia na Produção de Alimentos. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2001.

M., Ruhul Amin; M., Saquib Hossain; M., Sarker. **Simulation of Ethanol Production by Fermentation of Molasses**. *Journal Of Engineering: JOE*. Bangladesh, p. 1-4. jan. 2013

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. BROCK. **Biologia de los Microorganismos**. 10 ed. Perarson Prentice Hall, 2004. 1096p.

Mantech. (2011). PeCOD aplicaion note # 1. Ontario: Mantech Inc. Disponível em <http://www.titrato.hu/WEBSET_DOWNLOADS/613/PeCOD-Wastewater%20Industry.pdf>
Acesso em mai 2017.

MAPA – **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Assessoria de gestão estratégica projeções do agronegócio, fevereiro de 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>> Acesso em: 14 outubro 2017.

MATHIAS, Thiago Rocha dos Santos. **Aproveitamento biotecnológico de resíduos industriais cervejeiros**. 2015. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia de Processos

Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MAUTHNER, Franz; HUBMANN, Matthäus; BRUNNER, Christoph. **Manufacture of malt and beer with low temperature solar process heat**. Energy Procedia, Gleisdorf, v. 48, n. 48, p.1188-1193, set. 2013.

MEGA, J. F., NEVES, E., Andrade C. J. de. **A produção da cerveja no Brasil**. Citino, Número 1, 2011.

Metcalf & Eddy. (1991). Wastewater engineering – Treatment, disposal, and reuse. Singapore: McGraw-Hill.

Mohan, S. V. (2008). **Fermentative hydrogen production with simultaneous wastewater treatment: influence of pretreatment and system operating conditions**. Journal of Scientific and Industrial Research, 67, 950–961.

Mondobirra (2012). Disponível em: < <http://www.mondobirra.org/articolo30bis.htm>> Acesso em: 20 mai. 2017.

Moran, Sean (2015). An Applied Guide to Process and Plant Design. Butterworth-Heinemann. p. 63. ISBN 9780128003824. Acessado: em 4 Dez 2017.

NASCIMENTO, Marcio Luis Ferreira. **Condutividade Elétrica de Vidros de Boratos, Silicatos, e Sílico-Sulfatos de Íons Alcalinos**. 2000. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. 5 ed: ARTMED, 2011. 1304p.

Nelson, Max (2005). The Barbarian's Beverage: A History of Beer in Ancient Europe. Routledge. p. 1. ISBN 0-415-31121-7.

O'ROURKE, T. **The function of enzymes in brewing**. The Brewer International, Technical Summary, v. 9, n. 2, p. 14-18, 2002.

OLAJIRE, Abass A. **The brewing industry and environmental challenges**. Journal Of Cleaner Production. Ogbomoso, p. 1-21. mar. 2012.

Pasteur, Louis (1857). "**Mémoire sur la fermentation appelée lactique**". Comptes Rendus Chimie (in French). 45: 913–916.).

Portal Cervisia (2013). Disponível em: <http://www.cervisiafilia.com.br/> Acesso em: 25 mai. 2017.

PRIEST, F. G.; STEWART, G. G. **Handbook of Brewing**. 2 ed. Florida: CRC Press and Taylor & Francis Group, 2006. 829p.

Raymond E. Kirk and Donald F. Othmer, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th Edition, Wiley-Interscience, 2001. ISBN 0471419613. Acesso em: 12 Jan 2018.

REINOLD, M. R. A pasteurização da cerveja. **Revista Indústria de Bebidas**, Ano 8, edição especial, 2009.

Relatório de inteligência de mercado Sebrae (Julho 2015). Disponível em: [<http://www.sebraeinteligenciasetorial.com.br/>](http://www.sebraeinteligenciasetorial.com.br/) Acesso em: 20 mai. 2017 .

Rudgley, Richard (1993). **The Alchemy of Culture: Intoxicants in Society**. London: British Museum Press; ISBN 978-0714117362.

Shao, E., Wei, J., Yo, A., & Levy, R. (2009). **Application of ultrafiltration and reverse osmosis for mine waste water reuse**. In Water in mining conference, Perth, 15 – 17 September Disponível em [<http://www.nirossoft.com/files/CollahausiChileMiningEffluents\(1\).pdf.>](http://www.nirossoft.com/files/CollahausiChileMiningEffluents(1).pdf) Acesso em: 15 mar. 2017.

Simate, G. S. (2012). **The treatment of brewery wastewater using carbon nanotubes synthesized from carbon dioxide carbon source**. PhD thesis. University of the Witwatersrand.

Simate, G. S. (2012). **The treatment of brewery wastewater using carbon nanotubes synthesized from carbon dioxide carbon source**. PhD thesis. University of the Witwatersrand.

Simate, G. S., Cluett, J., Iyuke, S. E., Musapatika, E. T., Ndlovu, S., Walubita, L. F., et al. (2011). **The treatment of brewery wastewater for reuse: state of the art**. Desalination, 273(2–3), 235–247.

SUZIGAN, Wilson. **Industrialização brasileira em perspectiva histórica**. História Econômica & História de Empresas, São Paulo, v. 2, n. 3, p.7-25, fev. 2002.

TORTORA, G. J.; CASE, C. L.; FUNKE, B. R. **Microbiologia**. 10 ed. ARTMED, 2011. 894p.

Unicer SA/Sustainability Report 2004, 2005. Matosinhos. Disponível em: <<http://www.unicer.pt>> Acesso em mai 2017.

VERSIANI, F. R.; VERSIANI, M. T. **A indústria brasileira antes de 1930: uma contribuição**. In: VERSIANI, F. R.; MENDONÇA DE BARROS, J. R. *Formação econômica do Brasil: período republicano*. São Paulo: Saraiva, 1977.

W.A. Hardwick (Ed.), **Fermentation Handbook of Brewing**, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.

YOUNG, Thomas W. **Beer**. 2015. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/beer>>. Acesso em: 5 mar. 2017.